

Masterarbeit

zum Erwerb
des akademischen Grades Diplomingenieur
der Studienrichtung Wirtschaftsingenieurwesen - Bauingenieurwissenschaften

von

Ing. Alexander Marx, BSc

eingereicht am
Institut für Bodenmechanik und Grundbau
der Technischen Universität Graz
Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Roman Marte

Thema der Masterarbeit

**Ungesättigte hydraulische Eigenschaften von Thermosand,
einem neuartigen Bettungsmaterial für Fernwärmeleitungen**

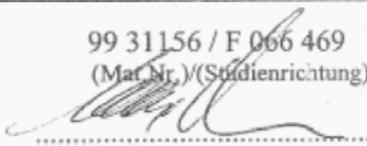
Betreuer:
Em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Stephan Semprich

2. Betreuer:
Univ.-Prof. Dr. Steffen Birk

mitbetreuender Assistent:
Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz

Graz, April 2014

MASTERARBEIT-AUSGABEPROTOKOLL
an der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften der TU Graz

KANDIDAT: Alexander MARX (Name)	99 31156 / F 066 469 (Mat.Nr.)/(Studienrichtung)  (Unterschrift)
<p>THEMA der Masterarbeit:</p> <p>Ungesättigte hydraulische Eigenschaften von Thermosand, einem neuartigen Bettungsmaterial für Fernwärmeleitungen</p> <p>ZIELSETZUNG (stichwortartig):</p> <ul style="list-style-type: none">- Literatursuche und -studium- Grundlagen der Bodenmechanik teilgesättigter Böden- Anwendungsbereiche- Stoffgesetze teilgesättigter Böden- Stationäre und instationäre Verfahren zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften teilgesättigter Böden (Saugplatten- und Sandbettverfahren, Verdunstungsmethode, etc.)- pF-Kurve und relative Durchlässigkeit von Thermosand für 2 unterschiedliche Trockendichten- Kostenermittlung für die Durchführung der Laborversuche zur Bestimmung einer pF-Kurve und der relativen Durchlässigkeit von Thermosand bei einer bestimmten Dichte- Schlussfolgerungen und Ausblick	
FACHGEBIET: Bodenmechanik und Grundbau ggf. 2. FACHGEBIET:	
BETREUER: O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Stephan Semprich (Name) (Unterschrift) ggf. 2. BETREUER: Univ.-Prof. Dr. Steffen Birk (Name) (Unterschrift) mitbetreuender Assistent: Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz (Name) (Unterschrift)	
AUSGABEDATUM: 17.5.2020	
SPÄTESTER ABGABETERMIN: 24.9.2010	

Beurteilung:

Beurteilung erfolgt durch die Betreuer
--

.....
Koller e.l.
Datum und Unterschrift des Studiendekans

EIDESSTÄTTLICHE 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 wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Danksagung

In erster Linie bedanke ich mich bei meinen Eltern, Herbert und Rosalinde Marx, die mir dieses Studium ermöglichten und mir vor allem durch ihre jahrelange Geduld sowie finanzielle Unterstützung ein sorgenfreies Leben ermöglichten.

Auch möchte ich mich bei Em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Stephan Semprich bedanken, dass er mir die Möglichkeit gab, am Institut für Bodenmechanik und Grundbau an der TU Graz diese Masterarbeit zu schreiben.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Univ.-Prof. Dr. Steffen Birk und Dr. Gerfried Winkler, dass sie mir die Möglichkeit boten, die für diese Masterarbeit erforderlichen Laboruntersuchungen, im Labor des Institutes für Erdwissenschaften Bereich Geologie und Paläontologie der Karl-Franzens-Universität durchzuführen.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Hr. Oberrat Dipl.-Ing. Otto Henögl und bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christian Hofstadler für ihre große Unterstützung und fachliche Beratung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Des weiteren bedanke ich mich bei Fr. Mag. Elvira Eberhard und Hr. Dominik Lebschy für die Unterstützung bei den Laborversuchen und Auswertung.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Freunden, die mich während meines langen Studiums begleitet haben.

Abschließend möchte ich mich noch bei den Mitgliedern des Verkehrswesenzeichensaales der TU Graz für viele unterstützende und beratende Gespräche bedanken.

Graz, im April 2014

Kurzfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Ermittlung der hydraulischen Eigenschaft des teilgesättigten Thermosandes unter Verwendung von zwei Labormethoden und anschließender Kostenermittlung für die Versuchsdurchführungen.

In den ersten beiden Kapiteln werden allgemeine bodenphysikalische Grundlagen beschrieben. Des Weiteren wird auf die Eigenschaften des Wassers im Boden sowie die Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und in weiterer Folge die relative Durchlässigkeits-Sättigungsbeziehung eingegangen.

In Kapitel 3 wird auf die Frage, warum braucht man Kenntnisse über teilgesättigte Böden, eingegangen und wo findet dieses Wissen im Bauingenieurwesen Anwendung.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit den Stoffgesetzen der teilgesättigten Böden. Um eine möglichst realitätsnahe Retentions- und Durchlässigkeitscharakteristik wiedergeben zu können, werden hier die drei am häufigsten verwendeten Porenraummodelle, die die Zusammenhänge zwischen Porenraum und Durchlässigkeit beschreiben, erläutert.

Im fünften Abschnitt dieser Arbeit werden die Grundlagen der stationären und instationären Versuchsmethoden sowie drei unterschiedliche Labortests beschrieben. Ebenfalls wird hier auf die Messung der Kapillarspannungen eingegangen.

Die Ermittlung der Saugspannungskurven und der relativen Durchlässigkeit für Thermosand erfolgt in Kapitel 6 mit anschließender Darstellung der Messergebnisse in Diagrammen. Ebenfalls werden hier Probandaten, Herstellung der Proben und Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche des Thermosandes beschrieben.

In Kapitel 7 wird eine Diskussion und Interpretation der Messergebnisse durchgeführt.

Im achten Kapitel wird eine Kostenberechnung unter Einhaltung der ÖN B 2061 sowie die Darstellung aller Kalkulationsgrundlagen zur Durchführung der Laborversuche durchgeführt.

Im letzten Abschnitt, Kapitel 9, befindet sich eine kurze Zusammenfassung und Schlussfolgerung der vorliegenden Masterarbeit mit Ausblick in die Zukunft.

Abstract

Unsaturated hydraulic properties of thermal sand, an innovative bedding material for district heating networks

This masterthesis is concerned with the determination of the hydraulic properties of the partially saturated thermal sand using two laboratory methods and subsequent cost determination for the experimental procedures.

In the first two chapters general soil physical principles are described. Furthermore, the properties of water in soil, the permeability and consequently the relative permeability - saturation relationship are addressed.

Chapter 3 is received on the question why do you need knowledge of unsaturated - preferential soils and where will be applied this knowledge in civil engineering.

Chapter 4 deals with the constitutive law of unsaturated soils.

In order to play as realistic as possible retention and permeability characteristics, the three pore space models, most commonly used describes the relationship between pore space and permeability, are presented.

In the fifth part of this work the basics of stationary and non-stationary test methods as well as three different laboratory tests are layed out. Also the measurement of the capillary pressure will be discussed.

The determination of the soil moisture tension curves and the relative permeability for thermal sand occurs in chapter 6, followed by presentation of the measurement results in the form of charts. Also the sample data, the preparation of the samples and the permeability results of the thermal sand are described.

In chapter 7, there is a discussion and interpretation of the measurement results.

In the eighth chapter a cost calculation in compliance with the ÖN B 2061 and the presentation of all calculation bases, carried out for the implementation of laboratory experiments, are shown.

In the last section, chapter 9 is a summary and conclusion of this masterthesis with a short view into the future.

1	Einleitung	1
2	Bodenphysikalische Grundlagen	2
2.1	Allgemein	2
2.2	Wasser im Boden	3
2.2.1	Gravimetrischer Wassergehalt	4
2.2.2	Volumetrischer Wassergehalt	4
2.2.3	Zusammenhang zwischen volumetrischen und gravimetrischen Wassergehalt	4
2.2.4	Porenraum	5
2.2.5	Wassersättigungsgrad	6
2.2.6	Fluideigenschaften	7
2.2.7	Gesetz von Darcy	9
2.3	Kapillarspannung	10
2.3.1	Definitionen	10
2.3.2	Kapillarer Aufstieg	12
2.3.3	Wasser im Untergrund	15
2.3.4	Durchlässigkeit	16
2.3.5	Relative Durchlässigkeit	17
2.3.6	Kapillarspannungs – Sättigungsbeziehung	19
2.4	Relative Durchlässigkeits- Sättigungsbeziehung	20
3	Anwendungsbereiche	21
4	Stoffgesetze teilgesättigter Böden	23
4.1	Das Brooks und Corey Modell	23
4.2	Das „van Genuchten/Mualem Modell“	24
4.3	Das „bimodale van Genuchten/Mualem Modell“	28
5	Grundlagen der Versuchsmethoden	30
5.1	Angewandte Methoden	30
5.1.1	Allgemeines	30
5.1.2	Begriffe	30
5.2	Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit	30
5.2.1	Stationäre Methoden zur Bestimmung der pF-Charakteristik	30
5.2.2	Instationäre Methoden zur Bestimmung der pF-Charakteristik	34
5.3	Messtechnik	36
5.3.1	Messung der Kapillarspannung mittels Tensiometer	36

5.3.2	Waage	37
5.3.3	Software	37
6	Laboruntersuchungen	39
6.1	Allgemein	39
6.2	Probendaten	39
6.3	Herstellung der Proben	40
6.4	Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter	43
6.4.1	Messergebnisse	51
6.5	Saugspannungsbestimmung mittels Verdunstungs- methode	52
6.5.1	Messergebnisse	59
6.6	Saugspannungsbestimmung mittels Sandkasten	61
6.6.1	Das Prinzip der hängenden Wassersäule	65
6.6.2	Messergebnisse	66
7	Diskussion und Interpretation der Ergebnisse	70
7.1	Auswertung des Hyprop-Versuchs	73
7.2	Auswertung des Sandkasten-Versuchs	75
8	Kostenermittlung für die Durchführung der Laborversuche zur Bestimmung einer pF-Kurve und der relativen Durchlässigkeit von Thermosand bei einer bestimmten Lagerungsdichte	77
8.1	Kalkulation nach ÖNORM B 2061	77
8.1.1	Die Österreichische Baugeräteliste	79
8.1.2	Geräteleistung und Gerätekosten	80
8.1.3	Kalkulationsgrundlagen für die Berechnung der Versuchskosten	80
8.2	Kostenermittlung für Permeameterversuch	82
8.3	Kostenermittlung für Hypropversuch	82
8.4	Kostenermittlung für Sandkastenversuch	83
8.5	Gesamtkostenermittlung für Hypropversuch	83
8.6	Gesamtkostenermittlung für Sandkastenversuch	85
8.7	Zusammenfassung Kostenermittlung	86
9	Schlussfolgerung und Ausblick	87
10	Literaturverzeichnis	89
	Anlagen	94

Anlage 1: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 12	94
Anlage 2: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 13	96
Anlage 3: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 14	98
Anlage 4: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 15	100
Anlage 5: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 16	102
Anlage 6: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 17	104
Anlage 7: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 18	106
Anlage 8: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 19	108
Anlage 9: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 20	110
Anlage 10: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 19	112
Anlage 11: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 20	114
Anlage 12: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 22	116
Anlage 13: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 23	118
Anlage 14: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 24	120
Anlage 15: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 25	122
Anlage 16: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 26	124
Anlage 17: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 28	126
Anlage 18: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 29	128
Anlage 19: Wiegelisten Sandkasten-Versuch $pF = 0$	130
Anlage 20: Wiegelisten Sandkasten-Versuch $pF = 0,4$	131
Anlage 21: Wiegelisten Sandkasten-Versuch $pF = 1,0$	133
Anlage 22: Wiegelisten Sandkasten-Versuch $pF = 1,5$	135
Anlage 23: Wiegelisten Sandkasten-Versuch $pF = 1,8$	136
Anlage 24: Wiegelisten Sandkasten-Versuch $pF = 2,0$	137
Anlage 25: Wiegelisten Sandkasten-Versuch intakte Stechzylinder	138
Anlage 26: Berechnung volumetrischer Wassergehalt – Sandkasten-Versuch	139
Anlage 27: Formblatt K6E – Permeameter	149
Anlage 28: Formblatt K6E – Hyprop 50% Auslastung	150
Anlage 29: Formblatt K6E – Hyprop 33% Auslastung	151
Anlage 30: Formblatt K6E – Hyprop 20% Auslastung	152
Anlage 31: Formblatt K6E – Sandkasten 50% Auslastung	153
Anlage 32: Formblatt K6E – Sandkasten 33% Auslastung	154

Anlage 33: Formblatt K6E – Sandkasten 20% Auslastung	155
Anlage 34: Formblatt K7 – Permeameter 50% Auslastung	156
Anlage 35: Formblatt K7 – Hyprop 50% Auslastung	157
Anlage 36: Formblatt K7 – Hyprop 33% Auslastung	158
Anlage 37: Formblatt K7 – Hyprop 20% Auslastung	159
Anlage 38: Formblatt K7 – Sandkasten 50% Auslastung	160
Anlage 39: Formblatt K7 – Sandkasten 33% Auslastung	161
Anlage 40: Formblatt K7 – Sandkasten 20% Auslastung	162
Abbildungsverzeichnis	163
Tabellenverzeichnis	166

1 Einleitung

Durch den steigenden Anstieg der Luftverschmutzung, gewinnt die Nutzung der Fernwärme immer mehr an Bedeutung. Da die Wärmeerzeugung meist nicht zentral in den Städten erfolgt, entstehen beim Wärmetransport hohe Verluste. Um diese Verluste möglichst gering zu halten, kann man einerseits den Dämmquerschnitt der Transportleitungen erhöhen, andererseits kann man den Raum um das Rohr „dämmen“, ähnlich wie bei einer Gebäudefassade. Zu diesem speziellen Thema hat es bereits eine Masterarbeit (Steirer 2010) gegeben. Für die Dämmung des Raumes um die Fernwärmeleitung herum wurde der sogenannte Thermosand aus Fohnsdorf (auch Fohnsdorfer Halditt) untersucht.

Thermosand hat, wie der Name schon vermuten lässt, wärmedämmende Eigenschaften. Hierbei handelt es sich um ein rötliches Material, welcher hochgebranntem Ton nahe kommt. Die wärmedämmende Eigenschaft erhält Thermosand durch den hohen Porenanteil, welcher durchschnittlich zu ca. 35% mit Luft gefüllt ist.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erforschung der hydraulischen Eigenschaften des Thermosandes. Hierfür werden die Stoffgesetze der teilgesättigten Böden zur Anwendung kommen, wobei auf die drei wichtigsten genauer eingegangen wird. Um die Bestimmung der relativen Durchlässigkeit und Saugspannungskurven durchzuführen, werden zwei stationäre und ein instationäres Laborverfahren beschrieben. Für die Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften, wurde eine Messkampagne mit zwei unterschiedlichen Laborverfahren durchgeführt. Deren Ergebnisse sind die Wassergehalt-Saugspannungskurve, die Leitfähigkeit-Saugspannungskurve und die relative Durchlässigkeitskurve. Zur Bestimmung der relativen Durchlässigkeitskurve wird vorab auch die Durchlässigkeit bei Vollsättigung bestimmt.

Des Weiteren wurde in dieser Arbeit auch eine Kostenermittlung der durchgeführten Laboruntersuchungen ermittelt, mit dem Ziel einen aussagekräftigen Preis für die Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften zu berechnen.

2 Bodenphysikalische Grundlagen

2.1 Allgemein

Boden (Lockergestein) entsteht durch physikalische, chemische und in geringem Maße auch durch biologische Verwitterung von Fels (Festgestein), durch Verfrachtung und anschließender Sedimentation.

Die vorhandenen Hohlräume der Fest- und Lockergesteine können mit Luft, Luft und Wasser bzw. mit Wasser alleine gefüllt sein. Daraus ergibt sich, dass Böden als Dreiphasengemisch betrachtet werden müssen.

In

Abbildung 2.1 ist der Boden als Dreiphasensystem dargestellt, sowie eine Aufteilung nach Volumen, Masse und zwei wichtige Bodenkenngrößen (Porenanteil n und Porenzahl e).

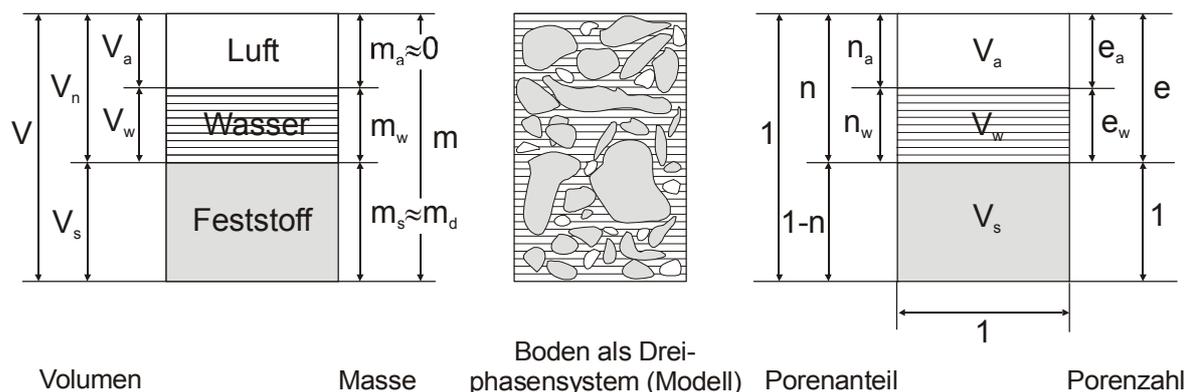


Abbildung 2.1: Boden als Dreiphasengemisch (Henögl, 2000)

Der Boden ist kein homogenes Material. Die feste Phase bilden Minerale, welche durch Größe, Form, mineralische Zusammensetzung und Art der Lagerung die bodenmechanischen Eigenschaften beeinflussen. Die einzelnen Körner der Kiese und Sande ($> 0,063$ mm) sind mit dem freien Auge gut zu erkennen. Da das Korngefüge verschiedene Lagerungsarten besitzt, wird dies beispielhaft in Abbildung 2.2 dargestellt. Auf der linken Seite erkennt man die lockerste Lagerungsform, wohingegen auf der rechten Seite die dichteste Lagerung dargestellt wird.

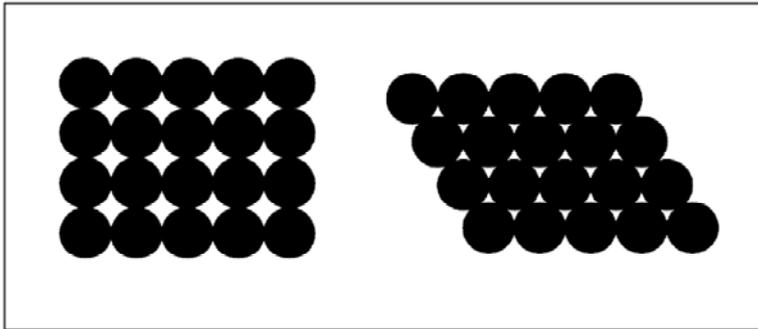


Abbildung 2.2: Lagerungsarten der Körner (Kolymbas, 2007)

Dagegen sind die Teile von feinkörnigen Böden ($< 0,063$ mm) mit bloßem Auge nicht zu erkennen. Sie entstehen vorwiegend durch Verwitterung und haben meist eine plättchen- oder stabförmige Gestalt. In Abbildung 2.3 ist links ein Parallelgefüge und rechts ein Flockengefüge erkennbar. Dies ist typisch für tonige Böden.

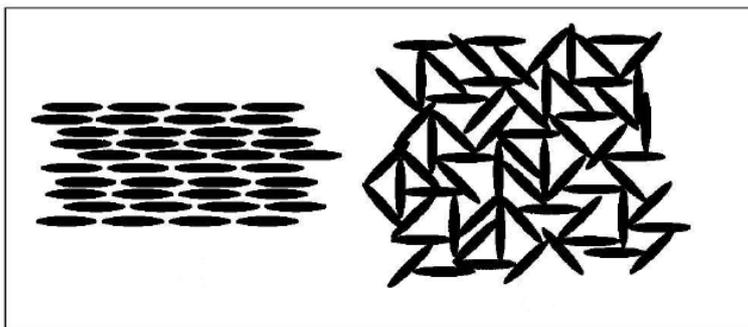


Abbildung 2.3: Lagerungsarten der Plättchen (Kolymbas, 2007)

Das im Boden vorhandene Wasser vermag sich in den Poren zu bewegen, engere und lockere Bindungen mit den festen Bodenteilchen einzugehen, und durch sein Verhalten beim Übergang zu Eis Veränderungen hervorzurufen (Schmidt, 1996).

2.2 Wasser im Boden

Eine Trennung von Boden und Wasser kommt in der Natur kaum vor, da auch in anscheinend vollkommen trockenen Böden die einzelnen Bodenkörner noch von einem fest anhaftenden Wasserfilm bzw. von Zwickelwasser umhüllt sind.

Zur Bestimmung des Wassergehaltes von Böden gibt es mehrere Methoden. Um den Wassergehalt von Böden zu ermitteln wird zwischen direkten und indirekten Verfahren unterschieden.

Unter direkten Verfahren werden jene bezeichnet, bei denen das Wasser aus der Probe durch Verdunstung, Extraktion oder chemischen Reaktionen entfernt und anschließend der Gewichtsverlust gemessen wird.

Als indirekte Verfahren werden jene bezeichnet, bei denen physikalische und chemische Eigenschaften des Bodens aufgezeichnet werden, die mit der Feuchte in Zusammenhang stehen. Aus diesen kann dann über eine Kalibrierfunktion der Wassergehalt bestimmt werden (Stacheder, 1996).

2.2.1 Gravimetrischer Wassergehalt

Der gravimetrische Wassergehalt wird wie folgt berechnet:

$$w = \frac{m_w}{m_d} \quad (1)$$

w Gravimetrischer Wassergehalt [%]

m_w Masse des Wassers [g]

m_d Trockenmasse des Bodens [g]

2.2.2 Volumetrischer Wassergehalt

Der volumetrische Wassergehalt wird wie folgt berechnet:

$$\Theta = \frac{V_w}{V} \quad (2)$$

Θ Volumetrischer Wassergehalt [%]

V_w Volumen des Wassers [cm³]

V Gesamtvolumen [cm³]

In der Berechnung des volumetrischen Wassergehalts Θ nach Gleichung 2 fließt das Gesamtvolumen des betrachteten Probekörpers mit ein, nicht jedoch der zur Verfügung stehende Porenraum.

2.2.3 Zusammenhang zwischen volumetrischen und gravimetrischen Wassergehalt

Die Abhängigkeit zwischen dem volumetrischen und gravimetrischen Wassergehalt kann wie folgt hergeleitet werden:

$$w = \frac{m_w}{m_d} \quad (3)$$

$$m_w = \rho_w \cdot V_w \quad (4)$$

$$m_d = \rho_d \cdot V \quad (5)$$

V_w Volumen des Wassers [cm³]

V Gesamtvolumen [cm³]

ρ_w Dichte des Wassers [g/cm³]

ρ_d Trockendichte [g/cm³]

$$w = \frac{\rho_w \cdot V_w}{\rho_d \cdot V} \quad (6)$$

$$w_V = \frac{V_w}{V}; \quad w_V = \frac{\rho_w}{\rho_d} \quad (7)$$

$$w = \frac{\Theta \cdot \rho_w}{\rho_d} \text{ oder } \Theta = \frac{w \cdot \rho_d}{\rho_w} \quad (8)$$

2.2.4 Porenraum

Der Porenraum wird mittels der Parameter Porenanteil n und Porenzahl e beschrieben (siehe Abbildung 2.1).

$$n = \frac{V_n}{V} = \frac{V - V_s}{V} = \left(1 - \frac{m_d}{V \cdot \rho_s}\right) = \frac{e}{1 - e} \quad (9)$$

$$e = \frac{V_n}{V_s} = \frac{n}{1 - n} \quad (10)$$

n Porenanteil [%]

V_n Volumen der Poren [cm³]

V_s Volumen des Feststoffes [cm³]

ρ_s Korndichte [g/cm³]

e Porenzahl [-]

	Porenanteil n [%]
nicht bindiger Boden	20 – 40
bindiger Boden	30 - 50

Tabelle 2.1: Richtwerte für den Porenanteil (Semprich, 2007)

In

Tabelle 2.1 sind allgemeine Richtwerte der Porenanteile für bindige und nicht bindige Böden angegeben. Diese Werte dienen nur zur groben Abschätzung. Der tatsächliche Porenanteil wird im Labor mittels Ofentrocknung bei 105 °C bestimmt.

2.2.5 Wassersättigungsgrad

Der Wassersättigungsgrad $S_{r,w}$ gibt den Anteil der mit Wasser gefüllten Poren gegenüber dem Gesamtporenraum n an. Dieser liegt in einem Bereich von 0 bis 100 %.

$$S_{r,w} = \frac{V_w}{V_n} = \frac{\theta}{n} \quad \text{mit (2) und (3)} \quad S_{r,w} = \frac{\theta \cdot V}{n \cdot V} = \frac{\theta}{n} \quad (11)$$

$S_{r,w}$ Wassersättigungsgrad [%]

n Porenanteil [%]

V_n Volumen der Poren [cm³]

Da aber ein Probekörper selten vollkommen bzw. meist nur teilweise mit Wasser gesättigt ist, kann die Sättigung des Porenraumes in Sättigung mit Luft und Wasser unterschieden werden.

$$S_L + S_w = 100\% \quad (12)$$

wobei

S_L Sättigung des Porenraumes mit Luft [%]

S_w Sättigung des Porenraumes mit Wasser [%]

Mithilfe der Sättigungszahlen wird der Anteil des Porenraums angegeben, der mit dem jeweiligen Fluid (Wasser oder Gas) gefüllt ist.

$$S_L = \frac{V_L}{V_n} \quad (13)$$

$$S_w = \frac{V_w}{V_n} \quad (14)$$

V_L Volumen des Gases im Porenraum [cm³]

V_w Volumen des Wassers im Porenraum [cm³]

2.2.6 Fluideigenschaften

Die Durchströmung von Luft und Wasser – im Folgenden auch als Fluide bezeichnet - in teilweise gesättigten Böden stellt einen sehr komplexen Vorgang dar. Um die Strömung der Fluide im Untergrund zu beschreiben, müssen zunächst einige Vereinfachungen getroffen werden. Wasser wird als inkompressibel und Luft als ideales Gas angenommen. Daraus ergibt sich die allgemeine Zustandsgleichung für Gase (Hochgürtel, 1998):

$$p_g * V_g = m_g * R * T \quad (15)$$

p_g Gasdruck [N/m²]

V_g Volumen des Gases [m³]

m_g Masse des Gases [kg]

R spezifische Gaskonstante (Luft: 287 m²/(s²K)) [m²/(s²K)]

T Temperatur [K]

Des Weiteren können beide Fluide für ihre Klassifizierung in benetzende und nicht benetzende Fluide unterschieden werden. Wasser ist eine benetzende Flüssigkeit. Um festzustellen ob eine Flüssigkeit benetzend ist, wird der Randwinkel zur Hilfe herangezogen. Bei einem Winkel kleiner als 90°, wird die Flüssigkeit als benetzend eingestuft (siehe linke Grafik Abbildung 2.4). Der Winkel stellt sich so ein, dass an jedem Element der Fluidgrenzfläche ein Kräftegleichgewicht zwischen den Fluiden und dem Bodenkorn entsteht. Sind die äußeren Drücke der Fluide nicht im Gleichgewicht, entsteht eine Krümmung an der Grenzfläche. Diese Krümmung wird durch die Druckdifferenz an der Grenzfläche zwischen den beiden Fluiden hervorgerufen und in weiterer Folge durch die Grenzflächenspannung aufgenommen (Taylor, 1948). Die Form der Grenzfläche ist bestrebt, den Zustand der minimalen potentiellen Energie zu erreichen (Hochgürtel, 1998).

Der Begriff Grenzflächenspannung beschreibt jenen Zustand, zwischen den Molekülen eines homogenen Fluids wirkender Kräfte, welche als Anziehungskräfte definiert sind. Bei einem Molekül, das sich an der Grenzfläche zweier nichtmischbarer Fluide befindet, sind die vorhandenen Anziehungskräfte (Kohäsionskräfte) der Moleküle der eigenen Fluidphase viel größer als die des anderen Fluids Grenzfläche (siehe Abbildung 2.5). Dieses Ungleichgewicht der Kräfte verursacht die Krümmung der Grenzfläche (Sheta, 1999).

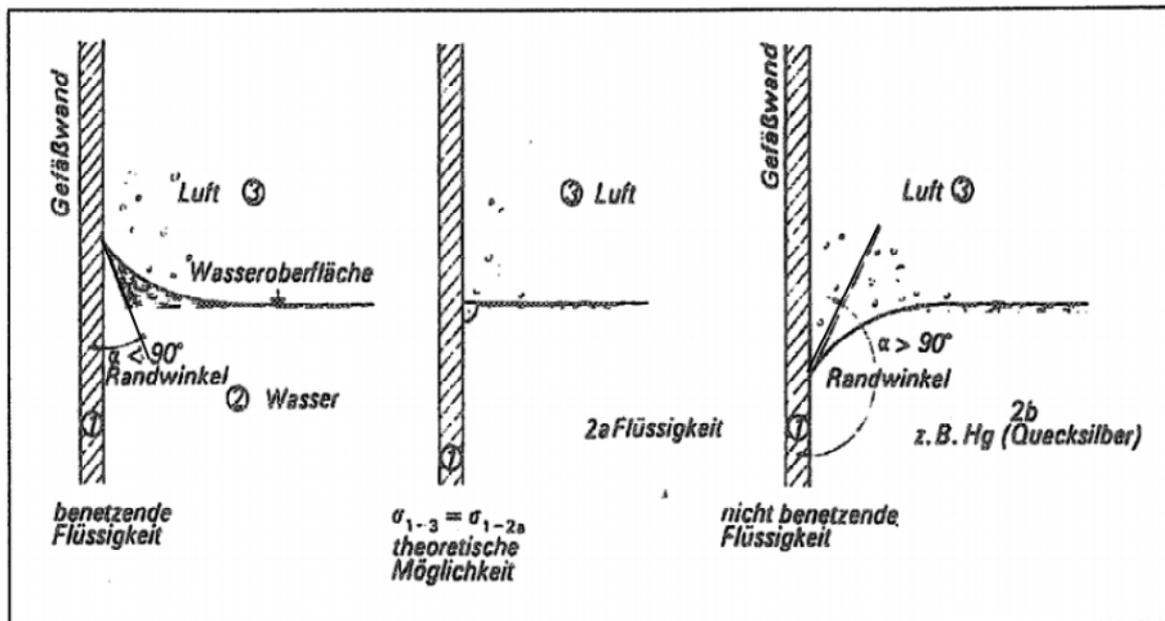


Abbildung 2.4: Benetzungswinkel α verschiedener Flüssigkeiten (Zeller, Franke, 1966)

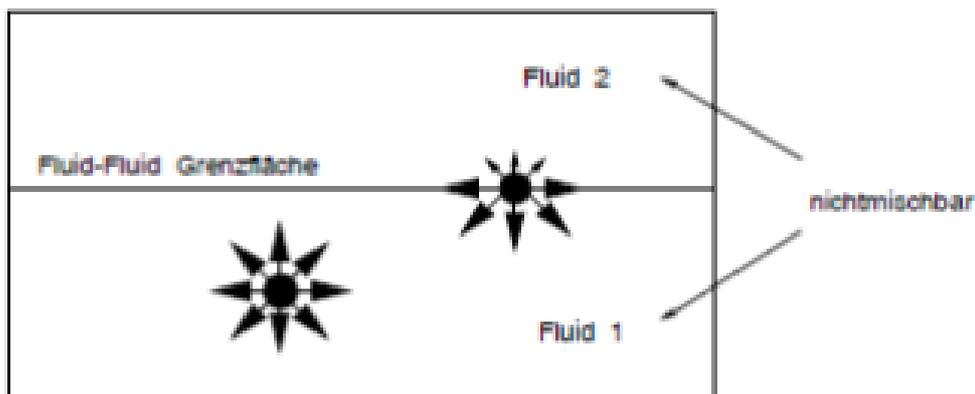


Abbildung 2.5: Kohäsionskräfte auf Moleküle in der Fluidphase sowie an der Grenzfläche zweier nicht mischbarer Fluide (Hillel 1980)

Als eine weitere Vereinfachung wird die Gültigkeit des Gesetzes von Darcy für die Strömung von Luft und Wasser zugrunde gelegt. Dies bedeutet, dass laminares Strömen vorliegen muss.

Eine Hauptbedingung für das Gesetz von Darcy ist auch, dass das Porengerüst starr ist und die einzelnen Bodenteilchen nicht am Strömungsvorgang teilnehmen (Scheid, 2003).

2.2.7 Gesetz von Darcy

Nach Darcy ist die Geschwindigkeit v proportional zur Energiehöhe Δh , die auf die Länge Δl abgebaut wird. $\Delta h/\Delta l$ wird auch als hydraulischer Gradient i (Gefälle) bezeichnet (siehe Abbildung 2.6).

$$v = k \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad \text{oder} \quad v = k \cdot i \quad (16)$$

wobei

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

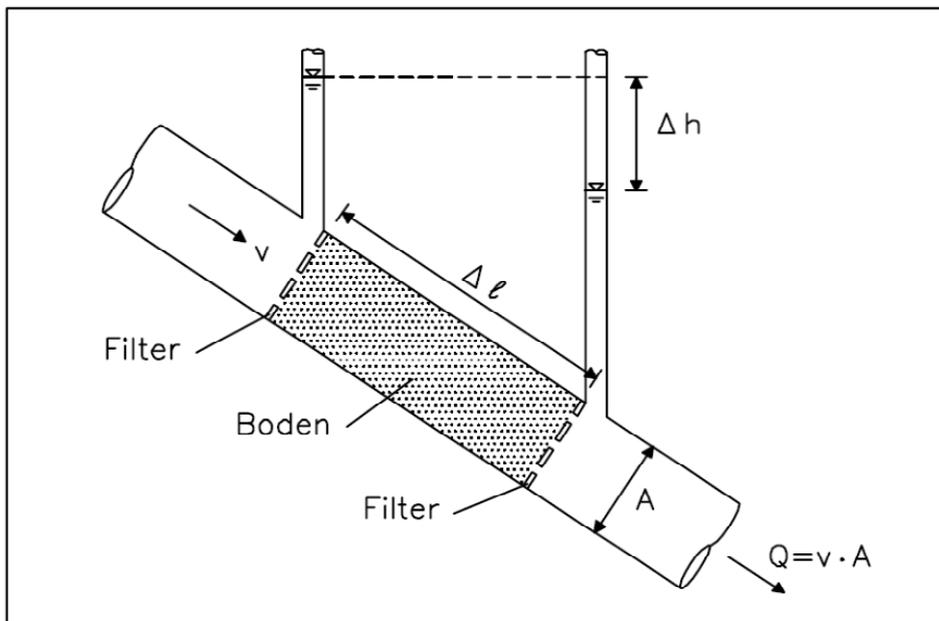


Abbildung 2.6: Prinzipskizze zum Gesetz von Darcy (Kolymbas, 2007)

Das Gesetz von Darcy besitzt nur Gültigkeit bei folgenden Voraussetzungen:

- der Boden ist isotrop
- die Strömung muss laminar sein
- die Bodenkörner müssen im Stillstand sein

Der Zustand einer Strömung (laminar/turbulent siehe Abbildung 2.7) wird mit Hilfe der Reynoldszahl (Re) definiert:

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (17)$$

wobei

L wirksame Länge des Porensystems [m]

ν kinematische Zähigkeit der Flüssigkeit (Wasser bei 20°C: $\nu = 1,0 \cdot 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$)

v Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

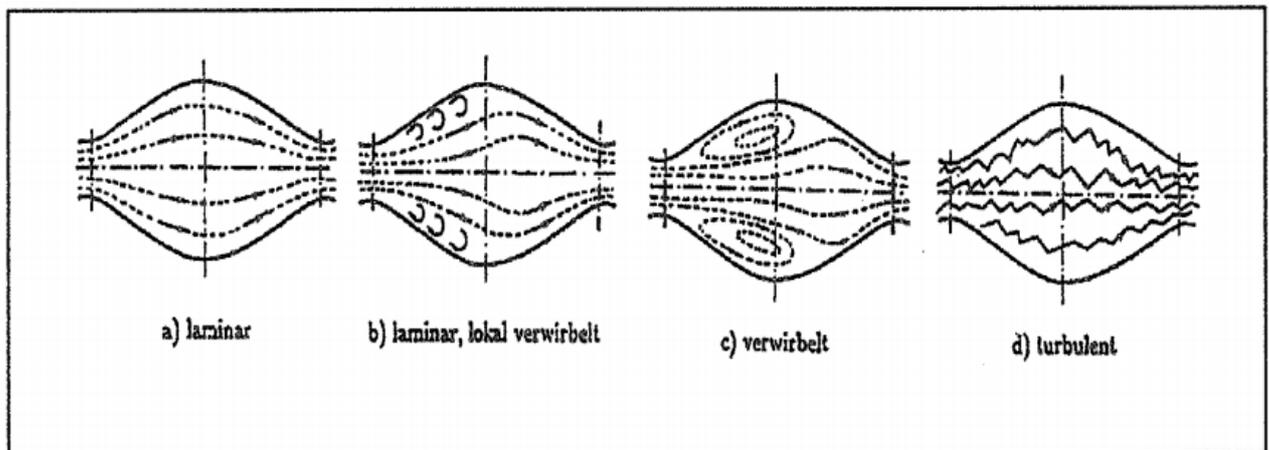


Abbildung 2.7: Strömungsarten (Pregl, 1983)

Für den Fall, dass sich die Bodenkörner bewegen, muss im Darcy'schen Gesetz die Relativgeschwindigkeit zwischen Körnern und Wasser stehen (Gesetz von Darcy – Gersevanov) (Kolymbas, 2007).

2.3 Kapillarspannung

2.3.1 Definitionen

Eine Besonderheit der Bodenmechanik in teilgesättigten Böden, ist das Vorhandensein von Kapillarspannungen. Die Kapillarspannung Ψ ist ein Ergebnis der Grenzflächenspannung (siehe Kap. 2.2.6). Unter der Bedingung, dass beide Fluide im Porenraum anwesend sind, stellt die Kapillarspannung das Gleichgewicht zwischen Luftdruck und Wasserdruck dar (Terzaghi, 1943).

$$\Psi = u_a - u_w \quad (18)$$

Ψ Kapillarspannung (auch Saugspannung/Matrixpotential) [kN/m^2]

- u_a Porenluftdruck [kN/m²]
- u_w Porenwasserdruck [kN/m²]

Um die Kapillarspannung simpel zu veranschaulichen, können die Poren des Bodens als Bündel paralleler zylindrischer Rohre mit geringem, kreisförmigem Querschnitt verstanden werden. Das benetzende Fluid (Wasser) steigt entgegen der Schwerkraft nach oben in den Kapillaren, bis sich die Druckdifferenz zwischen der Umgebungsluft und der sich ausbildenden Flüssigkeitssäule ausgeglichen hat. (Terzaghi, 1943).

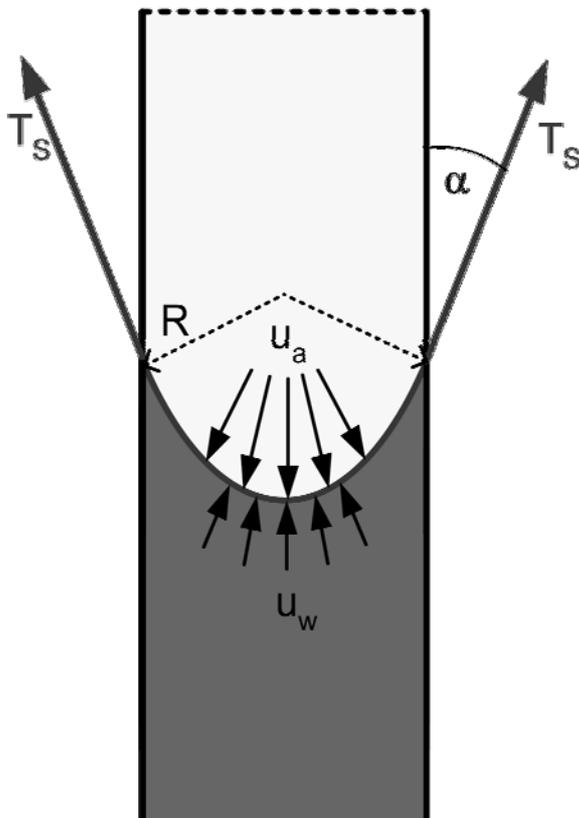


Abbildung 2.8: Gleichgewichtszustand eines Grenzflächenelements (Leibnitz, 2010)

Im Inneren von Wasser ist jedes Molekül von anderen Wassermolekülen vollständig umgeben und daher auch im Gleichgewicht. An der Grenzfläche (Oberfläche) von Wasser zu Luft gibt es keine Nachbarmoleküle und dadurch ergibt sich kein Gleichgewicht (siehe Abbildung 2.8). Aus diesem Ungleichgewicht resultiert eine tangential zur Grenzfläche wirkende Oberflächenspannung. Bei Vorhandensein von einer dritten Phase kommt es zu einer an der Grenzfläche wirkenden Kraft, der sogenannten Adhäsionskraft.

Die Größe der Kapillarspannung Ψ im Boden und damit die Größe des Krümmungsradius des Meniskus sind abhängig von (Schubert, 1982):

- Abstand der Teilchen zueinander
- Oberfläche des Feststoffs
- phasenspezifische Benetzungswinkel
- Porenanteil n
- Porengrößenverteilung
- Teilchenform
- Teilchengröße
- Wassersättigungsgrad $S_{r,w}$

Wird der Druckunterschied zwischen dem Porenwasserdruck und dem Porenluftdruck auf null reduziert, geht der Radius der Krümmung R_S gegen unendlich, wodurch sich eine ebene Grenzfläche einstellt. Dies wird in der Kapillaritätsgleichung von Kelvin dargestellt (Adam, 2005) (siehe Abbildung 2.9).

$$\Psi = u_a - u_w = \frac{2T_S}{R_S} \quad (19)$$

T_S Oberflächenspannung [kN/m²]

R_S Radius der Krümmung [m]

2.3.2 Kapillarer Aufstieg

Um die kapillare Steighöhe h_c nach Fredlund & Rahardjo (1993) zu ermitteln, wird die vertikale Komponente der Oberflächenspannung T_S der Schwerkraft der Wassersäule gleichgesetzt:

$$2r * \pi * T_S * \cos \alpha = \pi * r^2 * h_c * \rho_W * g \quad (20)$$

r Radius der Kapillare [m]

α Winkel der gekrümmten Oberfläche zur Vertikalen [°]

h_c Kapillare Steighöhe [m]

g Erdbeschleunigung [m/s²]

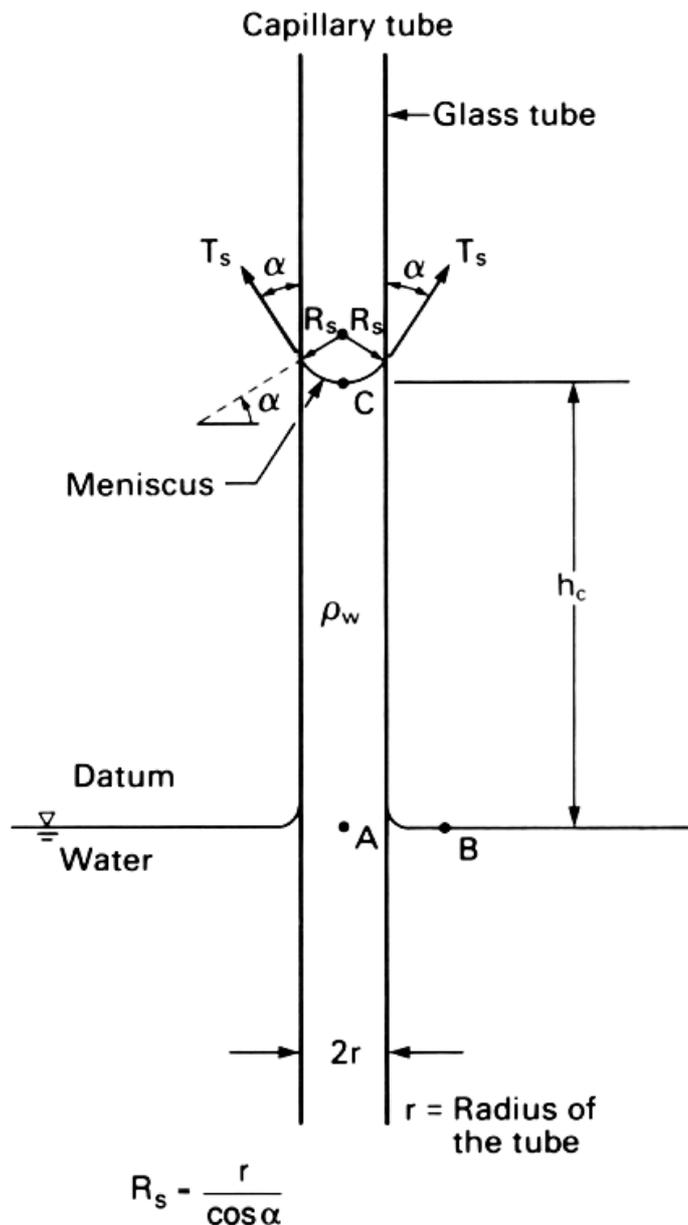


Abbildung 2.9: Modell der kapillaren Steighöhe (Fredlund & Rahardjo, 1993)

Aus Gleichung 20 ergibt sich bei reinem Wasser und einer sauberen Glaskapillarröhre mit $\alpha = 0^\circ$ die kapillare Steighöhe h_c zu:

$$\text{—————} \tag{21}$$

Die kapillare Aufstiegshöhe kann durch das Entwässern dieser Kapillare festgestellt werden, da dem dazu notwendigen Druck auch der entsprechende Porendurchmesser zugeordnet werden kann. Hierbei entspricht der Wasserverlust zwischen zwei Drücken dem Volumen eines bestimmten Porenbereichs. Dieser Druck

kann auch als pF-Wert (= \log cm Wassersäule [hPa]) dargestellt werden (Adam, 2005).

Die kapillare Steighöhe h_c ist abhängig von:

- Korngröße
- Art der Minerale
- Orientierung der Mineralkörner
- Form der Minerale
- Lagerungsdichte

Da Böden aus Körnern unterschiedlicher Größen in verschiedenen Mischungsverhältnissen bestehen, können Poren in sehr unterschiedlichen Größen vorkommen. Grundsätzlich werden Poren nach ihrem Äquivalentdurchmesser eingeteilt. Die nachfolgende Tabelle 2.2 unterscheidet die Poren nicht nach den üblichen Unterteilungen wie z. B.: kapillare und nicht kapillare Poren, sowie Makro- und Mikroporen, sondern beruhen darauf, dass sie charakteristischen Kennwerten des Wasserhaushaltes entsprechen. So entsprechen die Grenzwerte zwischen 10 μm und 50 μm den zur Charakterisierung der Feldkapazität (FK) $pF = 1,8 - 2,5$ [hPa] und der Grenzwert von 0,2 μm dem permanenten Welkepunkt (PWP) $pF = 4,2$ [hPa] (Scheffer & Schachtschabel, 2010).

Porengröße	Porendurchmesser [μm]	Wassersäule [cm]	pF [hPa]
weite Grobporen	> 50	1 - 60	0 – 1,8
enge Grobporen	50 - 10	60 - 300	1,8 – 2,5
Mittelporen	10 – 0,2	300 - 15000	2,5 – 4,2
Feinporen	< 0,2	> 15000	> 4,2

Tabelle 2.2: Einteilung der Porengrößenbereiche nach dem Porendurchmesser und der Wasserspannung (Scheffer & Schachtschabel, 2010)

Als Feldkapazität wird jene Menge Wasser beschrieben, die ein gesättigter Boden durch Kapillarspannung halten kann. Die Feldkapazität hat eine große Bedeutung bei der Wasserversorgung von Pflanzen und ist somit direkt abhängig vom Porendurchmesser.

Der permanente Welkepunkt bezeichnet jenen Austrocknungsgrad eines Bodens, bei dem Pflanzen das vorhandene Zwicker- und Porenwasser durch eine Erhöhung der Saugspannung nicht mehr aufnehmen können. Es reißt der Wasserfluss von den Wurzeln zu den Blättern ab. Das Ergebnis ist eine verwelkte Pflanze.

2.3.3 Wasser im Untergrund

Unterirdisches Wasser ist jegliches Wasser, welches in den Hohlräumen der Erdkruste vorhanden ist (ÖNORM B 2400, 1986).

Das unterirdische Wasser tritt in der wasserungesättigten und in der wassergesättigten Zone auf. Die Grenze dieser beiden Zonen wird durch den geschlossenen Kapillarsaum gebildet (Velikogne, 2000). In nachfolgender Abbildung ist ein Querschnitt eines Bodens dargestellt mit den Lagen der unterschiedlichen Sättigungszonen.

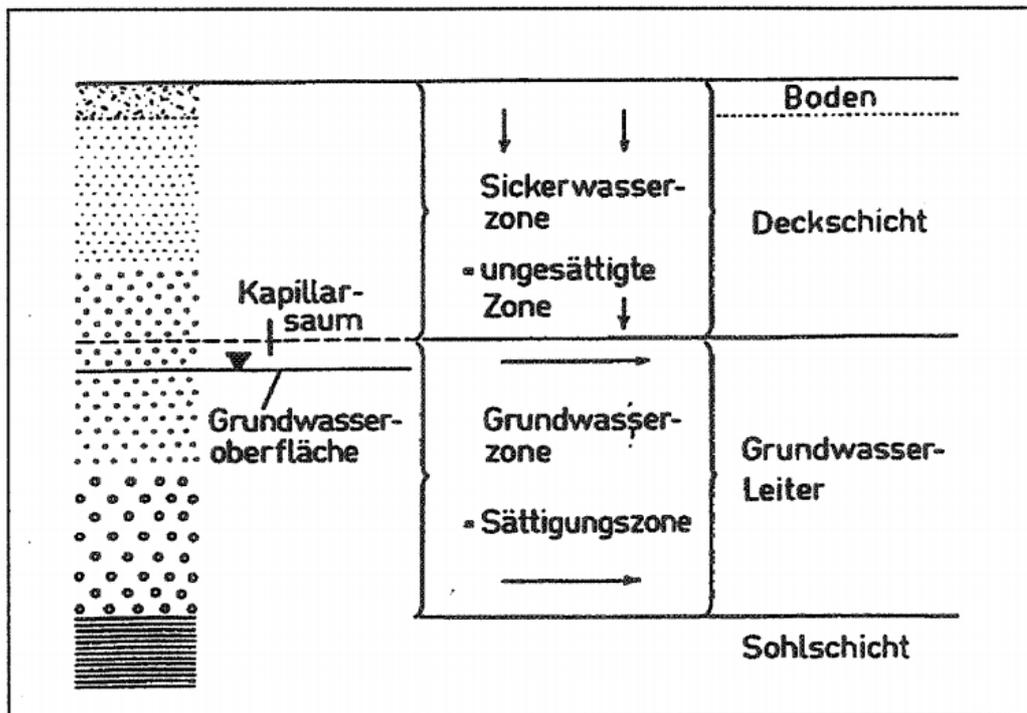


Abbildung 2.10: Hydrologische Gliederung des Untergrundes (Mattheß und Ubell, 1983)

2.3.3.1 Einteilung des unterirdischen Wassers

Wasser im Untergrund steht in vielfältiger Wechselbeziehung zu den Bodenkörnern und ist durch unterschiedliche Bindungsformen und mit unterschiedlichen Bindungsintensitäten an diese gebunden.

Die unterirdischen Wässer werden eingeteilt in:

- Adsorptionswasser
- Kapillarwasser
- Sickerwasser
- Grundwasser
- Wasser in Einzelhohlräumen
- Wasser in chemischer Bindung im Gestein oder gelöst in Magmen (Mattheß & Ubell, 1983)

2.3.3.2 Die wassergesättigte Zone

Die wassergesättigte Zone (Grundwasserzone) beginnt direkt unter der ungesättigten Wasserzone und beinhaltet das Grundwasser sowie das Wasser des geschlossenen Kapillarsaumes.

Grundwasser ist unterirdisches Wasser, welches Hohlräume und Poren der Erdkruste ausfüllt und dessen Bewegung durch die Schwerkraft und durch Reibungskräfte bestimmt wird. An der Grundwasseroberfläche bildet sich der Kapillarsaum zu dem ungesättigten Bereich aus (ÖNORM B 2400, 1986).

2.3.3.3 Die wasserungesättigte Zone

Die wasserungesättigte Zone umfasst Boden- und Gesteinsbereiche, in denen die Hohlräume nicht vollständig mit Wasser gefüllt sind (ÖNORM B 2400, 1986).

Die wasserungesättigte Zone wird einerseits durch die Erdoberfläche und andererseits durch die unregelmäßig ausgebildete Oberfläche des geschlossenen Kapillarsaumes begrenzt.

Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben ist die Mächtigkeit des Kapillarsaums stark abhängig von der Porengröße des Bodens. Je nach Größe der Poren im Boden endet die wasserungesättigte Zone in einem Kapillarsaum über dem Grundwasser bzw. ist dieser Übergang zum Kapillarsaum abrupt zu Ende wie z.B.: bei Karst- und Kluftgestein (Velikogne, 2000).

2.3.4 Durchlässigkeit

Die gesättigte Durchlässigkeit eines Bodens ist abhängig vom Aufbau des Porenvolumens sowie der Flüssigkeit, welche den Boden durchströmt. Das Porenvolumen wird durch die Körnung, den Korngrößen, der Geometrie, der Kornoberfläche, den Mineralien, der Struktur sowie der Lagerungsdichte definiert.

Die Durchlässigkeit für Wasser wird durch den Durchlässigkeitsbeiwert k_w beschrieben. Dieser gibt an, welches Wasservolumen V in der Zeiteinheit t bei einem bestimmten Gefälle i in einem bestimmten Bodenquerschnitt A durchströmt (Adam, 2005).

$$k_w = \frac{V}{A \cdot i \cdot t} \quad (22)$$

$$i = \frac{h}{l} \quad (23)$$

wobei

k_w	Durchlässigkeitsbeiwert für Wasser [m/s]
V	Wasservolumen im Meßzeitraum [m ³]
A	Durchströmter Bodenquerschnitt [m ²]
i	Hydraulischer Gradient [-]
h	Hydraulische Druckhöhe [m]
l	Länge des Strömweges [m]
t	Zeit [s]

Die Ermittlung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes k_w im Labor erfolgt nach den Bestimmungen der ÖNORM B 4422-1 (1992).

2.3.5 Relative Durchlässigkeit

Für die Wasserbewegung im teilgesättigten Boden ist außer der Kornstruktur auch der wassergefüllte Porenanteil n bzw. der Wassersättigungsgrad $S_{r,W}$ von maßgebender Bedeutung. Bei Teilsättigung wird der relative Durchlässigkeitsbeiwert mit sinkendem Sättigungsgrad kleiner. Der relative Durchlässigkeitsbeiwert ist dimensionslos und nimmt Werte zwischen 0 und 1, in Abhängigkeit von der Sättigung, ein.

$$k_{r,W}(S_{r,W}) = \frac{k_w(S_{r,W})}{k_w(S_{r,W}=1)} \quad (24)$$

$k_{r,W}(S_{r,W})$	Relativer Wasserdurchlässigkeitsbeiwert [-]
$k_w(S_{r,W})$	Effektiver Wasserdurchlässigkeitsbeiwert bei Teilsättigung [m/s]
$k_w(S_{r,W}=1)$	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert nach Darcy bei vollständiger Sättigung [m/s]

Im Rahmen dieser Arbeit wird auch die relative Wasserdurchlässigkeit in Abhängigkeit vom Wassersättigungsgrad bestimmt. Dabei werden die erforderlichen Daten aus selbst durchgeführten Versuchen ermittelt und in Diagrammen ähnlich Abbildung 2.11 dargestellt. In Abbildung 2.11 sind einerseits auf der rechten Seite eine relative Durchlässigkeit für Wasser- und andererseits auf der linken Seite eine relative Durchlässigkeit für Luft-Kurve nach Wyckoff & Botset dargestellt. Für diese Arbeit wird nur die rechte Kurve ermittelt, welche die relative Durchlässigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt beschreibt.

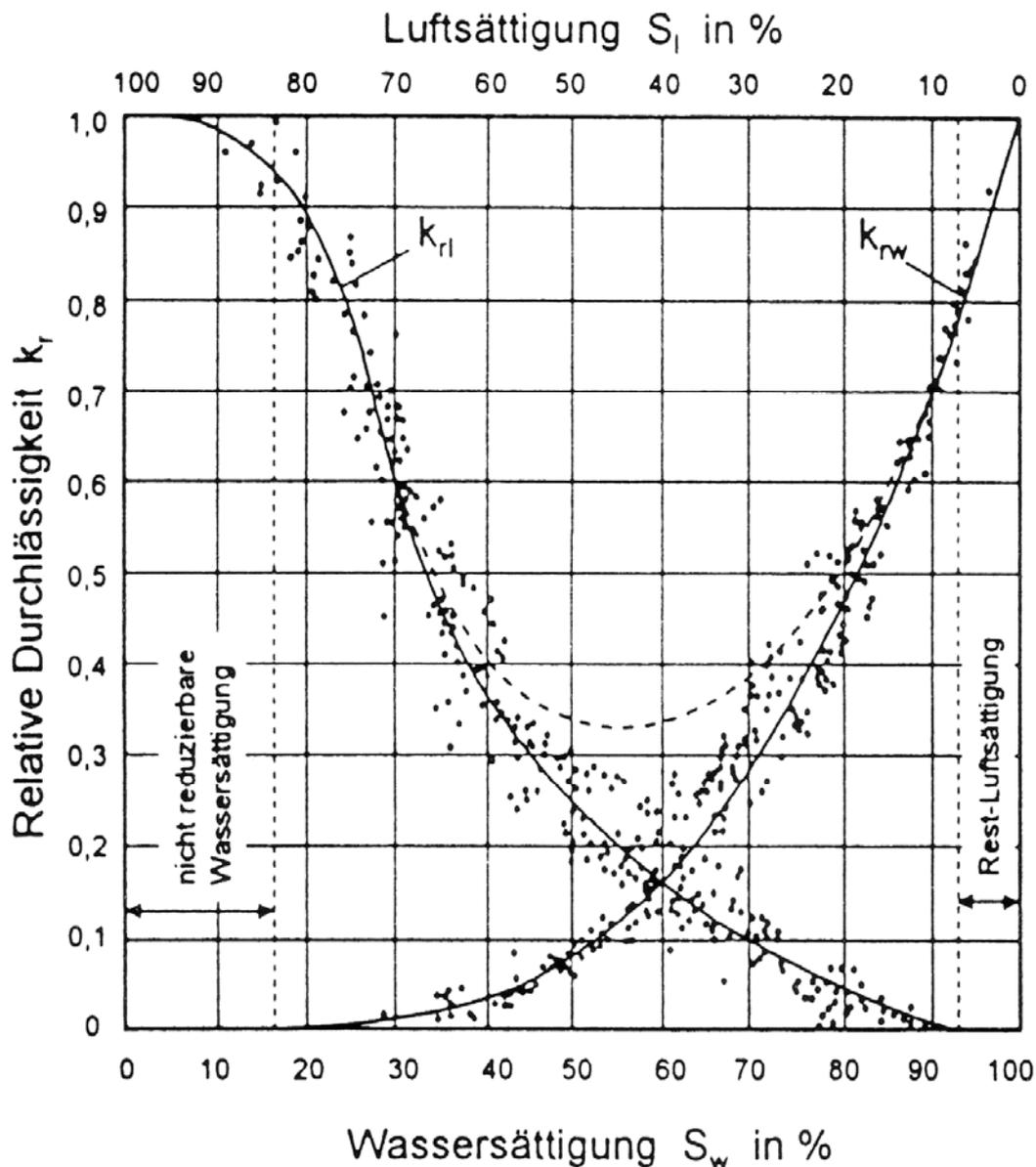


Abbildung 2.11: Abhängigkeit der relativen Durchlässigkeitsbeiwerte von Wasser bzw. Luft (Wyckoff und Botset, 1936)

2.3.6 Kapillarspannungs – Sättigungsbeziehung

Die Abhängigkeit der Kapillarspannung von der Sättigung des Bodens und deren Einfluss auf die Strömung von Wasser wurden experimentell von Richards (1931) ermittelt und in einem theoretischen Modell formuliert.

Die Kapillarspannungs-Sättigungsbeziehung beschreibt die Steigerung von Kapillarspannungen im Boden, die auftritt, wenn die Wassersättigung eines Bodens abnimmt und sich das Wasser im Boden aufgrund seiner Oberflächenspannung in feinere Bereiche des Porenraums (Zwickel) zurückzieht. Im Gegensatz dazu nimmt die Kapillarspannung wieder ab, wenn dem Boden Wasser zugeführt wird. Das Ergebnis sind sogenannte Be- und Entwässerungskurven und als Hystereseverhalten bezeichnet.

Auch in der Geotechnik haben neben Bodenkunde und Hydrologie, Kapillarspannungen eine besondere Bedeutung, da sie Einfluss auf das Strömungsverhalten von Luft und Wasser und die Kornspannungsbeziehung im Boden haben. Die Bodenmechanik der teilgesättigten Böden beschreibt diese Einflüsse (Scheid, 2003). Die Kapillarspannungs - Sättigungsbeziehung beschreibt die Abhängigkeit der Kapillarspannung an der Grenzschicht zwischen den beiden Fluiden als Funktion des herrschenden Sättigungszustandes im Boden (Scheid, 2003). Weitere Bodeneigenschaften wie zum Beispiel seine Scherfestigkeit, volumetrische Verformung (Quellen und Schrumpfen) und die thermische Leitfähigkeit stehen in Zusammenhang mit der Kapillarspannungs – Sättigungsbeziehung. Einfluss auf die Form der Kapillarspannungs - Sättigungsbeziehung nehmen folgende Parameter (siehe Tabelle 2.3).

Einflussgröße	Angabe in der Literatur
Spannungszustand	Gallipoli et al. (2001, 2002)
Verdichtung, Porenanteil	Schick (2002), McDougall & Pyrah (2002), McDougall et al. (2002)
Korngrößenverteilung, Porenanteil	Brooks & Corey (1964 & 1966), Mualem (1976), Schick (2002)
mineralogische Zusammensetzung der Körner, spez. Oberfläche	Schick (2002)
plastische Eigenschaften	Schick (2002)

Tabelle 2.3: Ausgewählte Einflussgrößen auf die Form der Kapillarspannungs - Sättigungsbeziehung

2.4 Relative Durchlässigkeits- Sättigungsbeziehung

Eine weitere Möglichkeit zur Charakterisierung teilgesättigter Böden beschreibt das Strömungsverhalten. Enthält ein Boden gleichzeitig zwei strömende Fluide, so kann jedes einzelne Fluid nur einen Teil des vorhandenen Porenraums ausfüllen. Dadurch steht für das Strömen des jeweiligen Fluids nur ein Teil des Durchflussquerschnitts zur Verfügung. Dieser Zusammenhang wird durch die relative Durchlässigkeits – Sättigungsbeziehung beschrieben.

$$k_{gr} = f(S_g) \tag{25}$$

$$k_{lr} = f(S_l) \tag{26}$$

- k_{gr} relativer Durchlässigkeitskoeffizient für Luft [-]
- k_{lr} relativer Durchlässigkeitskoeffizient für Wasser [-]
- S_g Sättigung des Porenraums mit Luft [%]
- S_l Sättigung des Porenraums mit Wasser [%]

Einflussgröße	Angabe in der Literatur
Spannungszustand	Vaughan (1989)
Verdichtung, Porenanteil	Meerdink et al. (1996)
Korngrößenverteilung, Porenanteil	Brooks & Corey (1964 & 1966), Mualem (1976)

Tabelle 2.4: Ausgewählte Einflussgrößen auf die Form der relativen Durchlässigkeits - Sättigungsbeziehung

Bei der Ermittlung der relativen Durchlässigkeits – Sättigungsbeziehung unterschiedlicher feinkörniger Böden zeigte Meerdink et al. (1996), dass diese nahezu unabhängig vom Wassergehalt beim Einbau des Probenkörpers ist. Allerdings zeigte sich eine starke Abhängigkeit von der aufgewendeten Einbauenergie, wodurch auch eine Beeinflussung der Größe des Porenanteils sowie des Porendurchmessers gezeigt wurde.

3 Anwendungsbereiche

Die Kenntnis der Wasserdurchlässigkeit, sowohl im gesättigten als auch im teilgesättigten Bereich, ist für viele Aufgaben des Bauingenieurwesens von Bedeutung. Es ergeben sich bei teilgesättigten Böden einige Fragestellungen, welche bei voll gesättigten Böden keine Bedeutung haben:

- Scherfestigkeit: Bei teilgesättigten Böden wird die Scherfestigkeit durch Kapillarkohäsion beeinflusst. Dieser Festigkeitsanteil bleibt nur unter bestimmten Randbedingungen erhalten.
- Schrumpfen/Quellen: Das Ausmaß von Schrumpfen bzw. Quellungen ist abhängig vom Sättigungsgrad des Bodens

Die Erforschung erstreckt sich vom Grundbau, dem Deponiebau, dem Straßenbau, dem Wasserbau, der Hydrologie, dem Tunnelbau, der Geohydraulik, bis zur Bodenkunde.

Einige konkrete Beispiele für die Anwendung der teilgesättigten Bodenmechanik sind:

- In der Bodenmechanik zur Erfassung der Austrocknung von mineralischen Abdichtungsschichten.
- In der Grundwasserhydraulik zur mengenmäßigen Abschätzung von kapillarem Sickerwassertransport in Erdstaudämmen.
- Im Siedlungswasserbau zur Berücksichtigung überlagernder Schichten bei der Bemessung von Wasserschutzgebieten.
- In der Hydrologie zur Erfassung von Infiltration, Oberflächenabfluss, Bewegung des Oberflächenwassers und Verbinden dieser Prozesse.
- Im landwirtschaftlichen Wasserbau zum Bau von Bewässerungsanlagen.
- In der Bodenmechanik zur Standsicherheit von Böschungen.
- Im Wasserbau bei Deckwerke an Wasserstraßen
- Im Wasserbau bei Deichbauwerke für Hochwasserschutz
- In der Bodenmechanik bei Baugruben und anderen von wechselnden Wasserständen belastete Bauwerke.
- In der Hydrologie bei Simulationsmodellen von Wasserbewegungen im Boden

- In der Bodenmechanik bei numerischen Modellen der Luft- und Wasserströmung im Tunnelbau (Adam, 2005).

4 Stoffgesetze teilgesättigter Böden

Die Modellierung der ungesättigten Durchlässigkeit ist mit einem sehr hohen Messaufwand / Zeitaufwand verbunden, da der Boden stets isotrop ist und deshalb erheblich in seinen bodenhydraulischen Eigenschaften variiert. Für eine realitätsnahe Charakterisierung wäre daher eine große Anzahl an Messungen notwendig (Külls, 2005).

Um eine möglichst realitätsnahe Retentions- und Durchlässigkeitscharakteristik abbilden zu können, arbeitet man daher mit sogenannten Porenraummodellen, mit denen sich die hydraulische Bodencharakteristik, die die Zusammenhänge zwischen Porenraum und Durchlässigkeit beschreibt, herleiten lässt.

Am häufigsten kommen in der Bodenmechanik folgende Modelle zur Anwendung:

- das „van Genuchten/Mualem Modell“
- das „bimodale van Genuchten/Mualem Modell“
- das „Brooks und Corey Modell“

4.1 Das Brooks und Corey Modell

Dieses Modell wird zur Berechnung der Wasserspeicherverhältnisse von Böden verwendet. Bei der Berechnung wird angenommen, dass der Wassergehalt nicht kleiner als der residuale Wassergehalt werden kann. Dies bedeutet, dass Porenkanäle, die beim residualen Wassergehalt noch wassergesättigt sind, einen sehr kleinen Radius aufweisen, so dass ihre Leitfähigkeit vernachlässigbar ist (S.W. Tayler, S.W. Wheatcraft, 1990).

Die Sättigungs- und Durchlässigkeitsfunktion des Brooks und Corey-Modells sind gegeben durch (Brooks & Corey, 1964):

$$S_e(h) = \begin{cases} 1 & \text{für } h \geq \alpha^{-1} \\ (\alpha h)^{-\lambda} & \text{für } h < \alpha^{-1} \end{cases} \quad (27)$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s & \text{für } h \geq \alpha^{-1} \\ K_s [(\alpha h)^{-\lambda}]^{\frac{2}{\lambda+\tau+2}} & \text{für } h < \alpha^{-1} \end{cases} \quad (28)$$

- α Kehrwert des Lufteintrittspotentials [cm^{-1}]
- K_s gesättigte Leitfähigkeit [cm/d]
- h Matrixpotential [$\text{cm Wassersäule, hPa}$]
- λ Fittingparameter [-]
- τ Fittingparameter [-]

λ ist ein Fittingparameter, der die Porengrößenverteilung berücksichtigt und τ ändert sich mit der Tortuosität des Bodens. Beide Parameter sind eine Funktion des Tortuositätsfaktor L , welcher die der Gestalt der Poren im Bodenkörper beschreibt.

4.2 Das „van Genuchten/Mualem Modell“

Im Gegensatz zum Modell nach Brooks & Corey berücksichtigt das „van Genuchten/Mualem Modell“, wie in Abbildung 4.1 ersichtlich, die durch Messung bestätigte charakteristische S-Form der Wasserspannungskurve (pF-Kurve) (Külls, 2005).

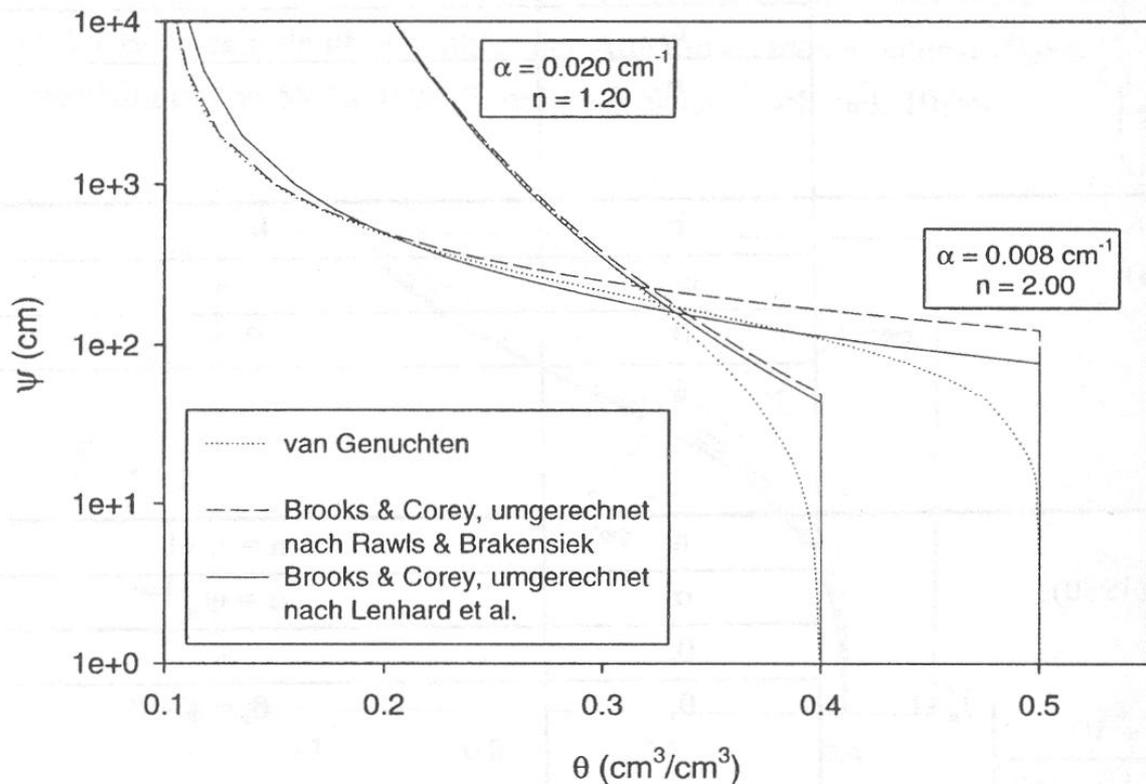


Abbildung 4.1: Vergleich der pF-Kurven nach Brooks & Corey (1964) und van Genuchten (1980), (Schäfer, 1999)

Der Ansatz nach Mualem (1976), in welchem anhand des Matrixpotentials h der Anteil der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit an der gesättigten, die sogenannte relative ungesättigte Durchlässigkeit K_r , berechnet werden kann, lautet (Külls, 2005):

$$K_r = \Theta_{\text{eff}}^L \cdot \left[\frac{\int_0^\Theta \frac{1}{h(x)} dx}{\int_0^1 \frac{1}{h(x)} dx} \right] \quad (29)$$

- h Matrixpotential [hPa]
- Θ_{eff} effektiver Wassergehalt [-]
- Θ momentaner Wassergehalt [Vol.-%]
- Θ_r residualer Wassergehalt (Leitfähigkeit ist Null) [Vol.-%]
- Θ_s Wassergehalt bei Sättigung des Bodens [Vol.-%]
- L Tortuositätsfaktor [-]

wobei

$$\Theta_{\text{eff}} = \frac{\Theta - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r} \quad (30)$$

- Θ_{eff} effektiver Wassergehalt [-]
- Θ momentaner Wassergehalt [Vol.-%]
- Θ_r residualer Wassergehalt (Durchlässigkeit ist Null) [Vol.-%]
- Θ_s Wassergehalt bei Sättigung des Bodens [Vol.-%]

Der Tortuositätsfaktor L beschreibt die Gestalt der Poren im Bodenkörper. L ist eine empirische Größe, die meistens auf den Wert 0,5 festgelegt wird, weil Mualem mit diesem Wert die größte Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten hydraulischen Leitfähigkeiten erzielte (Disse, 1995). Die Wasserspannungsspannungskurve leitete Van Genuchten 1980 wie folgt her (Külls, 2005):

$$\Theta_{\text{eff}} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (31)$$

wobei

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (32)$$

- h Matrixpotential [hPa]
- Θ_{eff} effektiver Wassergehalt [-]
- α Konstante, entspricht dem Wendepunkt der Wasserspannungskurve [1/hPa]
- n Konstante, beschreibt die Steilheit der Wasserspannungskurve [-]

Aus den Gleichungen (30) und (31) ergibt sich die Funktion des Matrixpotentials in Abhängigkeit vom Wassergehalt im Boden $h(\Theta)$ (siehe Gleichung 33) (Külls, 2005).

$$h(\Theta) = \left[\left(\frac{\Theta - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r} \right)^{-\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (33)$$

- h Matrixpotential [hPa]
- Θ_{eff} effektiver Wassergehalt [-]
- α Konstante, entspricht dem Wendepunkt der Wasserspannungskurve [1/hPa]
- n Konstante, beschreibt die Steilheit der Wasserspannungskurve [-]
- Θ momentaner Wassergehalt [Vol.-%]
- Θ_r residualer Wassergehalt (Durchlässigkeit ist Null) [Vol.-%]
- Θ_s Wassergehalt bei Sättigung des Bodens [Vol.-%]

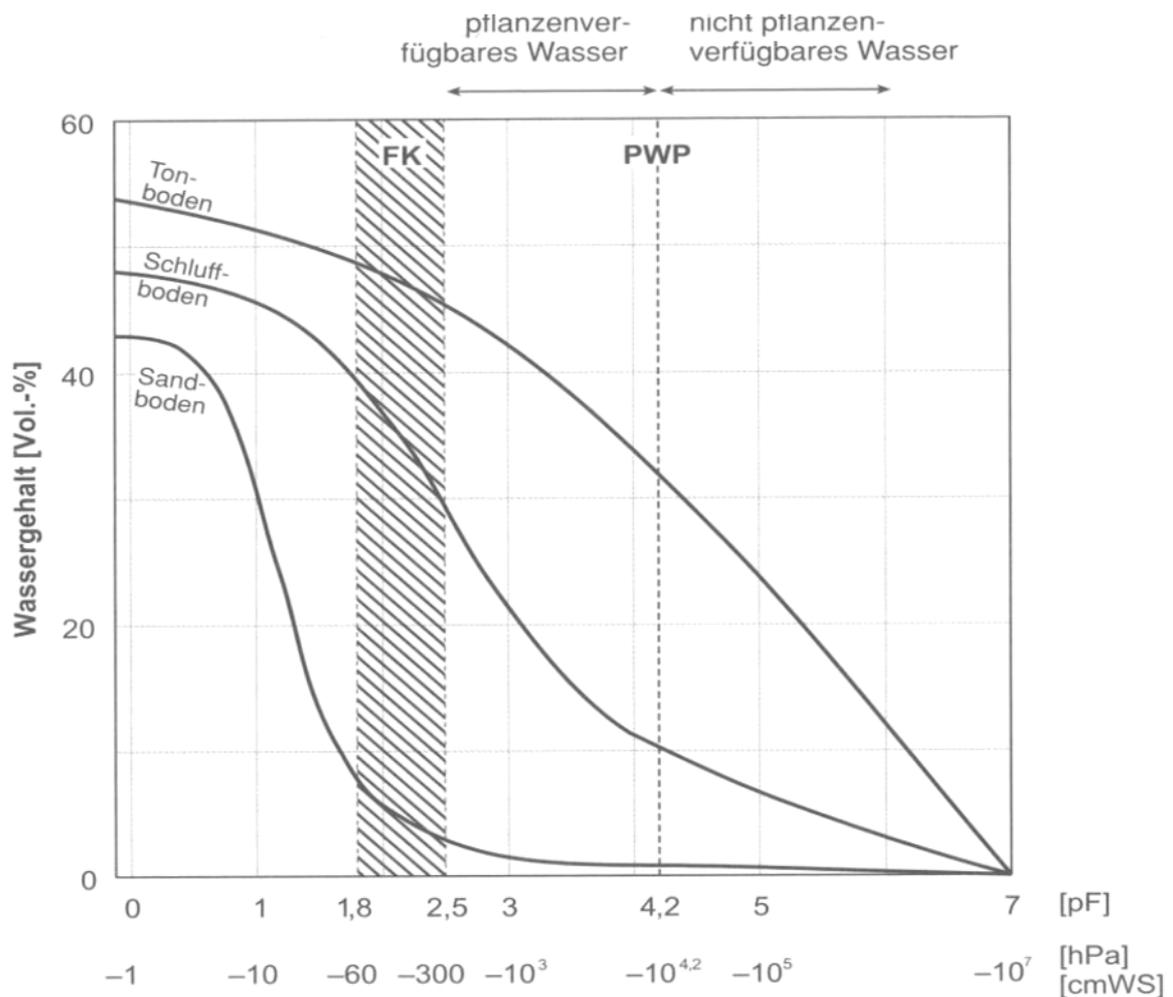


Abbildung 4.2: Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt bei unterschiedlichen Bodentypen (FK = Feldkapazität, PWP = permanenter Welkepunkt) (Scheffer/Schachtschabel, 2002)

Kombiniert man den Ansatz von Mualem (1976) zur Beschreibung der ungesättigten Leitfähigkeit (siehe Gleichung (29)) mit der Van-Genuchten-Gleichung (1980) zur Bestimmung der Wasserspannungskurve (siehe Gleichung (31)), so erhält man eine analytisch lösbare Gleichung der relativen ungesättigten Durchlässigkeit K_r nach van Genuchten (1980) (siehe Gleichung 34):

$$(34)$$

- Θ_{eff} effektiver Wassergehalt [-]
- Θ momentaner Wassergehalt [Vol.-%]
- m Parameter [-] (siehe Gleichung (32))

Es gilt weiterhin für den effektiven Wasserhaushalt Θ_{eff} die Gleichung (30), sowie für m die in Gleichung (31) beschriebene Abhängigkeit vom Faktor n (Külls, 2005). Mit der relativen ungesättigten Durchlässigkeit K_r kann die Durchlässigkeit in Abhängigkeit des Matrixpotentials beschrieben werden (Disse, 1995):

$$K(h) = K_s \cdot K_r \quad (35)$$

K_s Durchlässigkeit bei Vollsättigung [m/s]
 K_r relative ungesättigte Durchlässigkeit [-]

Werden die Gleichungen (35), (34) und (31) ineinander eingesetzt, erhält man die $K(h)$ - Funktion:

$$K(h) = K_s \cdot \frac{[1 - (\alpha \cdot h)^{n-1} \cdot (1 + (\alpha \cdot h)^n)^{-m}]^2}{(1 + (\alpha \cdot h)^n)^{\frac{m}{2}}} \quad (36)$$

K_s Durchlässigkeit bei Vollsättigung [m/s]
 h Matrixpotential [hPa]
 α Konstante, entspricht dem Wendepunkt der Wasserspannungskurve [1/hPa]
 n Konstante, beschreibt die Steilheit der Wasserspannungskurve [-]
 m Parameter [-] (siehe Gleichung 32)

4.3 Das „bimodale van Genuchten/Mualem Modell“

Um eine noch bessere Berücksichtigung der heterogenen Zusammenstellung des Bodens zu gewährleisten wurde das „bimodale van Genuchten/Mualem Modell“ entwickelt, welches auf dem Prinzip der Superposition aufbaut (Chinkulkijniwat, 2005).

Das bimodale Modell hat die gleiche Funktion wie das unimodale „van Genuchten/Mualem Modell“, nur die Anzahl der Parameter wird erhöht (Priesack & Durner, 2006).

Das von Durner (1994) vorgeschlagene Modell stellt die Retentions- und Leitfähigkeitsfunktion durch Überlagerung zweier einzelner van Genuchten/Mualem Funktionen dar (Priesack & Durner, 2006).

$$S_e(h) = \sum_{j=1}^2 \omega_j \cdot (1 + (\alpha \cdot h)^{n_j})^{\frac{1}{n_j-1}} \quad (37)$$

$$K(h) = K_s \cdot \left[\sum_{j=1}^2 \omega_j \cdot [1 + (\alpha \cdot h)^{n_j}]^{\frac{1}{n_j-1}} \right]^\tau \cdot \left[\frac{\sum_{j=1}^2 \omega_j \cdot \alpha_j \cdot \left\{ 1 - (\alpha_j \cdot h^{n_j-1} \cdot [1 + (\alpha_j \cdot h)^{n_j}]^{\frac{1}{n_j-1}}) \right\}}{\sum_{j=1}^2 \omega_j \alpha_j} \right]^2 \quad (38)$$

- α Kehrwert des Lufteintrittspotentials [cm^{-1}]
- n Porenweitenindex [-]
- K_s gesättigte Leitfähigkeit [cm/d]
- h Matrixpotential [cm WS, hPa]
- ω_j Gewichte der Teilfunktionen [-]
- τ Fittingparameter [-]

Um dem Prinzip der Superposition gerecht zu werden gelten die Einschränkungen:

$$0 < \omega_j < 1 \quad (39)$$

und

$$\sum \omega_j = 1 \quad (40)$$

5 Grundlagen der Versuchsmethoden

5.1 Angewandte Methoden

5.1.1 Allgemeines

Um die pF-Charakteristik einer Bodenprobe zu bestimmen, gibt es zwei verschiedene Methoden: stationäre und instationäre

Um die Saugspannung mit Hilfe der stationären Methode zu bestimmen gibt es zwei Verfahren:

- Drucktopfmethode
- Sandkastenmethode

Um die Saugspannung mit Hilfe der instationären Methode zu bestimmen, wird die Verdunstungsmethode verwendet.

5.1.2 Begriffe

5.1.2.1 pF-Stufe:

Die pF-Stufe entspricht einem bestimmten Wert der Kapillarspannung und wird in $pF = \log pF = \text{cm WS} = \text{hPa}$ angegeben.

5.1.2.2 Durchfluss Q:

Der Durchfluss Q ist die Wassermenge, welche in einem bestimmten Zeitintervall durch eine definierte Querschnittsfläche eines Probekörpers durchströmt.

5.2 Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit

5.2.1 Stationäre Methoden zur Bestimmung der pF-Charakteristik

5.2.1.1 Drucktopfmethode

Der Wassergehalt wird den Bodenproben durch das Erhöhen des Luftdrucks in einem Drucktopf reduziert, indem das in den Poren enthaltene Wasser herausge-

presst wird. Eine poröse Keramikplatte dient als hydraulische Verbindung, über die das Wasser vom Boden in die Keramikplatte weiter durch ein Ausflussrohr in den Außenbereich des Drucktopfs gelangen kann. Die Druckluft strömt nicht durch die Poren in die Platte, da diese mit Wasser gefüllt sind.

Je kleiner die Porengröße, umso höher muss der Druck sein, bevor die Luft durchströmt. Bei einem Versuchsdurchgang mit eingestelltem Überdruck strömt das in der Bodenprobe enthaltene Wasser durch die Keramikplatte und das Ausflussrohr hinaus.

Das Feuchtigkeitsgleichgewicht stellt sich ein, wenn der Wasserstrom aus den Ausflussrohren versiegt. Am Gleichgewichtspunkt besteht eine genaue Beziehung zwischen dem Luftdruck im Drucktopf und dem Wassergehalt in den Proben. (Fa. UMS, 2010)

Die erforderliche Versuchsausrüstung besteht aus:

- Drucktopf mit Keramikplatten (1, 3 und 15 bar)
- Bodenprobenringe
- Druckkontrollfeld mit zwei Manometer
- Kompressor ($p_{\max} = 20$ bar)

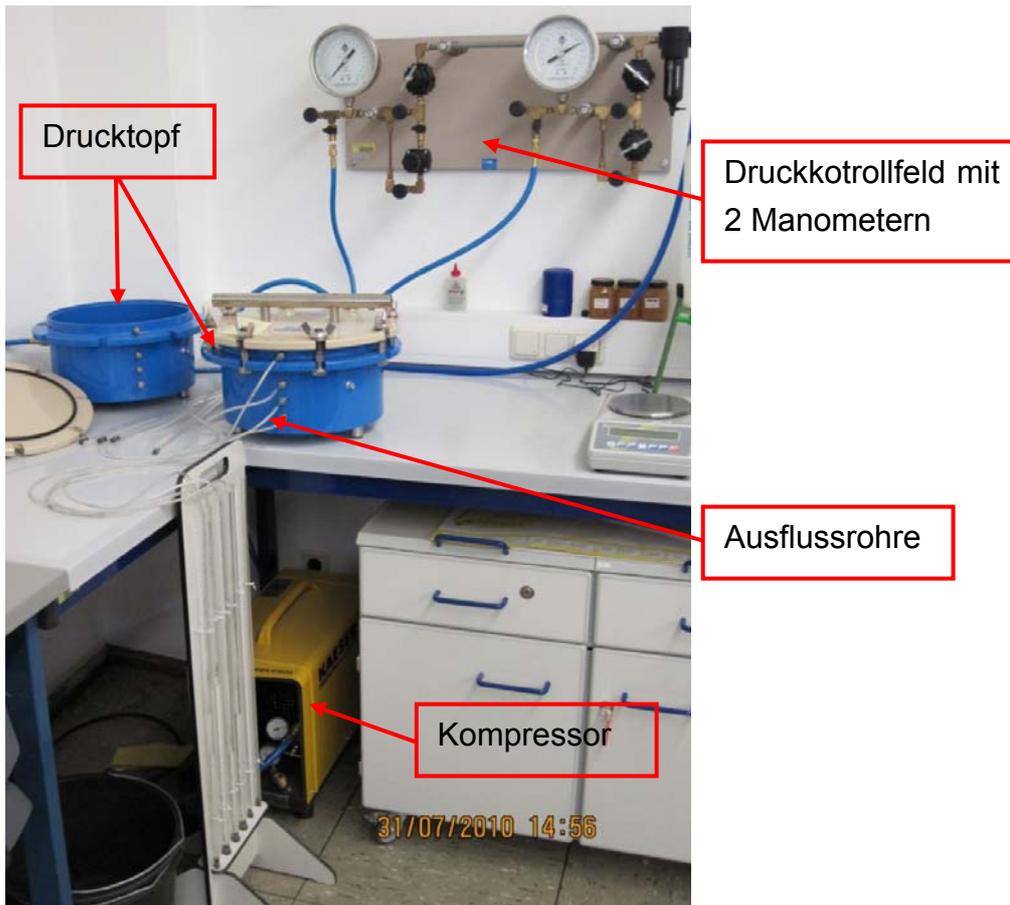


Abbildung 5.1: Das Drucktopf-System zur Bestimmung von hydraulischen Bodeneigenschaften

5.2.1.2 Sandkastenmethode

Zur Bestimmung der Feuchtigkeitscharakteristik mit der Sandkastenmethode werden ungestörte Proben benötigt. Diese Proben werden mit Edelstahl-Stechzylinder entnommen. Im Labor, werden anschließend die Stechzylinder mit einem Filtertuch auf einer Seite verschlossen und mit einem O-Ring gesichert (siehe Abbildung 5.2).

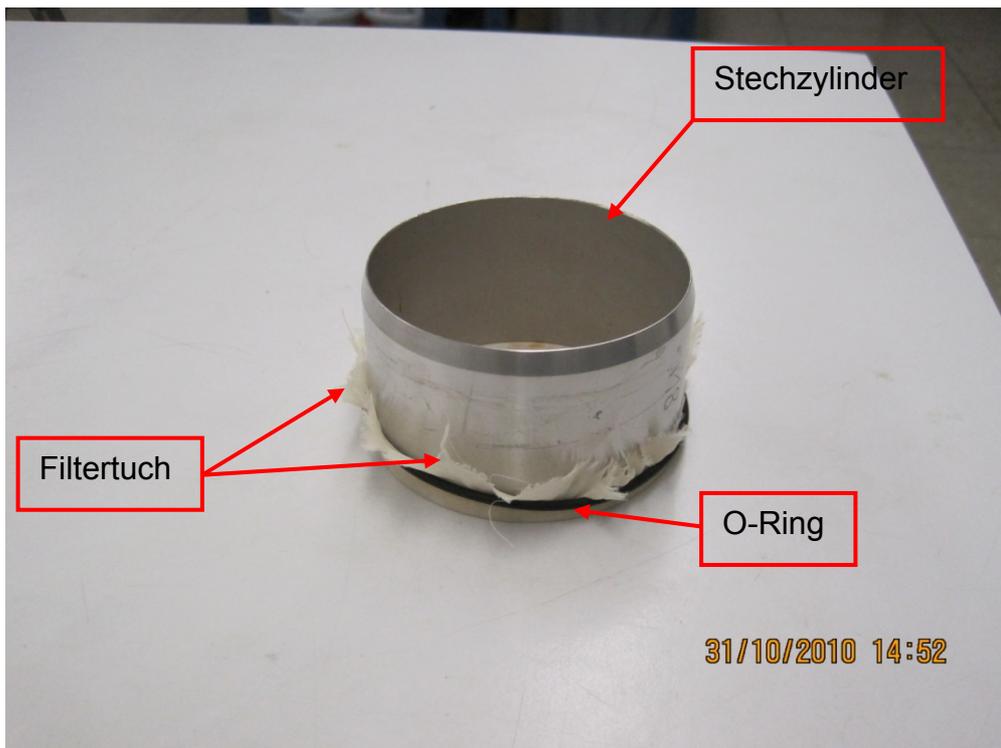


Abbildung 5.2: Stechzylinder mit Filtertuch verschlossen und O-Ring Sicherung

Darauf werden die Proben in ein Gefäß mit Wasser gestellt und aufgesättigt. Die Aufsättigung muss langsam erfolgen um keine Luft in den Poren einzuschließen. Nach erfolgter Aufsättigung werden die Proben gewogen. Das ermittelte Gewicht dient zur Berechnung des Wassergehaltes bei Sättigung $pF = 0$. Anschließend werden die Stechzylinder in den Sandkasten gesetzt und dabei leicht angedrückt, um einen guten Kontakt zwischen Probe und Sand sicherzustellen. Jetzt wird ein definiertes Vakuum an die Proben angelegt und nach Einstellen des Gleichgewichtes zwischen Saugspannung (Vakuum) und Probengewicht kann der Wassergehalt bei definierter Saugspannung berechnet werden. (Fa. UMS, 2009)

Die erforderliche Versuchsausrüstung besteht aus:

- Sandkasten mit Bedienungsfeld
- Absaugnivellierständer
- Wasserversorgungsflasche mit Ständer
- Filtertuch (140 – 150 mm)
- Kunststoffsand (Korngröße ca. 73 mm)

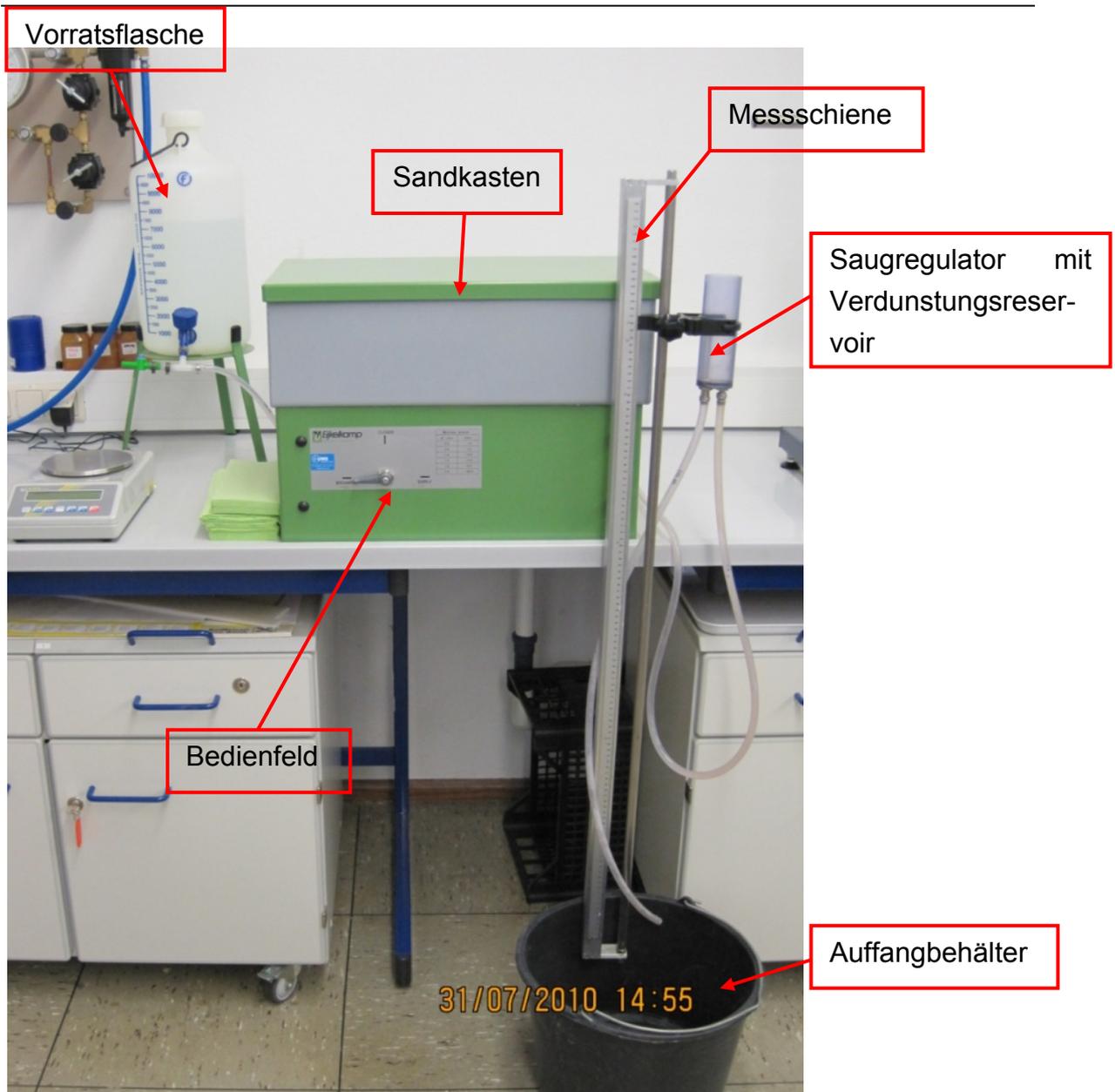


Abbildung 5.3: Sandkasten-System zur Bestimmung von hydraulischen Bodeneigenschaften

5.2.2 Instationäre Methoden zur Bestimmung der pF-Charakteristik

5.2.2.1 Verdunstungsmethode

Ein typisches Verfahren zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit ist die Verdunstungsmethode nach Wind/Schindler, bei der eine mit Wasser gesättigte Bodenprobe auf einer Waage platziert und der Verdunstung im Labor ausgesetzt wird.

Die so herbeigeführte Gewichtsreduktion und Änderung der Saugspannung wird kontinuierlich mittels Waage und Tensiometer gemessen. Die Messdaten werden anhand der von Durner & Peters (2008) entwickelten Methode ausgewertet und an Standardmodellen für hydraulische Funktionen (siehe Kap. 4) gefittet.

Die Bestimmung der gesuchten Funktionen erfolgt hierbei durch Verfahren der nichtlinearen Optimierung.

Modelle z.B. nach van Genuchten/Mualem, bimodale van Genuchten/Mualem sowie Brooks & Corey können ausgewählt werden. Die Modellparameter können vor, nach und während der Messung berechnet werden. Dadurch werden die Messergebnisse überprüft und die Funktionsverläufe im extrapolierten Bereich der Sättigung und im Trockenen über das jeweilige eingestellte Modell berechnet.

Vorteil gegenüber anderen Methoden ist, dass die hydraulischen Leitfähigkeit präzise (1,5 hPa bei einem Messbereich von 0 bis 800 hPa) und während der natürlichen Austrocknung der Bodenprobe gewonnen werden. Diese Messmethode wurde von Durner & Peters in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen UMS entwickelt und ist unter dem Handelsnamen „Hyprop®“ bekannt. (Fa. UMS, 2010)

Die erforderliche Versuchsausrüstung besteht aus:

- Messkopf
- Messkopf-Anschlusskabel
- Silikondichtungsscheibe
- Tensiometerkerzen 12,5 mm und 37,5mm
- Bohradapter
- Tensiometer-Bohrer
- Befüllset oder Vakuumpumpe
- tensioView Software
- Verbindungskabel
- Stechzylinder 250 cm³
- Laborwaage (Messbereich 0 - 2,5 kg)

In nachfolgender Abbildung 5.4 ist das Hyprop-Messsystem dargestellt. Hier besteht es aus drei Messköpfen zur Saugspannungsbestimmung sowie einer Waage und Computereinheit zur Auswertung.



Abbildung 5.4: Das HYPROP-System zur Bestimmung von hydraulischen Bodeneigenschaften (Fa. UMS, 2010)

5.3 Messtechnik

Aufgrund der Anforderungen für die Laborversuche sind beim Hypropversuch zwei Messgeräte von Bedeutung. Tensiometer für die Bestimmung der Kapillarspannung in der Bodenprobe und eine Waage, mit der die Gewichtsveränderung in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt werden kann.

5.3.1 Messung der Kapillarspannung mittels Tensiometer

Zur Messung der Kapillarspannung (Saugspannung) wird die Tensiometrie verwendet. Bei dieser Methode wird mit Hilfe der Tensiometer der Porenwasserdruck u_w direkt gemessen. Der Messbereich der verwendeten T5 Tensiometer der Fa. UMS reicht von 0 bis 850 hPa. Das Matrixpotential h ist als Differenz zwischen Porenluftdruck u_a und Porenwasserdruck u_w in Kapitel 2.3 definiert worden.

Da die Durchführung der Versuche unter atmosphärischen Druck ($u_a=0$) stattfindet, erhält man ohne Korrektur die Kapillarspannung als Messergebnis.

Das Bodenwasser und das Wasser im Tensiometer haben Kontakt über die poröse Keramik, welche wasserdurchlässig ist. Die Bodenwasserspannung überträgt

sich direkt auf den Drucksensor im Messkopf, der das elektronische Messsignal liefert.

Die Spitze besteht aus keramischem Al_2O_3 -Sintermaterial und hat einen Durchmesser von 5 mm. Damit besitzt dieses Tensiometer alle Vorteile kleiner Abmessungen: geringe Bodenstörung, punktuelle Messung und schnelles Ansprechverhalten. Abbildung 5.5 zeigt einen schematischen Querschnitt eines Tensiometers, sowie einen Tensiometer in Natur.

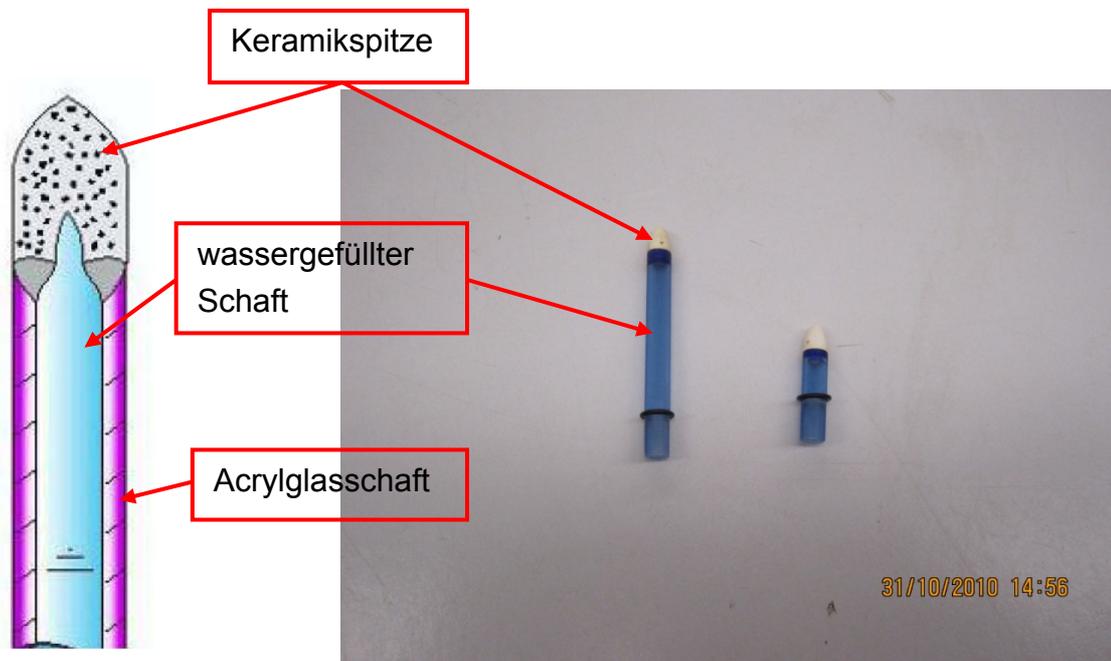


Abbildung 5.5: Tensiometer (links: schematischer Schnitt rechts: Tensiometer) (Fa. UMS, 2009)

5.3.2 Waage

Die Waage zur Durchführung der Hyprop-Versuche ist eine Kern EG2200, die auf das Messprogramm tensioVIEW® abgestimmt wird. Mit dem Computer wird die Waage über COM-Schnittstelle oder USB-Port verbunden. Der maximale Wägebereich beträgt 2.200 g.

5.3.3 Software

Für die Erfassung der Messdaten wurde das Programm tensioVIEW® verwendet. Diese Software zeigt während des Versuchs das aktuelle Gewicht und die Kapillarspannung am Bildschirm an (siehe Abbildung 5.6). Nach Beendigung einer Messzyklus erfolgt die Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit nach dem jeweiligen eingestellten Modell (van Genuchten, bimodal van Genuchten, Brooks & Corey). Die Ergebnisse werden als .csv-Datei ausgegeben und können in ein Tabellenkalkulationsprogramm (z. B.: Microsoft Excel) eingespielt werden.

Abbildung 5.6 zeigt die Bildschirmoberfläche während des Messvorganges. In der oberen Grafik wird die Saugspannungskurve über den Zeitverlauf dargestellt. Die untere Grafik zeigt den Gewichtsverlust über die Zeit.

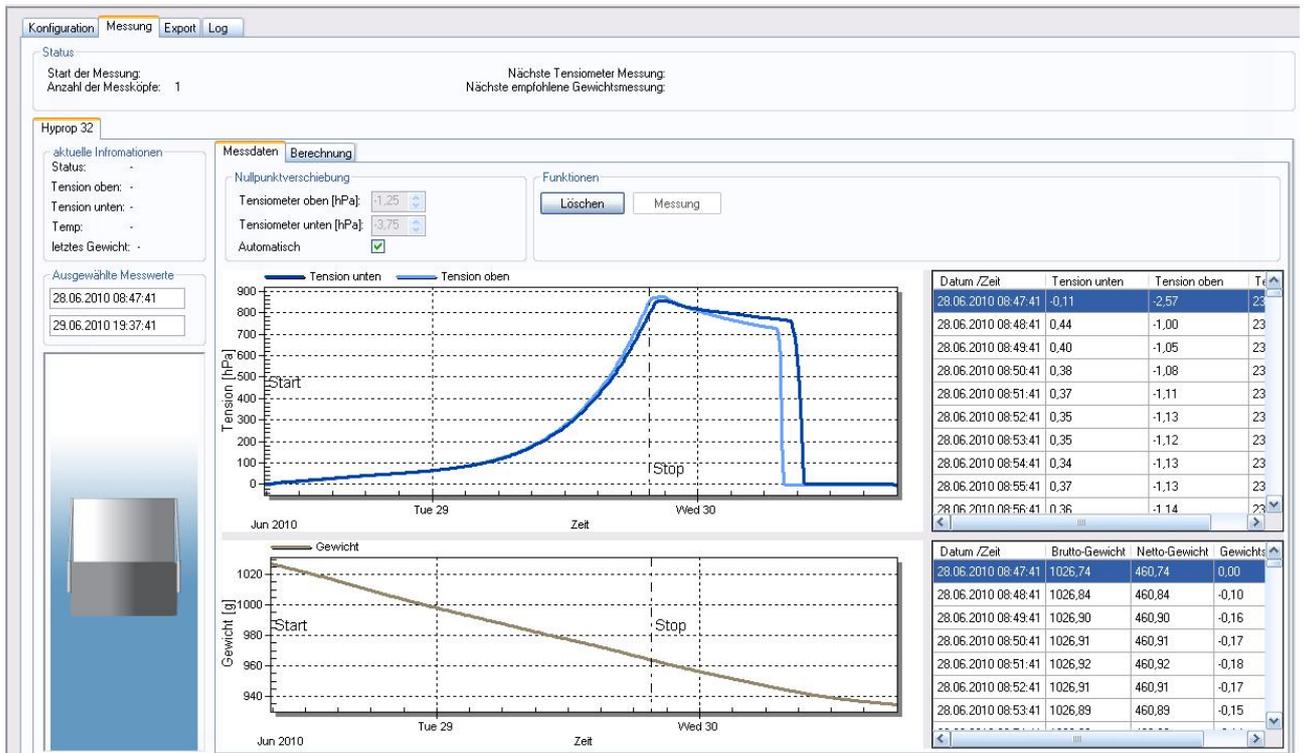


Abbildung 5.6: Computerbild während Messung (Fa. UMS, 2009)

6 Laboruntersuchungen

6.1 Allgemein

Beim Hyprop- und Sandkastenversuch wird die relative Wasserdurchlässigkeit teilgesättigter Böden in Abhängigkeit vom Wassersättigungsgrad bestimmt. Für die Versuche wird Thermosand mit zwei unterschiedlichen Einbaudichten untersucht.

Die Herstellung der Probekörper erfolgt im Labor des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau an der TU-Graz. Die Laborversuche (Permeameter-, Hyprop- und Sandkastenversuch) wurden im Labor des Institutes für Erdwissenschaften Bereich Geologie und Paläontologie der Karl-Franzens-Universität durchgeführt.

6.2 Probandaten

Bei den untersuchten Proben handelt es sich um Thermosand. Das ist das Abraummaterial aus stillgelegten Kohlefördergebieten um Fohnsdorf in der Steiermark. Dieses Abraummaterial enthält einen geringen Anteil an Kohle, welches in der Halde über Jahrzehnte durch thermische Umwandlung zu einem hoch gebrannten Ton (Klinker) gebrannt wurde. Durch Aufbereiten des Materials auf Korngröße 0 bis 4 mm entsteht aus diesem rötlichen Taubmaterial der sogenannte Thermosand (Semprich & Henögl, 2003).

Aus bodenmechanischer Sicht handelt es sich bei Thermosand um einen gering kiesigen, schluffigen Sand. Die Korndichte hat einen Mittelwert von $\rho_s = 2,78 \text{ g/cm}^3$.

Die Einbautrockendichte beträgt für den Verdunstungs-Versuch $\rho_d = 1,30 \text{ g/cm}^3$ und für den Sandkasten-Versuch $\rho_d = 1,39 \text{ g/cm}^3$. Der dabei erreichte durchschnittliche Durchlässigkeitsbeiwert beträgt für $k_{pd=1,30} \approx 5,3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ und $k_{pd=1,39} \approx 1,7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Die Bestimmung der Durchlässigkeit wurde mit Hilfe des Permeameterversuches durchgeführt. Die Ergebnisse dazu befinden sich in Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2.

6.3 Herstellung der Proben

Da der Thermosand mit definierten Dichten untersucht wird, wird dieser mit dem unter Kap. 6.2 bestimmten Einbautrockendichten, in die vorhandenen Stechzylinder eingepresst.

Die verwendeten Stechzylinder sind aus Edelstahl, 5 cm hoch und haben einen Innendurchmesser von 8 cm. Sie besitzen ein Volumen von 250 cm³.



Abbildung 6.1: Stechzylinder und Abdeckkappen

Der Ablauf der Probenherstellung wird im Folgenden beschrieben und bildlich (siehe Abbildung 6.1 bis Abbildung 6.4) dargestellt:

- 1) Um die Proben mit den geforderten Trockendichten ($\rho_d = 1,30 \text{ g/cm}^3$, $\rho_d = 1,39 \text{ g/cm}^3$) einzubauen, wurde der Thermosand im Trockenofen bei 105 °C getrocknet. Dabei verdampft das in den Poren freie- und gebundene Porenwasser. Die Ofentrocknung wird über einen Zeitraum von 24 Stunden aufrechterhalten.
- 2) Der getrocknete Thermosand wird, in 3 gleiche Gewichtsteile (siehe Abbildung 6.2) aufgeteilt und anschließend ca. 50 g destillierten Wasser vermischt. Das

zugesetzte Wasser bewirkt scheinbare Kohäsion, die gewährleistet, dass der verdichtete Boden beim Hantieren der Proben vollständig in der Form bleibt.



Abbildung 6.2: aufgeteilte Proben vor Einpressen

- 3) Anschließend wird das Probenmaterial in 3 gleichmäßigen Lagen in den Edelstahlstechzylinder gepresst. Um das gleichmäßige Einpressen zu kontrollieren, wird Stichmaß kontrolliert (siehe Abbildung 6.3).



Abbildung 6.3: Einpressvorgang und Kontrolle des Absetzmaßes

- 4) Nach Fertigstellung des Einpressvorgangs werden die Stechzylinder mit PVC-Kappen luftdicht verschlossen und in einem mit Schaumstoff gepolsterten Transportkoffer gelagert (siehe Abbildung 6.1 und Abbildung 6.4). Die vorsichtige Lagerung ist erforderlich, damit die hergestellten Proben beim Transport zwischen TU-Graz und KF-Uni keine Stöße erfahren und somit die Lagerungsdichte nicht verändert wird.



Abbildung 6.4: transportfertiger Stechzylinder

Unmittelbar nach der Herstellung einer Probenserie (10 Stück) wurde diese in das Labor des Institutes für Erdwissenschaften Bereich Geologie und Paläontologie der Karl-Franzens-Universität transportiert und für die weiteren Versuche, durch Aufsättigung im Permeameter, vorbereitet.

6.4 Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Das Permeameter ist ein Laborgerät, mit dem die Durchlässigkeit von gesättigten Bodenproben bestimmt werden kann. Das Permeameter arbeitet nach dem in Abbildung 6.9 gezeigten Prinzip. Die Wasserdurchlässigkeit wird bestimmt, indem an beiden Seiten einer gesättigten Probe ein unterschiedlicher Wasserdruck eingestellt und der daraus entstehende Wasserdurchfluss gemessen wird.

Bevor die Proben in das Permeameter der Fa. Eijkelkamp eingebaut werden, müssen diese gegen Herausfallen mit Gummiring und einem feinen Vlies gesichert werden (Abbildung 6.5). Anschließend werden die Proben in einen Ringhalter mit Siebdeckel (Abbildung 6.6) eingespannt und in das Permeameter eingehängt und mit Hilfe des Wasserstandsreglers mit Wasser auf gesättigt.



Abbildung 6.5: Stechzylinder mit Filtertuch und O-Ring

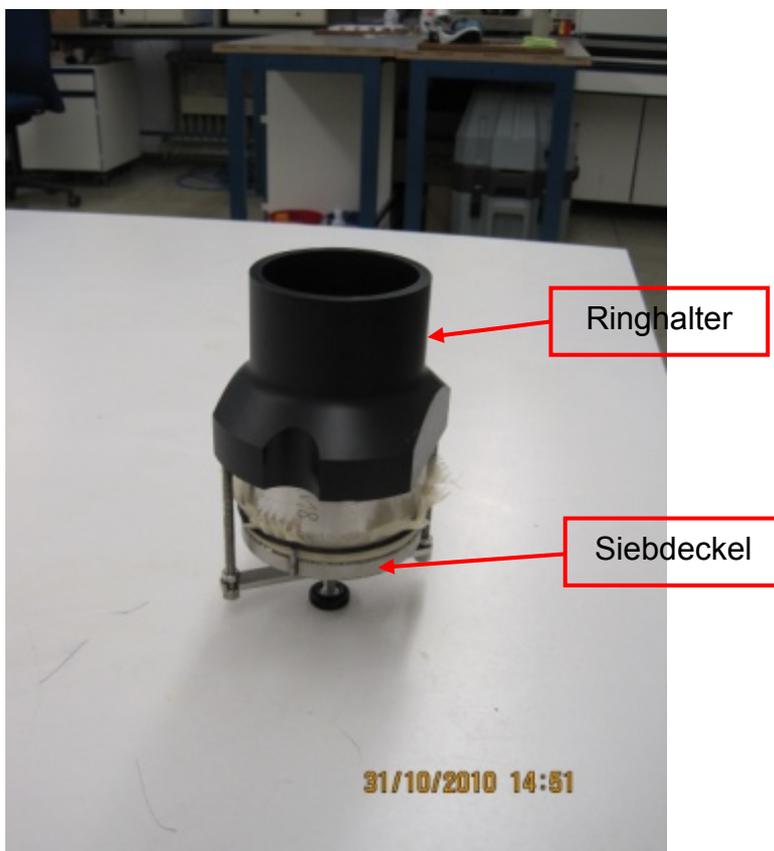


Abbildung 6.6: Eingebauter Stechzylinder in Ringhalter für Permeameterversuch

Die Aufsättigung muss langsam stattfinden, da durch eine zu schnelle Durchtränkung die Durchlässigkeit verringert werden kann. Die Dauer der Aufsättigung hängt von der Bodenart ab. Eine Sandprobe ist schon innerhalb 1 Tages gesättigt, während ein wenig durchlässiger Ton erst nach ein paar Wochen gesättigt ist.

Die vollständige Sättigung erkennt man daran, dass der Wasserstand im Ringhalter die gleiche Höhe wie im Becken des Kunststoffbehälters hat.

Die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit kann in zwei unterschiedliche Methoden erfolgen:

- Bestimmung mit konstantem Druckhöhenunterschied
- Bestimmung mit abnehmbarem Druckhöhenunterschied

Die Methode mit abnehmendem Höhenunterschied wird nur für Böden mit niedrigen Durchlässigkeiten wie z. B.: Tone und Schluffe verwendet. Hierbei wird nicht die abgeführte Wassermenge gemessen, sondern die Änderung des Wasserhöhenunterschiedes in einem bestimmten Zeitraum.

Da die hier verwendete Bodenprobe innerhalb von wenigen Stunden aufgesättigt war, kann von einer guten Durchlässigkeit ausgegangen werden, und somit kommt die Wasserdurchlässigkeitsbestimmung mit konstantem Wasserhöhenunterschied zur Anwendung.

Um den Messvorgang, nach erfolgreicher Aufsättigung, in Gang zu setzen, wird ein Saugheber (Abbildung 6.7) mit einem „Bein“ in den Ringhalter und das andere Bein in das nummerierte Kunststoffrohr eingesetzt.



Abbildung 6.7: Saugheber

Das Wasser über der Probe im Ringhalter sinkt nun bis auf Saugheberniveau. Das ablaufende Wasser fließt in das Kunststoffrohr, nachdem dieses gefüllt ist, tropft es über die Auslassöffnung in die Messburette. Für den Messvorgang muss ein konstanter Höhenunterschied innerhalb- und außerhalb des Ringhalters vorhanden sein.



Abbildung 6.8: Oben eingebaute Probe im leeren und unten im gefüllten Zustand mit Saugheber

Um den Laborversuch der Durchlässigkeitsbestimmung besser zu verstehen, ist nachfolgend in Abbildung 6.9 ein schematischer Querschnitt des Permeameters sowie ein Bild der verwendeten Apparatur abgebildet.

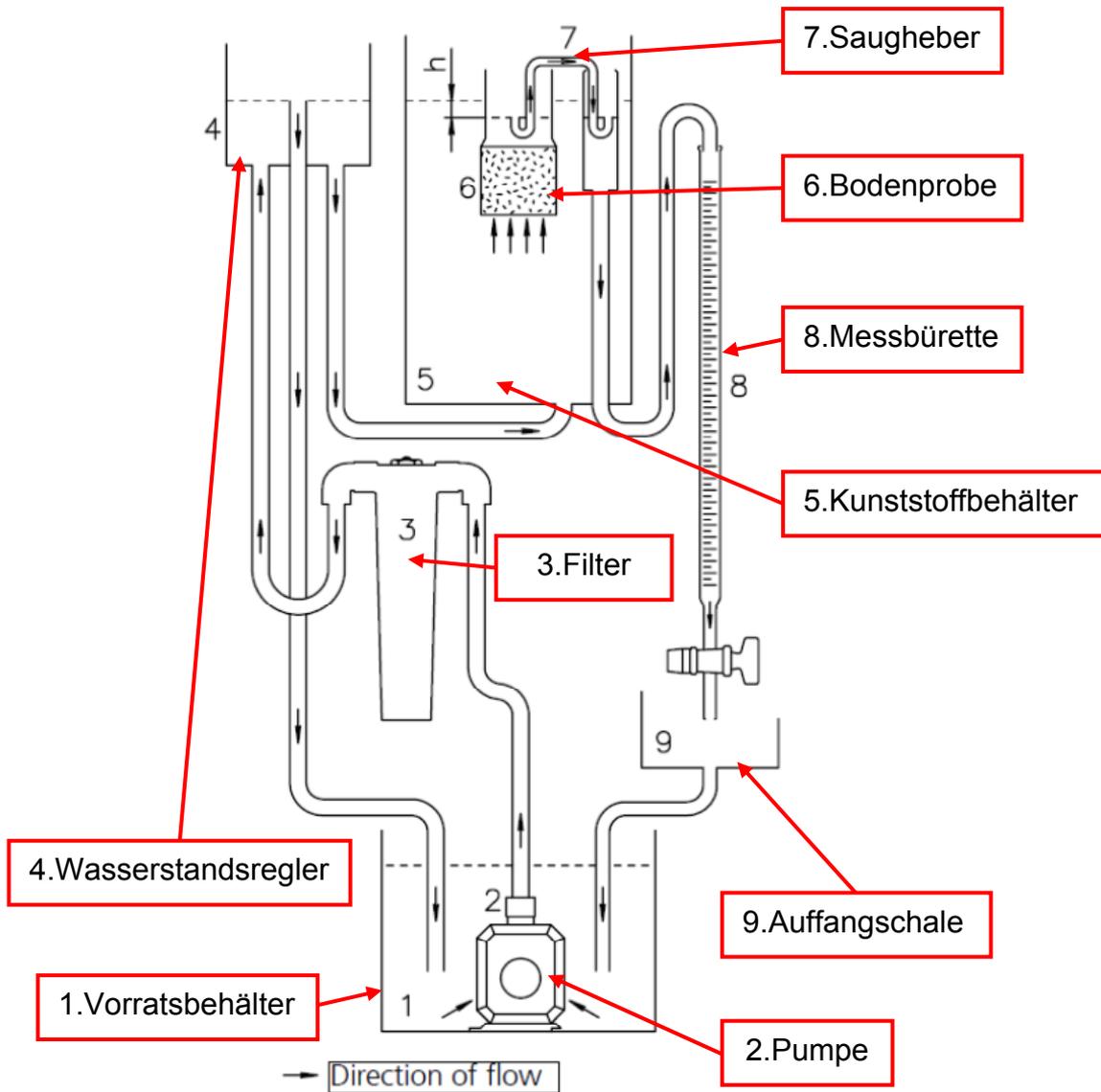


Abbildung 6.9: Schematischer Querschnitt durch das Permeameter

Bei diesem geschlossenen System wird Wasser aus dem Vorratsbehälter (1) mit einer Pumpe (2) durch einen Filter (3) in einen in der Höhe verstellbaren Wasserstandsregler (4) gepumpt. Der Wasserstandsregler ist einerseits mit dem Kunststoffbehälter (5) verbunden und andererseits mit einem Rohr, durch welches überschüssiges Wasser in den Vorratsbehälter zurückfließen kann. Das Wasser fließt durch die Bodenprobe (6), welche in Ringhalter mit Siebdeckel in den Kunststoffbehälter (5) eingesetzt ist. Über den Saugheber (7) wird über der Probe stehendes

Wasser in eine Messburette (8) geführt. Das Wasser aus den Büretten fließt in die Auffangschale (9) weiter in den Vorratsbehälter.

Durch den Einsatz des Saughebers entsteht ein Höhenunterschied (h) zwischen dem Wasserstand innerhalb und außerhalb des Ringhalters. Durch den Höhenunterschied wird ein kontinuierlicher Wasserfluss durch die Probe erzeugt. Die Höhe des Wasserstandes wird mit Hilfe einer Einpunkt-Messbrücke (siehe Abbildung 6.10) bestimmt.

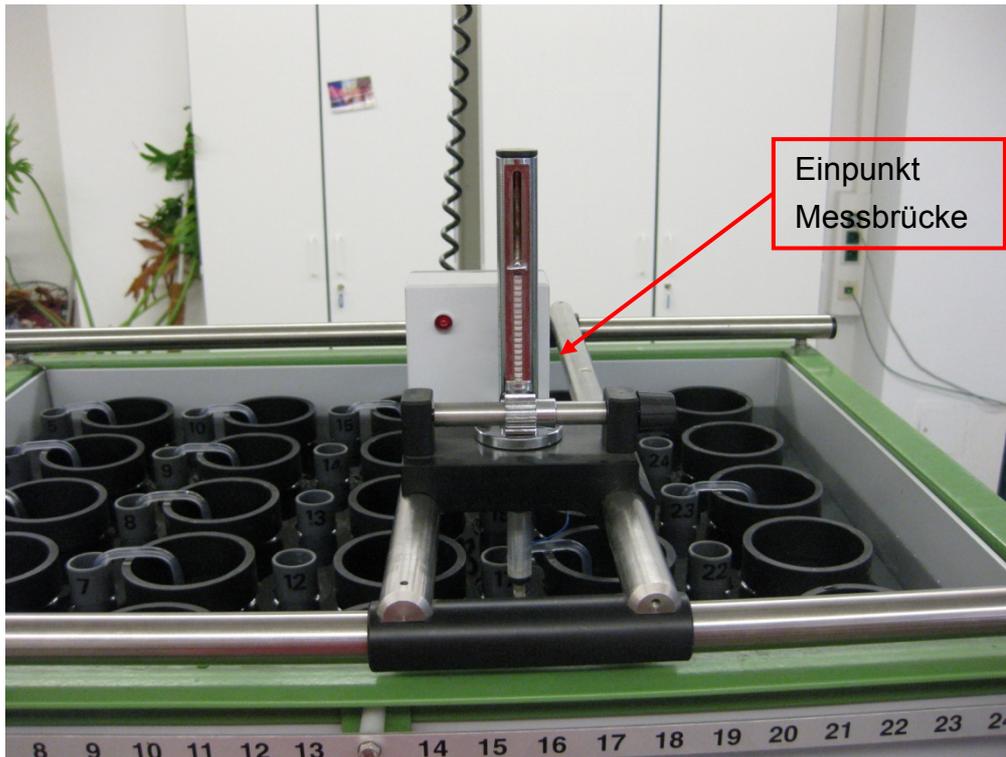


Abbildung 6.10: Einpunkt-Messbrücke

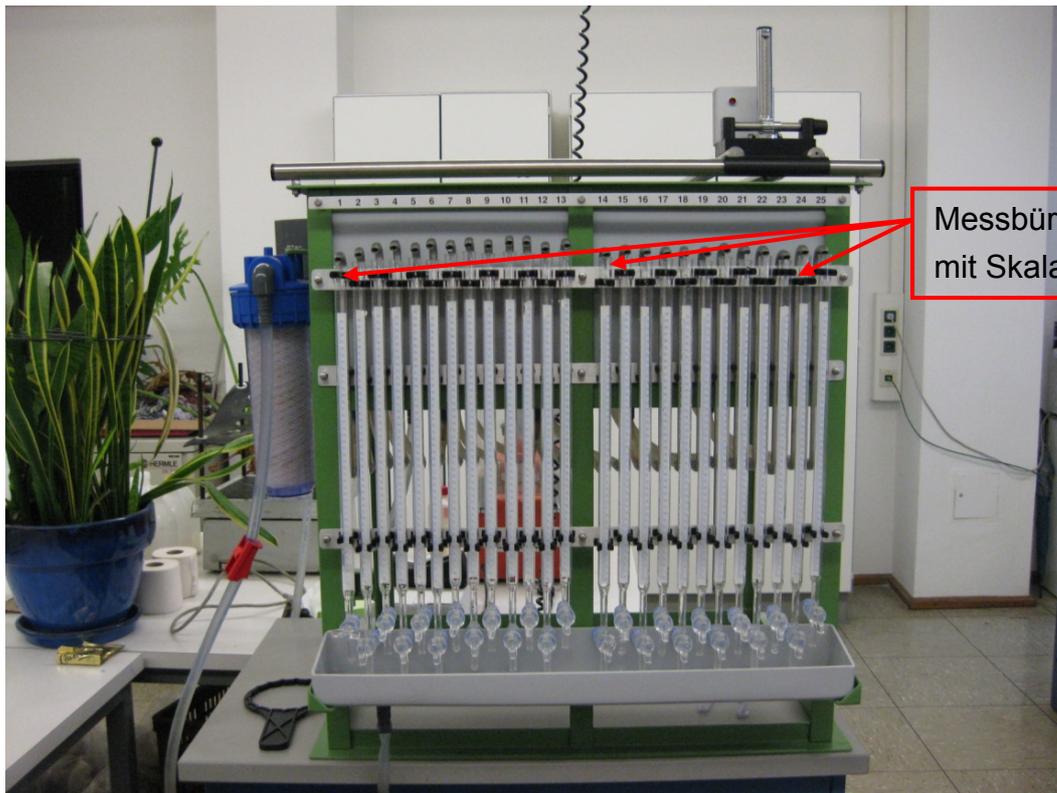


Abbildung 6.11: Foto eines Permeameters der Fa. Eijkelkamp

Die Messung erfolgt über Ablesung der Wassermenge (Messbürette), welche in einer bestimmten Zeit durch die Probe läuft. Der Durchlässigkeitsbeiwert k wird nach dem Gesetz von Darcy (siehe Formel 22) und bei Verwendung der nachfolgenden Formel bestimmt:

$$k = \frac{V \cdot l}{A \cdot t \cdot h} \quad (34)$$

- k Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
- V Wasservolumen das durch die Probe fließt [m³]
- l Länge der Bodenprobe [m]
- A Querschnittsfläche der Bodenprobe [m²]
- t Zeit benötigt zum Durchfluss von Wasservolumen V [s]
- h Wasserhöhenunterschied inner- und außerhalb Ringhalter [m]

In Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse der einzelnen Stechzylinder, getrennt nach Einbaudichte, ausgewertet. In Spalte eins befindet sich die Stechzylinder Nummer. In den Spalten zwei und drei befindet sich der Meßzeitraum und

das gemessene Wasservolumen. Spalte vier und fünf beinhaltet die Wasserstandshöhen von Ringhalter und Kunststoffbehälter. Die letzten beiden Spalten zeigen die Ergebnisse der Durchlässigkeitsbestimmung in unterschiedlichen Einheiten (Gebrauchsanweisung Permeameter, Eijkelkamp 2008).

Das arithmetische Mittel für die Durchlässig k beträgt für eine Einbaudichte von $\rho_d=1,30 \text{ g/cm}^3 \approx 5,3 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ und für $\rho_d=1,39 \text{ g/cm}^3 \approx 1,7 \times 10^{-6} \text{ m/s}$.

6.4.1 Messergebnisse

$\rho_d=1,30 \text{ g/cm}^3$						
STZ Nr:	Zeitintervall [min]	Wasservolumen [cm ³]	Wasserstand innen [cm]	Wasserstand außen [cm]	k [cm/d]	k [m/s]
11	3,0	1,3	6,30	5,10	52,01	$6,0 \cdot 10^{-6}$
12	3,0	2,4	6,60	4,90	69,66	$8,1 \cdot 10^{-6}$
13	3,0	1,1	6,25	5,10	44,01	$5,1 \cdot 10^{-6}$
14	3,0	0,5	5,60	5,00	46,67	$5,4 \cdot 10^{-6}$
15	3,0	1,3	6,20	4,90	48,01	$5,6 \cdot 10^{-6}$
16	3,0	1,1	6,25	5,10	47,17	$5,5 \cdot 10^{-6}$
17	3,0	1,7	6,55	4,90	49,46	$5,7 \cdot 10^{-6}$
18	3,0	0,6	5,80	5,10	41,15	$4,8 \cdot 10^{-6}$
19	3,0	1,3	6,30	5,05	48,01	$5,6 \cdot 10^{-6}$
20	3,0	1,8	6,00	4,90	51,68	$6,0 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 6.1: Durchlässigkeit k [m/s] für $\rho_d = 1,30 \text{ g/cm}^3$

$\rho_d=1,39 \text{ g/cm}^3$						
STZ Nr:	Zeitintervall [min]	Wasservolumen [cm ³]	Wasserstand innen [cm]	Wasserstand außen [cm]	k [cm/d]	k [m/s]
13	4,0	0,8	6,50	4,70	17,19	$2,0 \cdot 10^{-6}$
20	3,0	0,4	6,05	4,70	14,22	$1,6 \cdot 10^{-6}$
22	3,0	0,5	6,70	4,85	13,49	$1,6 \cdot 10^{-6}$
23	3,0	0,5	6,10	4,70	17,14	$2,0 \cdot 10^{-6}$
24	3,0	0,5	6,70	4,75	12,30	$1,4 \cdot 10^{-6}$
25	3,0	0,5	6,70	4,75	13,54	$1,6 \cdot 10^{-6}$
26	3,0	0,4	6,55	4,70	10,38	$1,2 \cdot 10^{-6}$
28	3,0	0,5	6,10	4,70	14,40	$1,7 \cdot 10^{-6}$
29	3,0	0,5	6,40	4,75	16,00	$1,9 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 6.2: Durchlässigkeit k [m/s] für $\rho_d = 1,39 \text{ g/cm}^3$

6.5 Saugspannungsbestimmung mittels Verdunstungsmethode

Das hier beschriebene Laborverdunstungsverfahren nach Wind/Schindler dient der Messung und Berechnung der Wasserretentionsfunktion und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit als Funktion der Wasserspannung oder des Wassergehaltes von Bodenproben. Das System wurde von Fa. UMS in Zusammenarbeit mit Dr. Schindler und Dr. Durner entwickelt und trägt den Handelsnamen Hyprop®.

Das Hyprop-System misst mit Hilfe von Tensiometer und Waage die auftretenden Wasserspannungen sowie den Gewichtsverlust, welcher beim Verdunsten entstehen. In Abbildung 6.12 ist ein systematischer Querschnitt eines Messkopfes mit zwei Tensiometer sowie des Stechzylinders zu erkennen. (Fa. UMS, 2010)

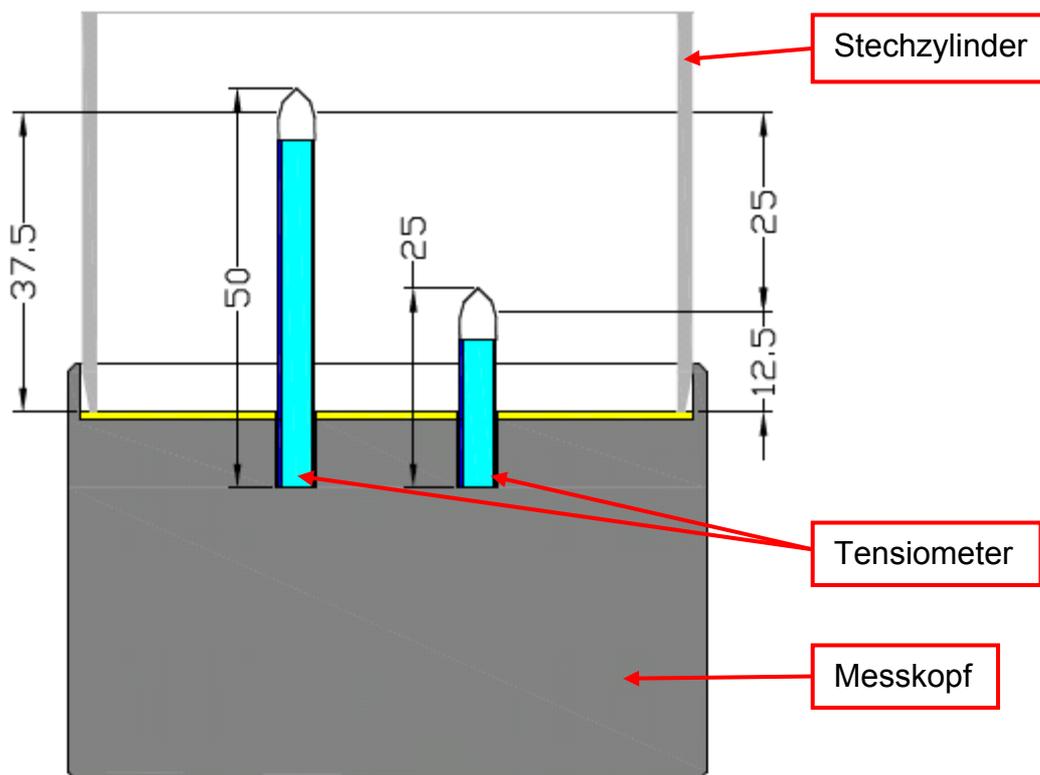


Abbildung 6.12: Systematischer Querschnitt des Gehäuses/Messkopf (Fa. UMS, 2010)

Um mit diesem Laborverfahren beginnen zu können, müssen die Proben vor dem Zusammenbau mit dem Messsystem mit Wasser aufgesättigt werden. Da aber in diesem Fall im Vorhinein der Permeameterversuch durchgeführt wurde, sind die

Stechzylinder bereits aufgesättigt und werden nach dem Ausbau aus dem Permeameter in einer Wanne mit Wasser zwischengelagert (siehe Abbildung 6.13). Das vorhandene Wasser in der Wanne schützt die Proben vor Austrocknung.



Abbildung 6.13: Zwischengelagerte Stechzylinder

Um einen kontinuierlichen Versuchsablauf zu erhalten, müssen die für die Messung notwendigen Tensiometer und Messköpfe, während der Durchlässigkeitsbestimmung vorbereitet werden. Damit die Tensiometer in der Lage sind, die Bodenwasserspannungen schnell und zuverlässig zu messen, müssen diese möglichst blasenfrei mit entionisiertem und entgastem Wasser befüllt sein (Abbildung 6.14). Die Spitze der Tensiometer besteht aus keramischem Al_2O_3 -Sintermaterial und hat eine aktive Oberfläche von nur $0,5 \text{ cm}^2$ sowie einen Durchmesser von 5 mm und besitzt somit alle Vorteile kleiner Abmessungen: geringe Bodenstörung, punktuelle Messung und dabei schnelles Ansprechverhalten. Die Befüllung erfolgt mit Hilfe einer Vakuumpumpe durch Aufbringen eines Unterdruckes auf die Tensiometer und Messköpfe. Die Tensiometerkerzen werden dabei in einen Behälter mit entionisiertem und entgastem Wasser gelegt. Ein passender Silikonschlauch wird mit den Kerzen verbunden und über eine Tröpfchenfängerflasche an die Vakuumpumpe angeschlossen. Anschließend wird ein Messkopfadapter auf den Messkopf aufgesetzt und mit Hilfe einer Pipettenspritze mit entionisiertem und

entgastem Wasser befüllt. Anschließend wird auch hier ein Silikonschlauch an einem Ende am Messkopfadapter angeschlossen und am anderen mit der Vakuumpumpe verbunden. Durch die poröse Keramik der Tensiometer wird das entionisierte und entgaste Wasser eingesaugt und entlüftet die Keramikspitze und den Schaft vollkommen. Dieser Vorgang wird über einen Zeitraum von ca. 24 Stunden aufrecht erhalten (siehe Abbildung 6.14).

Nach Beendigung des Entlüftens der Tensiometer und des Messkopfes werden die Tensiometer sehr vorsichtig in den Messkopf eingeschraubt (Abbildung 6.15). Dabei muss der Messkopf mit dem Computer über ein Kabel verbunden sein, damit der beim Eindrehen der Tensiometer entstehende Überdruck am Monitor kontrolliert werden kann.

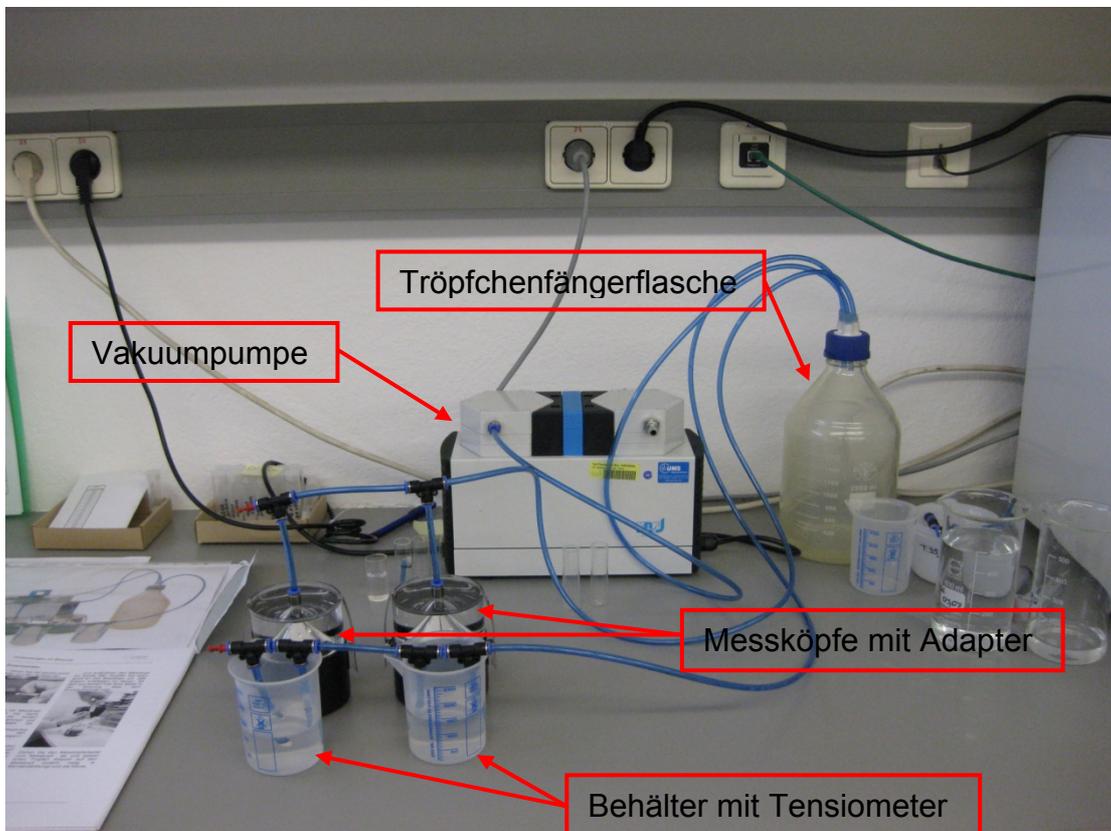


Abbildung 6.14: Entlüften der Tensiometer und Messköpfe

Der Druck darf dabei nicht über 1 bar steigen. Im Anschluss wird eine Kontrolle des Befüllungszustandes der Tensiometer durchgeführt, indem die Schutzkappen der Tensiometer entfernt werden.

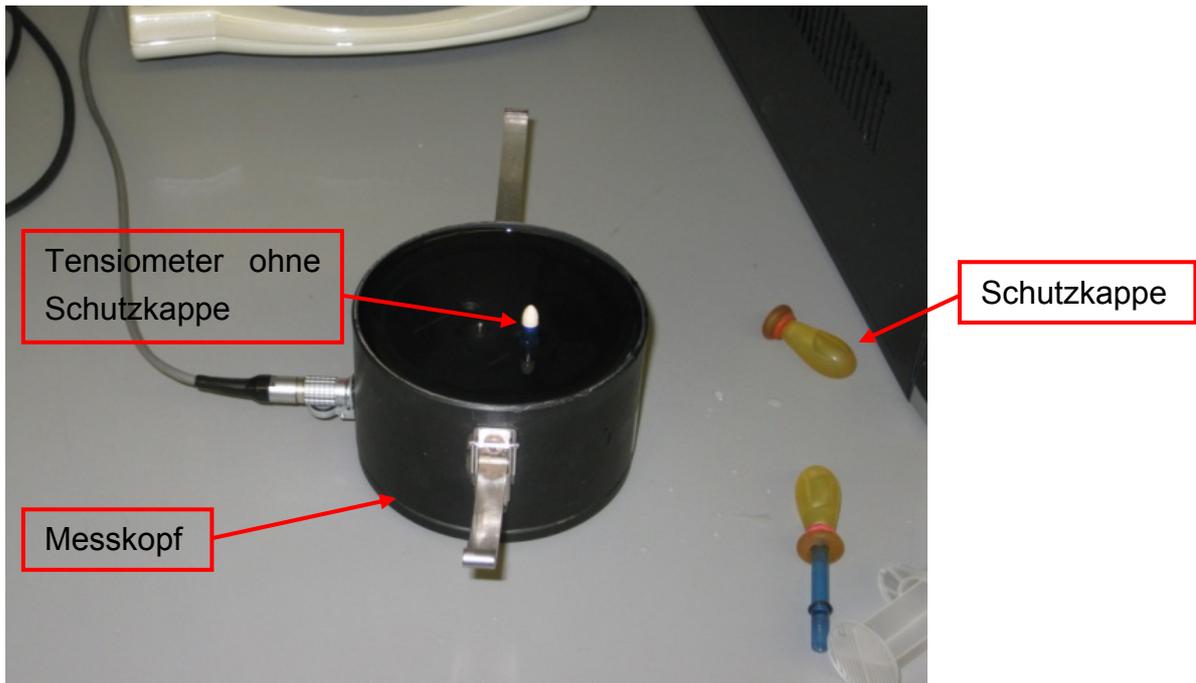


Abbildung 6.15: Eingeschraubter Tensiometer mit Schutzkappe

Darauf wird ein Tropfen Wasser geträufelt und schafft somit das Null-Potential (0 hPa), welches über die Anzeige am Computermonitor ersichtlich ist. Anschließend werden die Keramikspitze mit einem Papierhandtuch kurz berührt. Das Papierhandtuch saugt das gespeicherte Wasser aus der Keramikspitze und in weiterer Folge aus dem Schaft und erzeugt somit einen Unterdruck, welcher die Saugspannung wiedergibt. Wenn die Tensiometer gut befüllt sind sollten diese innerhalb von wenigen Sekunden einen Wert von ca. -800 hPa erreichen.

Um ein weiteres Austrocknen zu verhindern, werden die Schutzkappen wieder auf die Tensiometer gestülpt.

Im Anschluss an die Tensiometer- und Messkopfbefüllungskontrolle wird die Probe mit zwei Bohrungen versehen, um den Hohlraum für die Tensiometer zu schaffen. Um das genaue Maß der Bohrung herzustellen werden ein Bohradapter und ein Handbohrer verwendet. Der Bohradapter wird auf dem Stechzylinder aufgesetzt und mithilfe zweier unterschiedlicher eingestellter Tiefenstufen (abhängig von verwendeten Tensiometer) werden die Hohlräume für die einzuführenden Tensiometerkerzen geschaffen (Abbildung 6.16).

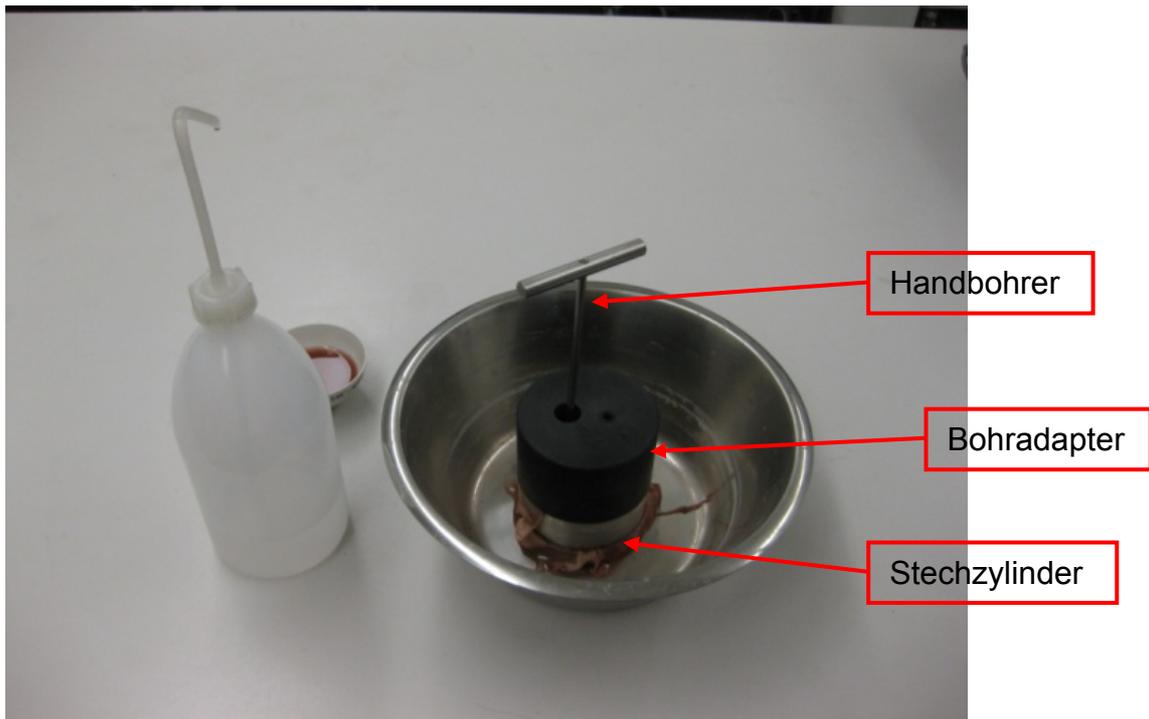


Abbildung 6.16: Herstellung der Tensiometerbohrungen

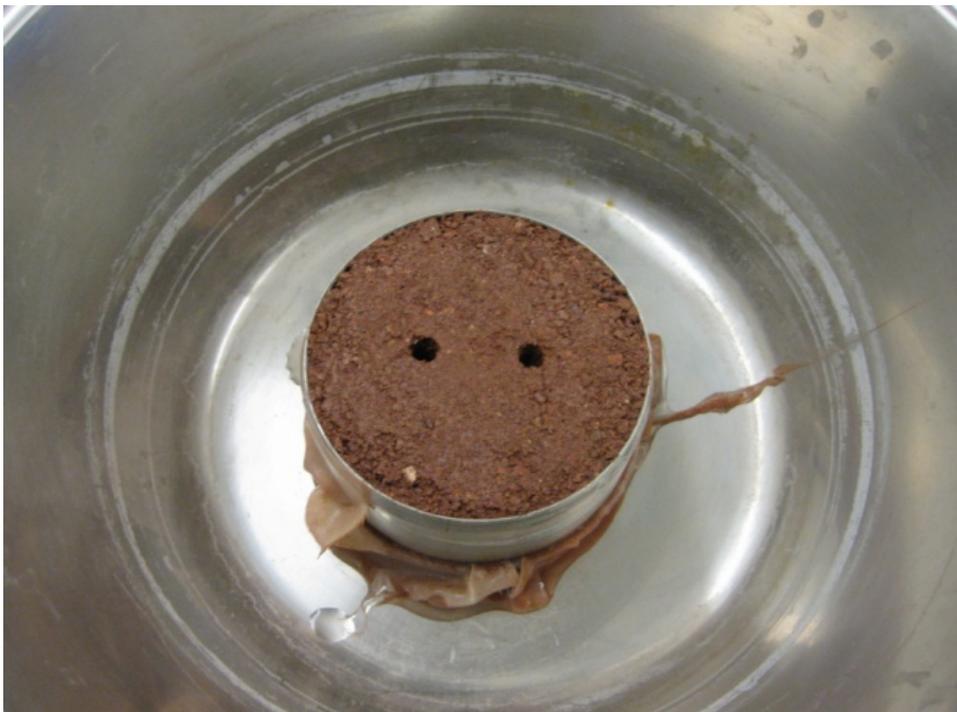


Abbildung 6.17: Fertige Tensiometeröffnungen

Um ein Verschmutzen der sensiblen Sensormembrane hintanzuhalten, werden vor Zusammenstecken des Messkopfes mit dem Stechzylinder zwei O-Ringe auf die Tensiometerschäfte bis auf den Boden des Messkopfes geschoben. Danach wird eine Silikondichtscheibe auf den Messkopf gelegt (siehe Abbildung 6.20).



Abbildung 6.18: Zusammengebauter Messkopf mit Silikondichtscheibe und O-Ringen

Daraufhin wird der Bohradapter heruntergenommen und der Messkopf mit den Tensiometern umgekehrt auf den Stechzylinder aufgesetzt. Hierbei ist es wichtig sich zu merken, welches Loch für welchen Tensiometer gemacht wurde, da diese eine unterschiedliche Länge haben. Anschließend wird der Messkopf mit Stechzylinder umgedreht und mit vorhandenen Klammern wird der Stechzylinder am Messkopf fixiert (siehe Abbildung 6.19).



Abbildung 6.19: Verkehrt aufgesetzter Messkopf mit Stechzylinder



Abbildung 6.20: Messkopf mit Stechzylinderprobe auf der Waage

Nach abschließender Säuberung des Messkopfes und des Stechzylinders wird die Probe auf die Waage gestellt, welche mit dem Auswertungs-PC verbunden ist (siehe Abbildung 6.20).

Nach Eingabe der Probandaten im Messprogramm muss auf die Probe ein Wasserfilm aufpipetiert werden, um gleiche Startbedingungen zu schaffen. Der Messvorgang wird gestartet.

Die Waage mit der Probe sollte keiner direkten Sonne, keinem Luftstrom oder keiner starken Temperaturschwankungen ausgesetzt sein, sowie an einem erschütterungsfreien Arbeitsplatz stehen.

6.5.1 Messergebnisse

Für diesen Versuch wurden insgesamt zehn Stechzylinder mit einer vorgegebenen Dichte von $1,30 \text{ g/cm}^3$ beprobt. Beispielhaft für diese Versuchsreihe wird hier der Stechzylinder 11 präsentiert. Die Ergebnisse der restlichen Stechzylinder werden im Anhang präsentiert. In Abbildung 6.21 ist das Ergebnis aus dem Hypropversuch dargestellt. Es zeigt die unterschiedlichen Verläufe der relativen Durchlässigkeit in Bezug auf ihre Sättigung ausgewertet nach den drei Modellen aus Kapitel 4.

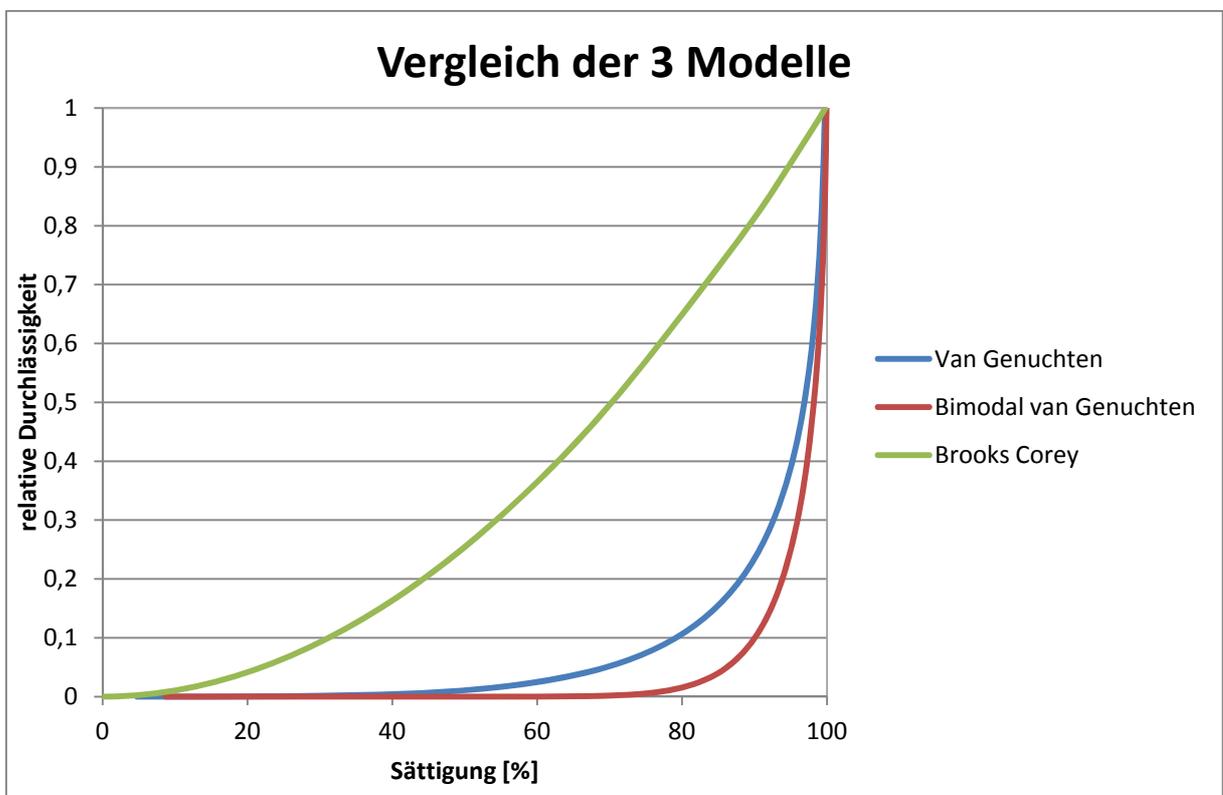


Abbildung 6.21: relative Durchlässigkeit – Sättigung Beziehung (STZ 11)

In Abbildung 6.22 ist der Vergleich der Wassergehälte in Abhängigkeit von der Saugspannung dargestellt. Die hier dargestellte Auswertung, erfolgte jeweils für die in Kapitel 4 beschriebenen Stoffgesetze.

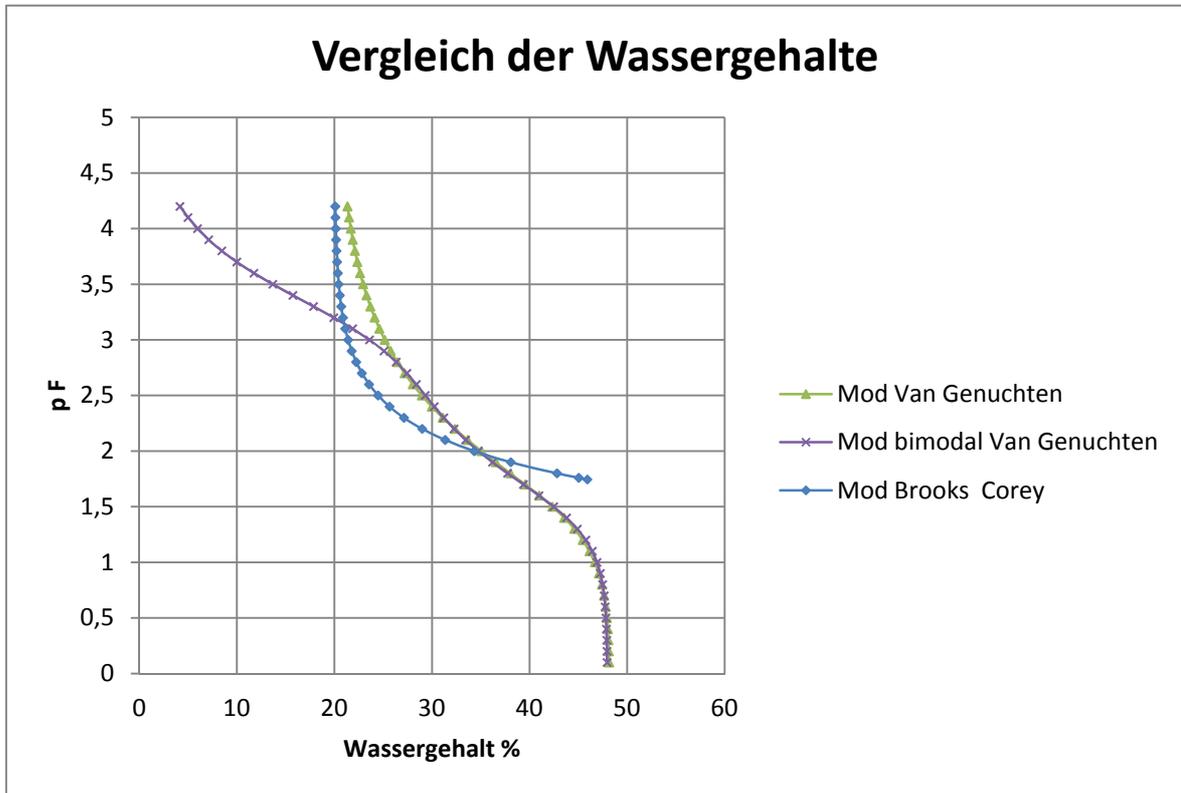


Abbildung 6.22: Vergleich der Wassergehalte (STZ 11)

Abbildung 6.23 zeigt den Vergleich der Durchlässigkeit in Bezug auf die Saugspannung. Die Auswertung erfolgte für die in Kapitel 4 beschriebenen Stoffgesetze.

Auffallend war bei den drei Auswertungen, dass das Modell nach Brooks & Corey die schlechtesten Übereinstimmungen im Vergleich zu den Modellen von Van Genuchten hatte. Eine genauere Analyse wird in Kapitel 7 durchgeführt.

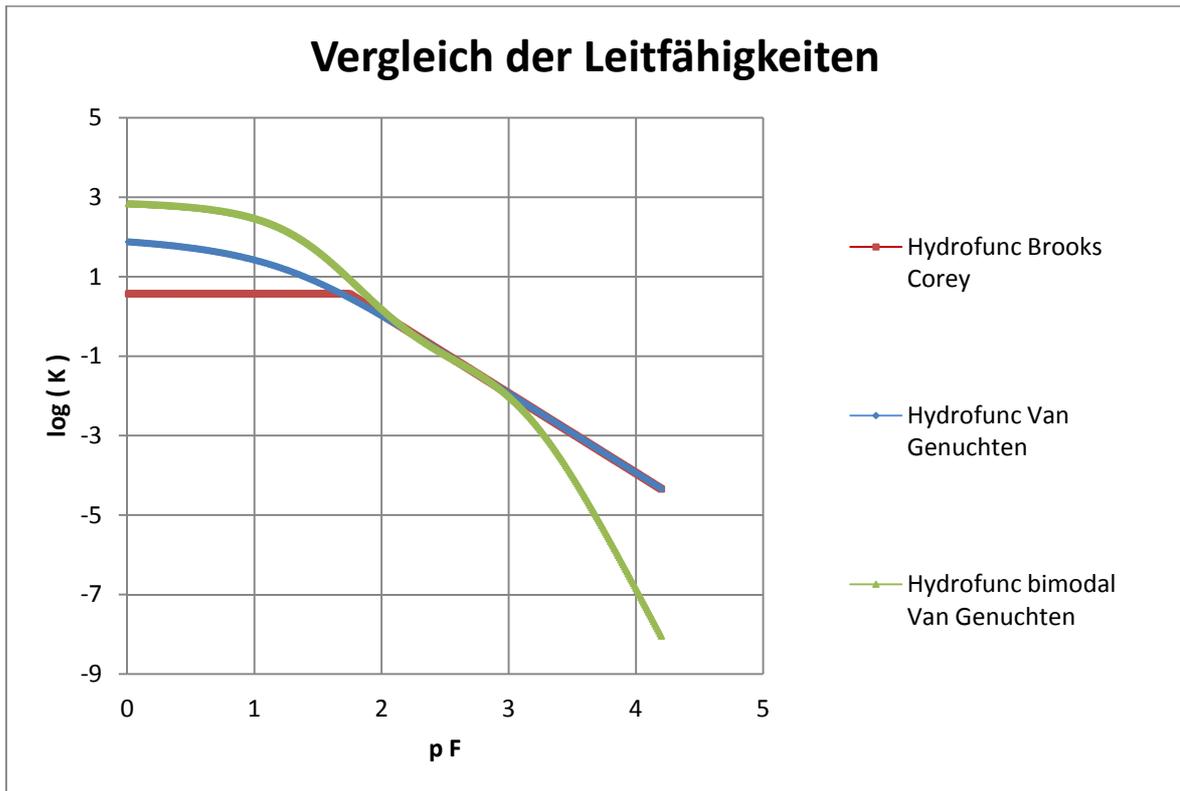


Abbildung 6.23: Vergleich der Leitfähigkeit (STZ 11)

6.6 Saugspannungsbestimmung mittels Sandkasten

Hier werden nach der unter Kap. 6.4 durchgeführten Durchlässigkeitsbestimmung die Proben aus dem Permeameter ausgebaut und in einer Wanne mit Wasser zwischengelagert (siehe Abbildung 6.13).

Das für den Permeameterversuch auf der unteren Seite der Stechzylinder mittels O-Ring befestigte Filtertuch wird für den später folgenden Sandkastenversuch ebenfalls benötigt. Das Filtertuch verhindert ein Herausfallen des Bodenmaterials aus dem Stechzylinder und schützt somit den Sandkasten vor einer Verschmutzung (siehe Abbildung 6.24).



Abbildung 6.24: Stechzylinder mit Filtertuch und O-Ring

Anschließend werden die Proben vorsichtig aus der Wanne genommen und gewogen, um das Gewicht und in weiterer Folge den Wassergehalt bei vollständiger Sättigung ($pF = 0$) zu bestimmen. Daraufhin werden die einzelnen Stechzylinder in den Sandkasten eingesetzt. Hierbei werden die Stahlzylinder leicht in den Sand gedrückt um einen guten Kontakt zwischen dem Probenkörper und dem Sand sicherzustellen (siehe Abbildung 6.25).



Abbildung 6.25: Eingesetzte Probenkörper im Sandkasten bei $pF = 0$ hPa

Normalerweise werden die Proben jetzt im Sandkasten mit Wasser aufgesättigt. Da aber im Vorhinein die Durchlässigkeit mittels Permeameterversuch bestimmt wurde, kann auf den Aufsättigungsvorgang verzichtet werden und man beginnt direkt mit der pF -Stufe = 0,4 hPa.

Zum Einstellen der pF -Stufe wird der Wasserstand mit Hilfe von Messschiene, Saugregulator und Verdunstungsreservoir auf -2,5 cm ($pF = 0,4$) eingestellt (siehe Abbildung 6.26). Die Stechzylinder haben eine Höhe von 5 cm daher entspricht die Höhe der Kontaktfläche zwischen Stechzylinder und Sandkasten genau der Hälfte des Stechzylinders (2,5 cm). Anschließend werden die Proben bei geschlossenem Sandkastendeckel ca. eine Woche ruhen gelassen, um einen Gleichgewichtszustand zu ermöglichen.

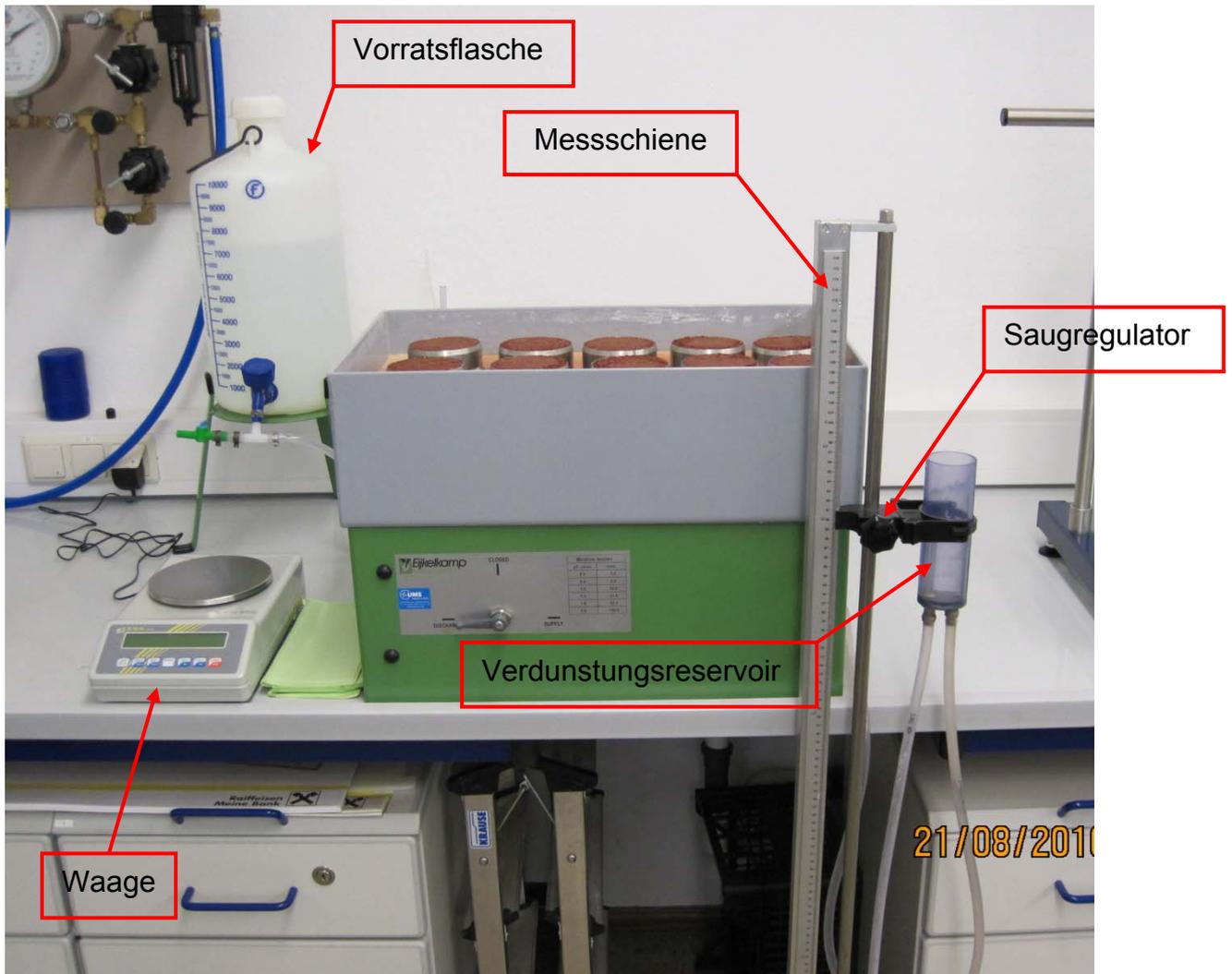


Abbildung 6.26: Sandkasten mit Regulierungsapparatur

Danach werden die Proben einzeln zum Wiegen entnommen um anschließend wieder an die exakt selbe Stelle im Sandkasten gesetzt. Auch wird die Probe wieder leicht in den Sand gedrückt, um einen guten Kontakt zwischen Probe und Sand zu erzielen. Dieser Wiegevorgang wird an den darauffolgenden Tagen wiederholt und erst nach Einstellen einer geringeren Abweichung des Wassergehaltes als 0,2 Vol-% wird der Messwert notiert und mit dem weiteren Absenken des Wasserstandes auf die nächsten Saugspannungsniveaus (1,0; 1,5; 1,8 und 2,0 pF) fortgefahren.

Diese Messmethode funktioniert mit Hilfe des Prinzips der hängenden Wassersäule, welche im Anschluss beschrieben ist.

6.6.1 Das Prinzip der hängenden Wassersäule

Die Bodenproben werden mit Wasser aufgesättigt und somit bei Zunahme des Matrixpotentials in ein Gleichgewicht gebracht. Das Matrixpotential wird durch Anlegen von negativem (Unterdruck) oder positiven (Überdruck) Druck erzeugt, wobei hier beim Sandkasten nur Unterdruck eingestellt werden kann. Überdruck kann nur mit Hilfe eines Drucktopfes hergestellt werden.

Abbildung 6.27 zeigt die Darstellung eines schematischen Querschnittes eines Sandkastens der Fa. UMS.

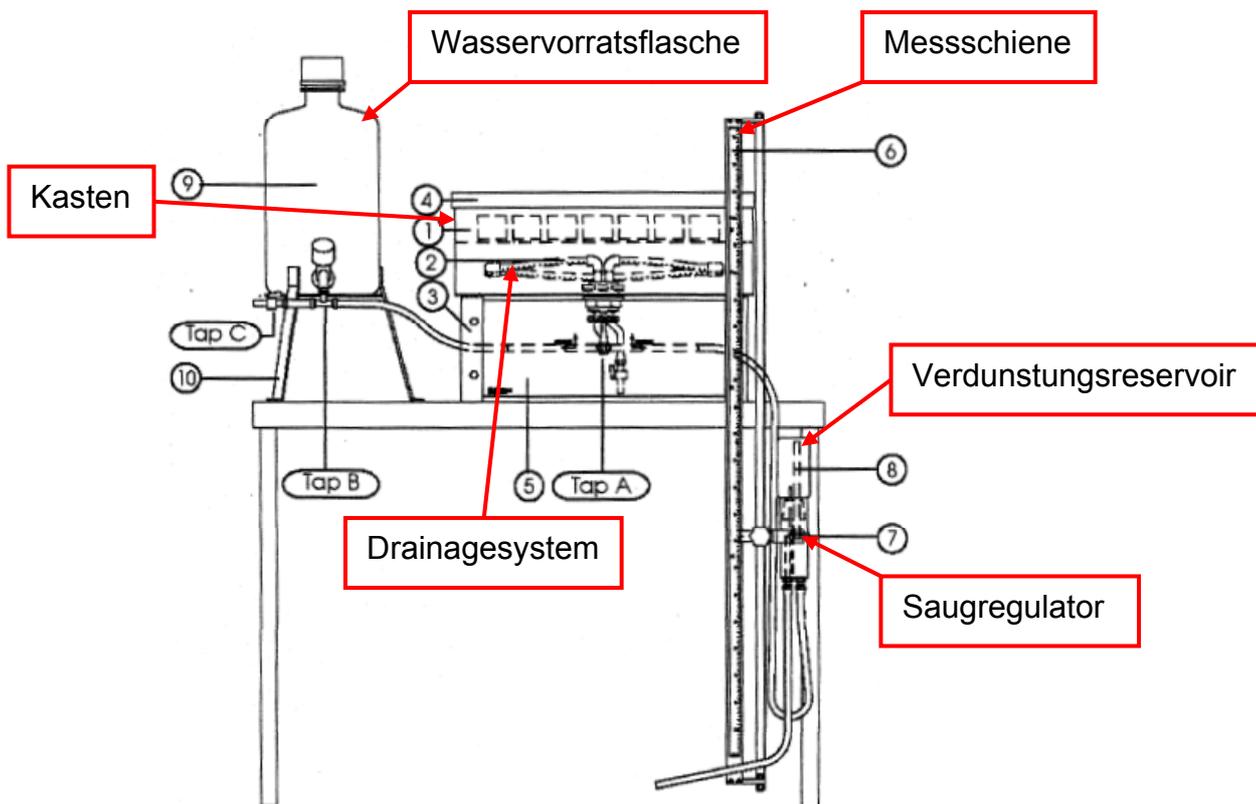


Abbildung 6.27: Schematischer Schnitt durch Sandkasten (Fa. UMS, 2008).

Der Unterdruck wird durch eine hängende Wassersäule erzielt. Abbildung 6.28 stellt das Prinzip der hängenden Wassersäule schematisch dar.

Die Hauptbestandteile sind der Filter (3), verschlossen mit einer Membrane (2) und das einseitig offene Steigrohr (4).

Die feinmaschige PVC Membrane bleibt solange gesättigt wie der Unterdruck nicht über die Kapillarfähigkeit der Membrane steigt. Wird das offene Ende des Rohres auf Höhe der Mitte der Bodenprobe (1) gebracht (1/2 h) wirkt dabei der Atmosphärendruck ($H=0$). Beim anschließenden Absenken des offenen Rohrendes wirkt eine Wassersäule von H cm auf die Probe, am offenen Rohrende (5)

liegt immer unverändert Atmosphärendruck an. Bei dichtem Kontakt zwischen Probe und Membrane leitet dabei das Wasser in der Membrane den negativen Druck weiter. Der relative Wassergehalt kann bestimmt werden, indem die Probe gewogen wird, nachdem sie das Gleichgewicht bei diesem Unterdruck eingestellt hat.

Die Dauer bis zum Erreichen des Feuchtigkeitsgleichgewichtes variiert je nach Bodentyp und liegt zwischen einem und drei Tagen (Fa. UMS: Bedienungsanweisung Sandkasten, 2009).

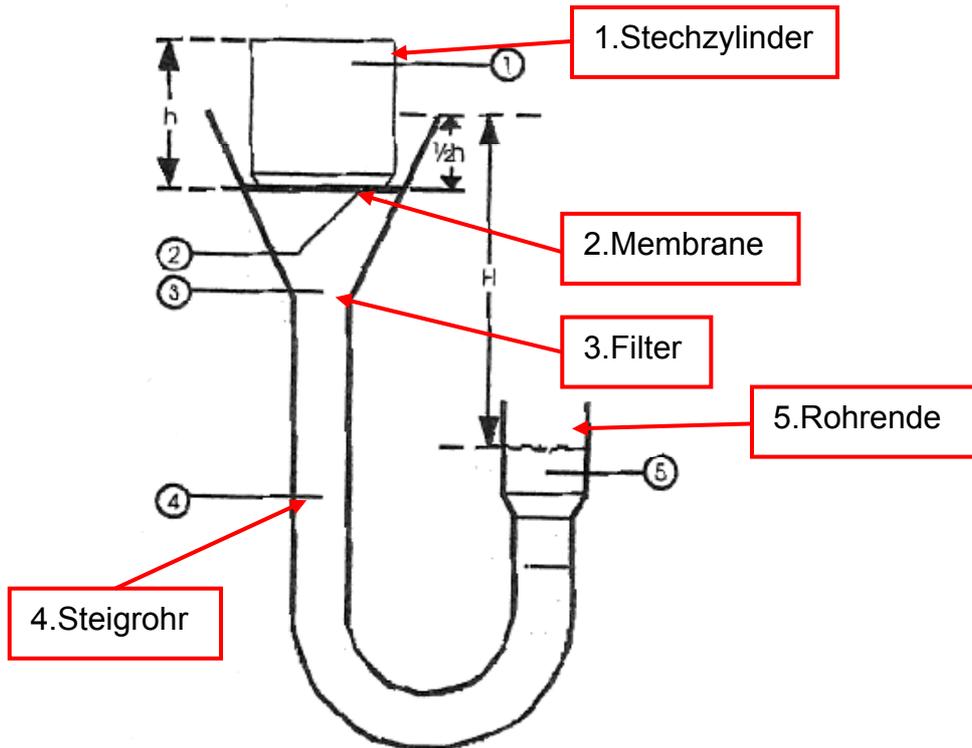


Abbildung 6.28: Schemaskizze hängende Wassersäule (Fa. UMS 2008)

6.6.2 Messergebnisse

Da bei der Durchführung der Messserie mit dem Sandkasten systembedingt nur bis $pF = 2,0$ hPa gemessen werden kann, benötigt man weitere Angaben um einen Vergleich zwischen den Ergebnissen von Hyprop- und Sandkastenversuch herzustellen. Hierbei befindet sich der Durchlässigkeitsbeiwert k in direkter Abhängigkeit zum Matrixpotential h und man trifft die Vereinfachung:

$$k, h = \text{const.} \quad (40)$$

$$h = f(\rho, w) \quad (41)$$

k	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
h	Höhenunterschied [m]
ρ	Dichte [g/cm ³]
w	gravimetrischer Wassergehalt [%]

Mithilfe dieser Vereinfachung ist nun ein Vergleich zwischen Hyprop- und Sandkastenversuch möglich.

Für diesen Versuch wurden insgesamt zehn Stechzylinder mit einer vorgegebenen Dichte von 1,39 g/cm³ getestet. Beispielhaft für diese Versuchsreihe wird hier nur der Stechzylinder 13 präsentiert. Die Ergebnisse der restlichen Stechzylinder befinden sich im Anhang.

In Abbildung 6.29 ist ein Ergebnis aus dem Sandkastenversuch dargestellt. Es zeigt die unterschiedlichen Verläufe der relativen Durchlässigkeit in Bezug auf ihre Sättigung ausgewertet nach den Modellen von unimodal Van Genuchten und bimodal Van Genuchten aus Kapitel 4.

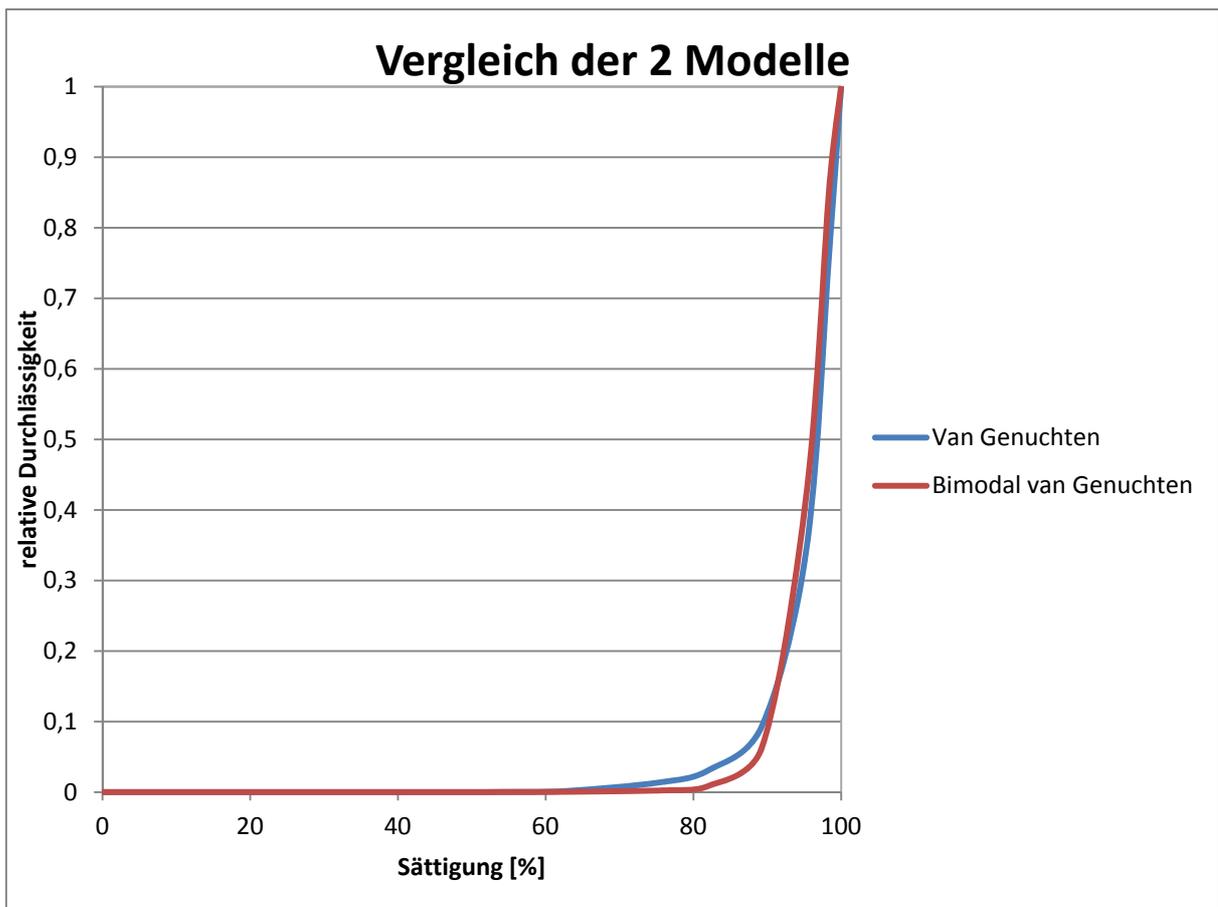


Abbildung 6.29: relative Durchlässigkeit – Sättigung Beziehung (STZ 13)

In Abbildung 6.30 ist der Vergleich der Wassergehälte in Abhängigkeit von der Saugspannung dargestellt. Die hier dargestellte Auswertung, erfolgte jeweils für das unimodale Van Genuchten und bimodale Van Genuchten Modell, der in Kapitel 4 beschriebenen Stoffgesetze.

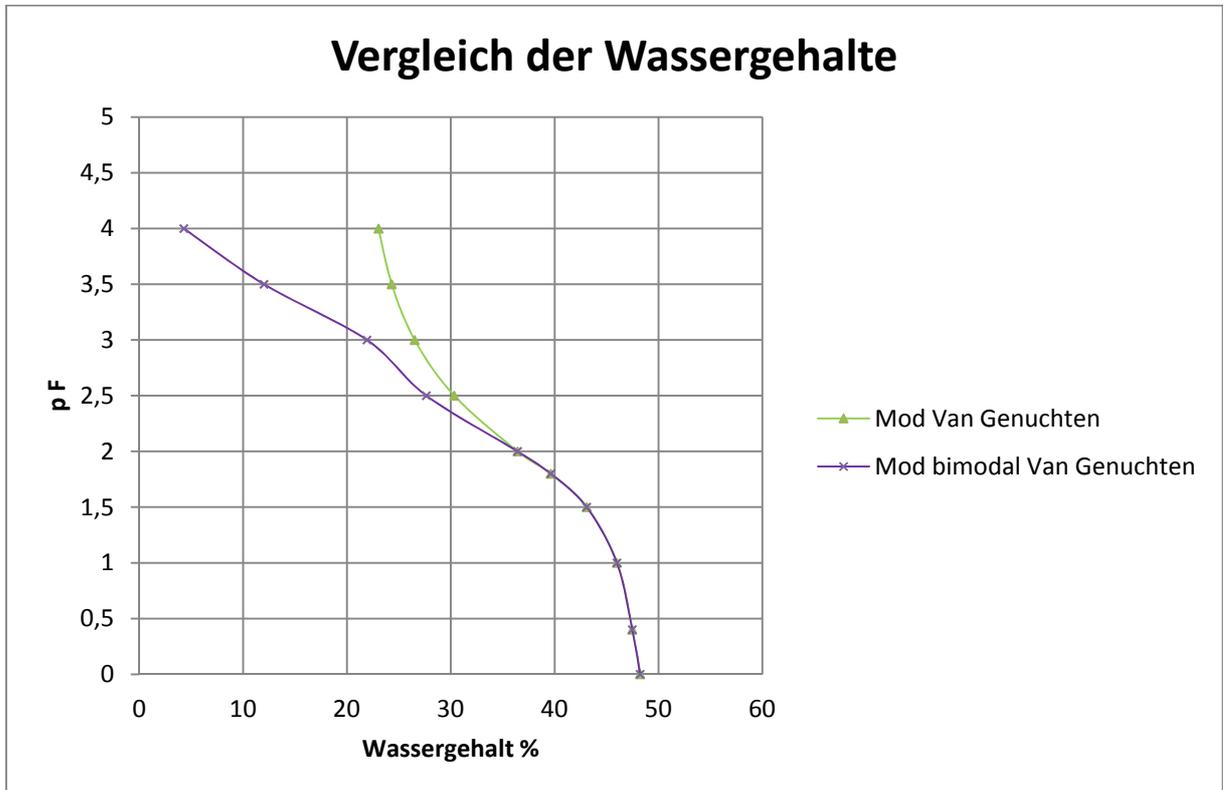


Abbildung 6.30: Vergleich der Wassergehalte (STZ 13)

Abbildung 6.31 zeigt den Vergleich der Durchlässigkeit in Bezug auf die Saugspannung. Die Auswertung erfolgte für die in Kapitel 4 beschriebenen Stoffgesetze nach unimodal Van Genuchten und bimodal Van Genuchten.

Aufgrund der Erkenntnis aus dem Hypropversuch, wurde auf eine Auswertung nach dem Brooks & Corey Modell verzichtet, da dieses Modell für Thermosand kein zufriedenstellendes Ergebnis liefert. Eine genauere Analyse wird im folgenden Kapitel 7 durchgeführt.

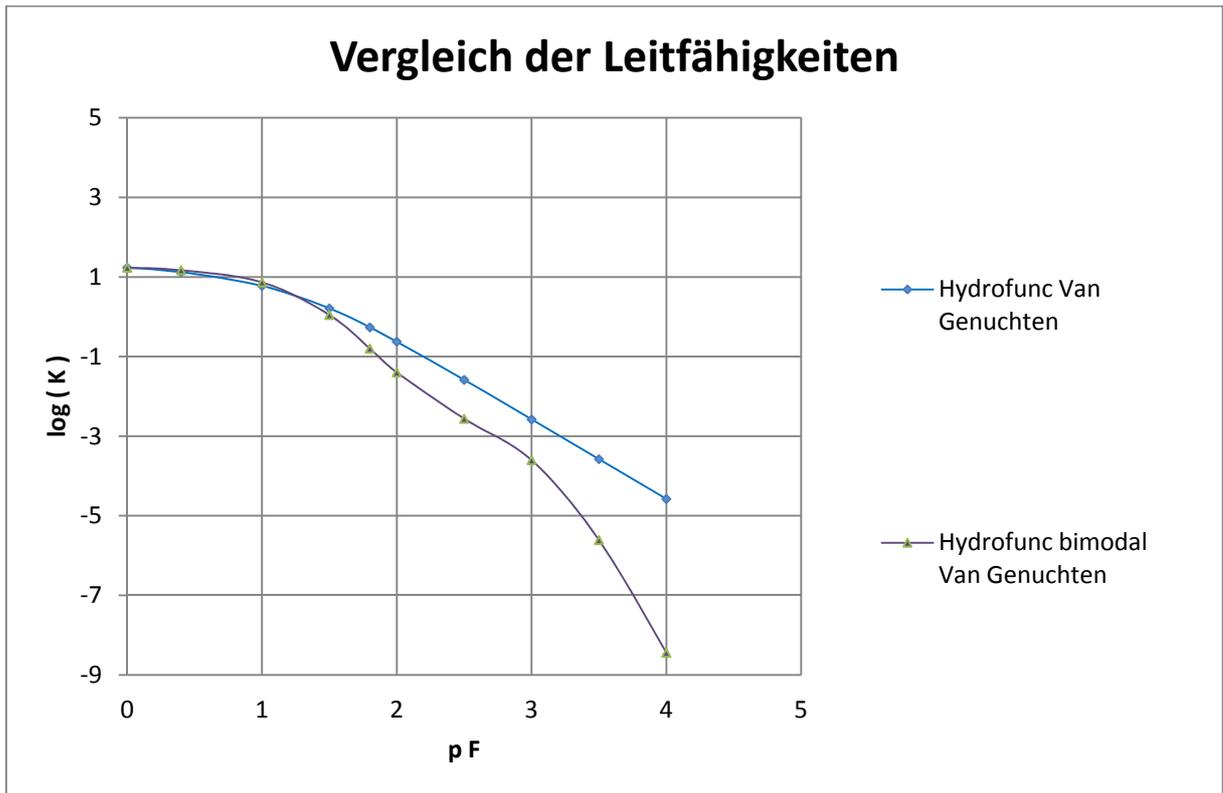


Abbildung 6.31: Vergleich der Leitfähigkeit (STZ 13)

7 Diskussion und Interpretation der Ergebnisse

Abschließend wird für die Auswertung der Versuchsergebnisse festgehalten, dass für die Bestimmung der relativen Durchlässigkeit zwei unterschiedliche Verfahren zur Anwendung gekommen sind:

- Hyprop-Verfahren
- Sandkasten-Verfahren

Bei jedem dieser Verfahren wurde eine Versuchserie, bestehend aus zehn Stechzylindern, getestet. Einen Unterschied zwischen den beiden Verfahren stellen nicht nur die Labortests selber dar, sondern auch die Proben. Diese wurden mit unterschiedlich vorgegebenen Dichten hergestellt. Für den Hyprop-Versuch wurde eine Trockendichte von $\rho = 1,30 \text{ g/cm}^3$ und für den Sandkasten-Versuch wurde eine Trockendichte von $\rho = 1,39 \text{ g/cm}^3$ vorgegeben.

In Abbildung 7.1 ist der Vergleich der relativen Durchlässigkeit-Sättigungsbeziehung für den Hyprop- und den Sandkastenversuch gemeinsam dargestellt, um die Unterschiede der Messergebnisse aufzuzeigen. Hierbei wurden das unimodale und das bimodale Van Genuchten Modell ausgewertet. Da das Brooks & Corey Modell keine passablen Ergebnisse lieferte, wurde auf eine Darstellung verzichtet. Eine Beschreibung der Ergebnisse erfolgt für den Hypropversuch in Kap. 7.1. Auf die Ergebnisse der Sandkastenversuchs wird in Kap. 7.2 näher eingegangen.

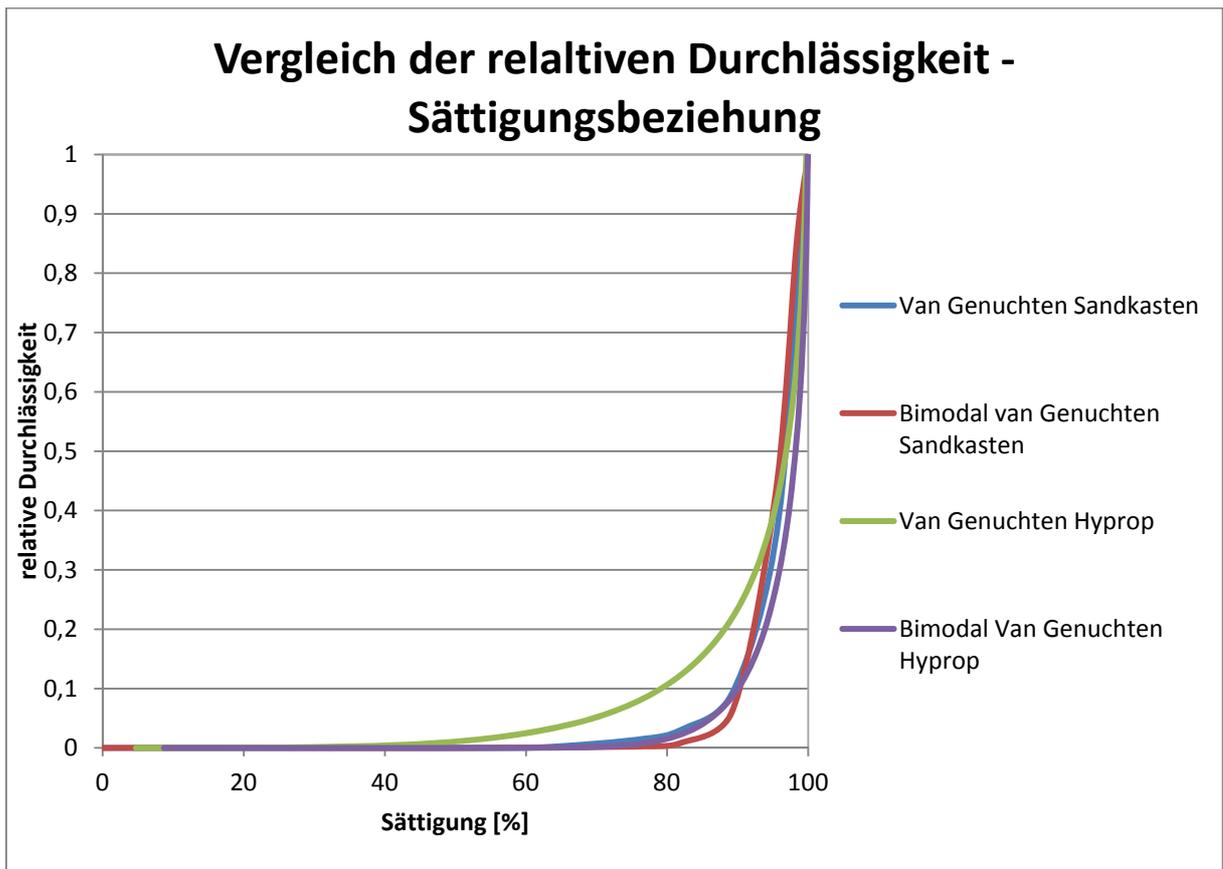


Abbildung 7.1: Vergleich relative Durchlässigkeit – Sättigung Beziehung für Hyprop- und Sandkastenversuch

Abbildung 7.2 zeigt den Vergleich der Wassergehalte in Abhängigkeit von der Saugspannung. Hier wurden ebenfalls das unimodale- und bimodale Van Genuchten Modell zusammen dargestellt, um die Unterschiede der Messergebnisse der beiden Laborversuche besser darzustellen.

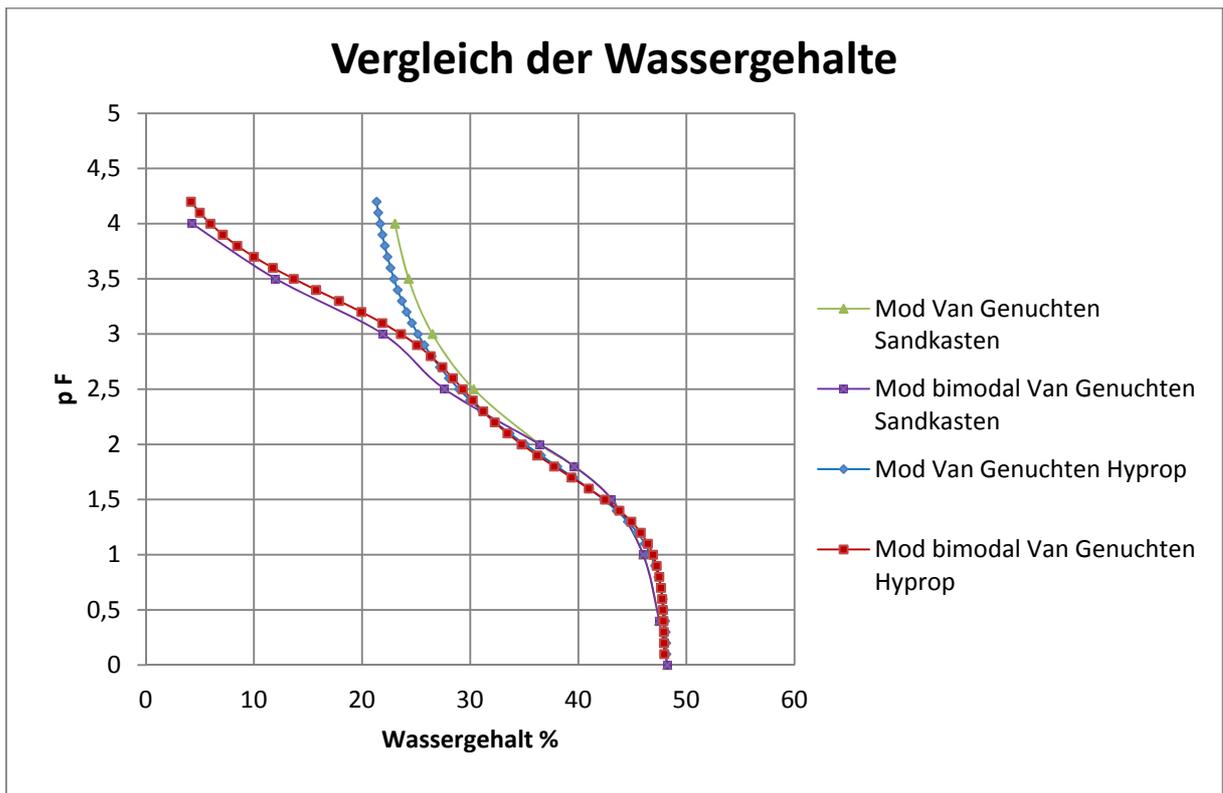


Abbildung 7.2: Vergleich der Wassergehalte für Hyprop- und Sandkastenversuch

Bei folgender Abbildung 7.3 wird der Vergleich der Leitfähigkeit von unimodalem- und bimodalem Van Genuchten Modell für den Sandkasten- und Hypropversuch, in einem gemeinsamen Diagramm, dargestellt. Eine genaue Beschreibung erfolgt für den Hypropversuch in Kapitel 7.1. Der Sandkastenversuch wird in Kapitel 7.2 näher erörtert.

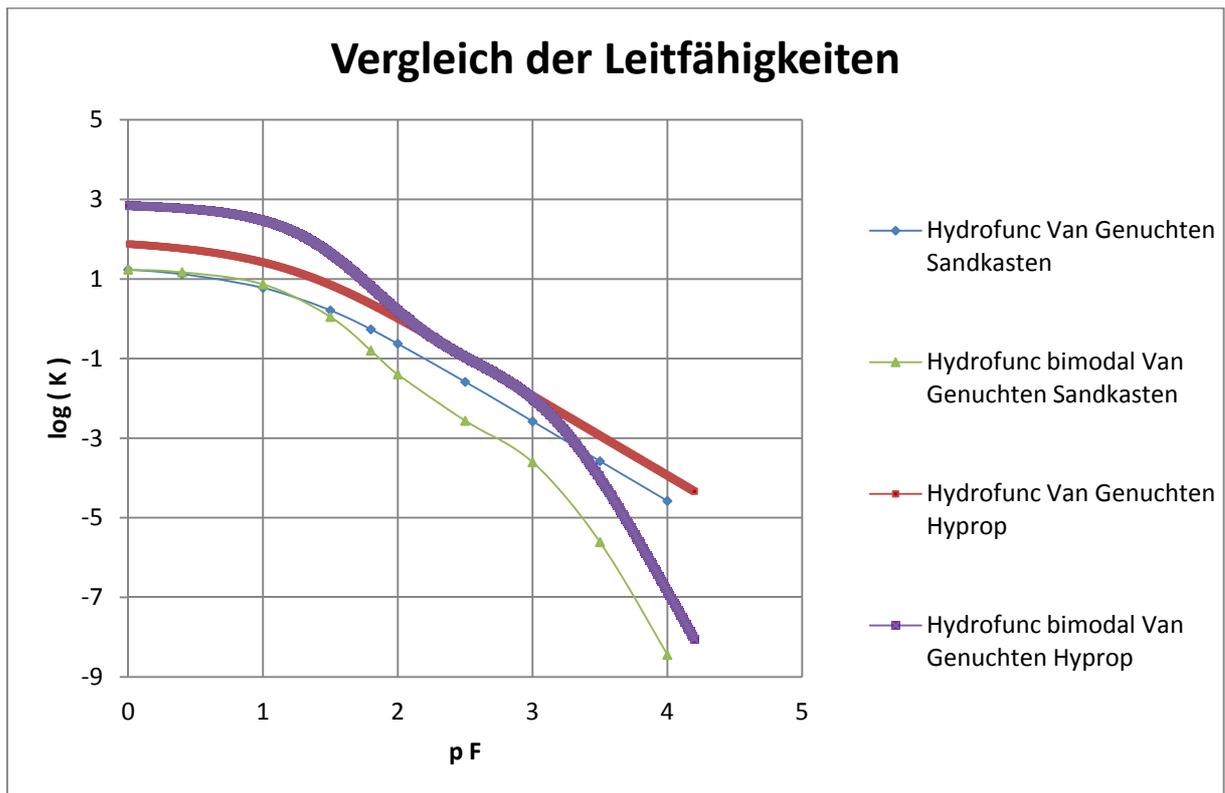


Abbildung 7.3: Vergleich der Leitfähigkeit für Hyprop- und Sandkastenversuch

7.1 Auswertung des Hyprop-Versuchs

Das Ergebnis des HYPROP-Versuches ergab eine gute Übereinstimmung der relativen Durchlässigkeit–Sättigung–Kurve (siehe Abbildung 6.21) nach den Modellen von „Van Genuchten/Mualem“ und „bimodal Van Genuchten/Mualem“. Das Modell nach Brooks & Corey weicht jedoch deutlich vom Verlauf der beiden anderen Kurven ab. Auch beim Vergleich der Wassergehalt–Saugspannung-Kurven hebt sich das Brooks & Corey Modell deutlich vom Verlauf der beiden „Van Genuchten/Mualem-Kurven“ ab und weist zudem nicht die, wie in Abschnitt 4.2 beschriebene, typische S-Form auf (siehe Abbildung 6.22). Da sich die Brooks & Corey Kurve auch bei allen anderen Stechzylindern (siehe Anhang) deutlich vom Verlauf der Van Genuchten/Mualem bzw. bimodale Van Genuchten/Mualem Kurve abhebt, kann davon ausgegangen werden, dass das Modell nach Brooks & Corey für diesen Boden nicht geeignet ist.

Der Unterschied zwischen den Modellen von Van Genuchten (uni- und bimodal) und Brooks & Corey besteht darin, dass die Brooks & Corey Funktion beim Luft-eintrittspunkt ein abruptes Abknicken aufweist, wohingegen die Van Genuchten Funktion ein weiches Umbiegen an dieser Stelle aufzeigt (siehe Abbildung 6.23).

Das Brooks & Corey Modell eignet sich gut für die Beschreibung der Wasserspannung-Wassergehalt-Kurven (siehe Abbildung 6.22) für trockene, grobe Böden (Durner 1991), aber eher schlecht für feinstrukturierte Böden nahe der Sättigung (Van Genuchten & Nielsen, 1985).

Auffallend ist der relativ steile Abfall der relativen Durchlässigkeits-Sättigung-Kurve. Bei 90% Sättigung reduziert sich die Durchlässigkeit des Thermosandes schon auf ca. 25% der Durchlässigkeit gegenüber Vollsättigung. Bei einer Reduzierung der Sättigung auf 50% ist die relative Durchlässigkeit der Bodenprobe praktisch 0, d.h. die Tortuosität geht gegen unendlich. Dieses Ergebnis war aufgrund der Probenzusammensetzung zu erwarten, da es sich bei Thermosand um einen gering kiesig, schluffigen Sand handelt, welcher eine sehr gute Entwässerungseigenschaft aufweist.

Ein Strömen des Porenwassers ist somit nur dann möglich, wenn die Poren gesättigt sind. Das bedeutet, dass bei einer Zunahme der Saugspannung (pF) und gleichzeitiger Abnahme des Wassergehaltes, die Wasserleitfähigkeit immer kleiner wird, denn die dadurch frei werdenden Poren füllen sich mit Luft und somit verbleibt nur mehr das Restwasser in den Zwickeln der einzelnen Körner übrig.

Einen großen Vorteil der Hyprop-Methode bilden die voll computerunterstützte Durchführung der Messungen sowie deren Auswertung. Lediglich das Vorbereiten des Messsystems für die einzelnen Messungen ist ein etwas aufwendigerer Prozess. Nach dem Verbinden der Proben mit dem Hypropssystem und dem Starten der Messkampagne arbeitet das Messsystem vollkommen selbstständig. Ein weiterer großer Vorteil besteht in der Messgenauigkeit des Systems, welche laut Herstellerangabe bei 1,5 hPa (im Messbereich 0-800 hPa) liegt.

Beim Vergleich der Leitfähigkeit (siehe Abbildung 6.23) ist außerdem aufgefallen, dass die Anfangswerte der Durchlässigkeit nicht ident sind. Dies wird erklärt, dass das Hyprop-System jeweils nur einen kleinen Anteil an Messpunkten für die Leitfähigkeit misst. Der Messbereich hierfür lag zwischen 2 und 3 pF. Die restlichen Punkte extrapolierte die Software tensioVIEW[®] in Abhängigkeit des vorab eingestellten Berechnungsmodells (uni- oder bimodal Van Genuchten oder Brooks & Corey) sowie der Durchlässigkeit bei Vollsättigung.

7.2 Auswertung des Sandkasten-Versuchs

Wie in Kap. 7.1 beschrieben, liefert das Brooks & Corey Modell für den vorliegenden Versuchsboden keine zufriedenstellenden Ergebnisse und deshalb wurde bei der Auswertung des Sandkasten-Versuchs auf dieses Modell verzichtet.

Auch hier ist der relativ steile Abfall der relativen Durchlässigkeit–Sättigung–Kurve (siehe Abbildung 6.29) auffallend. Anders als beim Hyprop-Versuch fällt bei ca. 90% Sättigung die relative Durchlässigkeit des Thermosandes schon auf ca. 10% der Durchlässigkeit gegenüber Vollsättigung. Bei einer weiteren Reduzierung der Sättigung auf 60% ist die relative Durchlässigkeit der Bodenprobe praktisch nicht mehr vorhanden und geht gegen Null. Im Vergleich dazu zeigt die Abbildung 2.11, dass die nicht weiter reduzierbare Restsättigung bei ca. 17% liegt.

In Abbildung 6.29 ist ebenfalls erkennbar, dass beim Start zur Reduzierung der Sättigung die relative Durchlässigkeit von Beginn an langsamer fällt als beim Hyprop-Versuch (siehe Abbildung 6.21). Dieser Umstand kann mit der Ungenauigkeit des Sandkasten-Versuchs erklärt werden.

Beim Vergleich der Wassergehalt–Saugspannung–Kurve (siehe Abbildung 6.30) mit dem Hyprop-Versuch (Abbildung 6.22) ist erkennbar, dass beide Versuche gut korrelieren und sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Ein erwartetes Ergebnis, dass der Endwassergehalt infolge der höheren Einbaudichte höher sein sollte, konnte nicht bestätigt werden. Im Gegensatz dazu liefert der Vergleich der Leitfähigkeiten (siehe Abbildung 6.31) das erwartete Ergebnis. Je grösser die Saugspannung (pF) desto geringer ist die Leitfähigkeit. Die Leitfähigkeit liegt beim Hyprop-Versuch bei einer Saugspannung von pF = 4 in einem Bereich von ca. -4 bis -7, wohingegen beim Sandkasten-Versuch bei gleicher Saugspannung von pF = 4 die Leitfähigkeit in einem Bereich von ca. -5 bis -9 reicht. Dies erklärt, dass bei einer Zunahme der Saugspannung aus einem 2 Phasen-Gemisch (Thermosand und Wasser) des Probekörpers eine dritte Phase (Luft) (siehe Abbildung 2.1) den frei werdenden Porenraum einnimmt und dadurch die Durchgängigkeit der mit Wasser gefüllten Porengänge unterbrochen wird. Dadurch muss das entziehende Wasser einen längeren Weg gehen und somit wird die Leitfähigkeit verringert.

Ein Nachteil der Sandkasten-Versuchs besteht darin, dass mit dieser Methode nur eine Saugspannung von bis zu maximal pF = 2,0 hPa gemessen werden kann. Des Weiteren ist diese Messmethode im Vergleich zur Hyprop-Methode ungenau, da bei den einzelnen Wiegevorgängen bei niedriger Saugspannung immer ein kleiner Anteil des Wassers aus der Probe abtropft. Somit sind diese Wiegeergeb-

nisse mit einer gewissen Ungenauigkeit systembedingt behaftet und in weiterer Folge auch die Ermittlung des volumetrischen Wassergehaltes.

Ein großes Problem stellte die Ermittlung der teilgesättigten Leitfähigkeit dar. Da es beim Sandkasten-Versuch um eine rein mechanisch ablaufende Beprobung handelt, werden hier nur der volumetrische Wassergehalt und die dazugehörige Saugspannung ermittelt. Die relative Leitfähigkeit kann nur bei Vollsättigung bestimmt werden und liefert somit nur einen Startpunkt aber keine weiteren Messergebnisse. Um trotzdem eine annehmbare Lösung zu finden, wurde eine ingenieurmässige Annahme getroffen. Man setzt die Leitfähigkeit bei Vollsättigung aus dem Hyprop-Versuch mit dem aus dem Sandkasten-Versuch in Korrelation und erhielt somit eine fixe Differenz zwischen den beiden Werten aus den Versuchen. Diese Differenz wurde nun bei allen weiteren Messstufen des Hyprop-Versuchs in Abzug gebracht und somit ergaben sich die Werte für die relative Durchlässigkeit. Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass der Sandkasten-Versuch nicht für die Bestimmung der relativen Leitfähigkeit herangezogen werden kann. Stattdessen werden mit dieser Methode die Saugspannungs-Wassergehalts-Charakteristik, Bodenwasserdurchlässigkeit, Bodensaugwirkung sowie die kapillare Leitfähigkeit bestimmt.

8 Kostenermittlung für die Durchführung der Laborversuche zur Bestimmung einer pF-Kurve und der relativen Durchlässigkeit von Thermosand bei einer bestimmten Lagerungsdichte

In diesem Abschnitt werden die Kosten auf Grundlage einer Zuschlagskalkulation nach ÖNORM B 2061 für die Durchführung der Laborversuche ermittelt. Da es aber für die verwendeten Laborgeräte keine eigenen Werte für Reparatur, Abschreibung und Verzinsung usw. gibt, werden diese aus der Gruppe Y (Laborgeräte) der Österreichischen Baugeräteliste 2009 herangezogen. Somit dienen für die nachfolgende Kalkulation folgende Unterlagen als Grundlage:

- die ÖNORM B 2061 (Preisermittlung für Bauleistungen, 1999)
- die Österreichische Baugeräteliste 2009 (ÖBGL)
- die Tarifliste für wissenschaftliche Untersuchungen am Geotechnischen Labor des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau der TU-Graz (2013)
- das Kalkulationsformblatt K6E für die Ermittlung der Laborgerätekosten
- das Kalkulationsformblatt K7 für die Preisermittlung

8.1 Kalkulation nach ÖNORM B 2061

Die ÖNORM B 2061 enthält Richtlinien für die Preisbildung von Bauleistungen gemäß ÖNORM B 2110 (Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen, 2009) und ÖNORM B 2117 (Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen an Verkehrswegen, 2002). Sie gibt Hinweise für den Aufbau der Kalkulation und regelt die Darstellung der Preisermittlung. Die Norm dient in weiterer Folge auch als Grundlage für Überprüfung der Angemessenheit der Preise.

Die in der Baukalkulation vorkommenden Kosten sind in der ÖNORM B 2061 angeführt und werden wie folgt in sechs Kostenarten unterteilt:

- Personalkosten
- Materialkosten

Kostenermittlung für die Durchführung der Laborversuche zur Bestimmung einer pF-Kurve und der relativen Durchlässigkeit von Thermosand bei einer bestimmten Lagerungsdichte

- Gerätekosten
- Fremdleistungskosten
- Zinskosten
- andere Kosten

Bezugnehmend auf die oben angeführten Kostenarten werden nachstehende Kosten ermittelt:

- Einzelkosten
- Baustellengemeinkosten
- Geschäftsgemeinkosten
- sonstige Gemeinkosten
- Bauzinsen
- Wagnis
- Gewinn

Des Weiteren ist in dieser Norm beschrieben, wie die Kosten auf einzelne Kostenträger umgelegt werden können und welche Kostenanteile es gibt. Diese setzen sich aus den Mittellohn-, den Material- und den Gerätekosten zusammen.

Die Mittellohnenkosten werden mithilfe des Kalkulationsformblattes K3, die Materialkosten mit dem Kalkulationsformblatt K4 und K5 ermittelt. Für die Berechnung der Gerätekosten werden die Kalkulationsformblätter K6 bzw. K6E verwendet.

Der Preis für die Leistung wird im Kalkulationsformblatt K7 unter Zusammenfügen der oben aufgezählten Formblätter K3 bis K6E ermittelt.

Kostenermittlung für die Durchführung der Laborversuche zur Bestimmung einer pF-Kurve und der relativen Durchlässigkeit von Thermosand bei einer bestimmten Lagerungsdichte

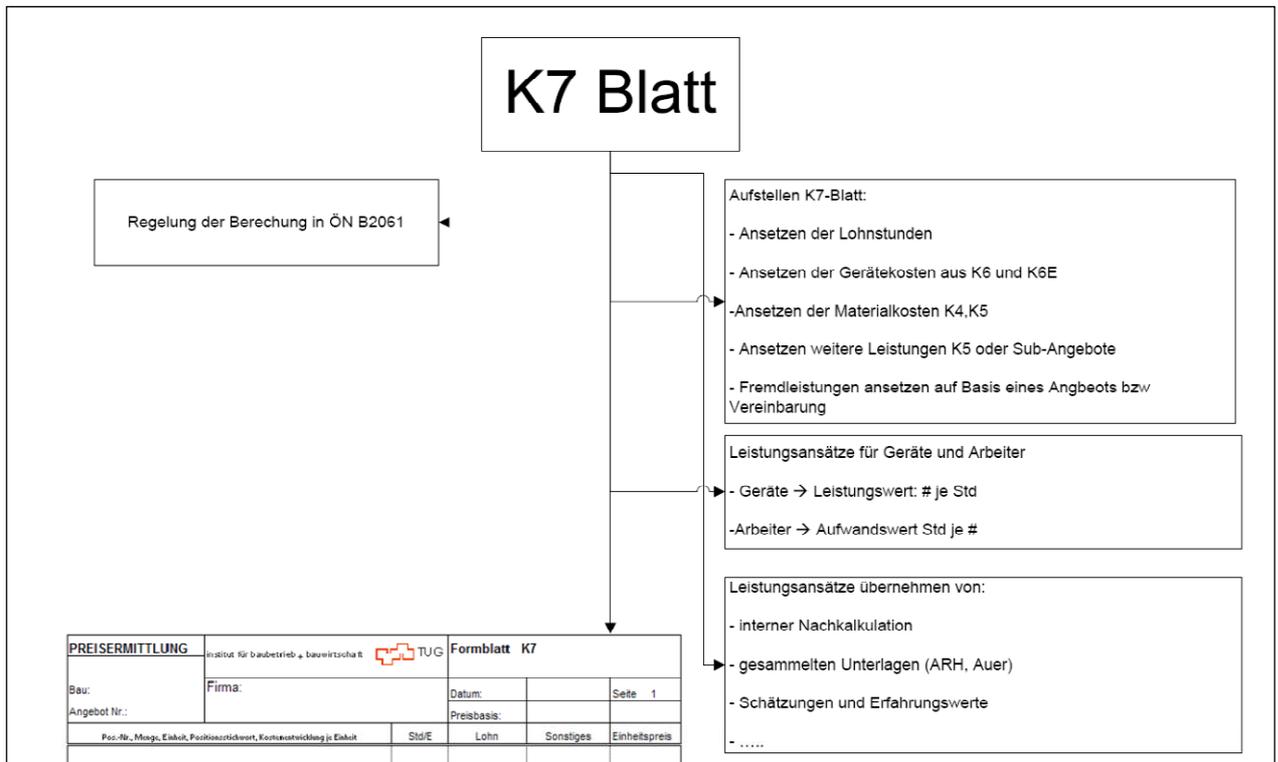


Abbildung 8.1: Aufbau des Kalkulationsformblattes K7, Institut f. Baubetrieb u. Bauwirtschaft, TU Graz, 2009

8.1.1 Die Österreichische Baugeräteliste

In der österreichischen Baugeräteliste (ÖBGL) sind alle gängigen Baumaschinen sowie erforderliche Baustellenausstattungen und Laborgeräte angeführt. Die einzelnen Positionen der ÖBGL betrachten die technischen Durchschnittswerte des jeweiligen Gerätes. Da die ÖBGL aber nur ca. alle zehn Jahre neu aufgelegt wird, müssen die Werte in der Zwischenzeit an den Markt angepasst werden. Dies geschieht mit einer Indexanpassung. Die durchschnittlichen Anschaffungskosten für 2012 müssen mit einem Faktor von 1,125 (Großhandelspreisindex für Baumaschinen 2009) multipliziert werden, da die angegebenen Werte in der ÖBGL aus dem Jahre 2008 stammen und dies die Anpassung an den Großhandelspreisindex darstellt. Der Großhandelspreisindex ist die statistische Preisentwicklung der ÖBGL und wird von der Statistik Austria jährlich veröffentlicht.

Kostenermittlung für die Durchführung der Laborversuche zur Bestimmung einer pF-Kurve und der relativen Durchlässigkeit von Thermosand bei einer bestimmten Lagerungsdichte

8.1.2 Geräteleistung und Gerätekosten

Bei der Berechnung der Gerätekosten wird zwischen Vorhaltegeräten und Leistungsgeräten differenziert. Leistungsgeräte werden einer Tätigkeit direkt zugeordnet (z.B.: Bodenaushub in €/m³). Für die Berechnung der Leistungsgeräte sind treffende Angaben über die speziellen Gerätekosten (z.B.: €/Einsatzstunde) und den Leistungsansatz (z.B.: m³/Einsatzstunde) erforderlich. Die Bestimmung der Geräteleistung basiert zum großen Teil auf Erfahrungswerten sowie Literaturwerten.

Vorhaltegeräte werden für mehrere Tätigkeiten benötigt und können somit nicht mehr direkt einer Leistung zugeordnet werden. Diese Geräte (z.B.: Laborgeräte) werden pauschal in €/Monat angegeben. (Steirer, 2010)

Die Gerätekosten bestehen somit aus:

- Vorhaltekosten (Abschreibung, Verzinsung, Reparatur)
- Betriebskosten (Betriebs- und Schmiermittel, Wartung, Pflege)
- Einrichtungskosten (An- und Abtransport, Auf- und Abbau)
- Sonstige Kosten (Lager, Verwaltung, Versicherung, Steuern)

8.1.3 Kalkulationsgrundlagen für die Berechnung der Versuchskosten

8.1.3.1 Gerätekosten

Die Anschaffungswerte für die verwendeten Geräte belaufen sich laut Angabe vom Labor des Institutes für Erdwissenschaften Bereich Geologie und Paläontologie der Karl-Franzens-Universität auf:

- Permeameter → € 12.000.-
- Sandkasten → € 2.400.-
- Hyprop → € 11.000.-

Da es sich bei der hier gezeigten Preisbestimmung um eine typische Baukalkulation handelt, welche auf der ÖBGL 2009 basiert, sind die im Speziellen angeführten Laborgeräte nicht enthalten. Trotzdem kann man für die Berechnung der Geräte-

kosten die ÖBGL 2009 heranziehen, indem man ähnliche Geräte und deren Eingangswerte für Abschreibung & Verzinsung und Reparatur verwendet.

Für die etwas robusteren Laborgeräte (Permeameter und Sandkasten) werden als Vergleichsgerät aus der ÖBGL ein Bewehrungssucher und ein Permeabilitätstester ausgewählt. Diese Geräte haben ähnlich hohe Anschaffungswerte. Für die weitere Berechnung werden die gleichen Prozentsätze für Abschreibung und Verzinsung (A+V) sowie für Reparatur (Rep.) verwendet. Für die äußerst empfindliche Hyprop-Garnitur wird ein elektronisches Tachymeter mit einem ähnlich hohen Anschaffungswert herangezogen.

Bei der Verwendung der ÖBGL werden grundsätzlich die Werte für A+V und Rep. abgemindert, da die Neuwerte dieser Geräte aus statistisch gemittelten Werten stammen und diese meist weit über den tatsächlichen Anschaffungskosten liegen. Da es sich in diesem speziellen Fall aber um „echte“ Neuwerte handelt, wird von einer Reduzierung der A+V und Rep.-Werte abgesehen.

8.1.3.2 Lohnkosten

Um eine möglichst genaue Preisgestaltung zu erzielen, wurden bei allen durchgeführten Versuchen die benötigten Zeiten notiert. Die Zeitangaben fließen bei der Kalkulation im K7-Blatt ein. Da die Höhe der Personalkosten im universitären Bereich nur geschätzt werden kann, und das Labor des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau an der TU-Graz sich ebenfalls am Marktpreis orientiert, wurden die Lohnkosten (€/h) aus dessen Tarifliste entnommen.

8.1.3.3 Gemeinkosten

Die für die Durchführung entstehenden Gemeinkosten wie z. B.: Miet-, Kopier-, EDV-Ausstattungs-, und Verwaltungskosten werden ebenfalls aus der Tarifliste des Labors des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau entnommen, jedoch mit 5% auf insgesamt 25% aufgeschlagen, da für die Durchführung der Versuche nur die Hauptgeräte bewertet wurden. Diverse Waagen, Probeschalen und Trocknungsofen werden auch für andere Versuche eingesetzt und finden sich kostenmäßig im Gesamtzuschlag wieder.

8.2 Kostenermittlung für Permeameterversuch

Die Ermittlung der Kosten für den Permeameterversuch setzen sich aus den Gerätekosten und den Lohnkosten für die Durchführung und Auswertung der Beprobung zusammen (siehe Anlage 27 + 34). Auf eine Variation der Auslastung der Durchlässigkeitsbestimmung mit Permeameter wurde verzichtet, da es sich bei der Bestimmung der Durchlässigkeit um einen eigenständigen Versuch handelt. Deswegen, und weil bei Laborgeräten nicht von einer Vollauslastung ausgegangen werden kann, wurde die Auslastung mit einer Annahme von 50 % festgesetzt. Diese entspricht einer Auslastung von durchschnittlich zehn Arbeitstagen oder einem Einsatz an jedem zweiten Tag im Monat.

Die Kosten belaufen sich auf ca. € 529.- pro Serie Stechzylinder. Für die Versuchsdurchführung und Auswertung einer Versuchsreihe wurden insgesamt 8,3 Stunden benötigt. Nach genauerer Betrachtung des K7-Blattes wird erkennbar, dass für den Permeameterversuch ca. 85% der Zeit (entspricht 7 Std.) für die Durchführung des Versuches benötigt wurden und lediglich 1,3 Stunden für die Auswertung.

8.3 Kostenermittlung für Hypropversuch

Die Ermittlung der Kosten für den Hypropversuch setzen sich aus den Gerätekosten und den Lohnkosten für die Durchführung und Auswertung der Beprobung zusammen (siehe Anlage 28 – 30 und 35 - 37). Da bei Laborgeräten nicht von einer Vollauslastung ausgegangen werden kann, wurde für diesen Versuch eine Variation der Auslastung mit 20%, 33% und 50% berechnet. Die damit verbundene Auslastung beläuft sich somit auf durchschnittlich 4, 7 und 10 Arbeitstage.

Die Kosten für die Versuchsdurchführung belaufen sich je nach Auslastung von € 1.156.- bis € 1.254.- pro Serie Stechzylinder. Für die Versuchsdurchführung und Auswertung einer Versuchsreihe wurden 14,3 Stunden benötigt. Nach genauerer Betrachtung des K7-Blattes wird erkennbar, dass für die Durchführung des Hypropversuches ca. 48% der Zeit (entspricht 6,8 Std.) für die manuelle Tätigkeit der Versuchsdurchführung benötigt werden und somit mehr als die Hälfte (7,5 Std.) für die Auswertung. Im direkten Vergleich zum Sandkasten-Versuch zeigt sich, dass für die Durchführung beider Versuchsreihe fast gleich viel Zeit benötigt wird. Die Unterschiede liegen im höheren Zeitbedarf für die Auswertung des

Kostenermittlung für die Durchführung der Laborversuche zur Bestimmung einer pF-Kurve und der relativen Durchlässigkeit von Thermosand bei einer bestimmten Lagerungsdichte

Hyprop-Versuchs (+30%) und den höheren Anschaffungskosten. Dies erklärt die höheren Kosten von ca. € 1.200.- pro Versuchsserie im Vergleich zum Sandkastenversuch.

Für die Ermittlung der Kosten wurden keine Forschungskosten für die Excel-Programmierung angesetzt, da diese von diversen anderen Diplomarbeiten bzw. Dissertationen erarbeitet wurden.

8.4 Kostenermittlung für Sandkastenversuch

Die Ermittlung der Kosten für den Sandkasten-Versuch setzen sich aus den Gerätekosten und den Lohnkosten für die Durchführung und Auswertung der Beprobung zusammen (siehe Anlage 31 – 33 und 38 - 40). Da bei Laborversuchen nicht von einer Vollauslastung ausgegangen werden kann, wurde auch für diesen Versuch eine Variation der Auslastung von 20%, 33% und 50% durchgeführt. Die damit verbundene Auslastung beläuft sich somit auf durchschnittlich 4, 7 und 10 Arbeitstage.

Die Kosten für die Versuchsdurchführung belaufen sich je nach Auslastung von € 986.- bis € 1.011.- pro Serie Stechzylinder. Für die Versuchsdurchführung und Auswertung einer Versuchsreihe wurden 13,6 Stunden benötigt. Nach genauerer Betrachtung des K7-Blattes wird erkennbar, dass für die Durchführung des Hypropversuches ca. 57% der Zeit (entspricht ca. 7,8 Std.) für die Durchführung des Versuches benötigt werden. Im Vergleich zum Hyprop-Versuch wird ca. 1 Stunde (ca. 15%) weniger benötigt. Somit ist auch erkennbar, dass für den Sandkasten-Versuch mehr Arbeitszeit für die Durchführung des Versuches benötigt wird, da hier die Messungen nicht computergestützt durchgeführt werden. Die restlichen 5,8 Stunden entfallen auf die Auswertung und grafische Darstellung.

Für die Ermittlung der Kosten wurden keine Forschungskosten für die Excel-Programmierung angesetzt, da diese von diversen anderen Diplomarbeiten bzw. Dissertationen erarbeitet wurden bzw. nur leicht adaptiert wurden.

8.5 Gesamtkostenermittlung für Hypropversuch

Die Ermittlung der Gesamtkosten für den Hypropversuch setzen sich aus den beiden einzelnen Summen für den Permeameter- und Hypropversuch zusammen. In Tabelle 8.1 sind die Einzelkosten des Permeameterversuches und des Hyprop-

Kostenermittlung für die Durchführung der Laborversuche zur Bestimmung einer pF-Kurve und der relativen Durchlässigkeit von Thermosand bei einer bestimmten Lagerungsdichte

versuches mit Variation der Auslastung dargestellt. Die Gesamtkosten belaufen sich von € 1.684,96.- bis € 1.783,81.-, abhängig von der gewählten Auslastung der Laborgeräte.

	Auslastung:		
	20%	33%	50%
Hypropversuch:	€ 1.254,90	€ 1.189,96	€ 1.156,05
Permeameterversuch: (Auslastung 50%)	€ 528,91		
Gesamtsumme:	€ 1.783,81	€ 1.718,87	€ 1.684,96

Tabelle 8.1: Gesamtkosten Hypropversuch inkl. Variation der Auslastung

In nachfolgender Abbildung 8.2 ist die monetäre Aufteilung zwischen den geringen Gerätekosten und den hohen Lohnkosten für die 20 % Auslastung des Hypropgerätes grafisch dargestellt. Dabei ist erkennbar, dass trotz hoher Anschaffungskosten der Laborgeräte die Arbeitskraft als Preistreiber eingetht und sich dabei mit ca. 90 % der Gesamtkosten niederschlägt.

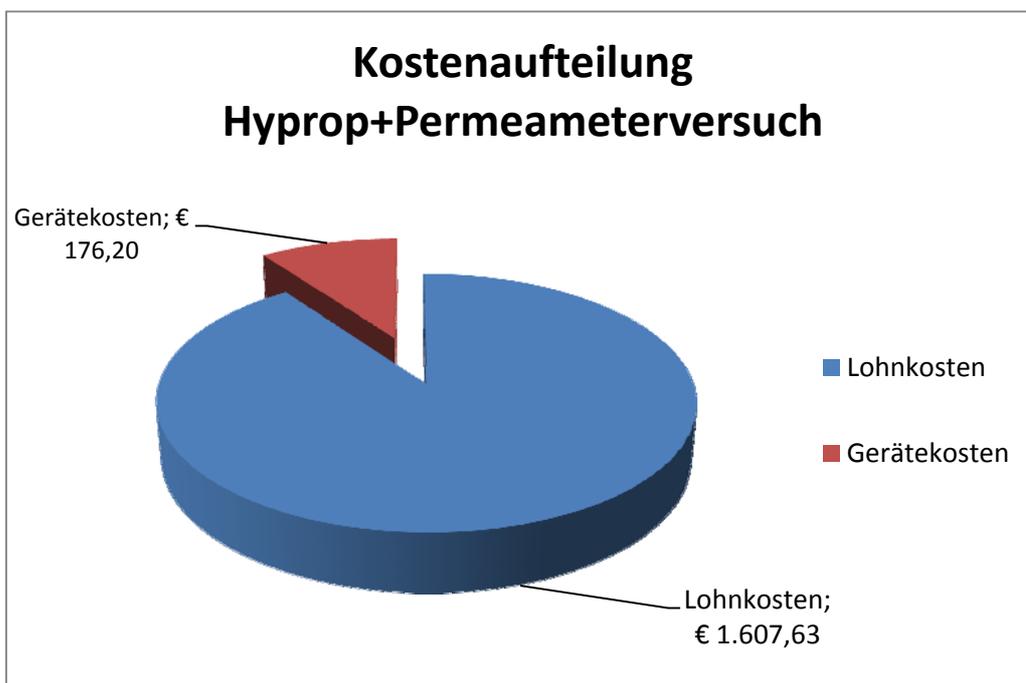


Abbildung 8.2: Kostenaufteilung von Lohn und Geräte bei Hyprop- und Permeameterversuch mit 20 % Auslastung

Kostenermittlung für die Durchführung der Laborversuche zur Bestimmung einer pF-Kurve und der relativen Durchlässigkeit von Thermosand bei einer bestimmten Lagerungsdichte

8.6 Gesamtkostenermittlung für Sandkastenversuch

Die Ermittlung der Gesamtkosten für den Sandkastenversuch setzen sich aus den beiden einzelnen Summen für den Permeameter- und Sandkastenversuch zusammen. In Tabelle 8.2 sind die Einzelkosten des Permeameterversuches und des Sandkastenversuches mit Variation der Auslastung dargestellt. Die Gesamtkosten belaufen sich von € 1.515,49.- bis € 1.540,25.-, abhängig von der gewählten Auslastung der Laborgeräte.

	Auslastung:		
	20%	33%	50%
Sandkastenversuch:	€ 1.011,34	€ 994,96	€ 986,58
Permeameterversuch: (Auslastung 50%)	€ 528,91		
Gesamtsumme:	€ 1.540,25	€ 1.523,87	€ 1.515,49

Tabelle 8.2: Gesamtkosten Sandkastenversuch inkl. Variation der Auslastung

Abbildung 8.3 zeigt ebenfalls eine Kostenaufteilung getrennt nach Lohn- und Gerätekosten. Auch hier wurde mit einer Auslastung von 20 % gerechnet. Das Ergebnis ist dem der Abbildung 8.2 sehr ähnlich. Der Lohnanteil beträgt ca. 95 % der Gesamtkosten.

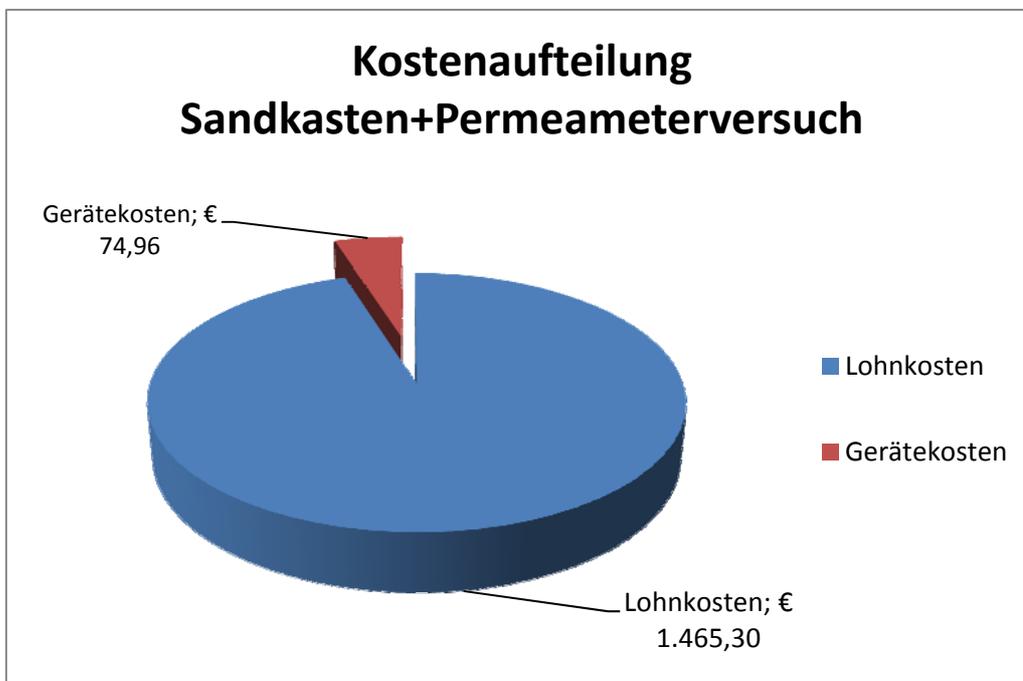


Abbildung 8.3: Kostenaufteilung von Lohn und Geräte bei Sandkasten- und Permeameterversuch mit 20 % Auslastung

8.7 Zusammenfassung Kostenermittlung

Aufgrund der im Anhang befindlichen K6E- und K7-Blätter wird erkennbar, dass für die Gesamtkosten der einzelnen Versuche nicht der Anschaffungswert der Gerätschaft maßgeblich ist, sondern die reine Versuchsdurchführungs- bzw. Auswertungszeit als Preistreiber eingehen. Die Lohnkosten betragen ca. 80% bis 98% der Gesamtkosten. Dies erklärt sich aus den sehr zeitintensiven Versuchsdurchführungen bzw. Auswertungen.

Um den „richtigen“ Preis der Versuche anzubieten ist es unabdingbar, eine genaue Kostenverfolgung (Controlling) nachzuführen sowie falls möglich bei zertifizierten Prüfanstalten die Versuchskosten zu vergleichen und den Preis anzugleichen.

9 Schlussfolgerung und Ausblick

Ziel dieser Masterarbeit war es, die Untersuchung der natürlichen Austrocknungsvorgänge von Thermosand, mit zwei unterschiedlichen Trockendichten, und die dabei im Boden auftretenden Spannungen zu beschreiben. Zur Ermittlung der Ergebnisse wurden die Stoffgesetze der teilgesättigten Böden beschrieben sowie zwei Laborverfahren zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit durchgeführt und ausgewertet. Für die Durchführung der Bestimmung der relativen Leitfähigkeit wurde im Vorfeld auch die Durchlässigkeit bei Vollsättigung mit den unterschiedlichen Trockendichten bestimmt.

Insgesamt wurden zwei Testserien mit je zehn Stechzylindern und unterschiedlicher Trockendichte geprüft. Die Prüfverfahren waren das Hyprop- und das Sandkasten-Verfahren. In diesem Fall wurde für den Hyprop-Versuch eine Trockendichte von $\rho = 1,30 \text{ g/cm}^3$ und für den Sandkasten-Versuch eine Trockendichte von $\rho = 1,39 \text{ g/cm}^3$ gewählt. Somit sind die Ergebnisse nur ähnlich und ermöglichen keinen genauen Vergleich im jeweiligen Messbereich. Ein großes Problem beim Sandkasten-Versuch war die Bestimmung der relativen Durchlässigkeit. Da beim Sandkasten-Verfahren als Ergebnis nur der volumetrische Wassergehalt herauskommt, kann man keinen direkten Rückschluss auf die relative Leitfähigkeit ziehen. In diesem Fall behalf man sich mit der ermittelten relativen Leitfähigkeit aus dem Hypropversuch und setzte diese in ein Verhältnis zueinander. Da aber ohne den Hyprop-Versuch dies nicht möglich wäre, ist der Sandkasten-Versuch allein zur Bestimmung der relativen Durchlässigkeit nicht geeignet. Auch ein höherer Arbeitsaufwand, bedingt durch die oftmaligen Wiegeprozesse, wirkt sich negativ bei der Versuchsdurchführung des Sandkasten-Versuchs aus. Zusätzlich zu dem höheren Arbeitsaufwand, entsteht durch die Wiegungen eine Ungenauigkeit bei den Messergebnissen, da einerseits bei der Wiegung der Probe immer ein kleiner Anteil des Wasser- und Bodengemisch auf der Waage zurück bleibt und andererseits anschließend die Probe niemals genau auf die gleiche Stelle mit gleicher Verbindung zum Sandbett zurückgesetzt wird. Um eine bessere Korrelation zwischen den beiden Prüfverfahren zu erreichen, müssten die beiden Versuchsabläufe mit jeweils gleicher Trockeneinbaudichte durchgeführt werden.

Im Gegensatz zum Sandkasten-Versuch läuft die Messung beim Hyprop-Versuch vollkommen automatisch ab. Auch die anschließende Auswertung erfolgt digital. Die Messergebnisse können am Schluss als .csv-Datei exportiert und somit in wei-

terer Folge in einen Tabellenberechnungsprogramm eingespielt und bearbeitet werden. Auffallend bei der Auswertung des Hyprop-Versuchs war, dass das Berechnungsmodell nach Brooks & Corey keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferte. Diese Problematik wurde in Kap. 7.1 näher erörtert. Damit ist erkennbar, dass bei der Auswertung der Messserie ein passendes Berechnungsmodell gewählt werden muss, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Einen großen Vorteil bietet das Hyprop-Verfahren, dass nach Abschluss der Messung auch die relative Leitfähigkeit vorliegt, im Gegenteil zum Sandkasten-Verfahren.

Bei der Bestimmung der Kosten für die jeweiligen Versuchsmethoden ist aufgefallen, dass der große Unterschied bei den Anschaffungskosten der Laborausstattung in die Preisgestaltung fast keinen Einfluss hat. Auch bei einer Reduzierung der Auslastung der Laborgeräte auf 20% betragen die Lohnkosten noch immer durchschnittlich 92% der Gesamtkosten. Der sogenannte Preistreiber bei beiden Laborversuchen stellt die Arbeitskraft der Labormitarbeiter dar. Diese schlägt sich durchschnittlich mit 95% der Gesamtkosten nieder. Im Anfangsstadium des Anbietens dieser Laborversuche wäre es sinnvoll, die Abrechnung in Regie vorzunehmen, um keinen Verlust zu erwirtschaften und eine dabei notwendige Kostenverfolgung (Controlling) nachfolgend durchzuführen.

Um eine Optimierung des Hyprop-Versuchs herbeizuführen, könnte man eine Kombination des bestehenden Systems mit einem Klimaschrank umsetzen. So kann man einerseits die Lager- und klimatischen Randbedingungen besser definieren und andererseits könnte man den Versuchsablauf beschleunigen, da man auf die natürliche Verdunstung nicht mehr angewiesen wäre.

10 Literaturverzeichnis

Adam, M., 2005:

Untersuchung zur Wasserdurchlässigkeit teilgesättigter Böden.
Diplomarbeit, Institut für Bodenmechanik und Grundbau,
Technische Universität Graz

Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964:

Hydraulic properties of porous media,
Hydrol. Pap. 3, 27 pp.,
Colo. State Univ., Fort Collins

Chinkulkijniwat, A., 2005:

Multiphase Flow of Unsaturated Soils and the Induced Deformation with Re-
spect to Compressed Air Tunnelling
Mitteilungsheft der Geotechnik Gruppe Graz

Disse, M., 1995:

Modellierung der Verdunstung und der Grundwasserneubildung in ebenen
Einzugsgebieten
Dissertation, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft,
TH Karlsruhe

Durner, W., 1991:

Vorhersage der hydraulischen Leitfähigkeit strukturierter Böden.
Bayreuther Bodenkundliche Berichte 20, 1-180

Durner, W., 1991:

Vorhersage der hydraulischen Leitfähigkeit von Böden mit mehrmodalem Po-
rensystem.
Mitteilungen der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft 66

Fredlund, D.G., Rahardjo, H., 1993:

Soil Mechanics for Unsaturated Soils.
John Wiley & Sons Inc., New York

Henögl, O., 2000:

Untersuchungen zur Strömungsausbreitung bei der Insitu – Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit oberflächennaher Bodenschichten.

Schriftenreihe Geotechnik, Bauhaus – Universität Weimar, Heft 04, Seiten 57 – 72, Weimar

Hillel, D., 1980

Fundamentals of soil physics

Academic Press, New York

Hochgürtel, T., 1998:

Numerische Untersuchung zur Beurteilung der Standsicherheit der Ortsbrust beim Einsatz von Druckluft zur Wasserhaltung im schildvorgetriebenen Tunnelbau.

Veröffentlichung des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, Nr. 32

Kolymbas, D., 2007:

Geotechnik – Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, 2. Auflage.

Springer – Verlag, Berlin Heidelberg New York

Külls, C., 2005:

Die ungesättigte Leitfähigkeit: Mualem-Van-Genuchten-Modell. Proseminar, Institut für Hydrologie, ALU Freiburg

Lecher, K., 1964:

Kapillare Steighöhe

Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau der ETH Zürich

Mattheß, G. und Ubell, K., 1983:

Allgemeine Hydrologie – Grundwasserhaushalt.

Gebrüder Bornträger – Verlag, Stuttgart

ÖNORM B 2400, 1986

Hydrographische Fachausdrücke und Zeichen.

Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM B 2061, 1999:

Preisermittlung für Bauleistungen - Verfahrensnorm

Österreichisches Normungsinstitut, Wien

Österreichische Baugeräteliste, 2009:

ÖBGL; technisch – wirtschaftliche Baumaschinendaten zur internen Verrechnung bei Arbeitsgemeinschaften

Fachverband der Bauindustrie

Pregl, O., 1983:

Wasser im Untergrund; Frost im Untergrund, Band 9.

Handbuch der Geotechnik, Wien

Priesack, E., Durner, W., 2006:

Closed form expression for the multi-modal unsaturated conductivity function.

Vadose Zone J. 5

Schäfer, D., 1999:

Bodenhydraulische Eigenschaften eines Kleineinzugsgebietes

Dissertation, Institut für Hydromechanik,

TH Karlsruhe

Scheffer, F., Schachtschabel, P., 2010:

Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Auflage.

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

Scheid, Y., 2003:

Einfluss der Strömungsmechanik teilgesättigter Böden beim Tunnelbau unter Druckluft nach NATM.

Dissertation, Institut für Bodenmechanik und Grundbau,

Technische Universität Graz

Schmidt, H. H., 1996:

Grundlagen der Geotechnik.

B. G. Teubner – Verlag, Stuttgart

Schubert, H., 1982:

Kapillarität in porösen Feststoffsystemen.

Springer – Verlag, Berlin

Semprich, S., 2007:

Geotechnik GL.

Skriptum, Institut für Bodenmechanik und Grundbau,

Technische Universität Graz

Semprich S. / Henögl O, 2003:

„Thermosand (Fohnsdorfer Halditt)“ -

Bericht und Attest zur Eignungsprüfung im Labor

Institut für Bodenmechanik und Grundbau,

Technische Universität Graz, unveröffentlicht

Sheta, H., 1999

Simulation von Mehrphasenströmungen in porösen Medien unter Einbeziehung von Hysterese-Effekten

Dissertation, Institut für Wasserbau,

Universität Stuttgart

Stacheder, M., 1996:

Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik.

Schriftenreihe Geologie Karlsruhe – 40 (I-XV, 1,170)

Karlsruhe

Steirer, B., 2010:

Thermosandmischungen als stabilisiertes Bettungsmaterial für Fernwärmeleitungen unter Aufrechterhaltung der Wärmedämmeigenschaften

Masterarbeit, Institut für Bodenmechanik und Grundbau,

Technische Universität Graz

Taylor, D. W., 1948:

Fundamentals of Soil Mechanics.

Wiley, New York

Taylor, D. W., Wheatcraft, S. W., 1990:
Fractal processes in soil water retention
Water Resources Research, Volume 26
AGU, Washington DC

Terzaghi, K., 1943:
Theoretical Soil Mechanics.
Wiley, New York

Terzaghi, K., 1954:
Theoretische Bodenmechanik
Springer – Verlag, Berlin.

Van Genuchten M.Th. and Nielsen D.R., 1985.
On describing and predicting the hydraulic properties in unsaturated soils.
Annales Geophysicae, 1985, 3, 5, 615-628.

Velikogne, P., 2000:
Durchlässigkeit und Kapillarität teilgesättigter Böden.
Diplomarbeit, Institut für Bodenmechanik und Grundbau,
Technische Universität Graz

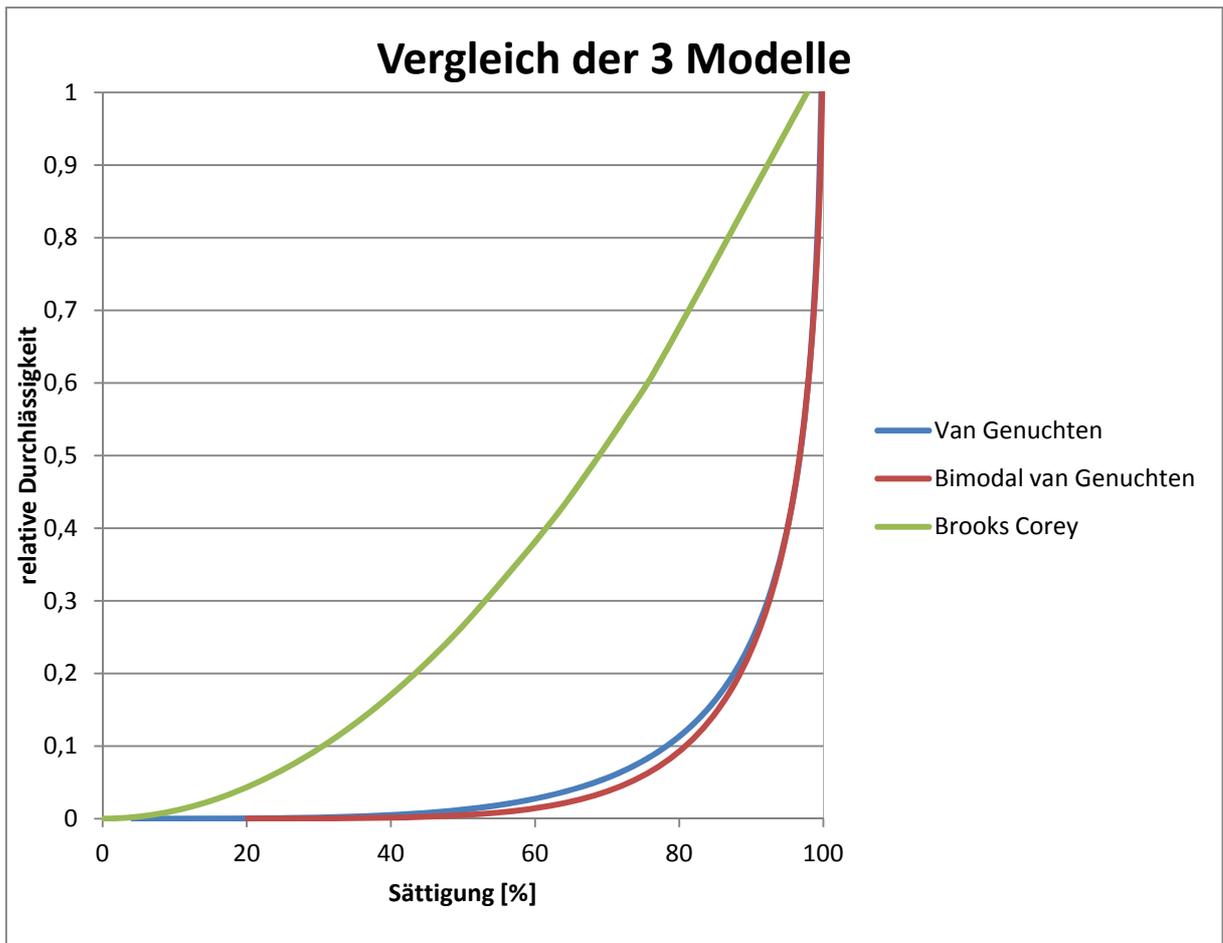
Vogler, M., 1999:
Einfluss der Kapillarität auf die Mehrphasenströmung bei der Sanierung von
Mineralölschadensfällen im Boden.
Mitteilung des Instituts und der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darm-
stadt, Heft 45

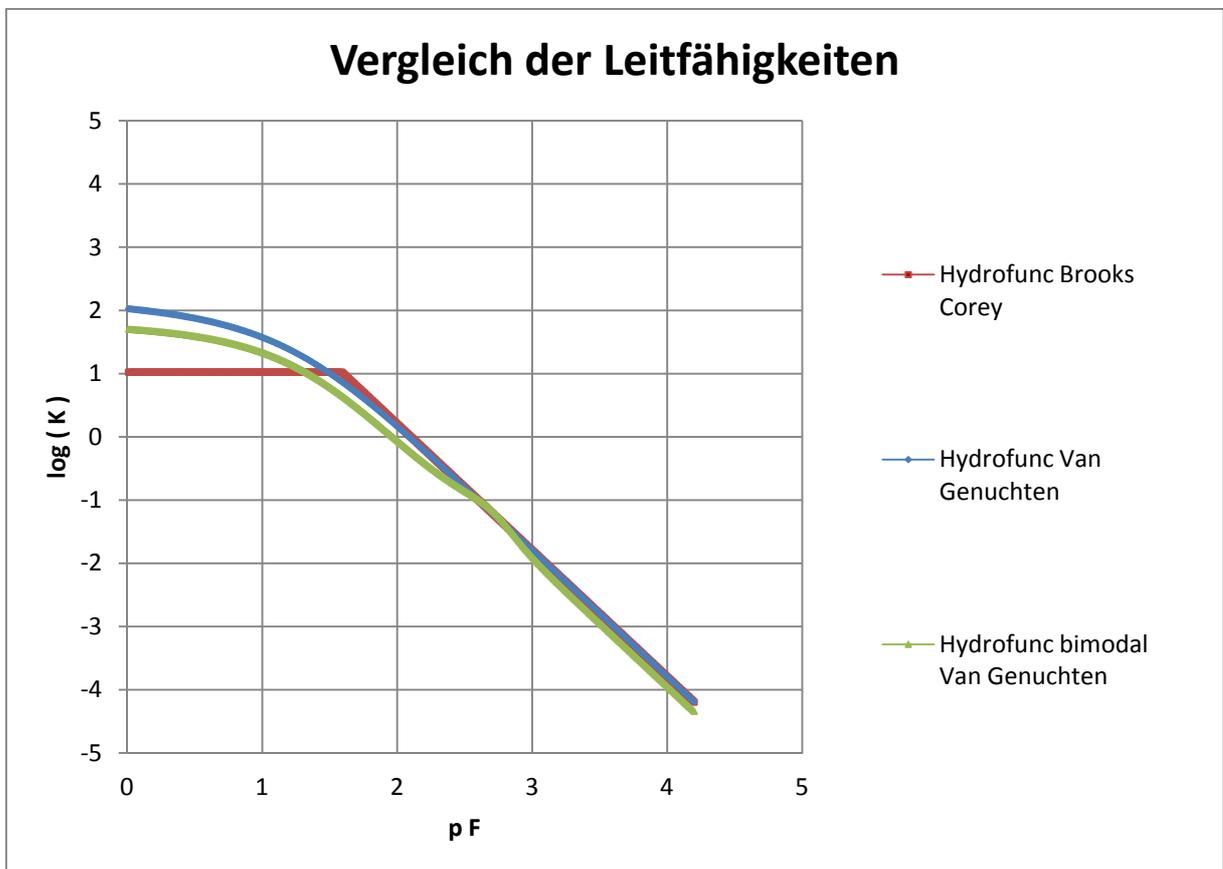
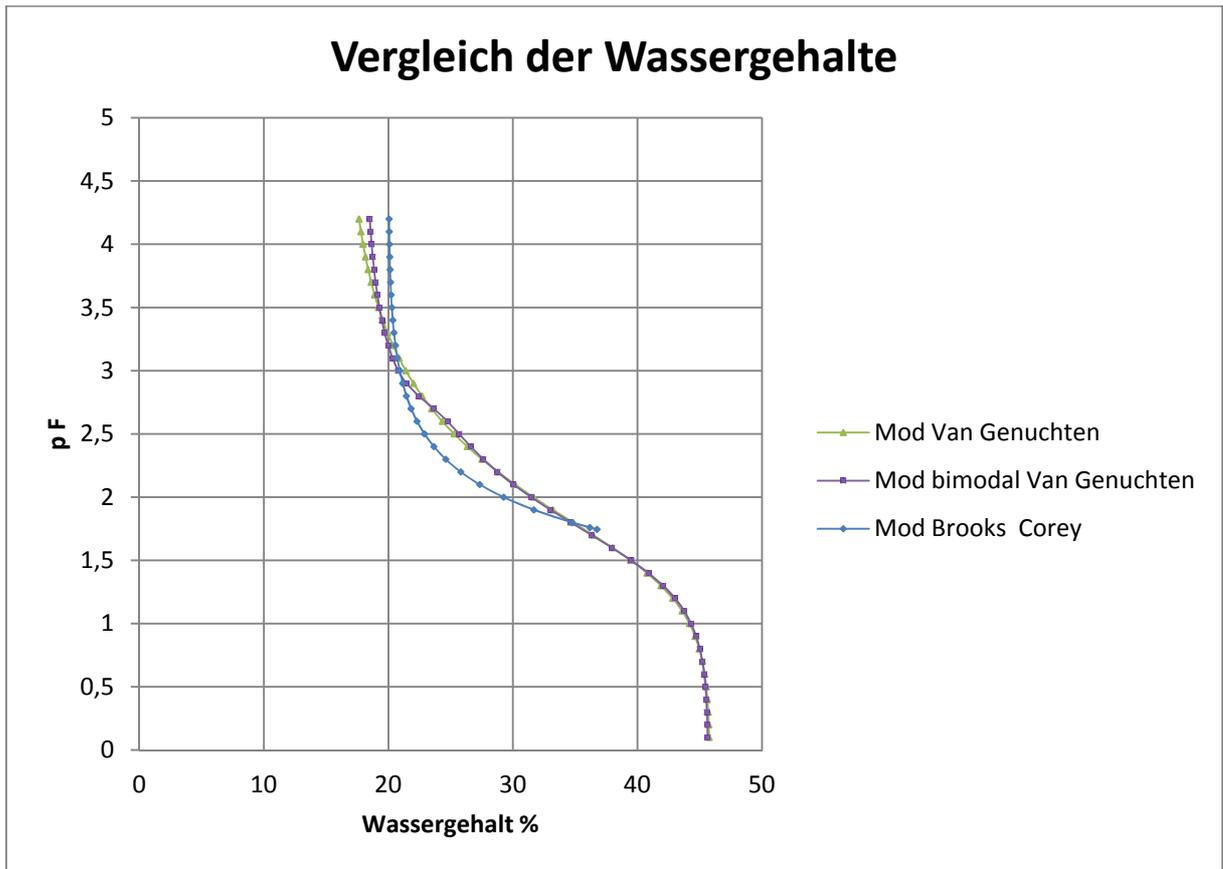
Wyckoff, R.D., Botset, H.G., 1936:
The flow of gas-liquid mixtures through unconsolidated sands.
Physics, Vol. 7, pp. 325 - 345

Zeller, W., Franke, A., 1966:
Das physikalische Rüstzeug des Ingenieurs.
Fikentscher & Co., Darmstadt

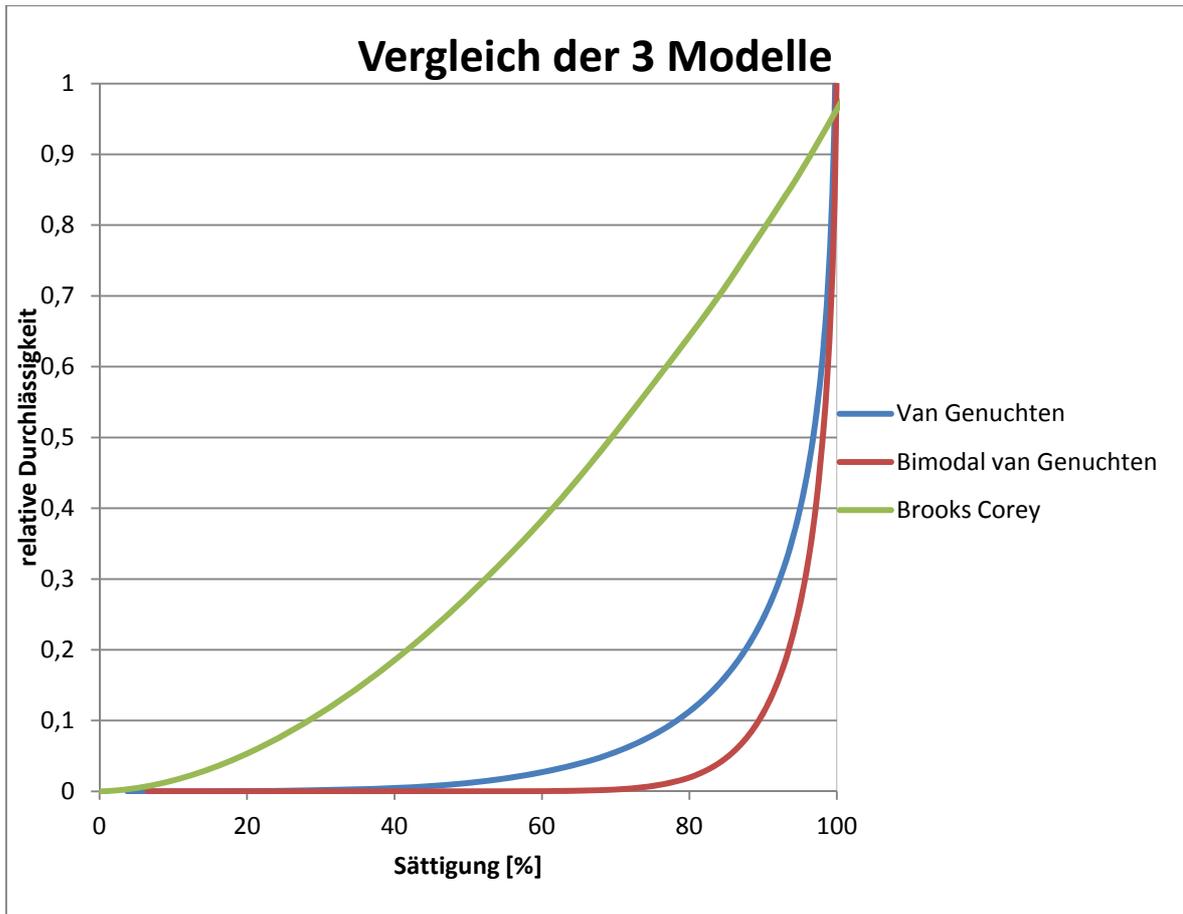
Anlagen

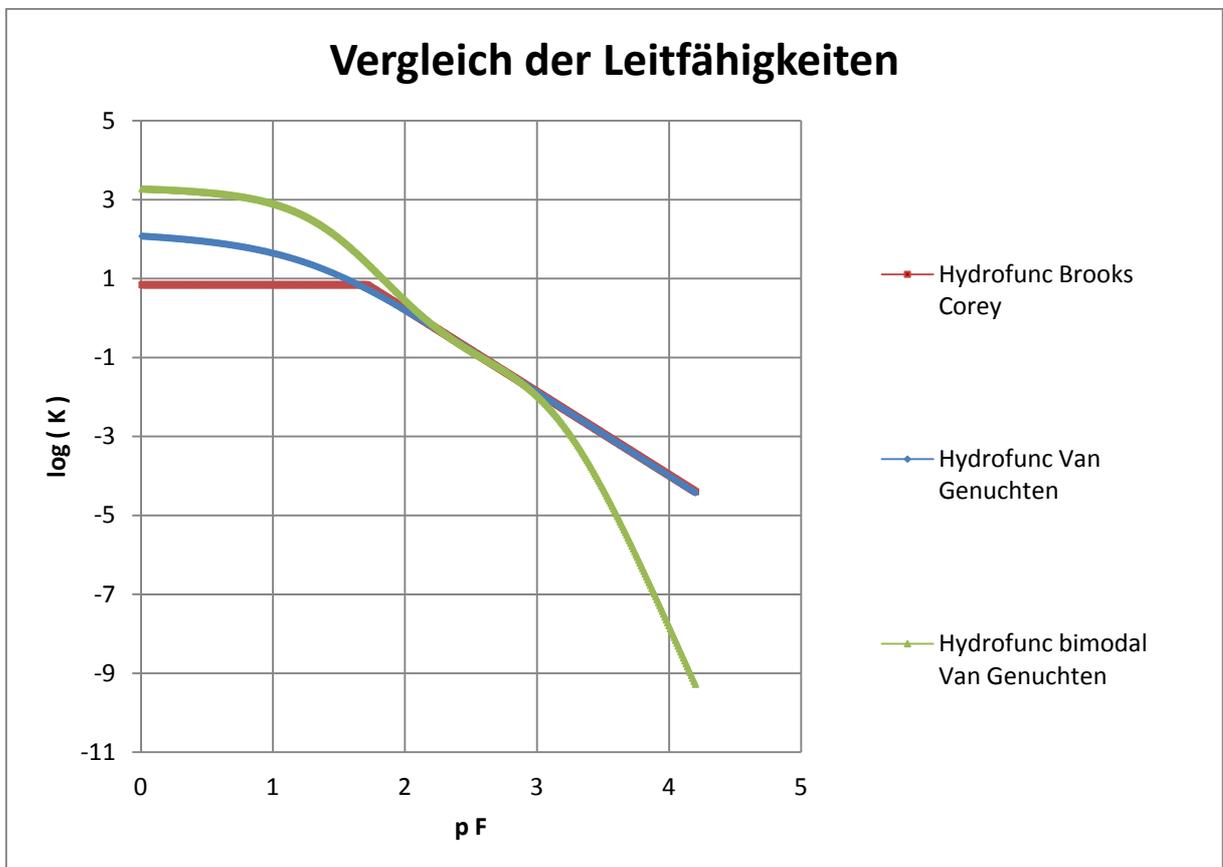
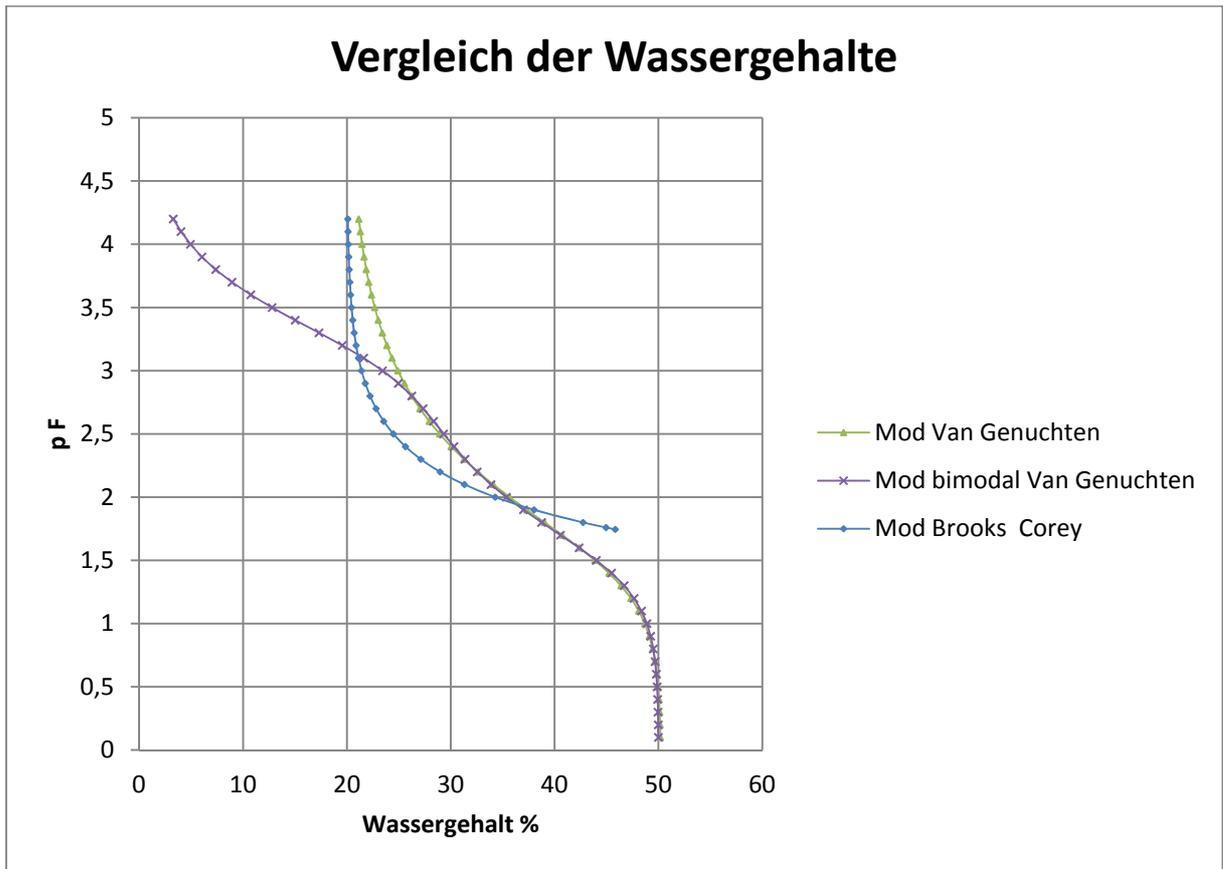
Anlage 1: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 12



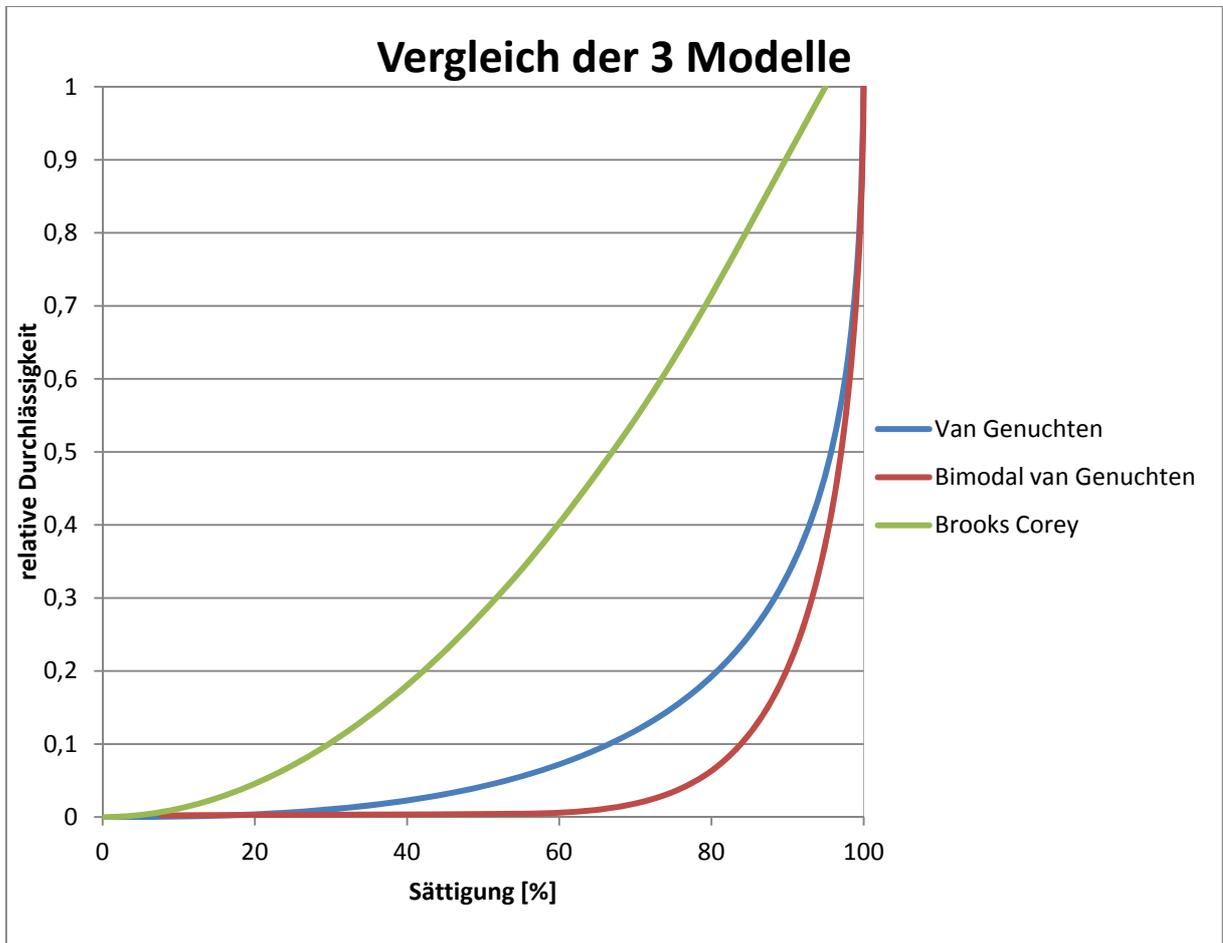


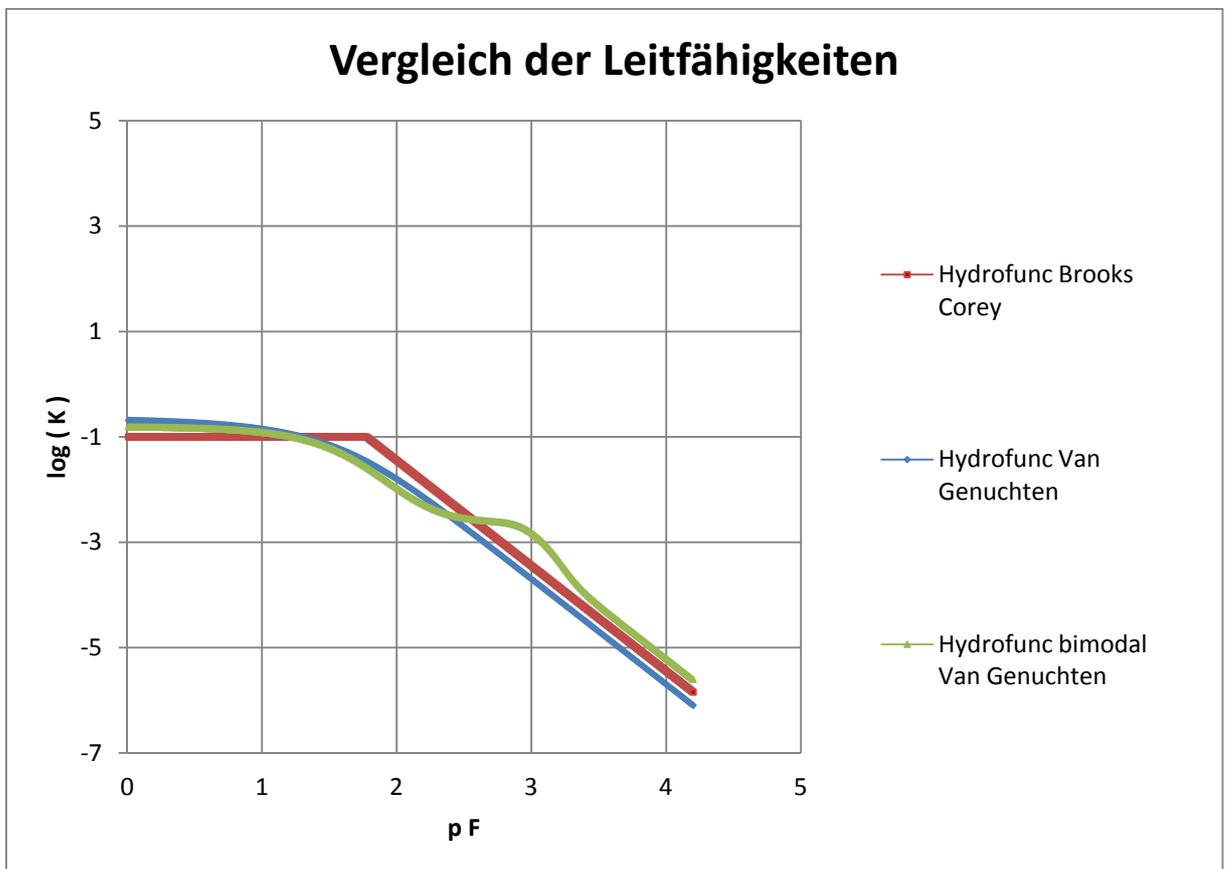
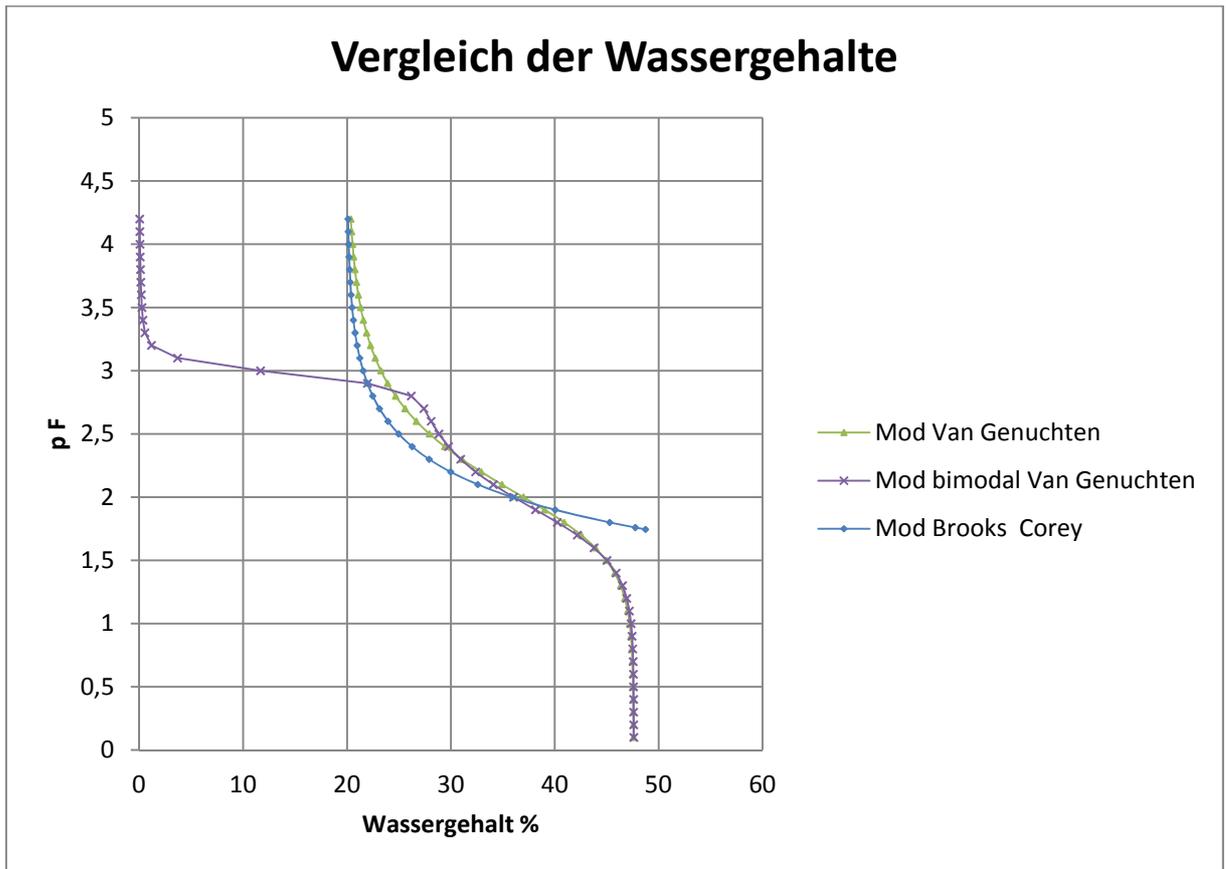
Anlage 2: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 13



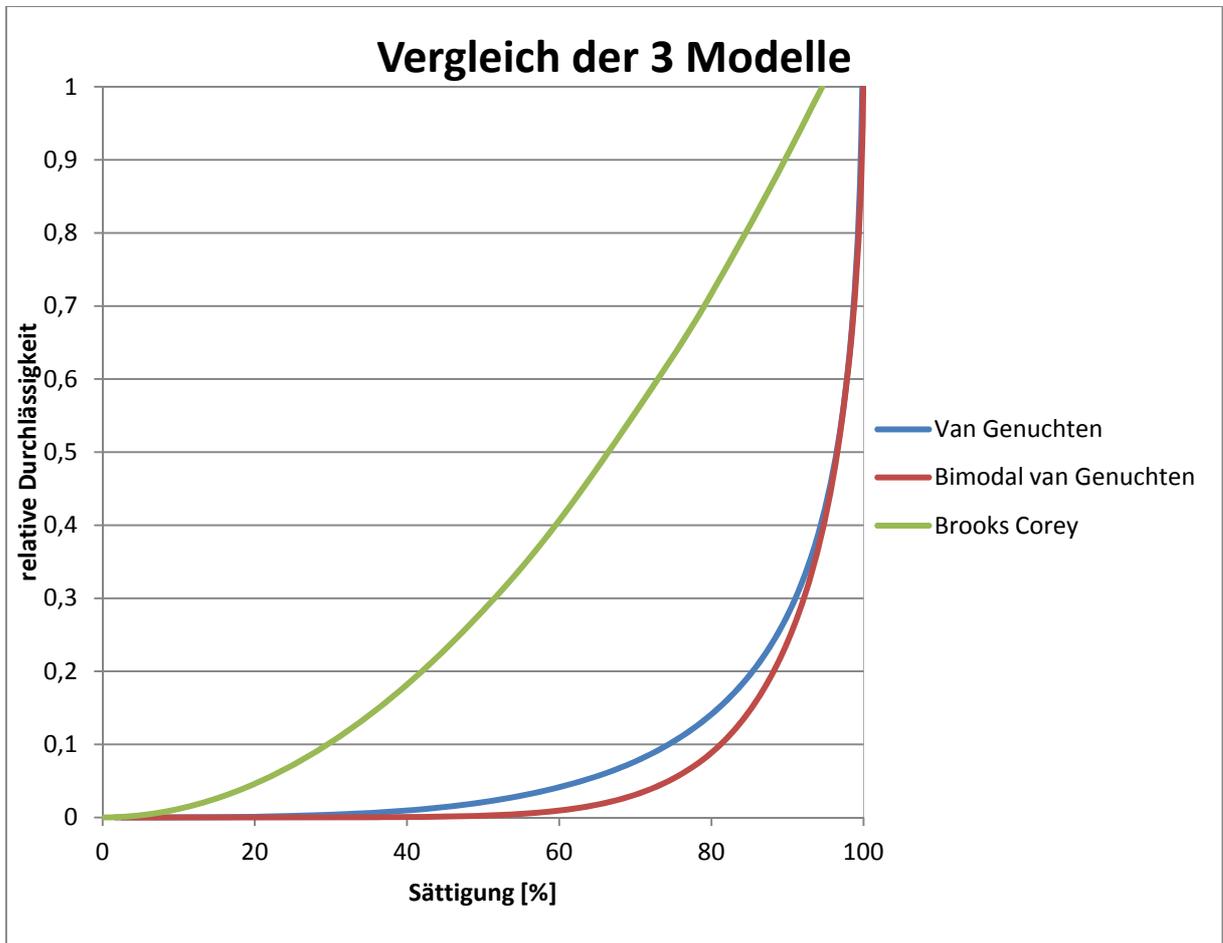


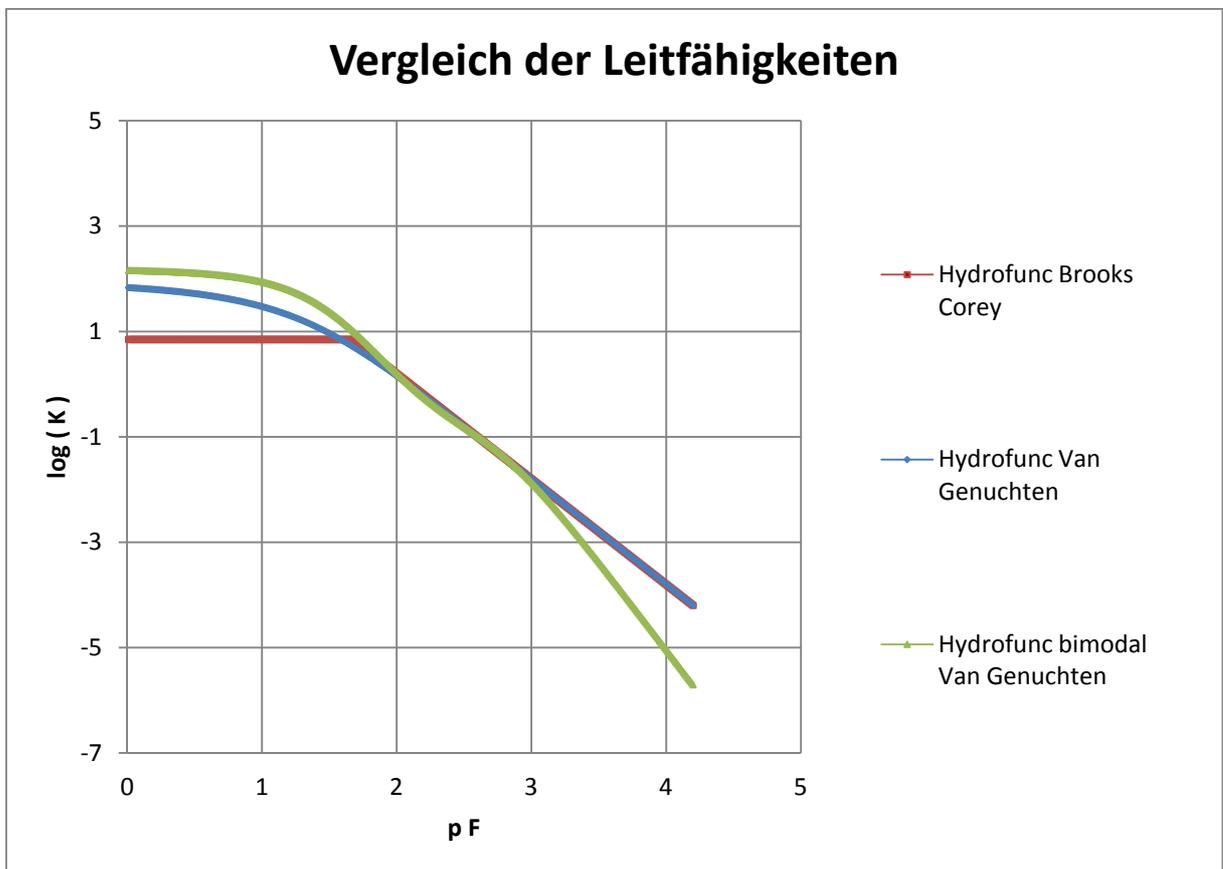
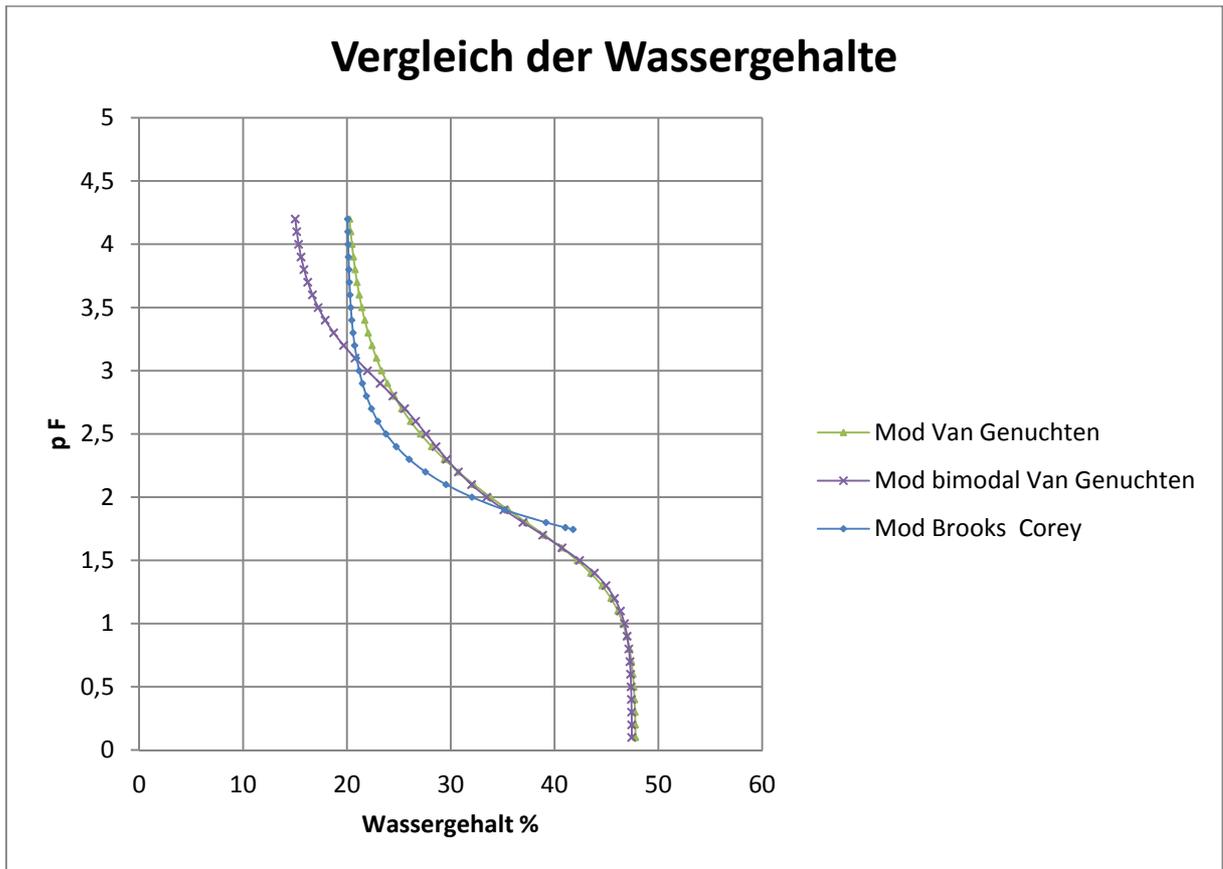
Anlage 3: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 14



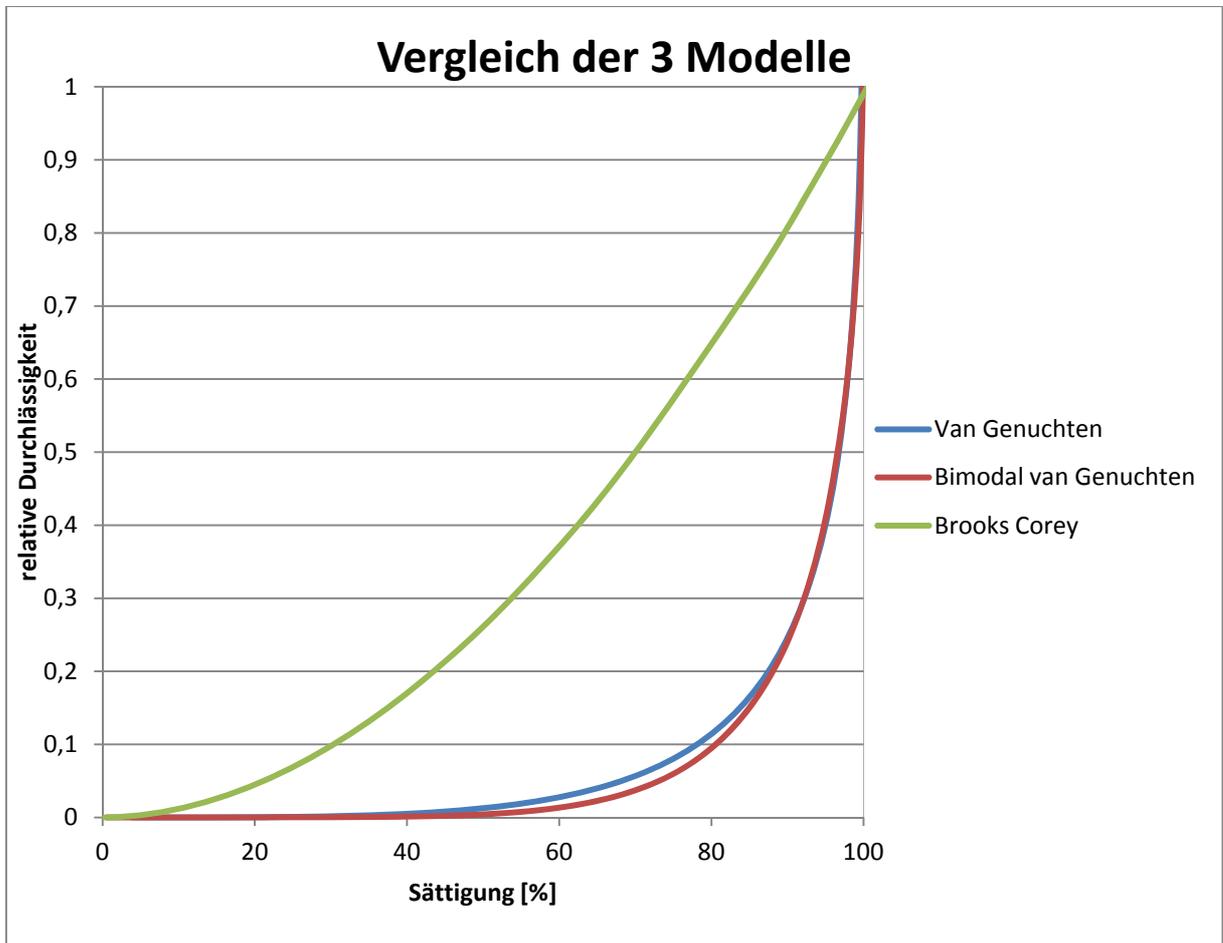


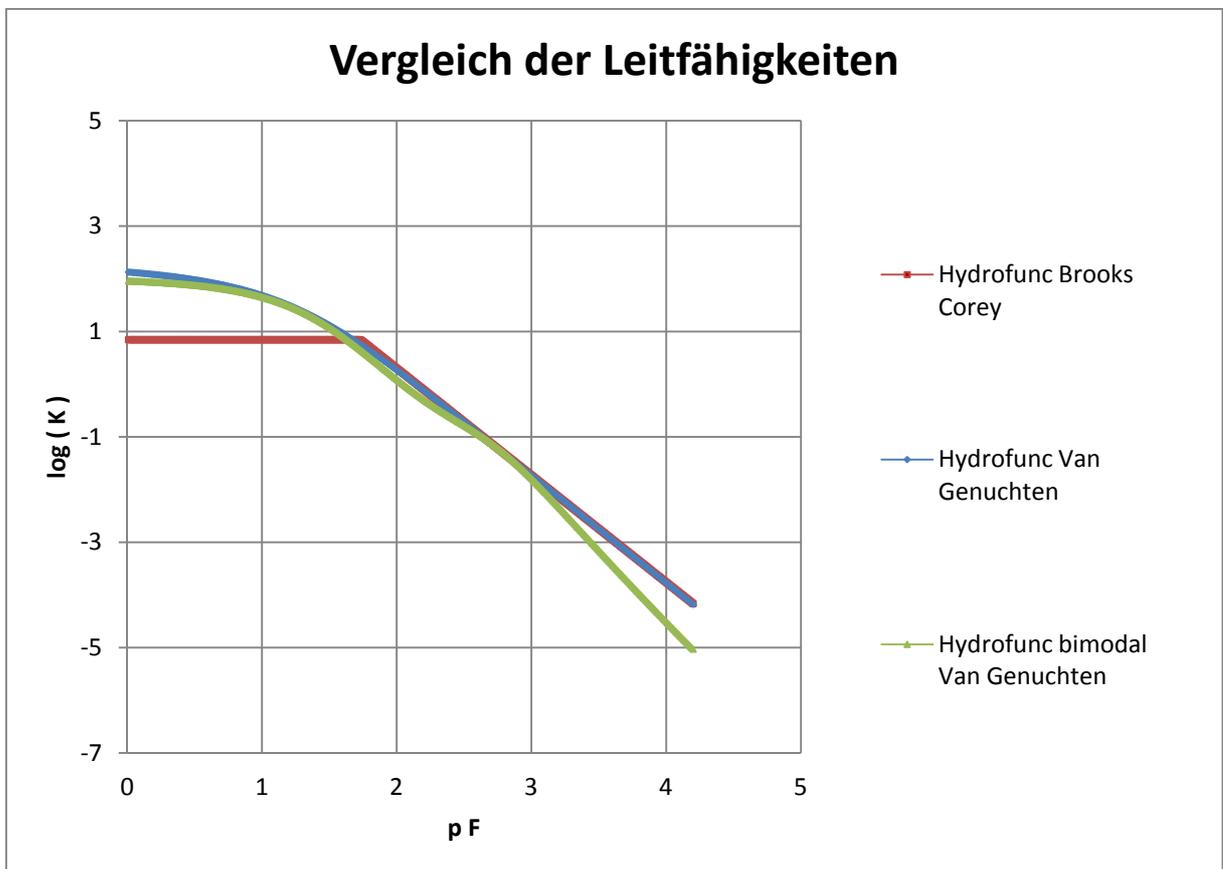
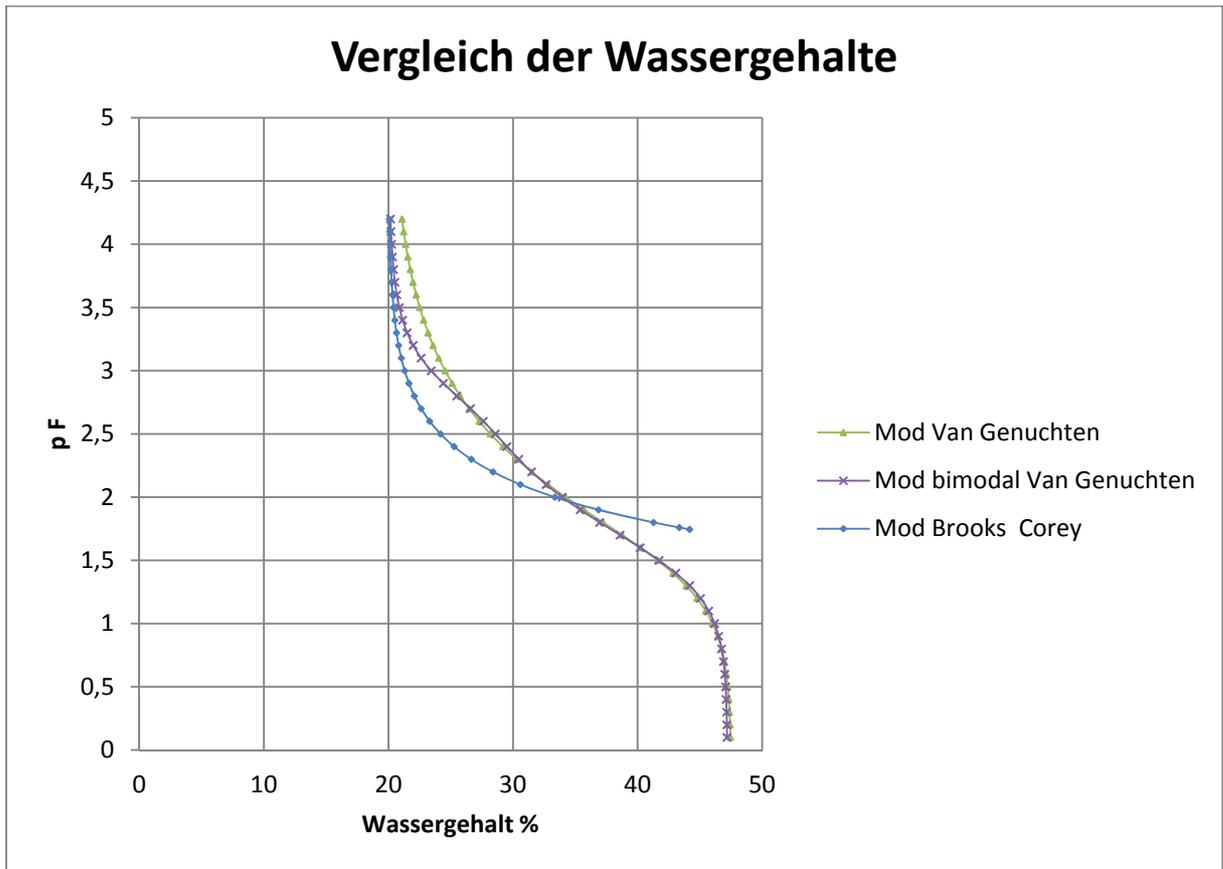
Anlage 4: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 15



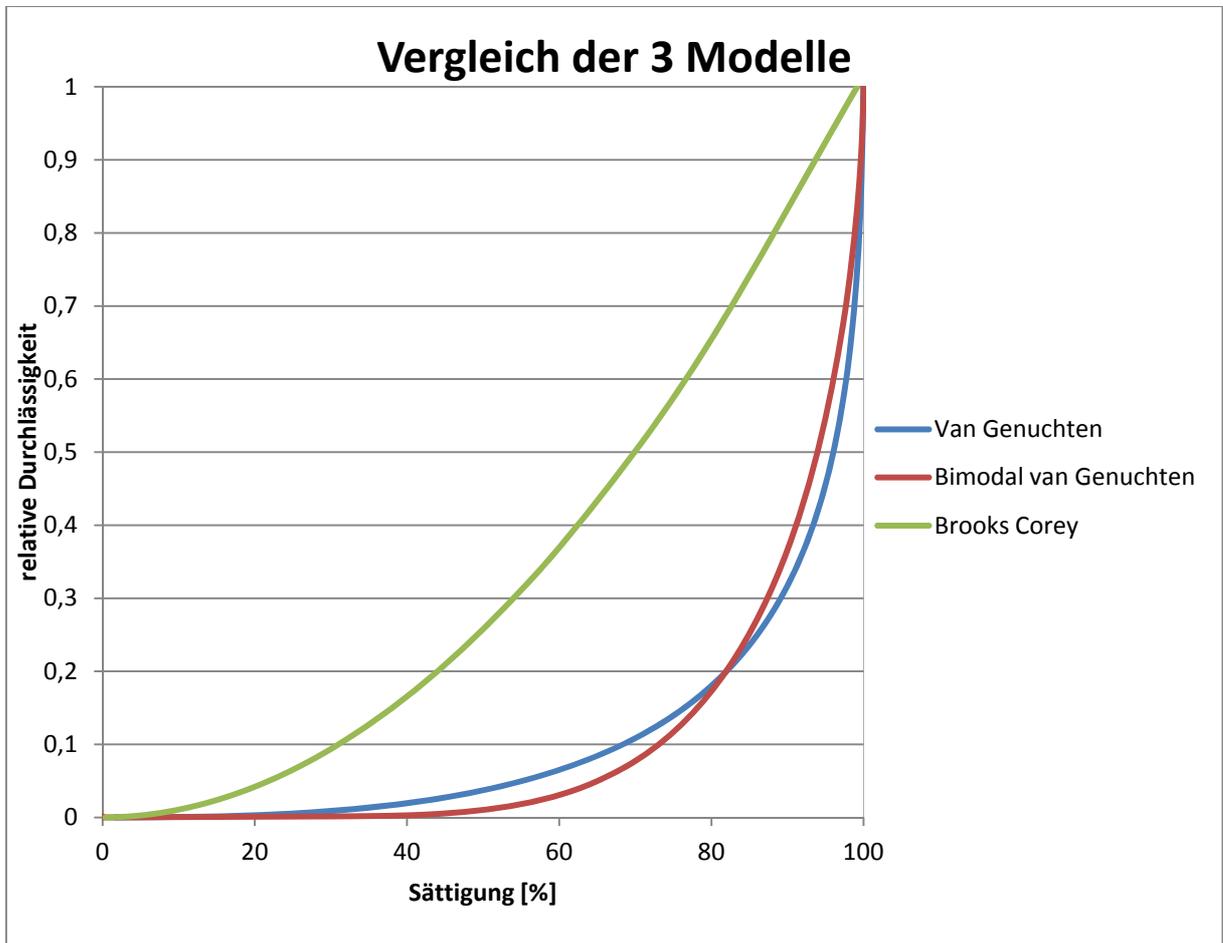


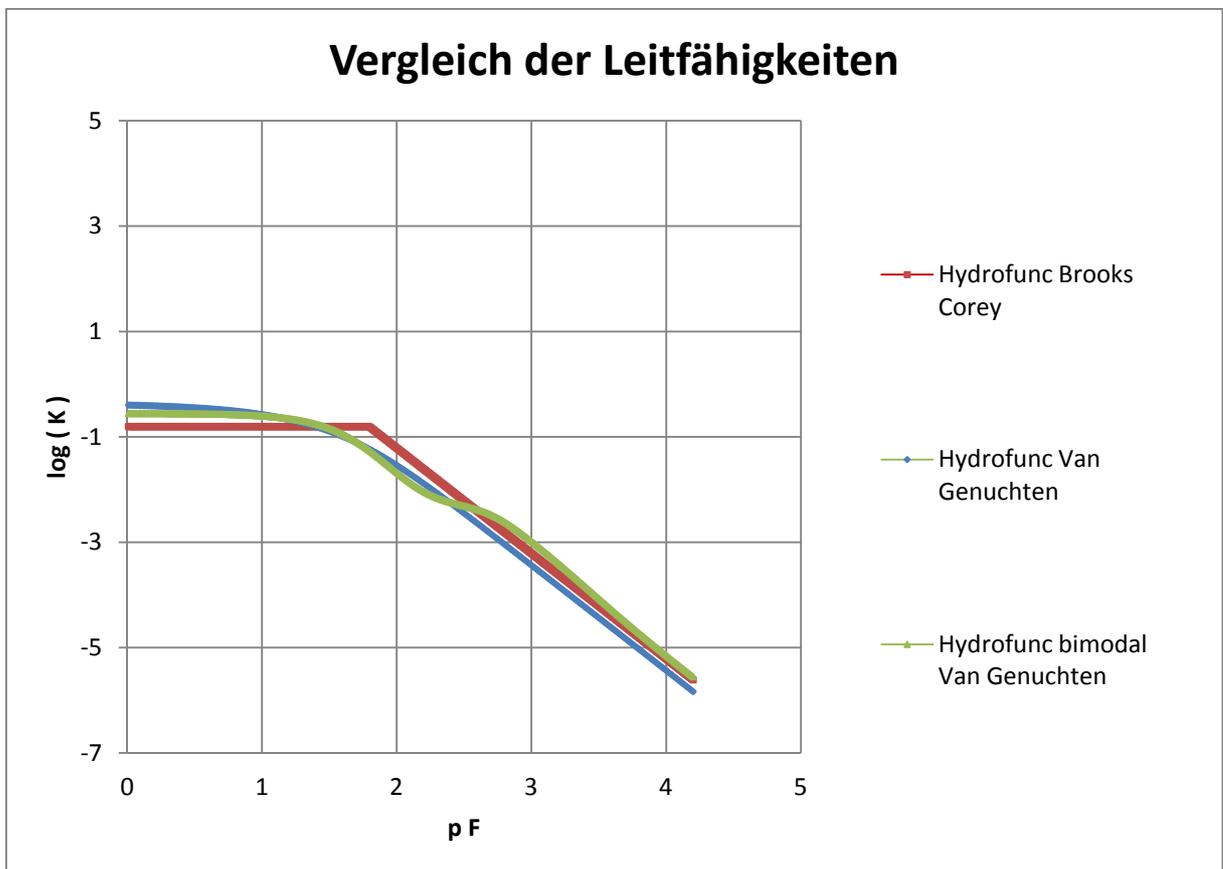
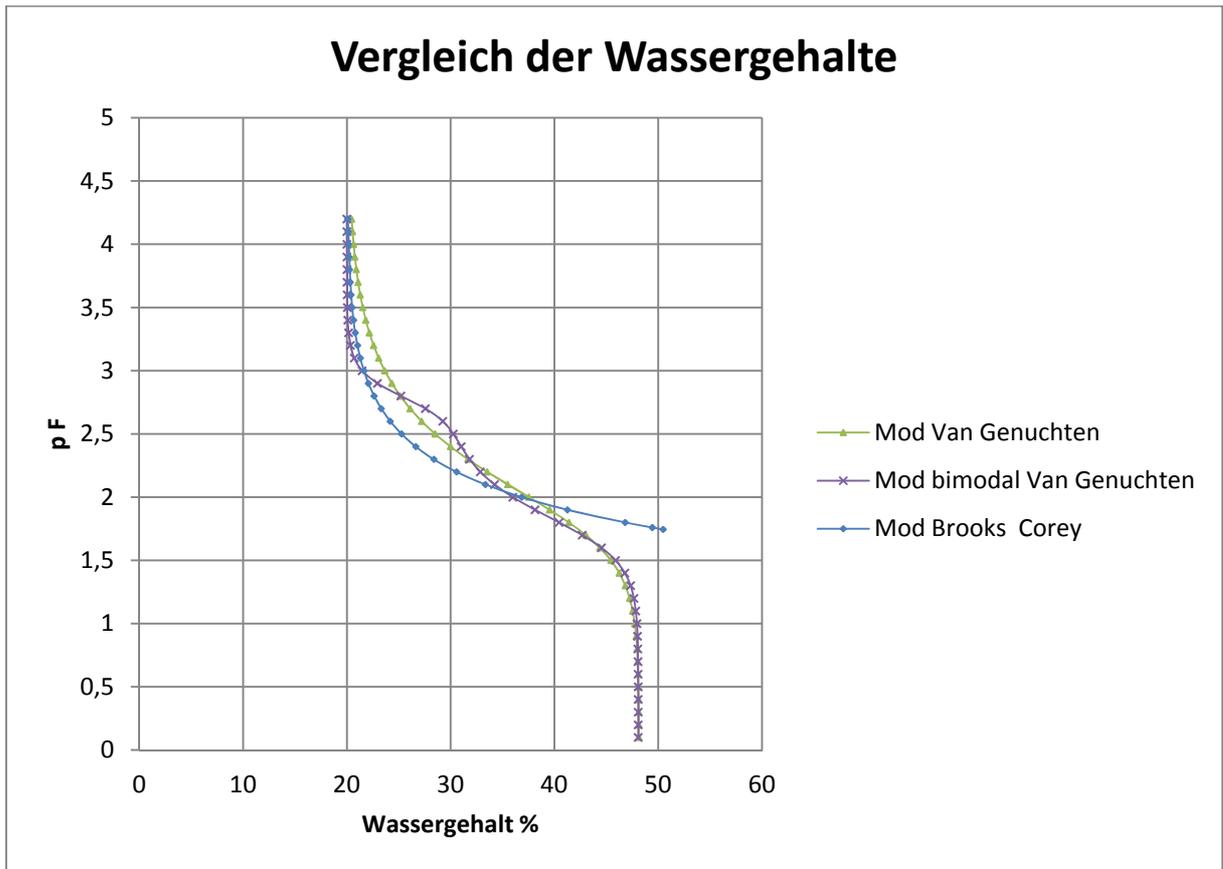
Anlage 5: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 16



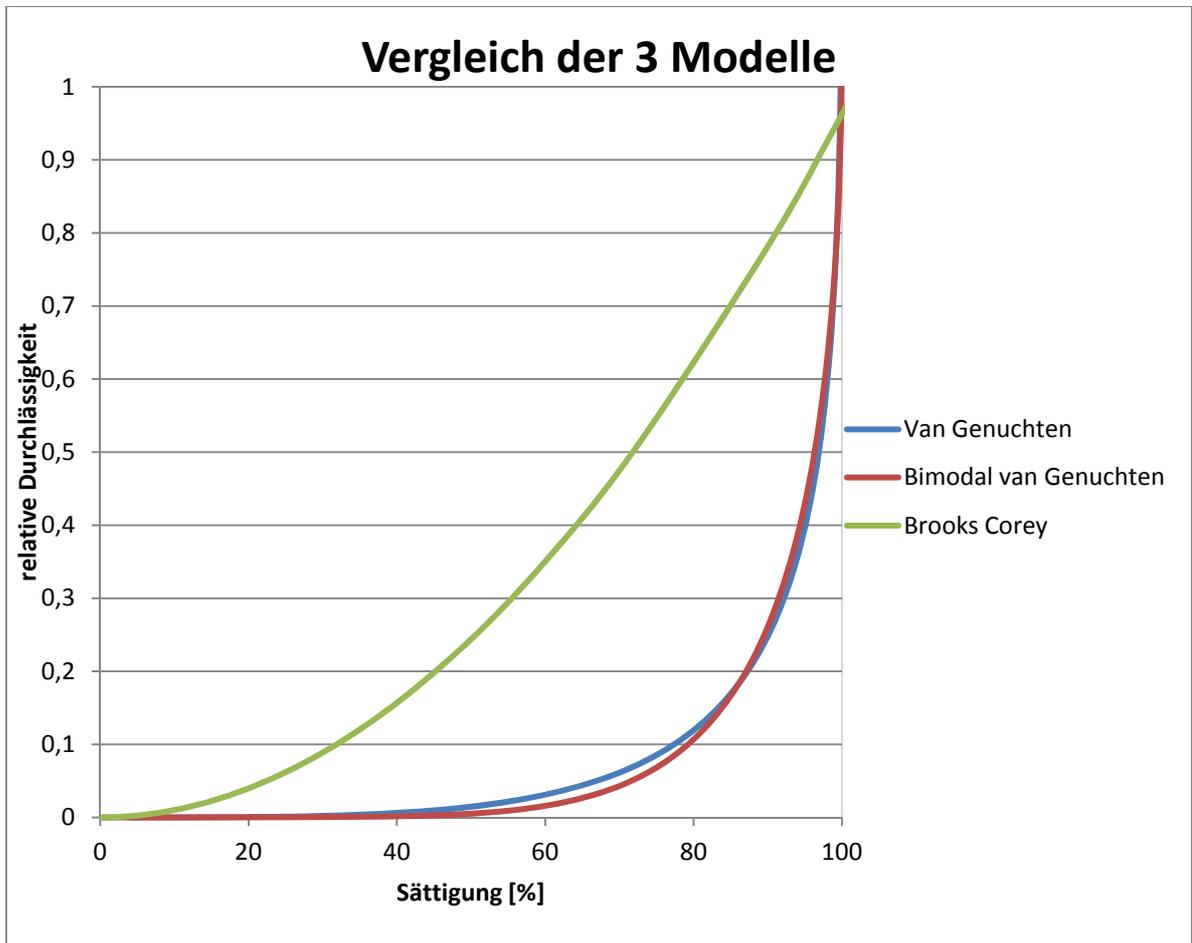


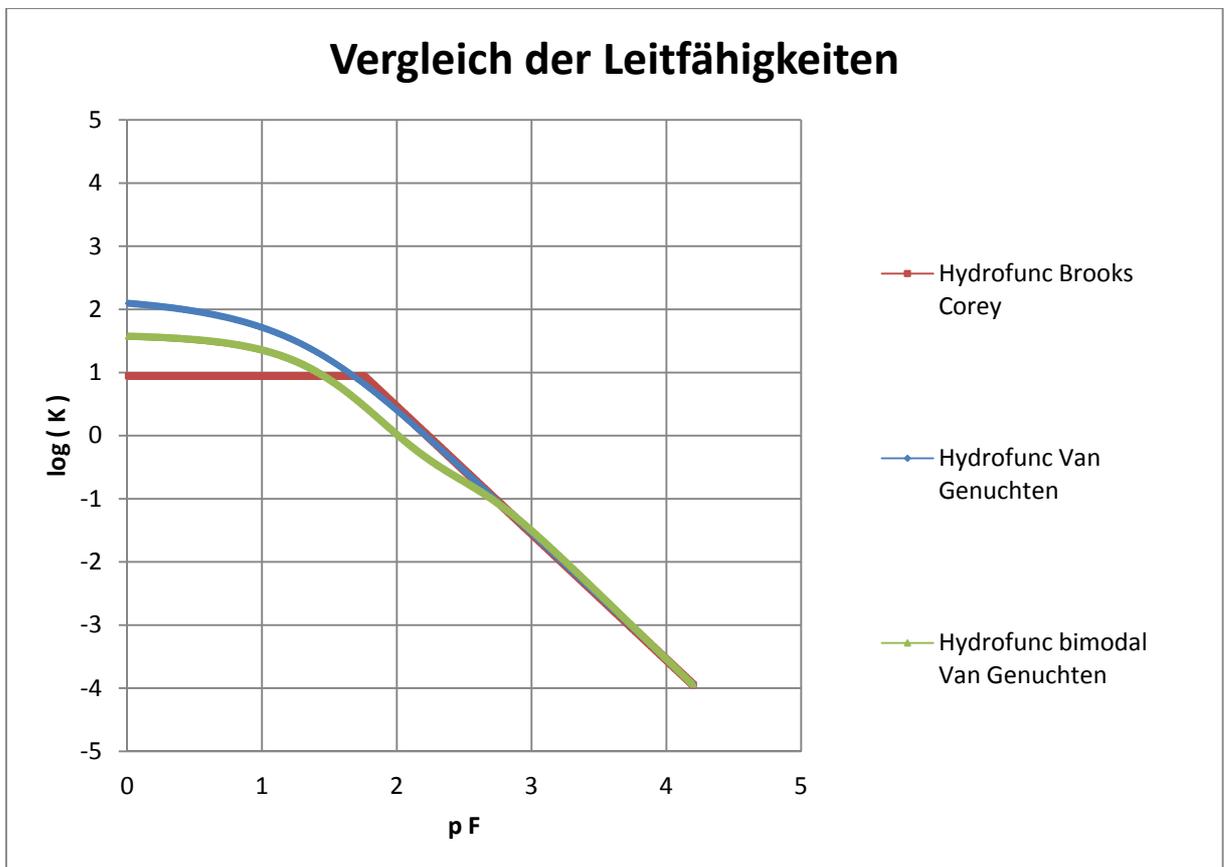
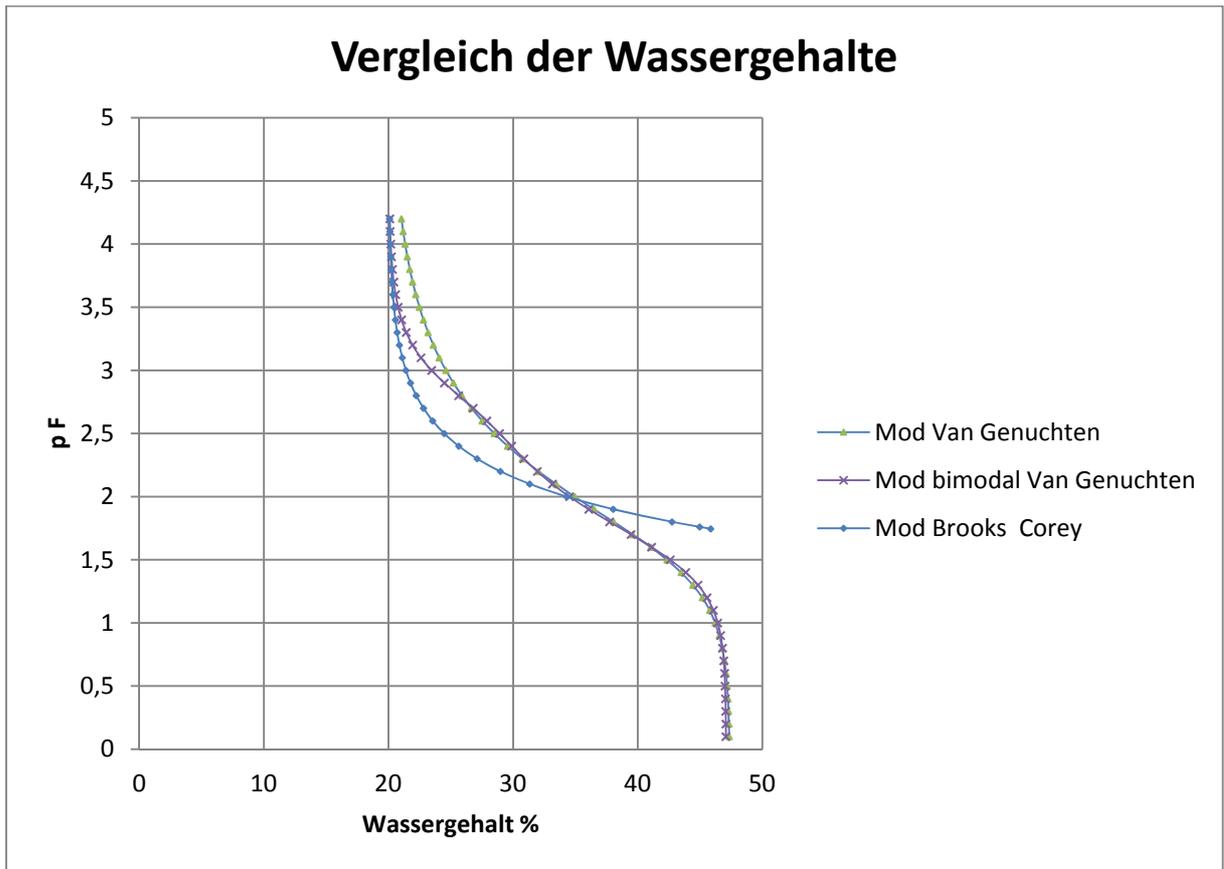
Anlage 6: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 17



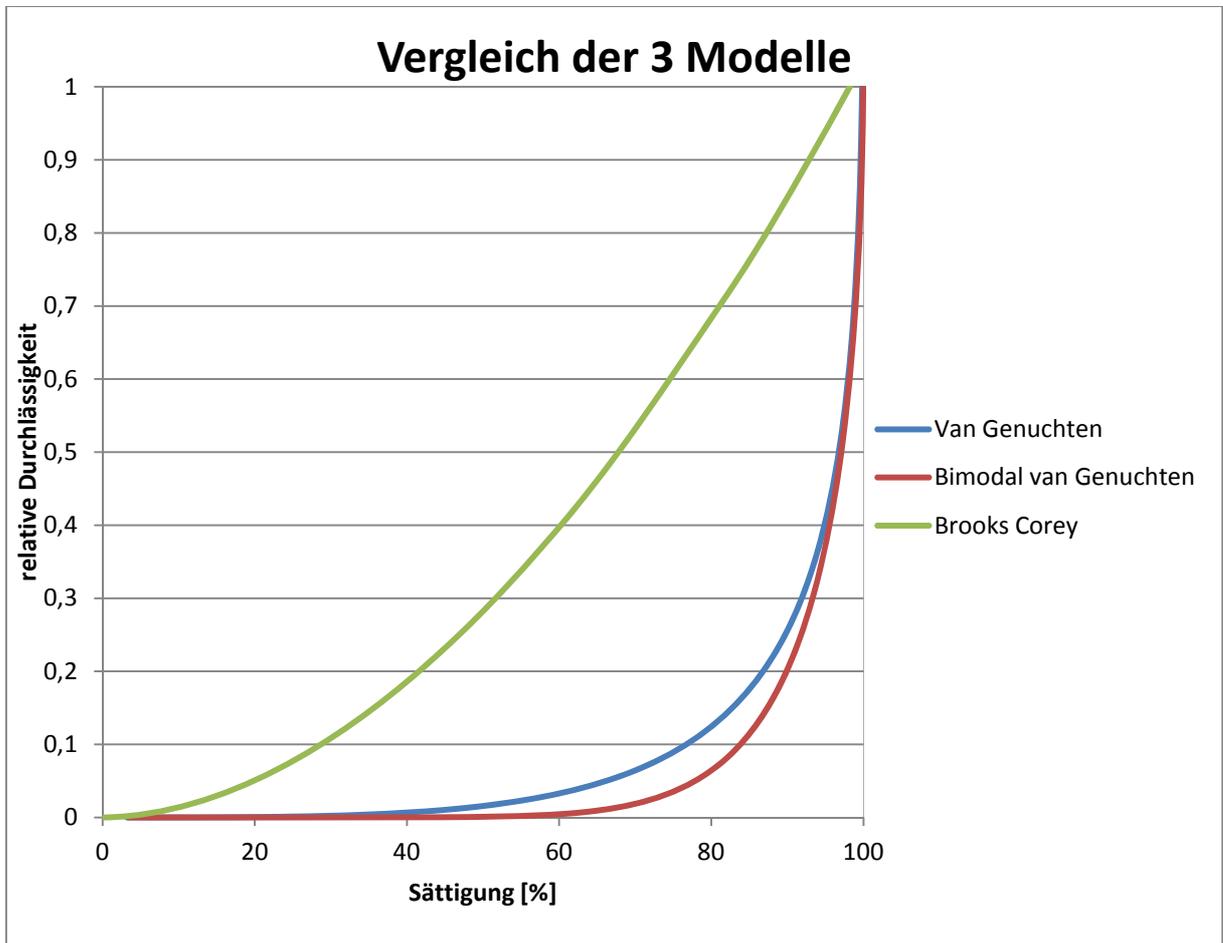


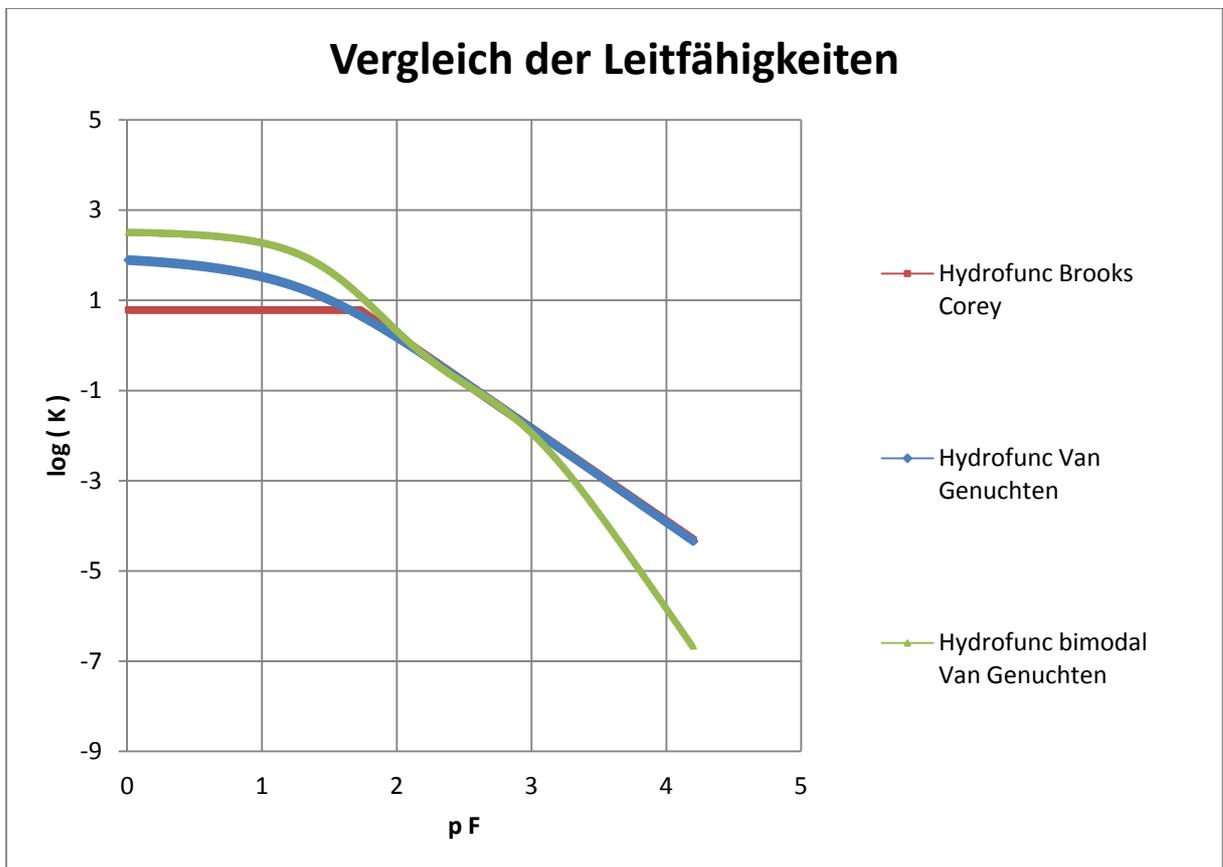
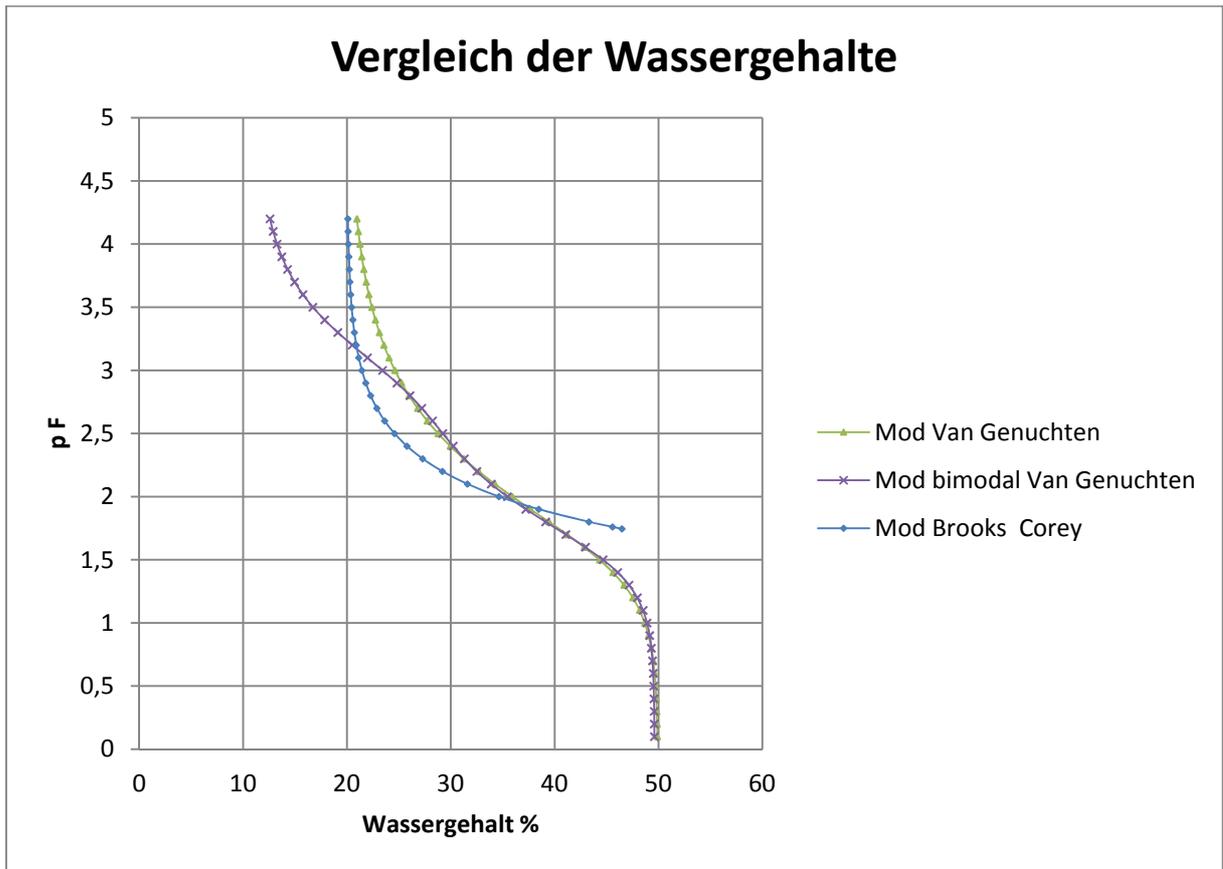
Anlage 7: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 18



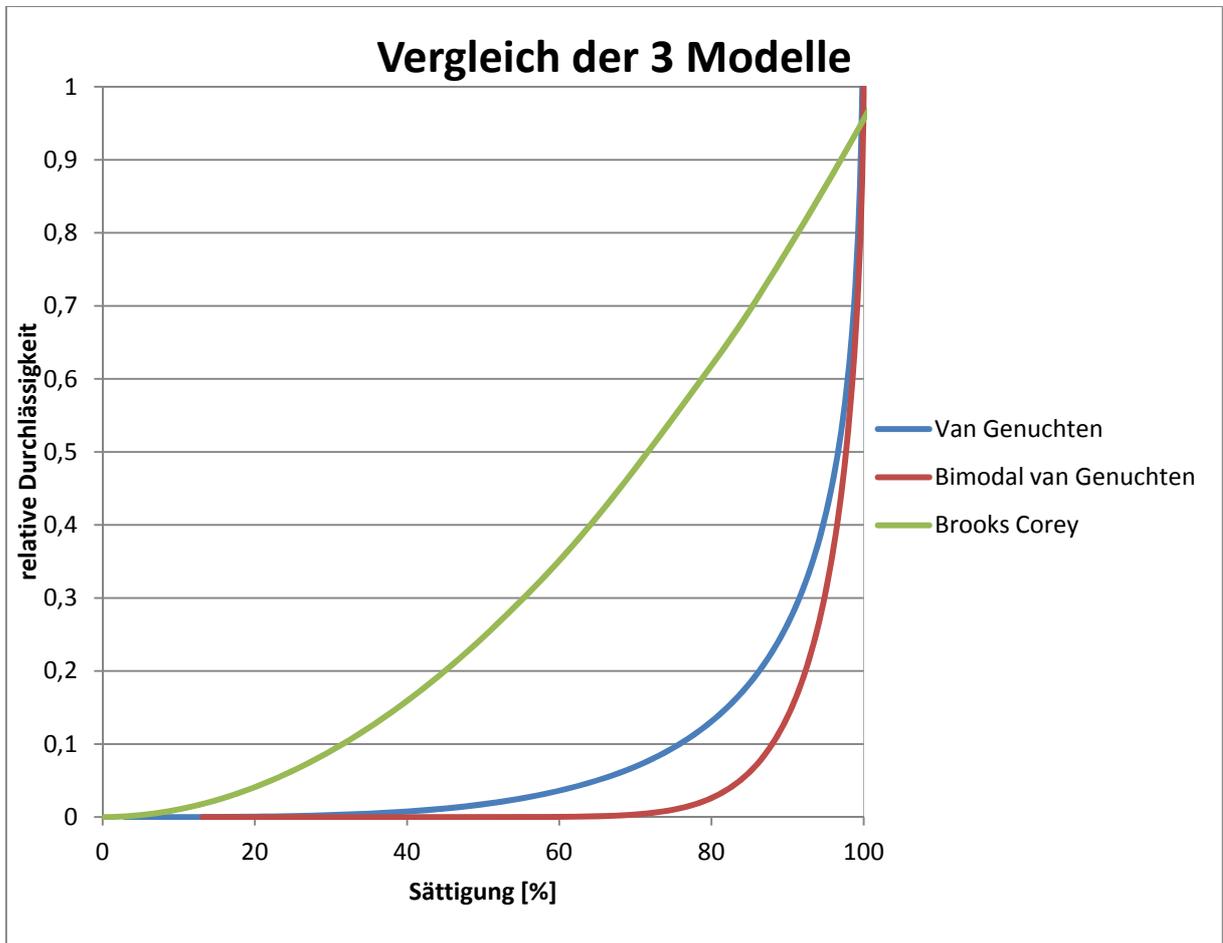


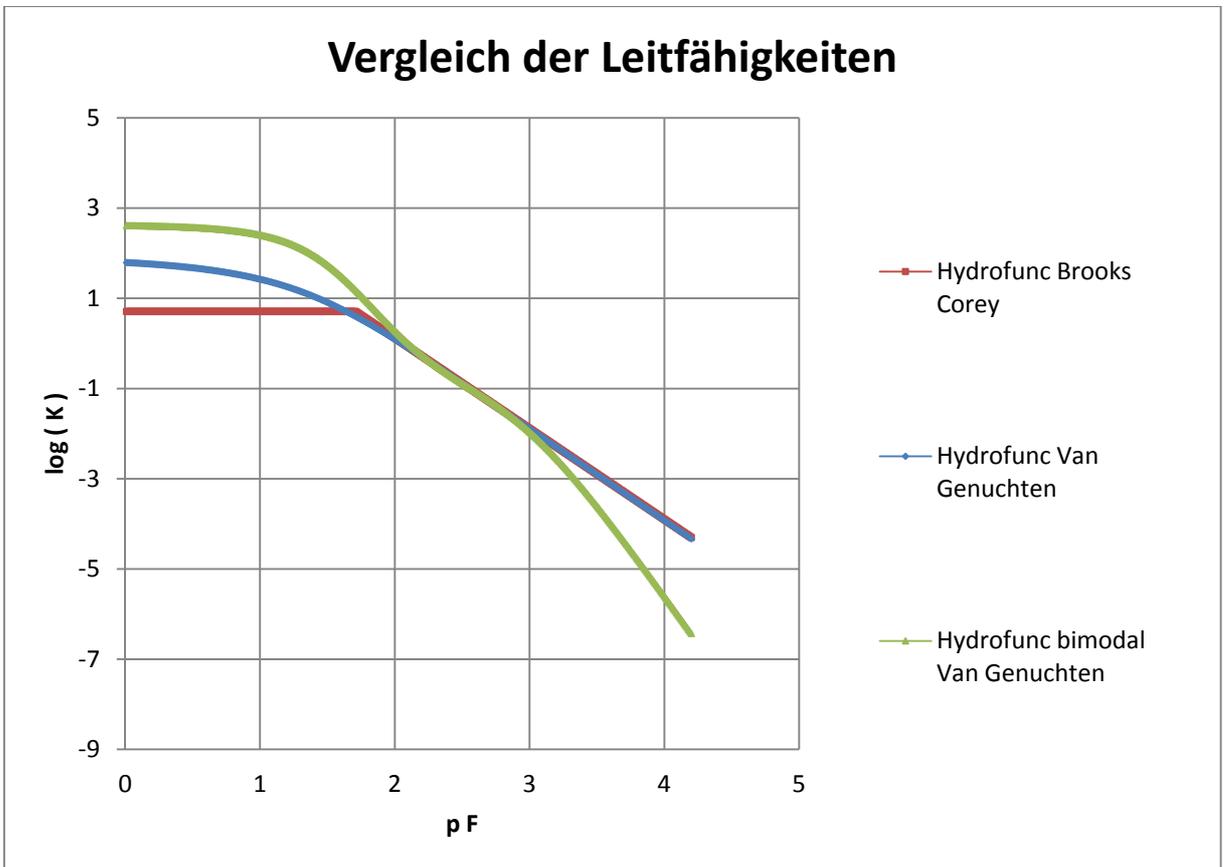
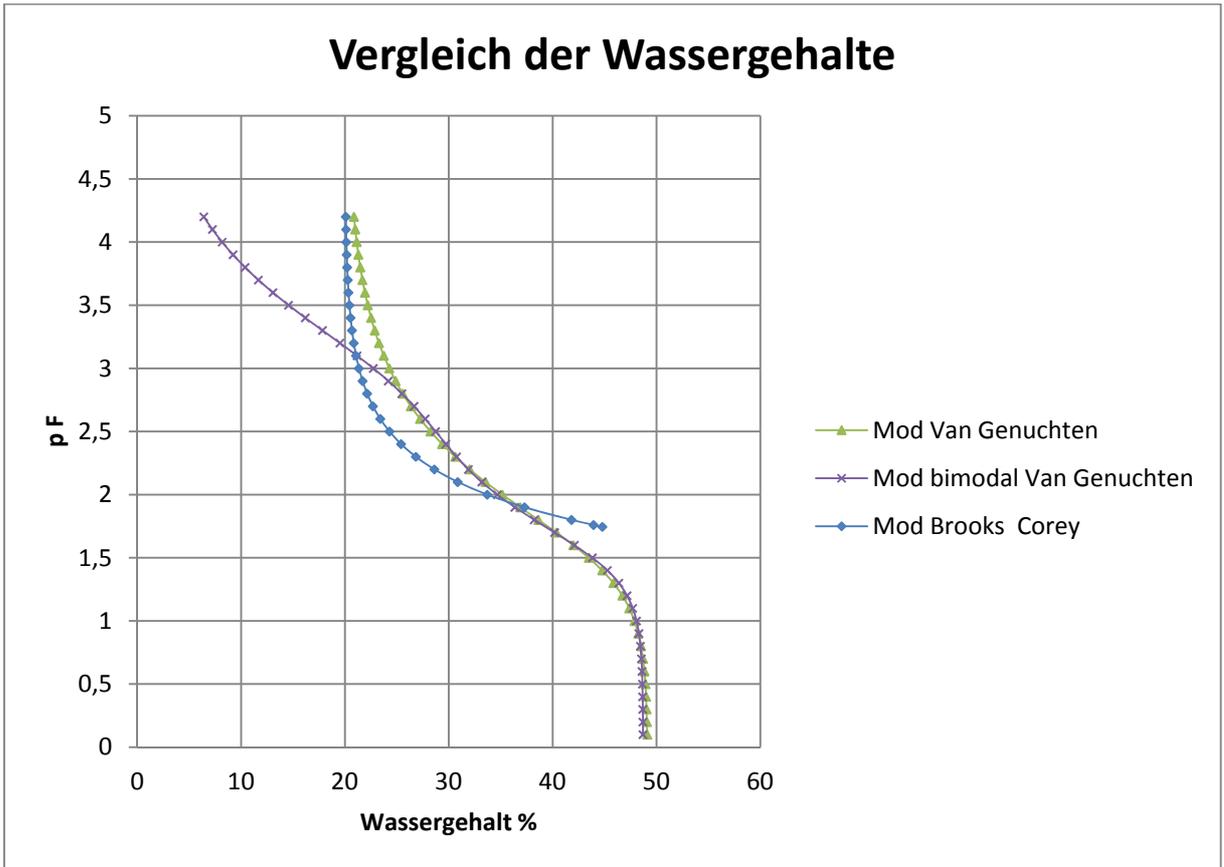
Anlage 8: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 19



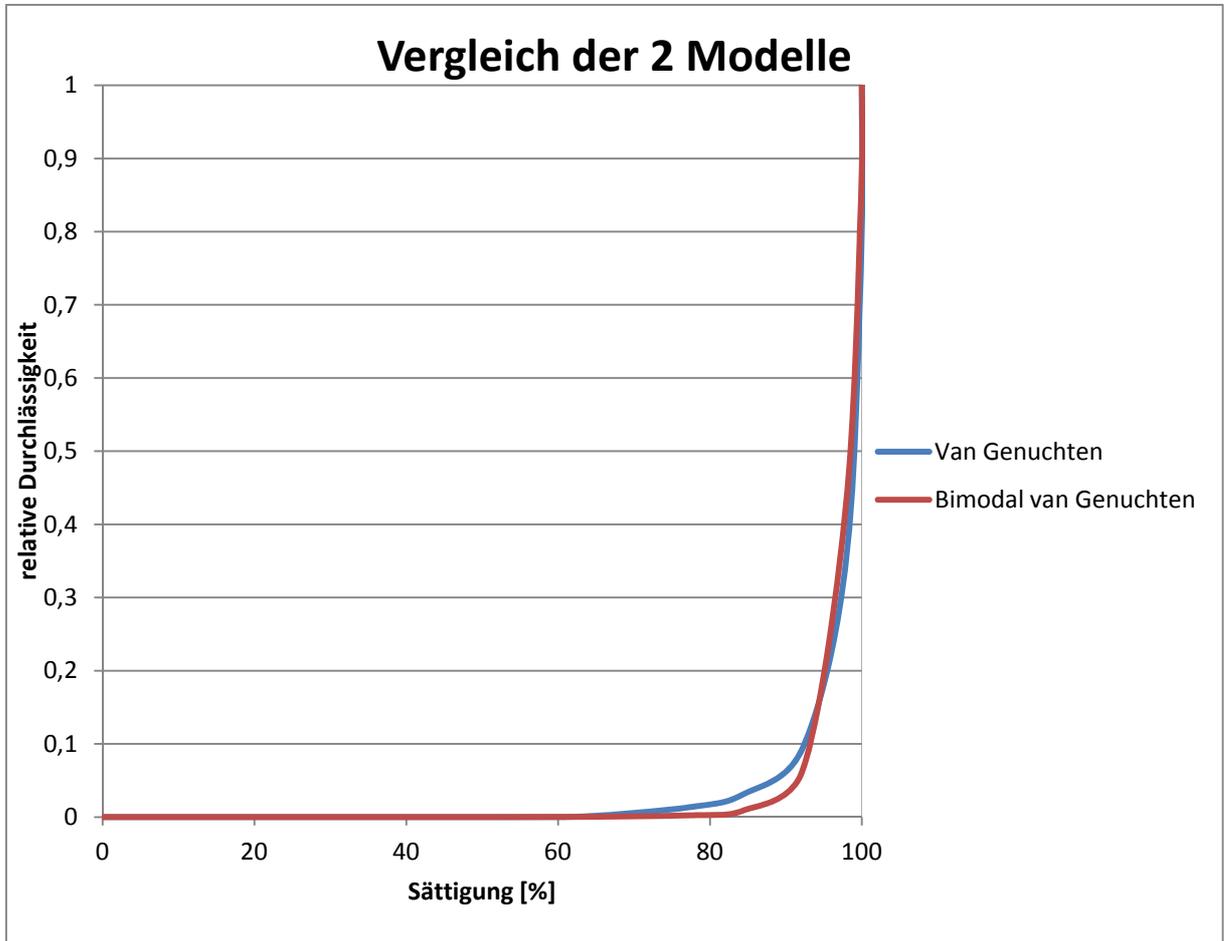


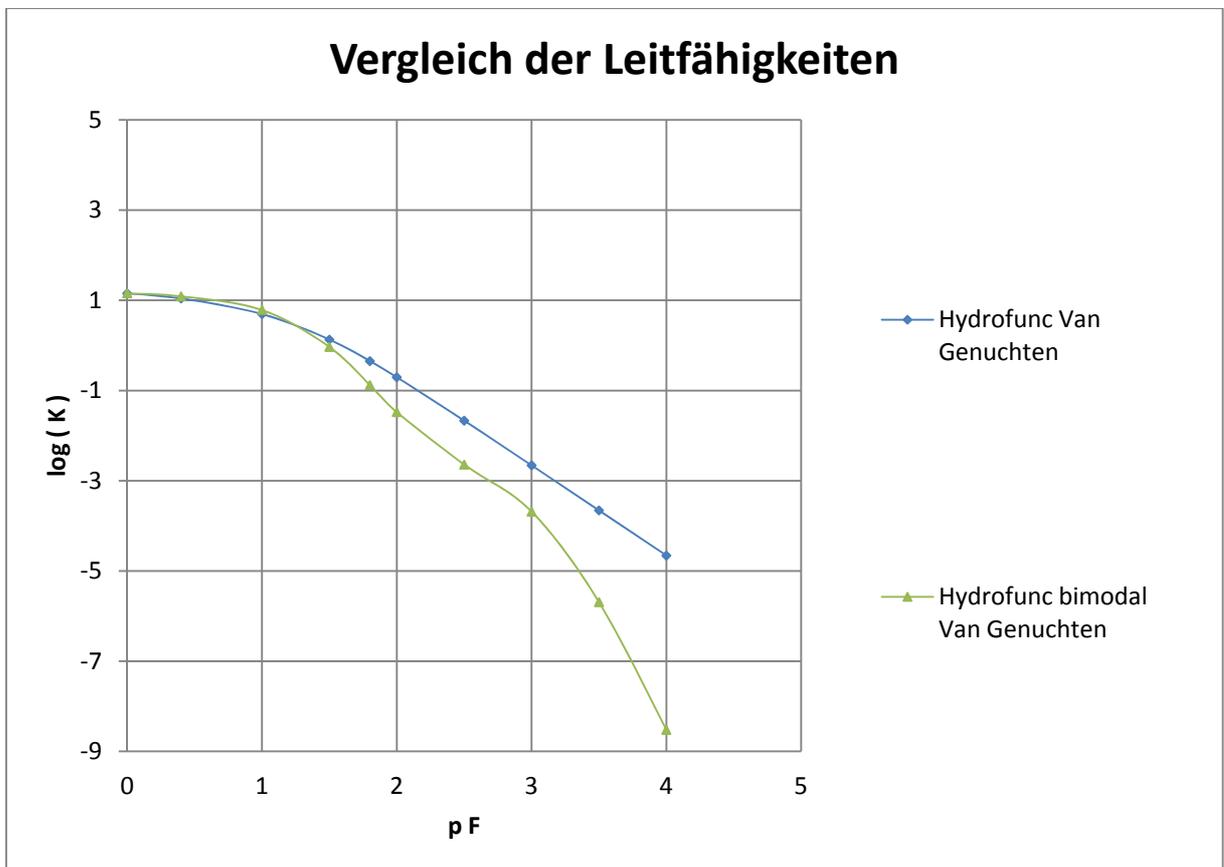
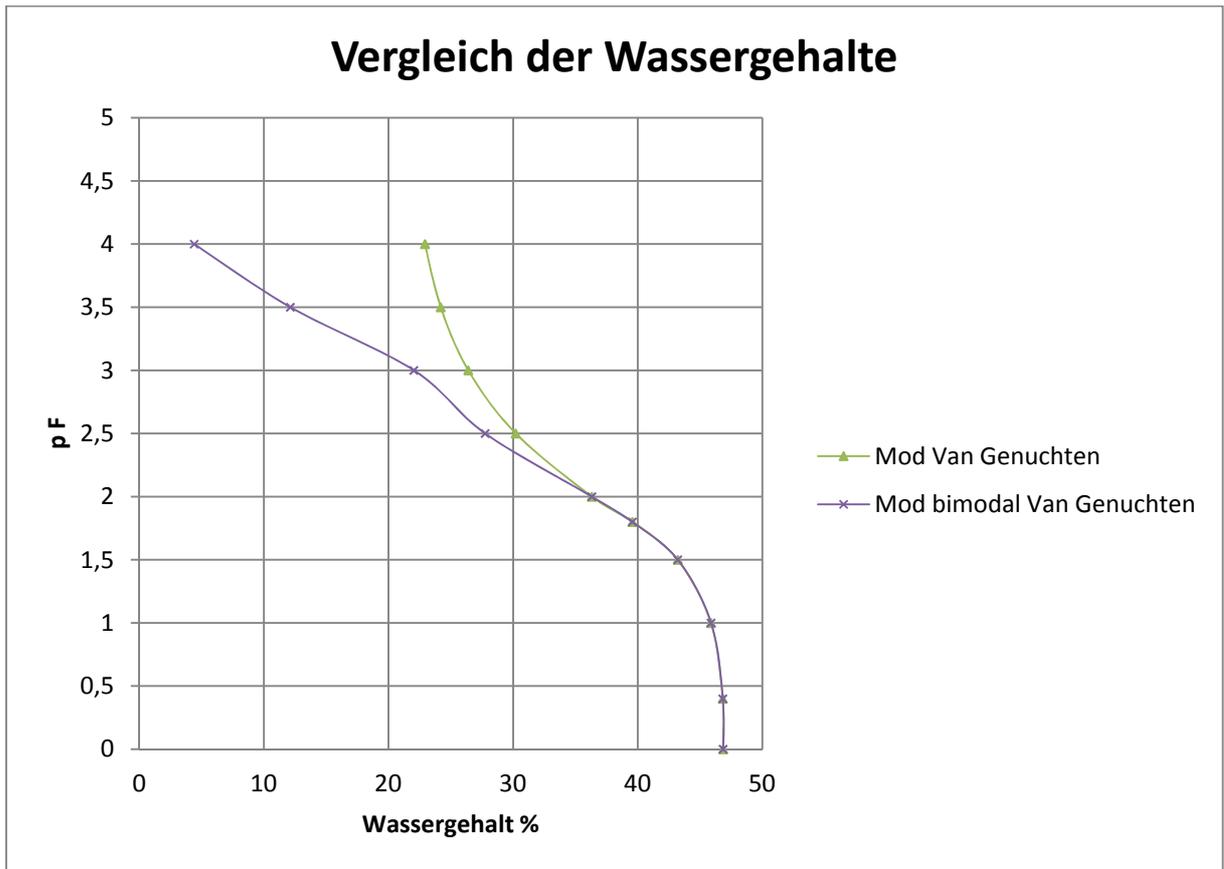
Anlage 9: Messergebnisse des Hyprop-Versuchs für STZ 20



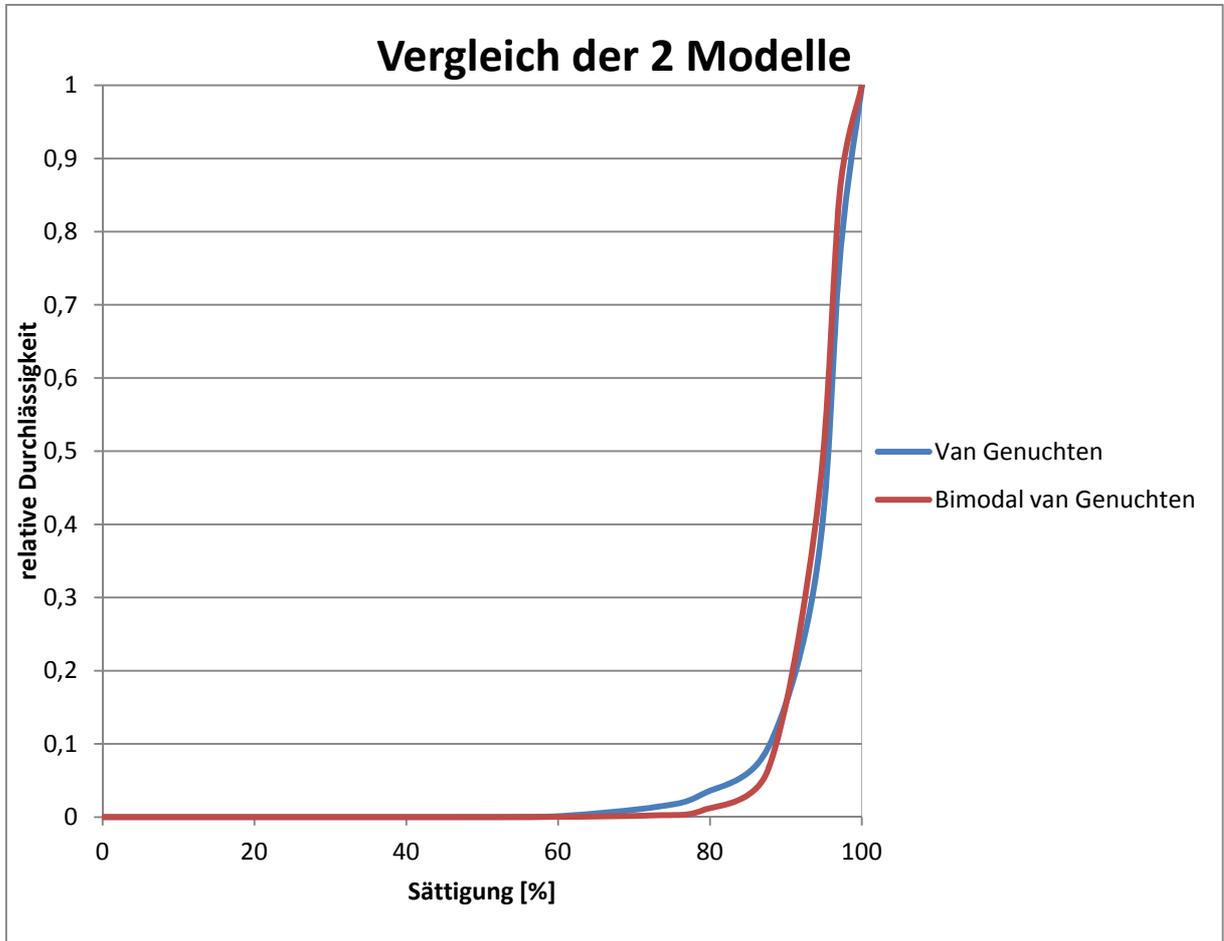


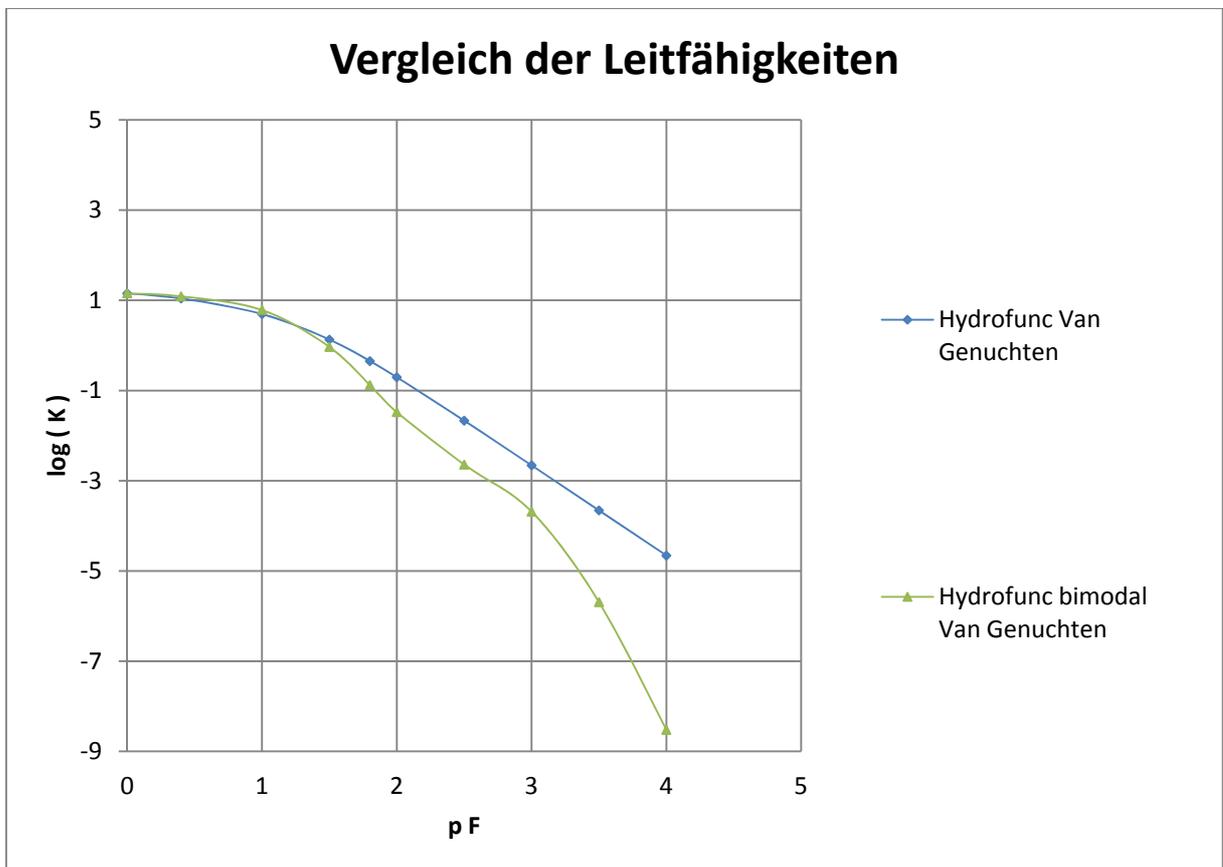
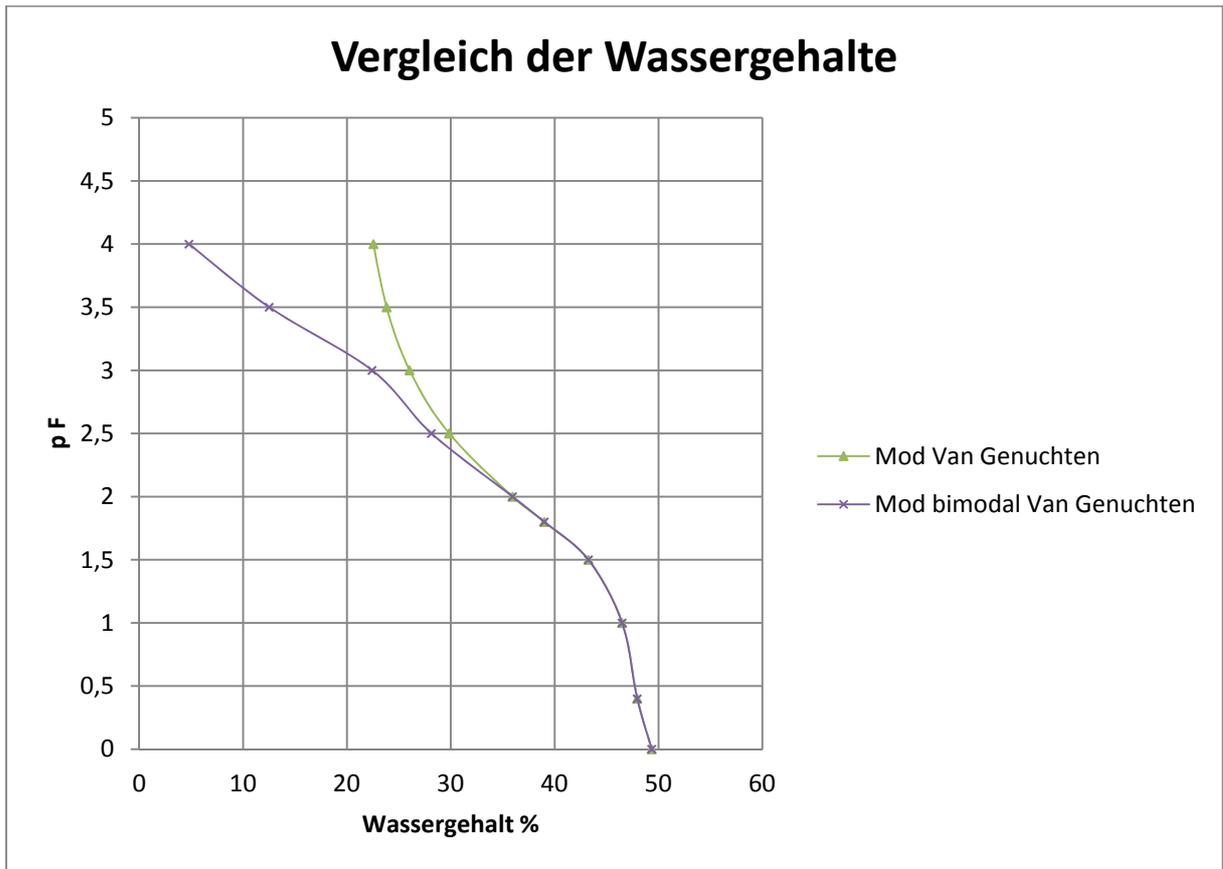
Anlage 10: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 19



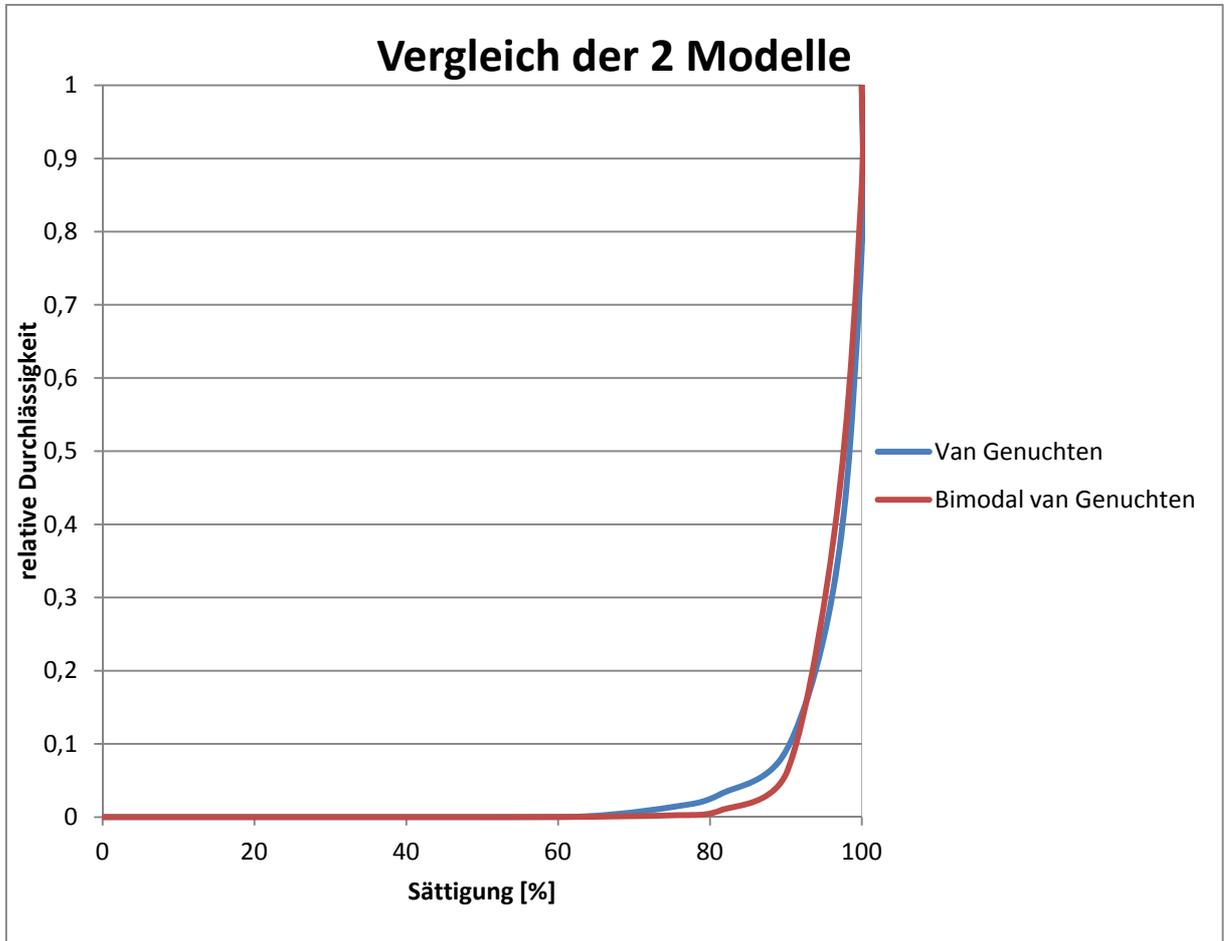


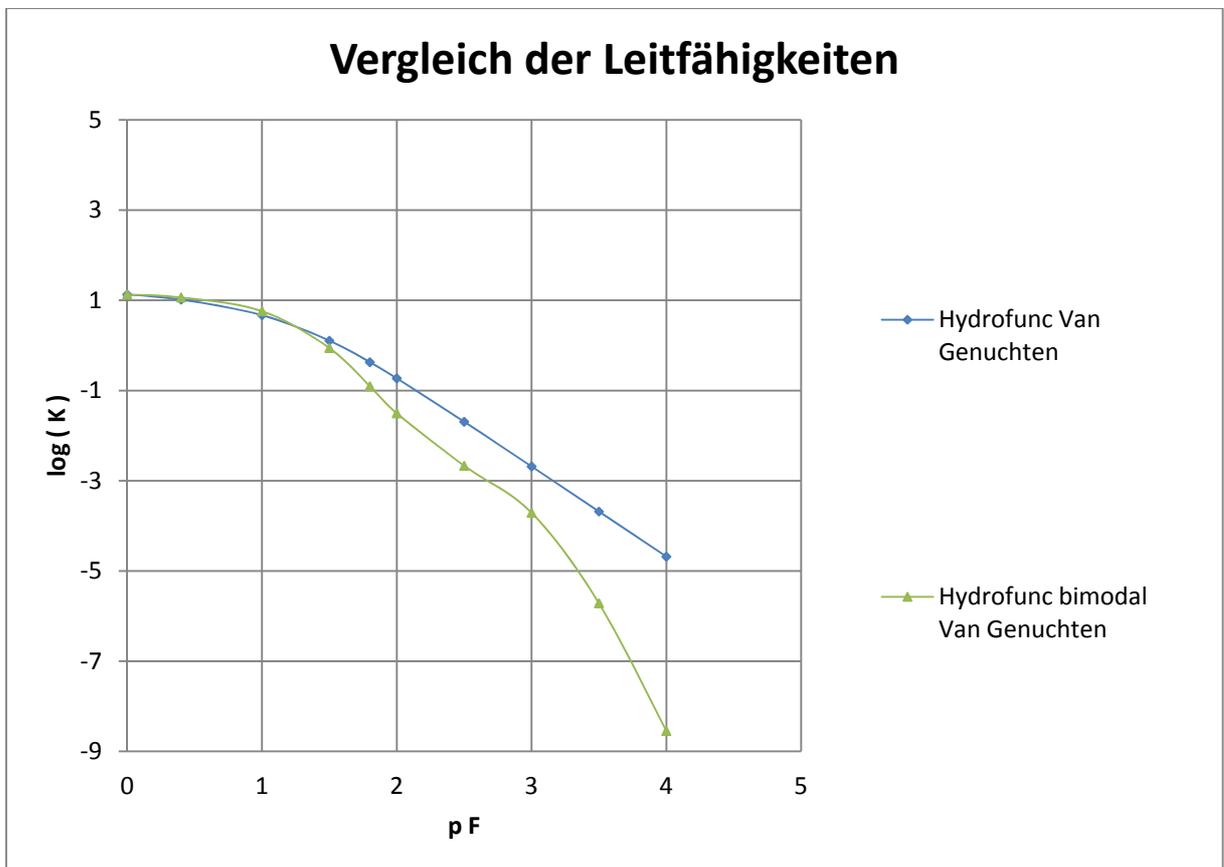
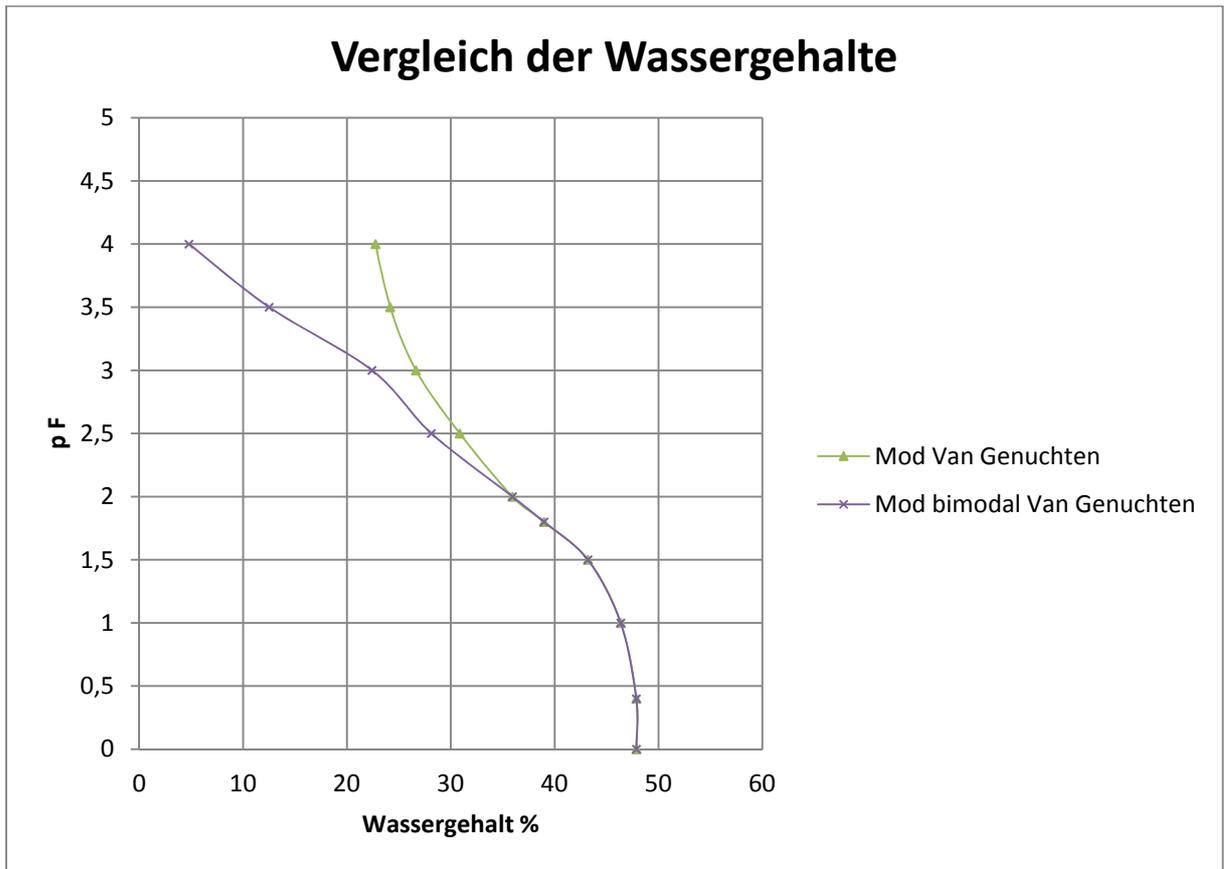
Anlage 11: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 20



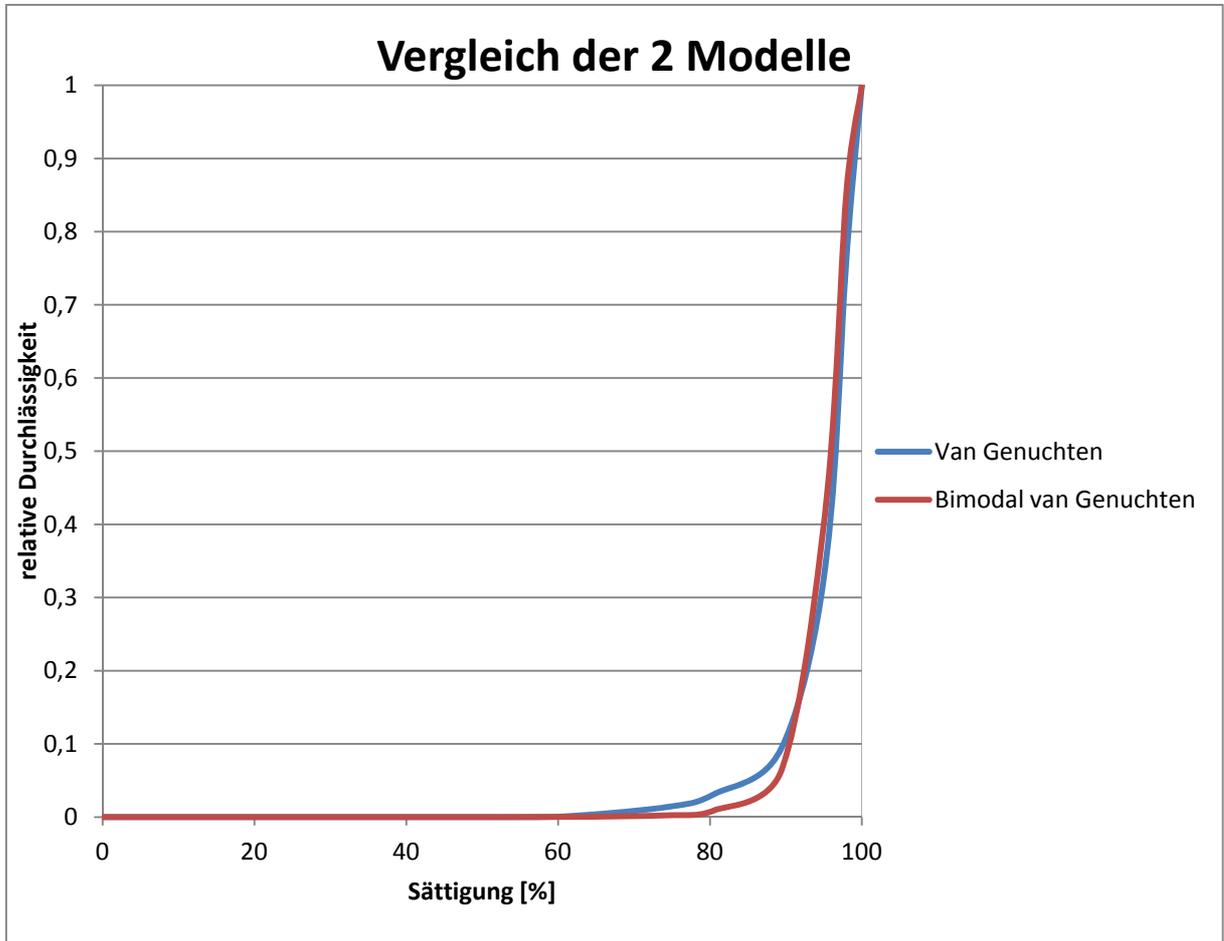


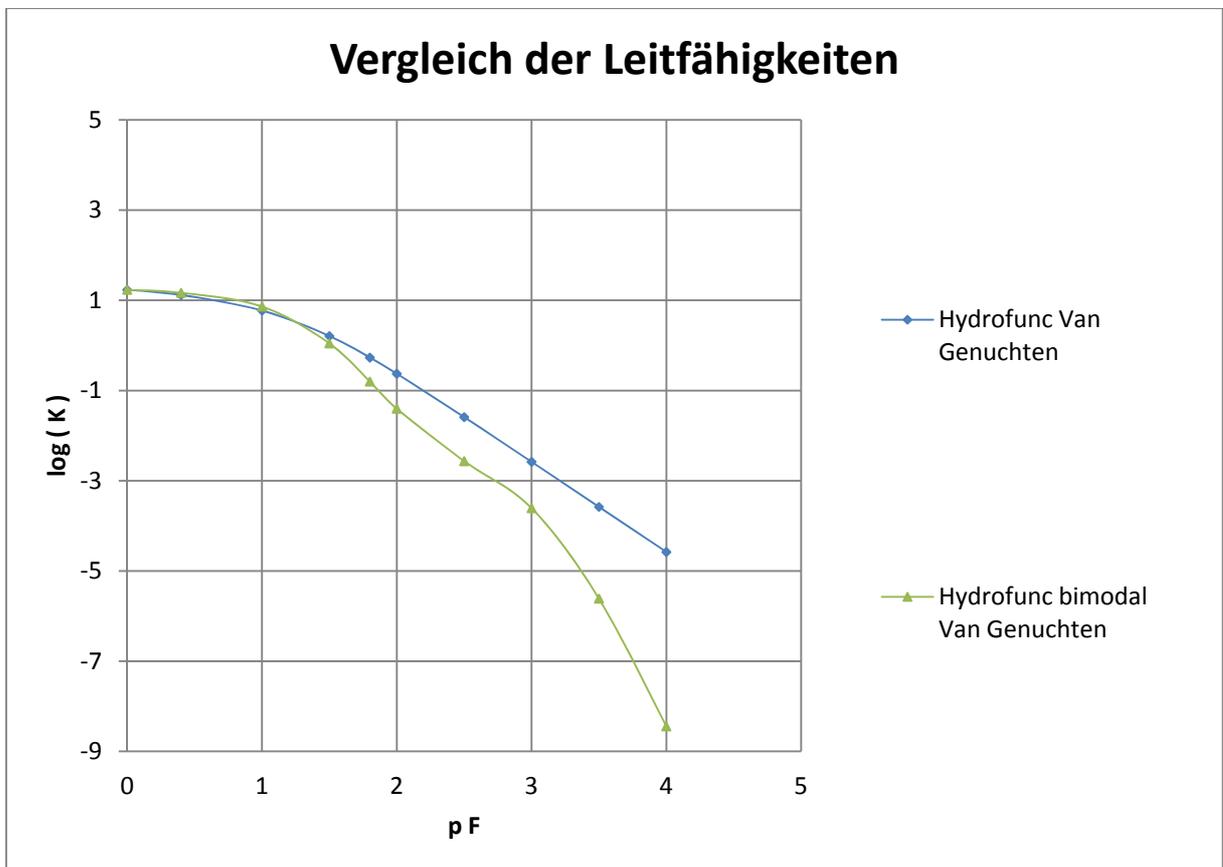
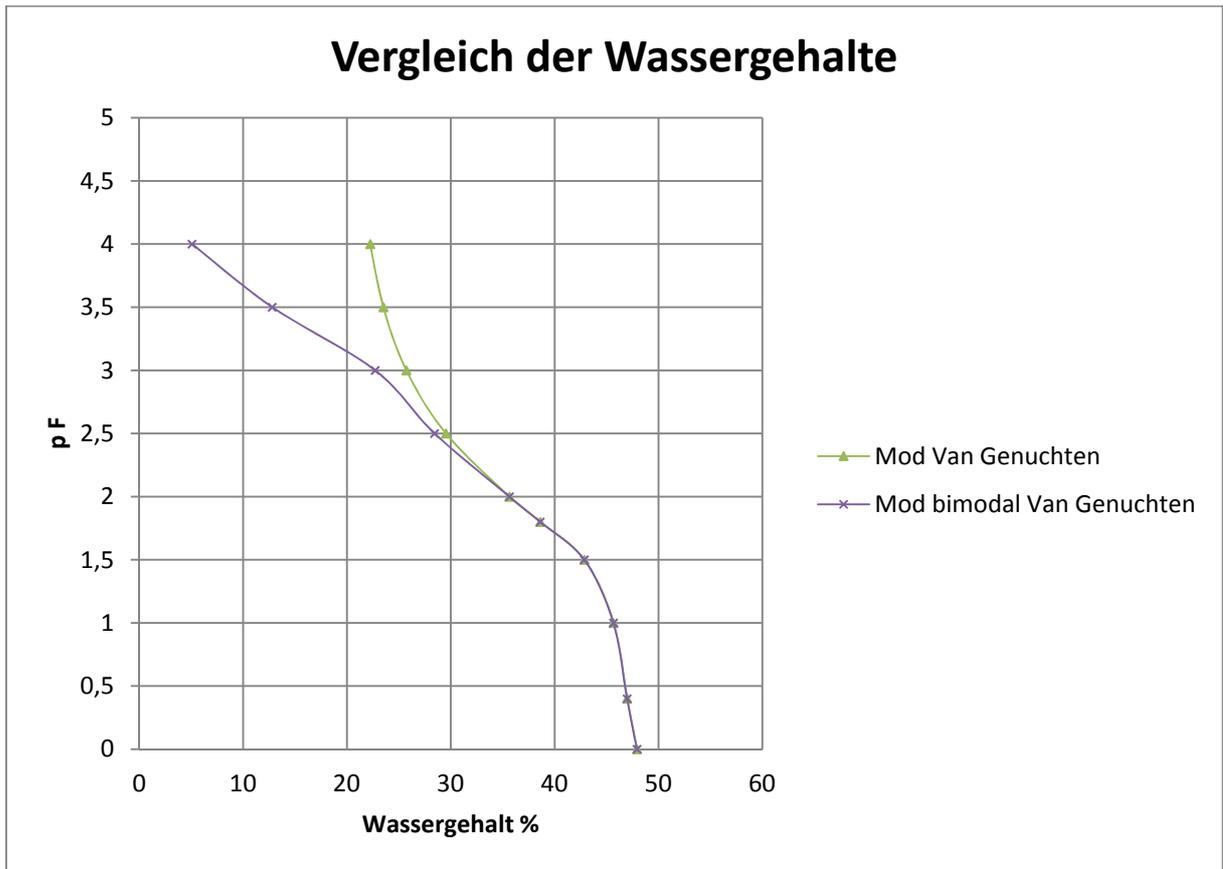
Anlage 12: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 22



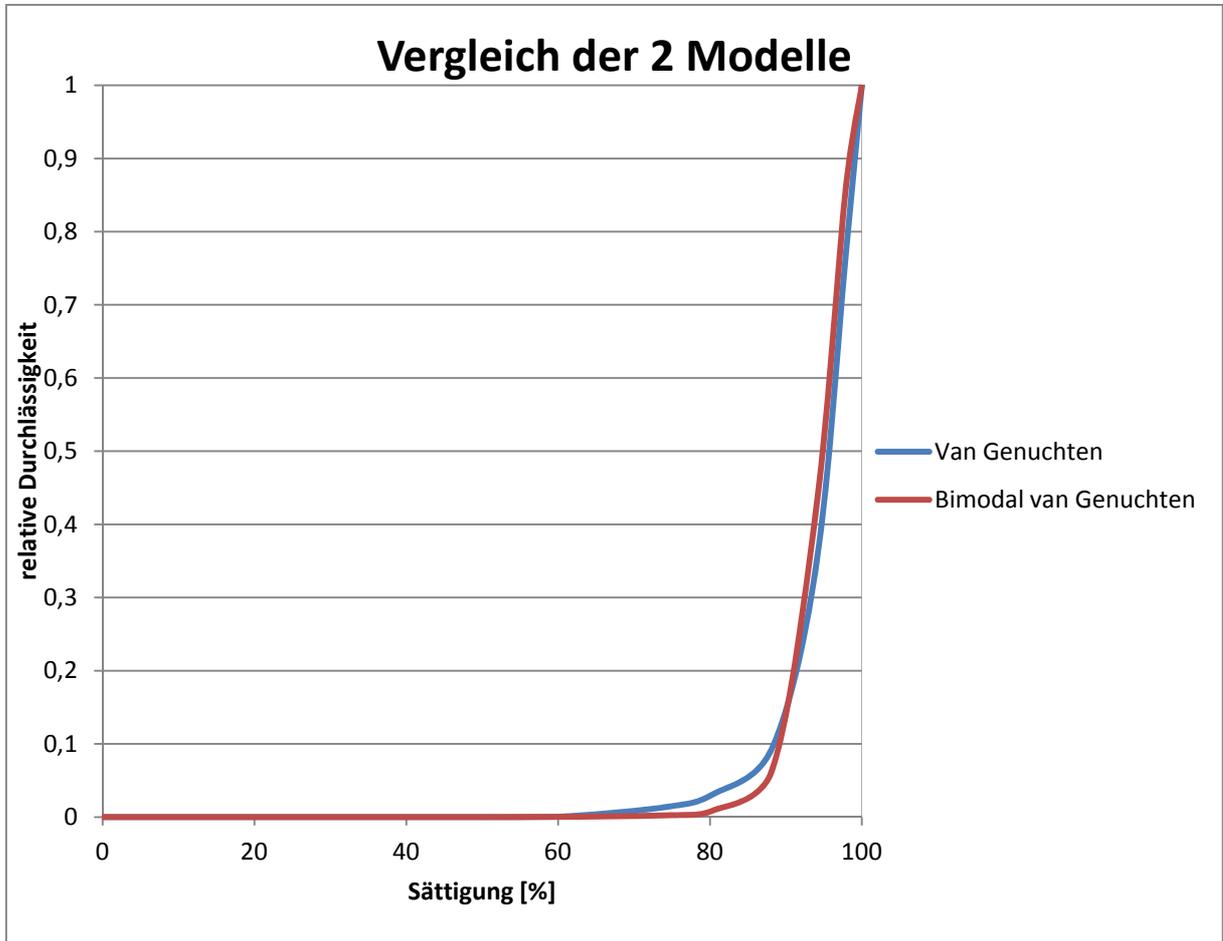


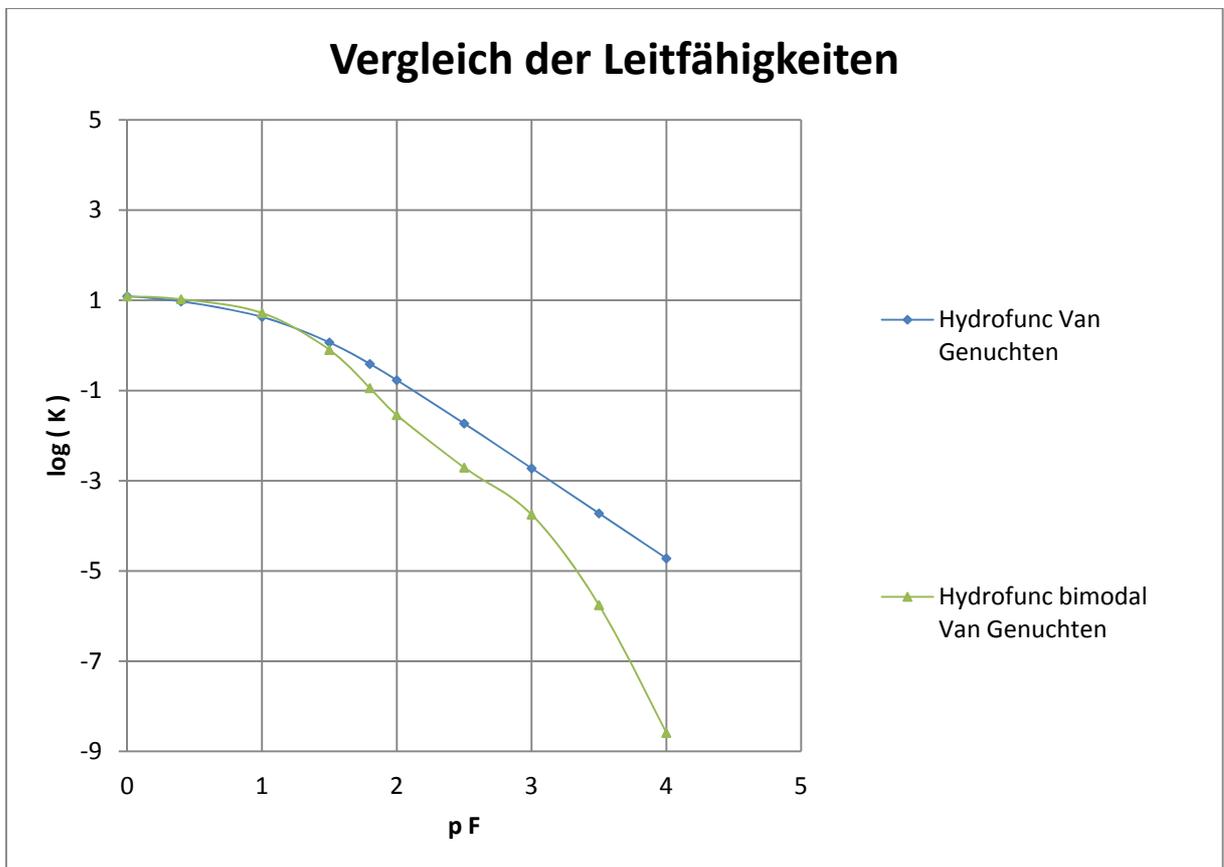
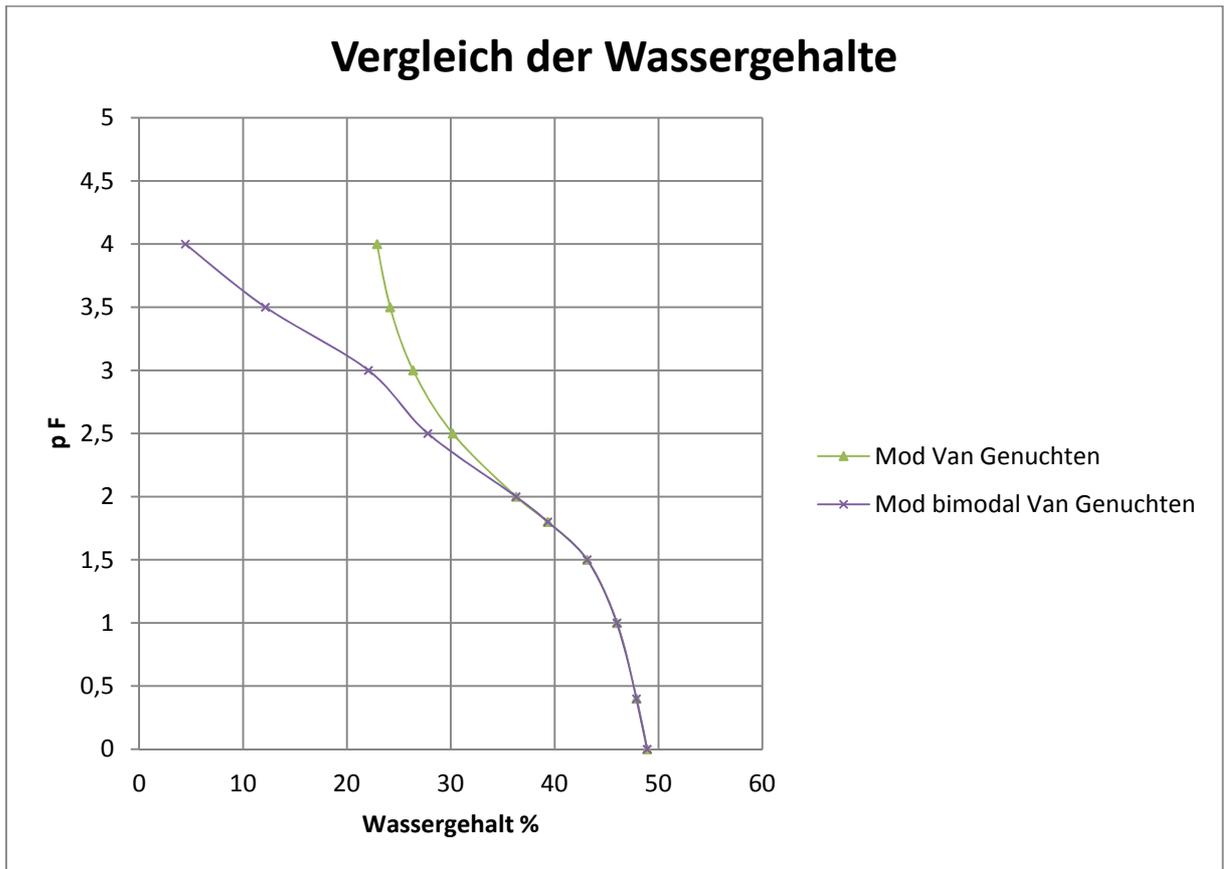
Anlage 13: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 23



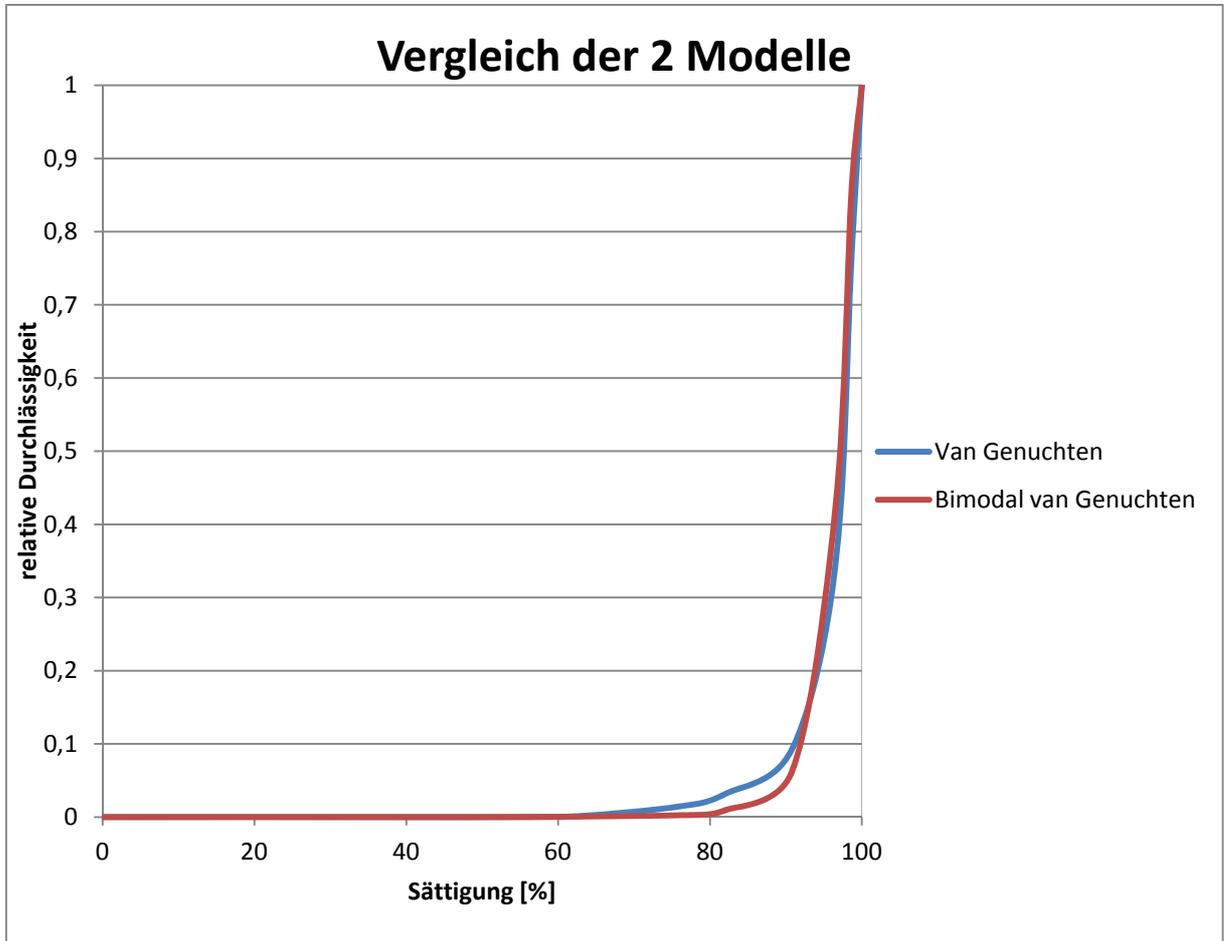


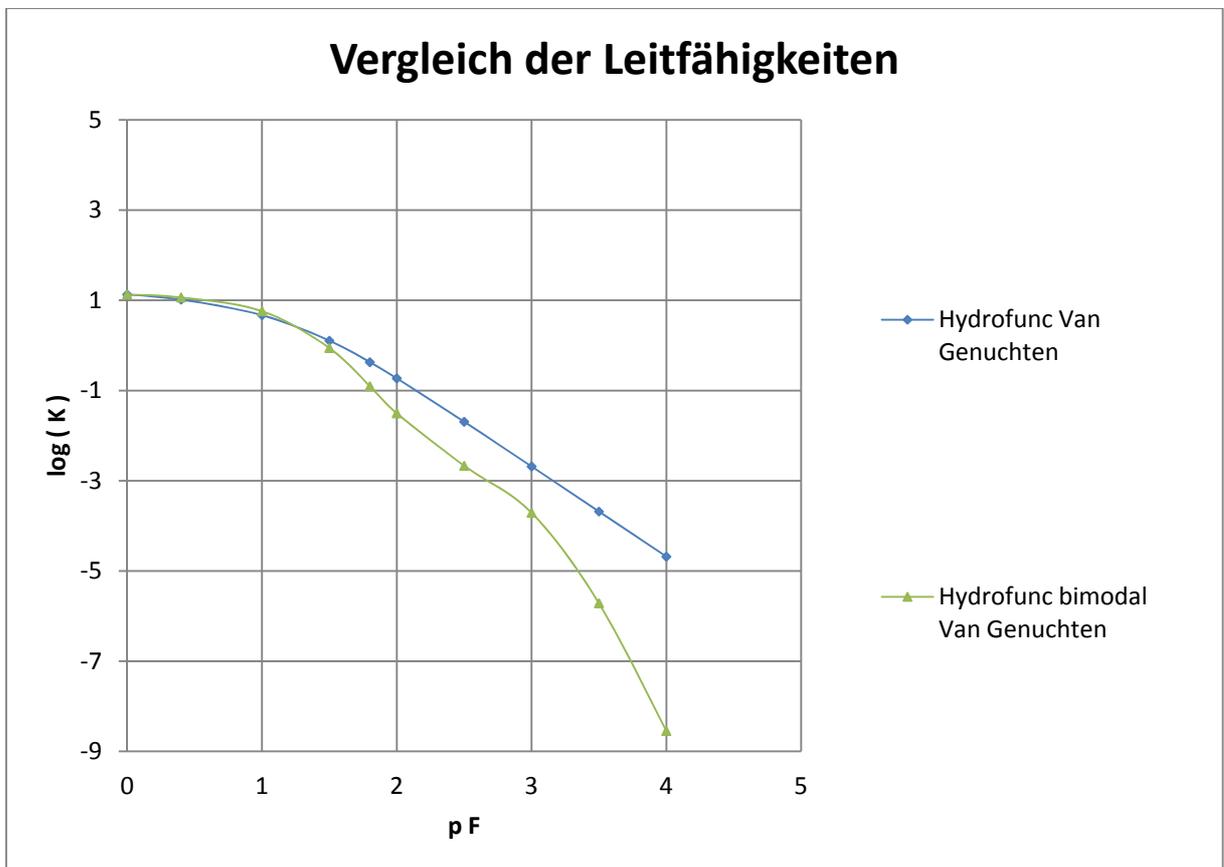
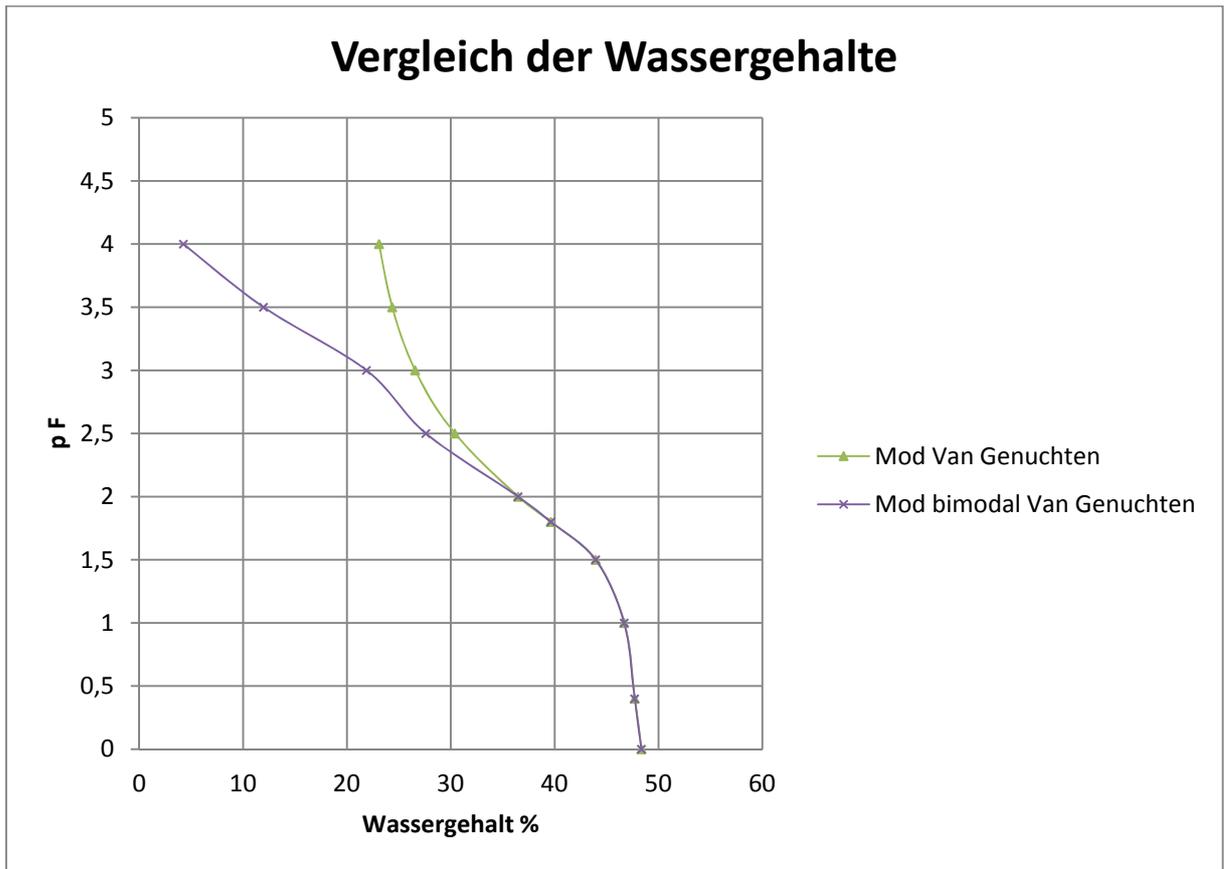
Anlage 14: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 24



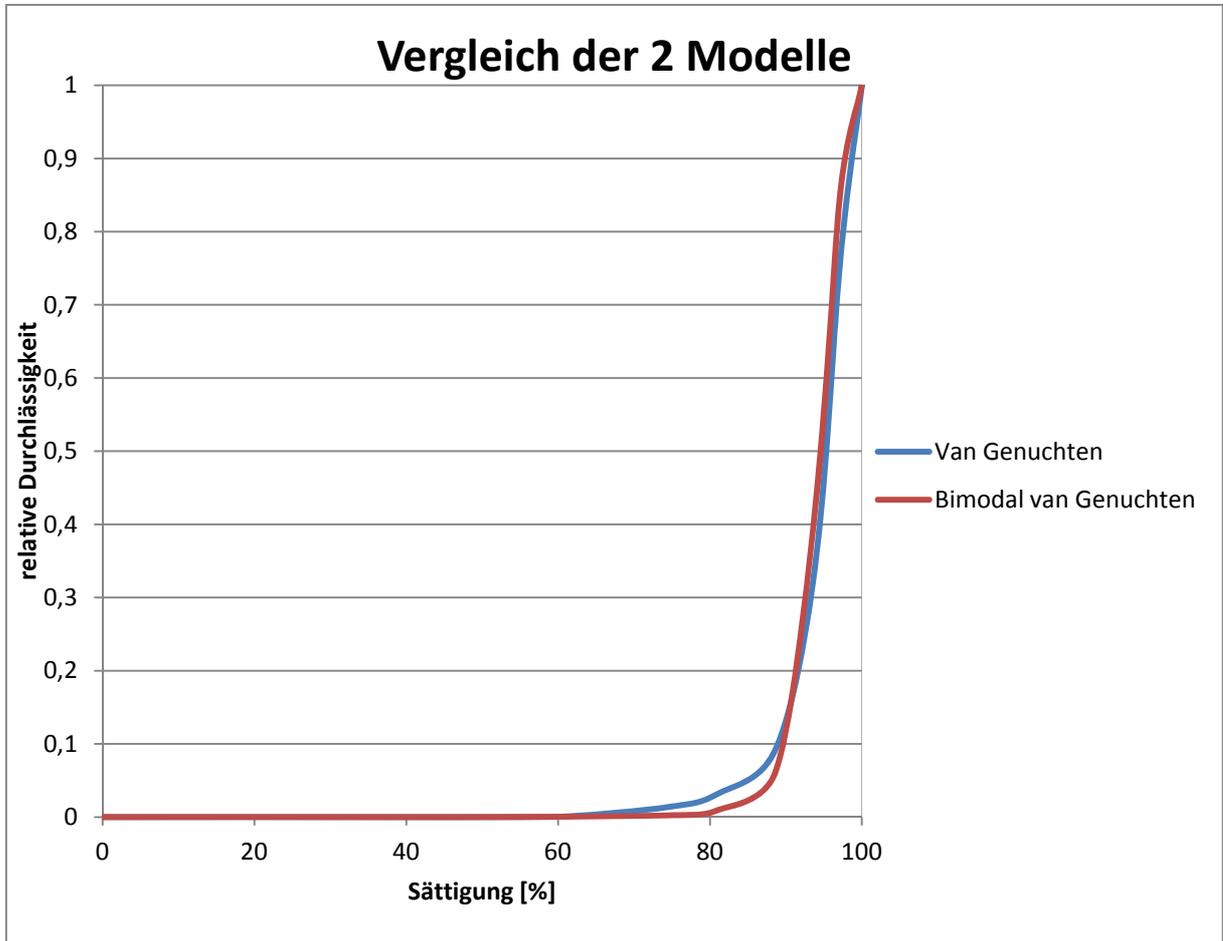


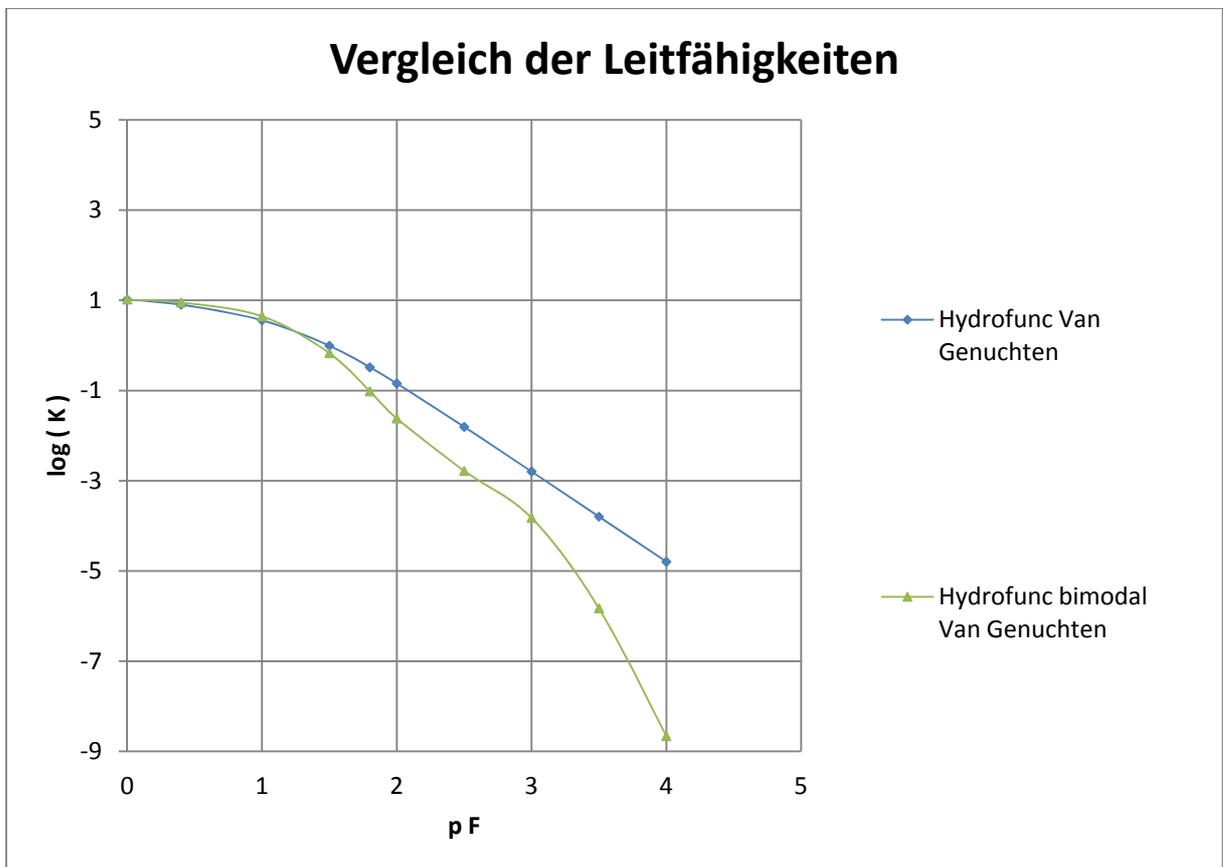
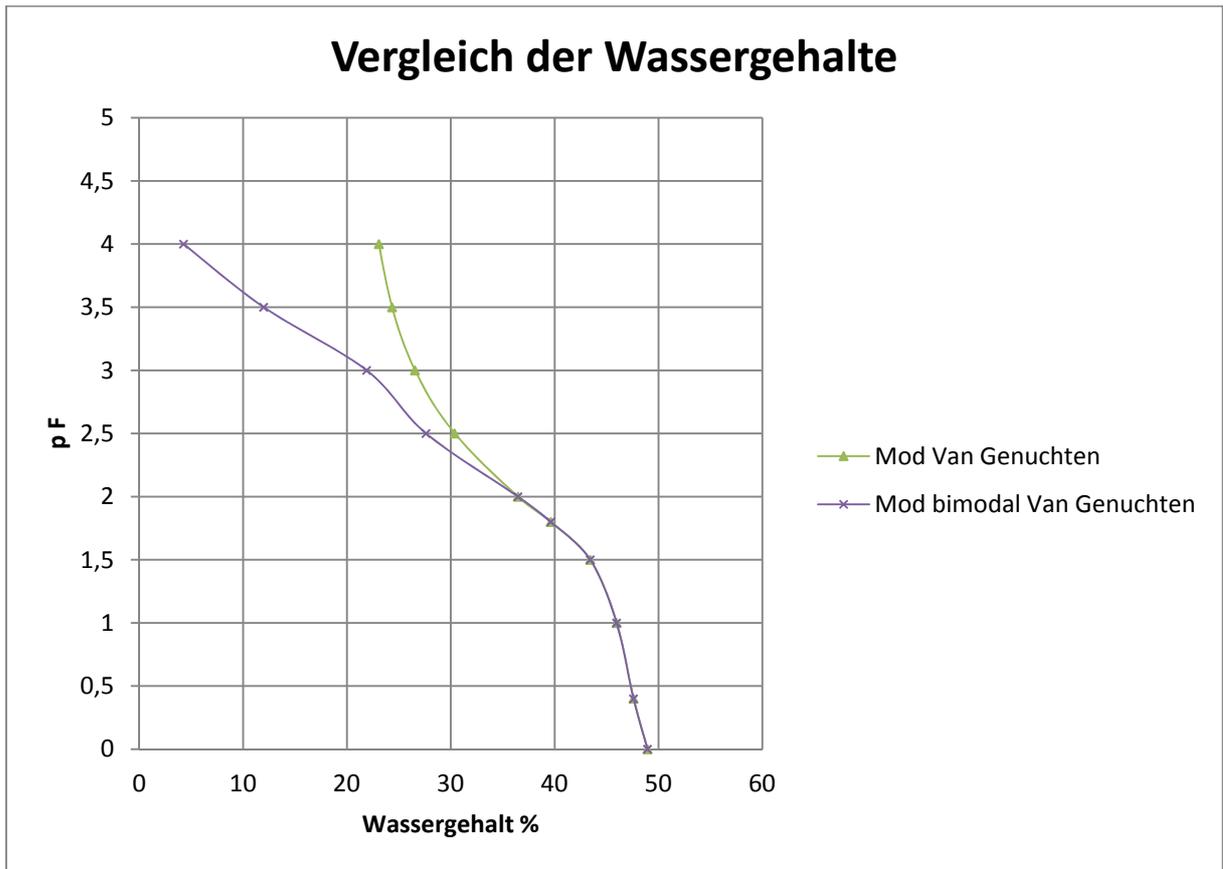
Anlage 15: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 25



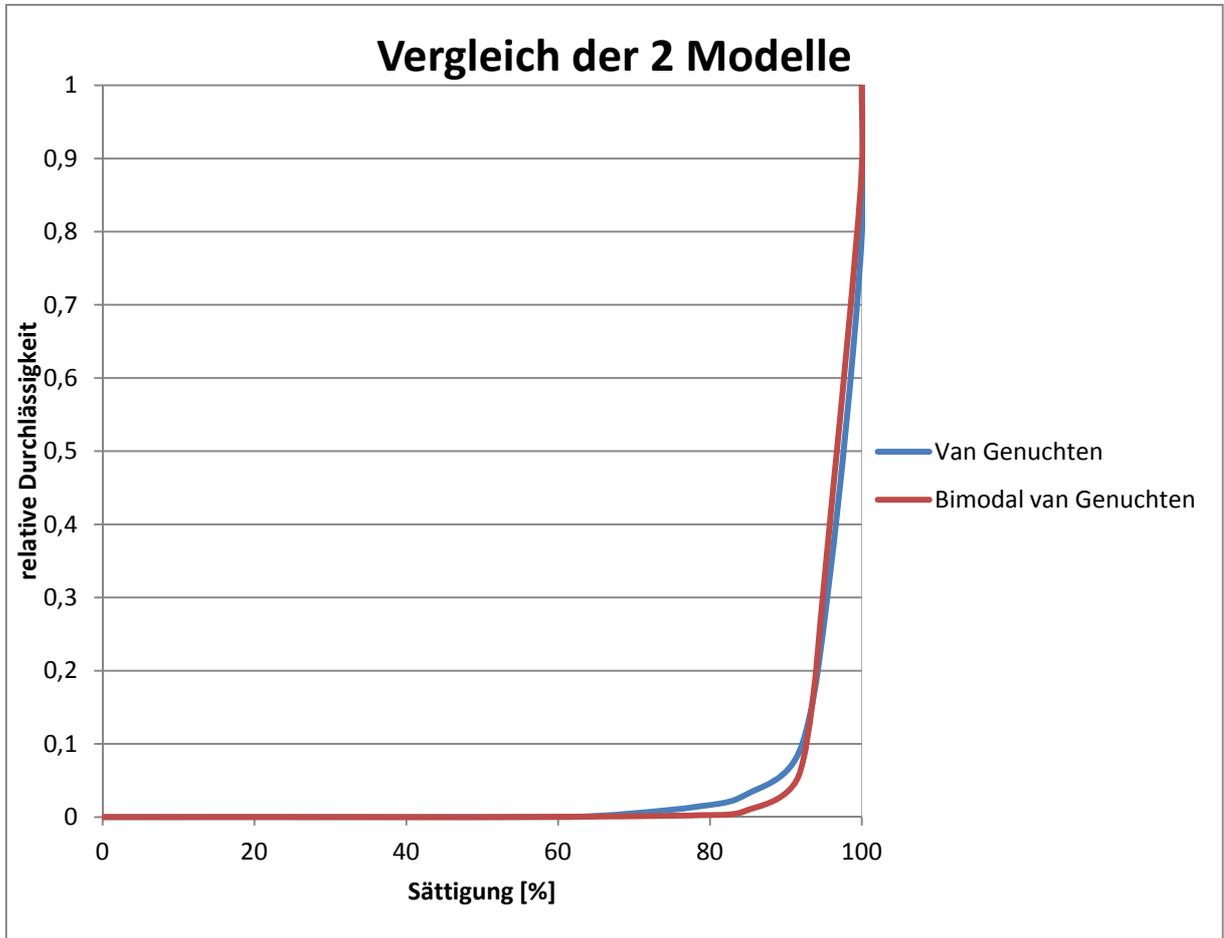


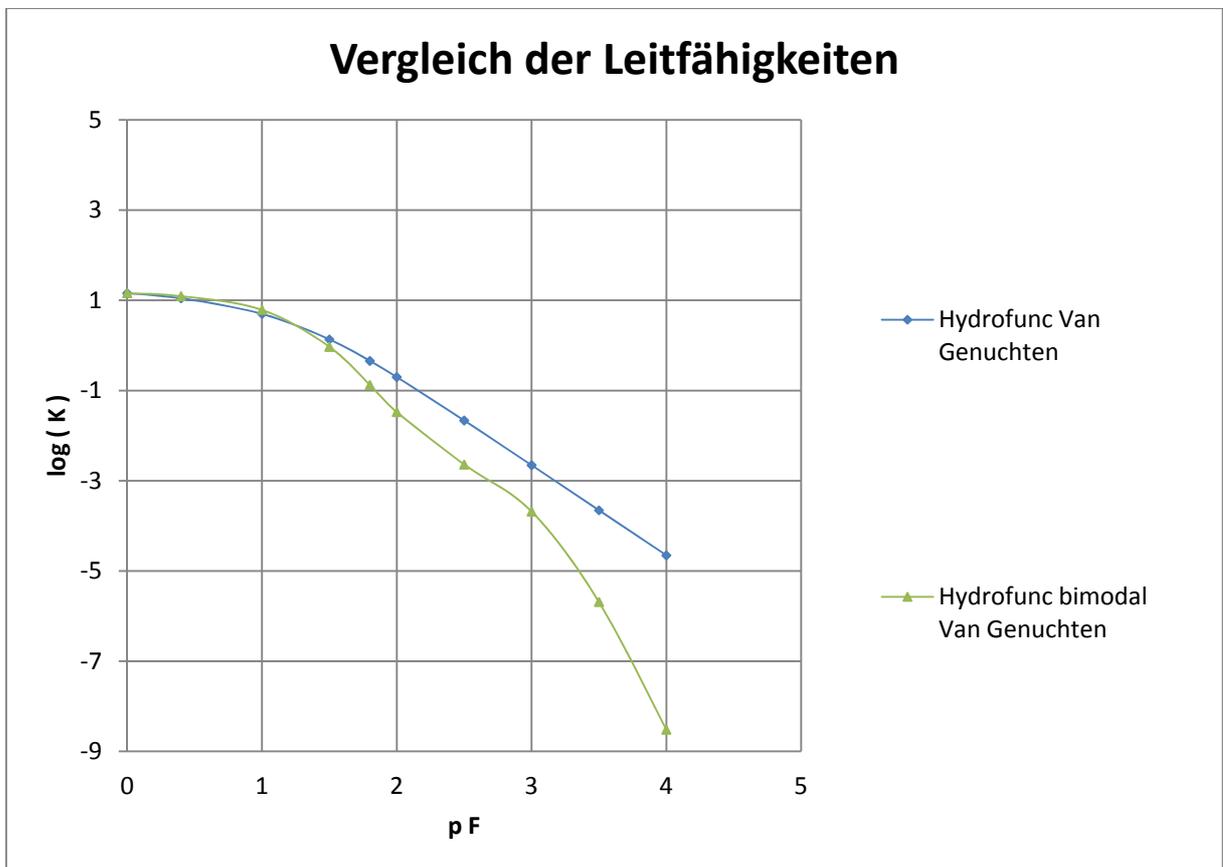
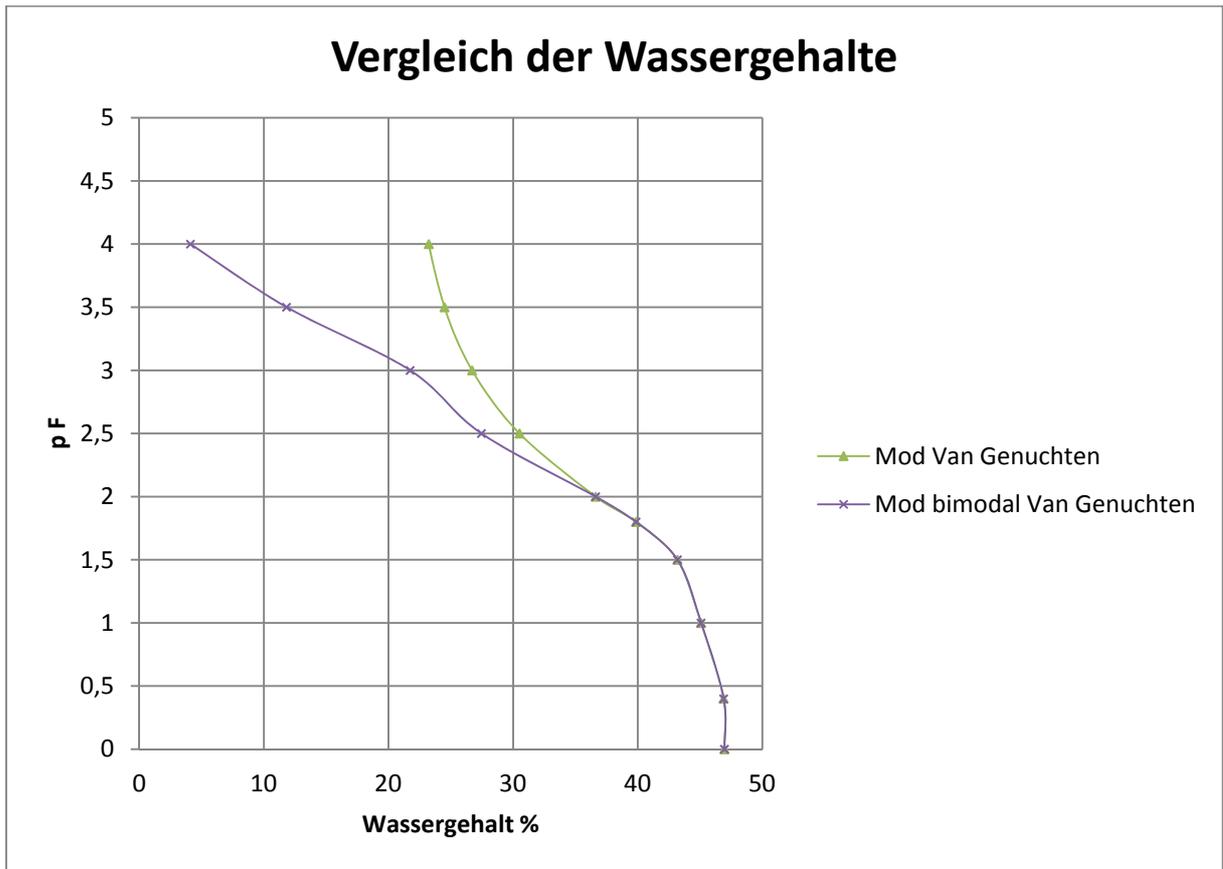
Anlage 16: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 26



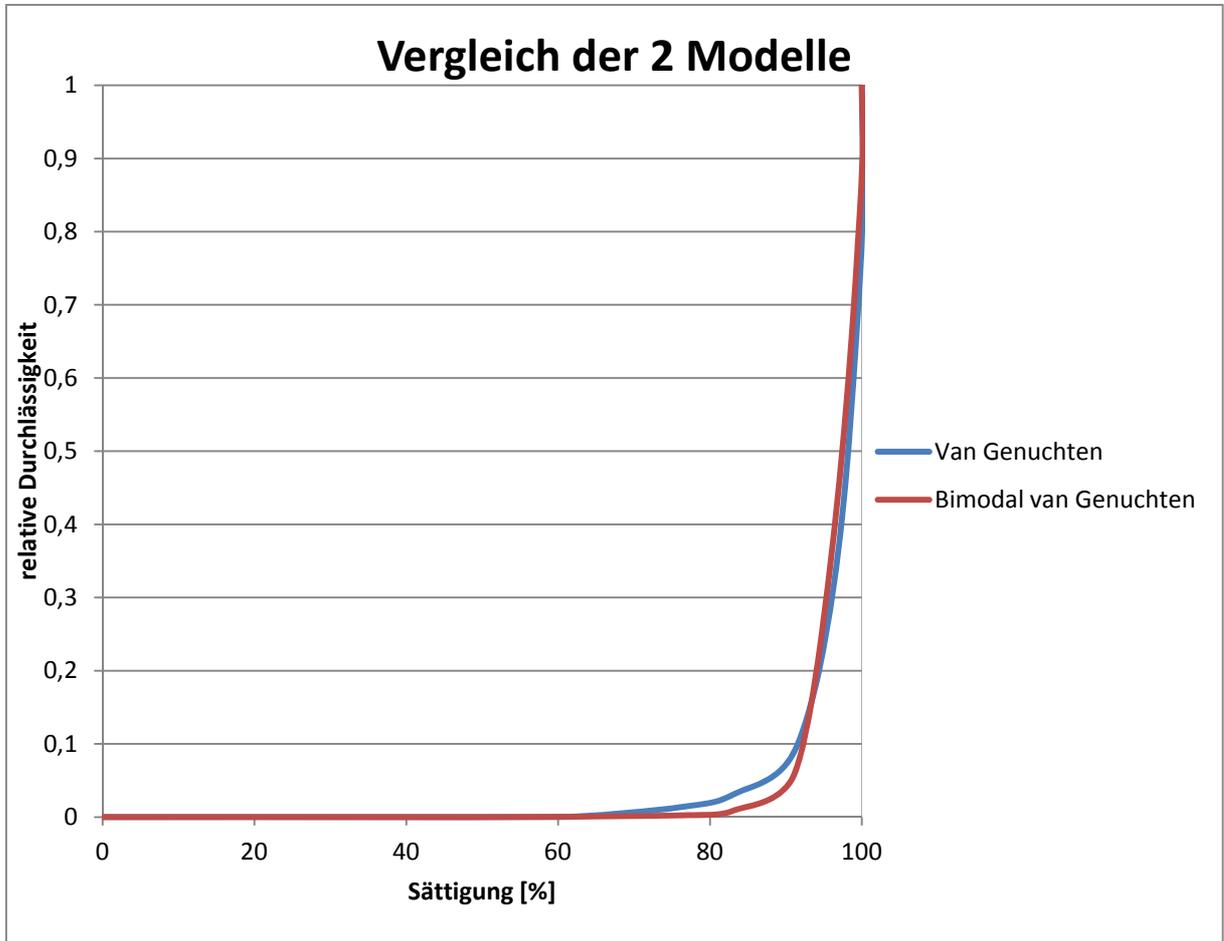


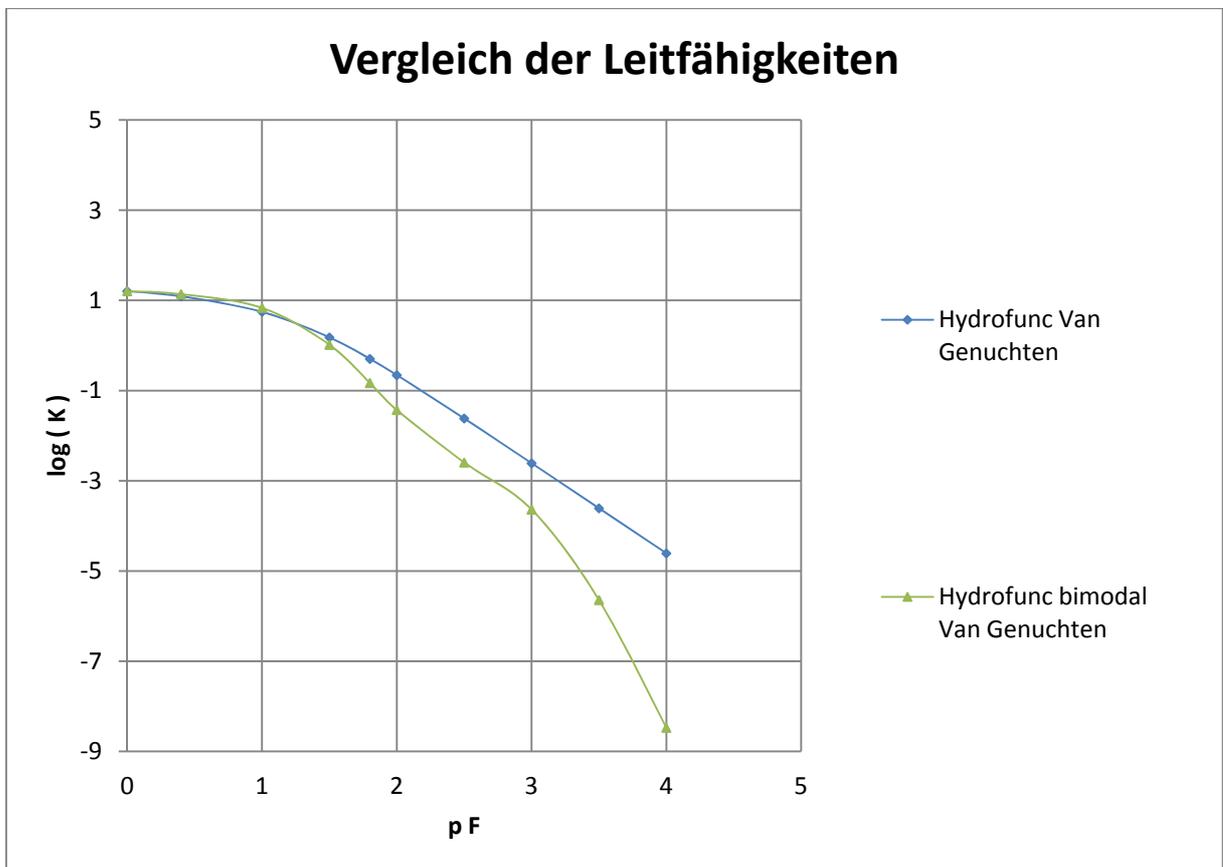
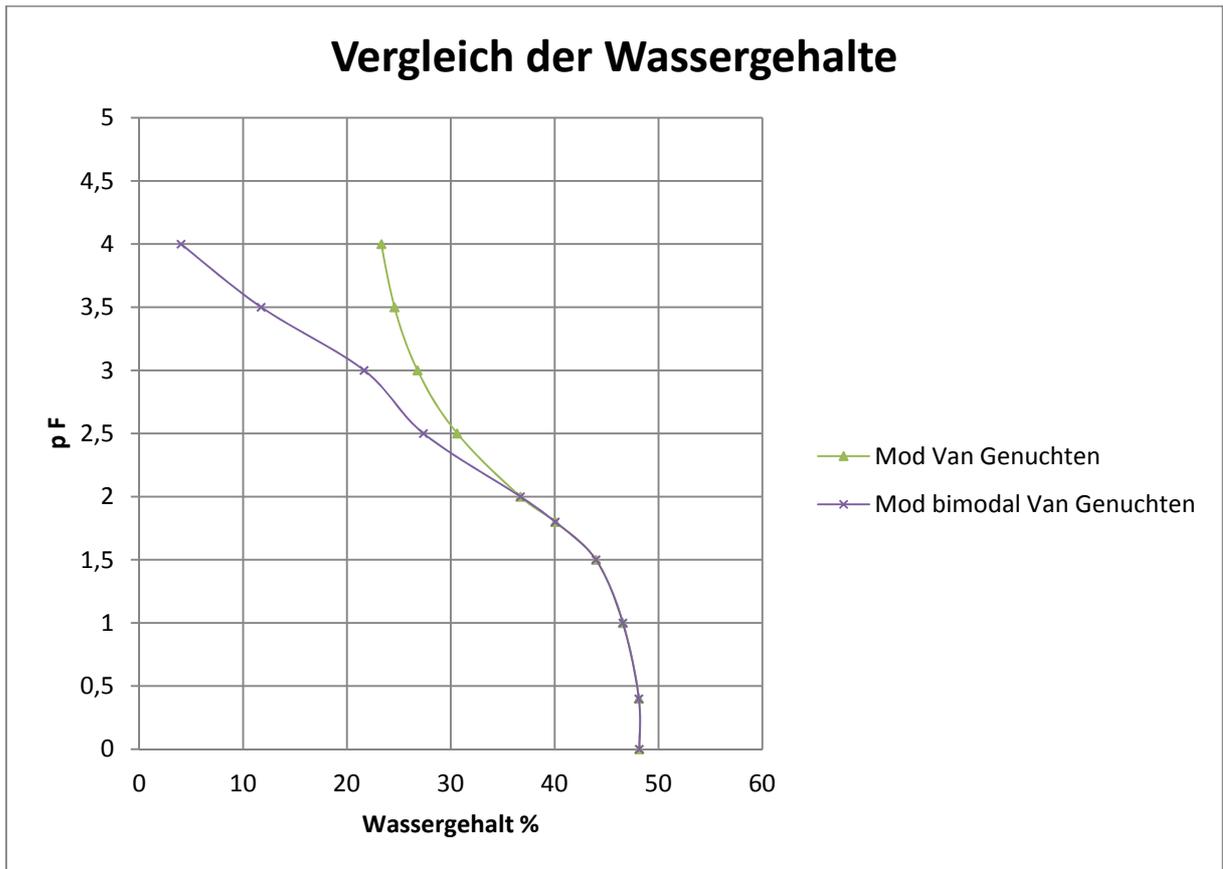
Anlage 17: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 28





Anlage 18: Messergebnisse des Sandkasten-Versuchs für STZ 29





Anlage 19: Wiegelisten Sandkasten-Versuch $pF = 0$

	Projekt: MA - Alexander Marx	
Wägung: 1	Bearbeiter: Marx	pF-Stufe: 0
Datum: 07.08.2010	Uhrzeit: 15:30	STZ-Volumen: 250 cm ³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	669,19	<u>keine</u> <u>Auffälligkeiten</u>
25	674,58	k. A.
24	670,18	k. A.
26	670,98	k. A.
13	673,48	k. A.
19	670,71	k. A.
29	673,63	k. A.
20	676,88	k. A.
23	671,84	k. A.
28	669,82	k. A.

	Projekt: MA - Alexander Marx	
Wägung: 2	Bearbeiter: Marx	pF-Stufe: 0
Datum: 09.08.2010	Uhrzeit: 10:30	STZ-Volumen: 250 cm ³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	669,70	<u>keine</u> <u>Auffälligkeiten</u>
25	674,60	k. A.
24	671,15	k. A.
26	672,81	k. A.
13	674,25	k. A.
19	670,73	k. A.
29	674,19	k. A.
20	676,89	k. A.
23	673,99	k. A.
28	670,87	k. A.

	Projekt: MA - Alexander Marx	
Wägung: 3	Bearbeiter: Marx	pF-Stufe: 0
Datum: 10.08.2010	Uhrzeit: 11:30	STZ-Volumen: 250 cm ³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	670,79	<u>keine</u> <u>Auffälligkeiten</u>
25	674,67	k. A.
24	671,20	k. A.
26	673,49	k. A.
13	673,99	k. A.
19	670,74	k. A.
29	675,02	k. A.
20	676,90	k. A.
23	673,71	k. A.
28	670,42	k. A.

Anlage 20: Wiegelisten Sandkasten-Versuch pF = 0,4

	Projekt: MA - Alexander Marx	
Wägung: 4	Bearbeiter: Marx	pF-Stufe: 0,4
Datum: 15.08.2010	Uhrzeit: 17:30	STZ-Volumen: 250 cm ³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	670,77	<u>keine</u> <u>Auffälligkeiten</u>
25	674,35	k. A.
24	670,31	k. A.
26	670,74	k. A.
13	672,61	k. A.
19	670,70	k. A.
29	673,74	k. A.
20	676,86	k. A.
23	672,62	k. A.
28	670,31	k. A.

	Projekt: MA - Alexander Marx	
Wägung: 5	Bearbeiter: Eberhart	pF-Stufe: 0,4
Datum: 16.08.2010	Uhrzeit: 15:40	STZ-Volumen: 250 cm³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	670,77	<u>keine</u> Auffälligkeiten
25	674,02	k. A.
24	670,25	k. A.
26	669,85	k. A.
13	673,89	k. A.
19	670,69	k. A.
29	673,15	k. A.
20	676,85	k. A.
23	672,42	k. A.
28	668,84	k. A.

	Projekt: MA - Alexander Marx	
Wägung: 6	Bearbeiter: Eberhart	pF-Stufe: 0,4
Datum: 18.08.2010	Uhrzeit: 10:50	STZ-Volumen: 250 cm³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	670,76	<u>keine</u> Auffälligkeiten
25	673,40	k. A.
24	670,33	k. A.
26	670,69	k. A.
13	673,31	k. A.
19	670,67	k. A.
29	675,26	k. A.
20	676,80	k. A.
23	674,61	k. A.
28	671,88	k. A.

	Projekt: MA - Alexander Marx	
Wägung: 7	Bearbeiter: Marx	pF-Stufe: 0,4
Datum: 19.08.2010	Uhrzeit: 10:15	STZ-Volumen: 250 cm ³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	670,76	<u>keine</u> Auffälligkeiten
25	673,05	k. A.
24	668,64	k. A.
26	670,12	k. A.
13	672,10	k. A.
19	670,66	k. A.
29	674,92	k. A.
20	673,41	k. A.
23	671,34	k. A.
28	670,26	k. A.

Anlage 21: Wiegelisten Sandkasten-Versuch pF = 1,0

	Projekt: MA - Alexander Marx	
Wägung: 8	Bearbeiter: Eberhard	pF-Stufe: 1,0
Datum: 20.08.2010	Uhrzeit: 09:15	STZ-Volumen: 250 cm ³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	667,76	<u>keine</u> Auffälligkeiten
25	671,47	k. A.
24	664,96	k. A.
26	667,15	k. A.
13	669,39	k. A.
28	667,92	k. A.
23	668,93	k. A.
20	670,73	k. A.
29	672,18	k. A.
19	669,29	k. A.

	Projekt: MA - Alexander Marx	
Wägung: 9	Bearbeiter: Marx	pF-Stufe: 1,0
Datum: 21.08.2010	Uhrzeit: 14:45	STZ-Volumen: 250 cm ³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	667,30	<u>keine</u> <u>Auffälligkeiten</u>
25	670,77	k. A.
24	664,26	k. A.
26	666,53	k. A.
13	668,77	k. A.
28	666,29	k. A.
23	668,36	k. A.
20	670,13	k. A.
29	671,46	k. A.
19	668,58	k. A.

	Projekt: MA - Alexander Marx	
Wägung: 10	Bearbeiter: Marx	pF-Stufe: 1,0
Datum: 22.08.2010	Uhrzeit: 14:30	STZ-Volumen: 250 cm ³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
19	668,30	<u>keine</u> <u>Auffälligkeiten</u>
22	667,02	k. A.
25	670,53	k. A.
29	671,08	k. A.
20	669,78	k. A.
24	663,94	k. A.
26	666,05	k. A.
23	668,06	k. A.
28	665,74	k. A.
13	668,41	k. A.

Anlage 22: Wiegelisten Sandkasten-Versuch pF = 1,5

Projekt: MA - Alexander Marx		
Wägung: 11	Bearbeiter: Eberhard	pF-Stufe: 1,5
Datum: 25.08.2010	Uhrzeit: 09:30	STZ-Volumen: 250 cm³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	659,74	<u>keine</u> Auffälligkeiten
25	664,32	k. A.
24	657,40	k. A.
26	660,23	k. A.
13	661,61	k. A.
28	661,62	k. A.
23	661,52	k. A.
20	662,21	k. A.
29	665,19	k. A.
19	662,23	k. A.

Projekt: MA - Alexander Marx		
Wägung: 12	Bearbeiter: Eberhard	pF-Stufe: 1,5
Datum: 27.08.2010	Uhrzeit: 08:30	STZ-Volumen: 250 cm³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	659,11	<u>keine</u> Auffälligkeiten
25	663,66	k. A.
24	656,77	k. A.
26	659,70	k. A.
13	661,13	k. A.
19	661,63	k. A.
29	664,59	k. A.
20	661,66	k. A.
23	661,05	k. A.
28	660,98	k. A.

Anlage 23: Wiegelisten Sandkasten-Versuch $pF = 1,8$

Projekt: MA - Alexander Marx		
Wägung: 13	Bearbeiter: Marx	pF-Stufe: 1,8
Datum: 29.08.2010	Uhrzeit: 12:00	STZ-Volumen: 250 cm³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	649,14	<u>keine</u> Auffälligkeiten
25	653,55	k. A.
24	647,98	k. A.
26	650,89	k. A.
13	653,25	k. A.
19	653,32	k. A.
29	655,62	k. A.
20	651,67	k. A.
23	651,19	k. A.
28	653,46	k. A.

Projekt: MA - Alexander Marx		
Wägung: 14	Bearbeiter: Eberhard	pF-Stufe: 1,8
Datum: 31.08.2010	Uhrzeit: 09:00	STZ-Volumen: 250 cm³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	648,53	<u>keine</u> Auffälligkeiten
25	652,87	k. A.
24	647,29	k. A.
26	650,18	k. A.
13	652,47	k. A.
19	652,52	k. A.
29	654,79	k. A.
20	651,03	k. A.
23	650,42	k. A.
28	652,68	k. A.

Anlage 24: Wiegelisten Sandkasten-Versuch $pF = 2,0$

Projekt: MA - Alexander Marx		
Wägung: 15	Bearbeiter: Eberhard	pF-Stufe: 2,0
Datum: 02.09.2010	Uhrzeit: 10:50	STZ-Volumen: 250 cm ³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	641,20	<u>keine</u> Auffälligkeiten
25	645,31	k. A.
24	639,97	k. A.
26	642,63	k. A.
13	644,78	k. A.
28	644,92	k. A.
23	643,31	k. A.
20	643,74	k. A.
29	646,77	k. A.
19	644,63	k. A.

Projekt: MA - Alexander Marx		
Wägung: 16	Bearbeiter: Eberhard	pF-Stufe: 2,0
Datum: 03.09.2010	Uhrzeit: 11:30	STZ-Volumen: 250 cm ³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	641,08	<u>keine</u> Auffälligkeiten
25	645,16	k. A.
24	639,80	k. A.
26	642,43	k. A.
13	644,63	k. A.
28	644,75	k. A.
23	643,15	k. A.
20	643,54	k. A.
29	646,55	k. A.
19	644,48	k. A.

	Projekt: MA - Alexander Marx	
Wägung: 17	Bearbeiter: Eberhard	pF-Stufe: 2,0
Datum: 06.09.2010	Uhrzeit: 09:50	STZ-Volumen: 250 cm³
Stechzylinder- Nummer	Gewicht [g]	Beschreibung / Auffälligkeiten
22	640,94	<u>keine</u> Auffälligkeiten
25	644,99	k. A.
24	639,66	k. A.
26	642,29	k. A.
13	644,49	k. A.
19	644,38	k. A.
29	646,41	k. A.
20	643,39	k. A.
23	642,99	k. A.
28	644,57	k. A.

Anlage 25: Wiegelisten Sandkasten-Versuch intakte Stechzylinder

Stechzylinder- Nummer	STZ + Probe+ Fließ (g)	Fließ (g)	Gewicht STZ (g)	Bodenprobe rein (g)
13	553,41	2,40	206,54	344,47
19	553,59	2,19	206,43	344,97
20	553,54	2,25	207,91	343,38
22	551,09	2,37	206,65	342,07
23	553,89	2,26	207,61	344,02
24	548,94	2,25	202,78	343,91
25	553,79	2,43	208,40	342,96
26	551,13	2,21	205,31	343,61
28	553,02	2,28	206,47	344,27
29	554,65	2,16	208,11	344,38

Anlage 26: Berechnung volumetrischer Wassergehalt – Sandkasten-Versuch

Proben-Nr.	Ring-Nr.	pF	cm Wassersäule (Potential in hPa)	Gewicht [g]				Probenringvolumen V = 250 cm³			
				Nassgewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi)	Trockengewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi)	Gewicht von Ring, Tuch, Gummi	Gewicht Bodenwasser	Gewicht trockener Boden	Gravimetr. Wassergehalt	Bulk density Schüttdichte	Volumetr. Wassergehalt
				A	B	C	D = A - B	E = B - C	$\omega = D / E$	$\rho_d = E / V$	$\theta = \omega \times \rho_d$
13		0,0	1,0	673,99	553,41	208,94	120,58	344,47	0,3500	1,3778	0,4823
13		0,4	2,5	672,10	553,41	208,94	118,69	344,47	0,3446	1,3778	0,4747
13		1,0	10	668,41	553,41	208,94	115,00	344,47	0,3338	1,3778	0,4600
13		1,5	31,6	661,13	553,41	208,94	107,72	344,47	0,3127	1,3778	0,4309
13		1,8	63,1	652,47	553,41	208,94	99,06	344,47	0,2876	1,3778	0,3962
13		2,0	100	644,49	553,41	208,94	91,08	344,47	0,2644	1,3778	0,3643

Proben-Nr.	Ring-Nr.	pF	cm Wassersäule (Potential in hPa)	Gewicht [g]					Probenringvolumen V = 250 cm³			
				Nassgewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi)	Trockengewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi)	Gewicht von Ring, Tuch, Gummi	Gewicht Bodenwasser	Gewicht trockener Boden	Gravimetr. Wassergehalt	Bulk density Schüttdichte	Volumetr. Wassergehalt	
				A	B	C	D = A - B	E = B - C	$\omega = D / E$	$\rho_d = E / V$	$\theta = \omega \times \rho_d$	
19		0,0	1,0	670,74	553,59	208,62	117,15	344,97	0,3396	1,3799	0,4686	
19		0,4	2,5	670,66	553,59	208,62	117,07	344,97	0,3394	1,3799	0,4683	
19		1,0	10	668,30	553,59	208,62	114,71	344,97	0,3325	1,3799	0,4588	
19		1,5	31,6	661,63	553,59	208,62	108,04	344,97	0,3132	1,3799	0,4322	
19		1,8	63,1	652,52	553,59	208,62	98,93	344,97	0,2868	1,3799	0,3957	
19		2,0	100	644,38	553,59	208,62	90,79	344,97	0,2632	1,3799	0,3632	

Proben-Nr.	Ring-Nr.	pF	cm Wasser- säule (Poten- tial in hPa)	Gewicht [g]						Probenringvolumen V = 250 cm³			
				Nassgewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi)	Trockengewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi)	Gewicht von Ring, Tuch, Gummi	Gewicht Bodenwasser	Gewicht trockener Boden	Gravimetr. Wassergehalt	Bulk density' Schüttdichte	Volumetr. Wassergehalt		
				A	B	C	D = A - B	E = B - C	ω = D / E	ρ _d = E / V	θ = ω x ρ _d		
20		0,0	1,0	676,90	553,54	210,16	123,36	343,38	0,3593	1,3735	0,4934		
20		0,4	2,5	673,41	553,54	210,16	119,87	343,38	0,3491	1,3735	0,4795		
20		1,0	10	669,78	553,54	210,16	116,24	343,38	0,3385	1,3735	0,4650		
20		1,5	31,6	661,66	553,54	210,16	108,12	343,38	0,3149	1,3735	0,4325		
20		1,8	63,1	651,03	553,54	210,16	97,49	343,38	0,2839	1,3735	0,3900		
20		2,0	100	643,39	553,54	210,16	89,85	343,38	0,2617	1,3735	0,3594		

Proben-Nr.	Ring-Nr.	pF	cm Wasser- säule (Poten- tial in hPa)	Gewicht [g]						Probenringvolumen V = 250 cm³			
				Nassgewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummil)	Trockengewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummil)	Gewicht von Ring, Tuch, Gummil	Gewicht Bodenwasser	Gewicht trockener Boden	Gravimetr. Wassergehalt	Bulk density Schüttdichte	Volumetr. Wassergehalt		
				A	B	C	D = A - B	E = B - C	$\omega = D / E$	$\rho_d = E / V$	$\theta = \omega \times \rho_d$		
22		0,0	1,0	670,79	551,09	209,02	119,70	342,07	0,3499	1,3683	0,4788		
22		0,4	2,5	670,76	551,09	209,02	119,67	342,07	0,3498	1,3683	0,4787		
22		1,0	10	667,02	551,09	209,02	115,93	342,07	0,3389	1,3683	0,4637		
22		1,5	31,6	659,11	551,09	209,02	108,02	342,07	0,3158	1,3683	0,4321		
22		1,8	63,1	648,53	551,09	209,02	97,44	342,07	0,2849	1,3683	0,3898		
22		2,0	100	640,94	551,09	209,02	89,85	342,07	0,2627	1,3683	0,3594		

Proben-Nr.	Ring-Nr.	pF	cm Wasser- säule (Poten- tial in hPa)	Gewicht [g]						Probenringvolumen V = 250 cm³			
				Nassgewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi)	Trockengewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi)	Gewicht von Ring, Tuch, Gummi	Gewicht Bodenwasser	Gewicht trockener Boden	Gravimetr. Wassergehalt	Bulk density* Schüttdichte	Volumetr. Wassergehalt		
				A	B	C	D = A - B	E = B - C	$\omega = D / E$	$\rho_d = E / V$	$\theta = \omega \times \rho_d$		
23		0,0	1,0	673,71	553,89	209,87	119,82	344,02	0,3482	1,3760	0,4792		
23		0,4	2,5	671,34	553,89	209,87	117,45	344,02	0,3414	1,3760	0,4698		
23		1,0	10	668,06	553,89	209,87	114,17	344,02	0,3318	1,3760	0,4566		
23		1,5	31,6	661,05	553,89	209,87	107,16	344,02	0,3114	1,3760	0,4286		
23		1,8	63,1	650,42	553,89	209,87	96,53	344,02	0,2805	1,3760	0,3861		
23		2,0	100	642,99	553,89	209,87	89,10	344,02	0,2589	1,3760	0,3564		

Proben-Nr.	Ring-Nr.	pF	cm Wasser- säule (Poten- tial in hPa)	Gewicht [g]						Probenringvolumen V = 250 cm³		
				Nassgewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi) A	Trockengewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi) B	Gewicht von Ring, Tuch, Gummi C	Gewicht Bodenwasser D = A - B	Gewicht trockener Boden E = B - C	Gravimetr. Wassergehalt $\omega = D / E$	Bulk density* Schüttdichte $\rho_d = E / V$	Volumetr. Wassergehalt $\theta = \omega \times \rho_d$	
24		0,0	1,0	671,20	548,94	205,03	122,26	343,91	0,3555	1,3756	0,4890	
24		0,4	2,5	668,64	548,94	205,03	119,70	343,91	0,3481	1,3756	0,4788	
24		1,0	10	663,94	548,94	205,03	115,00	343,91	0,3344	1,3756	0,4600	
24		1,5	31,6	656,77	548,94	205,03	107,83	343,91	0,3135	1,3756	0,4313	
24		1,8	63,1	647,29	548,94	205,03	98,35	343,91	0,2860	1,3756	0,3934	
24		2,0	100	639,66	548,94	205,03	90,72	343,91	0,2638	1,3756	0,3629	

Proben-Nr.	Ring-Nr.	pF	cm Wasser- säule (Poten- tial in hPa)	Gewicht [g]					Probenringvolumen $V = 250 \text{ cm}^3$			
				Nassgewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi)	Trockengewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi)	Gewicht von Ring, Tuch, Gummi	Gewicht Bodenwasser	Gewicht trockener Boden	Gravimetr. Wassergehalt	Bulk density' Schüttdichte	Volumetr. Wassergehalt	
				A	B	C	$D = A - B$	$E = B - C$	$\omega = D / E$	$\rho_d = E / V$	$\theta = \omega \times \rho_d$	
25		0,0	1,0	674,67	553,79	210,83	120,88	342,96	0,3525	1,3718	0,4835	
25		0,4	2,5	673,05	553,79	210,83	119,26	342,96	0,3477	1,3718	0,4770	
25		1,0	10	670,53	553,79	210,83	116,74	342,96	0,3404	1,3718	0,4669	
25		1,5	31,6	663,66	553,79	210,83	109,87	342,96	0,3204	1,3718	0,4395	
25		1,8	63,1	652,87	553,79	210,83	99,08	342,96	0,2889	1,3718	0,3963	
25		2,0	100	644,99	553,79	210,83	91,20	342,96	0,2659	1,3718	0,3648	

Proben-Nr.	Ring-Nr.	pF	cm Wasser-säule (Potential in hPa)	Gewicht [g]				Probenringvolumen V = 250 cm³			
				Nassgewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi)	Trockengewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi)	Gewicht von Ring, Tuch, Gummi	Gewicht Bodenwasser	Gewicht trockener Boden	Gravimetr. Wassergehalt	Bulk density* Schüttdichte	Volumetr. Wassergehalt
				A	B	C	D = A - B	E = B - C	$\omega = D / E$	$\rho_d = E / V$	$\theta = \omega \times \rho_d$
26		0,0	1,0	673,49	551,13	207,52	122,36	343,61	0,3561	1,3744	0,4894
26		0,4	2,5	670,12	551,13	207,52	118,99	343,61	0,3463	1,3744	0,4759
26		1,0	10	666,05	551,13	207,52	114,92	343,61	0,3344	1,3744	0,4597
26		1,5	31,6	659,70	551,13	207,52	108,57	343,61	0,3160	1,3744	0,4343
26		1,8	63,1	650,18	551,13	207,52	99,05	343,61	0,2883	1,3744	0,3962
26		2,0	100	642,29	551,13	207,52	91,16	343,61	0,2653	1,3744	0,3646

Proben-Nr.	Ring-Nr.	pF	cm Wasser- säule (Poten- tial in hPa)	Gewicht [g]				Probenringvolumen V = 250 cm ³			
				Nassgewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi) A	Trockengewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummi) B	Gewicht von Ring, Tuch, Gummi C	Gewicht Bodenwasser D = A - B	Gewicht trockener Boden E = B - C	Gravimetr. Wassergehalt $\omega = D / E$	Bulk density Schüttdichte $\rho_d = E / V$	Volumetr. Wassergehalt $\theta = \omega \times \rho_d$
28		0,0	1,0	670,42	553,02	208,75	117,40	344,27	0,3410	1,3770	0,4696
28		0,4	2,5	670,26	553,02	208,75	117,24	344,27	0,3405	1,3770	0,4689
28		1,0	10	665,74	553,02	208,75	112,72	344,27	0,3274	1,3770	0,4508
28		1,5	31,6	660,98	553,02	208,75	107,96	344,27	0,3135	1,3770	0,4318
28		1,8	63,1	652,68	553,02	208,75	99,66	344,27	0,2894	1,3770	0,3986
28		2,0	100	644,57	553,02	208,75	91,55	344,27	0,2659	1,3770	0,3662

Proben-Nr.	Ring-Nr.	pF	cm Wasser- säule (Poten- tial in hPa)	Gewicht [g]						Probenringvolumen V = 250 cm ³			
				Nassgewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummy) A	Trockengewicht (Boden, Ring, Tuch, Gummy) B	Gewicht von Ring, Tuch, Gummy C	Gewicht Bodenwasser D = A - B	Gewicht trockener Boden E = B - C	Gravimetr. Wassergehalt $\omega = D / E$	Bulk density Schüttdichte $\rho_d = E / V$	Volumetr. Wassergehalt $\theta = \omega \times \rho_d$		
29		0,0	1,0	675,02	554,65	210,27	120,37	344,38	0,3495	1,3775	0,4815		
29		0,4	2,5	674,92	554,65	210,27	120,27	344,38	0,3492	1,3775	0,4811		
29		1,0	10	671,08	554,65	210,27	116,43	344,38	0,3381	1,3775	0,4657		
29		1,5	31,6	664,59	554,65	210,27	109,94	344,38	0,3192	1,3775	0,4398		
29		1,8	63,1	654,79	554,65	210,27	100,14	344,38	0,2908	1,3775	0,4006		
29		2,0	100	646,41	554,65	210,27	91,76	344,38	0,2664	1,3775	0,3670		

Anlage 33: Formblatt K6E – Sandkasten 20% Auslastung

BAUGERÄTE-BETRIEBSKOSTEN		Firma:		Formblatt K6E				
Bau:	Marx			Datum:	01.01.2014	Seite		
Angebot Nr.:	Masterarbeit			Preisbasis:	01.01.2013	3		
A	ÖBGL-Nr.: Y.1.30.0001	Gerät: Sandkasten						
	Nutzzl.: Ln =	Masse:		mittl. NW:		2.400,00		
B	n= 5 Jahre v= 40 Monate a+v= 2,9 % rep= 2,4 %							
Stk	ÖBGL - Nr	Bezeichnung	kW	Masse	Mittl.NW.	A+V	Reparatur	
1	Y.1.30.0001	Sandkasten			2.400,00	69,60	57,60	
C	Summe :				2.400,00	69,60	57,60	
	GHP - Index		112,50%		2.700,00	78,30	64,80	
D	Abminderung A+V und REP							
	Aufteilung Reparatur nach Lohn / Stoff					40,00%	60,00%	
	Kostenentwicklung je Einheit				Lohn Std	Lohn €	Stoff €	Gerät €
E	Beistellkosten je Monat					25,92	38,88	78,30
F	Beistellkosten je Stunde 20%-Auslastung 33,8 h/mon					0,77	1,15	2,32
G	Bedienung incl. Wartung				1,00			
H	Betriebsstoff kWh/l/kwh*S/l*1.2 l/kwh:							
J	Sonstige Kosten, Verschleißteile							
K	Gerätekosten je Einsatz Summe: F bis J				1,00	0,77	1,15	2,32
L	Kosten je VE = GSS/Ln							
					BMLP	GZaL	GZaS	GZaG
H	Werte aus K2, K3 - Blättern				€ 40,00	25,00%	25,00%	25,00%
N	Gerätepreis je Einsatz L*H				40,00	0,96	1,44	2,90
O	Preis (Lohn + Sonstiges)				40,96		4,33	
P	Preis pro Einheit				45,29			

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Boden als Dreiphasengemisch (Henögl, 2000).....	2
Abbildung 2.2:	Lagerungsarten der Körner (Kolymbas, 2007).....	3
Abbildung 2.3:	Lagerungsarten der Plättchen (Kolymbas, 2007).....	3
Abbildung 2.4:	Benetzungsrandwinkel α verschiedener Flüssigkeiten (Zeller, Franke, 1966).....	8
Abbildung 2.5	Kohäsionskräfte auf Moleküle in der Fluidphase sowie an der Grenzfläche zweier nicht mischbarer Fluide (Hillel 1980).....	8
Abbildung 2.6:	Prinzipskizze zum Gesetz von Darcy (Kolymbas, 2007).....	9
Abbildung 2.7:	Strömungsarten (Pregl, 1983).....	10
Abbildung 2.8:	Gleichgewichtszustand eines Grenzflächenelements (Leibnitz, 2010)	11
Abbildung 2.9:	Modell der kapillaren Steighöhe (Fredlund & Rahardjo, 1993)	13
Abbildung 2.10:	Hydrologische Gliederung des Untergrundes (Mattheß und Ubell, 1983)	15
Abbildung 2.11:	Abhängigkeit der relativen Durchlässigkeitsbeiwerte von Wasser bzw. Luft (Wyckoff und Botset, 1936).....	18
Abbildung 4.1:	Vergleich der pF-Kurven nach Brooks & Corey (1964) und van Genuchten (1980), (Schäfer, 1999).....	24
Abbildung 4.2:	Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt bei unterschiedlichen Bodentypen (FK = Feldkapazität, PWP = permanenter Welkepunkt) (Scheffer/Schachtschabel, 2002)	27
Abbildung 5.1:	Das Drucktopf-System zur Bestimmung von hydraulischen Bodeneigenschaften	32
Abbildung 5.2:	Stechzylinder mit Filtertuch verschlossen und O-Ring Sicherung	33
Abbildung 5.3:	Sandkasten-System zur Bestimmung von hydraulischen Bodeneigenschaften	34
Abbildung 5.4:	Das HYPROP-System zur Bestimmung von hydraulischen Bodeneigenschaften (Fa. UMS, 2010)	36
Abbildung 5.5:	Tensiometer (links: schematischer Schnitt rechts: Tensiometer) (Fa. UMS, 2009).....	37
Abbildung 5.6:	Computerbild während Messung (Fa. UMS, 2009).....	38
Abbildung 6.1:	Stechzylinder und Abdeckkappen.....	40

Abbildung 6.2:	aufgeteilte Proben vor Einpressen.....	41
Abbildung 6.3:	Einpressvorgang und Kontrolle des Absetzmaßes	42
Abbildung 6.4:	transportfertiger Stechzylinder	43
Abbildung 6.5:	Stechzylinder mit Filtertuch und O-Ring	44
Abbildung 6.6:	Eingebauter Stechzylinder in Ringhalter für Permeameterversuch.....	44
Abbildung 6.7:	Saugheber	46
Abbildung 6.8:	Oben eingebaute Probe im leeren und unten im gefüllten Zustand mit Saugheber.....	47
Abbildung 6.9:	Schematischer Querschnitt durch das Permeameter	48
Abbildung 6.10:	Einpunkt-Messbrücke	49
Abbildung 6.11:	Foto eines Permeameters der Fa. Eijkelkamp.....	50
Abbildung 6.12:	Systematischer Querschnitt des Gehäuses/Messkopf (Fa. UMS, 2010)	52
Abbildung 6.13:	Zwischengelagerte Stechzylinder	53
Abbildung 6.14:	Entlüften der Tensiometer und Messköpfe	54
Abbildung 6.15:	Eingeschraubter Tensiometer mit Schutzkappe	55
Abbildung 6.16:	Herstellung der Tensiometerbohrungen	56
Abbildung 6.17:	Fertige Tensiometeröffnungen.....	56
Abbildung 6.18:	Zusammengebauter Messkopf mit Silikondichtscheibe und O- Ringen	57
Abbildung 6.19:	Verkehrt aufgesetzter Messkopf mit Stechzylinder.....	58
Abbildung 6.20:	Messkopf mit Stechzylinderprobe auf der Waage.....	58
Abbildung 6.21:	relative Durchlässigkeit – Sättigung Beziehung (STZ 11).....	59
Abbildung 6.22:	Vergleich der Wassergehalte (STZ 11).....	60
Abbildung 6.23:	Vergleich der Leitfähigkeit (STZ 11)	61
Abbildung 6.24:	Stechzylinder mit Filtertuch und O-Ring	62
Abbildung 6.25:	Eingesetzte Probenkörper im Sandkasten bei $pF = 0$ hPa	63
Abbildung 6.26:	Sandkasten mit Regulierungsapparatur.....	64
Abbildung 6.27:	Schematischer Schnitt durch Sandkasten (Fa. UMS, 2008)....	65
Abbildung 6.28:	Schemaskizze hängende Wassersäule (Fa. UMS 2008).....	66
Abbildung 6.29:	relative Durchlässigkeit – Sättigung Beziehung (STZ 13).....	67
Abbildung 6.30:	Vergleich der Wassergehalte (STZ 13).....	68
Abbildung 6.31:	Vergleich der Leitfähigkeit (STZ 13)	69
Abbildung 7.1:	Vergleich relative Durchlässigkeit – Sättigung Beziehung für Hyprop- und Sandkastenversuch.....	71

Abbildung 7.2	Vergleich der Wassergehalte für Hyprop- und Sandkastenversuch	72
Abbildung 7.3	Vergleich der Leitfähigkeit für Hyprop- und Sandkastenversuch.	73
Abbildung 8.1:	Aufbau des Kalkulationsformblattes K7, Institut f. Baubetrieb u. Bauwirtschaft, TU Graz, 2009	79
Abbildung 8.2:	Kostenaufteilung von Lohn und Geräte bei Hyprop- und Permeameterversuch mit 20 % Auslastung	84
Abbildung 8.3:	Kostenaufteilung von Lohn und Geräte bei Sandkasten- und Permeameterversuch mit 20 % Auslastung	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Richtwerte für den Porenanteil (Semprich, 2007)	5
Tabelle 2.2:	Einteilung der Porengrößenbereiche nach dem Porendurchmesser und der Wasserspannung (Scheffer & Schachtschabel, 2010).....	14
Tabelle 2.3:	Ausgewählte Einflussgrößen auf die Form der Kapillarspannungs - Sättigungsbeziehung.....	19
Tabelle 2.4:	Ausgewählte Einflussgrößen auf die Form der relativen Durchlässigkeits - Sättigungsbeziehung.....	20
Tabelle 6.1:	Durchlässigkeit k [m/s] für $\rho_d = 1,30 \text{ g/cm}^3$	51
Tabelle 6.2:	Durchlässigkeit k [m/s] für $\rho_d = 1,39 \text{ g/cm}^3$	51
Tabelle 8.1:	Gesamtkosten Hypropversuch inkl. Variation der Auslastung.....	84
Tabelle 8.2:	Gesamtkosten Sandkastenversuch inkl. Variation der Auslastung	85