

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl und Prüfamts für
Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau

Geohydraulische Eigenschaften verdichteter Tone unter besonderer Berücksichtigung des ungesättigten Zustandes

Emanuel M. Birle

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Vogt
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt
Bauhaus-Universität Weimar
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Werner Richwien (i. R.)
Universität Duisburg-Essen

Die Dissertation wurde am 23.09.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 07.12.2011 angenommen.

Kurzzusammenfassung

Zur Beschreibung der Durchsickerung von Erdbauwerken mit grundwasserrelevanten Inhaltsstoffen (z. B. Straßendämme, Lärm- und Sichtschutzwälle) müssen die hydraulischen Eigenschaften der Böden im ungesättigten Zustand beschrieben und bestimmt werden. Bei verdichteten Tonen ist dabei zu beachten, dass die hydraulischen Eigenschaften maßgebend vom Einbauzustand beeinflusst werden, da sich in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt und der Einbaudichte unterschiedliche Poren- und Aggregatstrukturen ergeben. Anhand von experimentellen Untersuchungen wird der Einfluss des Einbauzustandes auf die Porengrößenverteilung, die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung sowie die Durchlässigkeitseigenschaften verdichteter Tone studiert und beschrieben. Auf Grundlage der Ergebnisse wird eine Parameterregression dargestellt, mit der die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung verdichteter Tone in der parametrisierten Form nach van Genuchten unter Berücksichtigung der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand abgeschätzt werden kann. Außerdem wird anhand einer 5 m hohen Versuchsschüttung, die aus einem organogenen Ton errichtet wurde, gezeigt, wie sich unterschiedliche Einbauwassergehalte auf den Wasserhaushalt und die Sickerwassermengen auswirken.

Summary

For the analysis of the seepage water through earth structures (embankments, noise and view protection barriers) the hydraulic properties of the soils in unsaturated state have to be determined. When compacted clays are considered, it has to be taken into account that their hydraulic behaviour depends strongly on the compaction conditions as the arrangement of the particles and the pore structure is influenced by the compaction water content and the initial dry density. By means of experimental investigations the influence of the compaction conditions on the pore-size distribution, the soil-water retention curve and the unsaturated hydraulic conductivity is described. On basis of the results a regression analysis is presented that allows the determination of the soil-water retention curve according to van Genuchten considering the coefficient of the saturated permeability. Additionally, experimental results gained by a 5 m high test hill built of organic clay are presented. They show that the water balance and the seepage flow depend strongly on the initial water content of the clay.

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen	IV
1 Einleitung	1
2 Problemstellung und Vorgehensweise	3
2.1 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit.....	3
2.2 Vorgehensweise.....	4
3 Wasserhaushalt von Erddämmen	6
3.1 Niederschlag	6
3.2 Infiltration an der Bodenoberfläche und Oberflächenabfluss	7
3.3 Evaporation und Transpiration	7
3.4 Wasser im Boden	8
3.4.1 Erscheinungsformen	8
3.4.2 Kapillarwasser.....	9
3.4.3 Adsorptionswasser.....	10
4 Grundlagen der Wasserbewegung im ungesättigten Boden	11
4.1 Wasserbewegung unter isothermischen Bedingungen	11
4.1.1 Allgemeines.....	11
4.1.2 Potentialkonzept.....	12
4.1.3 Beziehung zwischen Saugspannung und Wassergehalt	14
4.1.4 Hydraulische Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand.....	18
4.1.5 Mathematische Beschreibung der Wasserbewegung.....	24
4.2 Wasserbewegung infolge von Temperaturgradienten.....	26
4.3 Methoden zur Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung	27
4.3.1 Pedotransferfunktionen (PTF).....	27
4.3.2 Experimentelle Methoden	29
5 Literaturstudie zu den hydraulischen Eigenschaften verdichteter Tone	33
5.1 Allgemeines	33
5.2 Porengrößenverteilung.....	34
5.3 Zusammenhang zwischen Saugspannung und Wassergehalt	34
5.4 Hydraulische Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand	40
5.5 Durchlässigkeit im gesättigten Zustand.....	40
6 Eigene Untersuchungen zum Einfluss der Einbaubedingungen auf die hydraulischen Eigenschaften verdichteter Tone	41
6.1 Zielsetzung und Vorgehensweise	41
6.2 Untersuchte Böden.....	42
6.3 Verdichtungseigenschaften	44

6.3.1 Lias-Ton	44
6.3.2 Lösslehm.....	45
6.3.3 Ton mit organischen Beimengungen	45
6.4 Quecksilberporosimetrie.....	47
6.4.1 Grundlagen	47
6.4.2 Probenvorbereitung, Versuchsdurchführung und Auswertung	48
6.4.3 Einflussfaktoren auf die Messergebnisse.....	52
6.4.4 Ableitung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung aus der Quecksilberporosimetrie	53
6.4.5 Ergebnisse und Interpretation	55
6.5 Durchlässigkeit im gesättigten Zustand.....	67
6.5.1 Lias-Ton	67
6.5.2 Lösslehm.....	71
6.5.3 Ton mit organischen Beimengungen	73
6.6 Schrumpfuntersuchungen	73
6.6.1 Zielsetzung.....	73
6.6.2 Vorgehensweise.....	74
6.6.3 Ergebnisse	74
6.7 Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung	78
6.7.1 Druckplattenextraktor	78
6.7.2 Saugspannungs-kontrollierte Oedometerzelle	80
6.7.3 Tensiometer	88
6.7.4 Feuchtigkeitsmessgerät nach der Taupunktmethode	89
6.7.5 Ergebnisse	91
6.7.6 Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung mittels PTF.....	118
6.8 Hydraulische Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand	125
6.8.1 Mehrstufen-Ausfluss-Methode	125
6.8.2 Vorgehensweise.....	128
6.8.3 Ergebnisse	129
6.9 Zusammenfassung.....	132
7 Ableitung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung auf Grundlage der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand	137
7.1 Zielsetzung	137
7.2 Zusammenhang zwischen der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und dem Lufteintrittspunkt.....	138
7.2.1 Theoretische Betrachtungen am Kapillarrohr.....	138
7.2.2 Empirischer Zusammenhang auf Basis der Versuchsergebnisse.....	139
7.3 Parameterregression zur Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung	142
7.3.1 Ohne Berücksichtigung von Messdaten.....	142
7.3.2 Mit Einpunkt-Messung.....	145
8 Versuchsschüttung am Münchner Flughafen	147
8.1 Ziele der Untersuchungen.....	147
8.2 Böden	148

8.3	Aufbau der Versuchsschüttung	148
8.4	Messtechnische Instrumentierung.....	153
8.4.1	Tensiometer/Temperatursensoren.....	153
8.4.2	TDR-Sonden	154
8.4.3	Klimastation.....	155
8.4.4	Kippwaagen	155
8.4.5	Extensometer	156
8.5	Messergebnisse	156
8.5.1	Niederschlag	157
8.5.2	Sickerwasser.....	159
8.5.3	Tensiometer- und TDR-Messungen.....	164
8.5.4	Temperaturverläufe.....	167
8.5.5	Evapotranspiration	168
8.5.6	Zusammenfassung.....	171
8.6	Numerische Modellierung des Wasserhaushaltes der Versuchsschüttung	172
8.6.1	Vorgehensweise.....	172
8.6.2	Modellgeometrie.....	173
8.6.3	Bodenkennwerte	173
8.6.4	Anfangsbedingungen	174
8.6.5	Randbedingungen.....	175
8.6.6	Ergebnisse	176
8.6.7	Vergleich Berechnungsergebnisse - Messungen.....	182
9	Folgerungen für die Praxis.....	187
9.1	Allgemeines.....	187
9.2	Einfluss der Einbaubedingungen auf das hydraulische Verhalten von Erdbauwerken aus verdichteten Tonen.....	187
9.3	Hinweise zur Prognose von Sickerwassermengen mit numerischen Modellen	189
10	Zusammenfassung und Ausblick	191
	Literaturverzeichnis	196
	Anhang	204

Bezeichnungen

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Benennung
a	-	Parameter zur Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit
a	m	Parameter der Beziehung nach <i>Gardner</i>
A	m ²	Querschnittsfläche
a _f	kPa	Parameter der Beziehung nach <i>Fredlund&Xing</i>
b	m	Parameter der Beziehung nach <i>Gardner</i>
C	1/m	Kapillarkapazität
C _m	-	Stauchungsbeiwert bezogen auf Matrixspannungen
c _p	MJ/(kg °· C)	Spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck
d	m	Durchmesser
d	m	Verdrängungshöhe des Bewuchses nach <i>Monteith</i>
d	m	Dicke
D _T	m ² /(s · K)	Thermischer Diffusionskoeffizient
D _w	m ² /s	Diffusionskoeffizient
D _θ	m ² /s	Isothermischer Diffusionskoeffizient
e	-	Porenzahl
e	-	Euler'sche Zahl
e	m	Dicke der keramischen Platte
e ₀	-	Porenzahl nach Bewässerung
e _a	-	Porenzahl beim Einbau
e _e	-	Porenzahl beim Ausbau
e _{Hg}	-	Porenzahl bezogen auf Quecksilber
e _{inter}	-	Interaggregatporenzahl
e _{inter,Hg}	-	Interaggregatporenzahl bezogen auf Quecksilber
e _{intra}	-	Intraaggregatporenzahl
e _{intra,Hg}	-	Intraaggregatporenzahl bezogen auf Quecksilber
e _{MIP}	-	Porenzahl der mit Quecksilber gefüllten Poren
e _r	-	Porenzahl der nicht mit Quecksilber gefüllten Poren
ET _a	mm	Tatsächliche Evapotranspiration
ET _p	mm	Potentielle Evapotranspiration
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
G	MJ/(m ² · s)	Bodenwärmestrom
h	m	Höhe des Bewuchses
H	m	Hydraulisches Potential
H _a	m	Gaspotential
H _g	m	Gravitationspotential
h _k	m	Kapillare Steighöhe von Wasser
H _m	m	Matrixpotential

H_o	m	Osmotisches Potential
i	-	Hydraulischer Gradient
I_p	-	Plastizitätszahl
k	-	Karman-Konstante
k	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert bzw. hydraulische Leitfähigkeit des Bodens
k_d	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert der keramischen Platte
k_{re}	m/s	Hydraulische Leitfähigkeit bei einer Saugspannung $\psi = \psi_r$
k_s	m/s	Wasserdurchlässigkeit im gesättigten Zustand
L	m	Dicke der Bodenprobe
L	MJ/kg	Latente Verdunstungswärme
LAI	-	Blattflächenindex
m	-	Parameter der Beziehung nach <i>van Genuchten</i>
m_d	g	Trockenmasse
m_f	-	Parameter der Beziehung nach <i>Fredlund&Xing</i>
n	-	Parameter zur Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit
n	-	Porenanteil
n	-	Parameter der Beziehung nach <i>van Genuchten</i>
n_0	-	Porenanteil nach Bewässerung
n_a	-	Porenanteil beim Einbau
n_e	-	Porenanteil beim Ausbau
n_f	-	Parameter der Beziehung nach <i>Fredlund&Xing</i>
n_{ges}	-	Gesamtporenanteil
n_{Hg}	-	Porenanteil bezogen auf Quecksilber
n_{inter}	-	Interaggregatporenanteil
$n_{inter,Hg}$	-	Interaggregatporenanteil bezogen auf Quecksilber
n_{intra}	-	Intraaggregatporenanteil
$n_{intra,Hg}$	-	Intraaggregatporenanteil bezogen auf Quecksilber
$n_{Luft,a}$	-	Luftporenanteil
p	kPa	Druck
p	kPa	Partialdruck des Wasserdampfes
p_0	kPa	Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfes über reinem Wasser
p_f	kPa	Luftdruck
p_s	kPa	Sättigungsdampfdruck
p_t	kPa	Druck der trockenen Luft
Q	m ³ /s	Durchfluss
r	-	Parameter nach <i>Disse</i>
R	J/(kg · K)	Universelle Gaskonstante
r_a	s/m	Aerodynamischer Widerstand nach <i>Monteith</i>
R_d	J/(kg · K)	Gaskonstante für Wasserdampf
rh	-	Relative Luftfeuchtigkeit
r_k	m	Radius eines Kapillarrohres
R_n	MJ/(m ² · s)	Nettostrahlung
r_s	s/m	Oberflächenwiderstand nach <i>Monteith</i>
s	kN/(m ² · °C)	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve

S_e	-	Effektiver Sättigungsgrad
S_r	-	Sättigungsgrad
S_{r_0}	-	Sättigungsgrad nach Bewässerung
S_{r_a}	-	Sättigungsgrad beim Einbau
S_{r_e}	-	Sättigungsgrad beim Ausbau
$S_{r_{nw}}$	-	Sättigungsgrad bezogen auf Quecksilber
t	s	Zeit
T	K	Absolute Temperatur
u_a	kN/m ²	Luftdruck
u_{Hg}	kN/m ²	Quecksilberdruck
u_w	kN/m ²	Wasserdruck
v	m/s	Windgeschwindigkeit
v	m/s	Filtergeschwindigkeit nach <i>Darcy</i>
V	m ³	Volumen
V_0	m ³	Gesamtvolumen des abgegebenen bzw. aufgenommenen Wassers nach <i>Gardner</i> bzw. <i>Kunze&Kirkham</i>
V_a	m ³	Probenvolumen zu Versuchsbeginn
$V_{Feststoff}$	m ³	Feststoffvolumen
V_{ges}	m ³	Gesamtvolumen einer Bodenprobe
V_{Gl}	-	Glühverlust
V_{Hg}	m ³	Intrudiertes Quecksilbervolumen bei der Quecksilberporosimetrie
$V_{Hg,ges}$	m ³	Gesamtvolumen des mit Quecksilber gefüllten Porenraumes
v_p	m/s	Mittlere Fließgeschwindigkeit von Wasser in einem Rohr
V_{Poren}	m ³	Porenvolumen
V_{w0}	m ³ /kg	Spezifisches Volumen von Wasser
w	-	Gravimetrischer Wassergehalt
W	MNm/m ³	Verdichtungsenergie beim Proctorversuch
w_0	-	Wassergehalt nach Bewässerung
w_a	-	Wassergehalt beim Einbau
w_e	-	Wassergehalt beim Ausbau
w_L	-	Wassergehalt an der Fließgrenze
w_P	-	Wassergehalt an der Ausrollgrenze
w_{Pr}	-	Wassergehalt beim Proctoroptimum
w_s	-	Wassergehalt an der Schrumpfgrenze
w_{sat}	-	Wassergehalt bei Sättigung
z	m	Geodätische Höhe
z_m	m	Höhe über der Bodenoberfläche, in der die Windgeschwindigkeit gemessen wird
z_{oh}	m	Rauhigkeitslänge für Wärme und Dampf nach <i>Monteith</i>
z_{om}	m	Aerodynamische Rauhigkeitslänge nach <i>Monteith</i>

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Benennung
α	-	Parameter des Ansatzes nach <i>Arya&Paris</i>
α	1/kPa	Parameter der Beziehung nach <i>van Genuchten</i>
α_n	1/kPa	Parameter der Beziehung nach <i>Kunze&Kirkham</i>
γ	kN/(m ² · °C)	Psychrometerkonstante
ε	-	Verhältnis der Molgewichte des Wasserdampfes und der trockenen Luft
η	Ns/m ²	Dynamische Viskosität von Wasser
θ	-	Benetzungswinkel
θ	-	Volumetrischer Wassergehalt
Θ	-	Normierter Wassergehalt
θ_{FK}	-	Volumetrischer Wassergehalt bei der Feldkapazität
θ_{max}	-	Volumetrischer Wassergehalt (Maximalwert)
θ_{min}	-	Volumetrischer Wassergehalt (Minimalwert)
θ_{PWP}	-	Volumetrischer Wassergehalt beim permanenten Welkepunkt
θ_r	-	Restwassergehalt
θ_s	-	Volumetrischer Wassergehalt bei Sättigung
θ_w	-	Volumetrischer Wassergehalt bei einer Saugspannung $\psi = a_f$
λ	-	Index der Porengrößenverteilung nach <i>Brooks&Corey</i>
ν	m ² /s	Kinematische Viskosität von Wasser
ρ	kg/m ³	Dichte der Luft
ρ_d	g/cm ³	Trockendichte des Bodens
$\rho_{d,0}$	g/cm ³	Trockendichte des Bodens nach Bewässerung
$\rho_{d,a}$	g/cm ³	Trockendichte des Bodens beim Einbau
$\rho_{d,e}$	g/cm ³	Trockendichte des Bodens beim Ausbau
ρ_{Pr}	g/cm ³	Trockendichte beim Proctoroptimum
ρ_s	g/cm ³	Korndichte des Bodens
ρ_t	kg/m ³	Dichte der trockenen Luft
ρ_w	g/cm ³	Dichte von Wasser
σ	N/m	Grenzflächenspannung zwischen Wasser und Luft
σ_{Hg}	N/m	Grenzflächenspannung zwischen Quecksilber und Luft
τ	-	Tortuositätsfaktor nach <i>Mualem</i>
ψ	kPa	Matrixspannung bzw. Saugspannung / totale Saugspannung
ψ_0	kPa	Saugspannungswert zur Beschreibung der Saugspannungsbezogenen Dehnungen
ψ_b	kPa	Lufteintrittspunkt
$\psi_{b,n}$	kPa	Dichte-bezogener Lufteintrittspunkt
ψ_k	kPa	Kapillardruck
$\psi_{k,n}$	kPa	Dichte-bezogener Kapillardruck

ψ_r	kPa	Saugspannung beim Restwassergehalt θ_r
ω_v	-	Molekulare Masse von Wasserdampf

1 Einleitung

Entsprechend dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz sollen schadstoffbelastete Böden und Baustoffe weitgehend wieder verwendet werden und es soll auf eine Deponierung verzichtet werden. Eine bedeutende Einsatzmöglichkeit für derartige Stoffe stellt die Verwendung in Erdbauwerken wie z.B. Straßendämmen sowie Lärm- und Sichtschutzwällen dar. Je nach Höhe der Stoffkonzentrationen können schadstoffbelastete Böden dabei ungesichert, d.h. ohne zusätzliche Maßnahmen eingesetzt werden oder technische Sicherungsmaßnahmen zum Schutz des Grundwassers vor Verunreinigungen erfordern. Da der Austrag von Schadstoffen aus Böden in der Regel hauptsächlich über die flüssige Phase erfolgt, müssen technische Sicherungsmaßnahmen so ausgelegt werden, dass eine Durchsickerung dieser Böden infolge von Niederschlagswasser weitgehend verhindert wird. Dies kann prinzipiell durch Anordnung eines Dichtungselementes (z.B. einer mineralischen Dichtungsschicht oder einer Geokunststoff-Abdichtung) oberhalb des schadstoffbelasteten Bodens erreicht werden. Für den Fall, dass die schadstoffbelasteten Böden gering durchlässig sind, kann auf eine derartige Dichtungsschicht evtl. jedoch vollständig verzichtet werden. Aufgrund der geringen Durchlässigkeit verdichteter Tone bietet sich eine entsprechende Bauweise ohne zusätzliche Dichtungsschicht besonders für diese Böden an. Zur Beurteilung der Wirksamkeit dieser Bauweise sind die zu erwartenden Sickerwassermengen zu ermitteln. Dazu ist die Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften der Böden nach Verdichtung erforderlich. Da die Böden oberhalb des Grundwassers eingebaut werden, ist dabei von ungesättigten Verhältnissen auszugehen.

Bei der Ermittlung des hydraulischen Verhaltens ungesättigter feinkörniger Böden ist zu beachten, dass dieses von einer Vielzahl von Faktoren abhängig ist. So wird das hydraulische Verhalten primär von der Bodenart, die durch die Mineralogie und klassifizierende Versuche beschrieben werden kann, beeinflusst. Darüber hinaus hat die Dichte des Bodens einen erheblichen Einfluss auf das hydraulische Verhalten. Im Gegensatz zu grobkörnigen Böden wird die Struktur eines verdichteten feinkörnigen Bodens zudem wesentlich durch den Einbauwassergehalt gesteuert. So werden bei unterschiedlichen Einbaubedingungen unterschiedliche Krümel- und Porenstrukturen erzeugt (SEED UND CHAN, 1959; BARDEN UND SIDES, 1970), was Auswirkungen auf das mechanische und hydraulische Verhalten hat. Erschwerend kommt weiter hinzu, dass bei feinkörnigen Böden die hydraulischen Eigenschaften mit den mechanischen gekoppelt sind. So kommt es bei einer Entwässerung feinkörniger Böden zum Schrumpfen, bei einer Bewässerung dagegen kann in Abhängigkeit vom Spannungszustand ein Quellvorgang oder eine Volumenverringerng (Sackung) auftreten. Da Volumenänderungen stets mit einer Veränderung der Porenstruktur einhergehen, haben diese letztendlich auch einen Einfluss auf das hydraulische Verhalten.

Trotz erheblicher Fortschritte in der Erforschung des Verhaltens ungesättigter Böden in den letzten Jahren ist festzustellen, dass eine ganzheitliche Beschreibung der gekoppelten hydro-mechanischen Eigenschaften ungesättigter feinkörniger Böden aufgrund der Komplexität nicht zielführend ist. Stattdessen ist es angeraten, die für die jeweilige Aufgabenstellung relevanten Prozesse herauszuarbeiten. Im Zusammenhang mit der angestrebten Verwendung schadstoffbelasteter Böden in Erddämmen spielt die Abhängigkeit der hydraulischen Eigenschaften verdichteter Tone

von den Einbaubedingungen eine herausragende Rolle. Trotz einiger dazu vorliegender Untersuchungen lässt sich dazu noch ein erheblicher Forschungsbedarf erkennen.

Die vorliegende Arbeit widmet sich deshalb im ersten Teil der experimentellen Untersuchung des hydraulischen Verhaltens verdichteter Tone unter besonderer Berücksichtigung des ungesättigten Zustandes. Im zweiten Teil wird anhand eines konkreten Beispiels gezeigt, wie der Wasserhaushalt von Erdbauwerken und die zu erwartenden Sickerwassermengen mit Hilfe von experimentellen und theoretischen Untersuchungen bestimmt werden können.

2 Problemstellung und Vorgehensweise

2.1 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

Das hydraulische Verhalten von Böden im ungesättigten Zustand kann durch zwei Funktionen ausgedrückt werden, den Zusammenhang zwischen der Saugspannung und dem Wassergehalt, der auch als pF-WG-Kurve, Retentionskurve und im Englischen als soil-water retention curve (SWRC) bezeichnet wird, und den Zusammenhang zwischen der Durchlässigkeit und dem Wassergehalt. Diese Funktionen sind Eingangsparameter in Rechenmodelle zur Simulation von Strömungsvorgängen. Da die versuchstechnische Ermittlung dieser sogenannten Bodenzustandsfunktionen, insbesondere der Beziehung zwischen Durchlässigkeit und Wassergehalt, mit erheblichem Aufwand verbunden ist, wurden verschiedene Ansätze entwickelt, mit denen die Durchlässigkeit im ungesättigten Zustand aus der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung abgeleitet werden kann. Dementsprechend nimmt die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung eine zentrale Rolle bei der Modellierung von Strömungsvorgängen in ungesättigten Böden ein und sollte möglichst zutreffend beschrieben werden.

In der Ingenieurpraxis wird die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung zur Vermeidung von zeit- und kostenintensiven experimentellen Untersuchungen häufig mit Hilfe von sogenannten Pedotransferfunktionen aus einfach zu bestimmenden Bodenkennwerten abgeschätzt. Da die meisten dieser Funktionen für unverdichtete, natürlich abgelagerte Böden entwickelt wurden, bleibt dabei weitgehend unbeachtet, dass der Zusammenhang zwischen der Saugspannung und dem Wassergehalt keine Materialkonstante darstellt, sondern von der Struktur eines Bodens abhängt. Dies hat insbesondere bei aufbereiteten feinkörnigen Böden eine große Bedeutung, da wie eingangs erwähnt in Abhängigkeit von den Einbaubedingungen (Einbauwassergehalt, Einbaudichte) unterschiedliche Bodenstrukturen erzeugt werden, die unterschiedliche hydraulische und mechanische Eigenschaften nach sich ziehen. So zeigen verschiedene Untersuchungen (GENS, 1996; SIVAKUMAR UND WHEELER, 2000) zum mechanischen Verhalten aufbereiteter feinkörniger Böden, dass die Einbaubedingungen das Bodenverhalten maßgebend beeinflussen und zur Beschreibung des Stoffverhaltens für verschiedene Einbaubedingungen sogar von völlig unterschiedlichen Böden ausgegangen werden kann. Aus diesem Grund sind die bisher vorhandenen Pedotransferfunktionen zur Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung wenig geeignet. Desweiteren ist festzustellen, dass zwar der Einfluss der Einbaubedingungen auf die Durchlässigkeit im gesättigten Zustand bereits umfangreich untersucht wurde, zum Einfluss der Einbaubedingungen auf die hydraulischen Eigenschaften im ungesättigten Zustand aber bisher nur wenige systematische Untersuchungen vorliegen. Diese sind aber erforderlich, um anhand von numerischen Simulationsberechnungen den Wasserhaushalt von Erdbauwerken zutreffend analysieren zu können und darauf aufbauend die Erdbauwerke ggf. unter Verwendung von technischen Sicherungsmaßnahmen so zu optimieren, dass die Sickerwassermengen möglichst minimiert werden.

Die Arbeit verfolgt deshalb das Ziel, den Einfluss unterschiedlicher Einbaubedingungen auf die hydraulischen Eigenschaften verdichteter Tone unter besonderer Berücksichtigung des ungesättigten Zustandes zu ermitteln. Da bei feinkörnigen Böden die hydraulischen Eigenschaften mit den me-

chanischen gekoppelt sind und es beispielsweise infolge von Schrumpf- oder Quellvorgängen zu einer Veränderung der hydraulischen Eigenschaften kommen kann, sollen die dazu erforderlichen experimentellen Untersuchungen so ausgerichtet sein, dass neben den hydraulischen Eigenschaften auch das mechanische Verhalten der Proben erfasst werden kann. Aufbauend auf den Versuchsergebnissen soll geprüft werden, ob die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung und die hydraulische Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand für verdichtete Tone mit häufig angewendeten, überwiegend aus der Bodenkunde stammenden Modellen beschrieben werden können. Außerdem soll ein Ansatz zur Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung verdichteter Tone entwickelt werden, bei dem im Vergleich zu bereits vorhandenen Pedotransferfunktionen der Einfluss unterschiedlicher Einbaubedingungen Berücksichtigung findet.

Ein weiteres Ziel der Arbeit ist es, anhand eines großmaßstäblichen Feldversuches darzustellen, wie sich unterschiedliche Einbaubedingungen auf den Wasserhaushalt von Erddämmen auswirken und wie die Wasserbewegungen in ungesättigten Erddämmen mit Hilfe von experimentellen und theoretischen Untersuchungen analysiert werden können.

2.2 Vorgehensweise

Zur Ermittlung von Sickerwassermengen bei verdichteten Erdbauwerken genügt es nicht, sich auf die Analyse der Wasserbewegung im Boden zu beschränken, sondern es sind auch die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse und Wechselwirkungen mit der Atmosphäre zu berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund wird zu Beginn der Arbeit in Abschnitt 3 der Wasserhaushalt von Erddämmen mit den einzelnen Komponenten dargestellt.

Anschließend werden in Abschnitt 4 die theoretischen Grundlagen zur Beschreibung der Wasserbewegung im Boden dargestellt. Dabei wird auf verschiedene Methoden zur Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung eingegangen.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche zum Einfluss der Einbaubedingungen auf die hydraulischen Eigenschaften verdichteter feinkörniger Böden werden in Abschnitt 5 dargestellt. In Abschnitt 6 werden die eigenen Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Einbaubedingungen auf die hydraulischen Eigenschaften verdichteter Tone vorgestellt. Anschließend wird in Abschnitt 7 auf Grundlage der Versuchsergebnisse ein Ansatz zur Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung unter Berücksichtigung der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand in Form einer Parameterregression beschrieben.

In Abschnitt 8 wird anhand eines ausgeführten Erddamms am Münchner Flughafen dargestellt, wie sich unterschiedliche Einbaubedingungen auf die Sickerwassermengen auswirken. Der Erddamm wurde aus einem gering durchlässigen Ton mit organischen Beimengungen erstellt. Aufgrund der geringen Durchlässigkeit des Tons im verdichteten Zustand wurde trotz erhöhter Konzentrationen von Arsen im Boden auf eine Abdichtung verzichtet. Um den Einfluss unterschiedlicher Einbaubedingungen auf den Wasserhaushalt zu analysieren, wurde der Erddamm in zwei Abschnitte unterteilt, in denen der Boden bei unterschiedlichen Einbauwassergehalten verdichtet wurde. Zur Ermittlung des Wasserhaushaltes und der Sickerwassermengen wurde der Erddamm umfangreich messtechnisch ausgerüstet. Auf Grundlage der Messungen wird der Einfluss der Einbaubedingungen analysiert. Außerdem wurden Strömungsberechnungen mit Hilfe eines FE-Programmes durchge-

führt, um zu prüfen, inwieweit der Wasserhaushalt des Erddamms mit Hilfe von numerischen Berechnungen abgebildet werden kann. Dazu werden die Ergebnisse der Berechnungen mit den Messergebnissen verglichen.

In Abschnitt 9 werden Folgerungen der aus den verschiedenen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse zum geohydraulischen Verhalten verdichteter Erdbauwerke für die Praxis beschrieben. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der Erkenntnisse und Hinweisen auf offene, forschungswürdige Aspekte.

3 Wasserhaushalt von Erddämmen

Der Wasserhaushalt eines bewachsenen Erddammes mit seinen wichtigsten Komponenten ist vereinfacht in Abb. 3.1 dargestellt. Infolge von Niederschlägen kommt es an der Bodenoberfläche zu Oberflächenabflüssen und zur Versickerung von Niederschlagswasser in den Boden (Infiltration). Gleichzeitig wird einem Erdkörper über die Bodenoberfläche in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen und der Vegetation Wasser durch Evaporation und Transpiration der Pflanzen entzogen. Diese beiden Komponenten werden in der Regel in Form der Evapotranspiration gemeinsam erfasst. Bilanziert man die einzelnen Zu- und Abflüsse, muss im stationären Zustand gelten, dass der Niederschlag gleich der Summe aus Oberflächenabfluss, Infiltration in den Oberboden und Evapotranspiration ist. Im instationären Zustand muss zusätzlich eine Änderung des Wassergehaltes im Boden berücksichtigt werden. (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2002)

Im Folgenden werden die im Oberboden bzw. an der Bodenoberfläche auftretenden Vorgänge der Evaporation, Transpiration der Pflanzen, des Oberflächenabflusses und der Versickerung infolge von Niederschlägen näher dargestellt.

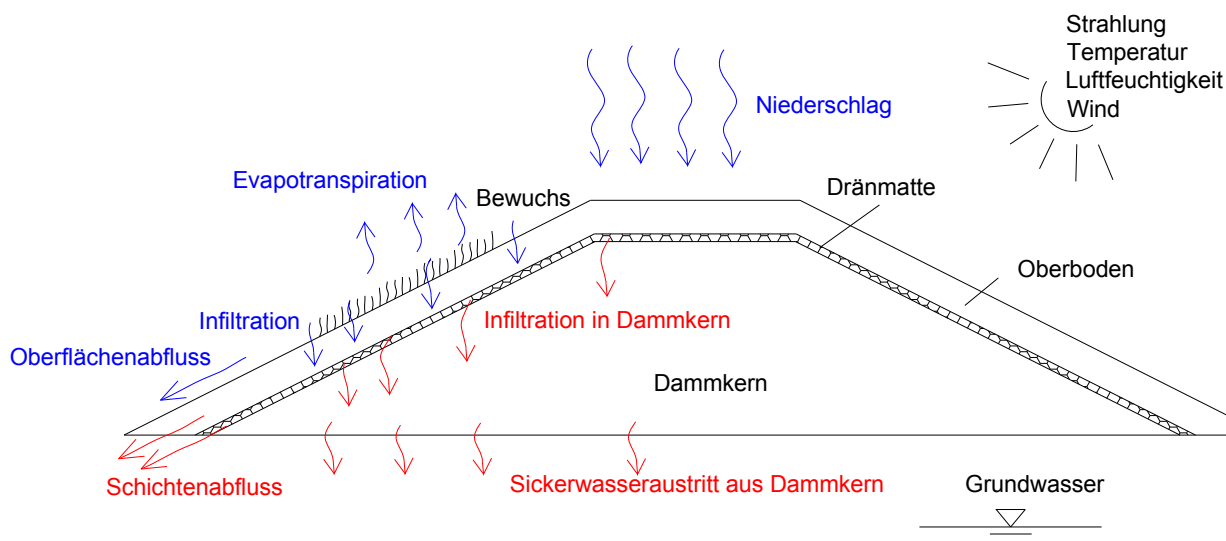


Abb. 3.1: Wasserhaushalt eines mehrschichtigen Erddammes

3.1 Niederschlag

Für die vorliegende Fragestellung der Wasserbewegung in verdichteten feinkörnigen Böden sind die klimatischen Verhältnisse von herausragender Bedeutung, da sie bei der quantitativen Berechnung von Sickerwassermengen die einwirkende Größe darstellen. Infolge von Niederschlägen kommt es zu einer Infiltration von Wasser in den Boden und damit zu einer Wasserbewegung im Boden. Die Höhe der Infiltration hängt dabei u. a. von der Intensität und Verteilung der Niederschläge ab. So stellen sich bei kurzen Niederschlagsereignissen hoher Intensität ein vergleichsweise großer Oberflächenabfluss und eine geringe Infiltration ein, während lang anhaltende Niederschlagsereignisse geringer Intensität zu geringen Oberflächenabflüssen und hohen Infiltrationsra-

ten führen. Zur rechnerischen Ermittlung von Sickerwassermengen aus Erddämmen ist der Ansatz der Niederschlagsintensität und -verteilung deshalb von großer Bedeutung.

3.2 Infiltration an der Bodenoberfläche und Oberflächenabfluss

Sofern infolge von Niederschlägen mehr Wasser auf der Bodenoberfläche auftritt, als vom Boden aufgenommen werden kann, kommt es zur Erstehung von Oberflächenwasser. Auf geneigten Flächen, wie im Falle des in [Abb. 3.1](#) dargestellten Erddammes, fließt dieses auf der Böschung ab und wird als Oberflächenabfluss bezeichnet. Die Größe des Oberflächenabflusses hängt von der Intensität der Niederschläge, der Neigung der Bodenoberfläche, den Eigenschaften der Vegetation und von der Größe der Infiltration ab. Letztere wird von den zustandsabhängigen Eigenschaften des Oberbodens maßgeblich beeinflusst. Im Allgemeinen wird angenommen, dass sich bei einem Boden im ungesättigten Zustand infolge der geringeren hydraulischen Leitfähigkeit eine geringere Infiltrationsrate an der Bodenoberfläche einstellt als im gesättigten Zustand (SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL, 2002). Wie aber die Beobachtung bei Durchlässigkeitsversuchen an verdichteten Tonen zeigt (HEYER, 2001), hat das Matrixpotential eines ungesättigten Bodens einen großen Einfluss auf die einströmende Wassermenge, wodurch sich trotz der im ungesättigten Zustand geringeren hydraulischen Leitfähigkeit eine Zunahme der Infiltration gegenüber dem gesättigten Zustand ergeben kann. Infolge der Vielzahl der Einflussparameter und der Abhängigkeiten dieser zueinander stellt die Ermittlung der in den Boden infiltrierenden Wassermenge prinzipiell eine äußerst komplexe Aufgabe dar.

3.3 Evaporation und Transpiration

Die Gesamtverdunstung setzt sich zusammen aus der Evaporation, der Transpiration und der Interzeptionsverdunstung. Die Evaporation umfasst die Verdunstung des unbewachsenen Bodens sowie die Wasserflächenverdunstung. Unter Transpiration wird die Wasseraufnahme aus dem Boden durch die Vegetation verstanden. Die Interzeptionsverdunstung berücksichtigt die Verdunstung des von den Pflanzen aufgefangenen, nicht zu Boden gelangenden Wassers. Die Gesamtverdunstung (Evapotranspiration) wird sowohl von atmosphärischen Bedingungen als auch vom Boden und der Vegetation beeinflusst. (DYCK, 1980)

Unter der potentiellen Evaporation wird die in Abhängigkeit von den atmosphärischen Bedingungen mögliche maximale Verdunstung bei einer vollen Sättigung des Bodens verstanden. Nimmt der Sättigungsgrad des Bodens im Zuge der Verdunstung ab, reduziert sich auch die hydraulische Leitfähigkeit. Dies führt zu einer Abnahme der Evaporation gegenüber der potentiellen Evaporation. Man spricht dann von der tatsächlichen Evaporation. Ähnliches gilt für die Wasseraufnahme durch die Pflanzen (Transpiration). So kann mit abnehmender Wasserleitfähigkeit des Bodens von den Pflanzen weniger Wasser aufgenommen werden.

Für die Verdunstung von Wasser als Übergang vom flüssigen oder festen Aggregatzustand in den gasförmigen ist ein Energieeintrag aus Strahlung oder Wärme erforderlich. Die Verdunstung ist damit sowohl in der Energiebilanz als auch in der Wasserbilanz der Erdoberfläche zu berücksichtigen. Zur Berechnung der Verdunstung wurden vielfältige Methoden entwickelt, die zumeist auf dem Energiebilanzverfahren oder auf einem aerodynamischen Ansatz beruhen. Ein aerodynamischer

Ansatz wurde 1801 von DALTON dargestellt. Dabei wird die Verdunstung einer Wasseroberfläche als Funktion der Windgeschwindigkeit und des Sättigungsdefizites zwischen der Wasseroberfläche und der Luft beschrieben. Beim Energiebilanzverfahren wird die Verdunstung als Element der Wärmehaushaltsgleichung ermittelt. Dazu müssen allerdings alle anderen, am Energieumsatz beteiligten Größen bekannt sein. SVERDRUP (1936) stellte eine entsprechende Gleichung zur Ermittlung des Verdunstungswärmestromes vor.

Durch Kombination des Energiebilanzverfahrens mit dem aerodynamischen Ansatz nach DALTON (1801) stellte PENMAN (1956) eine empirische Gleichung zur Ermittlung der potentiellen Evaporation auf. Sein Ansatz ermöglicht es, die Verdunstung einer Wasserfläche bzw. einer stets feuchten Bodenoberfläche in Abhängigkeit von der Strahlung, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit zu bestimmen. Die Übertragung dieses Ansatzes auf die Verdunstung von bewachsenen Landflächen gelang MONTEITH (1965), der die Gleichung nach PENMAN (1956) weiterentwickelte und um zwei bewuchsabhängige Verdunstungswiderstände ergänzte. Dabei handelt es sich um den aerodynamischen Widerstand, der von der Windgeschwindigkeit und von der Pflanzenart abhängt, sowie um den sogenannten Stomata-Widerstand, der die Wasserversorgung der Pflanzen berücksichtigt. Im Vergleich zu anderen Verfahren (z.B. HAUDE, 1955, THORNTHWAITE, 1948) ist die Gleichung nach Penman-Monteith vergleichsweise komplex und erfordert die Bestimmung einer Vielzahl an Parametern. Dementsprechend kommt dieser Ansatz bisher überwiegend nur in Forschungsarbeiten zur Anwendung. Auf die Gleichung nach Penman-Monteith wird im Detail im Zusammenhang mit der untersuchten Versuchsschüttung in Abschnitt 8.5.5 eingegangen. Wie bereits genannt wurden daneben weitere Ansätze (z.B. HAUDE, 1955; THORNTHWAITE, 1948) zur Bestimmung der potentiellen Evapotranspiration entwickelt. Diese beruhen auf statistisch-empirischen Methoden und ermöglichen es, die potentielle Evapotranspiration auf Grundlage von vergleichsweise wenigen Parametern zu bestimmen. Einen umfassenden Überblick über die verschiedenen Ansätze zur Beschreibung der Evapotranspiration gibt das DVWK Merkblatt 238/1996.

3.4 Wasser im Boden

3.4.1 Erscheinungsformen

Die Wasserbewegung im Boden wird zum einen von der Schwerkraft und zum anderen von den hydraulischen Eigenschaften des Bodens beeinflusst. So treten zwischen dem Bodengefüge und dem Bodenwasser Bindungskräfte auf, wodurch ein Teil des Bodenwassers als **Haftwasser** gegen die Schwerkraft vom Boden zurückgehalten werden kann. Dies führt dazu, dass nur ein Teil des Bodenwassers frei beweglich ist und sich infolge der Schwerkraft als **Sickerwasser** bewegen kann. Die Wechselwirkungen zwischen dem Bodenwasser und dem Bodengefüge beruhen im Wesentlichen auf Kapillar- und Adsorptionskräften und sind dadurch insbesondere in verdichteten feinkörnigen Böden sehr ausgeprägt.

In grobkörnigen, sehr durchlässigen Böden dagegen sind diese Bindungskräfte gering, wodurch es zu einem bevorzugten Sickerwasserabfluss kommen kann. In technischen Erdbauwerken ist dies beispielsweise bei Dränschichten der Fall, die zur gezielten Ableitung des Sickerwassers auf geringer durchlässigen Schichten angeordnet werden. Derartige Abflüsse werden auch als Schichtenabfluss bezeichnet (siehe dazu [Abb. 3.1](#)).

Kommt es oberhalb einer gering durchlässigen Schicht zu einem Aufstau von Sickerwasser, so spricht man von **Stauwasser**. Sofern dies dauerhaft auftritt, wird dies als **Grundwasser** bezeichnet.

3.4.2 Kapillarwasser

Als Kapillarwasser wird der Teil des Haftwassers bezeichnet, der durch Kapillarkräfte im Boden gegen die Schwerkraft gehalten wird. Die Kapillarkräfte beruhen dabei auf den zwischen den Wassermolekülen (Kohäsion) und den zwischen der Feststoffoberfläche und der Wasserphase (Adhäsion) auftretenden Bindungskräften. So stehen die zwischen den Wassermolekülen wirkenden Bindungskräfte im Inneren der Wasserphase im Gleichgewicht. An der Grenzfläche zur Luft dagegen ergibt sich eine resultierende, in Richtung der Flüssigkeit wirkende Kraft. Dadurch erfährt die Grenzfläche zwischen der Wasserphase und der Luft eine Zugspannung, die als Oberflächenspannung bezeichnet wird. An der Grenze zwischen einer festen Umrandung und der Wasserphase tritt in Abhängigkeit von der Oberflächenspannung ein Randwinkel auf. Dieser hängt u. a. von der Rauigkeit der Feststoffoberfläche ab. Allgemein unterscheidet man zwischen benetzenden Flüssigkeiten ($\theta < 90^\circ$), vollständig benetzenden Flüssigkeiten ($\theta = 0^\circ$) und nicht benetzenden Flüssigkeiten ($\theta \geq 90^\circ$). Bei Wasser handelt es sich um eine benetzende Flüssigkeit, wobei der Randwinkel zum Boden in der Regel mit $\theta = 0^\circ$ angenommen wird. (SCHUBERT, 1982)

Wie stark das Bodenwasser an den Feststoff gebunden ist, hängt von der Größe und Form der Poren im Boden ab. Je kleiner die Poren sind, desto größer sind die Bindungskräfte. Im Vergleich zu freiem Porenwasser stellt sich dadurch über dem kapillar gebundenen Wasser ein niedrigerer Dampfdruck ein, was bedeutet, dass zur Freisetzung des Wassers mehr Energie aufgewendet werden muss. Die Größe der Bindungskräfte lässt sich aus der kapillaren Steighöhe ermitteln. Dazu wird ein einfaches Modell in Form eines zylindrischen Rohres mit konstantem Durchmesser d betrachtet. Wie in der [Abb. 3.2](#) dargestellt wirkt im Kapillarrohr auf die Grenzfläche ein Differenzdruck infolge der wirkenden Luft- und Wasserdrücke. Dieser wird durch die Oberflächenspannung σ der Grenzfläche über Adhäsionskräfte vom Kapillarrohr aufgenommen. Aus Gleichgewichtsüberlegungen für die Grenzfläche lässt sich unter Berücksichtigung der Bezeichnungen aus der [Abb. 3.2](#) daraus die kapillare Steighöhe h_k bestimmen:

$$h_k = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \cos(\theta)}{d \cdot \rho_w \cdot g} \quad (3.1)$$

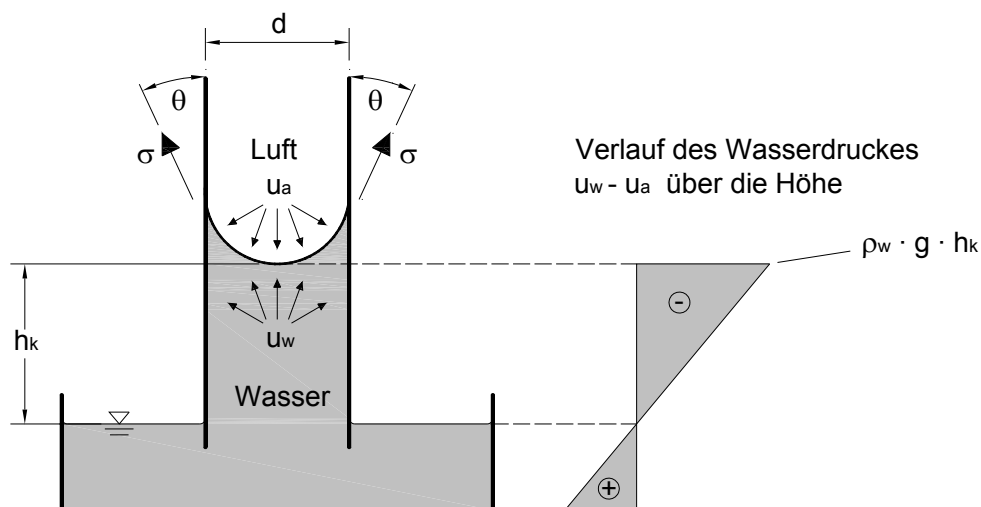


Abb. 3.2: Kapillarer Aufstieg des Wassers in einem Rohr

3.4.3 Adsorptionswasser

Entsprechend der Begriffsbestimmungen nach der DIN 4047-3:2002 bezeichnet das Adsorptionswasser den Teil des Haftwassers, der an der Oberfläche der festen Bodenteilchen gegen den Einfluss der Schwerkraft durch Adsorptionskräfte und osmotische Kräfte angelagert ist, ohne Menisken zu bilden.

Physikalisch beruhen die Bindungskräfte zwischen Wasser und Feststoff auf der Oberflächenladung des Feststoffes und dem Dipolcharakter der Wassermoleküle. Dabei orientieren sich die negativen Seiten des Wassermoleküls an positiv geladenen Ionen und umgekehrt. Aufgrund der großen Oberflächenladung der Tonminerale sind derartige Wechselwirkungen in feinkörnigen Böden besonders ausgeprägt.

Eine gute Übersicht über verschiedene Modelle zur quantitativen Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Bodenfeststoff und Bodenwasser auf mikroskopischer Ebene gibt SCHICK (2003).

Im Vergleich zum Kapillarwasser ist das Adsorptionswasser aufgrund der großen Bindungskräfte zwischen den Tonmineralen und den Wassermolekülen deutlich stärker gebunden. Die Höhe der Bindungskräfte lässt sich durch die Messung des Partialdruckes des Wasserdampfes in der Porenluft mit Hilfe des in Abschnitt 4 dargestellten thermodynamischen Zusammenhangs ermitteln (Gleichung (4.3)).

4 Grundlagen der Wasserbewegung im ungesättigten Boden

4.1 Wasserbewegung unter isothermischen Bedingungen

4.1.1 Allgemeines

Die Grundlagen der Wasserbewegung im ungesättigten Boden sind u.a. bei MITCHELL UND SOGA (2005), FREDLUND UND RAHARDJO (1993), LU UND LIKOS (2004) und SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL (2002) ausführlich beschrieben und werden im Folgenden zum besseren Verständnis der durchgeführten Untersuchungen zusammenfassend dargestellt.

In einem ungesättigten Boden können Strömungsvorgänge prinzipiell sowohl in der flüssigen als auch in der gasförmigen Phase auftreten. Die Ursachen für eine Wasserbewegung in der flüssigen Phase sind:

- hydraulische Gradienten
- Temperaturunterschiede
- chemische Konzentrationsunterschiede
- elektrische Spannungen

Für die Fragestellung der Wasserbewegung in verdichteten Erddämmen können Wasserbewegungen infolge von elektrischer Spannung vernachlässigt werden. Die Wasserbewegung in der flüssigen Phase infolge von Temperaturunterschieden ist nur bei sehr großen Temperaturgradienten relevant und muss für die vorliegende Fragestellung ebenfalls nicht betrachtet werden. Eine Wasserbewegung infolge von chemischen Konzentrationsunterschieden wird als Osmose bezeichnet. Im Vergleich zur Wasserbewegung infolge von hydraulischen Gradienten ist auch die osmotische Wasserbewegung für die vorliegende Fragestellung als untergeordnet anzusehen. Im Allgemeinen kann sie nur in feinkörnigen Böden sehr geringer Durchlässigkeit bei Vorliegen eines hohen Salzgehaltes relevant werden.

In der gasförmigen Phase wird Wasser als Wasserdampf bewegt. Die Wasserdampfbewegung kann dabei sowohl durch eine konvektive Luftbewegung als auch durch Diffusionsvorgänge verursacht werden. Konvektionsströmungen können bei verdichteten Erdbauwerken beispielsweise in sehr durchlässigen Dränschichten auftreten. In der Regel werden diese bei der rechnerischen Ermittlung der Wasserdampfbewegung jedoch nicht berücksichtigt. Maßgebende Ursachen für einen diffusiven Wasserdampftransport sind Temperatur- und Feuchtegradienten. Im Vergleich zur Temperatur ist der Einfluss von Feuchtegradienten allerdings meist nachrangig und nur bei sehr trockenen Böden zu berücksichtigen, da unter humiden Klimabedingungen allenfalls in obersten geringmächtigen Bereichen nennenswerte Dampfdruckgradienten entstehen.

Da die Transportkenngrößen für eine Wasserbewegung in der flüssigen und gasförmigen Phase nur mit großem Aufwand unabhängig voneinander ermittelt werden können, wird die Wasserbewegung in der flüssigen und in der gasförmigen Phase häufig zusammengefasst.

Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen für eine Wasserbewegung unter isothermischen Bedingungen dargestellt. Anschließend wird kurz auf den Ansatz von PHILIP UND DE VRIES (1957) zur gekoppelten Beschreibung der Wasserbewegung infolge von hydraulischen Gradienten und Temperaturgradienten eingegangen.

4.1.2 Potentialkonzept

Wie eingangs beschrieben wird die Wasserbewegung unter isothermischen Bedingungen maßgebend durch hydraulische Gradienten und nachgeordnet durch chemische Konzentrationsunterschiede bestimmt und findet überwiegend in der flüssigen Phase statt. Die hydraulischen Gradienten resultieren dabei aus der Verteilung der Energie in der flüssigen Phase. Entsprechend dem Potentialkonzept bewegt sich Wasser von einem Punkt höherer Energie zu einem Punkt niedrigerer Energie. Die Energie des Bodenwassers wird als Gesamtpotential bezeichnet und entspricht der Arbeit, die verrichtet werden muss, um Wasser von einem vorgegebenen Punkt zum Bezugspunkt des betrachteten Kraftfeldes zu bewegen. Das Gesamtpotential wird in der Regel in folgende messbare Teilpotentiale aufgeteilt:

- **Gravitationspotential** H_g : Das Gravitationspotential berücksichtigt den Einfluss des Schwerfeldes der Erde und ist definiert als die Arbeit, die verrichtet werden muss, um eine Einheitsmenge Wasser in eine bestimmte Höhe z zu bewegen.
- **Matrixpotential** H_m : Das Matrixpotential umfasst die Bindung des Wassers im Boden infolge von Kapillar- und Adsorptionskräften. Es entspricht der Arbeit, die verrichtet werden muss, um einem ungesättigten Boden unter den vorherrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen eine Einheitsmenge Wasser zu entziehen. Das Matrixpotential H_m wird dabei aus der Differenz der in einer Kapillare auf die Grenzfläche wirkenden Luft- und Wasserdrücke folgendermaßen ermittelt:

$$H_m = -\frac{u_a - u_w}{\rho_w \cdot g} \quad (4.1)$$

- **Gaspotential** H_a : Sofern der Luftdruck im Boden nicht mit dem Luftdruck, der am Bezugsniveau herrscht, übereinstimmt, wird dies mit Hilfe des Gaspotentials berücksichtigt. Bei vielen Problemstellungen kann das Gaspotential allerdings vernachlässigt werden, wenn die gasförmige Phase ungehindert entweichen kann und keinen nennenswerten Einfluss auf den Strömungsvorgang in der flüssigen Phase nimmt. Dies ist z.B. in der Regel bei der Infiltration von Niederschlagswasser der Fall. In diesen Fällen wird angenommen, dass der Luftdruck im Boden dem atmosphärischen Luftdruck entspricht.
- **osmotisches Potential** H_o : Das osmotische Potential ist definiert als die Arbeit, die verrichtet werden muss, um einem bestimmten Bodenvolumen eine Einheitsmenge Wasser durch eine semipermeable Membran zu entziehen. Die Größe des osmotischen Potentials ist von der Menge der gelösten Salze im Boden abhängig. Hohe Salzkonzentrationen, beispielsweise in ariden Gebieten führen zu einem erhöhten Wassergehalt in Folge eines osmotischen Potentials. Sind im Porenwasser keine Salze gelöst, kann das osmotische Potential vernachlässigt werden.

Zur Beschreibung der Wasserbewegung infolge von hydraulischen Gradienten wird das hydraulische Potential H betrachtet. Allgemein setzt es sich aus drei Anteilen infolge von Gravitation, Druck

und Geschwindigkeit zusammen. Die Geschwindigkeitshöhe in einem porösen Medium ist dabei vernachlässigbar gegenüber der Gravitations- und Druckhöhe. In ungesättigten Böden ist der Druck der flüssigen Phase geringer als der Druck der gasförmigen Phase (bei praktischen Anwendungen häufig der Luftdruck) und kann somit über das Matrixpotential erfasst werden. Dementsprechend wird das hydraulische Potential als Summe des Gravitations- und Matrixpotentials und ggf. des Gaspotentials betrachtet.

$$H = H_m + H_g + H_a \quad (4.2)$$

Das osmotische Potential sollte nach COREY (1977) im hydraulischen Potential nicht berücksichtigt werden, da es einen anderen physikalischen Prozess (osmotische Diffusion) nach sich zieht. Im Falle maßgeblicher osmotischer Gradienten sollte demnach separat ein osmotischer Diffusionsprozess betrachtet werden.

Dennoch werden das Matrixpotential und das osmotische Potential vielfach zusammengefasst, da bei verschiedenen Messmethoden neben der Saugspannung infolge von kapillaren und adsorptiven Kräften (Matrixpotential) auch osmotische Einflüsse (osmotisches Potential) erfasst werden. Die alleinige Ermittlung des osmotischen Potentials ohne implizite Erfassung des Matrixpotentials ist mit Hilfe der „squeezing“-Methode möglich, bei der alleine das Porenwasser untersucht wird. Dazu muss allerdings ausreichend Porenwasser aus dem Boden ausgepresst werden, was je nach Konsistenz der untersuchten Böden mit Schwierigkeiten verbunden ist. Die Summe von Matrixspannungen und osmotischen Saugspannungen wird auch als totale Saugspannung bezeichnet.

Nach EDLEFSEN UND ANDERSON (1943) besteht basierend auf der Gleichung nach Kelvin zwischen der totalen Saugspannung und dem Partialdruck des Wasserdampfes im Boden folgender thermodynamischer Zusammenhang:

$$\psi = -\frac{R \cdot T}{v_{w0} \cdot \omega_v} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (4.3)$$

Dabei ist:

- ψ : totale Saugspannung
- R : universelle Gaskonstante
- T : Temperatur
- v_{w0} : spez. Volumen von Wasser bzw. Inverse der Dichte von Wasser
- ω_v : molekulare Masse von Wasserdampf
- p : Partialdruck des Porenwasserdampfes
- p_0 : Sättigungsdruck von Wasserdampf über einer Oberfläche reinen Wassers (bei derselben Temperatur)

Der Ausdruck p / p_0 wird als relative Luftfeuchtigkeit bezeichnet. Die Gleichung (4.3) ermöglicht es, totale Saugspannungen indirekt durch Ermittlung der relativen Luftfeuchtigkeit zu bestimmen. Dabei ist zu beachten, dass auch osmotische Vorgänge Einfluss auf die relative Luftfeuchtigkeit haben und bei dieser Messmethode mit erfasst werden. So stellt sich beispielsweise über reinem Wasser (ohne Salze) in einem geschlossenen System eine relative Luftfeuchtigkeit von 100 % und über einer salzhaltigen Lösung abhängig von der Salzkonzentration von kleiner als 100 % ein.

4.1.3 Beziehung zwischen Saugspannung und Wassergehalt

4.1.3.1 Allgemeines

Wie in der Abb. 3.2 für das Kapillarrohr dargestellt, liegen in einem ungesättigten Boden im Bodenwasser Drücke vor, die geringer sind als der Druck in der gasförmigen Phase. Diese Differenz zwischen dem Druck der gasförmigen Phase u_a und dem Druck der flüssigen Phase u_w wird als Saugspannung bzw. Matrixspannung ψ bezeichnet:

$$\psi = u_a - u_w \quad (4.4)$$

Wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben hängt die kapillare Steighöhe in einem Kapillarrohr vom Durchmesser des Rohres ab. Für die Entwässerung eines Bodens bedeutet dies, dass die Saugspannungen umso größer werden, je stärker ein Boden entwässert wird, da die Durchmesser der Poren, welche entwässert werden, stets kleiner werden. Adsorptiv gebundenes Wasser ist nur sehr schwer zu entfernen und kann zu sehr großen Saugspannungen führen.

Zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Saugspannung und Wassergehalt empfiehlt sich die Verwendung des volumetrischen Wassergehaltes θ , da damit Veränderungen der Trockendichte infolge von Schrumpf- oder Quellvorgängen berücksichtigt werden können. Dieser lässt sich aus der Trockendichte ρ_d des Bodens, der Dichte des Wassers ρ_w und dem gravimetrischen Wassergehalt w folgendermaßen ermitteln:

$$\theta = w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (4.5)$$

Die Abb. 4.1 zeigt die prinzipielle Form einer Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung. Sie ist davon abhängig, ob der Boden be- oder entwässert wird und führt bei einem Zyklus von Be- und Entwässerungsvorgängen zu Hysteresen. Die bei gleichem Wassergehalt feststellbaren höheren Saugspannungen bei Entwässerung beruhen auf dem sogenannten Flaschenhalseffekt bei zusammenhängenden Porensystemen mit unterschiedlichen Porengrößen sowie einem unterschiedlichen Benetzungswinkel bei Be- oder Entwässerung und möglichen Lufteinschlüssen. Die Hauptentwässerungskurve und Hauptbewässerungskurve begrenzen den Bereich möglicher Zustände. Die Hauptentwässerungskurve bezeichnet die Entwässerung des Bodens nach einer vollständigen Sättigung. Eine Hauptbewässerung liegt vor, wenn der Boden vom Restwassergehalt ausgehend aufgesättigt wird. Aufgrund von Lufteinschlüssen wird dabei in der Regel keine vollständige Sättigung erreicht. Be- und Entwässerungen, die von anderen Zuständen ausgehen, werden *scanning curves* genannt und liegen zwischen der Hauptbewässerungs- und Hauptentwässerungskurve.

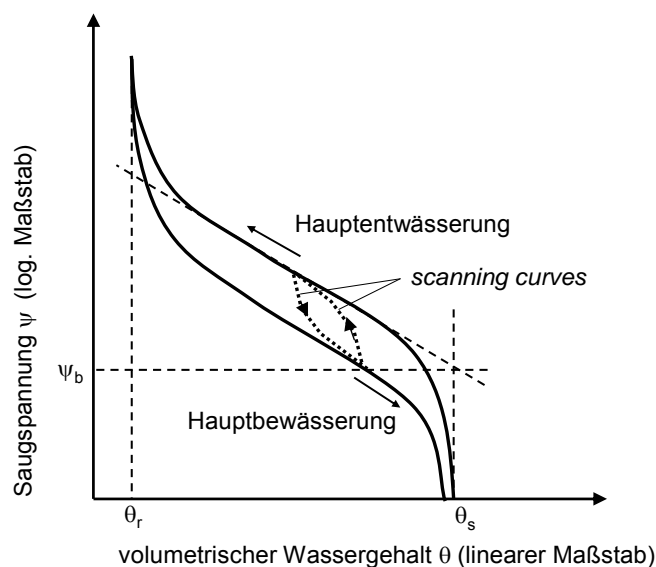


Abb. 4.1: Typische Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung

Aus dem Kurvenverlauf einer Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung können in der Regel einige charakteristische Punkte abgeleitet werden:

- Der Sättigungswassergehalt θ_s (siehe [Abb. 4.1](#)) beschreibt den Wassergehalt, bei welchem der Boden vollständig gesättigt ist und stellt den Ausgangszustand für die Ermittlung der Hauptentwässerungskurve dar.
- Aus dem Schnittpunkt zweier an die Entwässerungskurve angelegter Tangenten kann der sogenannte Lufttrittspunkt ψ_b abgeleitet werden (siehe [Abb. 4.1](#)). Mit diesem kann abgeschätzt werden, bei welcher Saugspannung Luft in den Boden eindringt und eine Entwässerung beginnt.
- Bei sehr geringen Wassergehalten steigen die Saugspannungen sehr stark an, was sich in einem steilen Kurvenverlauf äußert. Legt man in diesem Bereich eine Tangente an, kann der sogenannte Restwassergehalt θ_r bestimmt werden (siehe [Abb. 4.1](#)).

Die [Abb. 4.2](#) stellt typische Formen der Entwässerungskurve der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung für unterschiedliche Böden dar. Es ist erkennbar, dass der Lufttrittspunkt, welcher der passiven kapillaren Steighöhe entspricht, mit zunehmendem Feinkornanteil zunimmt. Sandige Böden mit geringem Feinkornanteil zeigen außerdem eine starke Entwässerung bei Saugspannungen oberhalb des Lufttrittspunktes, was aus dem zugehörigen sehr flachen Kurvenverlauf in [Abb. 4.2](#) deutlich wird.

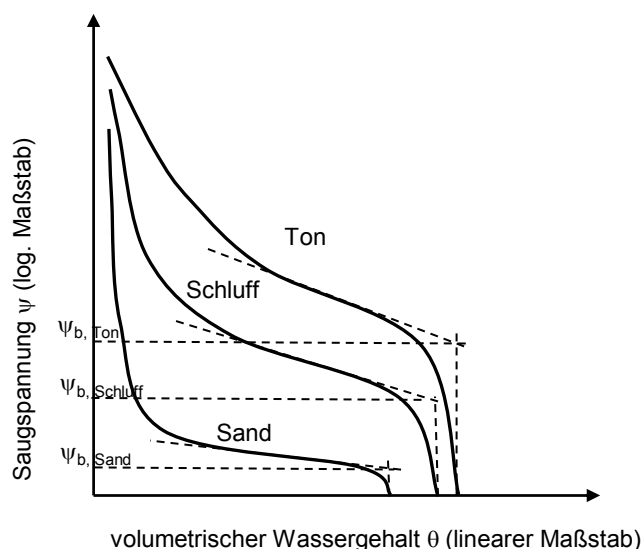


Abb. 4.2: Typische Beziehung zwischen Saugspannung und volumetrischen Wassergehalt für unterschiedliche Böden (nach SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL (2002) und ergänzt)

4.1.3.2 Saugspannungs-Wassergehalts-Modelle

Allgemein wird bei der mathematischen Beschreibung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung zwischen empirischen Modellen, die einzig einen aufgrund von Versuchen gefundenen funktionalen Zusammenhang darstellen, und physikalisch basierten Modellen, die auf einem Modell zur Beschreibung der Porenstruktur beruhen, unterschieden. Einen guten Überblick mit einer ausführlichen Darstellung der verschiedenen Modelle geben LEONG UND RAHARDJO (1997a). Im Folgenden wird nur auf die häufig verwendeten Modelle nach BROOKS UND COREY (1964), VAN GENUCHTEN (1980) sowie FREDLUND UND XING (1994), die zum Teil auch im Rahmen der Arbeit zur Anwendung kamen, eingegangen.

BROOKS UND COREY (1964) stellten anhand von experimentellen Untersuchungen an unterschiedlichen Böden einen Ansatz auf Basis eines Kapillarmodells vor, wonach jede Pore nur mit Poren desselben Durchmessers verbunden ist. Unter Ansatz des normierten Wassergehaltes

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4.6)$$

kann das Modell folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\Theta = \begin{cases} 1 & \text{für } \psi < \psi_b \\ \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda & \text{für } \psi \geq \psi_b \end{cases} \quad (4.7)$$

Dabei müssen der Lufteintrittspunkt ψ_b und der Index der Porengrößenverteilung λ bestimmt werden.

Dieser Ansatz wurde von VAN GENUCHTEN (1980) weiterentwickelt, der folgendes drei-parametrische Modell vorschlug:

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \right]^m \quad (4.8)$$

Hier sind n , m und α Parameter, um die Kurve an einen messtechnisch ermittelten Verlauf einer Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung anzupassen. Der Parameter α kann dabei in Zusammenhang mit dem Lufteintrittspunkt gebracht werden; n beeinflusst die Neigung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung im mittleren Bereich und wirkt ähnlich wie der Index der Porengrößenverteilung im Modell nach *Brooks&Corey*. Mit dem Parameter m kann die Form der Kurve insgesamt angepasst werden. Zur Reduzierung der Parameteranzahl wird der Parameter m aufgrund eines empirisch gefundenen Zusammenhangs häufig in folgende Beziehung zu n gesetzt:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (4.9)$$

Experimentelle Untersuchungen an verschiedenen Böden zeigen, dass das Modell nach *van Genuchten* im Vergleich zur Formulierung nach *Brooks&Corey* eine bessere Abbildung des Kurvenverlaufes über größere Saugspannungsbereiche und einen stetigen Funktionsverlauf im Bereich des Lufteintrittspunktes erlaubt.

Das Modell nach FREDLUND UND XING (1994) ist der Form nach dem Modell von *van Genuchten* sehr ähnlich und lässt sich unter Verwendung des normierten volumetrischen Wassergehaltes folgendermaßen darstellen:

$$\Theta = C(\psi) \left(\frac{1}{\ln(e + (\psi / a_f)^{n_f})} \right)^{m_f} \quad (4.10)$$

$$\text{mit } C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\psi_r}\right)} \right] \quad (4.11)$$

Das Modell zeichnet sich durch den zusätzlichen Korrekturfaktor $C(\psi)$ aus, welcher die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung beim Wassergehalt Null auf den Saugspannungswert 10^6 kPa festlegt. Der Parameter ψ_r bezeichnet dabei die Saugspannung beim Restwassergehalt. Über die Parameter a_f , n_f und m_f kann das Modell an Messwerte angepasst werden. Der Parameter a_f stellt dabei die Saugspannung am Wendepunkt der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung entsprechend der Abb. 4.3 dar. Der Wert für a_f liegt damit stets über dem nach Abb. 4.1 konstruierten Lufteintrittspunkt ψ_b . Über die Parameter n_f und m_f können die Neigung des mittleren Kurvenbereiches sowie der Übergangsbereich zu sehr hohen Saugspannungen gesteuert werden. Ein Vergleich des Modells mit experimentellen Ergebnissen zeigt, dass insbesondere bei feinkörnigen Böden die bei

geringen Wassergehalten auftretenden sehr hohen Saugspannungen besser abgebildet werden können als mit den Modellen nach *Brooks&Corey* und *van Genuchten*.

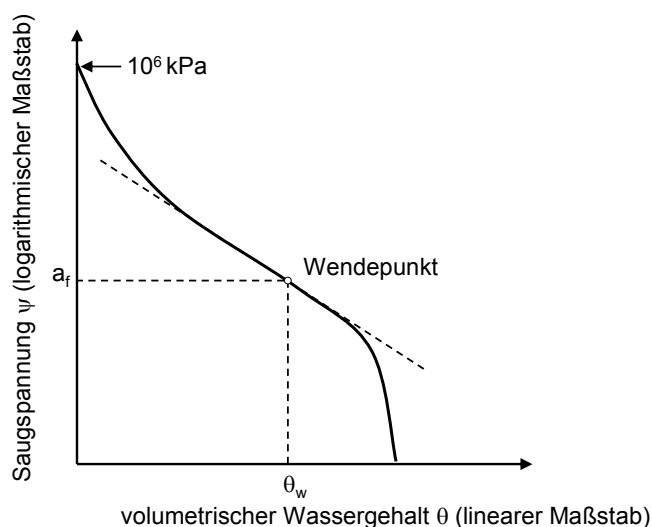


Abb. 4.3: Erläuterung des Parameters a_f nach FREDLUND UND XING (1994)

Die vorgestellten Ansätze eignen sich prinzipiell für Böden, die eine unimodale Porengrößenverteilung aufweisen. Probleme können bei der Abbildung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung von Böden mit einer Sekundärporenstruktur auftreten. Von einer Sekundärporenstruktur wird gesprochen, wenn ein Boden neben den Porenstrukturen in aggregierten Partikeln zusätzlich eine Makroporenstruktur zwischen den aggregierten Partikeln besitzt. In der Porengrößenverteilung äußert sich dies in einer bimodalen Form. Zur Beschreibung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung derartiger Böden wurden die für unimodale Porengrößenverteilungen aufgestellten Ansätze weiterentwickelt (u. a. DURNER, 1991; GITIRANA UND FREDLUND, 2004). DURNER ET AL. (2003) haben jedoch anhand von numerischen Simulationen von Säulenexperimenten gezeigt, dass sich die instationäre Wasserbewegung in Böden mit heterogenen Strukturen im Allgemeinen auch bei Verwendung des weit verbreiteten Modells nach *van Genuchten*, das auf einer unimodalen Porengrößenverteilung beruht, zufriedenstellend abbilden lässt.

4.1.4 Hydraulische Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand

Die Zusammenhänge zur Beschreibung der Strömungsvorgänge in ungesättigten Böden entstanden aus einer Übertragung der Zusammenhänge gesättigter Systeme auf ungesättigte Systeme. Im ungesättigten Fall sind die Poren bereichsweise mit Luft gefüllt und nehmen zunächst nicht am Strömungsprozess teil. Das bedeutet, dass die Durchlässigkeit des Bodens zusätzlich vom Wassergehalt bzw. vom Sättigungsgrad abhängt. Diesem wird nach einer Idee von BUCKINGHAM (1907) Rechnung getragen, indem im Gesetz nach DARCY (1856) der Durchlässigkeitsbeiwert k als Funktion des volumetrischen Wassergehaltes eingeführt wird. Damit lässt sich für eine Strömung in z -Richtung schreiben:

$$v = -k(\theta) \cdot \frac{\partial H}{\partial z} \quad (4.12)$$

Der Begriff der ungesättigten Durchlässigkeit für den Ausdruck $k(\theta)$ ist irreführend, da insbesondere ungesättigte feinkörnige Böden bei Wasserzutritt zunächst aufsättigen, bevor Wasseraustritte zu beobachten sind. In diesem Zusammenhang scheint der Begriff der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand als geeigneter und wird im Folgenden für den Ausdruck $k(\theta)$ verwendet.

Neben der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung nimmt die hydraulische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt eine zentrale Rolle bei der Beschreibung von Strömungsvorgängen in der ungesättigten Zone ein. Da der Zusammenhang zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit und dem Wassergehalt versuchstechnisch sehr schwierig zu ermitteln ist, wurden verschiedene Ansätze zur Abschätzung dieser Beziehung ermittelt.

Gleichung	Parameter	Referenz
$k(\psi) = a \cdot \psi + b$	a, b	Richards (1931)
$k(\theta) = k_s \cdot \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_r - \theta_s} \right)^n$	$\theta_r, \theta_s, k_s, n$	Averjanov (1950)
$k(\psi) = a \cdot \psi^{-n}$	a, n	Wind (1955)
$k(\psi) = \frac{k_s}{1 + a\psi^n}$	k_s, a, n	Gardner (1958)
$k(\psi) = k_s \quad \psi \leq \psi_b$ $k(\psi) = k_s \cdot \left(\frac{\psi}{\psi_b} \right)^{-n} \quad \psi > \psi_b$	k_s, n, ψ_b	Brooks und Corey (1964)
$k(\theta) = k_s \cdot e^{a(\theta - \theta_s)}$	k_s, a, θ_s	Davidson et al. (1969)
$k(\psi) = k_s \quad \psi \leq \psi_b$ $k(\psi) = k_s \cdot e^{-a(\psi - \psi_b)} \quad \psi_b \leq \psi \leq \psi_r$ $k(\psi) = k_{re} \cdot \left(\frac{\psi}{\psi_r} \right)^{-n} \quad \psi > \psi_r$	$k_s, a, \psi_b, \psi_r, k_{re}$	Rijtema (1965)
Mit	θ_s = volumetrischer Wassergehalt bei $S_r = 1$ [-] θ_r = Restwassergehalt [-] ψ_b = Saugspannungswert für den Lufttrittspunkt [kPa] ψ_r = Saugspannung beim Restwassergehalt θ_r [kPa] k_s = Durchlässigkeit im gesättigten Zustand [m/s] k_{re} = hydraulische Leitfähigkeit bei $\psi = \psi_r$ [m/s]	

Tab. 4.1: Empirische Gleichungen zur Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand (entnommen aus FREDLUND ET AL. (1994) und ergänzt)

Nach MUALEM (1986) unterscheidet man empirische, makroskopische und statistische Modelle zur Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Boden in Abhängigkeit vom volumetrischen Wassergehalt bzw. der Matrixspannung. Empirische Modelle bestehen aus einfachen

mathematischen Funktionen, die nicht unmittelbar auf physikalischen Modellbildungen basieren, sondern nur eine Reihe von Parametern beinhalten, mit denen Saugspannungs-Wassergehalts-Kurven empirisch an einzelne gemessene Werte angepasst werden können. Eine Auswahl von empirischen Modellen ist in Tab. 4.1 dargestellt.

Makroskopischen Modellen liegt zugrunde, dass sie eine Analogie zwischen der Beschreibung einer laminaren Strömung auf mikroskopischer Ebene und einer Strömung auf makroskopischer Ebene heranziehen. Im einfachsten Fall wird dabei die Strömung in einem zylindrischen Kapillarrohr betrachtet, wobei für die Übertragung auf die makroskopische Ebene davon ausgegangen wird, dass das poröse Medium aus parallelen Kapillaren mit gleichen und in Strömungsrichtung gleich bleibenden Durchmessern besteht (siehe Abb. 4.4).

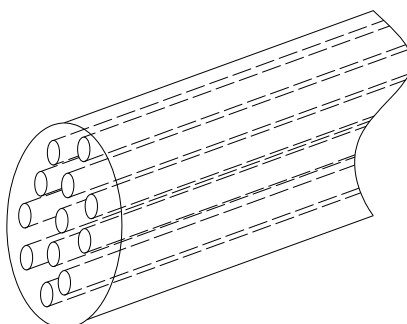


Abb. 4.4: Kapillarmodell bestehend aus parallelen Kapillaren mit gleichen und in Strömungsrichtung gleich bleibenden Durchmessern

Der Form nach ergibt sich für die Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand für alle makroskopischen Modelle ein Potenzgesetz folgender Form:

$$k = k_s \cdot S_e^n \quad (4.13)$$

Dabei stellen S_e den effektiven Sättigungsgrad und n eine Variable dar. Für den Faktor n schlugen AVERJANOV (1950) einen Wert von 3,5, YUSTER (1951) von 2,0 und IRMAY (1954) von 3,0 vor. MUALEM (1978) zeigte durch den Vergleich der makroskopischen Modelle mit experimentellen Messdaten an 50 Böden, dass der Parameter n von der Bodenart abhängt und ermittelte Werte zwischen 2,5 für grobkörnige Böden und 24,5 für feinkörnige Böden.

Der Vorteil von makroskopischen Modellen gegenüber vielen empirischen Modellen liegt im vergleichsweise einfach zu handhabenden mathematischen Zusammenhang und der vergleichsweise geringen Anzahl an zu bestimmenden Parametern. Allerdings bleibt der Einfluss der Porengrößenverteilung auf die hydraulischen Eigenschaften bei makroskopischen Modellen unberücksichtigt, auch wenn diese auf physikalisch basierten Modellvorstellungen beruhen.

Statistische Ansätze basieren auf Modellen zur Beschreibung von Porenstrukturen in porösen Medien und setzen voraus, dass ein Strömungsprozess nur in wassergefüllten Poren stattfindet. Da der Zusammenhang zwischen der Saugspannung und dem Wassergehalt ebenfalls von der Porenstruktur abhängt, können statistische Modelle zur Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand in Zusammenhang mit der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung ge-

setzt werden und sogar von dieser abgeleitet werden. Die von verschiedenen Autoren vorgeschlagenen Modelle unterscheiden sich hauptsächlich im zugrunde liegenden Ansatz für die Beschreibung der Porengeometrie- und -struktur (MUALEM, 1986). Eine Übersicht über verschiedene statistische Modelle gibt MUALEM (1986). Die bekanntesten Ansätze stammen von BURDINE (1953), CHILDS UND COLLIS-GEORGE (1950) sowie von MUALEM (1976).

Mehrere Autoren entwickelten Ansätze unter Betrachtung von einer Anzahl an parallelen Kapillaren, die unterschiedliche Durchmesser, in Strömungsrichtung jedoch gleich bleibende Durchmesser aufweisen. Die Verteilung der Durchmesser entspricht dabei der Porengrößenverteilung des porösen Mediums (siehe [Abb. 4.5](#)).

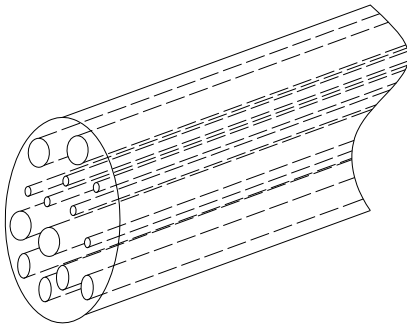


Abb. 4.5: Kapillarmodell mit in Strömungsrichtung gleich bleibenden Durchmessern

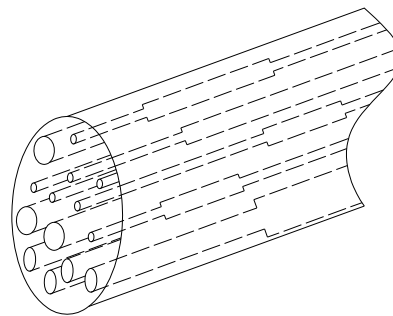


Abb. 4.6: Kapillarmodell mit in Strömungsrichtung veränderlichen Durchmessern

Nach MUALEM (1986) unterscheiden sich die auf diesem Kapillarmodell basierenden mathematischen Modelle voneinander durch unterschiedliche Ansätze zur Berücksichtigung der Tortuosität der Poren. Das bekannteste Modell nach BURDINE (1953) lautet:

$$k_r(\theta) = \Theta^2 \cdot \frac{\int_{\theta=0}^{\theta} \frac{d\theta}{\psi^2}}{\int_{\theta=0}^{\theta_s} \frac{d\theta}{\psi^2}} \quad (4.14)$$

Dabei bezeichnet $k_r(\theta)$ die relative hydraulische Leitfähigkeit. Diese erhält man, indem man die vom Wassergehalt abhängige hydraulische Leitfähigkeit $k(\theta)$ auf die Durchlässigkeit im gesättigten Zustand k_s bezieht. Θ stellt den normierten volumetrischen Wassergehalt entsprechend Gleichung (4.6) dar.

Kombiniert man diese Gleichung mit dem Ansatz nach BROOKS UND COREY (1964) bzw. VAN GENUCHTEN (1980) zur Beschreibung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung (Gleichung (4.7) bzw. (4.8)) erhält man die in [Tab. 4.2](#) dargestellten geschlossenen Lösungen zur Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand in Abhängigkeit vom volumetrischen Wassergehalt bzw. von der Saugspannung.

Brooks und Corey – Burdine:	
$k_r(\theta) = \Theta^{(3+2\lambda)/\lambda}$	(4.15)
$k_r(\psi) = \begin{cases} 1 & \text{für } \psi < \psi_b \\ \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^{-2-3\lambda} & \text{für } \psi \geq \psi_b \end{cases}$	(4.16)
Van Genuchten – Burdine:	
$k_r(\theta) = \Theta^2 \cdot \left[\Theta^{1/m} \right]^m$	(4.17)
$k_r(\psi) = \frac{1 - (\alpha \cdot \psi)^{n-2} \left[1 + (\alpha \cdot \psi)^n \right]^{-m}}{\left[1 + (\alpha \cdot \psi)^n \right]^{2m}}$	(4.18)

Tab. 4.2: Geschlossene Lösungen zur Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand mit Hilfe des Ansatzes nach BURDINE (1953)

Dem Ansatz von CHILDS UND COLLIS-GEORGE (1950) liegt ein Kapillarmodell zugrunde, das aus einer Anzahl an parallelen Kapillaren besteht, die unterschiedliche und in Strömungsrichtung veränderliche Durchmesser aufweisen (siehe Abb. 4.6). Zur Vereinfachung des Modells gingen sie davon aus, dass der Strömungswiderstand in einer Kapillare nur aus dem Porenabschnitt mit dem kleinsten Durchmesser resultiert. Der Ansatz von *Childs&Collis-George* wurde von mehreren Forschern weiterentwickelt. MUALEM (1976) stellte einen gegenüber dem Ansatz nach *Childs&Collis-George* modifizierten Ansatz vor, bei welchem der Einfluss der größeren Poren auf den Strömungswiderstand berücksichtigt wird:

$$k_r(\theta) = \Theta^\tau \left[\frac{\int_0^\theta \frac{d\theta}{\psi}}{\int_0^{\theta_s} \frac{d\theta}{\psi}} \right]^2 \quad (4.19)$$

MUALEM (1976) verglich seinen Ansatz mit 45 unterschiedlichen Böden, an denen die Beziehungen zwischen der Saugspannung und dem Wassergehalt sowie zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit und dem Wassergehalt experimentell bestimmt wurden. Die beste Anpassung an die gemessenen Werte erhielt er mit dem Tortuositätsfaktor $\tau = 0,5$.

Verknüpft man die Gleichung von MUALEM (1976) mit dem Ansatz nach BROOKS UND COREY (1964) bzw. VAN GENUCHTEN (1980) zur Beschreibung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung (Gleichung (4.7) bzw. (4.8)) erhält man die in Tab. 4.3 dargestellten geschlossenen Lösungen zur Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand in Abhängigkeit vom volumetrischen Wassergehalt bzw. von der Saugspannung. Der Tortuositätsfaktor wurde dabei zu $\tau = 0,5$ angenommen; Θ und m sind entsprechend den Gleichungen (4.6) und (4.9) definiert.

Brooks und Corey – Mualem:	
$k_r(\theta) = \Theta^{5/2+2/\lambda}$	(4.20)
$k_r(\psi) = \begin{cases} 1 & \text{für } \psi < \psi_b \\ \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^{-2-5\lambda/2} & \text{für } \psi \geq \psi_b \end{cases}$	(4.21)
Van Genuchten – Mualem:	
$k_r(\theta) = \Theta^{0.5} \cdot \left[1 - \left(1 - \Theta^{1/m} \right)^m \right]^2$	(4.22)
$k_r(\psi) = \frac{k(\psi)}{k_s} \cdot \frac{\left[1 - (\alpha \cdot \psi)^{n-1} \cdot \left[1 + (\alpha \cdot \psi)^n \right]^m \right]^2}{\left[1 + (\alpha \cdot \psi)^n \right]^{m/2}}$	(4.23)

Tab. 4.3: Geschlossene Lösungen zur Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand mit Hilfe des Ansatzes nach MUALEM (1976)

FREDLUND ET AL. (1994) modifizierten den Ansatz von *Childs&Collis-George* unter Berücksichtigung des Modells von FREDLUND UND XING (1994) zur Beschreibung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung (Gleichung (4.9)) und haben damit folgende geschlossene Lösung zur Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand erhalten:

$$k_r(\theta) = \Theta^q \cdot \frac{\int_{\ln \psi}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \cdot \theta' \cdot (e^y) dy}{\int_{\ln \psi_b}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \cdot \theta' \cdot (e^y) dy} \quad (4.24)$$

Darin stellt Θ^q einen Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Porentortuosität dar, wobei Θ als normierter Wassergehalt gemäß Gleichung (4.6) definiert ist und der Exponent q in der Regel zu 1 angenommen werden kann. Desweiteren beinhaltet die Gleichung (4.24) die Integrationsvariable $y = \ln(\psi)$, den Parameter $b = \ln(10^6)$, den Lufteintrittspunkt ψ_b sowie θ' als Ableitung der Gleichung (4.9) nach der Saugspannung. Der Vorteil des Ansatzes von *Fredlund et al.* gegenüber anderen statistischen Modellen liegt darin, dass die Angabe eines residualen volumetrischen Wassergehaltes zur Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand nicht erforderlich ist, da dieser zu Null angenommen wird. Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Gleichung nach *Fredlund et al.* ist allerdings, dass die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung zutreffend beschrieben wird.

4.1.5 Mathematische Beschreibung der Wasserbewegung

Nach DARCY (1856) besteht in einem gesättigten Boden über einen weiten Gradientenbereich ein linearer Zusammenhang zwischen der durchströmenden Wassermenge und dem hydraulischen Gradienten, was durch den stoffspezifischen Durchlässigkeitsbeiwert k ausgedrückt werden kann. Im eindimensionalen Fall lässt sich das Gesetz von Darcy folgendermaßen darstellen:

$$k = \frac{Q}{A} \cdot \frac{d}{\Delta H} \quad (4.25)$$

Dabei ist d die Dicke des Bodens und ΔH die Differenz des hydraulischen Potentials zwischen einströmender und ausströmender Seite. Mit der Filtergeschwindigkeit v als Quotient aus der durchströmenden Wassermenge Q und der durchströmten Fläche A wird aus Gleichung (4.25):

$$k = v \cdot \frac{d}{\Delta H} \quad (4.26)$$

Mit Einführung des hydraulischen Gradienten $i = d/\Delta H$ ergibt sich:

$$k = \frac{v}{i} \quad (4.27)$$

In einem homogenen, isotropen Boden lautet das Gesetz von Darcy allgemein:

$$v = -k \cdot \text{grad}(H) \quad (4.28)$$

BUCKINGHAM (1907) erweiterte das Gesetz von Darcy auf Wasserströmungen in ungesättigten Böden. Dabei ist zu beachten, dass im ungesättigten Zustand nicht alle Poren mit Wasser gefüllt sind und sich der Sättigungsgrad im Boden bei Wasserbewegungen verändert und dementsprechend keine stationären Strömungsverhältnisse vorliegen. Bei niedrigen Sättigungsgraden wird die Wasserbewegung im Boden durch die darin befindliche Luft behindert. Mit zunehmendem Sättigungsgrad nimmt der Luftanteil ab und damit die Wasserleitfähigkeit zu. Das bedeutet, dass der Durchlässigkeitsbeiwert k vom Sättigungsgrad bzw. volumetrischen Wassergehalt des Bodens abhängig ist. Zusätzlich zum Durchlässigkeitsbeiwert wird im ungesättigten Zustand auch der hydraulische Gradient vom Sättigungsgrad beeinflusst, da im Falle von nicht vollständig gefüllten Poren Saugspannungen infolge von Kapillar- und Adsorptionskräften entstehen. Diese werden als Matrixpotential im Gesamtpotential H berücksichtigt. Nach BUCKINGHAM (1907) lässt sich die Filtergeschwindigkeit damit folgendermaßen ausdrücken:

$$v = -k(\theta) \cdot \text{grad}(H) \quad (4.29)$$

Dabei stellt $k(\theta)$ die vom volumetrischen Wassergehalt abhängige hydraulische Leitfähigkeit dar.

Prinzipiell muss bei einer Wasserbewegung im Boden die Erhaltung der Masse, ausgedrückt durch die Kontinuitätsbedingung gelten. Diese lässt sich anhand des in [Abb. 4.7](#) dargestellten Volumenelementes mit den daran auftretenden Filtergeschwindigkeiten ableiten.

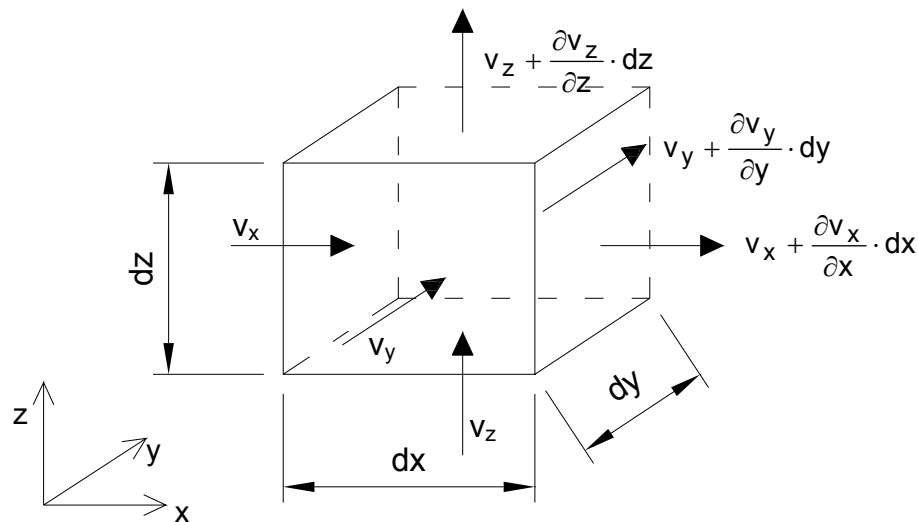


Abb. 4.7: Volumenelement mit Filtergeschwindigkeiten

Für den stationären Zustand, in dem die einströmende Wassermenge gleich der ausströmenden Wassermenge ist, kann geschrieben werden:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (4.30)$$

Dabei bezeichnen v_x , v_y und v_z die Filtergeschwindigkeiten in x-, y- und z-Richtung. Im instationären Zustand entspricht die Summe aus einströmender und ausströmender Wassermenge der zeitabhängigen Änderung des volumetrischen Wassergehaltes θ und die Gleichung (4.30) nimmt folgende Form an:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.31)$$

Durch Kombination des Fließgesetzes nach *Darcy-Buckingham* (Gleichung (4.29)) mit der Kontinuitätsbedingung (Gleichung (4.31)) erhält man nach einigen Umformungen die Gleichung nach RICHARDS (1931) für ein homogenes isotropes poröses Medium:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k(\theta) \cdot \frac{\partial H_m}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k(\theta) \cdot \frac{\partial H_m}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \cdot \left(\frac{\partial H_m}{\partial z} + 1 \right) \right] = C(H_m) \frac{\partial H_m}{\partial t} \quad (4.32)$$

$$\text{mit } C(H_m) = \frac{\partial \theta}{\partial H_m} \quad (4.33)$$

$C(H_m)$ wird als Kapillarkapazität bezeichnet und lässt sich aus der Beziehung zwischen dem Matrixpotential und dem volumetrischen Wassergehalt (Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung) ermitteln.

Bei der Richards-Gleichung handelt es sich um eine nicht-lineare partielle Differentialgleichung, die in der Regel nur mit numerischen Verfahren gelöst werden kann. Zur Lösung der Differentialgleichung ist eine mathematische Beschreibung der Zusammenhänge zwischen dem Matrixpotential bzw. der Matrixspannung und dem volumetrischen Wassergehalt sowie der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand und dem volumetrischen Wassergehalt erforderlich.

Die Richards-Gleichung trifft dabei folgende Annahmen:

- Es liegen laminare Strömungsverhältnisse vor.
- In der Luftphase des Bodens herrscht ein Druck entsprechend dem atmosphärischen Luftdruck.
- Die Bodenstruktur ist starr. Das bedeutet, dass der Porenanteil konstant bleibt und Volumenänderungen infolge von Quell- oder Schrumpfvorgängen nicht berücksichtigt werden.

Durch Einführung des isothermischen Diffusionskoeffizienten

$$D_{\theta}(\theta) = k(\theta) \cdot \frac{\partial H_m}{\partial \theta} \quad (4.34)$$

lässt sich die Richards-Gleichung (4.32) folgendermaßen umformulieren:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[D_{\theta}(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{\theta}(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{\theta}(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.35)$$

Die Gleichung (4.35) entspricht der Form nach den Ansätzen für eine nicht-stationäre Diffusion (2. Fick'sches Gesetz) und ist in der Bodenphysik weit verbreitet. Bei der Verwendung der Gleichung ist allerdings zu beachten, dass die Diffusivität vom Wassergehalt des Bodens abhängt und im gesättigten Bereich nicht mehr definiert ist. Deshalb ist sie zur Beschreibung der Wasserbewegung in teilweise gesättigten und teilweise ungesättigten Bodenbereichen nicht geeignet (DURNER, 1991).

4.2 Wasserbewegung infolge von Temperaturgradienten

Wie eingangs beschrieben führen Temperaturgradienten im ungesättigten Boden zu einem diffusiven Wasserdampftransport. Die Wasserbewegung infolge von Feuchte- und Temperaturgradienten lässt sich nach PHILIP UND DE VRIES (1957) für den dreidimensionalen Fall durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$D_T(\theta) \cdot \text{grad}(T) + D_{\theta}(\theta) \cdot \text{grad}(\theta) + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.36)$$

Dabei stellen D_T den thermischen Diffusionskoeffizienten und D_{θ} den isothermischen Diffusionskoeffizienten dar. Beide stehen in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Bodens. Für den isothermischen Fall lässt sich die Gleichung (4.36) in die Richards-Gleichung (4.35) überführen.

Bei Erdbauwerken ist eine Wasserbewegung infolge von thermischen Gradienten im Bereich der Bodenoberfläche zu beachten, da es dort infolge der Sonneneinstrahlung zu nennenswerten Temperatur- und Feuchtegradienten kommen kann. Im Boden dagegen nimmt der Einfluss von Temperaturgradienten mit zunehmender Tiefe deutlich ab.

4.3 Methoden zur Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung

Zur Beschreibung der Wasserbewegung unter isothermischen Bedingungen ist die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Saugspannung und dem Wassergehalt sowie zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand und dem Wassergehalt (bzw. der Saugspannung) erforderlich. Da der Zusammenhang zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand und dem Wassergehalt versuchs-technisch sehr schwierig zu ermitteln ist und daher unter Anwendung von Kapillarmodellen meist aus Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen abgeschätzt wird, kommt den Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen eine zentrale Rolle bei der Modellierung von Strömungsvorgängen zu.

4.3.1 Pedotransferfunktionen (PTF)

Da die experimentelle Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung aus Laborversuchen zeitintensiv ist, wurden so genannte Pedotransferfunktionen (PTF) entwickelt. Diese ermöglichen es, die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung aus bekannten, einfach zu bestimmenden Bodenkenngrößen abzuleiten. Die meisten Pedotransferfunktionen stammen aus dem Bereich der Bodenkunde und erfordern als Eingangsgrößen Informationen zur Bodenart, zur Korngrößenverteilung und zum Porenanteil.

Nach TIETJE UND HENNINGS (1993) lassen sich die Verfahren zur Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung in drei Gruppen unterteilen, die Punktregressions-Methode, die Parameterregression und der physikalisch-empirische Ansatz.

Bei der Punktregressions-Methode werden für festgelegte Saugspannungen anhand einer meist linearen Regression einzelne Wassergehalte bestimmt. Dagegen werden bei der Parameterregression die Parameter einer Funktion zur Beschreibung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung, z. B. nach *van Genuchten*, ermittelt. Physikalisch-empirische Modelle basieren auf einem Kapillarmodell, wonach die Poren im Boden als Bündel von Kapillarrohren mit unterschiedlichen Porendurchmessern angenommen werden. Unter Berücksichtigung der sich in einem Kapillarrohr einstellenden Steighöhe des Wassers lässt sich damit die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung aus der Porengrößenverteilung des Bodens ermitteln. Die Bestimmung der Porengrößenverteilung erfolgt dabei auf Basis der Korngrößenverteilung (KGV) unter Berücksichtigung der Dichte des Bodens. Weitere Einflussfaktoren wie z. B. der Anteil an organischem Material bleiben dabei unberücksichtigt.

In der Literatur findet sich eine Vielzahl an PTF, deren Vorstellung im Einzelnen im Rahmen dieser Arbeit nicht sinnvoll ist. Einen guten Überblick und Vergleich verschiedener PTF geben TIETJE UND HENNINGS (1993). In der Tab. 4.4 sind die Eigenschaften einiger gebräuchlicher PTF, die auch im Rahmen der Arbeit Anwendung finden, dargestellt.

Autoren	Prinzip	Eingangsdaten	Anmerkungen
Gubta und Larson (1979)	Punktregression: 12 Regressionsgleichungen zur Bestimmung von 12 Saugspannungen	Tonanteil (< 2 μm) Schluffanteil (50 – 2 μm) Sandanteil (50 – 2000 μm) Trockendichte organische Substanz	Ermittelt an 43 aufbereiteten Proben
Arya und Paris (1981)	Physikalisch-empirischer Ansatz: Unterteilung der KGV in einzelne Fraktionen und Ermittlung des Porenvolumens der einzelnen Fraktionen	KGV Trockendichte Korndichte	Organische Substanz bleibt unberücksichtigt
Rawls et al. (1982)	Punktregression: 3 Methoden mit jeweils 12 Regressionsgleichungen zur Bestimmung von 12 Saugspannungen	Methode a) Tonanteil (< 2 μm) Schluffanteil (2 – 50 μm) Sandanteil (50 – 2000 μm) Trockendichte organische Substanz Methode b) zus. zu a) Messwert $\theta_{33 \text{ kPa}}$ Methode c) zus. zu a) Messwerte $\theta_{33 \text{ kPa}}$, $\theta_{1500 \text{ kPa}}$	Methode basiert auf Gupta und Larson (1979), durch Berücksichtigung von einzelnen Messwerten Verbesserung der Korrelation
Vereecken et al. (1989)	Parameterregression: 4 Gleichungen zur Bestimmung der van Genuchten Parameter θ_s , θ_r , α und n , Ansatz von $m = 1$	Tonanteil (< 2 μm) Sandanteil (50 – 2000 μm) Trockendichte organische Substanz	Ermittelt auf Grundlage von 40 Bodenprofilen
Scheinost et al. (1997)	Parameterregression: 4 Gleichungen zur Bestimmung der van Genuchten Parameter θ_s , θ_r , α und n , Ansatz von $m = 1$	Tonanteil (< 2 μm) Porenanteil organische Substanz geom. Mittelwert der KGV Standardabweichung der KGV	Ermittelt auf Grundlage von 471 ungestörten Bodenproben aus einem 1,5 km^2 großen Gebiet nördlich von München
Tinjum et al. (1997,1999)	Parameterregression: 2 Gleichungen zur Bestimmung der van Genuchten Parameter α und n Ansatz von $\theta_r = 0$, $\theta_s = \text{Porenanteil}$ $m = 1-1/n$	Plastizitätszahl Einbauwassergehalt Proctorwassergehalt Verdichtungsenergie (Standard-Proctor oder mod. Proctor) Porenanteil	Ermittelt auf Grundlage von experimentellen Untersuchungen an 4 verdichteten Tonen

Tab. 4.4: Eigenschaften verschiedener Pedotransferfunktionen (nach TIETJE UND HENNINGS (1993) und ergänzt)

Bei der Anwendung von Pedotransferfunktionen für verdichtete feinkörnige Böden ist zu beachten, dass deren Poren- und Aggregatstruktur neben der Einbaudichte wesentlich vom Einbauwassergehalt abhängen. Abgesehen von der Parameterregression nach TINJUM ET AL. (1997, 1999) wird dies jedoch von keiner der in Tab. 4.4 aufgeführten PTF berücksichtigt. Auch der Ansatz nach ARYA UND PARIS (1981), der im Vergleich zu den übrigen PTF vergleichsweise detaillierte Informationen zur Korngrößenverteilung des Bodens erfordert, geht auf diesen Aspekt nicht ein. Dies beruht darauf,

dass die meisten Funktionen im Zusammenhang mit forst- und landwirtschaftlichen Fragestellungen entwickelt wurden und dabei in der Regel für natürlich abgelagerte Böden Aussagen zur Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung zu treffen sind.

Einziger Ansatz nach TINJUM ET AL. (1997, 1999) wurde vor dem Hintergrund des Einsatzes von feinkörnigen Böden für Deponieoberflächenabdichtungen entwickelt und geht auf den Einbauwassergehalt bei verdichteten feinkörnigen Böden ein.

In Abschnitt 6.7.6 werden die in Tab. 4.4 aufgeführten PTF auf drei Böden angewandt, für die bei unterschiedlichen Einbauzuständen die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung experimentell ermittelt wurde. Durch einen Vergleich der gemessenen mit den auf Basis der PTF abgeschätzten Werten wird die Eignung der einzelnen PTF für verdichtete feinkörnige Böden untersucht.

4.3.2 Experimentelle Methoden

Im Hinblick auf die experimentelle Ermittlung von Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen ist zu beachten, dass sich in feinkörnigen Böden bei geringen Wassergehalten sehr hohe Saugspannungen einstellen können. Um den gesamten Saugspannungsbereich abzudecken, sind deshalb in der Regel mehrere Messmethoden erforderlich. Die vorhandenen Methoden unterscheiden sich sowohl hinsichtlich des Messbereiches als auch hinsichtlich des hydraulischen Potentials, das erfasst wird. So stehen prinzipiell verschiedene Methoden zur Ermittlung der Matrixspannung (Kapillarspannungen), der osmotischen Saugspannung und der totalen Saugspannung als Summe aus Matrixspannung und osmotischer Saugspannung zur Verfügung. Der osmotische Anteil wird in der Regel als konstanter Wert unabhängig vom Wassergehalt angenommen. Damit lässt er sich auch als Differenz zwischen totalen Saugspannungen und Matrixspannungen ableiten. Übliche Methoden zur Ermittlung von Matrixspannungen und totalen Saugspannungen sind in der Tab. 4.5 angegeben. Zur Messung von Matrixspannungen werden häufig Tensiometer verwendet. Diese ermöglichen es, Matrixspannungen direkt zu messen. Allerdings beschränkt sich der Messbereich herkömmlicher Tensiometer auf etwa 85 kPa aufgrund der Kavitation des Wassers im Tensiometer. Spezial-Tensiometer mit einem höheren Messbereich von bis zu 1000 kPa wurden von RIDLEY UND BURLAND (1993) entwickelt, sind aber kommerziell bis dato nicht verfügbar.

Da die Saugspannungen in feinkörnigen Böden allerdings bereits bei hohen Sättigungsgraden über 85 kPa liegen können, ist die Anwendung von herkömmlichen Tensiometern bei feinkörnigen Böden nicht zielführend. Stattdessen wird häufig die Achsen-Translations-Technik angewendet. Diese wurde erstmalig von HILF (1956) beschrieben, der anhand von experimentellen Untersuchungen zeigen konnte, dass die Matrixspannung im Boden der Differenz zwischen dem Luftdruck und dem Wasserdruck entspricht und sich folglich beim Anheben des Luftdruckes der Wasserdruck in der Probe in gleicher Weise ändert. Das bedeutet, dass die Matrixspannungen in der Probe gleich sind, unabhängig davon, bei welchem Luftdruck sie gemessen werden. Die Achsen-Translations-Technik macht sich diese Eigenschaften zunutze, indem der Luftdruck gegenüber dem atmosphärischen Luftdruck angehoben wird. Damit wird der Porenwasserdruck in der Probe in gleicher Weise erhöht und die Gefahr der Kavitation, die bei herkömmlichen Tensiometern bei ca. 85 kPa bis 100 kPa auftritt, reduziert. Die Matrixspannung in der Probe kann entweder durch Messung des Wasserdruckes bestimmt werden oder als Differenz der Luft- und Wasserdrücke in der Probe vorgegeben werden. Dabei ist jeweils ein geeignetes Medium zur Trennung der Luft- von der Wasserphase

erforderlich. In der Regel kommen poröse Keramiken zum Einsatz, die in Abhängigkeit von ihren Poreneigenschaften im wassergesättigten Zustand bei Druckdifferenzen zwischen der Luft- und Wasserphase von bis zu 1500 kPa gegenüber einer Luftströmung undurchlässig sind. Jedoch kann Luft infolge der unterschiedlichen Luftdrücke durch die Keramik diffundieren, so dass es zur Entstehung von Luftblasen unterhalb der Keramik kommt.

Methode	Saugspannungskomponente	Messbereich	Bemerkung
Tensiometer	Matrixspannung	0 – 90 kPa	Direktes Verfahren, Messung des Porenwasserdruckes gegenüber dem atmosphärischen Luftdruck
Achsen-Translations-Technik	Matrixspannung	0 – 1500 kPa	Direktes Verfahren, maximale Differenz zwischen Luft- und Wasserdruck hängt vom Lufteintrittspunkt der porösen Keramik ab
Elektrische und thermische Leitfähigkeitssensoren	Matrixspannungen	0 – 400 kPa	Indirekte Messmethode, z.B. Gipsblock-sensor
Filterpapier	Matrixspannungen	Gesamter Messbereich	Indirekte Messmethode, Filterpapier im Kontakt mit dem Boden
	Totale Saugspannungen	1 – 500 MPa	Indirekte Messmethode, Filterpapier nicht im Kontakt mit dem Boden
Thermoelement-Psychrometer	Totale Saugspannungen	100 – 8000 kPa	Direkte Messmethode auf Basis der Kelvin-Gleichung
Feuchtigkeitsmessgerät nach der Taupunktmethode	Totale Saugspannungen	1 – 60 MPa	Direkte Messmethode auf Basis der Kelvin-Gleichung
Kapazitive Feuchtesensoren	Totale Saugspannungen	Gesamter Messbereich	Direkte Messmethode auf Basis der Kelvin-Gleichung, im Saugspannungsbereich zwischen 0 und 1 MPa ungenau

Tab. 4.5: Methoden zur Messung von Saugspannungen (nach LU UND LIKOS (2004) und ergänzt)

Auf dem Prinzip der Achsen-Translations-Technik beruht eine ganze Reihe von Versuchsgäräten zur Ermittlung von Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen. Ein in der Bodenkunde häufig verwendetes und in der DIN 11274 beschriebenes Gerät stellt der Druckplattenextraktor dar. Dabei werden die Proben auf eine keramische Platte aufgelegt, die sich in einem Stahltopf befindet (siehe [Abb. 4.8](#)). Nach Schließen des sogenannten Drucktopfes kann der Luftdruck im Topf über einen Präzisionsregler angehoben werden. Der über die poröse Keramik an der Unterseite der Proben anliegende Wasserdruck bleibt dabei konstant, entsprechend dem atmosphärischen Luftdruck zuzüglich des Wasserdruckes aus einem angeschlossenen Standrohr. Die poröse Keramik wird vor Versuchsbeginn gesättigt und kann infolge von Kapillarkräften eine Luftströmung unterbinden. Infolge der Erhöhung des Luftdruckes kommt es zu einer Wasserabgabe der Proben. Zur Ermittlung des Wassergehaltes werden die Proben jeweils nach Erreichen eines Gleichgewichtszustandes unter einer Druckstufe aus dem Druckplattenextraktor entnommen und gewogen. Zur vollständigen Erfassung einer Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung sind zwischen fünf und sieben Druckstufen erforderlich, so dass die Proben dementsprechend oft aus dem Druckplattenextraktor entnommen und wieder eingesetzt werden müssen. Dabei kann es zu einer Störung der Bodenproben bzw. zu einem Verlust an Probenmaterial kommen, was zu Ungenauigkeiten bei der Auswertung führen kann. Bei der Anwendung des Druckplattenextraktors für feinkörnige Böden ist außerdem zu beachten, dass die Proben frei quellen und schrumpfen können und Veränderungen der Proben-

höhe nur eingeschränkt mit Hilfe einer Schiebelehre bei der Entnahme der Proben zur Wägung bestimmt werden können.

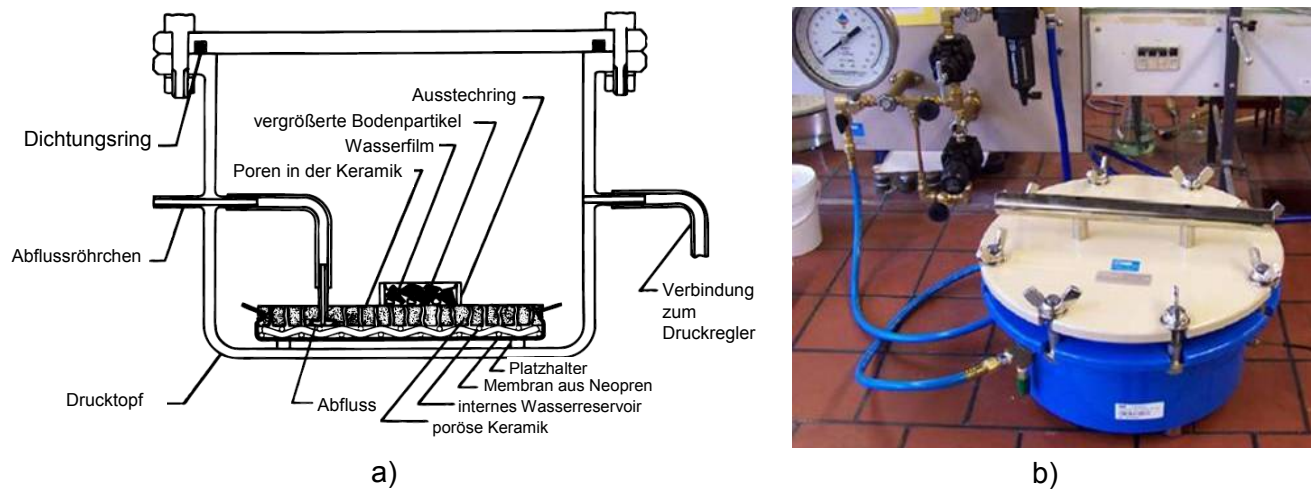


Abb. 4.8: Druckplattenextraktor a) Prinzipdarstellung (entnommen von www.soilmoisture.com und übersetzt) und b) Fotoaufnahme

Um die mit der Entnahme der Proben aus dem Druckplattenextraktor verbundene mögliche Störung der Probestruktur zu vermeiden, wurden sogenannten Tempe-Zellen entwickelt. Dabei befindet sich im Gegensatz zum Druckplattenextraktor, in dem mehrere Proben gleichzeitig untersucht werden können, jeweils nur eine Probe in einer Zelle, so dass der Wassergehalt der Probe unter der jeweiligen Druckstufe direkt aus der abgegebenen Wassermenge ermittelt werden kann. Wie auch beim Druckplattenextraktor lassen sich damit prinzipiell nur Entwässerungskurven bestimmen, da die Wasseraufnahme über die poröse Keramik infolge von Luftblasen unterhalb der Keramik eingeschränkt sein kann.

Zur Untersuchung des mechanischen Verhaltens ungesättigter Böden wurde das Prinzip der Achsen-Translations-Technik auf Oedometerzellen übertragen. Damit können prinzipiell Volumenänderungen und Wassergehaltsänderungen infolge von Matrixspannungen und Auflastspannungen untersucht werden. Schwierigkeiten können bei hohen Sättigungsgraden auftreten, wenn in der Probe keine kontinuierliche Luftphase mehr vorliegt. In diesem Fall kann es bei einer Erhöhung des Luftdrucks zur Entstehung von Porenwasserüberdrücken kommen, was einen Konsolidationsprozess nach sich zieht. Empfindlich dafür sind besonders weiche, verformbare Proben. Diesem kann prinzipiell damit begegnet werden, dass bei hohen Sättigungsgraden statt einem Anheben des Luftdrucks der Wasserdruck reduziert wird. Eine Veränderung des Wasserdruckes im Zuge des Versuches kann jedoch Probleme nach sich ziehen, wenn die Wasserleitungen nicht vollständig entlüftet sind, da die Änderung des Wasserdruckes in diesem Fall eine Änderung des Wasservolumens bewirkt. Da der Wassergehalt der Proben dabei wie bei Tempe-Zellen über die abgegebene bzw. aufgenommene Wassermenge bestimmt wird, kann dies Fehler bei der Bestimmung des Wassergehaltes der Proben nach sich ziehen. Im Vergleich zum Druckplattenextraktor oder Tempe-Zellen kann die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung mit Hilfe von Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen unter definierten Auflastspannungen ermittelt werden. Für die Versuchsdurchführung bedeutet dies, dass die im Feld zu erwartende Vertikalspannung im Versuch als konstante Auflastspannung aufgebracht werden kann. Im Detail wird auf die Vorgehensweise zur Bestim-

mung der Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehung mit Hilfe von Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen in Abschnitt 6 eingegangen.

Neben diesen direkten Messmethoden existieren einige sogenannte indirekte Methoden zur Ermittlung der Matrixspannung. Dabei wird der zu untersuchende Boden mit einem porösen Medium in Kontakt gebracht, so dass sich ein Gleichgewicht hinsichtlich des Matrixpotentials im Boden und im porösen Medium einstellen kann. Nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes wird der Wassergehalt des porösen Mediums ermittelt. Dies erfolgt in der Regel über die Messung dessen elektrischer bzw. thermischer Leitfähigkeit. Auf Grundlage einer vorhergehenden Kalibrierung des Sensors können aus der Leitfähigkeitsmessung der Wassergehalt des porösen Mediums und daraus das Matrixpotential bestimmt werden. Der bekannteste Vertreter dieser indirekten Messmethode sind sogenannte Gipsblöcke, die zur Ermittlung des elektrischen Widerstandes mit zwei Elektroden ausgestattet sind. Ein weiterer Vertreter der indirekten Methoden stellt die Filterpapiermethode dar. Zur Messung des Matrixpotentials des Bodens wird dabei ein Filterpapier mit dem Boden in Kontakt gebracht. Nach Erreichen eines Gleichgewichtszustandes wird dessen Wassergehalt bestimmt. Auf Grundlage einer vorhergehenden Kalibrierung lässt sich daraus anschließend das Matrixpotential bestimmen.

Die Filterpapiermethode kann auch zur Messung der totalen Saugspannungen angewendet werden. Dabei werden der zu untersuchende Boden und das Filterpapier in einen Behälter gegeben, wobei sich das Filterpapier und der Boden nicht berühren dürfen. Nach Erreichen eines Gleichgewichtszustandes im luftdicht verschlossenen Behälter wird der Wassergehalt des Filterpapiers und mit Hilfe einer vorhergehenden Kalibrierung die totale Saugspannung bestimmt.

Weitere Vertreter für die indirekte Messung von totalen Saugspannungen sind kapazitive Messverfahren. Dabei wird die Bodenfeuchtigkeit über einen Kunststoff gemessen, der wie das Filterpapier hinsichtlich der totalen Saugspannungen in ein Gleichgewicht mit dem Boden gebracht wird. Zur Messung der Feuchtigkeit wird dabei die Abhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften des Kunststoffes von der herrschenden relativen Luftfeuchtigkeit ausgenutzt. Unter Berücksichtigung der erzielbaren Messgenauigkeit sind derartige Sensoren für die Messung von totalen Saugspannungen im niedrigen Saugspannungsbereich bis 1 MPa aber nicht geeignet.

Direkte Methoden zur Ermittlung der totalen Saugspannungen basieren auf dem thermodynamischen Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit, der Temperatur und der totalen Saugspannung entsprechend der Gleichung nach Kelvin (Gleichung (4.3)). Danach lässt sich die totale Saugspannung durch Messung der relativen Luftfeuchtigkeit über einer Bodenprobe und der Temperatur der Bodenprobe ermitteln. Weit verbreitete Methoden zur Messung der relativen Luftfeuchtigkeit sind Thermoelement-Psychrometer oder Feuchtigkeitsmessgeräte nach der Taupunktmethode. Zur Kontrolle der Luftfeuchtigkeit (englisch: vapour-equilibrium-technique) kommen in der Regel Salzlösungen zum Einsatz. Da die totale Saugspannung bei einer Abnahme der relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % auf 99 % bereits auf 1,4 MPa ansteigt, ist der mit Hilfe von Feuchtigkeitsmessgeräten abdeckbare Messbereich aus Gründen der Messgenauigkeit auf Saugspannungen größer 1,5 MPa beschränkt. Auf die Funktionsweise des Feuchtigkeitsmessgerätes nach der Taupunktmethode wird im Detail in Abschnitt 6 eingegangen.

Eine gute Übersicht über die verschiedenen Messmethoden und deren Funktionsweise geben FREDLUND UND RAHARDJO (1993) sowie LU UND LIKOS (2004).

5 Literaturstudie zu den hydraulischen Eigenschaften verdichteter Tone

5.1 Allgemeines

Wie in Abschnitt 4 dargestellt ist zur Beschreibung der Wasserbewegung in ungesättigten Böden unter isothermischen Bedingungen die Kenntnis der Beziehung zwischen Saugspannung und Wassergehalt sowie zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand und dem Wassergehalt erforderlich. Beide Beziehungen sind jedoch nicht ausschließlich materialspezifisch, sondern sind daneben von der Porenstruktur der Böden abhängig. Bei verdichteten grobkörnigen Böden wird die Struktur im Wesentlichen durch die Dichte des Bodens beeinflusst und ist vom Einbauwassergehalt weitgehend unabhängig. Bei feinkörnigen Böden dagegen nehmen sowohl der Einbauwassergehalt als auch die Einbaudichte maßgeblichen Einfluss auf die Poren- und Aggregatstruktur. Allgemein lässt sich die Struktur eines bindigen Bodens nach MITCHELL UND SOGA (2005) in folgende Größenbereiche unterteilen:

- Microfabric: beinhaltet die Poren innerhalb der Aggregationen einzelner Partikel (im Bereich von 0,001 bis 0,01 mm)
- Minifabric: beinhaltet Aggregationen einzelner Partikel und die Poren zwischen diesen Aggregationen (im Bereich von 0,1 bis 1 mm)
- Macrob fabric: Risse, größere Poren (Millimeter-Bereich und größer)

Für verdichtete feinkörnige Böden kann davon ausgegangen werden, dass im Einbauzustand unmittelbar keine Risse oder größere Poren im Sinne von „Macrob fabric“ vorliegen. Dementsprechend wird die Porenstruktur durch die Größe und Verteilung der Poren innerhalb der Aggregationen (Intraaggregatporen) sowie der Poren zwischen den Aggregationen (Interaggregatporen) bestimmt. Die Größe und Form der Aggregationen und der beiden Porensysteme stehen dabei in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt und der Einbaudichte.

Der Einfluss des Einbauwassergehaltes auf die Bodenstruktur wurde bereits von LAMBE (1954) und SEED UND CHAN (1959) beschrieben. Danach stellen sich bei einem Wassergehalt unterhalb des Proctorwassergehaltes im Hinblick auf ihre Konsistenz relativ feste Aggregate ein, wodurch im Zuge einer Verdichtung ein nennenswerter Anteil an Interaggregatporen zwischen den Aggregaten verbleibt. Bei Wassergehalten oberhalb des Proctorwassergehaltes dagegen verhalten sich die Aggregate deutlich weicher. Infolge einer Verdichtung lassen sie sich verformen und es stellt sich eine vergleichsweise gleichmäßige Struktur mit senkrecht zur Verdichtungsrichtung orientierten Aggregaten ein. Der Anteil an Interaggregatporen ist dabei im Vergleich zu den bei Wassergehalten unterhalb des Proctorwassergehaltes verdichteten Proben deutlich geringer.

Diese qualitative Beschreibung der Bodenstruktur bei unterschiedlichen Einbaubedingungen lässt sich durch die Bestimmung der Porengrößenverteilung mittels Quecksilberporosimetrie belegen. Im Folgenden werden die diesbezüglich durchgeführten Untersuchungen zusammenfassend dargestellt. Anschließend werden die vorliegenden Erkenntnisse zur Auswirkung unterschiedlicher Einbaubedingungen auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung und die Durchlässigkeitseigenschaften verdichteter feinkörniger Böden beschrieben.

5.2 Porengrößenverteilung

Die Methode der Quecksilberporosimetrie zur Bestimmung der Porengrößenverteilung feinkörniger Böden wurde von DIAMOND (1970) ausführlich beschrieben. Anhand von experimentellen Untersuchungen konnte er einen Einfluss unterschiedlicher Einbauwassergehalte auf die Porengrößenverteilung verdichteter Tone belegen. In nachfolgenden Studien zeigte er zusammen mit Sridharan und Altschaeffl (SRIDHARAN ET AL., 1971), dass eine Erhöhung der Einbaudichte nur zu einer Verringerung des Porenraumes zwischen den Aggregaten (Interaggregatporen), nicht aber der Poren innerhalb der Aggregate (Intraaggregatporen) führt. Der Einfluss unterschiedlicher Einbauwassergehalte konnte allerdings in beiden Studien nur bedingt analysiert werden, da die untersuchten Proben zur Durchführung der Quecksilberporosimetrie jeweils vorab im Ofen getrocknet wurden und dadurch die nahe der Sättigungslinie verdichteten Proben zum Teil erhebliche Schrumpfverformungen erlitten hatten.

AHMED ET AL. (1974) zeigten, dass die Dichteänderung infolge von Schrumpfvorgängen bei Anwendung der Gefriertrocknung weitgehend unterbunden werden kann. In der Folge hat sich dieses Verfahren zur Trocknung feuchter Proben etabliert, wenn die Struktur der Proben durch den Trocknungsvorgang möglichst unbeeinflusst bleiben soll.

Neuere Untersuchungen zum Einfluss des Einbauwassergehaltes auf die Porenstruktur eines mittelplastischen Tones wurden von DELAGE ET AL. (1996) durchgeführt. Sie belegen, dass sich bei einer Verdichtung bei Wassergehalten unterhalb des Proctorwassergehaltes bimodale Porenstrukturen bestehend aus Interaggregatporen und Intraaggregatporen einstellen, wohingehend bei Wassergehalten oberhalb des Verdichtungsoptimums eine derartige Unterscheidung in Inter- und Intraaggregatporen nicht mehr möglich ist. Diese Ergebnisse wurden durch Untersuchungen von ROMERO ET AL. (1999) an einem ausgeprägt plastischen Ton (Boom-clay) bestätigt.

Anhand ihrer Untersuchungen stellen ROMERO ET AL. (1999) außerdem den Einfluss unterschiedlicher Einbaudichten auf die Porengrößenverteilung dar. Wie dies auch später von SIVAKUMAR ET AL. (2006) und THOM ET AL. (2007) anhand von Untersuchungen an einem Kaolin-Ton und von LI UND ZHANG (2008) anhand von Untersuchungen an einem mittelplastischen Ton beschrieben wird, führt eine Zunahme der Einbaudichte bei Einbauwassergehalten unterhalb des Proctorwassergehaltes nur zu einer Reduzierung der Interaggregatporen; die Intraaggregatporen dagegen bleiben vom Verdichtungsprozess weitgehend unbeeinflusst.

5.3 Zusammenhang zwischen Saugspannung und Wassergehalt

In der Literatur findet sich eine Reihe an wissenschaftlichen Untersuchungen zum hydraulischen Verhalten feinkörniger Böden, die im Wesentlichen vor dem Hintergrund der Eignung von Tonen als technische Barriere für Oberflächenabdichtungen von Deponien und für Lagerstätten radioaktiver Abfälle durchgeführt wurden. Im Zentrum der Untersuchungen stehen dabei in der Regel die Saugspannungs- und Durchlässigkeitseigenschaften verdichteter Tone. In Abhängigkeit von der Fragestellung wurde sehr vereinzelt auch die Kopplung des hydraulischen und mechanischen Verhaltens berücksichtigt.

Eine der ersten Untersuchungen, welche sich mit der Strukturabhängigkeit von Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen beschäftigt, wurde durch CRONEY UND COLEMAN (1954) durchgeführt. Sie zeigten an einem ausgeprägt plastischen Ton, dass in Abhängigkeit von seiner Struktur unterschiedliche Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen auftreten. Für ihre Untersuchungen verwendeten sie dabei Proben, die für Plastizitätsuntersuchungen bei unterschiedlichen Wassergehalten aufbereitet worden waren, und verglichen diese mit ungestörten Proben. Unabhängig von ihrer Aufbereitungsart wiesen die aufbereiteten Proben bei sehr geringen Wassergehalten ähnliche Saugspannungen auf, während bei hohen Wassergehalten deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Aufbereitungsart festgestellt wurden. Außerdem zeigten die untersuchten Böden generell ein hysteretisches Verhalten zwischen Be- und Entwässerungsvorgängen.

TINJUM ET AL. (1997) ermittelten an vier unterschiedlichen, gemäß DIN 18196 leicht bis ausgeprägt plastischen feinkörnigen Böden Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen (Entwässerung) in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt und der Einbaudichte. Ihre Untersuchungen führten sie dabei an Bodenproben durch, die bei Wassergehalten unterhalb, oberhalb und nahe dem Proctorwassergehalt verdichtet worden waren. Ihre Ergebnisse zeigen mit zunehmendem Einbauwassergehalt eine Zunahme des Lufteintrittspunktes sowie eine stärkere Saugspannungszunahme bei abnehmenden Wassergehalten. Die Zunahme der Einbaudichte hat sich in ihren Untersuchungen nur in einer Erhöhung des Lufteintrittspunktes bemerkbar gemacht. Mit zunehmenden Plastizitätszahlen wurden ebenso zunehmende Lufteintrittspunkte festgestellt. Auf Grundlage ihrer Ergebnisse und unter Anwendung der Parametrisierung nach *van Genuchten* stellen die Autoren zwei empirische Gleichungen zur Abschätzung der *van Genuchten*-Parameter in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt, der Plastizitätszahl und der Verdichtungsart auf. Unklar bleiben bei ihren Untersuchungen allerdings mögliche Volumenänderungen der Proben, da nach der Aufsättigungsphase unter einer Auflastspannung von 14 kPa im verwendeten Druckplattenextraktor weder Volumenänderungen infolge von Schrumpf- oder Quellvorgängen beobachtet noch nennenswerte Auflastspannungen aufgebracht werden konnten. Dabei ist zu beachten, dass die untersuchten Tone bei einem Mineralanteil quellfähiger Smektite von 9 % bis 44 % zum Teil erhebliche Quellverformungen erwarten lassen.

VANAPALLI ET AL. (1999) untersuchten an einem gemäß USC-System leicht plastischen Ton (mittelplastisch gemäß DIN 18196) den Einfluss unterschiedlicher Einbaubedingungen (Einbaudichte und Einbauwassergehalt) und unterschiedlicher Spannungsvorgeschichten auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung. Die Einbaubedingungen wurden dabei auf Grundlage eines Proctorversuches gewählt. Nach Herstellung der Probekörper bei den festgelegten Einbaubedingungen wurden diese zunächst unter Konstanthaltung des Volumens aufgesättigt, bevor anschließend die Spannungsvorgeschichte durch Aufbringen einer Auflastspannung im Oedometer erzeugt wurde. Zusätzlich zum Kompressionsverhalten wurde durch eine nachfolgende fast vollständige Entlastung das Quellverhalten der einzelnen Proben untersucht. Die dabei gemessenen, verhältnismäßig geringen Hebungen zeigen eine sehr geringe Quellfähigkeit des untersuchten Bodens. Aus diesem Grunde konnten die Autoren die Proben anschließend in herkömmlichen Druckplattenextraktoren ohne Aufbringen einer Auflast untersuchen, ohne dass nennenswerte Quellverformungen zu erwarten waren. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einbauwassergehalt einen wesentlichen Einfluss auf die Struktur des künstlich verdichteten Bodens und damit auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung ausübt. Darüber hinaus stellten die Autoren fest, dass die Spannungsvorgeschichte

insbesondere bei auf der trockenen Seite des Proctoroptimums verdichteten Proben einen nennenswerten Einfluss auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung hat. Bei auf der nassen Seite des Proctoroptimums verdichteten Proben ist dieser Einfluss dagegen vernachlässigbar. Unabhängig von den Einbaubedingungen und von ihrer Spannungsvorgeschichte wurden bei geringen Wassergehalten an den untersuchten Böden ähnliche Saugspannungen festgestellt.

ROMERO ET. AL (1999) und ROMERO UND VAUNAT (2000) stellen eine Reihe von Untersuchungen an einem ausgeprägt plastischen Ton (natürlicher „Boom clay“) mit 10 % bis 20 % quellfähigen Tonanteilen dar. Dabei ermittelten sie an zwei, bei gleichen Wassergehalten aber unterschiedlichen Dichten hergestellten Bodenproben Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen, Porengrößenverteilungen und hydraulische Leitfähigkeiten. Die Saugspannungsuntersuchungen wurden im hohen Saugspannungsbereich mit Hilfe der vapour-equilibrium-technique unter der Bedingung freier Volumenänderung und im niedrigen Saugspannungsbereich unter Konstanthaltung des Volumens durchgeführt. Die Ergebnisse ergaben deutliche Unterschiede zwischen den beiden Proben in der Beziehung zwischen Saugspannung und gravimetrischem Wassergehalt bei hohen Wassergehalten, was sich bei den höher verdichteten Proben nicht nur in einem größeren Lufteintrittspunkt, sondern bei Sättigungsgraden zwischen 1,0 und ca. 0,3 auch in erkennbar größeren Saugspannungen gegenüber den geringer verdichteten Proben äußert. Im Bereich geringer Sättigungsgrade (etwa $< 0,3$) dagegen weisen die Proben ähnliche Kurvenverläufe auf. Anhand von Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen stellten die Autoren an beiden Proben bimodale Porenstrukturen bestehend aus Interaggregat- und Intraaggregatporen fest und zeigten, dass die Verdichtung keinen nennenswerten Einfluss auf die Intraaggregatporen hat, sondern im Wesentlichen nur die Interaggregatporen beeinflusst. Auf Grundlage dieser Erkenntnis unterteilen sie die ermittelten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen in zwei Bereiche; einen Bereich, dessen Verhalten maßgeblich durch Intraaggregatporen bestimmt wird und der vom Verdichtungsprozess weitgehend unbeeinflusst bleibt, und einen Bereich, dessen Verhalten maßgeblich durch Interaggregatporen bestimmt wird und vom Verdichtungsprozess beeinflusst wird. ROMERO UND VAUNAT (2000) stellen zudem eine Weiterentwicklung des Ansatzes nach *Fredlund&Xing* dar, mit dem die Beziehungen zwischen Saugspannung und volumetrischem Wassergehalt für unterschiedliche (konstante) Porenzahlen parametrisiert werden können.

Im Zusammenhang mit der Fragestellung von Böschungsrutschungen infolge von Wassergehaltsänderungen beschäftigten sich NG UND PANG (2000a; 2000b) mit dem Einfluss unterschiedlicher Auflastspannungen und unterschiedlicher Einbaudichten und Einbauwassergehalte auf Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen. Sie führten Ihre Untersuchungen an einem Tuff durch, der nach DIN 18196 als ausgeprägt plastischer Schluff (UA) zu klassifizieren ist. Unter Anwendung der Achsen-Translations-Technik ermittelten sie sowohl an ungestörten als auch an gestörten Proben in einer selbstentwickelten Spezial-Oedometerzelle unter Auflastspannungen von 0 kPa, 40 kPa und 80 kPa Zusammenhänge zwischen dem volumetrischen Wassergehalt und der Saugspannung. Die Proben wurden vor Durchführung der Saugspannungsuntersuchungen zunächst aufgesättigt und unter den oben genannten Auflastspannungen in herkömmlichen Oedometerzellen konsolidiert. Anschließend wurden die Proben in der selbstentwickelten Spezial-Oedometerzelle bis zu einer Saugspannung von 200 kPa stufenweise entwässert und anschließend wieder aufgesättigt. Anhand ihrer Untersuchungen stellten sie u. a. Folgendes fest:

- Die Hysterese zwischen Ent- und Bewässerung nimmt bei konstantem Einbauwassergehalt mit zunehmender Dichte ab und bei konstanter Einbaudichte mit zunehmendem Einbauwassergehalt zu.
- Der Lufteintrittspunkt nimmt mit zunehmendem Einbauwassergehalt zu.
- Die Hysterese der ersten Ent- und Bewässerung ist deutlich ausgeprägter als die weiterer Ent- und Bewässerungszyklen.
- Mit zunehmender Auflastspannung zeigt sich bei einer Bewässerung eine langsamere Wasseraufnahme. Zudem ist die Hysterese zwischen Be- und Entwässerung mit zunehmender Auflastspannung schwächer ausgebildet.

Sie führen diese Ergebnisse auf die sich in Abhängigkeit von den Einbaubedingungen einstellenden unterschiedlichen Porengrößenverteilungen zurück. Zudem verglichen sie ihre Ergebnisse mit Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen aus herkömmlichen Druckplattenextraktoren, bei denen Volumenänderungen nicht erfasst werden und zur Ermittlung des volumetrischen Wassergehaltes stets die Anfangsdichte unter Vernachlässigung von Schrumpf- und Quellvorgängen berücksichtigt wird. Anhand von ihren experimentellen Untersuchungen und von numerischen Simulationsrechnungen konnten sie zeigen, dass die korrekte Erfassung des Probenvolumens zur Ermittlung der Saugspannung in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad bei einem feinkörnigen Boden von großer Bedeutung ist.

SIVAKUMAR UND WHEELER (2000) führten Untersuchungen zum Einfluss der Einbaubedingungen auf das mechanische Verhalten eines Kaolin-Tones durch. Entsprechend ihren Untersuchungen übt der Einbauwassergehalt einen deutlich stärkeren Einfluss auf das mechanische Verhalten aus als eine Veränderung der Einbaudichte. Sie empfehlen deshalb, gleichartige Böden, die bei unterschiedlichen Einbauwassergehalten verdichtet wurden, wie vollkommen unterschiedliche Böden zu behandeln. Nach ihren Untersuchungen hat außerdem die Verdichtungsart (statisch oder dynamisch) einen nur geringen Einfluss auf die Bodeneigenschaften.

Untersuchungen von MILLER ET AL. (2002) an drei feinkörnigen Böden zeigen, dass der Lufteintrittspunkt mit zunehmender Verdichtungsenergie und zunehmender Plastizität steigt. Einen systematischen Einfluss des Einbauwassergehaltes auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung konnten die Autoren nicht feststellen. An aus mineralischen Abdichtungen entnommenen Bodenproben und im Labor verdichteten Proben wurden bei vergleichbaren Einbaubedingungen (Dichte und Wassergehalt) ähnliche Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen ermittelt. Ebenso wie zuvor bei TINJUM ET AL. (1997) wurden die Untersuchungen von MILLER ET AL. (2002) im Druckplattenextraktor nach vorhergehender Sättigung ohne Quantifizierung von Volumenänderungen der Proben infolge von Quell- oder Schrumpfvorgängen vorgenommen.

Saugspannungsuntersuchungen von THAKUR ET AL. (2005) an einem leicht plastischen Schluff und einem leicht plastischen Ton (jeweils gemäß USC-System) zeigen, dass die Einbautrockendichte der Böden einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung im hohen Saugspannungsbereich hat. Aufgrund der gewählten Messtechnik (Messung der Luftfeuchtigkeit mit der Taupunktmethode) konnten die Autoren keine gesicherten Aussagen über die Entwicklung der Saugspannungen bei hohen Wassergehalten (z.B. über die Saugspannung beim Lufteintrittspunkt) in Abhängigkeit von den Einbaubedingungen machen.

Saugspannungsuntersuchungen mit Hilfe eines Einstichtensiometers an einem gemäß USC-System leicht plastischen Schluff und einem leicht plastischen Ton wurden von SREEDEEP UND

SINGH (2005) durchgeführt. Dabei wurden an verschiedenen, entlang der Proctorkurve verdichteten Proben Saugspannungen im Einbauzustand ermittelt. Die Ergebnisse zeigen eine geringe Abhängigkeit der Saugspannungen von der Einbaudichte. Die zu erwartende Abhängigkeit der Saugspannungen vom Einbauwassergehalt lässt sich aus ihren Untersuchungen nicht erkennen. Ebenso bleibt ungeklärt, weshalb der Lufteintrittspunkt der Tensiometer (ca. 90 kPa) bei auf der trockenen Seite der Proctorkurve verdichteten Proben (Sättigungsgrad ca. 45 %) nicht erreicht wurde.

TARANTINO UND TOMBOLATO (2005) untersuchten das hydro-mechanische Verhalten von verdichtetem Kaolin-Ton (TA gemäß DIN 18196). Durch statische Verdichtung wurden unterschiedliche Einbauzustände (Dichte und Wassergehalt) erreicht, wobei überwiegend auf der trockenen Seite des Verdichtungsoptimums liegende Zustände erzeugt wurden. Die Messung der Saugspannungen unmittelbar nach der Herstellung zeigt, dass die Saugspannungen wesentlich vom Einbauwassergehalt abhängen, wobei die bei höheren Wassergehalten von mehreren Autoren festgestellte Annäherung der Saugspannungs-Isolinien an die Linien konstanter Sättigungsgrade nicht bestätigt wurde. Außerdem stellten sie fest, dass die im Bereich des Verdichtungsoptimums hergestellten Proben Saugspannungen aufweisen, die etwa im Bereich des Lufteintrittspunktes liegen.

SIVAKUMAR ET AL. (2006) untersuchten den Einfluss unterschiedlicher Einbaudichten auf das hydro-mechanische Verhalten eines Kaolin-Tones. Sie stellten u. a. fest, dass die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung unterschiedlich verdichteter Proben ab Saugspannungen von etwa 100 kPa unabhängig von der eingebrachten Verdichtungsarbeit ist.

MIAO ET AL. (2006) untersuchten den Einfluss unterschiedlicher Einbaudichten auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung zweier gemäß DIN 18196 ausgeprägt plastischer Tone. Die Proben wurden statisch verdichtet, gesättigt und anschließend in herkömmlichen Druckplattenextraktoren entwässert. Sie stellten fest, dass der Lufteintrittspunkt einer Entwässerungskurve mit zunehmender Trockendichte zunimmt und gleichzeitig die Steigung der Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehung (Sättigungsgrad auf der Abszisse und Saugspannung auf der Ordinate dargestellt) oberhalb des Lufteintrittspunktes mit zunehmender Trockendichte abnimmt. Es wird allerdings nicht beschrieben, bei welchem Wassergehalt die Proben verdichtet wurden und ob Dichteänderungen während des Sättigungsvorganges und bei der Entwässerung der Proben im Druckplattenextraktor bestimmt wurden.

SUN ET AL. (2006) untersuchten den Einfluss unterschiedlicher Einbaudichten auf die Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehung eines gemäß DIN 18196 mittelplastischen, nicht quellfähigen Tones. Dazu wurden Proben mit unterschiedlichen Dichten in einer Triaxialzelle unter Anwendung der Achsen-Translations-Technik untersucht. Alle untersuchten Proben wiesen geringere Einbauwassergehalte als die Wassergehalte der jeweiligen Verdichtungsoptima auf. Ebenso wie MIAO ET AL. (2006) beobachteten sie mit zunehmender Einbaudichte eine Zunahme des Lufteintrittspunktes. Sie stellten eine mathematische Formulierung zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Sättigungsgrad, Porenzahl und Saugspannung auf, die als Grundlage für eine Kopplung des mechanischen und hydraulischen Verhaltens verwendet werden kann.

CATANA ET AL. (2006) stellten anhand von Saugspannungsuntersuchungen an einem gemäß DIN 18196 ausgeprägt plastischen Ton fest, dass die Einbaudichte im Vergleich zum Einbauwassergehalt nur einen geringfügigen Einfluss auf den Zusammenhang zwischen Saugspannung und gravimetrischen Wassergehalt ausübt. Unter Einbeziehung weiterer veröffentlichter Untersuchungser-

gebnisse stellen sie eine Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung anhand einer Einpunktmessung und unter Berücksichtigung der Fließgrenze und des Tonanteils des Bodens dar. Die bei den Saugspannungsuntersuchungen aufgetretenen Dichteänderungen wurden nicht dargestellt. Der Zusammenhang zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad bzw. Saugspannung und volumetrischem Wassergehalt wurde nicht ermittelt.

Eine Reihe von Untersuchungen (u. a. AL-MUKHTAR ET AL. (1999), VILLAR (1999), LLORET ET AL. (2003), CUISINIER UND MASROUI (2004), AGUS UND SCHANZ (2005b)) beschäftigt sich mit dem hydromechanischen Verhalten stark verdichteter, sehr quellfähiger Tone. Im Zusammenhang mit der Fragestellung der Eignung dieser Böden als technische Barriere für radioaktive Abfälle fokussieren die Untersuchungen dabei auf die Wechselwirkungen zwischen den hydraulischen und den mechanischen Eigenschaften der verdichteten Tone. Dies umfasst u. a. den Aspekt möglicher Schrumpferformungen durch Temperaturbeanspruchungen bzw. Quellverformungen infolge von Wasserzutritt. Im Vergleich zu den typischerweise bei Oberflächenabdichtungen zum Einsatz kommenden feinkörnigen Böden weisen die darin untersuchten Böden deutlich größere Anteile an quellfähigen Bestandteilen auf und wurden bei sehr geringen Einbauwassergehalten, zum Teil sogar in Pulverform, sehr hoch verdichtet. Untersuchungen zur Verdichtbarkeit, wie sie im Erdbau mit Hilfe des Proctorversuches durchgeführt werden, wurden in den genannten Veröffentlichungen nicht beschrieben. Dies beruht auf den Anforderungen an verdichtete Tone bei der Verwendung als technische Barriere für radioaktive Abfälle, die sich im Vergleich zum Einsatz in Oberflächenabdichtungen aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen deutlich unterscheiden.

Zusammenfassung:

Auch wenn die einzelnen dargestellten Untersuchungen zum Einfluss der Einbaubedingungen auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung aufgrund der unterschiedlichen Methodik und der uneinheitlichen Versuchstechnik nur eingeschränkt vergleichbar sind, lassen sich aus den Untersuchungen folgende Erkenntnisse festhalten:

- Die Saugspannungen eines Bodens bei geringen bis sehr geringen Wassergehalten werden im Wesentlichen durch die materialspezifischen Eigenschaften bestimmt und sind unabhängig vom Einbauwassergehalt und von der Einbaudichte (CRONEY UND COLEMAN, 1954; VANAPALLI ET AL., 1999; ROMERO ET AL., 1999; THAKUR ET AL., 2005).
- Bei hohen Sättigungsgraden dagegen ist ein wesentlicher Einfluss sowohl des Einbauwassergehaltes (VANAPALLI ET AL., 1999; TINJUM ET AL., 1997; TARANTINO UND TOMBOLATO, 2005; CATANA ET AL., 2006) als auch der Einbaudichte (MILLER ET AL., 2002; TINJUM ET AL., 1997; ROMERO ET AL., 1999; SUN ET AL., 2006; MIAO ET AL., 2006) feststellbar. Dabei nimmt der Lufteintrittspunkt mit zunehmendem Einbauwassergehalt und zunehmender Einbaudichte zu.
- NG UND PANG (2000a und 2000b) konnten zeigen, dass die Größe der Auflastspannungen einen nennenswerten Einfluss auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung haben kann und dass Volumenänderungen infolge von Quell- bzw. Schrumpfvorgängen bei der Ermittlung von Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen deshalb berücksichtigt werden sollten.
- Eine Abschätzung von Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen verdichteter feinkörniger Böden unter Berücksichtigung des Einbauwassergehaltes, der Plastizität und der Verdichtungsart wurde von TINJUM ET AL. (1997) aufgestellt. Die dieser Abschätzung zugrunde liegenden Untersuchungen weisen allerdings Unklarheiten auf, da mögliche Volumenänderungen infolge von Quell- und Schrumpfvorgängen während der Versuche weder unterbunden noch quantifiziert

wurden. Darüber hinaus ist die Repräsentativität der vorgestellten Abschätzungen eingeschränkt, da nur drei unterschiedliche Böden untersucht wurden.

Es kann festgestellt werden, dass weiterer Forschungsbedarf besteht, um für verdichtete feinkörnige Böden gesicherte Aussagen zum Einfluss der Einbaubedingungen (Wassergehalt und Dichte) auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung machen zu können und darauf aufbauend ein Modell zur Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung auf Grundlage von einfach zu bestimmenden Bodenkenngrößen zu entwickeln. Weitere Untersuchungen müssen dabei insbesondere das Verformungsverhalten der Böden bei Wassergehaltsänderungen infolge von Quell- und Schrumpfvorgängen berücksichtigen. Dazu ist es erforderlich, die Versuche unter repräsentativen Spannungszuständen durchzuführen.

5.4 Hydraulische Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand

Im Gegensatz zur Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung finden sich in der Literatur nur vergleichsweise wenige experimentelle Untersuchungen, die sich der Fragestellung des Einflusses der Einbaubedingungen auf die hydraulische Leitfähigkeit feinkörniger Böden im ungesättigten Zustand widmen. Dies beruht auf dem sehr großen experimentellen Aufwand zur Ermittlung der hydraulischen Leitfähigkeit. Stattdessen wird die hydraulische Leitfähigkeit meist aus Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen abgeschätzt (z. B. nach *van Genuchten & Mualem*). Eine der wenigen Untersuchungen wurde von MEERDINK ET AL. (1996) mit Hilfe der instationären Profilmethode an einem gemäß DIN 18196 ausgeprägt plastischen und einem leicht plastischen Ton durchgeführt. Ihre Ergebnisse zeigen, dass die Beziehung zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit und der Saugspannung vom Einbauwassergehalt nur im Bereich geringer Saugspannungen maßgebend beeinflusst wird und bei hohen Saugspannungen (> 200 kPa) sich sehr ähnliche Beziehungen ergeben. Dagegen stellen sie eine deutliche Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit sowohl im niedrigen als auch im hohen Saugspannungsbereich bei einer Zunahme der Einbaudichte fest. Außerdem beschreiben die Autoren, dass die hydraulische Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand mit üblichen Abschätzungen aus Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen in der Regel unterschätzt wird.

5.5 Durchlässigkeit im gesättigten Zustand

Der Einfluss der Einbaubedingungen auf die Durchlässigkeit verdichteter feinkörniger Böden wurde aufbauend auf den Untersuchungen von LAMBE (1954) und BJERRUM UND HUDER (1957) umfassend von MITCHELL ET AL. (1965) untersucht. Die Untersuchungen zeigen, dass die Durchlässigkeit im gesättigten Zustand sehr stark vom Einbauwassergehalt abhängt. So nimmt die Durchlässigkeit mit zunehmendem Einbauwassergehalt aufgrund der sich einstellenden Poren- und Aggregatstruktur der Böden entlang der Proctorkurve bis zum Proctoroptimum stark ab. Außerdem belegen ihre Untersuchungen die Abnahme der Durchlässigkeit mit zunehmender Einbaudichte. Im Zusammenhang mit der Fragestellung der Durchlässigkeit mineralischer Dichtungsstoffe wurden diese prinzipiellen Zusammenhänge in vielfachen Untersuchungen bestätigt (u. a. HEYER, 2001).

6 Eigene Untersuchungen zum Einfluss der Einbaubedingungen auf die hydraulischen Eigenschaften verdichteter Tone

6.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im Mittelpunkt der experimentellen Untersuchungen stand die Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Einbaubedingungen auf die hydraulischen Eigenschaften feinkörniger Böden im ungesättigten Zustand. Dabei sollte untersucht werden, inwieweit sich unterschiedliche Einbauwasserhalte und Einbaudichten auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung auswirken. Da die experimentelle Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung sehr zeitaufwändig ist, sollte auf Grundlage der Versuchsergebnisse außerdem ein Modell zur Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung ermittelt werden. Dieses sollte auf einfach zu bestimmenden bodenmechanischen Kennwerten basieren und die Berücksichtigung des Einflusses der Einbaubedingungen erlauben.

Als Versuchsböden wurden zwei mittelplastische Tone und ein Ton mit organischen Beimengungen ausgewählt. Entsprechend ihrer bodenmechanischen Eigenschaften können die beiden untersuchten mittelplastischen Tone als ein typisches Material für mineralische Dichtungen angesehen werden. Der Ton mit organischen Beimengungen ist demgegenüber als Dichtungsmaterial im Deponiebau ungeeignet. Er stammt aus dem Erdinger Moos und stellt einen typischen Vertreter eines Niedermooses dar. Dieser Boden wurde in die Untersuchungen aufgenommen, da er im Zuge der Erweiterung des Münchner Flughafens für eine dritte Start- und Landebahn in großen Mengen entnommen und für Erdbauwerke verwendet werden soll. Da er jedoch geogen bedingt erhöhte Konzentrationen an Arsen aufweist, ist bei der Verwendung dieses Bodens in Erdbauwerken in besonderer Weise auf seine hydraulischen Eigenschaften zu achten.

Zur Festlegung der Einbaubedingungen wurden zunächst die Verdichtungseigenschaften der drei Böden anhand von Proctor-Versuchen bestimmt. Da die hydraulischen Eigenschaften maßgebend von der Poren- und Aggregatstruktur der Böden bestimmt werden, wurden anschließend Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen zur Ermittlung der sich in Abhängigkeit von den Einbaubedingungen ergebenden Porengrößenverteilung durchgeführt. Im Zusammenhang mit der Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften im ungesättigten Zustand wurden im nächsten Schritt verschiedene Messmethoden im Hinblick auf ihre Eignung für die vorliegende Fragestellung untersucht. Die Reihenuntersuchungen wurden letztlich in Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen und mit einem Feuchtigkeitsmessgerät nach der Taupunktmethode durchgeführt. Im Vergleich zu dem in der Bodenkunde weit verbreiteten Druckplattenextraktor konnte dadurch auch das mechanische Verhalten der Böden erfasst werden. Außerdem ermöglichte die Verwendung der Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen die Anwendung der Mehrstufen-Ausfluss-Methode zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand. Darüber hinaus wurde der Einfluss der Einbaubedingungen auf die Durchlässigkeit im gesättigten Zustand untersucht. Wie auch die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung wird diese maßgeblich durch die Poren- und Aggregatstruktur beeinflusst.

Die experimentell ermittelten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung wurden mit den häufig angewendeten Modellen nach *van Genuchten* und *Fredlund&Xing* parametrisiert. Außerdem wurden verschiedene in der Bodenkunde weit verbreitete Ansätze zur Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung im Hinblick auf ihre Eignung für die untersuchten Böden geprüft.

Die zur hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand ermittelten Messdaten wurden mit den weit verbreiteten Ansätzen nach *van Genuchten&Mualem*, *Averjanov* sowie *Fredlund et al.* verglichen.

6.2 Untersuchte Böden

Bei den mittelplastischen Tönen handelt es sich zum einen um einen Lias-Ton aus der Fränkischen Schweiz und zum anderen um einen Lösslehm aus dem Raum Freising.

Die Tonmineralogie der beiden Böden wurde durch das Geozentrum der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg mit Hilfe des Röntgen-Reflexionsverfahrens an der Kornfraktion kleiner 2 µm bestimmt. Die Anteile der einzelnen Tonminerale als Gewichtsprozent sind in der Tab. 6.1 dargestellt. Die Gewichtsprozente beziehen sich dabei auf den Gewichtsanteil der Kornfraktion kleiner 2 µm. Es ist zu erkennen, dass der Lias-Ton überwiegend illitische und der Lösslehm überwiegend kaolinitische Tonminerale aufweist. Im Hinblick auf ihre bodenmechanischen Eigenschaften wurden für den Lias-Ton im Vergleich zum Lösslehm eine deutliche größere Fließgrenze und eine größere Plastizitätszahl ermittelt (siehe Tab. 6.2). Nach MITCHELL UND SOGA (2005) steht dies in Übereinstimmung mit den tonmineralischen Eigenschaften, wonach illitischen Böden ein plastischeres Verhalten als kaolinitischen Böden zugesprochen wird.

Tonmineral	Lias-Ton	Lösslehm
Smektit	1	9
Muscovit / Illit	62	18
Kaolinit	23	72
Vermikulit	-	1
Chlorit	14	-

Tab. 6.1: Mineralogische Zusammensetzung des Lias-Tons und Lösslehms

Boden	Lias-Ton	Lösslehm	Ton mit organischen Beimengungen
Bodengruppe nach DIN 18196	TM	TM	OT
Korngröße $d < 2,0$ mm [Masse-%]	100	100	100
Korngröße $d < 0,06$ mm [Masse-%]	82	72	87
Korngröße $d < 0,002$ mm [Masse-%]	12 ^{*)}	18	1,5 ^{*)}
Fließgrenze w_L [%]	46,5	36,5	124
Ausrollgrenze w_P [%]	19,5	18,7	80
Plastizitätszahl I_P [%]	27,0	17,8	44
Korndichte ρ_s [g/cm ³]	2,78	2,70	2,21
Glühverlust V_{GI} [%]	5,7	2,9	27,3

^{*)} aufgrund von Ausflockung nicht exakt bestimmbar

Tab. 6.2: Bodenmechanische Kenngrößen der Versuchsböden

Nach DIN 18196 handelt es sich bei dem verwendeten Lias-Ton um einen mittelplastischen Ton mit einem Wassergehalt an der Fließgrenze von $w_L = 46,5 \%$ und einem Wassergehalt an der Ausrollgrenze von $w_P = 19,5 \%$. Die mit dem Kapillarpyknometer ermittelte Korndichte des Materials beträgt $\rho_s = 2,78 \text{ g/cm}^3$. Das Material stammt aus einer Tongrube aus der Fränkischen Schweiz und wird als Rohmaterial für die Ziegelherstellung verwendet. Dazu werden die Feinanteile in Pulverform zermahlen. Das Material konnte damit in gleich bleibender Qualität als Sackware bezogen werden. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass die Materialzusammensetzung nur minimalen Schwankungen unterworfen ist. Der Wassergehalt des Pulvers beträgt weniger als 1 %. Da die Eigenschaften des Materials sehr stark von der Aufbereitungsart abhängen, wurde besonderes Augenmerk auf die Aufbereitung des Tonmehls gelegt und ein stets einzuhaltender Arbeitsablauf entwickelt. Für die Qualität und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der durchzuführenden Reihenuntersuchungen war dies von entscheidender Bedeutung. Für die Aufbereitung des Tonmehls wurde enthärtetes Münchner Leitungswasser verwendet. Das Tonmehl wurde zunächst auf einen Wassergehalt von ca. 27 % angefeuchtet, im Cutter durchmischt und zur Homogenisierung mindestens 1 Woche in luftdichten Eimern gelagert. Anschließend wurde der Boden bei etwa 50°C auf einen Wassergehalt von ca. 14 % heruntergetrocknet und ebenfalls mindestens 1 Woche zur Homogenisierung in luftdichte Eimer verpackt. Von diesem Zustand ausgehend wurden die für die verschiedenen Untersuchungen erforderlichen Probekörper hergestellt. Dazu wurde der Boden auf den einzustellenden Wassergehalt angefeuchtet und im Cutter durchmischt. Nach einer erneuten Homogenisierungsphase von mindestens 48 Stunden wurden daraus die für die verschiedenen Untersuchungen erforderlichen Probekörper durch statische Verdichtung hergestellt.

Der untersuchte Lösslehm wurde bei der in Abschnitt 8 beschriebenen großmaßstäblichen Versuchsschüttung für Dichtungszwecke verwendet. Zur Durchführung der Laboruntersuchungen wurde das Material mittels Baggerschurf aus der Tongrube bei Zolling im Raum Freising entnommen. Zur Homogenisierung wurde der in steifer bis halbfester Konsistenz vorliegende Boden luftgetrocknet und anschließend zerkleinert. Mit Hilfe eines Siebes der Öffnungsweite von 2 mm wurde der geringe Kiesanteil abgetrennt. Die in Pulverform vorliegenden Anteile < 2 mm dienten schließlich als Ausgangsmaterial für die verschiedenen Untersuchungen. Mit einem Wassergehalt an der Fließgrenze von $w_L = 36,5 \%$ und einem Wassergehalt an der Ausrollgrenze von $w_P = 18,7 \%$ handelt es sich nach DIN 18196 um einen mittelplastischen Ton. Die mit dem Kapillarpyknometer ermittelte Korndichte des Materials beträgt $\rho_s = 2,70 \text{ g/cm}^3$.

Der für den großmaßstäblichen Feldversuch ausgewählte Ton mit organischen Beimengungen stammt aus dem Erdinger Moos und wurde mittels Baggerschurf entnommen. Unmittelbar nach Anlieferung wurde das Material gründlich gemischt und luftdicht verschlossen in Mörtelmulden gelagert. Aufgrund der zum Teil nicht zersetzten organischen Anteile konnte das Material im Zuge des Mischens nur sehr schwer homogenisiert werden. Im Vergleich zu den mittelplastischen Tönen wiesen einzelne Teilproben deutlich größere Schwankungen insbesondere im Hinblick auf den Glühverlust und die Korndichte auf. Der Wassergehalt des Materials betrug nach dem Mischen etwa 85 %. Der Glühverlust wurde im Mittel zu 27,3 % bestimmt. Die Klassifikationsuntersuchungen ergaben einen Wassergehalt an der Fließgrenze von $w_L = 124,0 \%$, einen Wassergehalt an der Ausrollgrenze von $w_P = 79,7 \%$ und einen Feinkornanteil $\leq 0,063 \text{ mm}$ von 87,1 %. Gemäß DIN 18196 handelt es sich danach um einen Ton mit organischen Beimengungen bzw. um einen organogenen Ton (OT). Die mittels Kapillarpyknometer ermittelte Korndichte beträgt im Mittel $2,21 \text{ g/cm}^3$. Für die durchzuführenden Laboruntersuchungen wurde das Material vom Ausgangs-

wassergehalt auf den gewünschten Wassergehalt getrocknet und anschließend von Hand gründlich gemischt und zerkleinert. Zur Homogenisierung wurde der Boden danach mindestens 72 h in luftdicht verschlossenen Eimern gelagert.

6.3 Verdichtungseigenschaften

6.3.1 Lias-Ton

Zur Auswahl der zu untersuchenden Einbauzustände wurden ein Standard-Proctorversuch ($W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$), ein modifizierter Proctorversuch ($W = 2,7 \text{ MNm/m}^3$) sowie ein teilmodifizierter Proctorversuch ($W = 1,0 \text{ MNm/m}^3$) durchgeführt. Die Ergebnisse der Proctorversuche sind in Abb. 6.1 dargestellt. Für den Standard-Proctorversuch wurden ein Proctorwassergehalt $w_{Pr} = 20,8 \%$ und eine Trockendichte $\rho_{Pr} = 1,714 \text{ g/cm}^3$ bestimmt. Erwartungsgemäß nehmen der optimale Wassergehalt mit zunehmender Verdichtungsenergie ab und die Trockendichte zu. So wurden für den teilmodifizierten Proctorversuch Werte von $w_{\text{teilmod,Pr}} = 18,8 \%$ und $\rho_{\text{teilmod,Pr}} = 1,768 \text{ g/cm}^3$ und für den modifizierten Proctorversuch Werte von $w_{\text{mod,Pr}} = 16,8 \%$ und $\rho_{\text{mod,Pr}} = 1,856 \text{ g/cm}^3$ ermittelt. Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Einbaudichten und Einbauwassergehalte auf das hydromechanische Verhalten des Bodens wurden anhand der Proctorkurven die in Abb. 6.1 dargestellten acht Untersuchungspunkte ausgewählt. Die Untersuchungspunkte 1 bis 3, sowie 4 bis 6 unterscheiden sich dabei nur in der Trockendichte. Dagegen weisen die Untersuchungspunkte 2 und 7 sowie 4 und 8 dieselbe Trockendichte aber unterschiedliche Einbauwassergehalte auf.

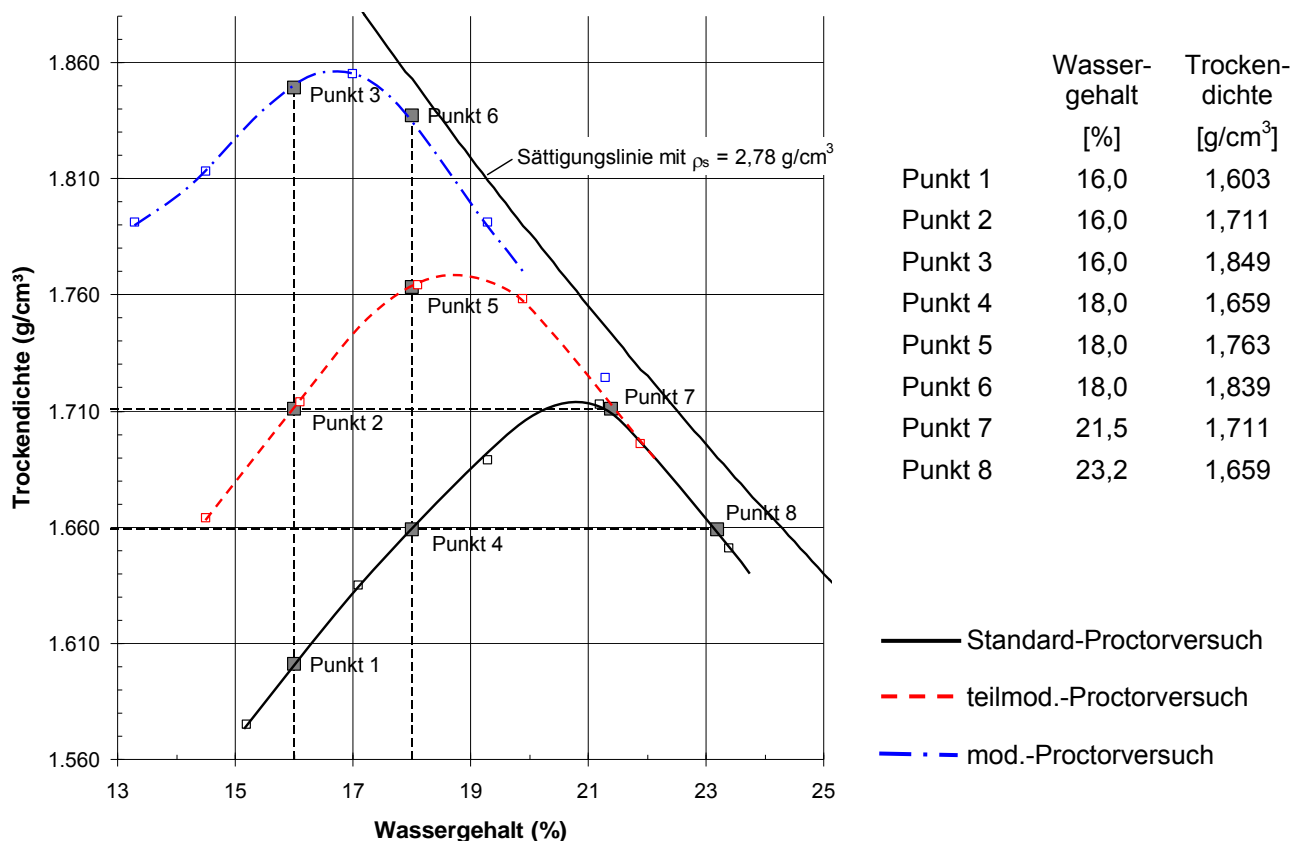


Abb. 6.1: Proctoruntersuchungen am Lias-Ton

6.3.2 Lösslehm

Wie auch am Lias-Ton wurden am Lösslehm ein Standard-Proctorversuch ($W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$), ein modifizierter Proctorversuch ($W = 2,7 \text{ MNm/m}^3$) sowie ein teilmodifizierter Proctorversuch ($W = 1,0 \text{ MNm/m}^3$) durchgeführt. Im Vergleich zum Lias-Ton wurden dabei etwas höhere optimale Trockendichten bei niedrigeren optimalen Wassergehalten festgestellt. Für den Standard-Proctorversuch betragen die Werte $w_{Pr} = 14,5 \%$ und $\rho_{Pr} = 1,818 \text{ g/cm}^3$. Für den teilmodifizierten und modifizierten Proctorversuch wurden Werte von $w_{\text{teilmod,Pr}} = 13,0 \%$ und $\rho_{\text{teilmod,Pr}} = 1,900 \text{ g/cm}^3$ bzw. $w_{\text{mod,Pr}} = 11,8 \%$ und $\rho_{\text{mod,Pr}} = 1,984 \text{ g/cm}^3$ ermittelt. Für die zu untersuchenden Einbaubedingungen wurden die in Abb. 6.2 dargestellten acht Untersuchungspunkte festgelegt. Ähnlich wie beim Lias-Ton sind für den Lösslehm die Untersuchungspunkte 1 bis 3 bzw. 4 bis 6 beim selben Wassergehalt, aber mit unterschiedlichen Dichten herzustellen, während die Untersuchungspunkte 1 und 8, 2 und 5 sowie 4 und 7 dieselbe Trockendichte aber unterschiedliche Einbauwassergehalte aufweisen.

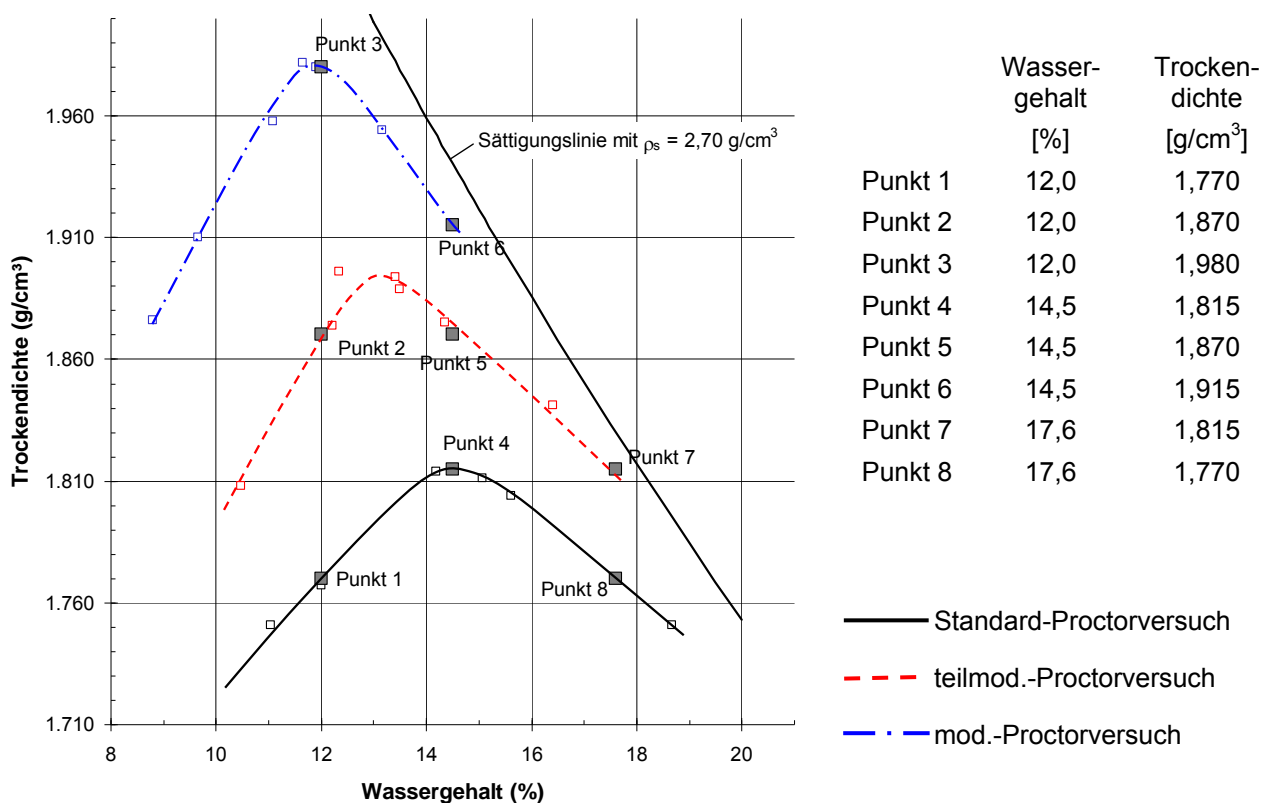


Abb. 6.2: Proctoruntersuchungen am Lösslehm

6.3.3 Ton mit organischen Beimengungen

Am Ton mit organischen Beimengungen wurden zunächst Proctorversuche entsprechend den Vorgaben der DIN 18127 durchgeführt. Danach wird der zu prüfende Boden im Zuge der Materialaufbereitung bis zu einem Wassergehalt zwischen Schrumpf- und Ausrollgrenze bei nicht mehr als 60°C getrocknet. Für den ersten Einzelversuch soll die Probe einen Wassergehalt aufweisen, der ausreichend weit unter dem geschätzten optimalen liegt. Für die weiteren Einzelversuche wird der

Wassergehalt jeweils um 2 % bis 3 % erhöht. Bevor der Boden verdichtet wird, muss er gleichmäßig durchfeuchtet sein. Bei plastischen Böden ist dazu eine Homogenisierungszeit von mindestens 24 h erforderlich. In [Abb. 6.3](#) ist das Ergebnis des gemäß DIN 18127 durchgeführten Proctorversuches dargestellt. Es ist ein ausgeprägtes Maximum mit einer Dichte von $0,84 \text{ g/cm}^3$ bei einem Wassergehalt von 66 % erkennbar.

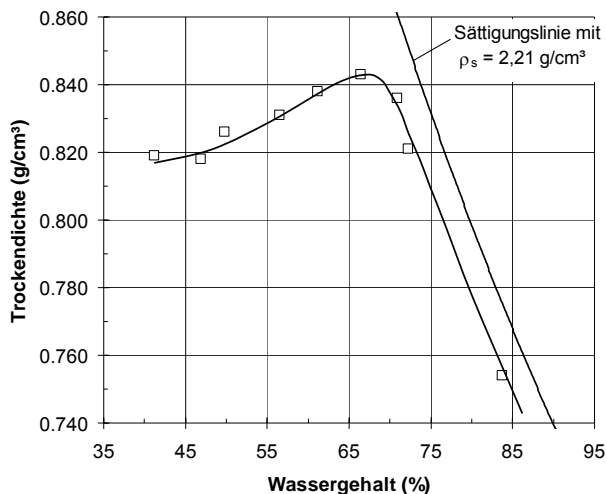


Abb. 6.3: Proctorkurve des organogenen Tons (Versuchsdurchführung gemäß DIN 18127 mit zunehmendem Wassergehalt)

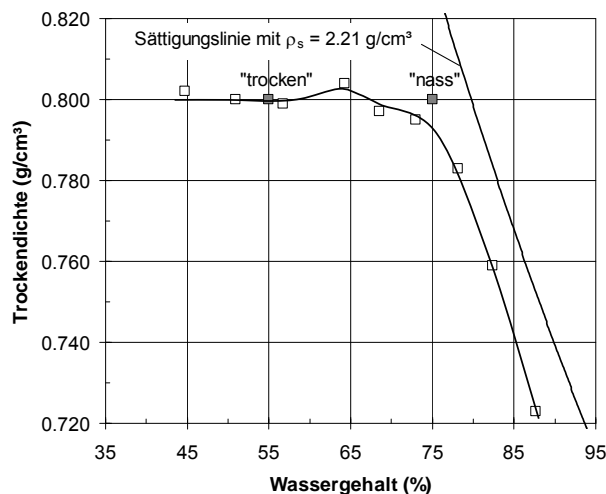


Abb. 6.4: Proctorkurve des organogenen Tons (Versuchsdurchführung mit abnehmendem Wassergehalt)

Zusätzlich zu dem nach DIN 18127 durchgeführten Versuch wurde ein Proctorversuch ausgeführt, bei dem entgegen der Vorgaben nach DIN 18127 der erste Prüfkörper beim natürlichen Wassergehalt (87,6 %) verdichtet und das Bodenmaterial für alle weiteren Prüfkörper vom natürlichen Wassergehalt ausgehend direkt auf die gewünschten Wassergehalte getrocknet wurde. Die Ergebnisse dieses Versuches sind in [Abb. 6.4](#) dargestellt. Im Gegensatz zu dem nach DIN 18127 durchgeführten Versuch ist kein ausgeprägtes Maximum erkennbar. Die ermittelten Trockendichten schwanken in einem Wassergehaltsbereich von 43 % bis ca. 75 % zwischen $0,79 \text{ g/cm}^3$ und $0,804 \text{ g/cm}^3$.

Um zu untersuchen, ob eine höhere Verdichtungsarbeit zu höheren Trockendichten führt, wurde ein modifizierter Proctorversuch mit einer höheren volumenbezogenen Verdichtungsarbeit von $W = 2,70 \text{ MNm/m}^3$ gemäß DIN 18127 durchgeführt. Die Ergebnisse ($\rho_{\text{mod,Pr}} = 0,839 \text{ g/cm}^3$, $w_{\text{mod,Pr}} = 66,17 \%$) zeigten jedoch im Vergleich zu dem Standard-Proctorversuch nach DIN 18127 keine Zunahme der Trockendichte.

Zur Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Einbaubedingungen wurden das mechanische und das hydraulische Verhalten des Bodens bei Einbauwassergehalten von ca. 55 % und ca. 75 % untersucht. Bei der Herstellung der Prüfkörper im Labor wurde eine Trockendichte von $0,8 \text{ g/cm}^3$ angestrebt. Dies entspricht etwa der im Proctorversuch gemäß [Abb. 6.4](#) erzielten Trockendichte. Bei der Festlegung dieser Einbaubedingungen wurde davon ausgegangen, dass der Wassergehalt des Bodens bei Entnahme für die in Abschnitt 8 dargestellte Versuchsschüttung deutlich über dem erdbautechnisch verarbeitbaren Wassergehalt liegen würde, so dass eine Trocknung des Materials erforderlich werden würde. Wie sich später bestätigte, war diese Annahme richtig und es konnte im

Zuge der Verdichtung des Materials im Feld eine ähnliche Trockendichte wie in dem in Abb. 6.4 dargestellten Proctorversuch erreicht werden. Der Wassergehalt von 75 % stellt den für diesen Boden maximalen Wassergehalt dar, bei dem eine Trockendichte von ca. $0,8 \text{ g/cm}^3$ erzielt werden konnte. Bei höheren Wassergehalten stellen sich im Zuge der dynamischen Verdichtung im Proctorversuch Porenwasserüberdrücke ein und ergeben sich geringere Trockendichten. Insbesondere im Zusammenhang mit der Versuchsschüttung wird im Zusammenhang mit dem Einbauwassergehalt von 75 % deshalb auch von einer „nassen“ Einbaubedingung gesprochen. Als „trockene“ Einbaubedingung wurde der gewählte Wassergehalt von 55 % bezeichnet. Dieser resultiert aus Überlegungen bezüglich der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand. Wie die Ergebnisse der durchgeführten Durchlässigkeitsversuche zeigten, stellen sich mit abnehmendem Einbauwassergehalt deutlich höhere Durchlässigkeitsbeiwerte ein. Bei einem Einbauwassergehalt von 55 % konnte von einem Durchlässigkeitsbeiwert von $k = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ ausgegangen werden. Dieser wurde im Zusammenhang mit der Verwendung des Bodens für Geländeaufschüttungen unter Berücksichtigung der erhöhten Arsenkonzentration als maximal zulässiger Durchlässigkeitsbeiwert betrachtet, der nicht überschritten werden sollte. Im Rahmen der in Abschnitt 8 dargestellten Versuchsschüttung sollten die beiden Grenzzustände des maximal und minimal zulässigen Einbauwassergehaltes studiert werden. Dementsprechend wurden die begleitenden Laboruntersuchungen zum mechanischen und hydraulischen Verhalten dieses Bodens für diese beiden Einbaubedingungen durchgeführt.

6.4 Quecksilberporosimetrie

Zur Ermittlung des Einflusses der unterschiedlichen Einbaubedingungen auf die Porengrößenverteilungen wurden Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen durchgeführt. Für die Untersuchungen kamen der Porosimeter Grimm 4.700 des Lehrstuhls 2 für Technische Chemie und der Quantachrome Poremaster 60 des Lehrstuhls für Bauchemie an der TU München in Garching zum Einsatz. Der Druckbereich des Porosimeters Grimm 4.700 beträgt 7 kPa bis 207 MPa. Daraus ergibt sich ein messbarer Porenbereich zwischen $200 \mu\text{m}$ und $0,0071 \mu\text{m}$. Beim Quantachrome Poremaster 60 wird zwischen einem niedrigen und einem hohen Druckbereich unterschieden. Im niedrigen Druckbereich werden Drücke zwischen 6 kPa und 172 kPa aufgebracht, wodurch Poren zwischen $239 \mu\text{m}$ und $9 \mu\text{m}$ erreicht werden. Im hohen Druckbereich wird der Quecksilberdruck stufenweise bis maximal 413 MPa erhöht. Die kleinste messbare Porengröße beträgt damit ca. $0,0036 \mu\text{m}$.

6.4.1 Grundlagen

Die Quecksilberporosimetrie beruht auf dem Prinzip, dass Quecksilber als nichtbenetzende Flüssigkeit nur unter Aufbringen eines äußeren Druckes in eine enge Kapillare eindringen kann (siehe Abb. 6.5).

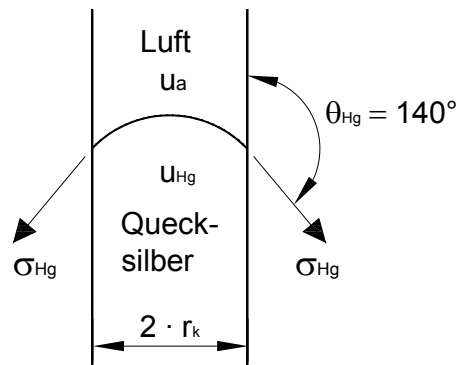


Abb. 6.5: Mit Quecksilber gefüllte Kapillare

Der dazu erforderliche Druck hängt u.a. vom Kapillarradius ab und kann mit Hilfe der Washburn-Gleichung beschrieben werden (WASHBURN, 1921):

$$\Delta p = - \frac{2 \cdot \sigma_{\text{Hg}} \cdot \cos \theta}{r_k} \quad (6.1)$$

Mit Δp : Differenz zwischen Quecksilberdruck u_{Hg} und Luftdruck u_a
 σ_{Hg} : Grenzflächenspannung zwischen Quecksilber und Luft
 θ : Benetzungswinkel
 r_k : Kapillarradius

Der Vorteil von Quecksilber gegenüber anderen nicht-benetzenden Flüssigkeiten besteht darin, dass der Benetzungswinkel relativ unabhängig vom Probenmaterial ist (SCHULZ, 1996). DIAMOND (1970) ermittelte für Montmorillonit einen Benetzungswinkel von 139° und für andere Tone von 147° . Um die Vergleichbarkeit von Ergebnissen zu gewährleisten, wird für die Auswertung von Messungen in der Regel ein Benetzungswinkel von 140° angenommen. Die Oberflächenspannung von Quecksilber an der Grenzfläche zur Luft wurde in den vorliegenden Untersuchungen zu $\sigma_{\text{Hg}} = 0,48 \text{ N/m}$ angenommen.

6.4.2 Probenvorbereitung, Versuchsdurchführung und Auswertung

Die Materialvorbereitung wurde wie in Abschnitt 6.2 beschrieben durchgeführt. Die Prüfkörper wurden aus den statisch verdichteten Proben gewonnen. Dabei war zu beachten, dass die Prüfkörper nicht herausgeschnitten, sondern nur heraus gebrochen werden durften, da andernfalls die Oberflächen der Prüfkörper verschmiert werden und damit das Eindringen des Quecksilbers behindert wird (siehe Abb. 6.6). Beim Herausbrechen der Prüfkörper muss sehr sorgfältig vorgegangen werden. Eine zu große mechanische Belastung kann insbesondere bei duktilen Proben Risse im Prüfkörper hervorrufen. Diese können das spätere Versuchsergebnis stark verfälschen. Die Größe der Probenzelle lässt nur sehr kleine Prüfkörper mit maximalen Abmessungen von ca. 15 mm Durchmesser und 15 mm Höhe zu.

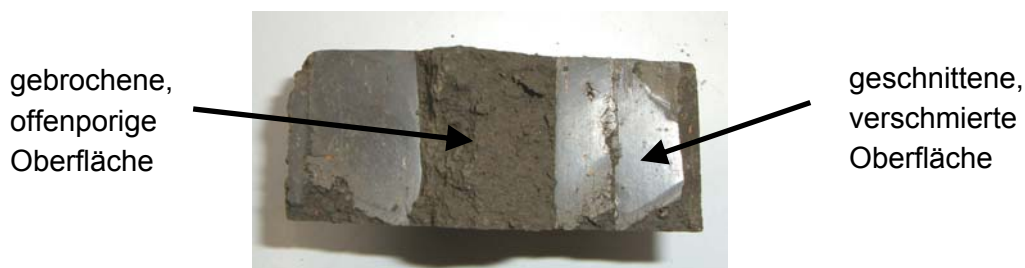


Abb. 6.6: Herstellung eines Prüfkörpers (Lias-Ton); verschmierte und offenporige Oberfläche

Bevor eine Bodenprobe mit Quecksilber in Kontakt gebracht wird, muss die Probe getrocknet werden. Um die Bodenstruktur durch die Trocknung so wenig wie möglich zu beeinflussen, wird die Probe durch Eintauchen in flüssigen Stickstoff gefroren (AHMED ET AL., 1974). Durch die niedrige Temperatur des flüssigen Stickstoffs (Siedepunkt bei -196°C) werden die Proben sehr schnell gefroren, wodurch die beim natürlichen Gefriervorgang auftretende Bildung von kristallinem Eis und die damit einhergehende 9 %-ige Volumenzunahme weitgehend unterbunden werden. Anschließend wird das gefrorene Wasser durch Herabsetzen des Druckes sublimiert. Dazu wird die Probe aus dem flüssigen Stickstoff entnommen und in ein Gefäß gebracht, an das Vakuum angelegt wird. Die Sublimation, d.h. der direkte Übergang vom festen in den gasförmigen Aggregatzustand findet unterhalb des Tripelpunktes bei einem Druck zwischen 0 bar und 0,006 bar statt. Die Probe muss unmittelbar nach dem Herausnehmen aus dem flüssigen Stickstoff mit Vakuum beaufschlagt werden, da die Temperatur während der Sublimation nicht konstant gehalten werden kann. An die Proben wird so lange Vakuum angelegt, bis keine weitere Massenänderung feststellbar ist. Die Masse der Proben wird dabei durch Wägung ermittelt.

Unmittelbar nach der Gefriertrocknung wird die Probe gewogen und in das Probengefäß gegeben. Dieses wird anschließend in die Probenkammer des Quecksilber-Porosimeters gestellt. Nach Schließen der Kammer wird diese mit Quecksilber gefüllt. Danach wird der Quecksilberdruck schrittweise bis zum Maximalwert gesteigert. Die nächste Druckstufe wird aufgebracht, wenn die in die Probe einströmende Quecksilbermenge einen bestimmten Wert unterschreitet, d.h. quasi-stationäre Verhältnisse vorliegen. Für jeden Schritt wird neben dem Quecksilberdruck die in die Probenkammer einströmende Quecksilbermenge gemessen (Intrusion). Mit diesen Daten kann das mit Quecksilber gefüllte Volumen als Funktion des Porendurchmessers dargestellt werden (Intrusionskurve, siehe Abb. 6.8). Nach Erreichen des maximalen Druckes wird der Quecksilberdruck schrittweise reduziert. Dabei werden wiederum für jeden Schritt der Quecksilberdruck und die ausströmende Quecksilbermenge gemessen (Extrusion). Gewöhnlich folgt die Extrusionskurve nicht der Intrusionskurve, sondern liegt über dieser (siehe Abb. 6.8). Dieses hysteretische Verhalten lässt sich auf verschiedene Ursachen zurückführen. Ein wesentlicher Anteil wird dem sogenannten „Flaschenhalseffekt“ zugewiesen, der Veränderungen des Porendurchmessers einzelner Poren beschreibt. Poren, die einen großen Innendurchmesser aber nur eine kleine Verbindung zu anderen Poren besitzen, können mit Quecksilber erst gefüllt werden, wenn der Druck ausreichend hoch ist, um die Verbindungsengstelle zu überwinden. Entleert werden diese Poren jedoch erst bei einem deutlich geringeren Druck entsprechend dem größeren Innendurchmesser. Außerdem findet in der Regel keine vollständige Entleerung der Proben statt, sondern es verbleibt eine gewisse Quecksilbermenge im Boden. Auch dies beruht auf dem bereits beschriebenen „Flaschenhalseffekt“ infolge unterschiedlicher Porendurchmesser. Die Abb. 6.7 stellt dazu den Befüllzustand einer

Pore bei unterschiedlichem Quecksilberdruck dar: Solange der Quecksilberdruck höher ist als der Druck $u_{Hg,a}$, bei dem der Porenbereich mit dem Durchmesser D_a entsprechend Gleichung (6.1) gefüllt wird, bleibt die Pore vollständig mit Quecksilber gefüllt (Zustand (a) in Abb. 6.7). Fällt der Quecksilberdruck unter $u_{Hg,a}$, entweicht das Quecksilber aus dem Porenbereich mit dem Durchmesser D_a (Zustand (b) in Abb. 6.7). Der innere Porenbereich mit dem Durchmesser D_i kann prinzipiell erst bei einem kleineren Quecksilberdruck $u_{Hg,i}$ entsprechend dem größeren Porendurchmesser entleert werden. Da das Quecksilber bei diesem Druck aber nicht in die umgebenden kleineren Porenbereiche eindringen kann, bleibt das Quecksilber in der Pore gefangen. Folglich stellt die im Boden verbleibende Quecksilbermenge ein Maß für die Variabilität der Porengrößen dar.

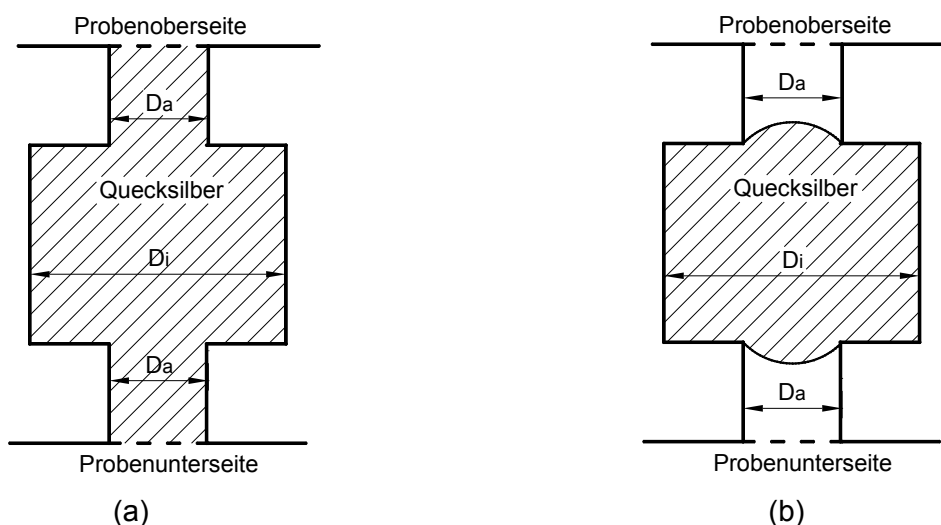


Abb. 6.7: Befüllzustand einer Kapillare mit Quecksilber am Ende der Intrusion (a) und am Ende der Extrusion (b)

Zur Auswertung wird das Intrusionsvolumen auf die Trockenmasse der Probe bezogen (siehe Abb. 6.8). Aus dem Intrusionsvolumen V_{Hg} , der Probentrockenmasse m_d und der Korndichte ρ_s lässt sich über folgende Beziehungen der mit Quecksilber gefüllte Porenanteil n_{Hg} bzw. die zugehörige Porosität e_{Hg} ermitteln:

$$e_{Hg} = \frac{V_{Poren}}{V_{Feststoff}} = \frac{V_{Hg}}{m_d} \cdot \rho_s \quad (6.2)$$

$$n_{Hg} = \frac{e_{Hg}}{1 + e_{Hg}} \quad (6.3)$$

Aus der Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem mit Quecksilber gefüllten Porenanteil und dem Porendurchmesser für die Intrusionskurve lässt sich der insgesamt von Quecksilber erreichte Porenanteil ermitteln (siehe Abb. 6.8). Entsprechend den mit den verwendeten Geräten maximal aufbringbaren Drücken von 207 MPa bzw. 413 MPa betragen die kleinsten mit Quecksilber erreichbaren Poren ca. $0,0071 \mu m$ bzw. $0,0036 \mu m$. Kleinere Poren konnten nicht gefüllt werden. Daher ergibt sich bei der Quecksilberporosimetrie ein Unterschied zwischen dem tatsächlichen Porenanteil n_0 und dem mit Quecksilber gefüllten Porenanteil des Bodens.

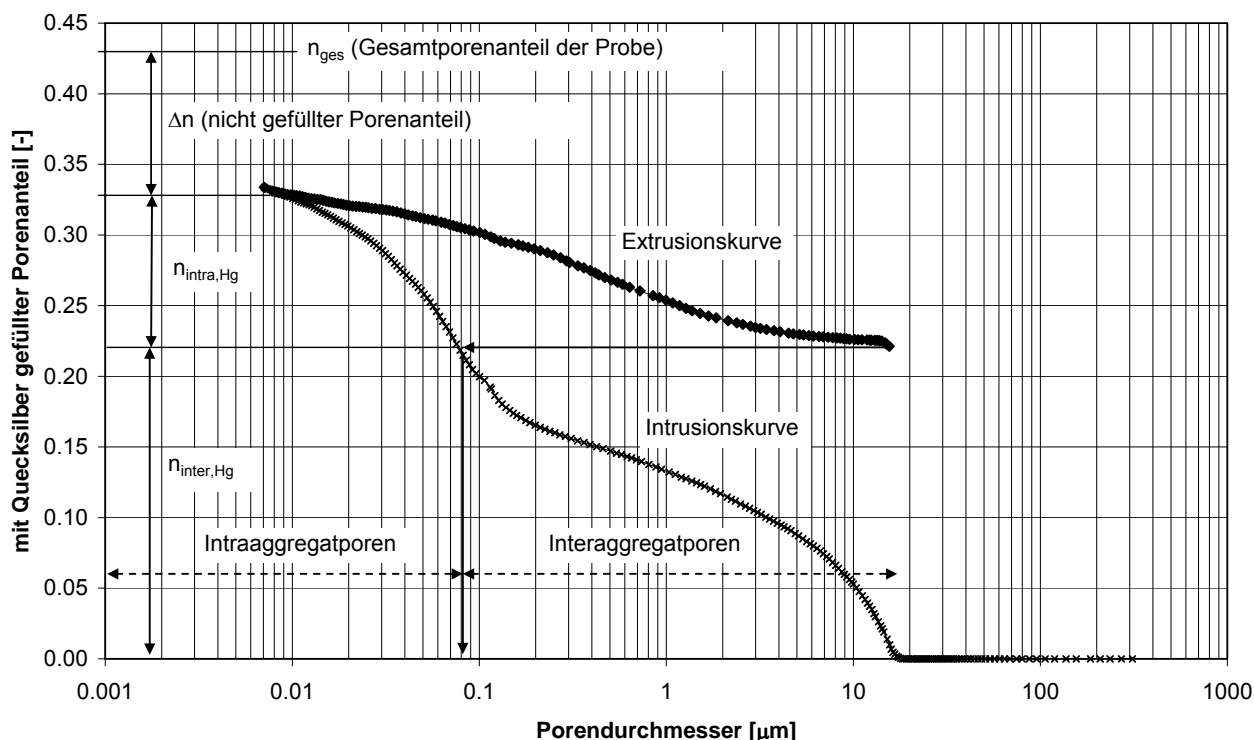


Abb. 6.8: Mit Quecksilber gefüllter Porenanteil im Zuge der Intrusion und Extrusion, Unterscheidung zwischen Intraaggregat- und Interaggregatporen nach DELAGE UND LEFEBVRE (1984)

Nach DELAGE UND LEFEBVRE (1984) kann der am Ende der Extrusion mit Quecksilber gefüllte Porenanteil den Interaggregatporen zugesprochen werden, während der im Zuge der Extrusion geleerte Porenanteil den Intraaggregatporen entspricht. Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen wurde jedoch nicht auf dieses Kriterium von DELAGE UND LEFEBVRE (1984) zurückgegriffen, sondern eine Tangentenkonstruktion an die Intrusionskurve zur Unterscheidung zwischen Inter- und Intraaggregatporen angewandt, auf welche im Detail bei der Diskussion der Ergebnisse eingegangen wird. Denn der Anteil der im Zuge der Extrusion geleerten Poren beruht prinzipiell nur auf dem Effekt unterschiedlicher Porengrößen entlang einer Pore, der unabhängig von der Größe der Poren sowohl bei Interaggregat- als auch Intraaggregatporen vorliegen kann.

Um die Dichteverteilung der Porengrößen zu erhalten, wird zunächst das infolge einer bestimmten Druckerhöhung eingedrungene Quecksilbervolumen bezogen auf das gesamte eingedrungene Quecksilbervolumen ermittelt und dieser Wert anschließend durch die Differenz der den Drücken entsprechenden Porendurchmesser (als logarithmische Werte) geteilt:

$$\frac{-(V_{Hg,i} - V_{Hg,i-1})/V_{Hg,ges}}{\log x_i - \log x_{i-1}} = \frac{-\Delta S_{r_{nw}}}{\log x_i - \log x_{i-1}} \quad (6.4)$$

Die Dichteverteilung ergibt sich schließlich, indem die so ermittelten Werte auf die mittleren Porendurchmesser $(x_i + x_{i-1}) / 2$ bezogen werden. In Abb. 6.9 ist ein Beispiel für eine so ermittelte Dichtefunktion dargestellt. Anhand der Dichtefunktion der Porendurchmesser lassen sich ebenso wie aus der Darstellung des mit Quecksilber gefüllten Porenanteils Aussagen über den Anteil von Intraaggregat- und Interaggregatporen gewinnen.

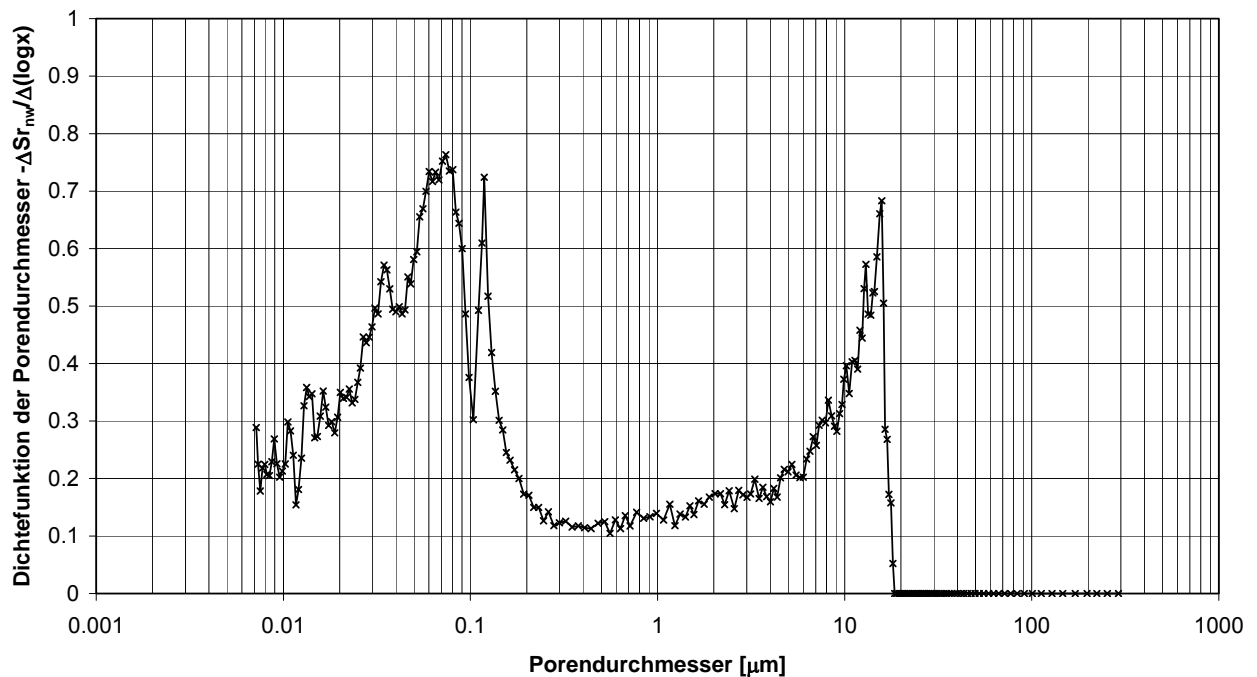


Abb. 6.9: Dichtefunktion der Porendurchmesser

6.4.3 Einflussfaktoren auf die Messergebnisse

Im Hinblick auf die Beurteilung der Ergebnisse ist es wichtig, mögliche Einflussfaktoren auf die Messergebnisse zu erkennen. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um folgende Faktoren (SIMMS UND YANFUL, 2004):

- Auswirkungen der Probenherstellung: Wie bereits in Abschnitt 6.4.2 beschrieben, muss sowohl der Herstellungsprozess als auch die Probentrocknung sehr sorgfältig durchgeführt werden, um eine Störung der Bodenstruktur möglichst gering zu halten.
- Probengröße: Prinzipiell können nur sehr kleine Prüfkörper untersucht werden. Dadurch können lokale Inhomogenitäten das Versuchsergebnis stark prägen. SIMMS UND YANFUL (2002) geben außerdem zu bedenken, dass die Probengröße das Ergebnis beeinflusst, da die Wahrscheinlichkeit, dass sowohl die Intrusion als auch die Extrusion des Quecksilbers durch „Flaschenhalsporen“ behindert wird, mit zunehmender Probengröße zunimmt. Aus diesem Grund sollten in einer Untersuchungsreihe möglichst nur Proben einer ähnlichen Größe untersucht werden.
- Abgeschlossene Poren: Poren, die keine Verbindung zur Probenoberfläche haben, können nicht mit Quecksilber gefüllt werden.
- Feinporen außerhalb des Messbereiches: Poren, die einen kleineren Durchmesser haben als der mit dem maximalen Quecksilberdruck entsprechend Gleichung (6.1) korrespondierende Porendurchmesser, können nicht mit Quecksilber gefüllt werden. Dadurch kann nicht der gesamte Porenraum gefüllt werden und somit wird der aus der eingedrungenen Quecksilbermenge errechnete Porenanteil unterschätzt.
- verwendetes Porenmodell: Das zur Ermittlung der Porengrößenverteilung verwendete Porenmodell geht von einem Bündel zylindrischer Kapillaren mit konstanten Porendurchmessern aus. Tatsächlich handelt es sich bei den Poren im Boden aber nicht um kreiszylindrische Poren mit konstantem Durchmesser, sondern um Poren, deren Form und Größe über die Länge variieren

kann. Damit verbunden ist der bereits in Abschnitt 6.4.2 beschriebene „Flaschenhalseffekt“, der die Messergebnisse stark beeinflussen kann.

- Veränderung der Bodenstruktur durch Aufbringen von äußerem Druck: Da die Bodenprobe während der Versuchsdurchführung einem Druck von bis zu 200 MPa ausgesetzt wird, kann es zu einer Aufweitung des Porenraumes infolge einer elastischen Deformation des Feststoffes kommen. Nach SIMMS UND YANFUL (2004) ist dieser Einfluss außer bei sehr weichen Proben aber vernachlässigbar.
- Deformation des Versuchsapparates: Prinzipiell werden die Ergebnisse auch durch die Verformung des Versuchsapparates beeinflusst. Dieser Faktor kann weitgehend eliminiert werden, indem vor dem eigentlichen Versuch eine Art „Leerlauf“ des Gerätes ohne Probeninhalt durchgeführt wird (WEBB, 2001).

6.4.4 Ableitung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung aus der Quecksilberporosimetrie

Anhand der Ergebnisse einer Quecksilberporosimetrie-Untersuchung lässt sich die Beziehung zwischen Matrixpotential und Sättigungsgrad ableiten. Die theoretischen Zusammenhänge sind ausführlich von ROMERO (1999) beschrieben, der diese Methode im Rahmen von Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen an einem ausgeprägt plastischen Ton angewendet hat. Im Folgenden werden die zugrunde liegenden Zusammenhänge zusammenfassend dargestellt.

Das Eindringen des Quecksilbers in eine Bodenprobe kann mit der Wasserabgabe einer gesättigten Probe infolge einer Erhöhung des Differenzdruckes zwischen Luft- und Wasserdruck verglichen werden (siehe Abb. 6.10).

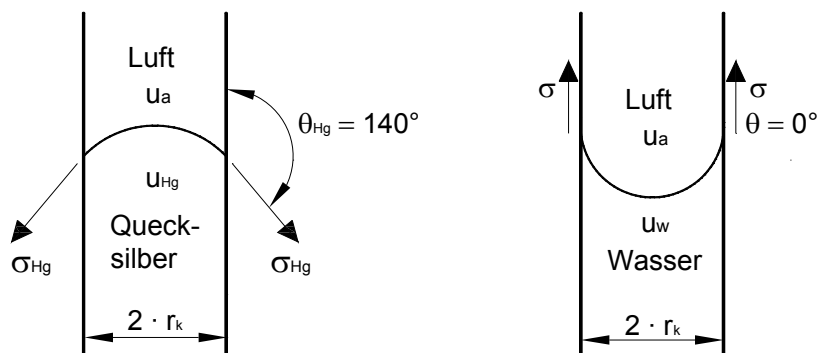


Abb. 6.10: Mit Quecksilber und mit Wasser gefüllte Kapillare

Im Folgenden wird ein Kapillarbündel mit unterschiedlichen Durchmessern betrachtet. Um die Kapillare des Radius r_k mit Quecksilber zu füllen, ist folgender Differenzdruck zwischen Quecksilber und Luft erforderlich:

$$u_{Hg} - u_a = - \frac{2 \cdot \sigma_{Hg} \cdot \cos \theta_{Hg}}{r_k} \quad (6.5)$$

Um dieselbe Kapillare des Radius r_k zu entwässern, muss folgender Differenzdruck zwischen Luft- und Wasserphase vorliegen:

$$u_a - u_w = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r_k} \quad (6.6)$$

Dabei ist σ die Grenzflächenspannung zwischen Wasser und Luft ($\sigma = 0,0727 \text{ N/m}$ bei 20°C) und θ der Benetzungswinkel von Wasser gegenüber dem Feststoff des Bodens an der Grenzfläche zur Luft ($\theta = 0^\circ$).

Löst man die beiden Gleichungen nach dem Kapillarradius auf und setzt sie gleich, erhält man eine Beziehung zwischen den Differenzdrücken der Luft- gegenüber der Wasserphase und des Quecksilbers gegenüber der Luft:

$$u_a - u_w = - \frac{\sigma \cdot \cos \theta}{\sigma_{\text{Hg}} \cdot \cos \theta_{\text{Hg}}} \cdot (u_{\text{Hg}} - u_a) \approx 0,196 \cdot (u_{\text{Hg}} - u_a) \quad (6.7)$$

Dies bedeutet, dass bei dem Differenzdruck ($u_{\text{Hg}} - u_a$) alle Kapillaren mit einem Radius, der größer oder gleich dem Radius r_k ist, mit Quecksilber gefüllt sind. Der Sättigungsgrad der mit Quecksilber gefüllten Poren $S_{r_{\text{nw}}}$ ergibt sich dann zu:

$$S_{r_{\text{nw}}} = \frac{V_{\text{Hg}}}{V_{\text{Hg, ges}}} \quad (6.8)$$

Für das Analogiemodell der wassergefüllten Probe ergibt sich bei Vorliegen des Differenzdruckes ($u_a - u_w$) ein Zustand, bei dem alle Poren, die einen Radius größer oder gleich dem Radius r_k aufweisen, mit Luft gefüllt sind (siehe [Abb. 6.11](#)). Das bedeutet, dass bei Vorliegen der Differenzdrücke entsprechend Gleichung (6.7) die Summe des Sättigungsgrades der mit Quecksilber gefüllten Poren ($S_{r_{\text{nw}}}$) und der mit Wasser gefüllten Poren (S_r) gerade 1 ergeben muss:

$$S_{r_{\text{nw}}} + S_r = 1 \quad (6.9)$$

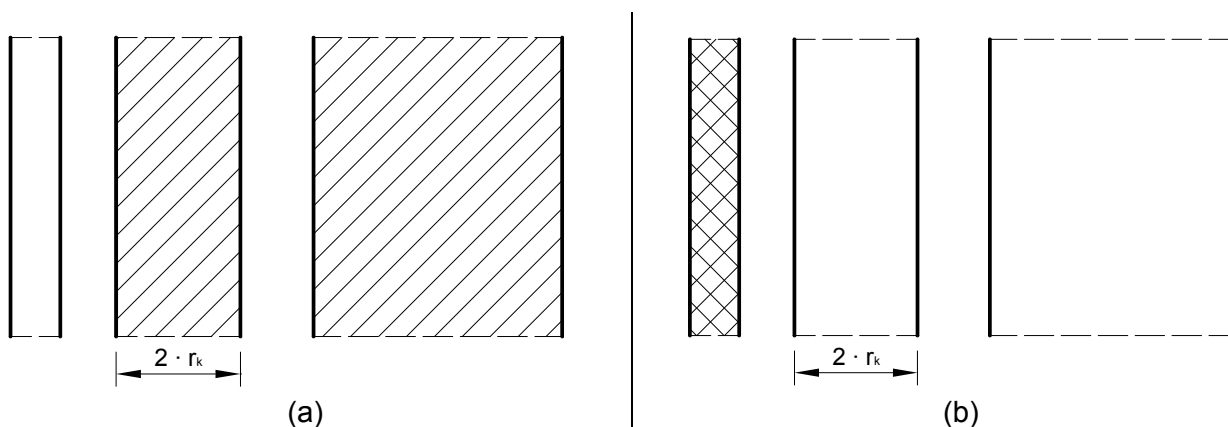


Abb. 6.11: Befüllzustand eines Kapillarbündels mit Quecksilber (a) und Wasser (b) bei Vorliegen der Differenzdrücke zwischen Quecksilber und Luft bzw. Wasser und Luft nach Gleichung (6.7)

Damit kann für eine Probe eine Beziehung zwischen dem Wassergehalt und dem Sättigungsgrad mit Quecksilber aufgestellt werden:

$$w = \frac{e_{MIP} \cdot Sr \cdot \rho_w}{\rho_s} = \frac{e_{MIP} \cdot (1 - Sr_{nw}) \cdot \rho_w}{\rho_s} = w_{sat} \cdot (1 - Sr_{nw}) \quad (6.10)$$

Dabei sind w_{sat} der Wassergehalt der Probe bei einem Sättigungsgrad $Sr = 1$ und e_{MIP} die aus der Quecksilberporosimetrie ermittelte Porenzahl. Unberücksichtigt bleibt in dieser Gleichung jedoch Absorptionswasser, das bei der Gefrietrocknung nicht entfernt werden kann und die Tatsache, dass nicht alle Poren mit Quecksilber erreicht werden. Aus diesem Grunde muss die Gleichung (6.10) korrigiert werden. Dazu wird zunächst aus der gemessenen Gesamtporenzahl e und der aus der Quecksilberporosimetrie abgeleiteten Porenzahl e_{MIP} die Porenzahl e_r bestimmt, die die nicht mit Quecksilber gefüllten Poren berücksichtigt:

$$e_r = e - e_{MIP} \quad (6.11)$$

Mit diesem Zusammenhang können die Gleichungen (6.9) und (6.10) folgendermaßen korrigiert werden:

$$Sr = (1 - Sr_{nw}) + \frac{e_r}{e} \cdot Sr_{nw} \quad (6.12)$$

$$w = \frac{[(e - e_r) \cdot (1 - Sr_{nw}) + e_r] \cdot \rho_w}{\rho_s} \quad (6.13)$$

Mit Hilfe von Gleichung (6.13) lässt sich aus einer Quecksilberporosimetrie-Untersuchung unter der Annahme einer konstanten Porenzahl eine Beziehung zwischen Saugspannung und Wassergehalt bzw. Saugspannung und Sättigungsgrad ermitteln.

Bei der Ermittlung der Sauspannungs-Wassergehalts-Beziehung mit Hilfe der Quecksilberporosimetrie ist zu beachten, dass die typischerweise bei einer Entwässerung des Bodens auftretende Veränderung der Porenstruktur infolge des Schrumpfens des Bodens nicht berücksichtigt wird. Die aus Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen abgeleiteten Sauspannungs-Wassergehalts-Beziehungen können deshalb von den mit Hilfe von Saugspannungsmessungen ermittelten Beziehungen deutlich abweichen. Umfangreiche Untersuchungen zur Veränderung der Porenstruktur infolge der Entwässerung des Bodens wurden von SIMMS UND YANFUL (2002) durchgeführt.

6.4.5 Ergebnisse und Interpretation

6.4.5.1 Lias-Ton

In der Abb. 6.12 sind die angestrebten und nach der Verdichtung erzielten Trockendichten und Wassergehalte der einzelnen Probekörper des Lias-Tons dargestellt. Die Unterschiede zwischen den erzielten und angestrebten Dichten sind auf die starke Abhängigkeit der Dichte von der Dicke der Probekörper bei den zugrunde liegenden geringen Probenabmessungen zurückzuführen. Danach wirkt sich bereits eine sehr geringe Änderung der Dicke der Prüfkörper (z. B. durch entlastungsbedingte Schwellvorgänge) sehr stark auf die Dichte der Proben aus. Der Wassergehalt der Probe

Pm8 lag etwa 0,5 % oberhalb des angestrebten Wassergehaltes, was folgerichtig zu einer geringeren Dichte führte.

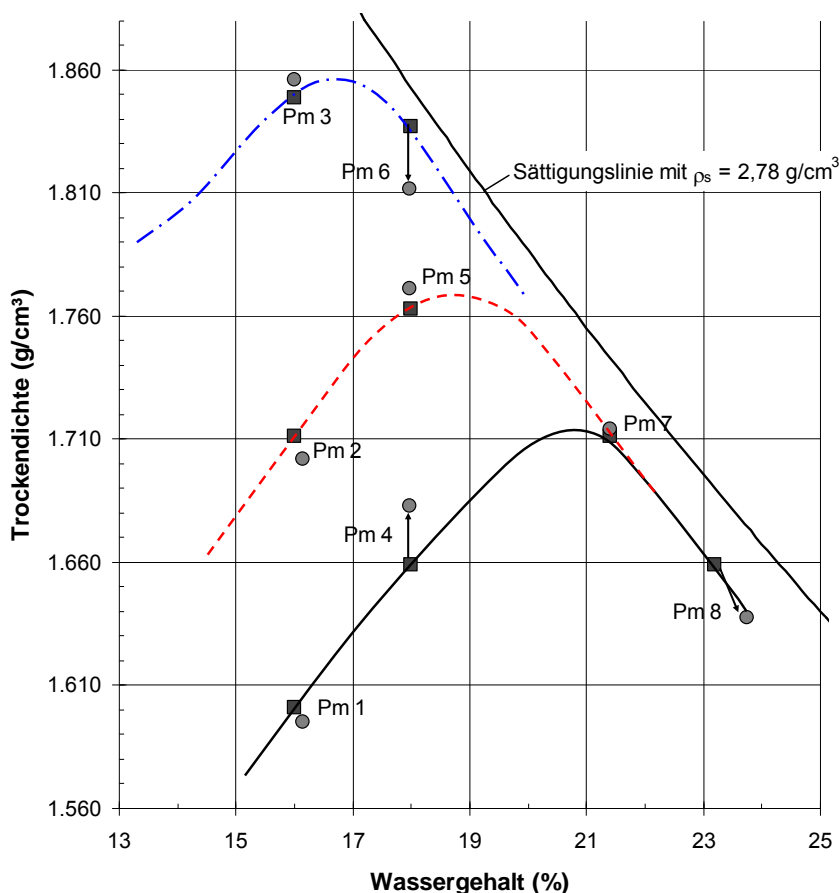


Abb. 6.12: Angestrebte (eckig) und erzielte (rund) Einbauzustände der Probekörper des Lias-Tons für die Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen

Die bei Wassergehalten unter dem Standard-Proctoroptimum verdichteten Proben Pm1 bis Pm6 weisen eine bimodale Porenstruktur auf. Die Abgrenzung zwischen Intraaggregat- und Interaggregatporen wurde für die einzelnen Proben anhand einer Tangentenkonstruktion an die Intrusionskurven, welche den mit Quecksilber gefüllten Porenraum gegenüber dem Porendurchmesser darstellen, durchgeführt. Exemplarisch ist dies für die Probe Pm1 in [Abb. 6.13](#) dargestellt. Für die übrigen Proben sind die entsprechenden Diagramme im Anhang A1 ([Abb. A1.1](#) bis [Abb. A1.7](#)) enthalten. Im Zuge der Intrusion werden zunächst die größeren Poren zwischen den Aggregaten (Interaggregatporen) mit Quecksilber gefüllt. Mit zunehmender Befüllung der Interaggregatporen flacht sich die Kurve ab. Das Eindringen des Quecksilbers in die kleineren Poren innerhalb der Aggregate (Intraaggregatporen) wird anschließend aus einem Anstieg der Kurve deutlich. Mit Hilfe der in [Abb. 6.13](#) dargestellten Tangentenkonstruktion an die Wendepunkte der Intrusionskurve lässt sich der Intraaggregatporenraum vom Interaggregatporenraum abgrenzen. Auf diese Weise kann auch die Eintrittsporengröße der Intraaggregatporen bestimmt werden.

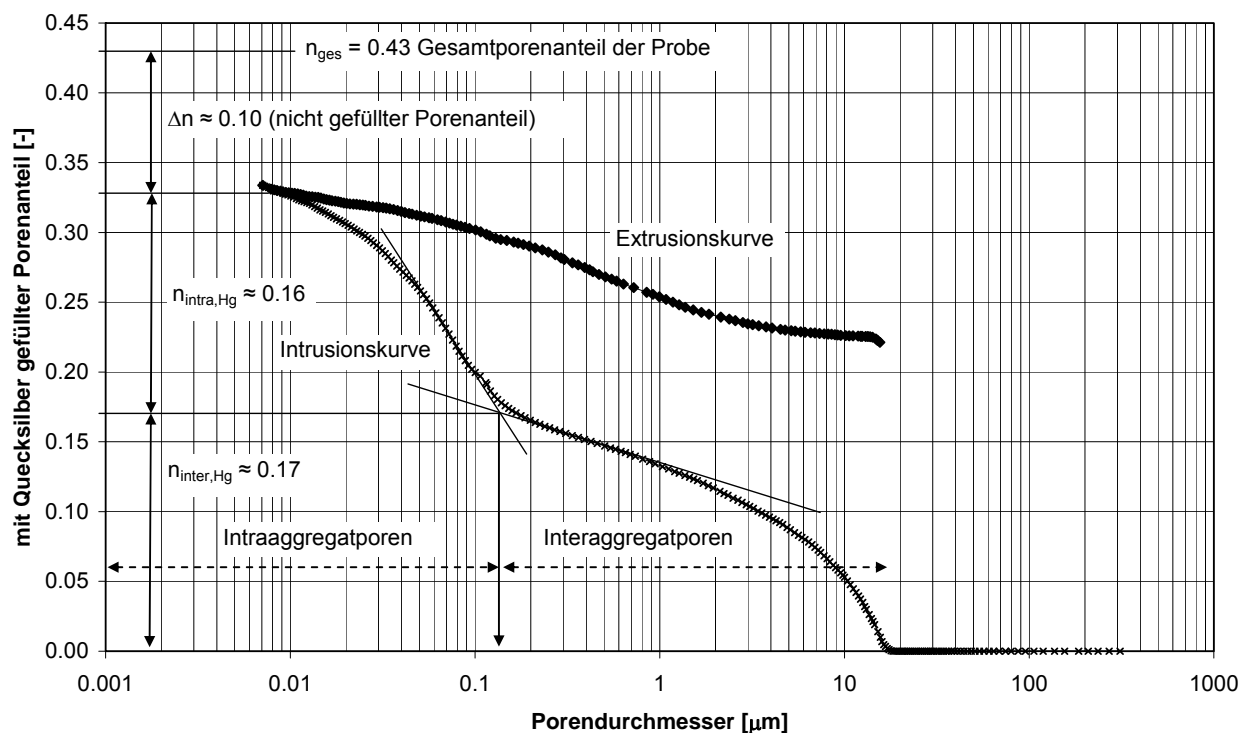


Abb. 6.13: Intrusions- und Extrusionskurven der Probe Pm1

Die [Abb. 6.14](#) und die [Abb. 6.15](#) stellen die Beziehungen zwischen dem mit Quecksilber gefüllten Porenanteil und dem Porendurchmesser für die Proben Pm1, Pm2, Pm3 sowie Pm4, Pm5 und Pm6 dar. Die Eintrittsporengöße der Intraaggregatporen beträgt für die Proben Pm1, Pm2 und Pm3 jeweils etwa $0,12 \mu\text{m}$, für die Proben Pm4, Pm5 und Pm6 liegt sie zwischen $0,12 \mu\text{m}$ und $0,2 \mu\text{m}$. Vergleicht man die Intrusionskurven, der bei gleichem Wassergehalt aber unterschiedlichen Dichten hergestellten Proben Pm1, Pm2, Pm3 sowie Pm4, Pm5 und Pm6 miteinander, erkennt man, dass der Interaggregatporenraum mit zunehmender Dichte abnimmt.

Aus der [Abb. 6.13](#) ist erkennbar, dass nicht alle Poren mit Quecksilber gefüllt wurden. Dies liegt an dem mit dem Porosimeter maximal möglichen Quecksilberdruck von 207 MPa, womit ein minimaler Porendurchmesser von $0,007 \mu\text{m}$ gefüllt werden kann. Kleinere Poren können damit nicht erreicht werden. Der Intraaggregatporenraum n_{intra} ergibt sich aus dem mit Quecksilber gefüllten Intraaggregatporenraum $n_{\text{intra,Hg}}$ sowie aus dem mit Quecksilber nicht erreichten Porenraum Δn . In [Tab. 6.3](#) sind die aus der Quecksilberporosimetrie abgeleiteten Porenanteile und Porenzahlen für die Proben Pm1 bis Pm8 zusammengefasst. Vergleicht man die Proben Pm1 und Pm2, erkennt man, dass der Interaggregatporenanteil der höher verdichteten Probe Pm2 deutlich geringer ist, gleichzeitig aber der Intraaggregatporenraum der Probe Pm2 größer ist. Dies kann auf die größere Dichte der Probe Pm2 und auf die damit größere Anzahl an Aggregaten zurückgeführt werden. Unter der Annahme, dass die Aggregate durch die Verdichtung in ihrer Struktur nicht wesentlich verändert werden, hängt der Intraaggregatporenraum direkt von der Anzahl der Aggregate bzw. der Feststoffmasse ab. Betrachtet man dagegen die Intraaggregatporenzahl, bleibt diese näherungsweise konstant, da dazu das Intraaggregatporenvolumen auf das Feststoffvolumen bezogen wird. Diese Überlegungen gelten in gleicher Weise für die bei demselben Wassergehalt aber mit unterschiedlichen Dichten hergestellten Prüfkörpern Pm4 und Pm5.

Prüfkörper	nach Verdichtung			aus Quecksilberporosimetrie								
	w	ρ_d	n_{ges}	e_{ges}	Δn	$n_{intra,Hg}$	n_{intra}	Δe	$e_{intra,Hg}$	e_{intra}	$n_{inter,Hg} = n_{inter}$	$e_{inter,Hg} = e_{inter}$
	[%]	[g/cm ³]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Pm1	16.14	1.595	0.43	0.74	0.10	0.16	0.26	0.24	0.29	0.53	0.17	0.21
Pm2	16.14	1.702	0.39	0.63	0.12	0.18	0.30	0.26	0.27	0.53	0.09	0.10
Pm3	16.00	1.856	0.33	0.50	0.04	0.22	0.26	0.10	0.31	0.41	0.07	0.09
Pm4	17.97	1.683	0.39	0.65	0.07	0.20	0.27	0.18	0.33	0.51	0.12	0.14
Pm5	17.97	1.771	0.36	0.57	0.11	0.20	0.31	0.23	0.29	0.52	0.05	0.05
Pm6	17.97	1.812	0.35	0.53	0.08	0.23	0.31	0.17	0.32	0.49	0.04	0.04
Pm7	21.40	1.714	0.38	0.62	0.09	0.26	0.35	0.20	0.38	0.58	0.03	0.04
Pm8	23.74	1.637	0.41	0.70	0.10			0.25				

Tab. 6.3: aus der Quecksilberporosimetrie abgeleitete Porenanteile und -zahlen

Anders stellt sich die Situation bei den hochverdichteten Proben Pm3 und Pm6 dar. Gegenüber den etwas geringer verdichteten Proben Pm2 und Pm5 weisen diese trotz der größeren Dichte nur einen geringfügig kleineren Interaggregatporenanteil auf. Außerdem ist für die Probe Pm3 eine Reduzierung der Intraaggregatporenzahl gegenüber den geringer verdichteten Proben Pm2 und Pm1 erkennbar. Dies deutet darauf hin, dass bei sehr hohen Verdichtungsarbeiten nicht mehr nur die Interaggregatporen reduziert werden, sondern auch die Aggregate komprimiert und dadurch der Intraaggregatporenraum reduziert wird. Aufgrund der geringen Probekörpergröße ist aber zu beachten, dass bereits sehr geringe Störungen im Zuge der Prüfkörperherstellung einen großen Einfluss auf die Messergebnisse der Quecksilberporosimetrie haben. Vermutlich auf derartige Störungen ist auch die Tatsache zurückzuführen, dass die Probe Pm3 einen größeren maximalen Porendurchmesser aufweist als der Prüfkörper Pm2, der mit einer geringeren Dichte hergestellt wurde (siehe Abb. 6.14).

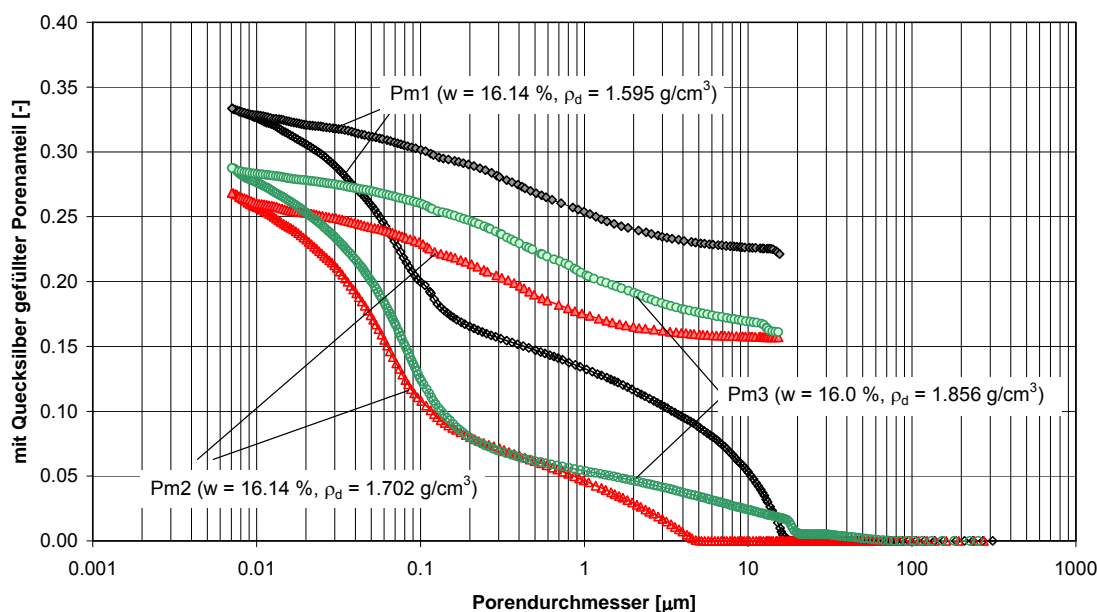


Abb. 6.14: Intrusions- und Extrusionskurven der Proben Pm1, Pm2 und Pm3

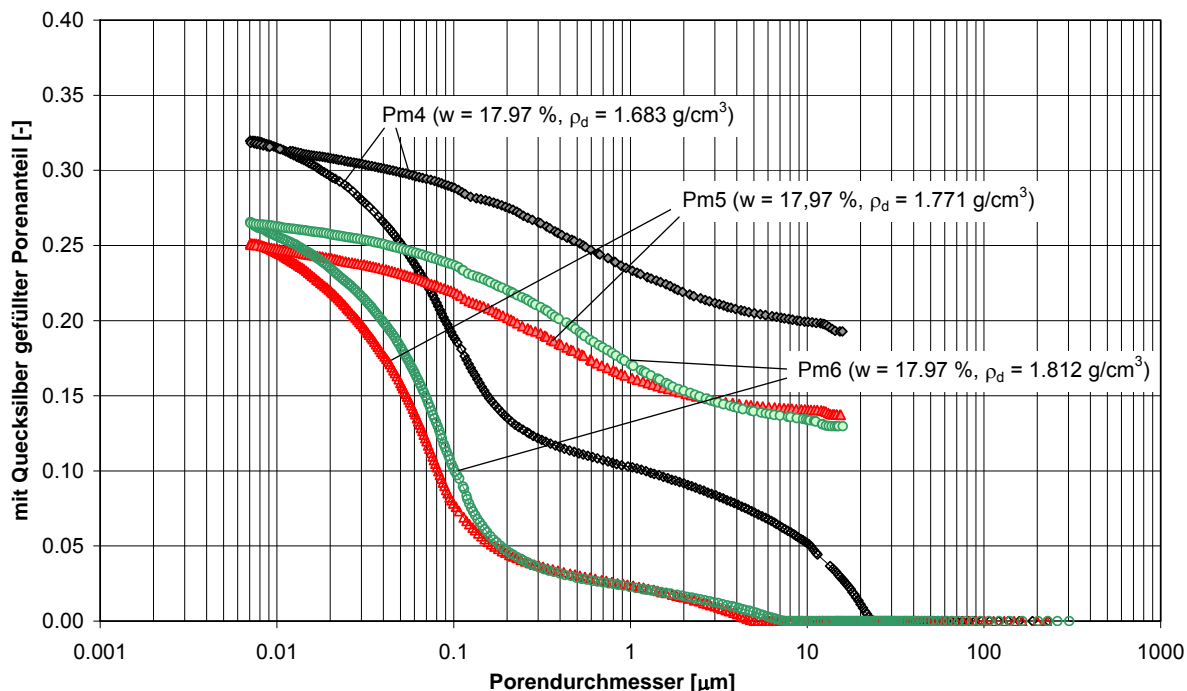


Abb. 6.15: Intrusions- und Extrusionskurven der Proben Pm4, Pm5 und Pm6

In Abb. 6.16 und Abb. 6.17 sind die Dichtefunktionen der Porendurchmesser getrennt für die Proben Pm1, Pm2, Pm3 und Pm4, Pm5 und Pm6 dargestellt. Eine bimodale Form ist insbesondere bei den relativ gering verdichteten Proben Pm1 und Pm4 erkennbar. Wie bereits beschrieben nehmen die Interaggregatporen mit zunehmender Dichte stark ab. Gleichzeitig nehmen die Intraaggregatporen in der Dichteverteilung mit zunehmender Dichte zu. Ähnliche Erkenntnisse stellten auch LI UND ZHANG (2009) in ihren Untersuchungen fest.

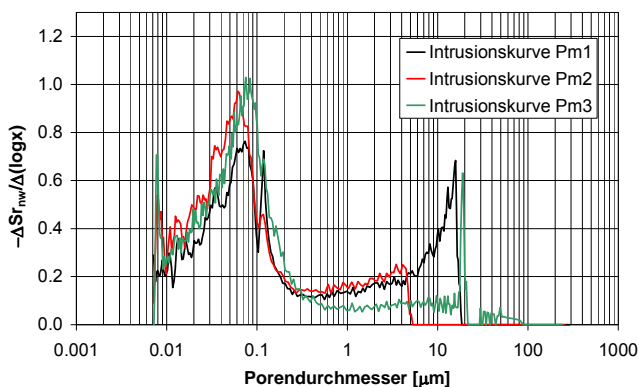


Abb. 6.16: Dichtefunktion der Porendurchmesser der Proben Pm1, Pm2 und Pm3

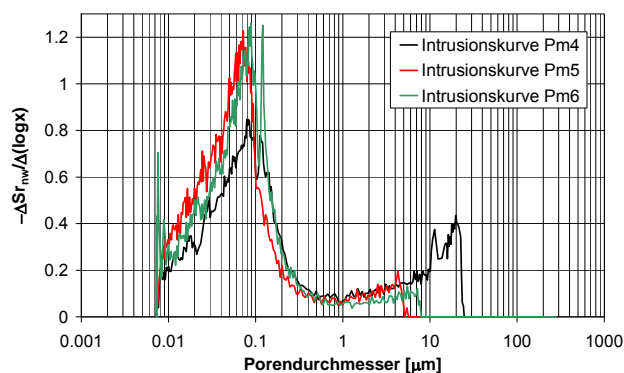


Abb. 6.17: Dichtefunktion der Porendurchmesser der Proben Pm4, Pm5 und Pm6

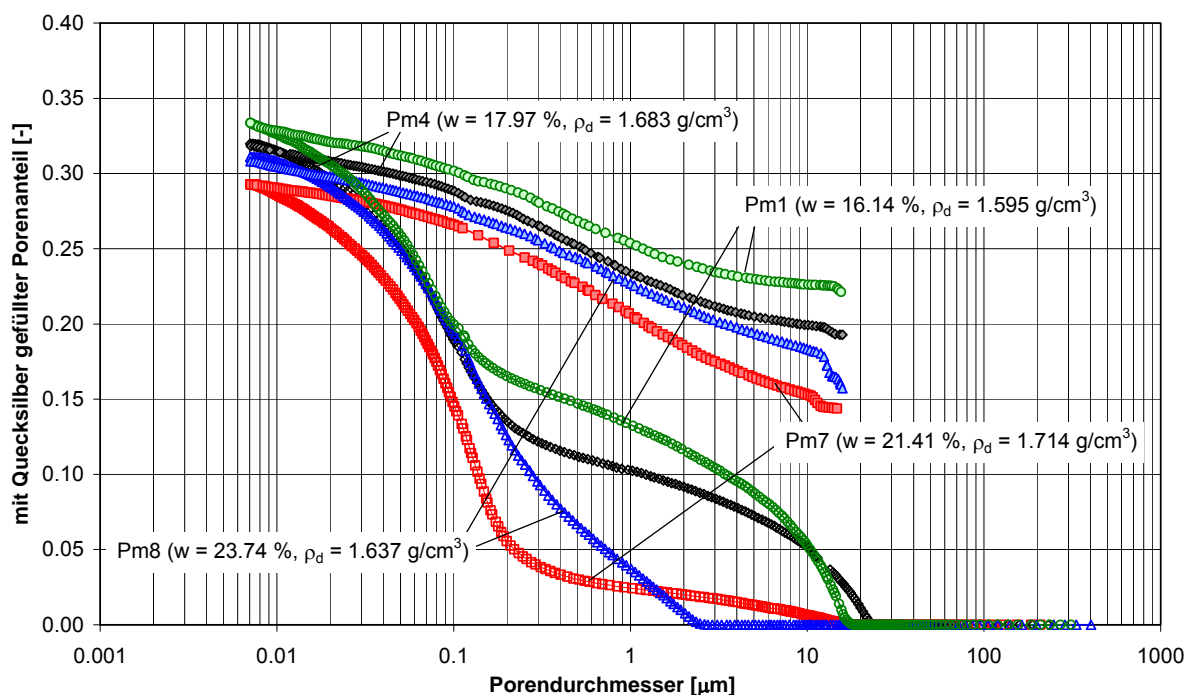


Abb. 6.18: Kumulativer Intrusions-Porenanteil der Prüfkörper Pm1, Pm4, Pm7 und Pm8

In der Abb. 6.18 ist der mit Quecksilber gefüllte Porenanteil in Abhängigkeit vom Porendurchmesser für die Proben Pm1, Pm4, Pm7 und Pm8 dargestellt. Diese vier Proben liegen etwa auf der Standard-Proctorkurve, d.h. sie wurden bei etwa gleichem Energieeintrag verdichtet. Die Proben Pm4 und Pm7 weisen zudem etwa gleiche Trockendichten auf. Der Wassergehalt der Probe Pm7 liegt etwa im Bereich des optimalen Proctorwassergehaltes (Standard-Proctorversuch). Wie bereits erwähnt weist die Probe Pm8 aufgrund des etwas erhöhten Wassergehaltes eine geringere Dichte auf als angestrebt. Die klare bimodale Verteilung der Proben Pm1 und Pm4 ist noch ansatzweise bei der Probe Pm7, jedoch nicht bei der Probe Pm8 erkennbar. Auffallend ist, dass die Intrusionskurven der Proben Pm1, Pm4 und Pm8 im Porenbereich zwischen $0,05 \mu\text{m}$ und $0,1 \mu\text{m}$ zusammenfallen. Wesentliche Unterschiede sind im Bereich der Interaggregatporen zu erkennen. Die Größe und Verteilung der Interaggregatporen wird demnach maßgeblich vom Wassergehalt beeinflusst. Dabei ist zu erkennen, dass die Anzahl der größeren Poren mit zunehmendem Wassergehalt abnimmt. Deutlich sichtbar wird dieses Verhalten aus der in Abb. 6.19 dargestellten Porengrößenverteilungen und der in Abb. 6.20 dargestellten Dichtefunktionen der Porendurchmesser der vier Proben.

Mit zunehmendem Wassergehalt nehmen die bei den Proben Pm1 und Pm4 ausgeprägten Interaggregatporen mit einem Durchmesser zwischen $5 \mu\text{m}$ und $20 \mu\text{m}$ stark ab und gleichzeitig die Anteile der Poren mit einem Durchmesser zwischen $0,1 \mu\text{m}$ und $5 \mu\text{m}$ zu. Dies beruht vermutlich auf der geringeren Steifigkeit der Aggregate mit zunehmendem Wassergehalt, wodurch die größeren Interaggregatporen im Zuge der Verdichtung durch die sich verformenden Aggregate geschlossen werden. Bei sehr hohen Wassergehalten wie bei der Probe Pm8 wird die vor der Verdichtung existierende Aggregatstruktur durch die Verdichtungsenergie so stark homogenisiert, dass eine bimodale Porenstruktur nicht mehr erkennbar ist. Ähnliche Ergebnisse wurden auch von DELAGE ET

AL. (1996), VANAPALLI ET AL. (1999), TINJUM ET AL. (1997) und TARANTINO UND TOMBOLATO (2005) ermittelt.

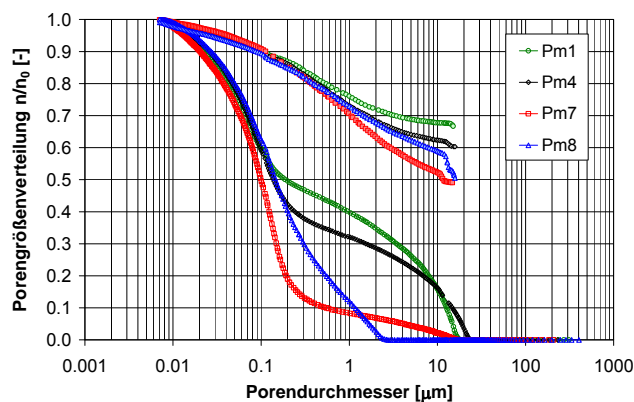


Abb. 6.19: Porengrößenverteilung der Proben Pm1, Pm4, Pm7 und Pm8

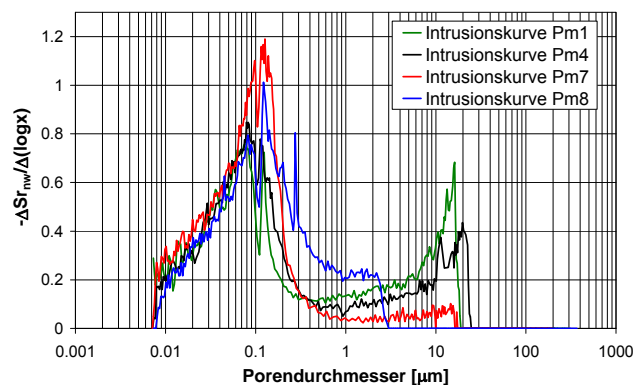


Abb. 6.20: Dichtefunktion der Porendurchmesser der Proben Pm1, Pm4, Pm7 und Pm8

Aus den Ergebnissen der Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen wurden Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 6.4.4 abgeleitet. Zur Ermittlung des Wassergehalts wie auch zur Ermittlung des Sättigungsgrades ist die Kenntnis der Dichte der Proben erforderlich. Da die Dichte der herausgearbeiteten Prüfkörper aufgrund ihrer unregelmäßigen Form nicht zerstörungsfrei bestimmt werden konnte, wurde für die Auswertung wiederum die Dichte sowie der Wassergehalt der verdichteten Rohlinge, aus denen die Prüfkörper herausgearbeitet wurden, herangezogen. Dichteänderungen infolge der Prüfkörperherstellung bleiben somit unberücksichtigt.

Die bimodale Porenstruktur spiegelt sich auch in den abgeleiteten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen wieder. Aus der [Abb. 6.21](#) und der [Abb. 6.22](#) ist zu erkennen, dass die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der Proben Pm1, Pm2, Pm3 und Pm4, Pm5, Pm6 bei höheren Saugspannungen teilweise übereinander liegen. Dies ist zu erwarten, wenn die Aggregate und damit auch die Intraaggregatporen durch die Verdichtung unbeeinflusst bleiben. Es ist zu erkennen, dass sich die Probe Pm3 anders verhält. Vermutlich wurde die Probe während der Prüfkörperherstellung aufgelockert. Stellt man die Saugspannungen gegenüber dem Sättigungsgrad dar, liegen die Kurven der bei gleichem Wassergehalt aber unterschiedlicher Dichte hergestellten Proben Pm1, Pm2, Pm3 und Pm4, Pm5, Pm6 aufgrund der unterschiedlichen Dichten jedoch nicht übereinander, auch wenn die Intraaggregatporen von der Verdichtung unbeeinflusst bleiben (siehe [Abb. 6.23](#)).

Die [Abb. 6.24](#) stellt die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der auf der Standard-Proctorkurve gelegenen Proben Pm1, Pm4, Pm7 und Pm8 dar. Wie bereits aus der Porengrößenverteilung der Proben erkennbar war, wirkt sich der unterschiedliche Einbauwassergehalt überwiegend auf die Interaggregatporen aus. Im Bereich der sehr kleinen Intraaggregatporen dagegen zeigen sich keine relevanten Unterschiede. Dementsprechend liegen die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen im hohen Saugspannungsbereich (> 1500 kPa) fast übereinander.

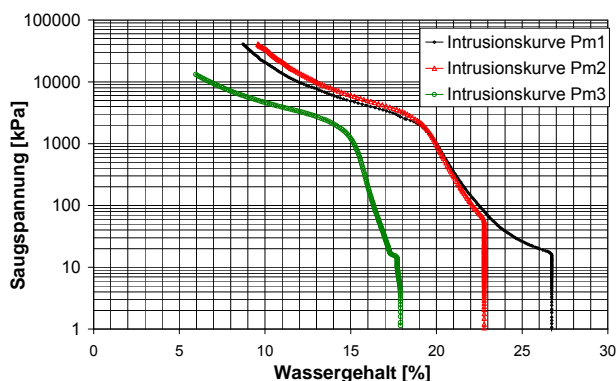


Abb. 6.21: Aus der Quecksilberporosimetrie abgeleitete Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der Proben Pm1, Pm2 und Pm3

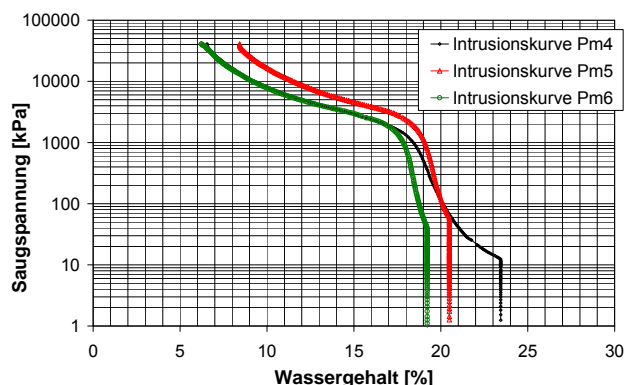


Abb. 6.22: Aus der Quecksilberporosimetrie abgeleitete Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der Proben Pm4, Pm5 und Pm6

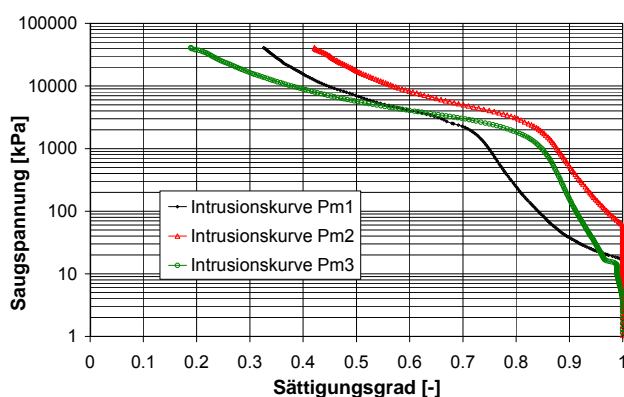


Abb. 6.23: Aus der Quecksilberporosimetrie abgeleitete Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehungen der Proben Pm1, Pm2 und Pm3

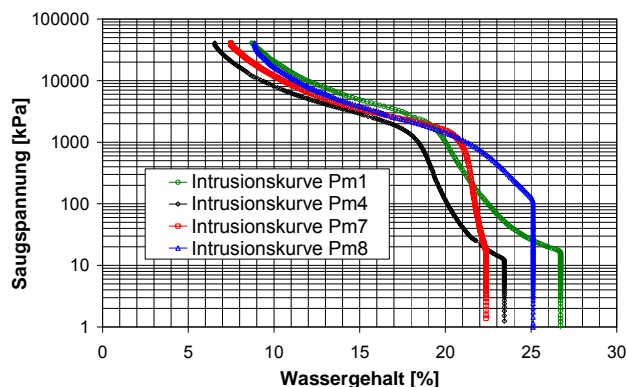


Abb. 6.24: Aus der Quecksilberporosimetrie abgeleitete Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der Proben Pm1, Pm4, Pm7 und Pm8

6.4.5.2 Lösslehm

Am Lösslehm wurde die Quecksilberporosimetrie an den Probekörpern L-Pm1, L-Pm3, L-Pm4 und L-Pm8 durchgeführt. Wie die Abb. 6.25 zeigt, wurden im Zuge der Probekörperherstellung die angestrebten Trockendichten und Wassergehalte sehr gut erreicht. Allerdings konnten die Proben erst zwei Wochen nach Herstellung untersucht werden und hatten bis zur Gefrietrocknung bereits eine Wassergehaltsabnahme von 3,5 % (L-Pm3, L-Pm4), 4,5 % (L-Pm1) bzw. 10 % (L-Pm8) erlitten. Infolge der damit verbundenen Schrumpfverformungen sind die durchgeführten Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses des Einbauzustandes auf die Porenstruktur nur eingeschränkt aussagekräftig.

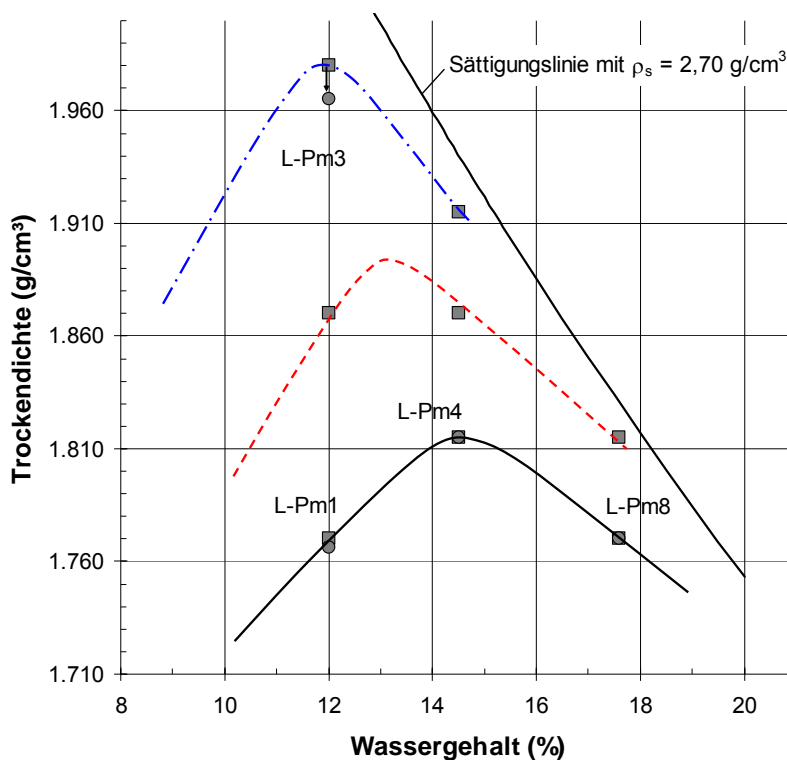


Abb. 6.25: Angestrebte (eckig) und erzielte (rund) Einbauzustände der Probekörper des Lösslehms für die Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen

Die Untersuchungen am Lösslehm wurden mit dem Quantachrome Poremaster 60 durchgeführt. Dabei wurden der niedrige und hohe Druckbereich getrennt voneinander untersucht. Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse ist zu beachten, dass im niedrigen Druckbereich zunächst die Probenkammer mit Quecksilber gefüllt werden muss, bevor das Quecksilber in die Proben eindringen kann. Aus den Versuchsdaten war allerdings nicht eindeutig zu klären, zu welchem Zeitpunkt die Probenkammer mit Quecksilber gefüllt war und wann das Quecksilber erstmalig in die Proben eingedrungen ist. Vor diesem Hintergrund konnte eine systematische Auswertung nur für den hohen Druckbereich durchgeführt werden. Das bedeutet allerdings, dass aus den Daten keine Informationen über den Porenraum mit Porendurchmessern größer 9 μm abgeleitet werden konnten.

Die Dichtefunktionen der Porendurchmesser der Proben sind in der [Abb. 6.26](#) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die auf der nassen Seite der Proctorkurve verdichtete Probe L-Pm8 eine ähnliche Verteilung aufweist wie die bei einem Wassergehalt auf der trockenen Seite des Proctroptimums, allerdings bei einer sehr großen Dichte hergestellte Probe L-Pm3. Dies ist auf die starke Wassergehaltsabnahme und damit verbundene Schrumpfung der Probe L-Pm8 zurück zu führen. Deutliche Unterschiede in der Porengrößenverteilung sind zwischen den Proben L-Pm1 und L-Pm3 zu erkennen, die bei gleichem Einbauwassergehalt aber unterschiedlichen Dichten hergestellt wurden. So weist die Probe L-Pm1 aufgrund der geringeren Dichte einen deutlich größeren Anteil an Poren mit Durchmessern zwischen 2 μm und 10 μm auf. Im Vergleich zum Lias-Ton ist dabei im betrachteten Größenbereich allerdings keine ausgeprägte bimodale Form der Dichtefunktion zu erkennen. Es ist aber anzunehmen, dass die Größe der Aggregate und der darin befindlichen Intraaggregatporen durch die unplanmäßige Trocknung eine Volumenabnahme erfahren haben und sich dadurch die Dichteverteilungen der Proben im Vergleich zum Einbauzustand etwas enger darstellen.

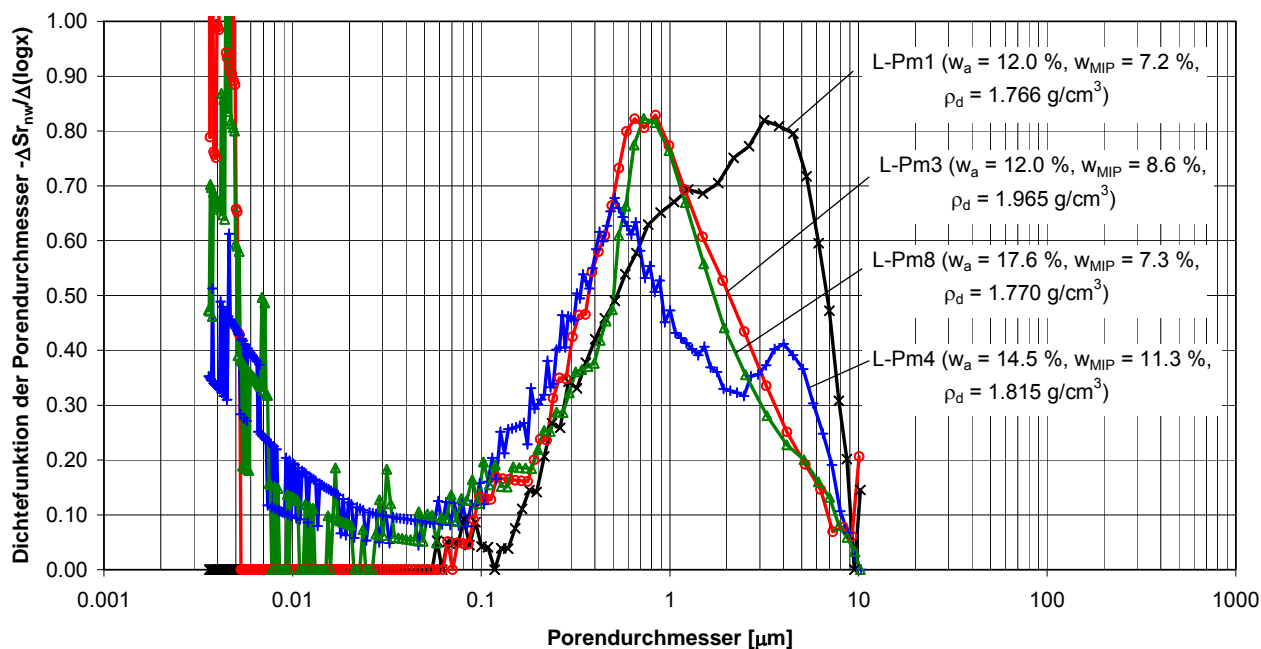


Abb. 6.26: Dichtefunktion der Porendurchmesser für die Proben des Lösslehms

6.4.5.3 Ton mit organischen Beimengungen

Bei der Herstellung der Probekörper zeigte sich, dass bei einem Einbauwassergehalt von 55 % keine ausreichend stabilen Probekörper herstellbar waren, da der Boden aufgrund des vergleichsweise geringen Wassergehaltes so bröckelig war, dass es bei dem in Abschnitt 6.4.2 beschriebenen Herausbrechen der Probekörper zu einer Zerstörung der Bodenstruktur kam. Dementsprechend musste der Wassergehalt etwas erhöht werden und betrug für den Probekörper der „trockenen“ Einbaubedingung 62 %. Der Wassergehalt des Probekörpers der „nassen“ Einbaubedingung lag bei 77 %. Als Trockendichten wurden $0,79 \text{ g/cm}^3$ für die trockene und $0,80 \text{ g/cm}^3$ für die nasse Einbaubedingung erreicht.

In der Abb. 6.27 ist der mit Quecksilber gefüllte Porenanteil in Abhängigkeit vom Porendurchmesser für die beiden Probekörper dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die bei einem Wassergehalt von 62 % verdichtete Probe ähnlich wie die auf der trockenen Seite des Proctoroptimums verdichteten Proben des Lias-Tons eine bimodale Porenstruktur aufweist. Mit Hilfe der in Abschnitt 6.4.5.1 beschriebenen Tangentenkonstruktion lässt sich der Intraaggregatporenraum vom Interaggregatporenraum abgrenzen. Die auf diese Weise bestimmte Eintrittsporengröße der Intraaggregatporen beträgt ca. $4 \mu\text{m}$.

Bei Porendurchmessern $< 3 \mu\text{m}$ liegen die beiden Kurven wiederum näherungsweise übereinander. Der nicht gefüllte Porenanteil ist bei beiden Proben gering und beträgt 0,04 (trocken) bzw. 0,05 (nass) bei einem Gesamtporenanteil der beiden Proben von jeweils 0,66.

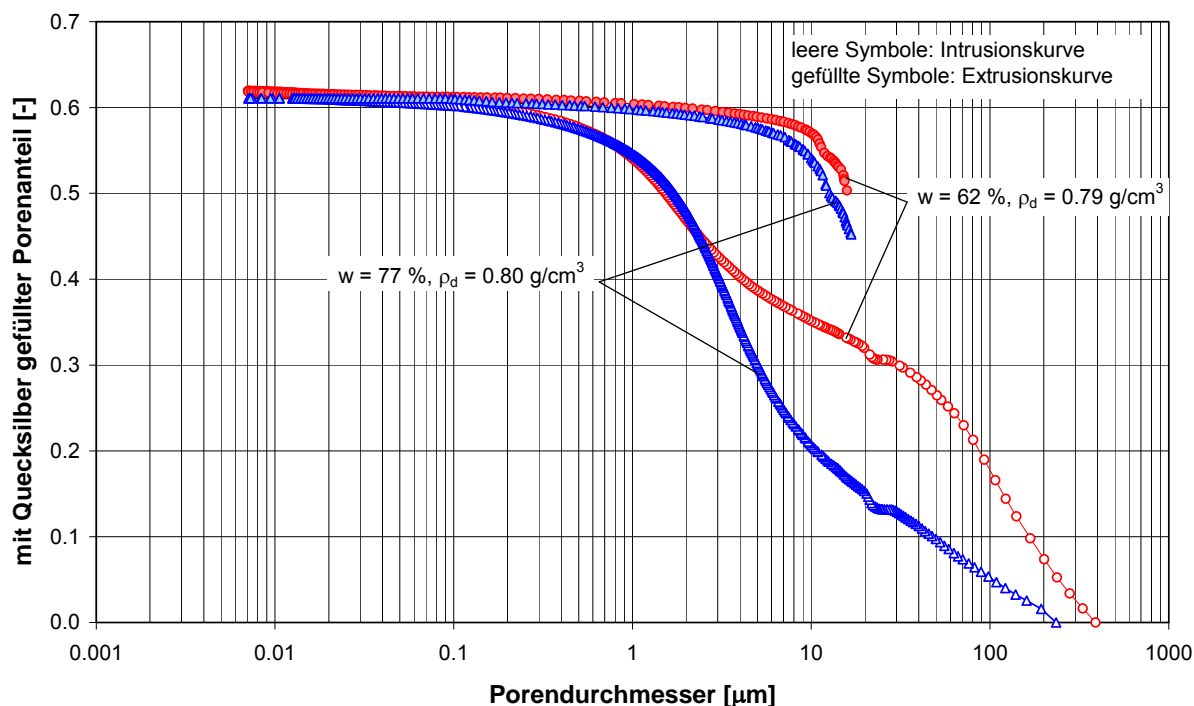


Abb. 6.27: Intrusions- und Extrusionskurven der Proben des Tons mit organischen Beimengungen mit $w_a = 62\%$ und $w_a = 77\%$

Die Dichtefunktionen der Porendurchmesser der beiden Prüfkörper sind in [Abb. 6.28](#) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich im Falle der „nass“ verdichteten Probe eine unimodale Porengrößenverteilung mit einem Maximum der Dichtefunktion bei einem Porendurchmesser von etwa $2,5 \mu\text{m}$ einstellt. Für die „trocken“ verdichtete Probe ist eine bimodale Porengrößenverteilung mit Maxima bei Porendurchmessern von $1,5 \mu\text{m}$ und $80 \mu\text{m}$ erkennbar. Die Unterschiede beruhen auf den vom Wassergehalt abhängigen unterschiedlichen Eigenschaften der Bodenaggregate. Bei höheren Wassergehalten stellen sich weichere, deformierbarere Aggregate ein, die sich im Zuge der Verdichtung verformen und dadurch eine unimodale Porengrößenverteilung erzeugen. Bei niedrigen Wassergehalten liegen deutlich steifere Aggregate vor, die zu einem nennenswerten Makroporenanteil zwischen den Aggregaten nach der Verdichtung führen. (BIRLE, 2010)

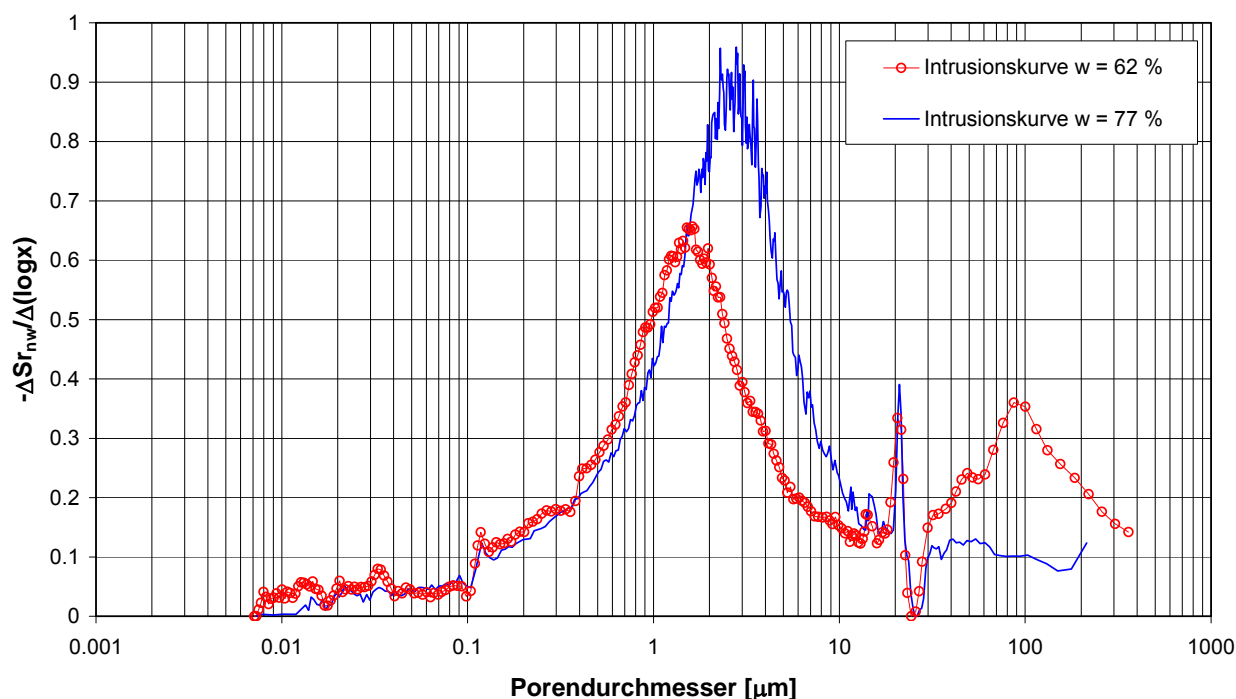


Abb. 6.28: Dichtefunktion der Porendurchmesser für die Proben des Tons mit org. Beimengungen

6.4.5.4 Zusammenfassung

Aus den durchgeführten Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen lassen sich folgende Erkenntnisse festhalten:

- Die bei Wassergehalten unterhalb des Proctorwassergehaltes verdichteten Proben weisen bimodale Porengrößenverteilungen auf. Eine Erhöhung der Einbaudichte führt dabei zu einer Reduzierung der Interaggregatporen und hat keinen signifikanten Einfluss auf die Intraaggregatporen.
- Bei einer Verdichtung auf der nassen Seite des Proctorwassergehaltes dagegen stellen sich unimodale Porengrößenverteilungen ein.
- Aufgrund der Dichteabhängigkeit der Ergebnisse ist die Bestimmung von Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen anhand von Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen mit großen Ungenauigkeiten verbunden. Die Auswirkung unterschiedlicher Bodenstrukturen auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung kann damit nur qualitativ studiert werden.

Die Ergebnisse stehen damit in Übereinstimmung mit Untersuchungen von DELAGE ET AL. (1996), VANAPALLI ET AL. (1999), TINJUM ET AL. (1997), TARANTINO UND TOMBOLATO (2005) sowie LI UND ZHANG (2009).

6.5 Durchlässigkeit im gesättigten Zustand

6.5.1 Lias-Ton

Die Durchlässigkeit im gesättigten Zustand der einzelnen Proben wurde in einer Triaxialzelle bei isotroper Belastung und bei konstantem Druckgefälle unter Beobachtung des Sättigungsvorganges ermittelt. Dabei wurden für alle Einbauzustände entsprechend der Abb. 6.1 Versuche mit schrittweiser Steigerung des Gradienten bis zu $i = 30$ und für die Einbauzustände 4, 5, 6 und 8 nach Abb. 6.1 Versuche mit einem konstanten Gradienten $i = 10$ durchgeführt. Eine Beschreibung des verwendeten Versuchsstandes sowie die Vorgehensweise zur Bestimmung des Sättigungsvorganges und des Durchlässigkeitsbeiwertes können HEYER (2001) entnommen werden.

Entsprechend den verwendeten Versuchsständen wurden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von 5 cm gepresst. Um eine gleichmäßige Dichte über den ganzen Körper hinweg zu gewährleisten, wurde dieser schrittweise in fünf Schichten von je 1 cm hergestellt. Dabei kam eine Presse zum Einsatz, mit der die Proben bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit des Stempels auf die gewünschte Schichtdicke verdichtet werden konnten. Nach Fertigstellung aller fünf Schichten wurde der Probekörper aus der verwendeten zweiteiligen Form entnommen, vermessen und gewogen. Aus den ermittelten Daten wurde die erreichte Trockendichte bestimmt. Die angestrebten und in den einzelnen Versuchsreihen erzielten Einbauzustände können der Abb. 6.29 und Abb. 6.30 entnommen werden.

Die Versuche mit schrittweiser Steigerung des Gradienten wurden mit dem Gradienten $i = 3$ begonnen. In Abständen von ca. 5 bis 20 Stunden wurde dieser dann schrittweise bis zum Erreichen des maximalen Gradienten von $i = 30$ erhöht. Eine sofortige Steigerung des Gradienten auf $i = 30$ kann insbesondere bei auf der trockenen Seite des Proctoroptimums liegenden Bodenproben die Ausbildung eines Filterkuchens infolge innerer Erosion begünstigen. Bildet sich ein Filterkuchen aus, werden aufgrund des Druckabbaus im Filterkuchen zu geringe Durchlässigkeitsbeiwerte abgeleitet (HEYER, 2001). Der relativ zum atmosphärischen Druck aufgebrachte Sättigungsdruck betrug bei diesen Versuchen 450 kPa. Der Zelldruck wurde zu 500 kPa gewählt, so dass ein Differenzdruck zwischen dem Sättigungsdruck und dem Zelldruck von 50 kPa vorlag. Dieser Differenzdruck ist erforderlich, um ein Anliegen der Gummimembran an die Probe zu gewährleisten und Randumläufigkeiten damit zu minimieren.

Bei den Versuchen mit konstanten Gradienten $i = 10$ konnte durch Messung der Filtergeschwindigkeiten an der Ober- und Unterseite der Prüfkörper das Sättigungsverhalten der Proben beobachtet werden. Dabei wurde unter anderem die Sättigungsdauer bestimmt. Diese ist definiert als die Zeit, die benötigt wird, um den Volumenstrom an der Oberseite der Prüfkörper (Ausfluss) vom Negativen (Einströmen) ins Positive (Ausströmen) umzukehren. Da der Gradient bei diesen Versuchen nicht langsam gesteigert wurde, musste besonderes Augenmerk auf ein plötzliches Abfallen der Filtergeschwindigkeit gelegt werden. Dies kann auf innere Erosion und Ausbildung eines Filterkuchens hindeuten. Da diesbezüglich besonders die auf der trockenen Seite des Proctoroptimums verdichteten Probekörper gefährdet sind, wurden die Versuche nur an Probekörpern der Punkte 4, 5, 6 und 8 durchgeführt. Es wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt, wobei der Sättigungsdruck bei der ersten Versuchsreihe 450 kPa und bei der zweiten 300 kPa betrug. Der Zelldruck wurde jeweils so gewählt, dass eine Differenz zum Sättigungsdruck von 50 kPa vorlag.

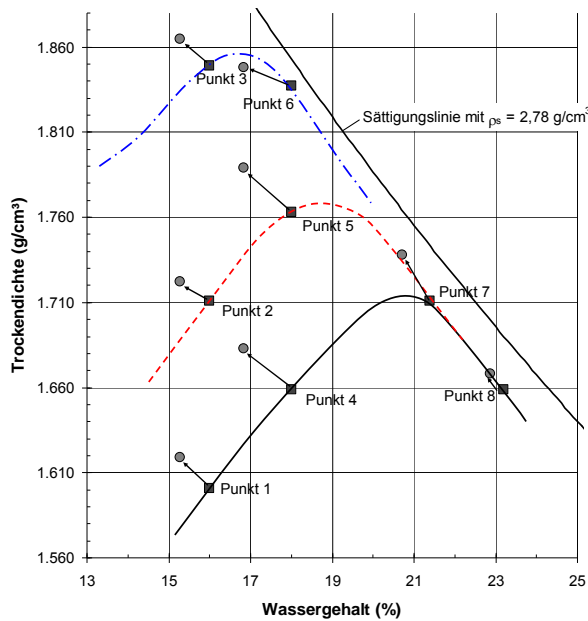


Abb. 6.29: Versuche mit Steigerung des Gradienten, gewünschte Ausgangspunkte (eckig) und tatsächlich erreichte Ausgangspunkte (rund)

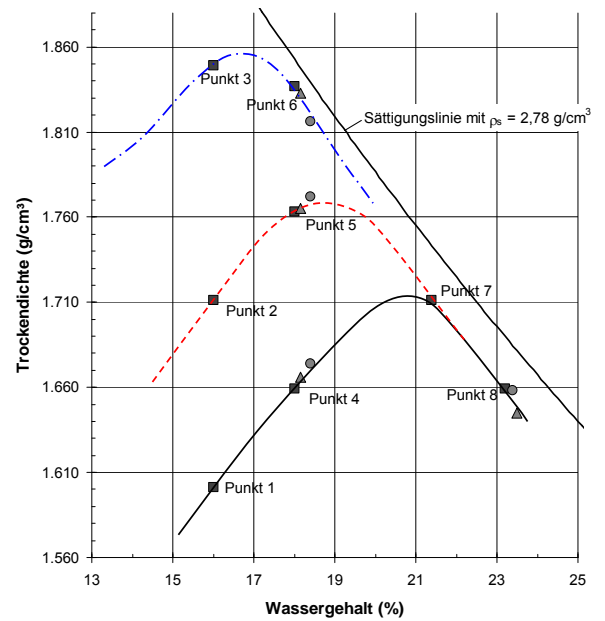


Abb. 6.30: Versuche mit $i=10$, gewünschte Ausgangspunkte (eckig) und tatsächlich erreichte Ausgangspunkte (rund für 450 kPa und dreieckig für 300 kPa Sättigungsdruck)

Die Ergebnisse aller durchgeführten Durchlässigkeitsversuche sind in der Tab. 6.4 angegeben:

Einbau-zustand	Prüfkörper	Einbau -			Sättigungs-		k-Wert [m/s]
		Wassergehalt [%]	Trockendichte [g/cm ³]	Luftporen- anteil [%]	druck [kPa]	dauer [h]	
Punkt 1	Pv_1 (i=30)	15,27	1,619	17,1	450	27,0	$2,3 \cdot 10^{-10}$
Punkt 2	Pv_2 (i=30)	15,27	1,722	11,8	450	32,3	$9,8 \cdot 10^{-11}$
Punkt 3	Pv_3 (i=30)	15,27	1,865	4,5	450	52,4	$5,0 \cdot 10^{-11}$
Punkt 4	Pv_4 (i=30)	16,83	1,683	11,2	450	25,8	$9,7 \cdot 10^{-11}$
	Pka_4 (i=10)	18,40	1,674	9,1	450	18,7	$1,9 \cdot 10^{-10}$
	Pkb_4 (i=10)	18,16	1,666	9,9	300	23,1	$1,2 \cdot 10^{-10}$
Punkt 5	Pv_5 (i=30)	16,83	1,789	5,6	450	40,1	$7,2 \cdot 10^{-11}$
	Pka_5 (i=10)	18,40	1,772	3,7	450	53,6	$6,1 \cdot 10^{-11}$
	Pkb_5 (i=10)	18,16	1,765	4,5	300	50,0	$7,4 \cdot 10^{-11}$
Punkt 6	Pv_6 (i=30)	16,83	1,848	2,5	450	65,6	$3,4 \cdot 10^{-11}$
	Pka_6 (i=10)	18,40	1,816	1,3	450	69,4	$3,4 \cdot 10^{-11}$
	Pkb_6 (i=10)	18,16	1,833	0,9	300	74,8	$3,1 \cdot 10^{-11}$
Punkt 7	Pv_7 (i=30)	20,71	1,738	1,6	450	25,3	$3,9 \cdot 10^{-11}$
Punkt 8	Pv_8 (i=30)	22,87	1,668	1,9	450	31,3	$4,7 \cdot 10^{-11}$
	Pka_8 (i=10)	23,40	1,658	1,6	450	20,1	$5,5 \cdot 10^{-11}$
	Pkb_8 (i=10)	23,50	1,645	2,2	300	23,5	$5,5 \cdot 10^{-11}$

Tab. 6.4: Ergebnisse der am Lias-Ton durchgeführten Durchlässigkeitsversuche

Es zeigt sich, dass der untersuchte Lias-Ton auch bei geringen Einbauwassergehalten und -dichten sehr geringe Durchlässigkeitsbeiwerte aufweist. Dennoch erkennt man, dass der Durchlässigkeitsbeiwert bei konstantem Einbauwassergehalt mit zunehmender Einbaudichte abnimmt (vgl. Punkte 1, 2 und 3 bzw. 4, 5 und 6). Dies wird auch aus der Abb. 6.31 deutlich, die den Durchlässigkeitsbeiwert gegenüber der Einbautrockendichte bei etwa gleichen Einbauwassergehalten darstellt. Daran ist zu erkennen, dass der experimentell ermittelte Zusammenhang zwischen der Einbautrockendichte und dem Durchlässigkeitsbeiwert mit exponentiellen Funktionen gut wiedergegeben werden kann.

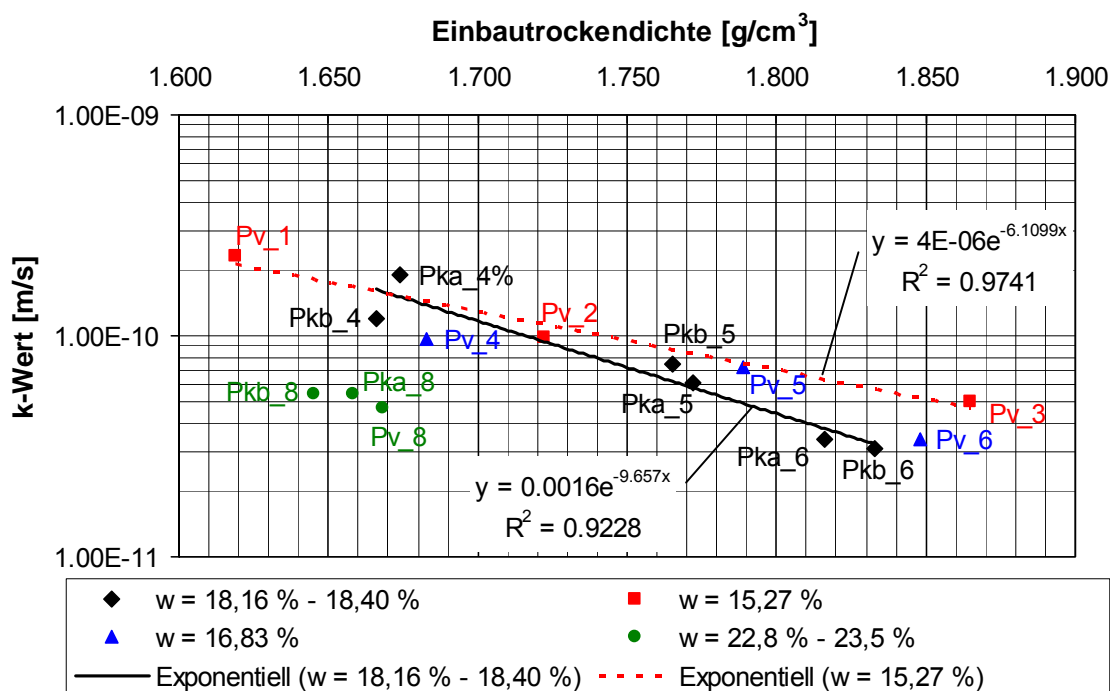


Abb. 6.31: Zusammenhang zwischen k-Wert und Einbautrockendichte für die Proben des Lias-Tons

Aus einem Vergleich der Punkte 2 und 7 sowie 4 und 8 (siehe Tab. 6.4) lässt sich außerdem feststellen, dass der Durchlässigkeitsbeiwert bei gleicher Einbaudichte mit zunehmendem Einbauwassergehalt abnimmt.

Zur Ermittlung des Sättigungsverhaltens wurden an den Punkten 4, 5, 6 und 8 Durchlässigkeitsversuche mit konstanten Gradienten durchgeführt. Das Sättigungsverhalten wurde über die Messung des zeitlichen Verlaufs der Filtergeschwindigkeiten an der Ober- und Unterseite der Proben erfasst (siehe Abb. 6.32). Die dabei gemessenen Durchlässigkeitsbeiwerte bestätigen die Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche mit schrittweiser Steigerung des Gradienten. Im Vergleich zum Durchlässigkeitsbeiwert wurden zu Versuchsbeginn sehr hohe Filtergeschwindigkeiten an der Ober- und Unterseite der Proben gemessen. Aus diesem Grund ist die Größe des Durchlässigkeitsbeiwertes im stationären Zustand aus Abb. 6.32 darstellungsbedingt nicht ablesbar.

In der Tab. 6.4 sind zusätzlich die bei den einzelnen Versuchen ermittelten Sättigungsdauern dargestellt. Es zeigt sich, dass die Sättigungsdauer mit zunehmender Einbaudichte zunimmt. Wird die

Gültigkeit des Gesetzes nach Darcy vorausgesetzt, beruhen die gemessenen Filtergeschwindigkeiten auf den örtlich und zeitlich veränderlichen Gradienten und hydraulischen Leitfähigkeiten der einzelnen Proben.

Die Gradienten zu Versuchsbeginn resultieren im Wesentlichen aus den vorhandenen Saugspannungen und dem aufgebrachten Sättigungsdruck. Aus den in Abschnitt 6.7 dargestellten Saugspannungsuntersuchungen ist bekannt, dass die Saugspannungen im Einbauzustand weitgehend unabhängig von der Einbaudichte sind und die Punkte 4, 5 und 6 im Einbauzustand ähnliche Saugspannungen aufweisen. Damit können zu Versuchsbeginn für die Proben 4, 5 und 6 ähnliche hydraulische Gradienten angenommen werden. Die Unterschiede in den gemessenen Filtergeschwindigkeiten können damit auf die unterschiedlichen hydraulischen Leitfähigkeiten der Proben im ungesättigten Zustand zurückgeführt werden. Es zeigt sich, dass die hydraulische Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand ebenso wie die Durchlässigkeit im gesättigten Zustand mit abnehmendem Einbauluftporenanteil bzw. mit zunehmender Einbaudichte abnimmt.

Die Punkte 4 und 8, welche mit unterschiedlichem Einbauwassergehalt, aber gleicher Einbaudichte hergestellt wurden, weisen zwar ähnliche Sättigungsdauern, aber ein völlig unterschiedliches Sättigungsverhalten auf. Dies wird aus den an der Ober- und Unterseite der Prüfkörper gemessenen Filtergeschwindigkeiten ersichtlich (siehe [Abb. 6.32](#)). Die bei Punkt 8 im Vergleich zum Punkt 4 gemessenen deutlich geringeren Filtergeschwindigkeiten können auf die geringeren Saugspannungen im Einbauzustand zurückgeführt werden.

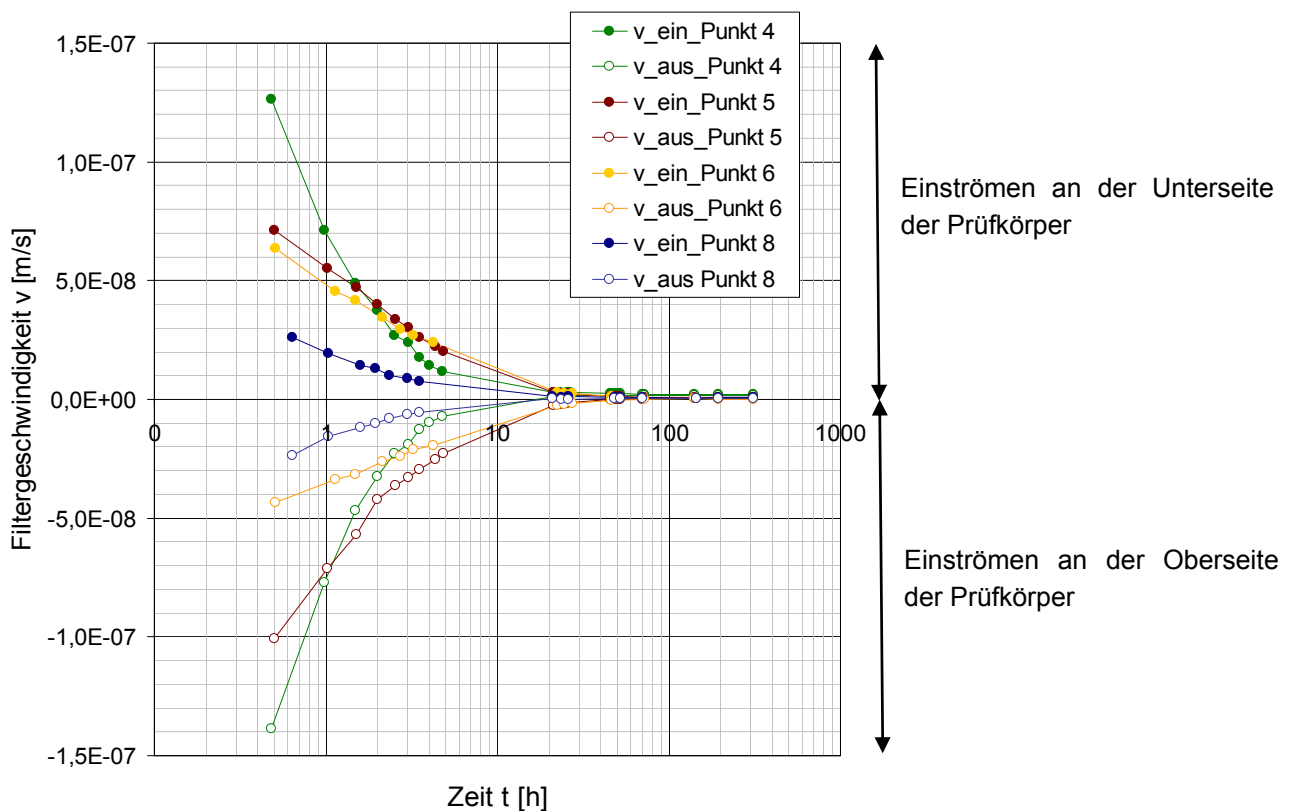


Abb. 6.32: Gemessene Filtergeschwindigkeiten an der Unter- und Oberseite der Prüfkörper Pka_4, Pka_5, Pka_6 und Pka_8 des Lias-Tons bei einem Sättigungsdruck von 450 kPa

6.5.2 Lösslehm

Die Durchlässigkeitsbeiwerte wurden für die Einbaubedingungen 1, 2, 3, 4, 5 und 8 wie für den Lias-Ton in einer Triaxialzelle bei isotroper Belastung und konstantem Druckgefälle ermittelt. Der Sättigungsdruck betrug dabei 450 kPa bei einem Zelldruck von 500 kPa. Die Versuche wurden mit einem Gradienten $i < 3$ begonnen. In Abständen von ca. 5 bis 20 Stunden wurde dieser dann schrittweise bis zum Erreichen des maximalen Gradienten von $i = 30$ erhöht. Die Durchlässigkeitsbeiwerte wurden nach Erreichen eines stationären Zustandes beim Gradienten $i = 30$ ausgewertet.

Die Proben der Einbaubedingungen 6 und 7 wurden in Triaxialzellen bei isotroper Belastung und veränderlichem Druckgefälle nach DIN 18130 untersucht.

Die Herstellung der Probekörper erfolgt in derselben Weise wie für die Probekörper des Lias-Tons. Die angestrebten und in den einzelnen Versuchsreihen erzielten Einbauzustände können der Abb. 6.33 entnommen werden.

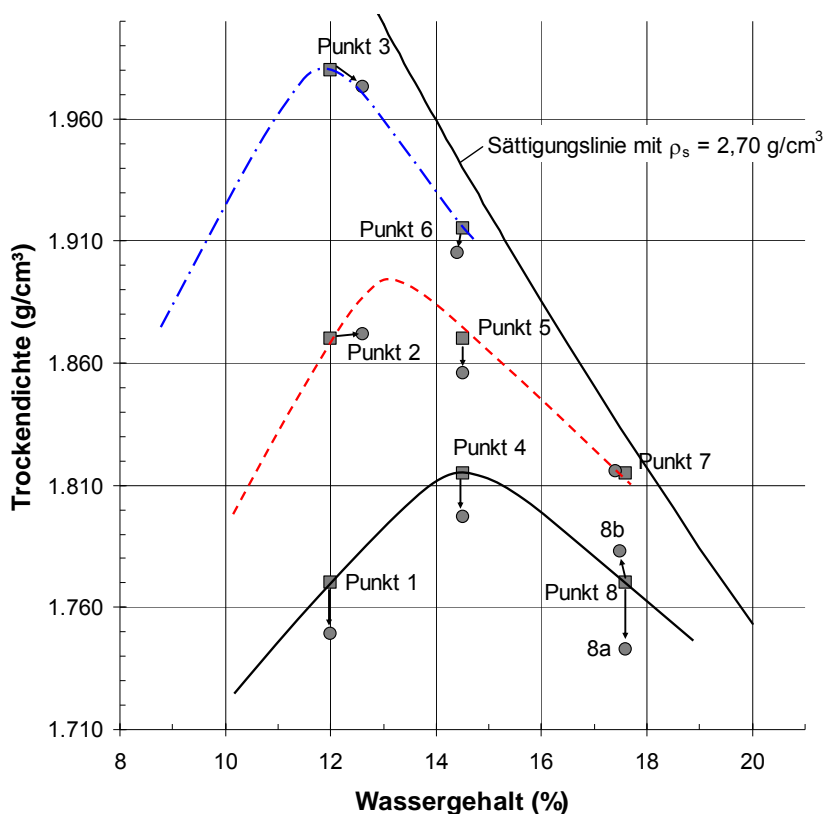


Abb. 6.33: Durchlässigkeitsversuche am Lösslehm, gewünschte Ausgangspunkte (eckig) und tatsächlich erreichte Ausgangspunkte (rund)

Die Ergebnisse der am Lösslehm durchgeführten Durchlässigkeitsversuche sind in der Tab. 6.5 dargestellt. Vergleicht man die Prüfkörper der Punkte 1, 2 und 3 sowie 4, 5 und 6 miteinander, die bei etwa gleichem Wassergehalt aber unterschiedlichen Trockendichten eingebaut wurden, zeigt sich eine deutliche Abnahme der Durchlässigkeit mit zunehmender Dichte. Dies wird auch aus der Abb. 6.34 deutlich, die den Durchlässigkeitsbeiwert gegenüber der Einbautrockendichte bei etwa gleichen Einbauwassergehalten darstellt. Daran ist zu erkennen, dass der experimentell ermittelte

Zusammenhang zwischen der Einbautrockendichte und dem Durchlässigkeitsbeiwert wie bei den Proben des Lias-Tons mit exponentiellen Funktionen gut wiedergegeben werden kann. Außerdem zeigen die Versuchsergebnisse, dass der Durchlässigkeitsbeiwert maßgeblich vom Einbauwasser-gehalt beeinflusst wird. So sind für die bei etwa gleicher Trockendichte aber unterschiedlichen Wassergehalten verdichteten Prüfkörpern P_1 und P_8a sowie P_2 und P_5 deutlich Unterschiede erkennbar. Dabei gilt, dass der Durchlässigkeitsbeiwert mit zunehmendem Einbauwasser-gehalt und damit abnehmendem Einbauluftporenanteil abnimmt.

Einbau- bedingung	Prüfkörper	Wassergehalt [%]	Einbau - Trockendichte [g/cm ³]	Luftporenanteil [%]	k-Wert [m/s]
Punkt 1	P_1 (i=30)	12,0	1,749	14,3	$8,3 \cdot 10^{-9}$
Punkt 2	P_2 (i=30)	12,6	1,872	7,1	$4,6 \cdot 10^{-9}$
Punkt 3	P_3 (i=30)	12,6	1,973	2,1	$2,9 \cdot 10^{-10}$
Punkt 4	P_4 (i=30)	14,5	1,797	7,4	$4,5 \cdot 10^{-9}$
Punkt 5	P_5 (i=30)	14,5	1,856	4,4	$7,9 \cdot 10^{-10}$
Punkt 6	P_6 (i=30)	14,4	1,905	2,2	$4,6 \cdot 10^{-11}$
Punkt 7	P_7 (i=30)	17,4	1,816	1,1	$4,9 \cdot 10^{-11}$
Punkt 8	Pa_8 (i=30)	17,6	1,743	4,8	$2,6 \cdot 10^{-10}$
	Pb_8 (i=30)	17,5	1,783	2,8	$3,8 \cdot 10^{-10}$

Tab. 6.5: Ergebnisse der am Lösslehm durchgeführten Durchlässigkeitsversuche

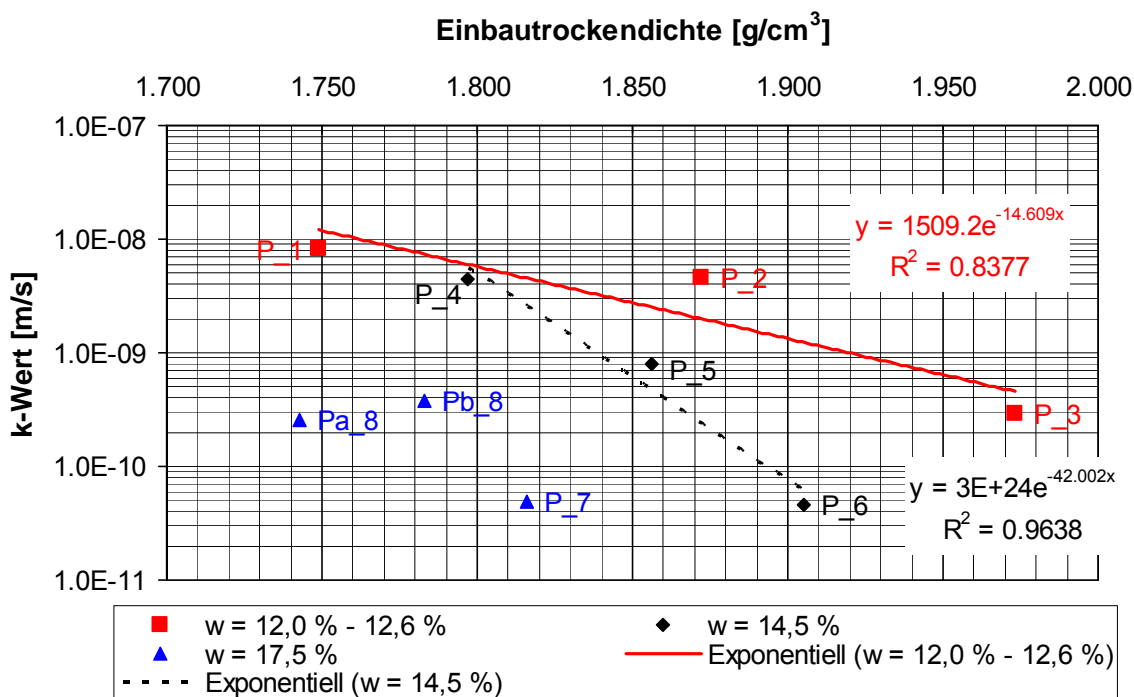


Abb. 6.34: Zusammenhang zwischen k-Wert und Einbautrockendichte für die Proben des Lösslehm

6.5.3 Ton mit organischen Beimengungen

Die Durchlässigkeitsversuche am organogenen Ton wurden in einer Triaxialzelle bei isotroper statischer Belastung nach DIN 18130 mit zum Teil konstanten und zum Teil veränderlichen hydraulischen Gradienten durchgeführt.

Die Versuche wurden an dem für die in Abschnitt 8 beschriebene Versuchsschüttung am Münchner Flughafen verwendeten Boden durchgeführt. Die untersuchten Prüfkörper wurden zum Teil im Labor statisch verdichtet, zum Teil wurden sie nach dem verdichteten Einbau in der Versuchsschüttung entnommen. Hinsichtlich der Einbaubedingungen wurde wie in Abschnitt 6.3.3 beschrieben zwischen einem trockenen und einem nassen Einbau bei angestrebten Wassergehalten von 55 % bzw. 75 % unterschieden. Im Zuge der Erstellung der Versuchsschüttung wurde der Wassergehalt des Materials regelmäßig kontrolliert. Entsprechend der natürlichen Schwankungsbreite der Materialeigenschaften wiesen die untersuchten Prüfkörper zum Teil höhere bzw. geringere Wassergehalte als die angestrebten auf. Die Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche sind in der Tab. 6.6 dargestellt. Bei den trockeneren Einbaubedingungen ($w = 54\%$) wurden Durchlässigkeitsbeiwerte zwischen $k = 8,5 \cdot 10^{-8}$ m/s und $k = 1,0 \cdot 10^{-8}$ m/s ermittelt. Bei der nassen Einbaubedingung lagen die Werte zwischen $k = 3,1 \cdot 10^{-8}$ m/s und $k = 6,9 \cdot 10^{-10}$ m/s. Die arithmetischen und geometrischen Mittel liegen bei $k = 3,7 \cdot 10^{-8}$ m/s bzw. $k = 4,8 \cdot 10^{-8}$ m/s für die trockene Einbaubedingung und $k = 5,3 \cdot 10^{-9}$ m/s bzw. $k = 9,8 \cdot 10^{-9}$ m/s für die nasse Einbaubedingung.

Einbau- bedingung	Verdichtungsart	Wassergehalt [%]	Einbau -		k-Wert [m/s]
			Trockendichte [g/cm ³]	Luftporenanteil [%]	
trocken	Labor	54,0	0,720	28,5	$8,5 \cdot 10^{-8}$
trocken	Labor	54,0	0,801	20,5	$4,7 \cdot 10^{-8}$
nass	Labor	64,0	0,730	20,2	$6,2 \cdot 10^{-9}$
nass	Labor	71,7	0,768	10,2	$3,1 \cdot 10^{-8}$
trocken	Feld	49,8	0,747	29,0	$4,8 \cdot 10^{-8}$
trocken	Feld	55,0	0,852	14,6	$1,0 \cdot 10^{-8}$
nass	Feld	68,1	0,737	16,5	$1,2 \cdot 10^{-8}$
nass	Feld	81,1	0,763	3,6	$6,9 \cdot 10^{-10}$
nass	Feld	83,1	0,721	7,5	$7,2 \cdot 10^{-9}$
nass	Feld	75,0	0,814	2,1	$1,9 \cdot 10^{-9}$

Tab. 6.6: Ergebnisse der am organogenen Ton durchgeführten Durchlässigkeitsversuche

6.6 Schrumpfuntersuchungen

6.6.1 Zielsetzung

Im Zusammenhang mit der Verwendung feinkörniger Böden für Dichtungszwecke ist zu prüfen, inwieweit es im Zuge einer Wasserabgabe zu Schrumpfverformungen und infolgedessen zu einer Rissbildung kommen kann. Bereits in verschiedenen Untersuchungen wurde das Schrumpfverhal-

ten verdichteter feinkörniger Böden analysiert. So konnten schon KLEPPE UND OLSON (1985) mit Hilfe von Schrumpfuntersuchungen an Ton-Sand-Mischungen zeigen, dass die Schrumpfverformungen mit zunehmendem Einbauwassergehalt stark zunehmen, von der Einbaudichte jedoch weitgehend unbeeinflusst sind. Diese Ergebnisse wurden in späteren Untersuchungen u. a. von DANIEL UND WU (1993) bestätigt. Der signifikante Einfluss des Einbauwassergehaltes auf das Schrumpfpotential wurde in späteren Untersuchungen auch von BAUER ET AL. (2004) belegt.

Bei der Verwendung verdichteter Tone ist prinzipiell zu beachten, dass sich die Durchlässigkeitseigenschaften infolge einer Wassergehaltsänderung im eingebauten Zustand ändern können. Die Abhängigkeit der Durchlässigkeitseigenschaften von möglichen Schrumpfverformungen und die Fragestellung, bei welchem Wassergehalt Schrumpfrisse im Boden erstmalig auftreten, konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht untersucht werden. Jedoch wurden an den beiden mittelplastischen Tönen Schrumpfuntersuchungen durchgeführt, um das Schrumpfverhalten und das Schrumpfpotential in Abhängigkeit von den Einbaubedingungen zu bestimmen. (BIRLE ET AL., 2008)

6.6.2 Vorgehensweise

Die Schrumpfuntersuchungen wurden für die jeweils acht Einbauzustände des Lias-Tons und des Lösslehms durchgeführt. Dazu wurden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 7,5 cm und einer Höhe von 2 cm bei den gewählten Wassergehalten und unter Berücksichtigung der zu erzielenden Trockendichten statisch verdichtet. Die Proben wurden anschließend vom Einbauzustand ausgehend ohne vorherige Aufsättigung bei einer konstanten Umgebungsluftfeuchtigkeit und -temperatur getrocknet. Der Trocknungsvorgang wurde durch regelmäßige Wägung kontrolliert. Nach Erreichen vorgegebener Wassergehalte wurden die Proben mit Hilfe einer Schiebelehre vermessen. Am Untersuchungsende wurden der Wassergehalt und die Trockenmasse der Proben mittels Ofentrocknung und das Volumen der getrockneten Probe mit Hilfe der Tauchwägung bestimmt.

6.6.3 Ergebnisse

Die angestrebten und erzielten Einbauzustände der Proben des Lias-Tons und des Lösslehms können der [Abb. 6.35](#) entnommen werden. Es ist zu erkennen, dass die angestrebten Dichten bei den Proben des Lias-Tons zum Teil deutlich überschritten wurden. Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist jedoch bedeutsam, dass die Proben Psh1, Psh2, Psh3 sowie Psh4, Psh5 und Psh6 jeweils beim selben Wassergehalt verdichtet wurden. Bei den Proben des Lösslehms stimmen die erzielten Wassergehalte mit den angestrebten sehr gut überein und sind nur vereinzelt geringe Abweichungen im Hinblick auf die angestrebten Dichten zu erkennen.

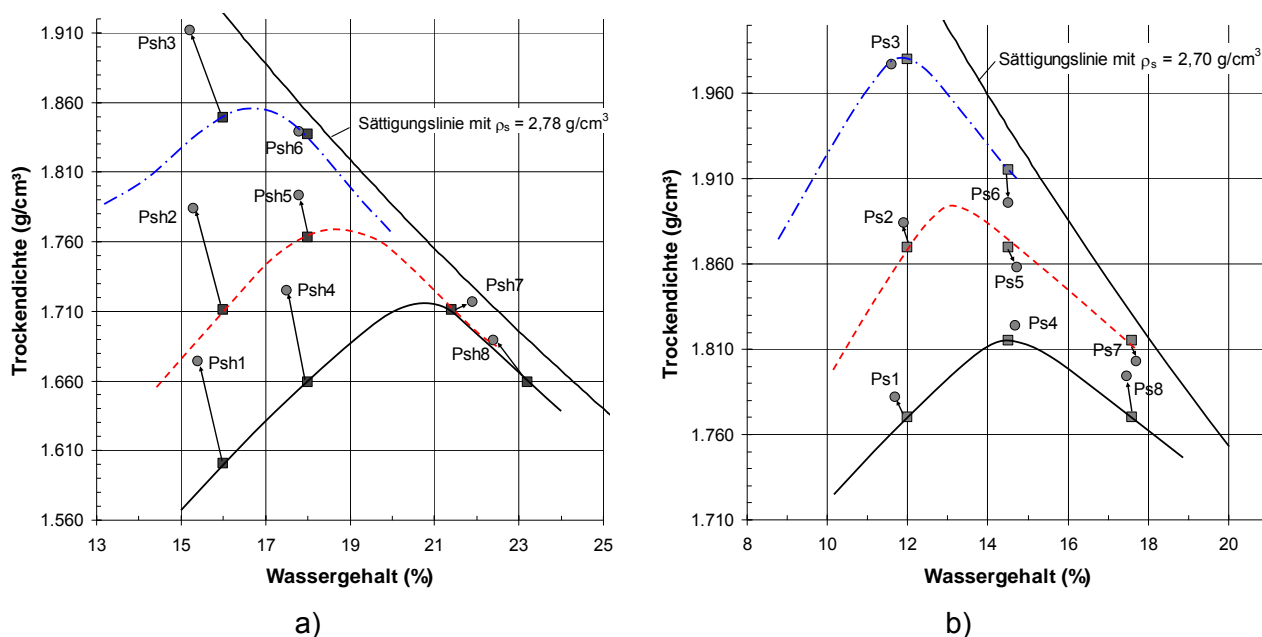


Abb. 6.35: Schrumpfuntersuchungen am a) Lias-Ton und b) Lösslehm, gewünschte Ausgangspunkte (eckig) und tatsächlich erreichte Ausgangspunkte (rund)

Die Abb. 6.36 stellt die Volumenabnahme in Abhängigkeit vom Wassergehalt für die acht Proben des Lias-Tons dar. Betrachtet man die Kurven der Proben Psh1, Psh2, Psh3 sowie Psh4, Psh5 und Psh6, die jeweils bei gleichem Einbauwassergehalt aber unterschiedlichen Trockendichten hergestellt wurden, ist zu erkennen, dass das Schrumpfverhalten vom Einbauwassergehalt, nicht aber von der Einbaudichte beeinflusst wird. So nehmen die Schrumpfverformungen mit zunehmendem Einbauwassergehalt stark zu. Ein sehr ähnliches Schrumpfverhalten weisen darüber hinaus die beiden auf der nassen Seite der Proctorkurve verdichteten Proben Psh7 und Psh8 auf, auch wenn sie sich im Einbauwassergehalt geringfügig unterscheiden.

Dieselben Beobachten können für die Proben des Lösslehms gemacht werden (siehe Abb. 6.37). So ist ebenfalls ein starker Einfluss des Wassergehaltes nicht aber der Trockendichte auf die Schrumpfverformungen festzustellen. Im Vergleich zu den Proben des Lias-Tons weisen die Proben des Lösslehms dabei allerdings etwas geringere Gesamtverformungen auf.

Damit werden die bereits eingangs erwähnten Ergebnisse von KLEPPE UND OLSON (1985) sowie DANIEL UND WU (1993) bestätigt.

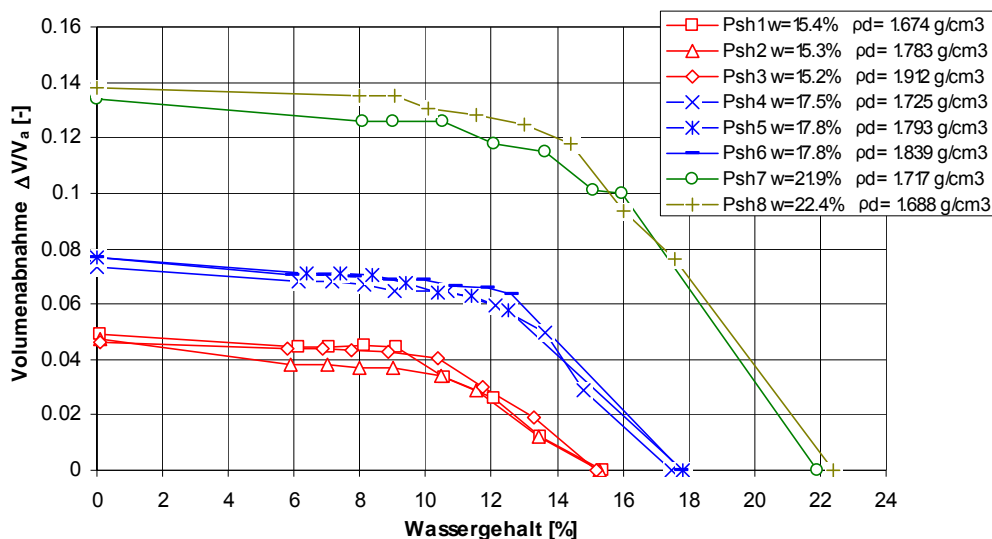


Abb. 6.36: Zusammenhang zwischen der Volumenabnahme und dem Wassergehalt für die Proben Psh1 bis Psh8 des Lias-Tons

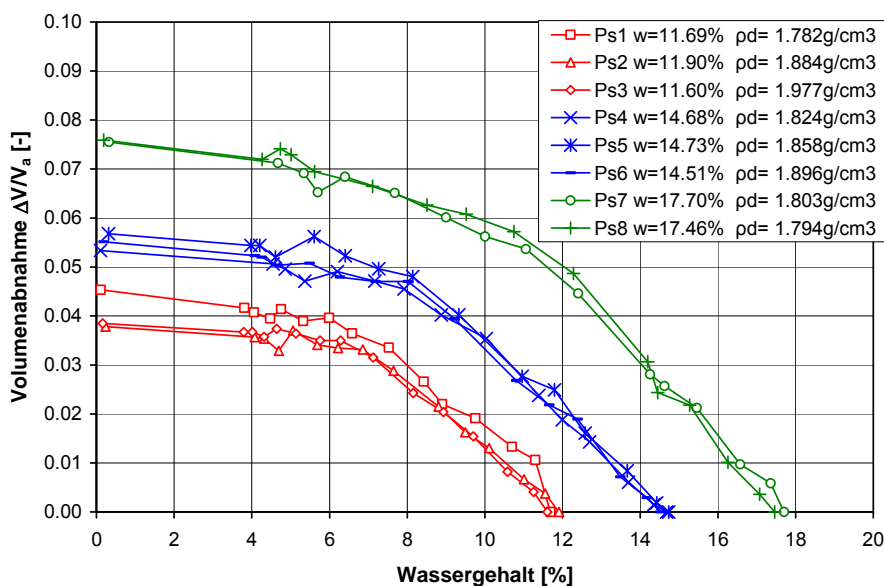


Abb. 6.37: Zusammenhang zwischen der Volumenabnahme und dem Wassergehalt für die Proben Ps1 bis Ps8 des Lösslehms

Interessante Beobachtungen können auch bezüglich des Verlaufes der Schrumpfverformungen der Proben gemacht werden. So zeigen die Beziehungen zwischen Volumenabnahme und Wassergehalt zunächst einen steileren und anschließend einen deutlich flacheren Verlauf. Dieses Verhalten ist für ursprünglich gesättigte Proben bekannt, wonach das Schrumpfverhalten in ein Primär- und ein Residual-Schrumpfen unterteilt werden kann (HAINES, 1923). Danach nimmt das Volumen eines ursprünglich gesättigten Bodens im Zuge der Primärschrumpfung entsprechend der abgegebenen Wassermenge ab und der Boden bleibt zunächst annähernd gesättigt. Infolge der Schrumpfverformungen nehmen jedoch die Dichte des Bodens und damit die Kornkontakte zu, wodurch der Widerstand gegen eine weitere Volumenabnahme zunimmt. Dadurch kommt es ab einem bestimmten

Wassergehalt bei weiterer Entwässerung zu einem Eindringen von Luft in die Poren und zu einer nurmehr geringen Volumenabnahme. Diese zweite Phase wird als Residualschumpfung bezeichnet.

Obwohl die Probekörper vor Durchführung der Schumpfunguntersuchungen nicht aufgesättigt wurden, zeigen sie ein ähnliches Verhalten. Der Übergang vom Primär- zum Residualschumpfen lässt sich durch Anlegen zweier Tangenten an die jeweiligen Verläufe ermitteln. Die Abb. 6.38 und die Abb. 6.39 zeigen, dass der Wassergehalt am Übergang zwischen Primär- und Residualschumpfen mit zunehmendem Einbauwassergehalt zunimmt, von der Einbautrockendichte jedoch unbeeinflusst ist. Weiter ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Einbauwassergehalt auch die Neigung des Primärschumpfastes zunimmt, d.h. die auf den Wassergehalt bezogene Volumenabnahme nimmt zu. Die Neigung des Residualschumpfastes dagegen ist für die untersuchten Proben des Lias-Tons und des Lösslehms unabhängig vom Einbauwassergehalt. Im Vergleich zum Primärschumpfen ist die im Zuge der Residualschumpfung auftretende Volumenabnahme außerdem gering, so dass der Übergang zwischen der Primär- und Residualschumpfung als Schumpfgrenze bezeichnet werden kann.

Die Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen haben gezeigt, dass die Tonaggregate mit den darin befindlichen Intraaggregatporen bei einer Verdichtung auf der trockenen Seite der Proctorkurve von der Einbaudichte weitgehend unabhängig sind. So kommt es infolge einer höheren Verdichtungsenergie zwar zu einer Zunahme der Dichte, diese resultiert aber im Wesentlichen aus einer Reduzierung der Interaggregatporen. Überträgt man diese Beobachtungen auf die Ergebnisse der Schumpfunguntersuchungen, ist festzustellen, dass das Schumpfverhalten verdichteter feinkörniger Böden maßgeblich von den Aggregaten und den Intraaggregatporen, nicht aber von den Interaggregatporen beeinflusst wird. Die Eigenschaften der Aggregate wiederum hängen, wie die Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen gezeigt haben, wesentlich vom Einbauwassergehalt ab. So nehmen die Aggregatgröße und der Intraaggregatporenraum mit zunehmendem Einbauwassergehalt zu, was im Falle einer Entwässerung zu einer Zunahme der Schumpfverformungen führt.

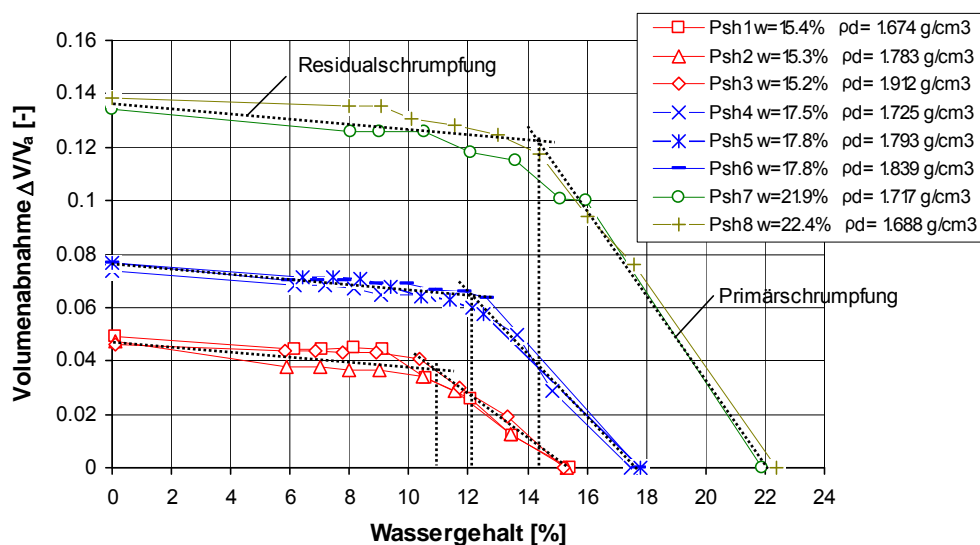


Abb. 6.38: Primär- und Residualschumpfung der Proben des Lias-Tons

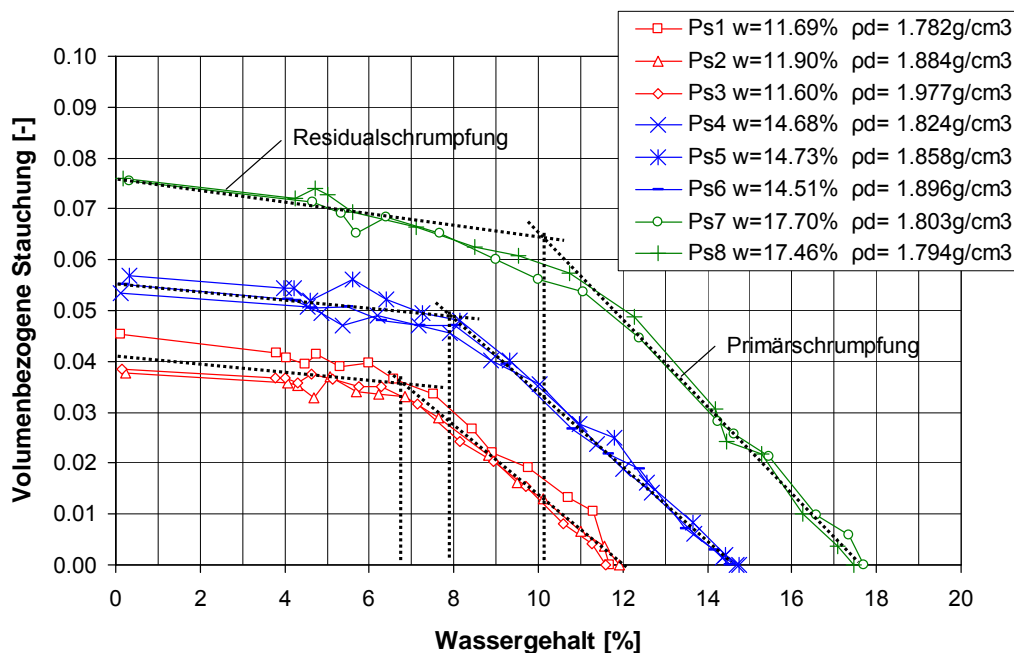


Abb. 6.39: Primär- und Residualschrumpfung der Proben des Lösslehms

6.7 Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung

6.7.1 Druckplattenextraktor

Das Versuchsprinzip des Druckplattenextraktors wurde bereits in Abschnitt 4.3.2 beschrieben. Im Druckplattenextraktor wurden Untersuchungen zur Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung des Lias-Tons durchgeführt. Nach DIN 11274 wird mit dem Druckplattenextraktor der Hauptentwässerungspfad der Proben untersucht, wozu diese vor Versuchsdurchführung aufzusättigen sind. In Voruntersuchungen hat sich allerdings gezeigt, dass die verdichteten Proben des Lias-Tons bei vollständiger Aufsättigung im unbelasteten Zustand starke Quellerscheinungen aufweisen, womit eine nennenswerte Veränderung der Bodenstruktur verbunden ist. In situ sind die Quellerscheinungen aufgrund der herrschenden Auflastspannungen jedoch deutlich reduziert.

Um auch den Bewässerungsast zu erfassen, wurden die Probekörper vom Einbauzustand ausgehend im Druckplattenextraktor zunächst stufenweise bis 0,1 bar (10 kPa) aufgesättigt. Vor Einbau in den Druckplattenextraktor wurden die im Einbauzustand vorliegenden totalen Saugspannungen mit Hilfe eines Feuchtigkeitsmessgerätes nach der Taupunktmethode (WP 4) bestimmt (siehe Abschnitt 6.7.4). Die erste Druckstufe im Druckplattenextraktor wurde anschließend so festgelegt, dass die vorgegebenen Matrixspannungen unterhalb der nach Herstellung vorhandenen Saugspannungen lagen, um eine Entwässerung der Proben zu Beginn des Versuches zu vermeiden.

Im Anschluss an den Bewässerungspfad wurden die Proben durch schrittweise Erhöhung des Luftdruckes von 0,1 bar (10 kPa) bis zu einer Saugspannung von 4 bar (400 kPa) entwässert. Die während des Be- und Entwässerungspfad beobachteten Quell- und Schrumpfverformungen, welche zu einer Veränderung der Trockendichte führen, wurden durch Ausmessen der Probekörper, soweit

es möglich war, ermittelt. In der Abb. 6.40 sind beispielhaft für die Proben P4, P5 und P6 die im Zuge des Bewässerungspfades aufgetretenen Quellverformungen dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass die Proben, auch wenn sie nicht vollständig aufgesättigt werden, bereits bei einer Saugspannung zwischen 0,5 bar (50 kPa) und 0,3 bar (30 kPa) stark quellen. Für den Fall, dass keine Volumenänderungen während der Versuche stattgefunden hätten, würden die in Abb. 6.40 dargestellten Linien der Untersuchungspunkte horizontal verlaufen, d.h. die Trockendichte würde unabhängig von Wassergehaltsänderungen konstant bleiben.

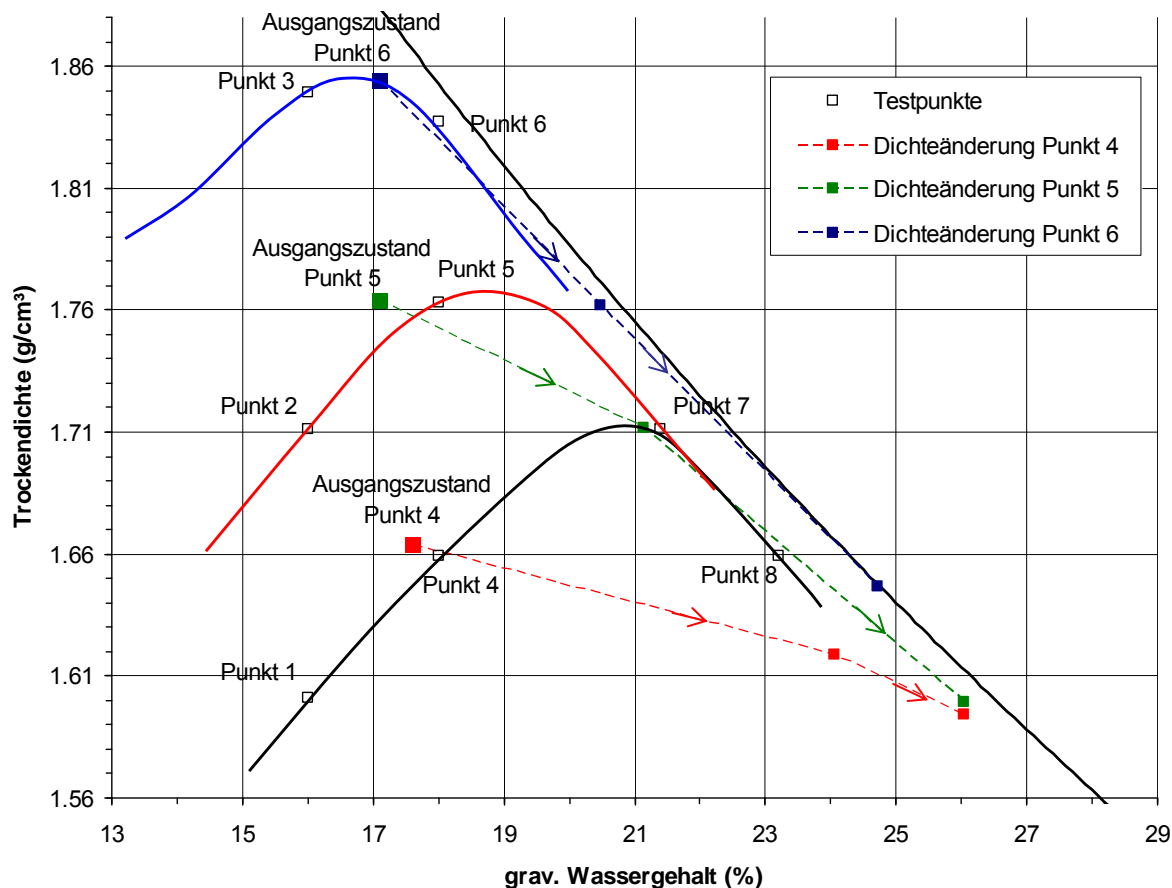


Abb. 6.40: Dichteänderung der Untersuchungspunkte 4, 5 und 6 des Lias-Tons während des Bewässerungspfades im Druckplattenextraktor

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass der Druckplattenextraktor zur Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung verdichteter feinkörniger Böden nicht geeignet ist. Im Detail sind dabei folgende Probleme und Schwierigkeiten aufgetreten:

- Prinzipiell lässt sich im Druckplattenextraktor zwar auch ein Bewässerungspfad der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung ermitteln; da die Wasseraufnahme der Proben durch die Akkumulation von Luftblasen unterhalb der porösen Keramik jedoch eingeschränkt sein kann, können damit keine belastbaren Versuchsergebnisse gewonnen werden.
- Versuchsbedingt können die Proben im Druckplattenextraktor vertikal nicht belastet werden. Damit können die Proben frei quellen bzw. schrumpfen. Andere Spannungszustände können im Druckplattenextraktor nicht abgebildet werden.

- Die Ermittlung des Probenvolumens ist nur stark eingeschränkt bei Entnahme der Proben mit Hilfe einer Schiebelehre möglich. Sofern die Proben ungleichmäßig quellen oder schrumpfen, ist die Bestimmung des Probenvolumens dabei mit großen Ungenauigkeiten behaftet.
- Die zur Wassergehaltsbestimmung erforderliche Entnahme der Proben aus dem Druckplattenextraktor ist häufig mit einem Materialverlust verbunden. Beim Wiedereinsetzen besteht die Gefahr, dass kein vollständiger Kontakt zwischen der Probe und der Keramik erreicht wird.

Aufgrund dieser Unzulänglichkeiten des Versuchsgertes für feinkörnige quell- und schrumpffähige Böden wurde auf systematische Untersuchungen mit Hilfe des Druckplattenextraktors verzichtet und wurden die experimentellen Untersuchungen stattdessen in einer Saugspannungskontrollierten Oedometerzelle durchgeführt (siehe Abschnitt 6.7.2).

6.7.2 Saugspannungskontrollierte Oedometerzelle

6.7.2.1 Konzeption des Versuchsstandes

Zur Ermittlung der Beziehungen zwischen der Saugspannung und dem Wassergehalt sowie der hydraulischen Leitfähigkeit und dem Wassergehalt wurden zwei Versuchsstände entwickelt. Das Kernstück der beiden Versuchsstände ist jeweils eine Oedometerzelle, in der die Saugspannung unter Anwendung der Achsen-Translations-Technik kontrolliert werden kann. Gegenüber dem Druckplattenextraktor bietet die Saugspannungskontrollierte Oedometerzelle folgende Vorteile:

- Die Saugspannung-Wassergehalts-Beziehung kann unter definierten Vertikalspannungen bei oedometrischen Verhältnissen ermittelt werden.
- Das Volumen der Probekörper kann bei Vernachlässigen der radialen Schrumpfung aus der Probenhöhe der Probekörper bestimmt werden. Dies ermöglicht es, mögliche Quell- oder Sackungsvorgänge bei Wasseraufnahme sowie Schrumpfungsvorgänge bei einer Entwässerung studieren zu können.
- Die Ermittlung des Wassergehaltes unter einer vorgegebenen Saugspannung erfolgt über die Messung der ausgetretenen bzw. vom Probekörper aufgenommenen Wassermenge. Dadurch müssen die Probekörper nicht nach jeder Saugspannungsstufe entnommen und gewogen werden.
- Aus dem zeitlichen Verlauf der bei einer Saugspannungsstufe aufgenommenen bzw. abgegebenen Wassermenge lassen sich unter Anwendung der sogenannten Mehrstufen-Ausfluss-Methode Informationen zur hydraulischen Leitfähigkeit gewinnen (siehe dazu Abschnitt 6.8.1).

In [Abb. 6.41](#) und [Abb. 6.42](#) sind die beiden verwendeten Oedometerzellen dargestellt. Bei beiden Zellen handelt es sich prinzipiell um modifizierte Oedometerzellen der Universidad Politècnica de Catalunya (UPC-Zellen), welche ausführlich bei ROMERO (1999) beschrieben sind. Die [Abb. 6.42](#) zeigt die von der Fa. Wille Geotechnik in Zusammenarbeit mit Prof. Schanz gefertigte Oedometerzelle. Die in [Abb. 6.41](#) dargestellte Zelle (TUM-Zelle) wurde selbst entworfen und durch die Werkstatt des Zentrum Geotechnik der TU München gebaut. Der Aufbau der TUM-Zelle ist schematisch in der [Abb. 6.43](#) dargestellt.



Abb. 6.41: Am Zentrum Geotechnik der TU München entwickelte Oedometerzelle (TUM-Zelle)

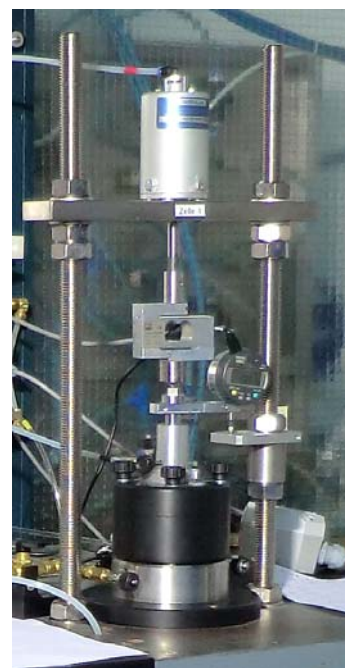


Abb. 6.42: Oedometerzelle nach Schanz der Fa. Wille

Gegenüber der Oedometerzelle der Fa. Wille zeichnet sich die TUM-Zelle durch folgende Eigenschaften aus:

- Anordnung der Kraftmessdose zur Messung der Vertikalkraft in der Zelle: Dies ermöglicht es, die tatsächliche Vertikalspannung auf die Probe zu ermitteln. Wird die Kraftmessdose außerhalb der Zelle angeordnet, können Reibungsverluste infolge der Gestängeführungen nicht berücksichtigt werden.
- Verwendung einer Rollmembran zur Abdichtung des Zellenluftdruckes gegenüber dem Atmosphärenluftdruck: Durch Verwendung einer Rollmembran muss die Gestängeführung keine Dichtfunktion erbringen und kann dadurch sehr leichtgängig ausgeführt werden. Einflüsse durch Haftreibung können somit stark reduziert werden.
- Spiralförmige Anordnung der Wasserkanäle in der Basisplatte unterhalb der porösen Keramik (siehe [Abb. 6.44 a](#)): Dies ermöglicht es, die infolge von Diffusion im Laufe eines Versuches sich unterhalb der porösen Keramik sammelnden Luftblasen bei einem Spülvorgang bestmöglich entfernen zu können. Bei einer Anordnung der Kanäle entsprechend [Abb. 6.44 b](#)) können Luftblasen prinzipiell trotz Spülung verbleiben, da bei einer Spülung nicht zwingend alle Kanäle erreicht werden.

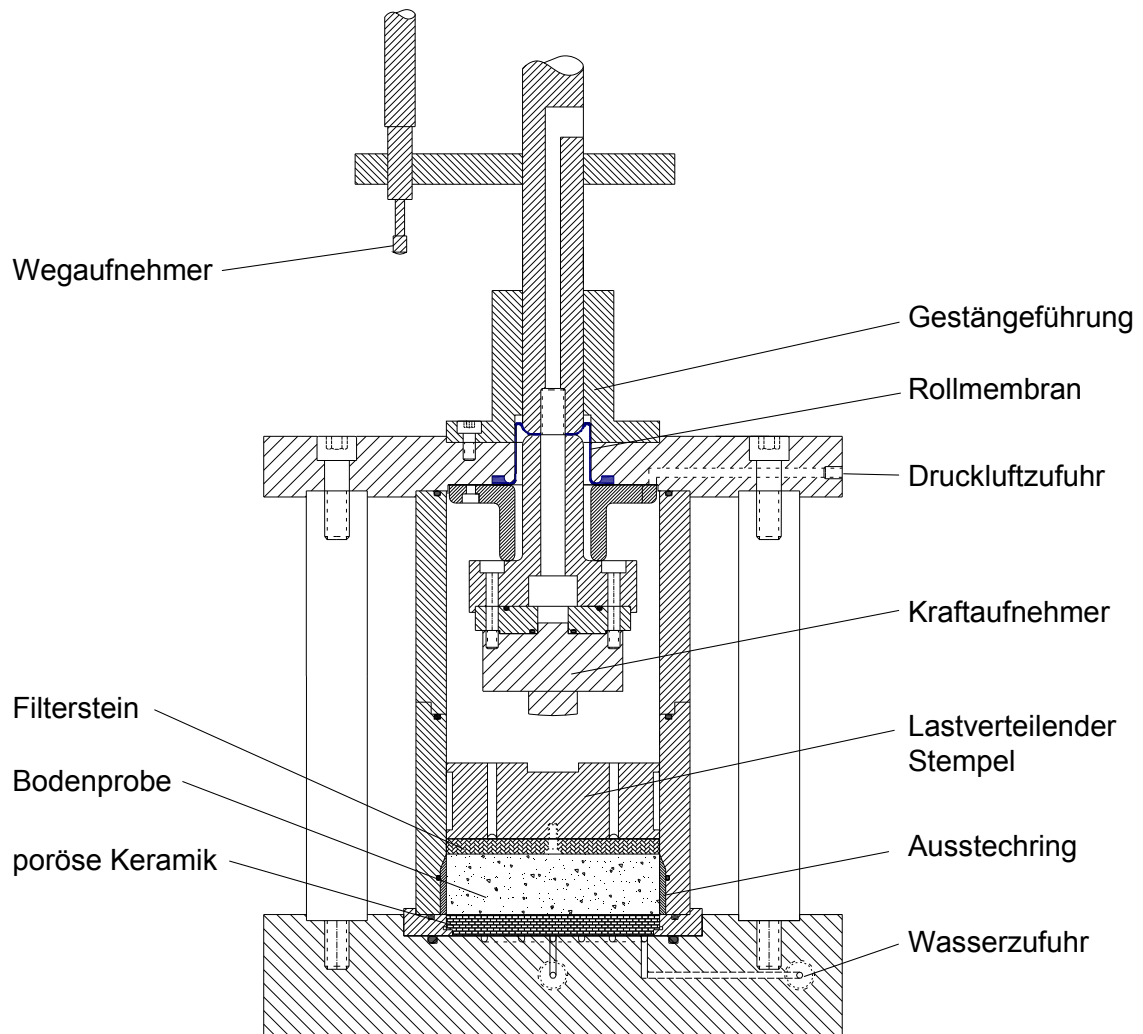
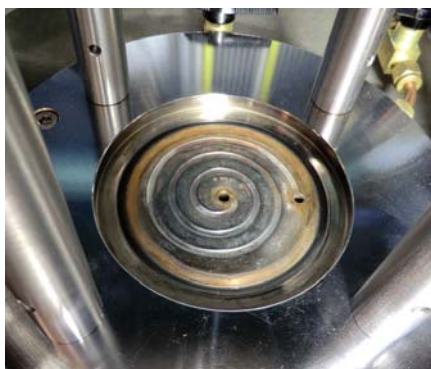
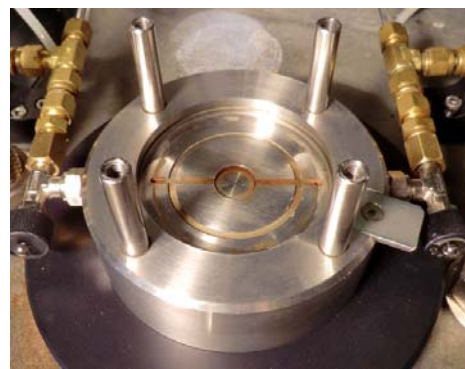


Abb. 6.43: Aufbau der TUM-Zelle (Konstruktionszeichnung)



a)



b)

Abb. 6.44: Anordnung der Wasserkanäle in der Basis: a) bei der TUM-Zelle b) bei der Wille-Zelle

Ähnliche Saugspannungs-kontrollierte Oedometerzellen wurden von der Universidad Politécica de Cataluña in Barcelona (ROMERO, 1999), der Hongkong University of Science and Technology (NG UND PANG, 2000b) und von der Firma GCTS Testing Systems in Zusammenarbeit mit Prof. Fred-

lund (www.gcts.com, PEREZ-GARCIA ET AL., 2008) entwickelt. Die UPC-Zellen und die Fredlund-Zellen erlauben ebenso wie die verwendete Spezial-Oedometerzelle der Fa. Wille keine Messung der Vertikalkraft in der Zelle. Die Oedometerzelle nach NG UND PANG (2000b) erlaubt zwar die Messung der Vertikalkraft in der Zelle, jedoch werden zur Abdichtung des Zellenluftdruckes wie bei der Fredlund-Zelle Dichtungsringe in der Gestängeführung verwendet. Die selbst entwickelte TUM-Zelle ist gegenüber den beschriebenen Oedometerzellen aufgrund der Anordnung der Kraftmessdose in der Zelle und der Verwendung einer Rollmembran für Untersuchungen unter kleinen Vertikalkräften, bei denen Haft- und Rollreibungseffekte besonders starke Auswirkungen haben können, bestmöglich geeignet.

Der Versuchsstand für die Untersuchungen in einer Saugspannung-kontrollierten Oedometerzelle ist schematisch in der Abb. 6.45 dargestellt. Der detaillierte Aufbau des Versuchsstandes mit den einzelnen Elementen kann dem Anhang A1.3 entnommen werden. Die Abb. 6.46 zeigt den gesamten Versuchsaufbau mit den beiden verwendeten Oedometerzellen, wie er im Labor des Zentrum Geotechnik aufgebaut wurde.

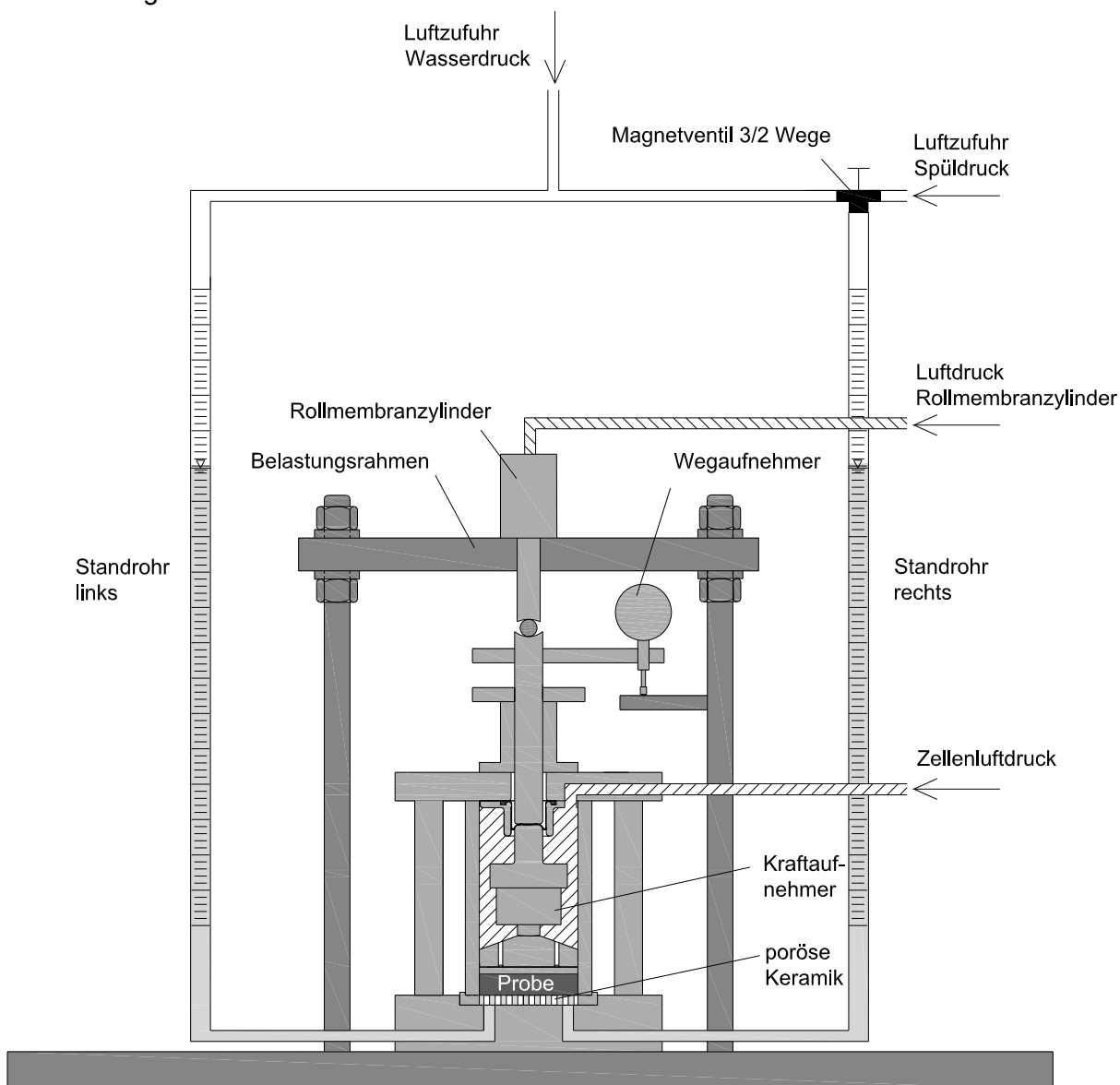


Abb. 6.45: Schematische Darstellung des Versuchsstandes

Das Prinzip der Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzelle beruht auf der Achsen-Translations-Technik, wonach die Saugspannung als Matrixspannung über die Differenz zwischen dem in der Zelle herrschenden Luftdruck und dem an der Basis der Probe angelegten Wasserdruck vorgegeben wird. Der Luftdruck wird mit Hilfe von Präzisionsreglern eingestellt und durch Drucksensoren während des gesamten Versuches aufgezeichnet. Um die Wasserabgabe der Probe während des Versuches durch Verdunstung zu minimieren, wird die in die Zelle eingebrachte Druckluft durch ein Wasserreservoir geführt. Dieses ist mit entsalztem Wasser gefüllt und soll dafür sorgen, dass die in die Zelle einströmende Luft weitgehend wassergesättigt ist.

Entsprechend der Achsen-Translations-Technik wird die Saugspannung im Versuch nicht gemessen, sondern vorgegeben. Bei einer Änderung der Saugspannung findet eine Wasserabgabe aus der Probe oder eine Wasseraufnahme durch die Probe statt. Zur Ermittlung des sich bei einer vorgegebenen Saugspannung einstellenden Wassergehaltes wird das in die Probe ein- bzw. aus der Probe ausströmende Wasser mit Hilfe von Standrohren quantifiziert. Eine Voraussetzung zur Anwendung der Achsen-Translations-Technik ist die Verwendung eines geeigneten Filtersteines an der Basis der Probe. Neben dem mechanischen Feststoffrückhalt muss der Filter dabei eine Trennfunktion zwischen der Wasser- und Luftphase übernehmen. D.h. er darf bei einem angelegten Zellenluftdruck nur für die Wasserphase nicht aber für die Luftphase durchlässig sein. Dies gelingt durch Verwendung poröser Keramiken, welche sehr feine Poren aufweisen, die nach Wassersättigung infolge von Kapillarspannungen bis zu einem spezifischen Luftdruck (Lufttrittspunkt) wassergesättigt bleiben und eine Luftströmung unterbinden. Dennoch können sich Luftblasen an der Unterseite der Keramik durch Diffusion bilden. Dieser Vorgang ist von der Luftkonzentration abhängig und tritt insbesondere bei hohen Luftdrücken auf. Um die Akkumulation von Luftblasen unterhalb der Keramik zu minimieren, sind die Wasserkanäle unter der Keramik regelmäßig zu spülen. Dazu wird der Luftdruck über dem rechten Standrohr kurzzeitig geringfügig erhöht, wodurch es zu einer Wasserbewegung vom rechten in Richtung des linken Standrohres kommt. Durch Verwendung eines Magnetventils und einer Steuerung erfolgt dieser Vorgang während des Versuches automatisch.

Luftblasen in den Leitungen zwischen der Probe und dem Standrohr können die Versuchsergebnisse stark beeinflussen, da sie Einfluss auf den Wasserstand in den Standrohren nehmen. Vorversuche haben gezeigt, dass bei Anlegen eines konstanten atmosphärischen Wasserdruckes während des Versuches Luftblasen in den Leitungen insbesondere im Bereich von Verschraubungen verbleiben bzw. sich während des Versuches akkumulieren können. Dies ließ sich auch nicht verhindern, indem die Leitungen alle sechs Stunden automatisch gespült wurden. Dieser Effekt konnte aber dadurch weitgehend eliminiert werden, dass der Wasserdruck gegenüber dem atmosphärischen Druck auf 3 bar (300 kPa) erhöht wurde. Die Größe möglicher Luftblasen wird dadurch stark reduziert und damit auch deren Effekt auf die Höhe des in den Standrohren gemessenen Wasserstandes.

Die Höhe des Wasserstandes in den Standrohren wurde im Versuch zum Teil mit Hilfe von Differential-Druckaufnehmern und zum Teil ergänzend durch die Ablesung des Wasserstandes mit Hilfe der angebrachten Maßbänder ermittelt. Es hat sich gezeigt, dass die Druckaufnehmer fehleranfällig sind und die Messwerte in den Langzeitversuchen zum Teil Schwankungen von 3 mm aufwiesen.

Aus diesem Grund wurde der Wasserstand ergänzend durch Ablesung mit Hilfe der angebrachten Maßbänder bestimmt. Dabei kann eine Genauigkeit von etwa 1 mm erzielt werden, was einer Wassermenge von etwa 0,1 g entspricht. Die daraus resultierende Ungenauigkeit des Wassergehaltes hängt von der Probengröße ab. Prinzipiell gilt, je größer die Probe ist, umso kleiner ist der Fehler. Um die Versuchsdauern zu reduzieren, musste die Probenhöhe für den Lias-Ton und den Lösslehm auf 1 cm reduziert werden. Der etwas durchlässigere organogene Ton wurde mit einer Dicke von 2 cm in die Oedometerzellen eingebaut. Die Ablesegenauigkeit von 1 mm erwies sich auch für die 1 cm dicken Proben als ausreichend.

Um die Verdunstung in den Standrohren zu reduzieren, wurden kleine Plastikkugeln in die Standrohre eingesetzt. Paraffinöl als Trennschicht zwischen der Wasser- und Luftphase erwies sich aufgrund der im Versuchsablauf eintretenden Standrohrspiegeländerungen als nicht zielführend. Infolge von adhäsiven Kräften blieb das Paraffin nach einem Spülvorgang zum Teil an den Kunststoffrohren hängen, was zu einer Verunreinigung der Standrohre und vereinzelt sogar der keramischen Filtersteine führte. Jedoch hat sich bei der Auswertung der Versuche gezeigt, dass die Ergebnisse trotz Vorhandensein der Plastikkugeln durch Verdunstung des in den Standrohren befindlichen Wassers beeinflusst werden. Deshalb wurde in einer weiteren Modifikation die in den Standrohren auf die Wassersäule wirkende Druckluft durch ein Wasserreservoir (Befeuchtungszellen) geleitet, um eine möglichst vollständige Wassersättigung der Luft zu erreichen.

Die Vertikalspannung auf die Probe wurde in den ersten Versuchen über eine Totlast aufgebracht. Da die Vertikalspannung auf die Probe jedoch vom Zellenluftdruck abhängig ist, musste bei jeder Druckluftänderung auch die auf den Stempel wirkende Vertikalkraft verändert werden. Die Verwendung von Totlasten erwies sich dabei im Versuchsablauf als unpraktisch, da sich die Vertikalkräfte damit nur sprunghaft ändern lassen. Aus diesem Grunde wurde der Versuchsaufbau nach den ersten Versuchen modifiziert und die Vertikalkraft über einen Rollmembranzylinder mit Hilfe von Druckluft aufgebracht. Der Rollmembranzylinder besteht prinzipiell aus zwei Kammern, die durch eine Gummimembran voneinander getrennt sind. Durch die Erhöhung des Luftdruckes in der oberen Kammer rollt sich die Membran an der Innenwand des Zylinders ab, wodurch die mit der Membran verbundene Kolbenstange ausfährt. Die über die Kolbenstange auf den Oedometerstempel wirkende Kraft hängt damit vom aufgetragenen Luftdruck und dem Durchmesser des Zylinders ab. Beim verwendeten Rollmembranzylinder wird die Kolbenstange über ein Kugellager geführt, wodurch nur sehr geringe Reibungswiderstände auftreten.

Die Änderung der Probenhöhe während des Versuches wurde über die Relativbewegung des Stempels gegenüber einem Fixpunkt am Belastungsrahmen erfasst. Dazu kam ein elektronischer Wegaufnehmer mit einer Messgenauigkeit von 1/1000 mm zum Einsatz (siehe auch [Abb. 6.41](#)). Die Eigenverformung der Oedometerzelle unter den aufgetragenen Luftdrücken und Vertikalkräften wurde vor Versuchsdurchführung ermittelt und bei der Messung der Vertikalverformungen berücksichtigt.

Während des Versuches wurden in regelmäßigen Zeitabständen elektronisch der Zellenluftdruck, der Wasserdruck, die über den Stempel aufgetragene Vertikalkraft, die Relativbewegung des Stempels sowie der Wasserstand in den Standrohren erfasst. Das Messintervall lag in der Regel bei 5 min. Da die größten Wassergehalts- und Volumenänderungen unmittelbar nach einer Änderung der Saugspannung in der Zelle auftreten, wurde das Messintervall bei einer Änderung des Zellenluftdruckes zunächst auf 10 s reduziert. Um nicht unnötig große Datenmengen zu erzeugen,

wurde das Messintervall anschließend wieder stufenweise erhöht, so dass in der Regel spätestens 6 h nach Änderung des Zellenluftdruckes wieder ein Messintervall von 5 min erreicht wurde.

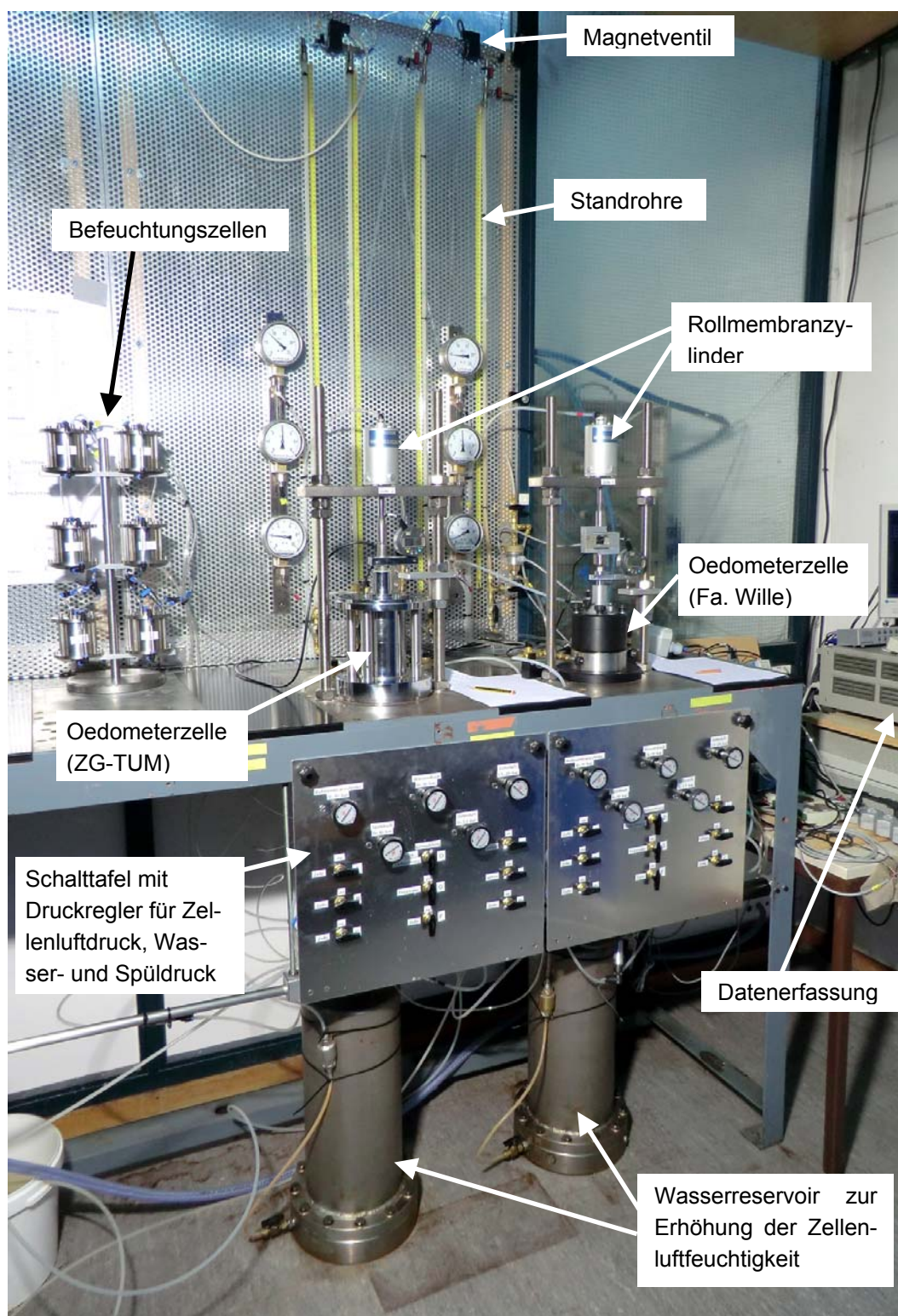


Abb. 6.46: Versuchsaufbau mit den Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen

6.7.2.2 Versuchsdurchführung

Die statisch verdichteten Probekörper hatten einen Durchmesser von 75 mm und eine Höhe von 12 mm bzw. 30 mm. Aus diesen wurde für die Untersuchung in den Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen Prüfkörper mit Hilfe eines Ausstechzylinders (Durchmesser 70 mm) entnommen und auf die Höhe des Ausstechzylinders von 10 mm bzw. 20 mm abgeglichen. Zur Festlegung der ersten Saugspannungsstufe wurde die totale Saugspannung des Restmaterials mit Hilfe des Feuchtigkeitsmessgerätes nach der Taupunktmethode (WP 4) gemessen.

Vor jedem Versuch wurden der k -Wert der gesättigten Keramik bestimmt, das System bei einem Wasserdruck von 3 bar (300 kPa) auf Dichtigkeit geprüft und die Druckaufnehmer kontrolliert. Anschließend wurde das System mit entlüftetem Wasser gefüllt und die Probe eingebaut. Da die Proben unmittelbar bei Kontakt mit der gesättigten Keramik Wasser aufnehmen, musste anschließend sehr zügig gearbeitet werden. Zunächst wurde eine Vertikalspannung von ca. 5 kPa mit Hilfe der Rollmembranzylinder aufgebracht. Damit wurde gewährleistet, dass der Stempel Kontakt zur Probe hat. Der Wegaufnehmer wurde anschließend auf Null gestellt und die Vertikalspannung auf 30 kPa erhöht. Danach wurde der Luftdruck auf die Höhe der einzustellenden Saugspannung angehoben. Um die Wasseraufnahme gering zu halten und eine Wasserabgabe zu diesem Zeitpunkt zu unterbinden, wurden die Anschlusshähne zu den Standrohren an der Oedometerzelle bis zu diesem Zeitpunkt noch geschlossen gehalten. Erst nach Anhebung des Luftdruckes auf die Höhe der Saugspannung wurden die Anschlusshähne geöffnet. Anschließend wurden der Wasserdruck und der Luftdruck um 3 bar (300 kPa) angehoben. Bei einer Veränderung des Luftdruckes wurde stets parallel die über den Rollmembranzylinder aufgebrachte Kraft entsprechend verändert, um die Vertikalkräfte auf den Stempel infolge des Zellenluftdruckes zu kompensieren und eine konstante Vertikalspannung von 30 kPa aufrecht zu erhalten.

Durch eine stufenweise Reduzierung des Luftdruckes wurden die Proben zunächst aufgesättigt. Eine vollständige Sättigung der Proben konnte dabei aber nicht erreicht werden, da die minimal einstellbare Saugspannung als Differenz des Zellenluftdruckes und des Wasserdruckes etwa 5 kPa betrug. Anschließend wurden die Proben durch Anheben des Luftdruckes stufenweise entwässert. Der Luftdruck wurde dabei etwa jeweils verdoppelt bis zum maximal möglichen Druck in Abhängigkeit von der verwendeten porösen Keramik. Für die Untersuchungen des Lias-Tones wurden poröse Keramiken mit einem Lufteintrittspunkt von etwa 1500 kPa verwendet; für die vergleichsweise etwas stärker durchlässigen Proben des Lösslehms und des Tons mit organischen Beimengungen kamen Keramiken mit einem Lufteintrittspunkt von 500 kPa zum Einsatz. In Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt der Proben und der maximal einstellbaren Saugspannung ergaben sich insgesamt zwischen acht und zwölf Saugspannungsstufen. Ein Gleichgewichtszustand unter einer Saugspannungsstufe wurde etwa nach 4 bis 6 Tagen erreicht. Dementsprechend ergaben sich Versuchsdauern zwischen eineinhalb und zweieinhalb Monaten. Prinzipiell ist bei der Ermittlung der Entwässerungskurve zu beachten, dass es zu einer Konsolidierung der Probekörper bei hohen Sättigungsgraden kommen kann, wenn keine kontinuierliche Luftphase vorliegt und der auf die Probenoberseite wirkende Luftdruck somit als Auflast auf den undränierten Boden wirkt. Dies kann insbesondere bei sehr kompressiblen Proben zu einer Verdichtung führen.

Nach der letzten Saugspannungsstufe wurde zunächst der Wasserdruck von 3 bar (300 kPa) auf den Atmosphärenluftdruck reduziert, wobei gleichzeitig der Zellenluftdruck und die über den Rollmembranzylinder aufgebrachte Kraft entsprechend vermindert wurden. Anschließend wurden die

Anschlussähne an die Standrohre geschlossen, um eine Veränderung des Wassergehaltes weitgehend zu vermeiden. Danach wurde der Luftdruck auf den Atmosphärenluftdruck gesenkt, wobei die Vertikalkraft so verändert wurde, dass eine Vertikalspannung von 30 kPa zunächst noch aufrechterhalten wurde. Da nach dem Herabsetzen der Saugspannung auf $u_a - u_w = 0$ die Probe beginnt, Wasser aus der gesättigten Keramik aufzunehmen, wurde die Vertikalkraft unmittelbar nachfolgend auf Null reduziert und die Probe sofort ausgebaut. Für weitere Saugspannungsuntersuchungen mit Hilfe des Feuchtigkeitsmessgerätes nach der Taupunktmethode (WP4) wurde aus der Oedometerprobe eine zylindrische Probe von ca. 30 mm Durchmesser herausgearbeitet und sofort in einem Probenbehälter des WP 4 verschlossen. Am übrigen Material wurde der Wassergehalt mittels Ofentrocknung bestimmt. Dabei hat sich gezeigt, dass der aus dem Wasserstand der Standrohre abgeleitete Wassergehalt der Probekörper mit dem zu Versuchsende mittels Ofentrocknung bestimmten Wassergehalt der Proben aufgrund der Verdunstung von Wasser in den Standrohren während der langen Versuchsdauer nicht übereinstimmte. In diesen Fällen wurde der Wassergehalt der Proben nach den einzelnen Saugspannungsstufen unter Berücksichtigung der verdunsteten Wassermenge korrigiert. Dazu wurde die infolge Verdunstung ermittelte Gesamtwassermenge als Differenz zwischen der aus der Ofentrocknung und der über die Standrohre ermittelten Wassermenge in der Probe bestimmt und es wurde eine über die Versuchsdauer gleichmäßige Verdunstung angenommen.

6.7.3 Tensiometer

Beim Ton mit organischen Beimengungen wurde die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung im niedrigen Saugspannungsbereich (< 100 kPa) zusätzlich mit Hilfe von Tensiometern untersucht. Beim Lias-Ton und beim Lösslehm wurde dagegen von einer Verwendung der Tensiometer abgesehen, da die Saugspannungen in diesen Böden bereits bei sehr hohen Sättigungsgraden 100 kPa übersteigen und der Messbereich der Tensiometer daher nicht ausreichend war, um aussagekräftige Ergebnisse zu gewinnen. Für die Saugspannungsmessung am nass verdichteten organogenen Ton wurden zunächst mehrere Probekörper statisch verdichtet. Der Einbauwassergehalt der einzelnen Probekörper lag im Mittel bei 77,2 % und damit geringfügig über dem angestrebten Wassergehalt von 75 %. Die erzielte Trockendichte betrug im Mittel $\rho_d = 0,795$ g/cm³. Da der Sättigungsgrad der Proben nach Verdichtung bereits bei 97 % lag, wurde auf eine vollständige Sättigung der Proben verzichtet und sie wurden zur Ermittlung des Entwässerungsastes direkt auf vorgegebene Wassergehalte getrocknet. Zur Reduzierung des Zeitaufwandes für die Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen wurde an jeder Probe nur eine Saugspannungsmessung durchgeführt. Dadurch mussten die Proben jeweils nur auf einen (jeweils unterschiedlichen) Wassergehalt getrocknet und anschließend homogenisiert werden. Im Vergleich zu einer Probe, die schrittweise auf verschiedene Wassergehalte getrocknet wird, konnte die Trocknung der einzelnen Proben parallel erfolgen und konnte damit die Versuchsdauer zur Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung deutlich reduziert werden. Die Messung der Saugspannungen erfolgte mit Hilfe eines Einstichtensiometers T5 der Fa. UMS (siehe [Abb. 6.48](#)). Zur Vermeidung der Verdunstung während der Saugspannungsmessung wurde die Probe mit Hilfe einer Folie abgedeckt (siehe [Abb. 6.47](#) und [Abb. 6.49](#)). Nach der Messung wurde der gravimetrische Wassergehalt mittels Ofentrocknung bestimmt. Zur Ermittlung des Sättigungsgrades wurden der Durchmesser und die Dicke der Proben unmittelbar vor der Messung mit Hilfe einer Schiebelehre gemessen.

Außerdem wurde am Ton mit organischen Beimengungen zusätzlich zum Entwässerungsast der Hauptbewässerungsast untersucht. Dies war zur Beschreibung der Wasserbewegung in der im Abschnitt 8 beschriebenen großmaßstäblichen Versuchsschüttung erforderlich. Zur Ermittlung des Hauptbewässerungsastes der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung wurde prinzipiell in derselben Weise vorgegangen wie für die Ermittlung des Entwässerungsastes. Die einzelnen Probestkörper wurden zunächst bei einem Wassergehalt von im Mittel $w = 78,5\%$ verdichtet. Die dabei erzielte Trockendichte betrug im Mittel $\rho_d = 0,770 \text{ g/cm}^3$. Anschließend wurden die Proben an der Luft auf den Residualwassergehalt von ca. 9 % entwässert, bevor sie wieder auf definierte Wassergehalte bewässert wurden. Die Bewässerung erfolgte dabei durch Wasserzugabe über ein auf der Probenoberfläche aufliegendes Filterpapier. Zur Reduzierung des Zeitaufwandes wurde an einer Probe wiederum nur eine Saugspannungsmessung durchgeführt. Das Probenvolumen wurde mit Hilfe einer Schiebelehre unmittelbar vor Messung der Saugspannung bestimmt. Die Ermittlung des gravimetrischen Wassergehaltes erfolgte nach der Messung mittels Ofentrocknung.



Abb. 6.47: Probe für Saugspannungsmessung



Abb. 6.48: Einstichtensiometer



Abb. 6.49: Saugspannungsmessung

6.7.4 Feuchtigkeitsmessgerät nach der Taupunktmethode

Der hohe Saugspannungsbereich wurde mit Hilfe eines Feuchtigkeitsmessgerätes nach der Taupunktmethode untersucht. Dieses nutzt den thermodynamischen Zusammenhang zwischen der Bodenluftfeuchtigkeit und der totalen Saugspannung nach Gleichung (4.3). Durch Bestimmung der Bodenluftfeuchtigkeit lässt sich damit die totale Saugspannung bestimmen. Die Messungen wurden mit dem Gerät WP 4 der Fa. Decagon durchgeführt. Zur Messung wird dabei eine Bodenprobe in eine luftdicht verschlossene Kammer gegeben, welche einen kühlbaren Spiegel mit Kondensationsdetektor und einen kleinen Ventilator zur Luftumwälzung enthält (siehe [Abb. 6.50](#)). Mit Hilfe des Ventilators stellt sich bereits nach kurzer Zeit ein Gleichgewicht zwischen der Bodenluftfeuchtigkeit und der Feuchtigkeit der darüber befindlichen Luft ein. Das heißt, die relative Feuchte in der Kammer entspricht der relativen Feuchte in den luftgefüllten Poren der Bodenprobe. Die Temperatur des Spiegels lässt sich thermoelektrisch steuern. Hat sich der Spiegel weit genug abgekühlt, kondensiert bei Erreichen des Taupunktes die Luftfeuchte am Spiegel. Die genaue Erfassung dieses Zeitpunktes erfolgt mit Hilfe eines Lichtstrahles und einer so genannten Fotodetektorzelle. Sobald sich ein Wassertropfen am Spiegel bildet, wird dies von der Fotodetektorzelle registriert, da der reflektierte Lichtstrahl am Wassertropfen gebrochen wird. Die relative Luftfeuchtigkeit wird an-

schließlich aus der Temperatur des Spiegels (Taupunkttemperatur) und der dabei in der Kammer herrschenden Temperatur ermittelt.

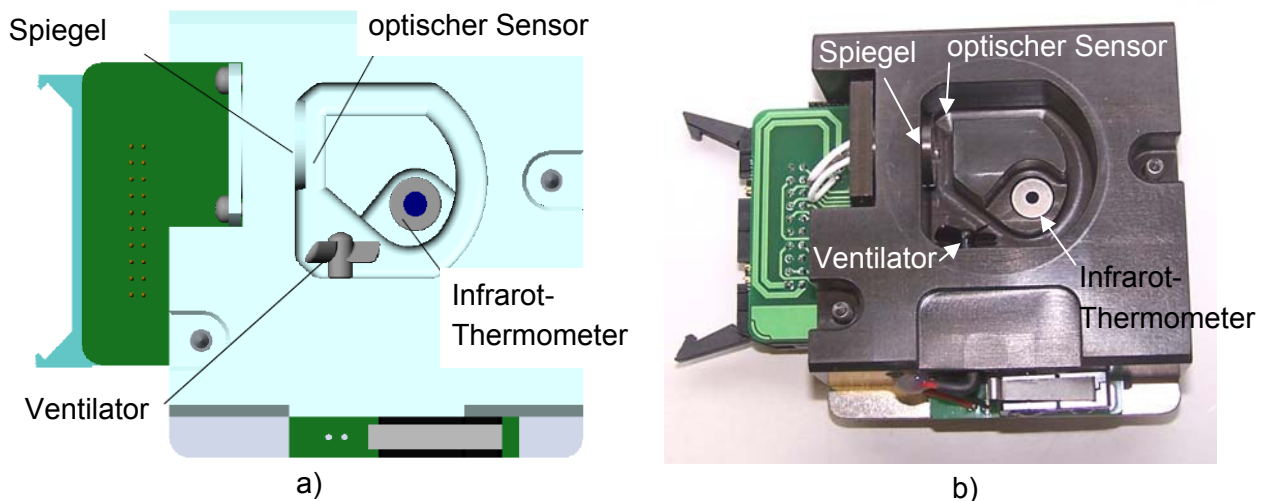


Abb. 6.50: Messkammer des WP 4: a) Prinzipdarstellung (Decagon Devices, 2003); b) Fotoaufnahme

Die Firma Decagon weist für das WP 4 einen Messbereich von 1 bis 60 MPa aus. Das Gerät liefert auch für den darunter und darüber befindlichen Messbereich Ergebnisse, jedoch nehmen die Messgenauigkeiten insbesondere bei Messwerten < 1 MPa stark zu, da die dabei vorliegenden relativen Luftfeuchtigkeiten über 99 % messtechnisch nicht exakt erfasst werden können. Zur Überprüfung der Messergebnisse wurden in regelmäßigen Abständen Messungen an 0,5 molaren Kaliumchlorid-Lösungen durchgeführt. Bei einer Temperatur von 20 °C stellt sich oberhalb dieser Lösung eine Luftfeuchtigkeit von 98,4 % ein, was einer totalen Saugspannung von 2,19 MPa entspricht. Sofern der Messwert des WP 4 um mehr als 0,1 MPa von 2,19 MPa abwich, wurde eine Kalibrierung des Gerätes vorgenommen.

Der große Vorteil des Messgerätes gegenüber anderen Messmethoden (z.B. Psychrometer) sind die relativ einfache Handhabung sowie die vergleichsweise sehr kurze erforderliche Messdauer. Entsprechend den Untersuchungen von CAMPBELL ET AL. (1973), LEONG ET AL. (2003) sowie AGUS UND SCHANZ (2005a) zeichnet sich das Messgerät außerdem durch eine große Präzision aus. Jedoch können damit nur sehr kleine Probekörper (Durchmesser ca. 30 mm, Dicke ca. 8 mm) untersucht werden. Dadurch, dass die Bodenprobe in einem Probenbehälter in das Gerät eingeführt wird, können die Untersuchungen zudem nicht unter oedometrischen Verhältnissen mit definierten Auflastspannungen durchgeführt werden.

Die Saugspannungsmessungen mit dem WP 4 wurden zum Teil an Proben, die bereits in der Saugspannungskontrollierten Oedometerzelle untersucht worden waren, und zum Teil an Proben, die direkt vom Einbauzustand entwässert wurden, durchgeführt. Dazu wurden Prüfkörper von ca. 3 cm Durchmesser und 0,8 cm Höhe aus den jeweiligen Proben herausgearbeitet. Zur Ermittlung des Entwässerungsastes der Saugspannung-Wassergehalts-Beziehung wurden diese schrittweise getrocknet, wobei jeweils der Wassergehalt der Proben aus der Feuchtmasse und die totale Saugspannung mit Hilfe des Feuchtigkeitsmessgerätes nach der Taupunktmethode ermittelt wurden. Da die Proben sich während des Versuches stets in einem Probenbehälter befinden und nur

über die Oberfläche trocknen können, wurde die Saugspannungsmessung jeweils erst nach einer Homogenisierungsphase von mindestens 24 h durchgeführt. Nach der letzten Messung beim niedrigsten Wassergehalt wurde der gravimetrische Wassergehalt der Proben mittels Ofentrocknung bestimmt. Auf eine Vermessung der Proben zur Bestimmung des Volumens mit Hilfe einer Schiebelehre wurde verzichtet, da die Proben sehr klein und empfindlich sind und dazu aus dem Probenbehälter hätten entnommen werden müssen. Zur Ermittlung des Sättigungsgrades wurde angenommen, dass sich die Dichte der Proben nicht ändert. Da die Proben im Zuge der Austrocknung jedoch schrumpfen, wird der Sättigungsgrad der Proben damit unterschätzt.

6.7.5 Ergebnisse

6.7.5.1 Lias-Ton

Da die Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung eines Bodens bei Berücksichtigung der Hauptentwässerungs- und Hauptbewässerungskurve sehr aufwändig und zeitintensiv ist, sollte prinzipiell in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung entschieden werden, ob ggf. die Ermittlung der Hauptbewässerungs- oder Hauptentwässerungskurve oder einer dazwischen liegenden „Scanning“-Kurve ausreichend ist, und ob die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung sowohl im niedrigen Saugspannungsbereich (< 1500 kPa) als auch im hohen Saugspannungsbereich (> 1500 kPa) zu ermitteln ist. Da sich die vorliegende Arbeit auf verdichtete Böden konzentriert, konnte als Ausgangszustand für die zu ermittelnden Kurven der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung vom Einbauzustand nach Verdichtung ausgegangen werden. Je nach Einbauwassergehalt kann sich dabei nach Verdichtung in situ eine Entwässerung bzw. eine Bewässerung einstellen. Dementsprechend wurde der Einfluss unterschiedlicher Einbaubedingungen zum einen an Proben untersucht, die vom Einbauzustand ausgehend zunächst aufgesättigt (Erstbewässerung) und anschließend entwässert wurden und zum anderen an Proben die vom Einbauzustand ausgehend direkt entwässert wurden (Erstentwässerung) (siehe [Abb. 6.51](#)). Bei der Erstbewässerung handelt es sich um eine „Scanning“-Kurve. Da im Zuge der Bewässerung in den Saugspannungskontrollierten Oedometerzellen zwar rechnerisch Sättigungsgrade zwischen 98 % und 100 % erreicht wurden, die minimale Saugspannung aber zwischen 5 und 10 kPa betrug, wird angenommen, dass im Zuge der Bewässerung keine vollständige Sättigung der Proben erreicht werden konnte. Bei der von diesem Zustand ausgehend ermittelten Entwässerungskurve handelt es sich deshalb strenggenommen nicht um eine Hauptentwässerungskurve. Dementsprechend wird im Folgenden von einer Entwässerungskurve gesprochen. Zur Ermittlung der Hauptbewässerungskurve hätten die Proben nach Einbau zunächst auf den Residualwassergehalt getrocknet und erst anschließend aufgesättigt werden müssen. Um den zeitlichen Aufwand für die experimentellen Untersuchungen jedoch in einem vertretbaren Rahmen zu halten, musste darauf verzichtet werden. Jedoch wurde zusätzlich die vom Einbauzustand ausgehende Entwässerungskurve (Erstentwässerung) bestimmt. Dadurch konnten die sich im Zuge der Austrocknung bei den Schrumpfunter-suchungen einstellenden Saugspannungen bestimmt und ein Zusammenhang zwischen der Dichte-änderung infolge der Austrocknung und der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung hergestellt werden. (BIRLE ET AL., 2008)

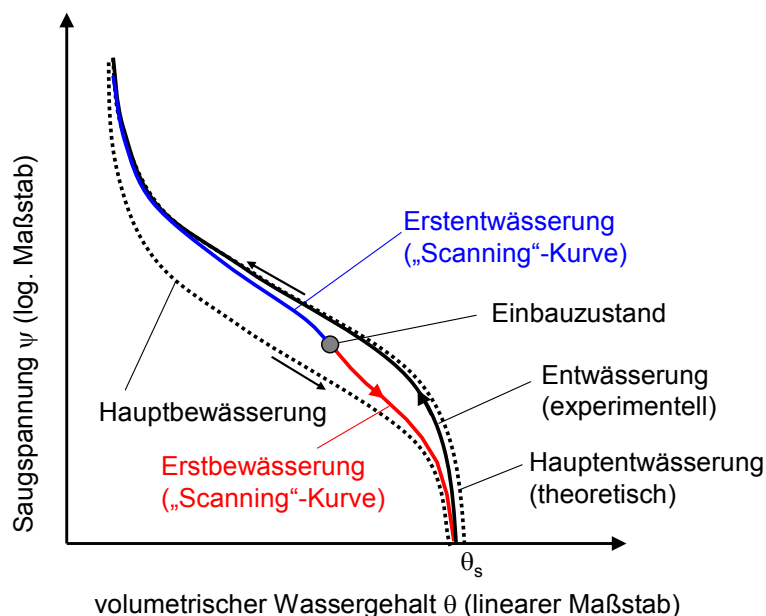


Abb. 6.51: Prinzipielle Darstellung der am Lias-Ton experimentell ermittelten Kurven der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung

Die im Einbauzustand vorliegenden Saugspannungen wurden mit Hilfe des Feuchtigkeitsmessgerätes nach der Taupunktmethode (WP 4) bestimmt. Die Erstbewässerung und die anschließende Entwässerung bis maximal 1500 kPa wurden in den Saugspannungskontrollierten Oedometerzellen durchgeführt. Die weitere Entwässerungskurve im Saugspannungsbereich > 1500 kPa wurde mit Hilfe des WP 4 untersucht. Ebenso wurde die Erstentwässerungskurve mit Hilfe des WP 4 bestimmt.

Da die Versuche sehr zeitintensiv sind, konnte der Lias-Ton nicht für alle Einbauzustände in diesem Umfang untersucht werden. Die ausgeführten Versuche können der Tab. 6.7 entnommen werden.

Versuchsart	Versuchsgeräte	Einbaubedingungen	Versuchsbezeichnungen
Entwässerung ausgehend vom Einbauzustand (Erstentwässerung)	WP 4	Punkt 1 bis Punkt 8	Psu1 bis Psu8
Bewässerung ausgehend vom Einbauzustand (Erstbewässerung) und Entwässerung	Oedometerzellen / WP 4	Punkte 4, 5, 7, 8	P4, P5, P7, P8

Tab. 6.7: Übersicht über die am Lias-Ton durchgeführten Saugspannungsuntersuchungen

Erstentwässerung

Die Erstentwässerungskurve wurde für alle acht Einbauzustände bestimmt. Die bei der Herstellung der Probekörper erzielten Einbauwassergehalte und Einbaudichten sind in Abb. 6.52 dargestellt. Im Vergleich zu den angestrebten Wassergehalten wurden systematisch etwa um 0,5 % bis 1 % geringere Wassergehalte erreicht, was sich auf Feuchtigkeitsverluste während der Probenherstellung zurückführen lässt.

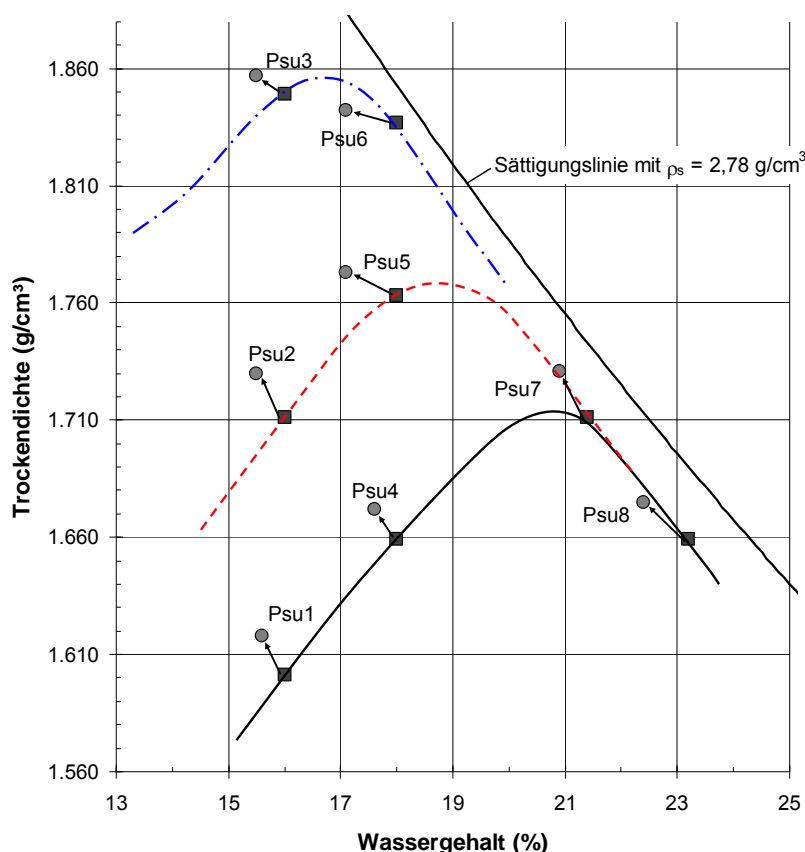
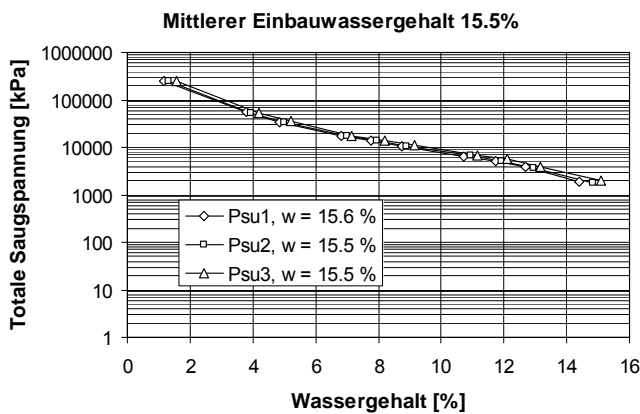


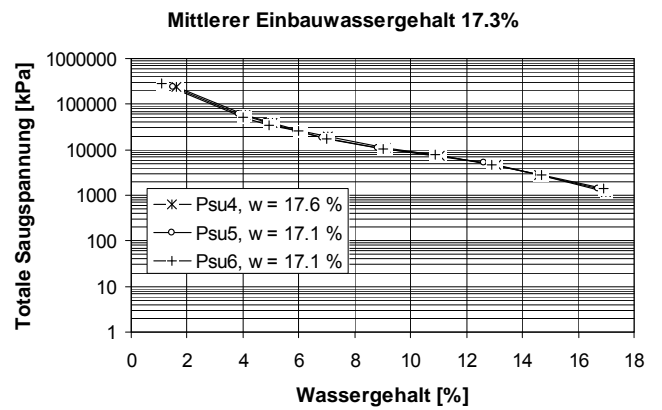
Abb. 6.52: Saugspannungsmessungen am Lias-Ton (Erstentwässerung), gewünschte Ausgangspunkte (eckig) und tatsächlich erreichte Ausgangspunkte (rund)

Für die Proben Psu1, Psu2 und Psu3 wurde ein mittlerer Wassergehalt von 15,5 %, für die Proben Psu4, Psu5 und Psu6 von 17,3 % bestimmt. Um den Einfluss unterschiedlicher Einbaudichten zu studieren, sind in der [Abb. 6.53](#) und der [Abb. 6.54](#) die Ergebnisse der bei ähnlichen Wassergehalten verdichteten Proben Psu1, Psu2, Psu3 sowie Psu4, Psu5, Psu6 dargestellt. Für die Beziehung zwischen Saugspannung und gravimetrischen Wassergehalt sind dabei sehr ähnliche Verläufe zu erkennen. Dies bedeutet, dass die vom Einbauzustand ausgehende Erstentwässerungskurve für die auf der trockenen Seite der Standard-Proctorkurve verdichteten Proben von der Einbaudichte nicht signifikant beeinflusst wird. Dies ist auf die Poren- und Aggregatstruktur der Proben zurückzuführen. Entsprechend den Ergebnissen der Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen führt die unterschiedliche Verdichtung der Proben zu einer Komprimierung der Interaggregatporen (Makroporen); die Intraaggregatporen (Mikroporen) dagegen bleiben davon weitgehend unbeeinflusst. Gemäß den Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen kann die Grenze zwischen Interaggregat- und Intraaggregatporen bei einem Porendurchmesser zwischen 0,1 μm und 0,3 μm gezogen werden, was einer Kapillarspannung zwischen 3 MPa und 8 MPa entspricht. Berücksichtigt man, dass die im Ausgangszustand gemessenen totalen Saugspannungen in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt bereits bei 1 MPa bis 2 MPa liegen, wird deutlich, dass sich die im Zuge der Erstentwässerung einstellenden totalen Saugspannungen abgesehen vom osmotischen Anteil fast ausschließlich aus den durch den Intraaggregatporenraum resultierenden Matrixspannungen ergeben. Ähnliche Ergebnisse wurden von ROMERO ET AL. (1999) an einem Boom-clay und von BOSO (2005) an einem schluffigen Ton erzielt.

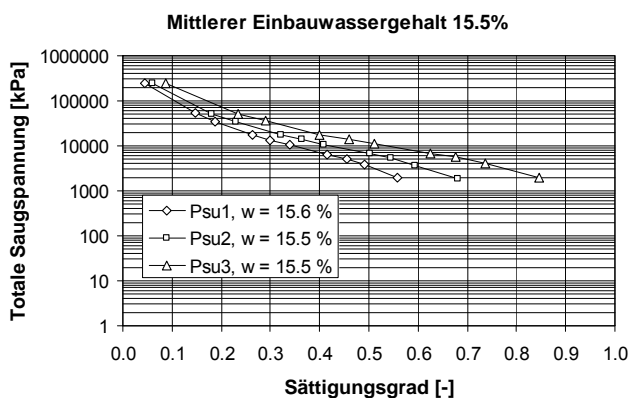
Der Einfluss unterschiedlicher Einbaudichten ist erkennbar, wenn für die bei gleichem Einbauwassergehalt verdichteten Proben Psu1, Psu2, Psu3 bzw. Psu4, Psu5, Psu6 die Beziehung zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad dargestellt wird (siehe [Abb. 6.53 b](#)) und [Abb. 6.54 b](#)). Mit zunehmender Einbaudichte nehmen die Porenzahl ab und der sich bei gleichem Wassergehalt einstellende Sättigungsgrad zu. Dadurch verschieben sich die ermittelten Kurven der Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehung mit zunehmender Einbaudichte nach oben. Der Abstand zwischen den einzelnen Kurven wird dabei durch die Differenz der Porenzahlen bestimmt. So stellt sich zwischen den Kurven der Proben Psu1 und Psu3 ein größerer Abstand ein als zwischen den Kurven der Proben Psu4 und Psu6, da sich die Trockendichten der Proben Psu1 und Psu3 um $\Delta\rho_d = 0,239 \text{ g/cm}^3$ und der Proben Psu4 und Psu6 nur um $\Delta\rho_d = 0,170 \text{ g/cm}^3$ unterscheiden. Ähnliche Beobachtungen wurden bereits von anderen Autoren gemacht, u. a. von VANAPALLI ET AL. (1999), TARANTINO UND TOMBOLATO (2005) und BOSO (2005).



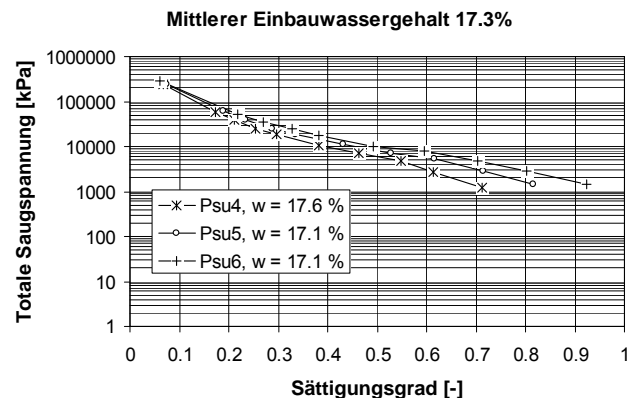
(a)



(a)



(b)



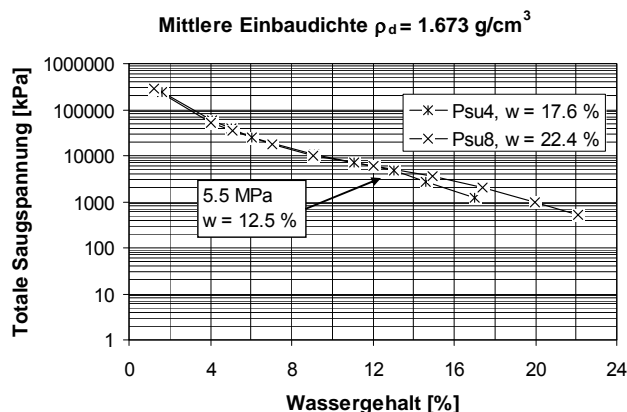
(b)

Abb. 6.53: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt (a) bzw. Sättigungsgrad (b) für die Proben Psu1, Psu2 und Psu3

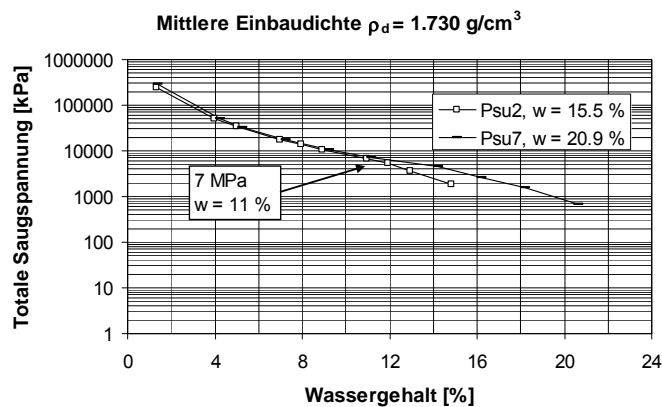
Abb. 6.54: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt (a) bzw. Sättigungsgrad (b) für die Proben Psu4, Psu5 und Psu6

Der Einfluss unterschiedlicher Einbauwassergehalte auf die Erstentwässerungskurve der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung ist aus einem Vergleich der Proben Psu4 und Psu8 bzw. Psu2 und Psu7 erkennbar. Diese wurden bei unterschiedlichen Einbauwassergehalten aber

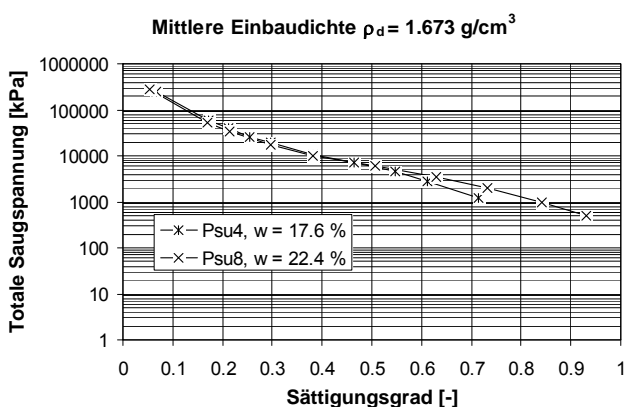
mit sehr ähnlichen Trockendichten hergestellt. Wie die Abb. 6.55 a) und die Abb. 6.56 a) zeigen, liegen die Kurven der Proben Psu4 und Psu8 bzw. Psu2 und Psu7 bei Saugspannungen oberhalb von 5,5 MPa bzw. 7 MPa etwa übereinander. Im niedrigeren Saugspannungsbereich sind dagegen deutliche Unterschiede erkennbar. Aus einem Vergleich mit den bei gleichem Einbauwassergehalt aber unterschiedlichen Dichten hergestellten Proben (Abb. 6.53 und Abb. 6.54) zeigt sich, dass der Einbauwassergehalt einen deutlich größeren Einfluss auf die Beziehung zwischen Saugspannung und Wassergehalt ausübt als die Einbaudichte. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Poren- und Aggregatstrukturen der Proben, die wie die Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen zeigen, maßgeblich vom Einbauwassergehalt beeinflusst werden. So wurden für die auf der nassen Seite des Standard-Proctoroptimums verdichteten Proben Pm7 und Pm8 unimodale Porengrößenverteilungen und für die auf der trockenen Seite des Proctoroptimums verdichteten Proben Pm1 bis Pm6 bimodale Porengrößenverteilungen bestehend aus Interaggregat- und Intraaggregatporen festgestellt. Infolge der vergleichsweise großen Interaggregatporen kommt es deshalb bei den auf der trockenen Seite verdichteten Proben Psu4 und Psu2 im Vergleich zu den auf der nassen Seite verdichteten Proben Psu8 und Psu7 zu einer stärkeren Abnahme der Saugspannung bei hohen Wassergehalten. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse aber auch, dass die Einbaubedingungen bei niedrigen Wassergehalten bis zu einem Grenzwassergehalt von ca. 11 % keinen nennenswerten Einfluss auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung ausüben. Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung mit Untersuchungen von CRONEY UND COLEMAN (1954), VANAPALLI ET AL. (1999), ROMERO ET AL. (1999) und THAKUR ET AL. (2005). VANAPALLI ET AL. (1999) führen dies darauf zurück, dass im niedrigen Wassergehaltsbereich die den Feststoff umgebenden Wasserfilme so dünn sind, dass die adsorptiven und osmotischen Kräfte gegenüber den Kapillarkräften überwiegen. Allerdings zeigen auch die Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen für die verdichteten Proben des Lias-Tons im niedrigen Wassergehaltsbereich unabhängig vom Einbauwassergehalt und der Einbaudichte sehr ähnliche Porengrößenverteilungen. Dies lässt darauf schließen, dass der Bereich der sehr kleinen Intraaggregatporen vom Einbauwassergehalt und von der Einbaudichte tatsächlich nicht signifikant beeinflusst wird und die Geometrie und Größe der Intraaggregatporen für die verschiedenen Proben im entsprechenden Größenbereich sehr ähnlich sind.



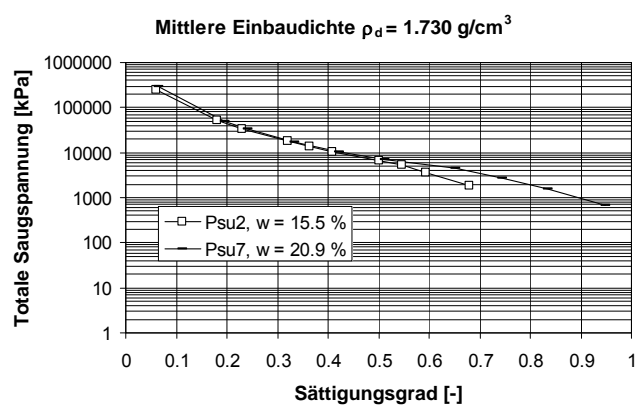
(a)



(a)



(b)



(b)

Abb. 6.55: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt (a) bzw. Sättigungsgrad (b) für die Proben Psu4 und Psu8

Abb. 6.56: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt (a) bzw. Sättigungsgrad (b) für die Proben Psu2 und Psu7

Erstbewässerung und Entwässerung

Da die Untersuchungen in der Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzelle unter Anwendung der Achsen-Translations-Technik (ATT) sehr zeitaufwändig sind, wurden die Erstbewässerungskurve und die Entwässerungskurve der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung nur für die Punkte 4, 5, 7 und 8 ermittelt. Die bei der Herstellung der Probekörper erzielten Einbauwassergehalte und Einbaudichten sind in der Abb. 6.57 dargestellt. Weitere Kennwerte der einzelnen Proben unmittelbar nach Verdichtung, am Ende der Bewässerungskurve und zum Ende der Entwässerungskurve sind darüber hinaus in der Tab. 6.8 angegeben. Es ist zu erkennen, dass die erreichten und angestrebten Wassergehalte sehr gut übereinstimmen. Jedoch liegen die erzielten Einbaudichten insbesondere bei den Punkten 4 und 8 deutlich unter den angestrebten Dichten. Dies ist auf Schwellvorgänge im Zuge der Entlastung nach der statischen Verdichtung der Probekörper zurück zu führen. Durch die geringe Dicke der Probekörper von nur 1 cm wirken sich geringe Messungenauigkeiten zudem sehr stark auf die Dichte aus.

Probe	$w_a / w_0 / w_e$ [%]	$\rho_{d,a} / \rho_{d,0} / \rho_{d,e}$ [g/cm ³]	$n_a / n_0 / n_e$ [-]	$e_a / e_0 / e_e$ [-]	$Sr_a / Sr_0 / Sr_e$ [-]	$n_{Luft,a}$ [-]	C_m [-]
P4	Einbau	18,05	1,635	0,412	0,700	0,117	0,041
	Ende Bew.	24,14	1,659	0,403	0,675		
	Ende Entw.	17,33	1,711	0,385	0,625	0,77	
P5	Einbau	17,91	1,765	0,365	0,575	0,049	0,044
	Ende Bew.	21,36	1,743	0,373	0,595	1,0	
	Ende Entw.	17,08	1,809	0,349	0,537	0,89	
P7	Einbau	20,94	1,701	0,388	0,634	0,92	0,051
	Ende Bew.	23,36	1,691	0,392	0,644	1,0	
	Ende Entw.	18,06	1,769	0,363	0,571	0,88	
P8	Einbau	22,90	1,610	0,420	0,723	0,86	0,081
	Ende Bew.	25,61	1,639	0,410	0,696	1,0	
	Ende Entw.	18,64	1,718	0,382	0,618	0,82	

Tab. 6.8: Kennwerte der in den Oedometerzellen untersuchten Proben des Lias-Tons

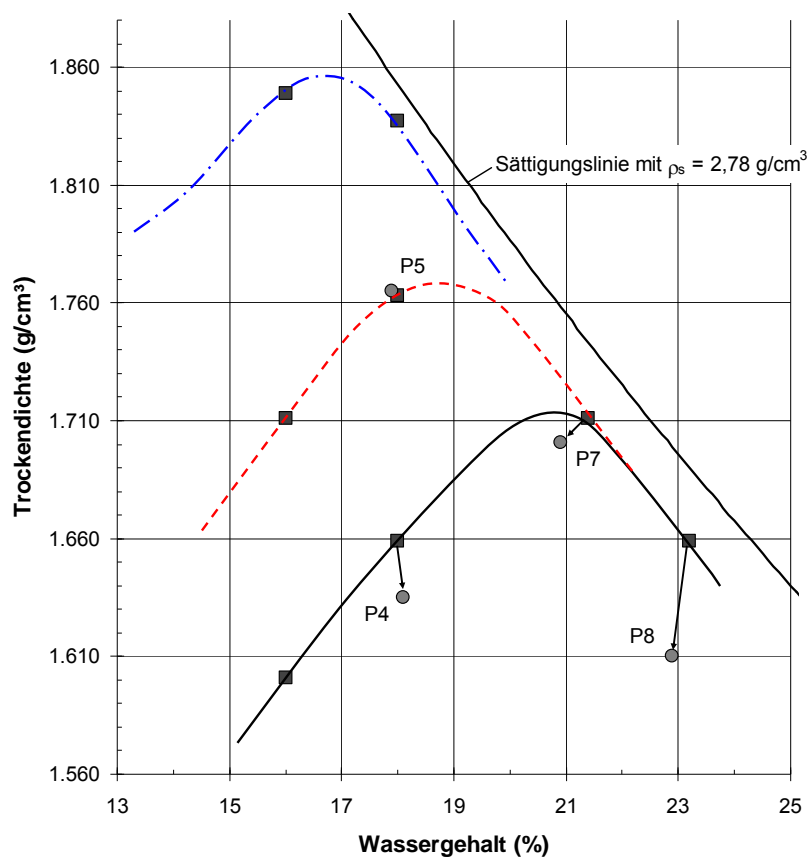


Abb. 6.57: Saugspannungsmessungen am Lias-Ton (Erstbewässerung und Entwässerung), gewünschte Ausgangspunkte (eckig) und tatsächlich erreichte Ausgangspunkte (rund)

Die Abb. 6.58 stellt den Zusammenhang zwischen Saugspannung und gravimetrischem Wassergehalt für die untersuchten Einbauzustände dar. In Abhängigkeit von der Einbaudichte streben die Proben unterschiedlichen Wassergehalten bei vollständiger Sättigung zu. Dementsprechend zeigen sich im niedrigen Saugspannungsbereich zum Teil deutliche Unterschiede in den Verläufen. Im

hohen Saugspannungsbereich bei Wassergehalten < 11 % dagegen liegen die Entwässerungskurven aller Proben fast deckungsgleich übereinander wie es auch für die Erstentwässerungskurven der Fall war. Ebenso lässt sich für die bei gleichem Einbauwassergehalt verdichteten Proben P4 und P5 erkennen, dass die Entwässerungskurven sogar bis zu einem Wassergehalt von ca. 18 % fast deckungsgleich übereinander liegen. Bei Wassergehalten oberhalb von 18 % dagegen zeigen sich deutliche Unterschiede, da die höher verdichtete Probe P5 aufgrund des geringeren Interaggregatporenraumes deutlich weniger Wasser aufnehmen kann.

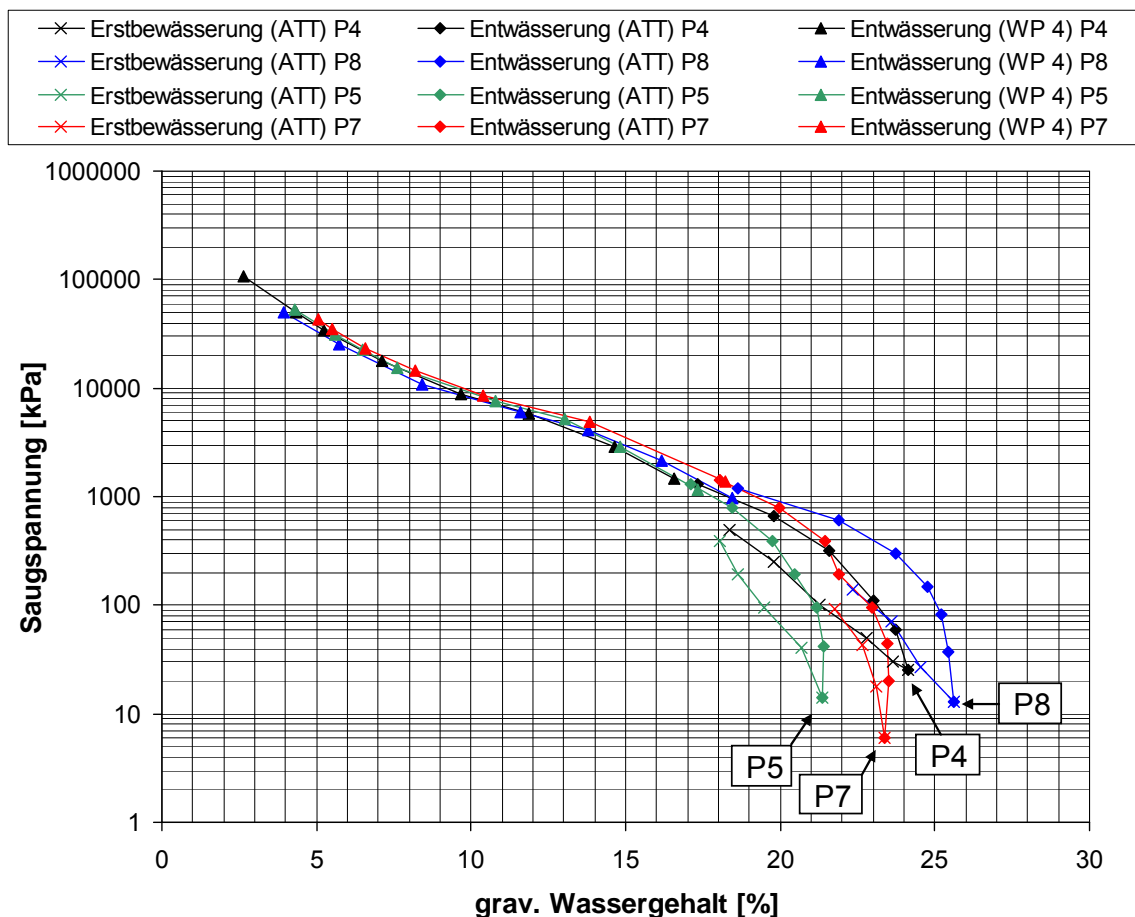


Abb. 6.58: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt für die Proben P4, P5, P7 und P8

Die Beziehung zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad ist für die untersuchten Proben in der Abb. 6.59 dargestellt. Die darin aufgeführten Lufteintrittspunkte wurden mit Hilfe der in Abschnitt 4.1.3.1 beschriebenen Tangentenkonstruktion ermittelt.

Bei einem Vergleich der bei gleichem Einbauwassergehalt hergestellten Proben P4 und P5 ist zu erkennen, dass die Entwässerungskurve der Probe P5 aufgrund der höheren Dichte oberhalb der Kurve der Probe P4 liegt. Außerdem weist die Probe P5 im Vergleich zur Probe P4 einen deutlich höheren Lufteintrittspunkt auf, was ebenfalls auf die höhere Dichte und den damit verbundenen geringeren Interaggregatporenraum zurückzuführen ist.

Die Entwässerungskurven der mit etwa gleicher Dichte aber bei unterschiedlichen Einbauwassergehalten verdichteten Proben P4 und P8 liegen im hohen Saugspannungsbereich über 5500 kPa fast deckungsgleich übereinander. Im Bereich von Saugspannungen < 5500 kPa dagegen sind aufgrund der unterschiedlichen Poren- und Aggregatstrukturen deutliche Unterschiede erkennbar. So weist die Probe P8 aufgrund ihrer unimodalen Porengrößenverteilung bei einer Entwässerung vom gesättigten Zustand ausgehend ein deutlich größeres Wasserrückhaltevermögen auf. Im Vergleich dazu ist bei der Probe P4 im niedrigen Saugspannungsbereich zwischen 1 kPa und 100 kPa ein deutlich stärker geneigter Kurvenverlauf zu erkennen. Dies bedeutet, dass die Probe P4 vom gesättigten Zustand ausgehend bereits bei einem vergleichsweise geringen Anheben der Saugspannungen entwässert. Diese Beobachtungen werden bestätigt durch die für die beiden Proben ermittelten Lufteintrittspunkte. So liegt der Lufteintrittspunkt der Probe P4 mit 300 kPa unterhalb des für die Probe P8 ermittelten Wertes von 410 kPa.

Die etwa beim Proctoroptimum hergestellte Probe P7 weist einen sehr ähnlichen Kurvenverlauf wie die Probe P5 auf, obwohl sich die Proben sowohl in der Dichte als auch im Einbauwassergehalt unterscheiden. Gemeinsam ist beiden Proben ein vergleichsweise geringer Luftporenanteil im Einbauzustand.

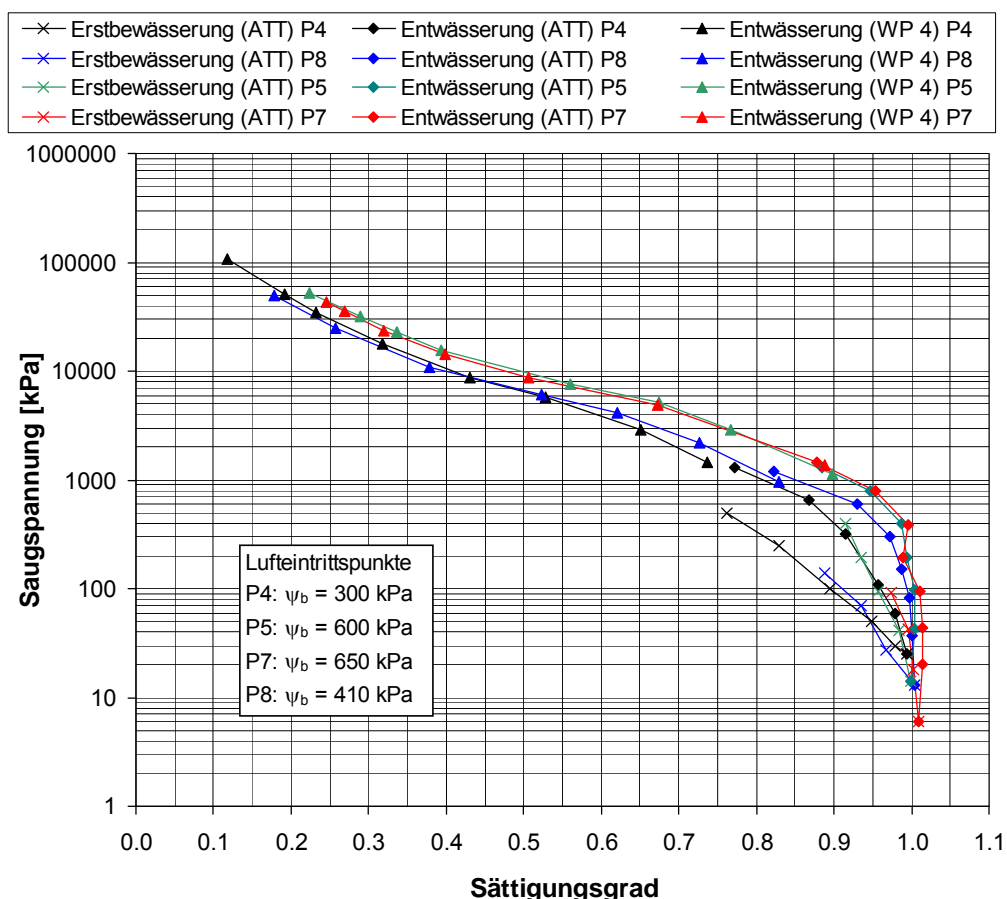


Abb. 6.59: Beziehung zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad für die Proben P4, P5, P7 und P8

Für die mathematische Beschreibung der Wasserbewegung im ungesättigten Boden ist wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben eine parametrisierte Darstellung der Beziehung zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad bzw. Saugspannung und volumetrischem Wassergehalt erforderlich. Vor diesem Hintergrund wurden die experimentell ermittelten Entwässerungskurven der einzelnen Proben mit den in der Praxis sehr weit verbreiteten Ansätzen nach VAN GENUCHTEN (1980) und FREDLUND UND XING (1994) parametrisiert. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Beschreibung der Wasserbewegung im Boden mit der in Abschnitt 4.1.5 dargestellten Richards-Gleichung die Annahme eines starren Korngerüstes voraussetzt. Dies ist jedoch bei den untersuchten Proben nicht der Fall. Vielmehr kommt es zu Quell- und Schrumpfvorgängen, die eine Veränderung des Porenanteils nach sich ziehen. Die in [Abb. 6.59](#) dargestellte Beziehung zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad wurde unter Berücksichtigung der Probenverformungen ermittelt und gibt damit die tatsächlich bei vorgegebenen Saugspannungen auftretenden Sättigungsgrade wieder. Wird diese Funktion für die Berechnung von Wasserbewegungen unter der Annahme eines starren Korngerüstes verwendet, kommt es jedoch zu Ungenauigkeiten, da die von der Probe infolge einer Verringerung oder Vergrößerung des Porenvolumens ab- bzw. aufgenommene Wassermenge nicht abgebildet werden kann. Für die Quantifizierung von Sickerwassermengen ist es deshalb ratsam, die Versuchsergebnisse unter der Annahme eines konstanten Porenanteils auszuwerten. Bezieht man die Saugspannung auf den Sättigungsgrad, kann es im Fall von Quellverformungen dabei jedoch zu Sättigungsgraden über 1,0 kommen. Deshalb ist stattdessen die Verwendung der Beziehung zwischen der Saugspannung und dem volumetrischen Wassergehalt zu empfehlen.

Um abzuschätzen, inwieweit die Berücksichtigung bzw. Vernachlässigung der Probenverformungen sich auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung auswirken, wurden die Parametrisierungen für beide Fälle durchgeführt. Zur Beschreibung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der einzelnen Proben mit dem Modell nach *van Genuchten* wurden die Parameter α , n , θ_{\max} und θ_{\min} so gewählt, dass die Summe der Fehlerquadrate zwischen den gemessenen Saugspannungen und den mit Hilfe des Modells nach *van Genuchten* ermittelten Werten ein Minimum annehmen. In gleicher Weise wurden die Kennwerte a_f , n_f , m_f , θ_{\max} und θ_{\min} beim Modell nach *Fredlund&Xing* für die einzelnen Proben bestimmt. Der beim Modell nach *Fredlund&Xing* enthaltene Parameter ψ_r wurde gemäß FREDLUND UND XING (1994) in allen Fällen zu $\psi_r = 3000$ kPa angenommen.

Die [Abb. 6.60](#) und [Abb. 6.62](#) stellt die messtechnisch ermittelten und mit den Ansätzen nach *van Genuchten* bzw. *Fredlund&Xing* parametrisierten Entwässerungskurven der Probe P5 dar. Die mit „V=var.“ bezeichneten Entwässerungskurven wurden dabei unter Berücksichtigung der gemessenen Volumenänderungen ermittelt, während die mit „V=const.“ bezeichneten Kurven unter der Annahme eines konstant bleibenden Volumens bestimmt wurden. Es ist zu erkennen, dass aus der Vernachlässigung der Probenverformungen tendenziell ein etwas kleinerer Lufteintrittspunkt und eine im mittleren Bereich geringfügig steilere Kurve resultieren. Dementsprechend ergeben sich bei der Parametrisierung nach *van Genuchten* etwas größere α -Werte und etwas geringere n -Werte. Allerdings sind die Unterschiede zwischen den unter Berücksichtigung der Volumenänderungen und den bei Annahme eines konstanten Volumens ermittelten Kurvenverläufen als gering zu bewerten. Dabei ist zu beachten, dass die Unterschiede bei der betrachteten Probe P5 im Vergleich zu den übrigen untersuchten Proben noch am größten sind, da die Probe P5 aufgrund der deutlich größeren Dichte im Zuge der Aufsättigung größere Quellverformungen als die übrigen Probekörper erfahren hat.

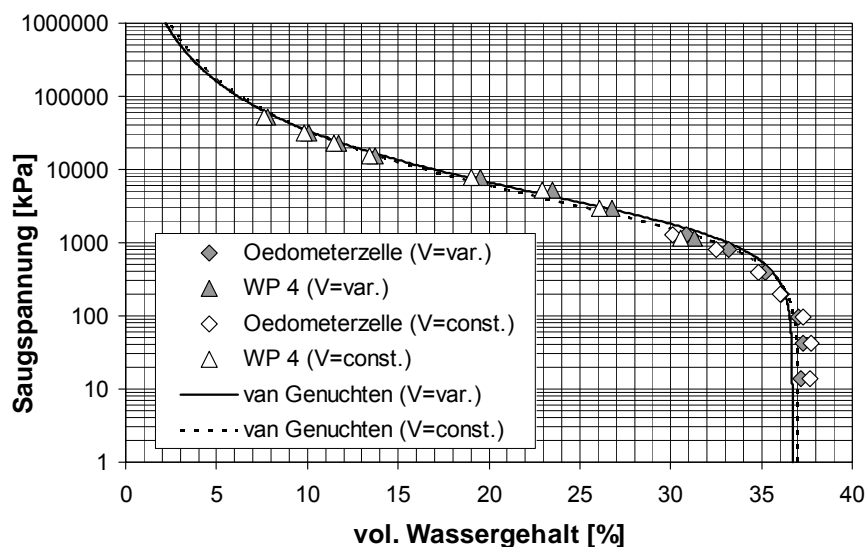


Abb. 6.60: Entwässerungskurve der Probe P5 mit Parametrisierung nach *van Genuchten*

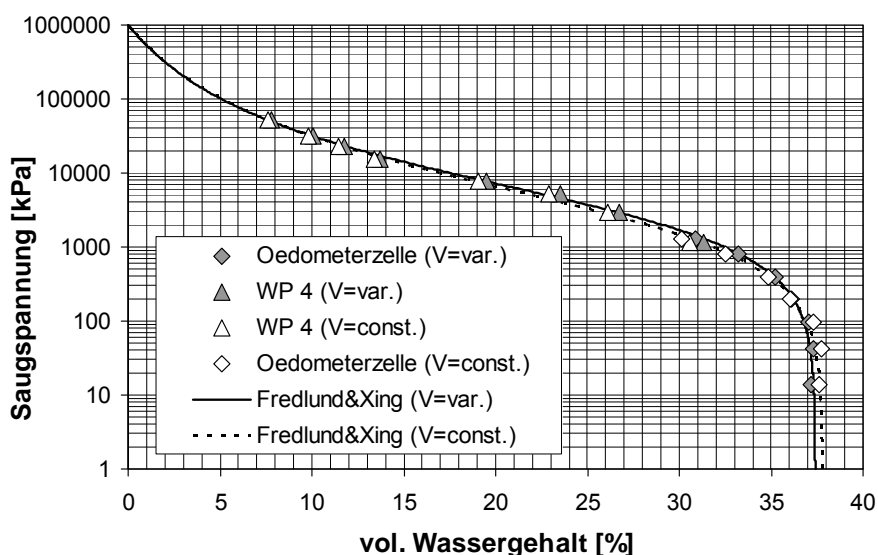


Abb. 6.61: Entwässerungskurve der Probe P5 mit Parametrisierung nach *Fredlund&Xing*

So wie für die Probe P5 lassen sich auch die Entwässerungskurven der Proben P7 und P8 sowohl mit dem Ansatz nach *van Genuchten* als auch mit dem Modell nach *Fredlund&Xing* sehr gut wiedergeben (siehe [Abb. A1.8](#) und [Abb. A1.9](#) in Anhang 1). Allein für die in [Abb. 6.62](#) dargestellte Entwässerungskurve der Probe P4 (unter Berücksichtigung von Volumenänderungen) lassen sich bei der Parametrisierung nach *van Genuchten* im niedrigen Saugspannungsbereich nennenswerte Unterschiede zu den Messwerten feststellen. Dies ist auf die ausgeprägte bimodale Porengrößenverteilung der Probe P4 zurück zu führen. Wie bereits DURNER (1991) zeigte, lassen sich mehrmodale Porengrößenverteilungen mit dem Modell nach *van Genuchten*, das für poröse Medien mit unimodalen Porengrößenverteilungen entwickelt wurde, nur eingeschränkt darstellen. Im Vergleich dazu gelingt mit dem Ansatz nach *Fredlund&Xing* eine deutlich bessere Anpassung der gesamten Entwässerungskurve der Probe P4.

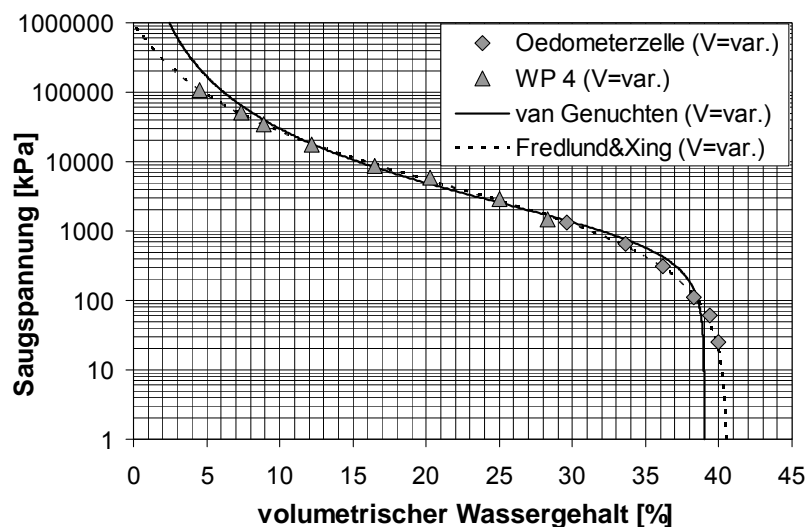


Abb. 6.62: Vergleich der Messdaten mit den Parametrisierungen nach *van Genuchten* und *Fredlund&Xing* für die Probe P4

Die für die Proben P4, P5, P7 und P8 ermittelten Parameter der Modelle nach *van Genuchten* und *Fredlund&Xing* sind in der Tab. 6.9 und der Tab. 6.10 zusammengefasst. Da die Versuche wie beschrieben sowohl unter Berücksichtigung der Volumenänderungen als auch unter Vernachlässigung der Volumenänderungen ausgewertet wurden, werden darin für jede Probe zwei Parametersätze angegeben.

Probe	Volumenänderung	θ_{\min} [%]	θ_{\max} [%]	α [1/kPa]	n [-]	$m = 1-1/n$ [-]
P4	V=var.	0	39,0	0,001	1,40	0,286
	V=const.	0	38,6	0,0012	1,39	0,281
P5	V=var.	0	36,7	0,00052	1,45	0,310
	V=const.	0	37,0	0,00065	1,42	0,296
P7	V=var.	0	39,1	0,00061	1,44	0,306
	V=const.	0	39,2	0,0008	1,41	0,291
P8	V=var.	0	41,5	0,00089	1,45	0,310
	V=const.	0	40,9	0,00111	1,43	0,301

Tab. 6.9: Kennwerte der Entwässerungskurven der Proben P4, P5, P7 und P8 für das Modell nach *van Genuchten* bei Berücksichtigung und Vernachlässigung der Volumenänderungen

Probe	Volumenänderung	θ_{\min} [%]	θ_{\max} [%]	a_f [kPa]	n_f [-]	m_f [-]
P4	V=var.	0	40,6	1760	0,73	1,060
	V=const.	0	40,6	1460	0,67	1,120
P5	V=var.	0	37,4	3550	0,94	0,900
	V=const.	0	37,8	2650	0,88	0,880
P7	V=var.	0	39,6	2910	0,97	0,870
	V=const.	0	40,1	2940	0,78	1,090
P8	V=var.	0	42,1	1670	1,01	0,910
	V=const.	0	41,8	1410	0,91	0,990

Tab. 6.10: Kennwerte der Entwässerungskurven der Proben P4, P5, P7 und P8 für das Modell nach *Fredlund&Xing* bei Berücksichtigung und Vernachlässigung der Volumenänderungen

Wie in Abschnitt 6.7.2 beschrieben werden in der Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzelle die sich im Zuge der Untersuchungen einstellenden Vertikalverformungen erfasst, womit Aussagen zu möglichen Quell- bzw. Schrumpferformungen gewonnen werden können. Die [Abb. 6.63](#) stellt die Beziehung zwischen der Saugspannung und der auf die Ausgangshöhe der Probe bezogene Zusammendrückung für die einzelnen Proben dar. Infolge der effektiven Vertikalspannung von 30 kPa kommt es nach dem Einbau in die Oedometerzelle bei allen Proben zunächst zu einer Stauchung. Im Zuge der sich anschließenden Bewässerung infolge der Reduzierung der Saugspannungen stellen sich bei der Probe P8 sehr geringe, bei den Proben P7 und P5 deutlich stärkere Quellhebungen ein. Die Probe P4 dagegen zeigt zunächst eine leichte Stauchung, bevor eine geringfügige Quellhebung zu erkennen ist. Dies ist auf eine Sackungserscheinung infolge der Wasseraufnahme der Probe P4 unter der Vertikalspannung von 30 kPa zurück zu führen. Die größeren Quellhebungen bei den Proben P7 und P5 resultieren aus den gegenüber den Proben P4 und P8 größeren Einbaudichten. Betrachtet man die Entwässerungskurven, ist für alle Proben zunächst eine geringe und erst ab einer Saugspannung zwischen 50 kPa und 200 kPa stärkere Abnahme der Porenzahl zu erkennen. Dies korrespondiert mit den Beziehungen zwischen Saugspannung und gravimetrischem Wassergehalt, indem erst mit einer Wasserabgabe, ausgedrückt durch den Wassergehalt, auch eine Stauchung der Probe verbunden ist.

Trägt man die Saugspannung gegenüber der Porenzahl an (siehe [Abb. 6.64](#) und [Abb. A1.10](#) in Anhang 1) lässt sich die Neigung der Geraden mit Hilfe des auf die Saugspannung bezogenen Stauchungsbeiwertes C_m folgendermaßen beschreiben:

$$C_m = \frac{\Delta e}{\Delta \log \psi} \quad (6.14)$$

Damit lässt sich die Entwässerungskurve für Saugspannungen oberhalb des Lufteintrittspunktes unter Berücksichtigung der Bezeichnungen aus [Abb. 6.64](#) gut durch folgenden Ansatz darstellen:

$$e_0 - e = C_m \cdot \log \left(\frac{\Delta \psi + \psi_0}{\psi_0} \right) \quad (6.15)$$

Dabei stellt e_0 die Porenzahl nach Sättigung der Probe dar. Die für die einzelnen Proben ermittelten Stauchungsbeiwerte C_m sind in der Tab. 6.8 angegeben. Es ist eine Zunahme der Werte mit zunehmendem Einbauwassergehalt festzustellen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Schrumpfundersuchungen, wonach die Primärschrumpfung mit zunehmendem Einbauwassergehalt zunimmt.

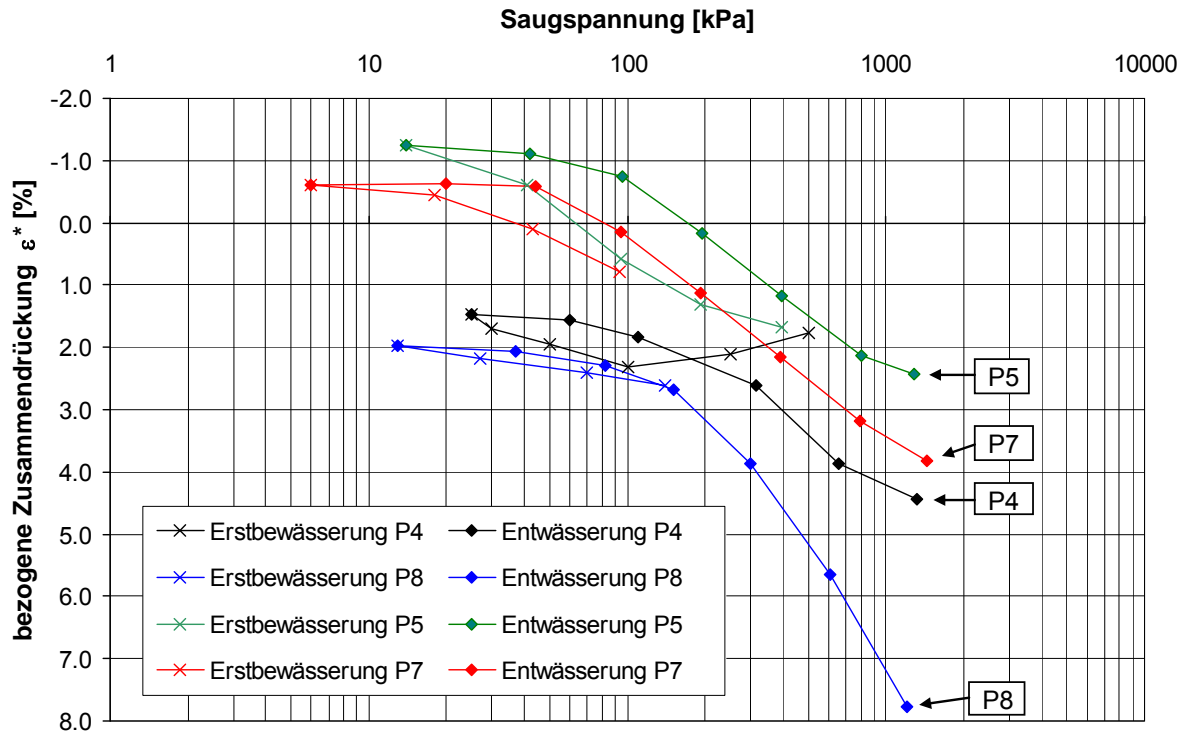


Abb. 6.63: Beziehung zwischen Saugspannung und bezogener Zusammendrückung für die Proben P4, P5, P7 und P8

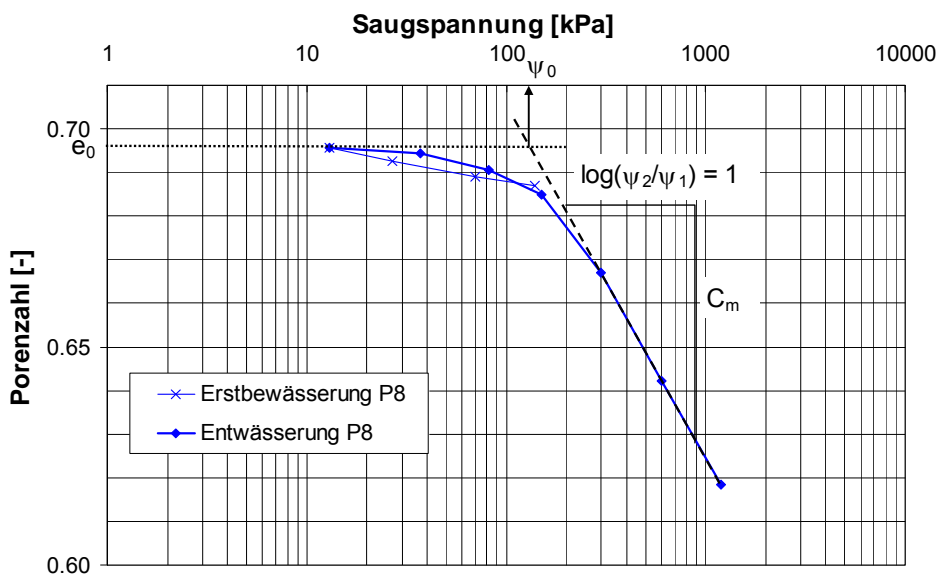


Abb. 6.64: Saugspannungs-Porenzahl-Diagramm für die Probe P8

6.7.5.2 Lösslehm

Ebenso wie für den Lias-Ton wurde der Einfluss unterschiedlicher Einbaubedingungen zum einen an Proben untersucht, die vom Einbauzustand ausgehend zunächst aufgesättigt (Erstbewässerung) und anschließend entwässert wurden (Entwässerung) und zum anderen an Proben, die vom Einbauzustand ausgehend direkt entwässert wurden (Erstentwässerung) (siehe Abb. 6.51).

Die im Einbauzustand vorliegenden Saugspannungen wurden mit Hilfe des Feuchtigkeitsmessgerätes nach der Taupunktmethode (WP 4) bestimmt. Die Erstbewässerung und die anschließende Hauptentwässerung bis maximal 1500 kPa wurden in den Spezial-Oedometerzellen durchgeführt. Die weitere Hauptentwässerungskurve im Saugspannungsbereich > 1500 kPa wurde mit Hilfe des WP 4 untersucht. Ebenso wurde die Erstentwässerungskurve mit Hilfe des WP 4 bestimmt.

Da die Untersuchungen in den Oedometerzellen sehr zeitaufwändig sind, konnten die Erstbewässerung und Entwässerung nur an zwei Proben des Lösslehms durchgeführt werden. Da die Untersuchungen mit dem WP 4 mit vergleichsweise deutlich geringerem zeitlichen Aufwand verbunden sind, konnten die Erstentwässerungen für alle acht Einbaubedingungen bestimmt werden. Eine Übersicht über die ausgeführten Versuche gibt die Tab. 6.11.

Versuchsart	Versuchsgeräte	Einbauzustände	Versuchsbezeichnungen
Entwässerung ausgehend vom Einbauzustand (Erstentwässerung)	WP 4	Punkt 1 bis Punkt 8	Pd1 bis Pd8
Bewässerung ausgehend vom Einbauzustand (Erstbewässerung) und Entwässerung	Oedometerzellen / WP 4	Punkte 1, 8	L-P1, L-P8

Tab. 6.11: Übersicht über die am Lösslehm durchgeführten Saugspannungsuntersuchungen

Erstentwässerung

Die Erstentwässerungskurve wurde für alle acht Einbaubedingungen bestimmt. Die bei der Herstellung der Probekörper erzielten Einbauwassergehalte und Einbautrockendichten sind in der Abb. 6.65 dargestellt. Im Vergleich zu den angestrebten Wassergehalten wurden zwar systematisch etwa um 0,5 % bis 1,5 % geringere Wassergehalte erreicht, die Proben Pd1, Pd2 und Pd3 sowie Pd4, Pd5 und Pd6 wurden aber zumindest wie angestrebt bei sehr ähnlichen Wassergehalten verdichtet und unterscheiden sich dementsprechend untereinander nur wesentlich im Hinblick auf die Einbaudichte.

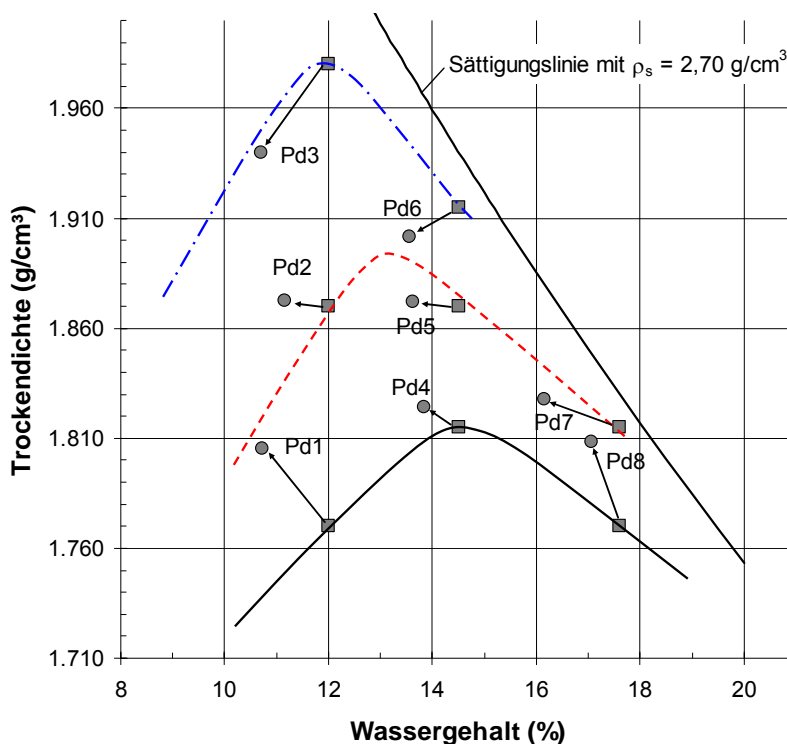


Abb. 6.65: Saugspannungsmessungen am Lösslehm (Erstentwässerung), gewünschte Ausgangspunkte (eckig) und tatsächlich erreichte Ausgangspunkte (rund)

Die [Abb. 6.66](#) und die [Abb. 6.67](#) stellen die Entwässerungskurven der bei ähnlichem Einbauwassergehalt aber unterschiedlichen Einbaudichten hergestellten Proben Pd1, Pd2 und Pd3 sowie Pd4, Pd5 und Pd6 dar. Wie es auch bei den Proben des Lias-Tons der Fall war, stellen sich für die Beziehung zwischen Saugspannung und gravimetrischem Wassergehalt sehr ähnliche Kurvenverläufe ein und es ist festzustellen, dass die vom Einbauzustand ausgehende Erstentwässerungskurve für die auf der trockenen Seite der Standard-Proctorkurve verdichteten Proben von der Einbaudichte nicht signifikant beeinflusst wird (siehe [Abb. 6.66 a](#)) und [Abb. 6.67 a](#)).

Der Einfluss unterschiedlicher Einbaudichten wird erkennbar, wenn die Saugspannung auf den Sättigungsgrad bezogen wird (siehe [Abb. 6.66 \(b\)](#) und [Abb. 6.67 \(b\)](#)). So weisen die höher verdichteten Proben bei gleichem Wassergehalt größere Sättigungsgrade auf. Dadurch verschieben sich die ermittelten Kurven der Saugspannungs-Sättigungsgrad-Beziehung mit zunehmender Einbaudichte nach oben.

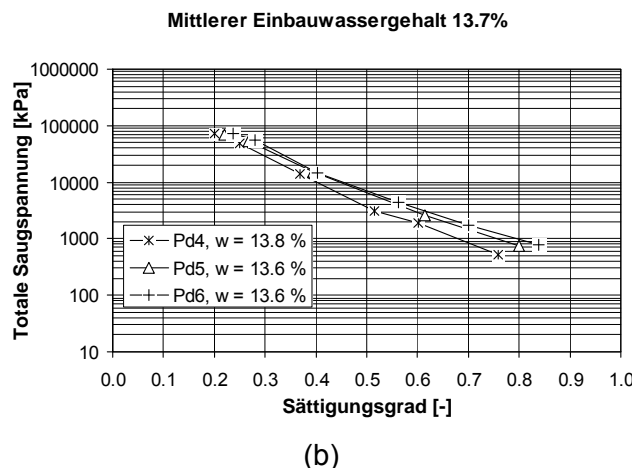
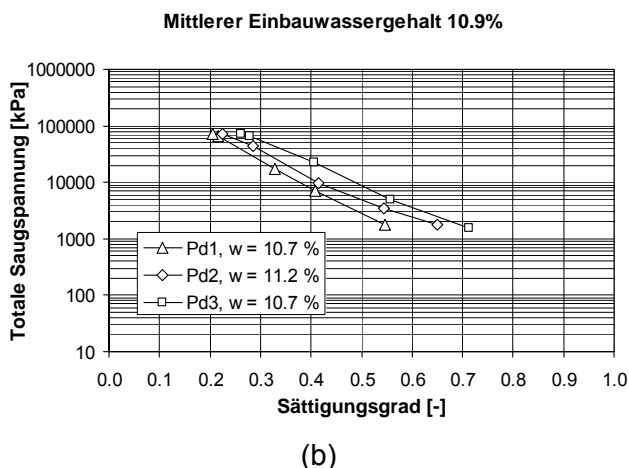
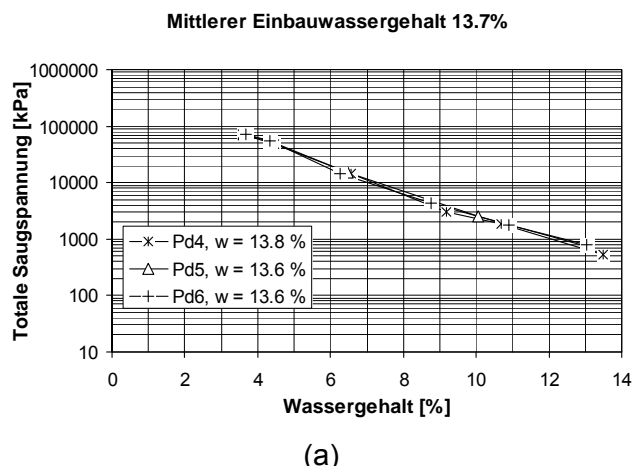
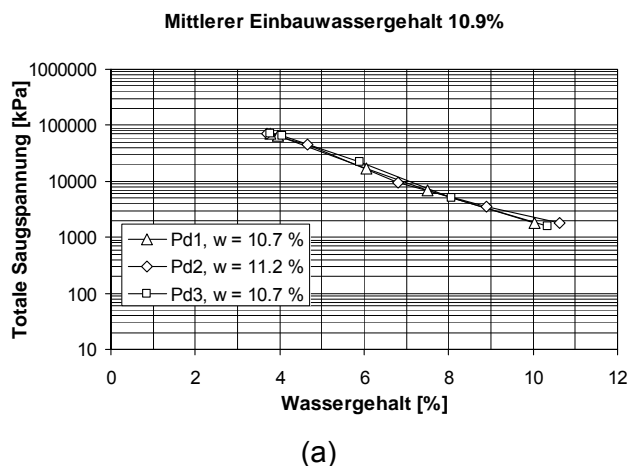


Abb. 6.66: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt (a) bzw. Sättigungsgrad (b) für die Proben Pd1, Pd2 und Pd3

Abb. 6.67: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt (a) bzw. Sättigungsgrad (b) für die Proben Pd4, Pd5 und Pd6

Der Einfluss unterschiedlicher Einbauwassergehalte auf die Erstentwässerungskurve der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung ist aus einem Vergleich der Proben Pd2 und Pd5 bzw. Pd1 und Pd8 erkennbar. Diese wurden bei unterschiedlichen Einbauwassergehalten aber mit sehr ähnlichen Trockendichten hergestellt. Wie die Abb. 6.68 zeigt, ist der Einfluss bei den auf der trockenen Seite des Proctor-Optimums verdichteten Proben Pd2 und Pd5 gering. Vergleicht man dagegen die auf der trockenen Seite verdichtete Probe Pd1 mit der auf der nassen Seite des Proctor-Optimums verdichteten Probe Pd8 ist ein deutlicher Einfluss des Einbauwassergehaltes auf die Erstentwässerungskurve im niedrigen Saugspannungsbereich erkennbar. Dies resultiert wie für die Proben des Lias-Tons bereits beschrieben aus den unterschiedlichen Poren- und Aggregatstrukturen der bei unterschiedlichen Wassergehalten verdichteten Proben. So weist die auf der nassen Seite des Standard-Proctoroptimums verdichtete Proben Pd8 eine unimodale Porengrößenverteilung auf, während die auf der trockenen Seite des Proctoroptimums verdichteten Proben bimodale Porengrößenverteilungen bestehend aus Interaggregat- und Intraaggregatporen besitzen. Infolge der vergleichsweise großen Interaggregatporen kommt es deshalb bei den auf der trockenen Seite verdichteten Proben im Vergleich zu den auf der nassen Seite verdichteten Probe zu einer stärkeren Abnahme der Saugspannung bei hohen Wassergehalten. Wie auch bei den Proben des Lias-

Tons festgestellt, haben die Einbaubedingungen auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung im niedrigen Wassergehaltsbereich bis zu einem Grenzwassergehalt von ca. 7,5 % keinen nennenswerten Einfluss. Dementsprechend liegen die Erstentwässerungskurven im hohen Saugspannungsbereich (hier oberhalb von ca. 7 MPa) etwa übereinander.

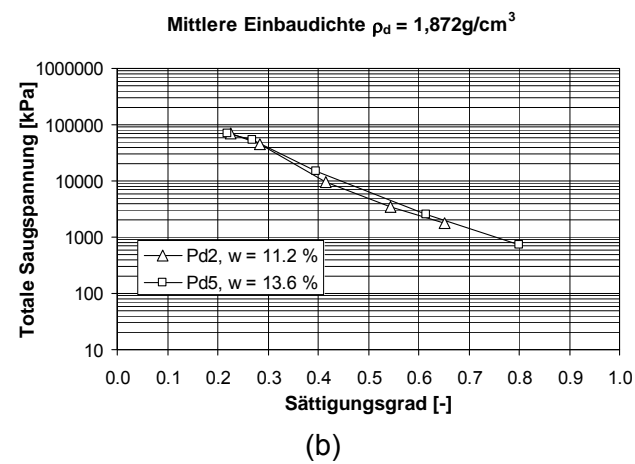
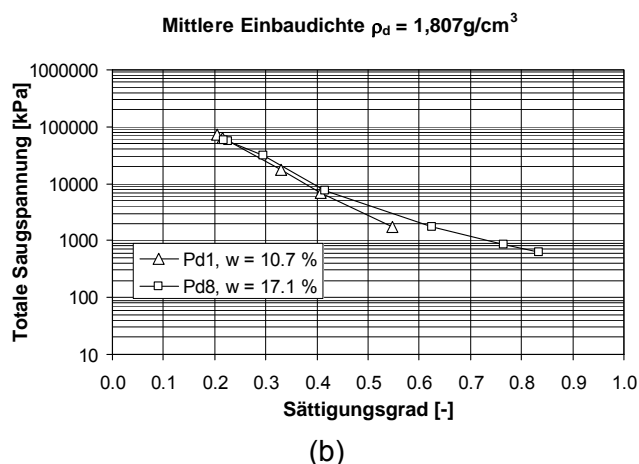
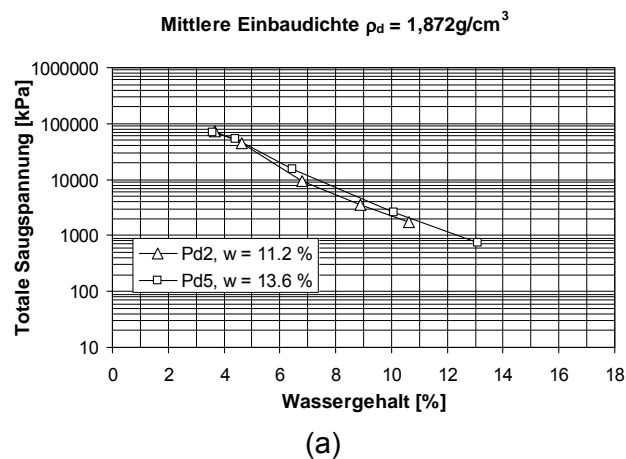
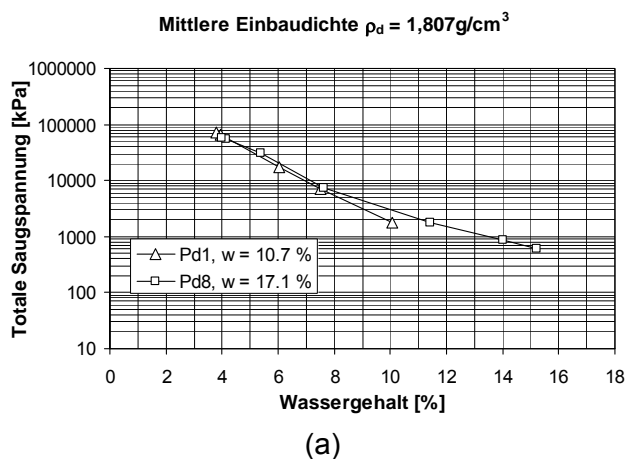


Abb. 6.68: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt (a) bzw. Sättigungsgrad (b) für die Proben Pd2 und Pd5

Abb. 6.69: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt (a) bzw. Sättigungsgrad (b) für die Proben Pd1 und Pd8

Erstbewässerung und Entwässerung

Die Kennwerte der beiden in den Oedometerzellen untersuchten Proben sind in der Tab. 6.12 angegeben. Die Einbauwassergehalte der beiden Proben lagen mit 11,7 % (L-P1) und 17,2 % (L-P8) etwas unterhalb der angestrebten Werte von 12,0 % und 17,5 %. Die erzielten Einbautrockendichten weisen nur geringe Unterschiede zu den angestrebten Werten auf. Daraus resultierten Sättigungsgrade im Einbauzustand von 60 % bzw. 87 %. Im Zuge der Bewässerung wurden maximale Sättigungsgrade von 94 % (L-P1) bzw. 99 % (L-P8) erreicht. Der vergleichsweise geringe Wert von 94 % wird auf die Interaggregatporen der Probe L-P1 zurückgeführt, die unter der angelegten minimalen Saugspannung von 6 kPa nicht gesättigt werden konnten. Weitere Parameter zum Zustand nach der Bewässerung und am Ende der Entwässerung können der Tab. 6.12 entnommen werden.

Probe		$w_a / w_0 / w_e$ [%]	$\rho_{d,a} / \rho_{d,0} / \rho_{d,e}$ [g/cm ³]	$n_a / n_0 / n_e$ [-]	$e_a / e_0 / e_e$ [-]	$Sr_a / Sr_0 / Sr_e$ [-]	$n_{Luft,a}$ [-]	C_m [-]
L-P1	Einbau	11,7	1,771	0,344	0,525	0,60	0,138	0,021
	Ende Bew.	18,8	1,749	0,352	0,544	0,94	0,023	
	Ende Entw.	12,4	1,769	0,345	0,527	0,63	0,126	
L-P8	Einbau	17,2	1,762	0,348	0,533	0,87	0,044	0,023
	Ende Bew.	19,5	1,761	0,348	0,533	0,99	0,004	
	Ende Entw.	15,6	1,783	0,340	0,515	0,82	0,062	

Tab. 6.12: Kennwerte der in den Oedometerzellen untersuchten Proben des Lösslehms

Die Abb. 6.70 stellt den Zusammenhang zwischen Saugspannung und Wassergehalt für die bei Wassergehalten von 11,7 % und 17,2 % verdichteten Proben dar. Vergleicht man die beiden Entwässerungskurven miteinander, ist zu erkennen, dass die Probe L-P1 bei Matrixspannungen zwischen 10 kPa und 100 kPa eine deutlich stärkere Entwässerung erfährt als die Probe L-P8. Dies spiegelt sich auch in den ermittelten Lufteintrittspunkten von 14 kPa (L-P1) bzw. 170 kPa (L-P8) wieder.

Im hohen Saugspannungsbereich (bei Wassergehalten < 8 % bzw. Sättigungsgraden < 40 %) dagegen liegen die Entwässerungskurven der beiden Proben ähnlich wie die Erstentwässerungskurven der Proben Pd1 und Pd8 näherungsweise übereinander.

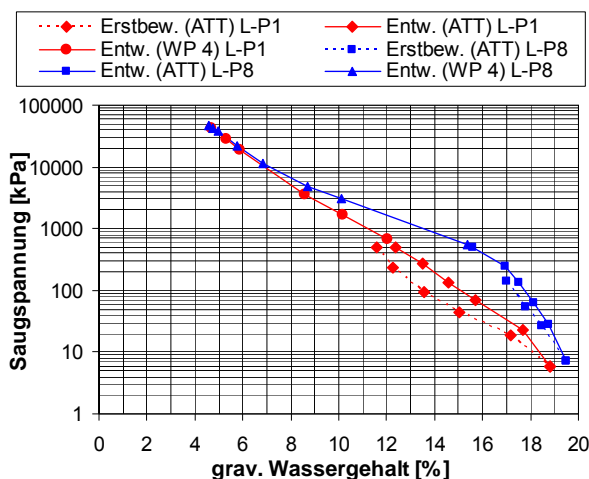


Abb. 6.70: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt für die Proben L-P1 und L-P8

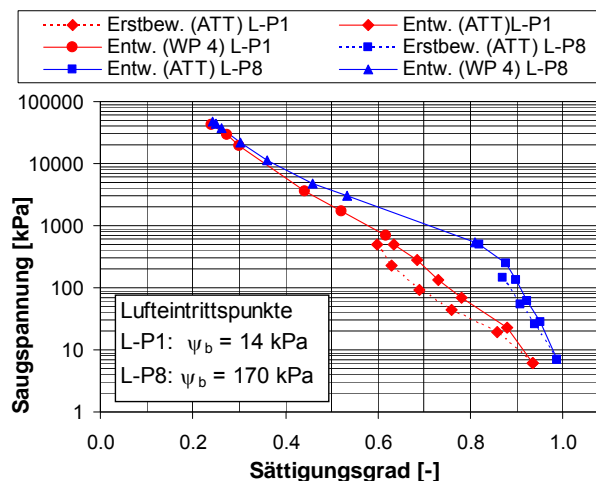


Abb. 6.71: Beziehung zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad für die Proben L-P1 und L-P8

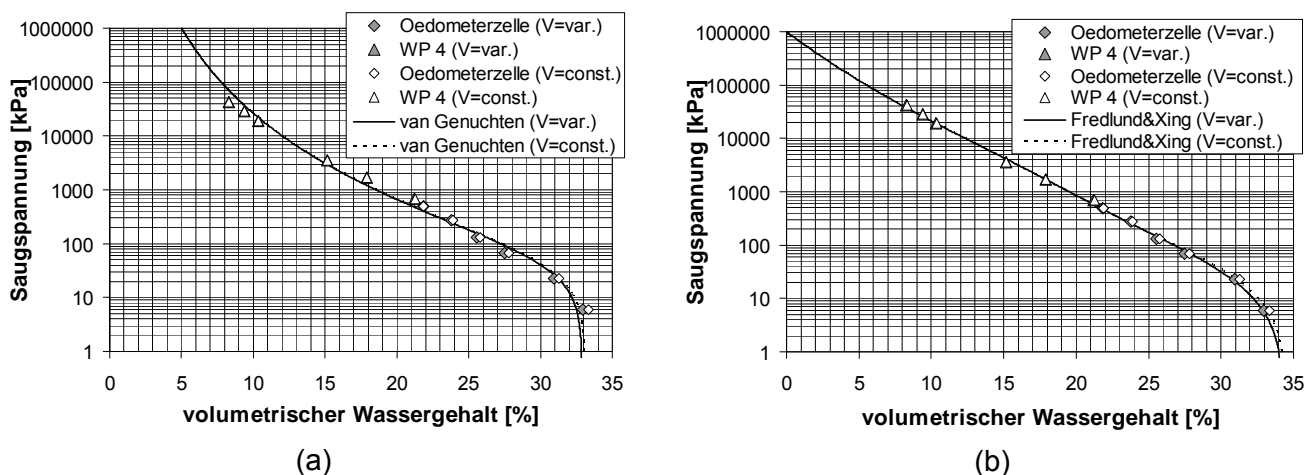
Die experimentell ermittelten Kurven wurden mit den in Abschnitt 4.1.3 dargestellten Ansätzen nach *van Genuchten* und *Fredlund&Xing* parametrisiert. Wie auch für die Proben des Lias-Tons wurde die Parametrisierung dabei für die Beziehung zwischen der Saugspannung und dem volumetrischen Wassergehalt durchgeführt, wobei diese sowohl unter Berücksichtigung der Volumenänderungen der Proben als auch unter Annahme eines konstanten Volumens entsprechend dem

Einbauzustand ermittelt wurden. Die Parametrisierung erfolgte dabei mit dem Ziel einer optimalen Anpassung an die gemessenen Werte.

Die [Abb. 6.72](#) stellt die messtechnisch ermittelten und mit den Ansätzen nach *van Genuchten* (a) bzw. *Fredlund&Xing* (b) parametrisierten Entwässerungskurven der auf der trockenen Seite des Proctoroptimums verdichteten Probe L-P1 dar. Die mit „V=var.“ bezeichneten Entwässerungskurven wurden dabei unter Berücksichtigung der Volumenänderungen ermittelt, während die mit „V=const.“ bezeichneten Kurven unter der Annahme eines konstant bleibenden Volumens der Probekörper bestimmt wurden. Es ist zu erkennen, dass sich die Messwerte für beide Fälle kaum unterscheiden und nur im niedrigen Saugspannungsbereich aus der Annahme eines konstanten Probenvolumens geringfügig größere volumetrische Wassergehalte resultieren. Dementsprechend liegen auch die parametrisierten Kurven sowohl beim Ansatz nach *van Genuchten* als auch beim Ansatz nach *Fredlund&Xing* für beide Fälle fast übereinander. Dies zeigt sich auch aus den für beide Fälle sehr ähnlichen Parametern der beiden Modelle (siehe [Tab. 6.13](#)).

Für die Probe L-P8 können ähnliche Beobachtungen gemacht werden (siehe [Abb. 6.73](#)). So liegen die unter der Annahme eines konstanten Porenvolumens gemessenen und parametrisierten Kurven fast deckungsgleich über den Kurven, die unter Berücksichtigung der Volumenänderungen der Proben bestimmt wurden.

Außerdem ist aus den beiden Abbildungen zu erkennen, dass sich sowohl die Messwerte der nass verdichteten Probe L-P8 als auch der trocken verdichteten Probe L-P1 mit beiden Modellen sehr gut abbilden lassen. Geringfügige Unterschiede zeigen sich im niedrigen Saugspannungsbereich < 100 kPa, der insbesondere bei der Probe L-P1 mit dem Ansatz nach *Fredlund&Xing* etwas besser abgebildet werden kann.



[Abb. 6.72](#): Entwässerungskurven der Probe L-P1, Vergleich der Messdaten mit den Parametrisierungen nach *van Genuchten* (a) und *Fredlund&Xing* (b)

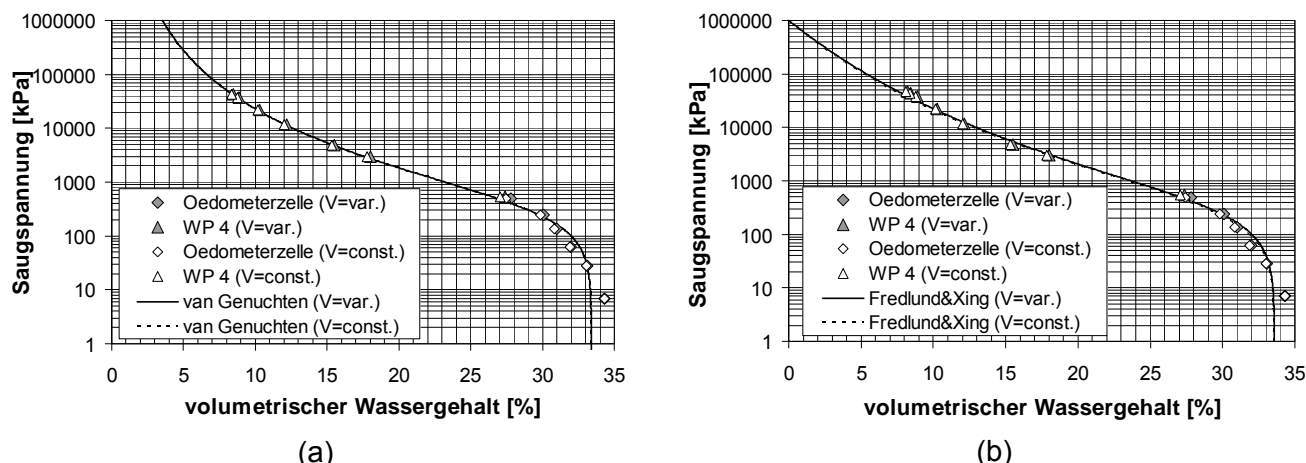


Abb. 6.73: Entwässerungskurven der Probe L-P8, Vergleich der Messdaten mit den Parametrisierungen nach van Genuchten (a) und Fredlund&Xing (b)

Probe	Volumenänderung	θ_{min} [%]	θ_{max} [%]	α [1/kPa]	n [-]	$m = 1-1/n$ [-]
L-P1 (Entwässerung)	V=var.	0	32,9	0,02	1,19	0,160
	V=const.	0	33,1	0,02	1,19	0,160
L-P8 (Entwässerung)	V=var.	0	33,5	0,003	1,28	0,219
	V=const.	0,3	33,4	0,003	1,29	0,225

Tab. 6.13: Kennwerte der Entwässerungskurven der Proben L-P1 und L-P8 für das Modell nach van Genuchten

Probe	Volumenänderung	θ_{min} [%]	θ_{max} [%]	a_f [kPa]	n_f [-]	m_f [-]
L-P1 (Entwässerung)	V=var.	0	34,4	30	0,79	0,480
	V=const.	0	34,5	30	0,87	0,450
L-P8 (Entwässerung)	V=var.	0	33,6	310	1,16	0,470
	V=const.	0	33,6	310	1,12	0,490

Tab. 6.14: Kennwerte der Entwässerungskurven der Proben L-P1 und L-P8 für das Modell nach Fredlund&Xing

In der Abb. 6.74 ist der in der Saugspannungskontrollierten Oedometerzelle ermittelte Zusammenhang zwischen der Saugspannung und der Porenzahl dargestellt. Die trocken verdichtete Probe L-P1 zeigt im Zuge der Aufsättigung geringfügige Quellhebungen, wodurch die Porenzahl von 0,523 auf 0,544 zunimmt. Im Vergleich dazu nimmt die Porenzahl der auf der nassen Seite des Proctroptimums verdichteten Probe L-P8 im Zuge der Bewässerung nur minimal zu. Infolge der anschließenden Entwässerung kommt es bei beiden Proben zu einer ähnlichen Abnahme der Porenzahl mit zunehmender Saugspannung. Für den Saugspannungsbereich zwischen 150 kPa und 500 kPa können die Beziehungen zwischen Porenzahl und Saugspannung im halblogarithmischen Maßstab wiederum durch eine Gerade gut angenähert werden. Die für die beiden Proben ermittelten Stauchungsbeiwerte C_m sind in der Tab. 6.12 angegeben.

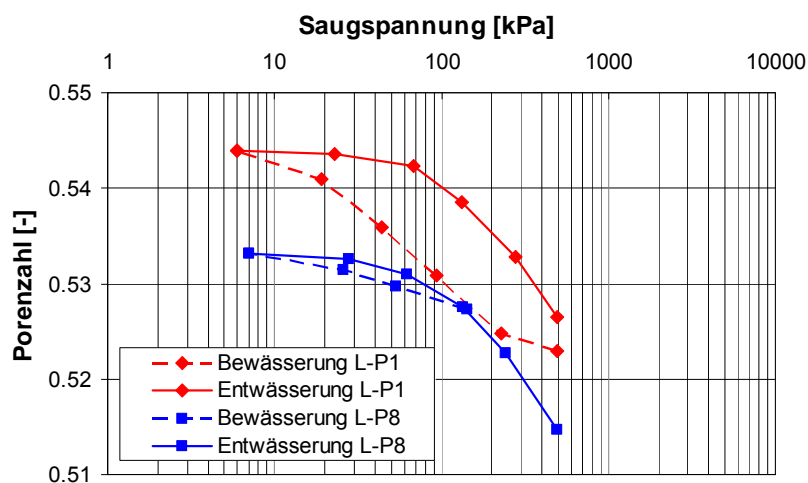


Abb. 6.74: Saugspannungs-Porenzahl-Diagramm für die Proben L-P1 und L-P8

6.7.5.3 Ton mit organischen Beimengungen

Der Ton mit organischen Beimengungen wurde im Rahmen des in Abschnitt 8 dargestellten großmaßstäblichen Feldversuches am Münchner Flughafen untersucht. Dabei wurden in situ der bereits beschriebene trockene und nasse Einbauzustand realisiert. Wie die in Abschnitt 8 dargestellten Untersuchungen zeigen, nimmt der trocken verdichtete Boden nach Verdichtung zunächst Wasser auf, während der nass verdichtete Boden Wasser abgibt. Nach einer gewissen Zeitspanne nimmt der Einfluss des Anfangswassergehalts jedoch ab und die Böden nehmen entsprechend den klimatischen Verhältnissen Wasser auf oder geben Wasser ab. Um dieses Verhalten anhand von numerischen Berechnungen auf Basis der Richards-Gleichung beschreiben zu können, ist sowohl die Beschreibung der Entwässerungs- als auch der Bewässerungskurve der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung erforderlich. Die verdichteten Proben wurden dazu nach Einbau in die Saugspannungs-kontrollierte Oedometerzelle vom Einbauzustand ausgehend zunächst aufgesättigt (Erstbewässerung) und anschließend entwässert. Im Zuge der Bewässerung konnte jedoch keine vollständige Sättigung der Proben erreicht werden. So betrug der maximale Sättigungsgrad der Proben 98 % bzw. 97 %. Dementsprechend wird die im Zuge der Entwässerung ermittelte Beziehung nicht als Hauptentwässerungskurve, sondern als Entwässerungskurve bezeichnet. Entsprechend den verwendeten porösen Keramiken konnten die Proben in den Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen bis zu einer maximalen Saugspannung von 500 kPa untersucht werden. Die weitere Ermittlung des Entwässerungsastes erfolgte mit dem Feuchtigkeitsmessgerät nach der Taupunktmethode (WP4). Zu Vergleichszwecken wurde für den nassen Einbauzustand die Entwässerungskurve im niedrigen Saugspannungsbereich bis 100 kPa auch mit Hilfe von Tensiometern bestimmt.

Zudem wurde für den nassen Einbauzustand zusätzlich die Hauptbewässerungskurve bestimmt. Dazu wurden die beim angestrebten Wassergehalt von ca. 75 % verdichteten Proben zunächst bis zum Residualwassergehalt von ca. 9 % getrocknet. Zur Ermittlung des Bewässerungsastes wurden sie danach auf vorgegebene Wassergehalte befeuchtet. Dies erfolgte durch eine Wasserzugabe über ein auf der Probenoberfläche aufliegendes Filterpapier. Zur Messung der sich einstellenden

Saugspannungen kamen im hohen Saugspannungsbereich das Feuchtigkeitsmessgerät nach der Taupunktmethode (WP 4) und im niedrigen Saugspannungsbereich Tensiometer zum Einsatz. Dabei wurden die Messungen mit dem Feuchtigkeitsmessgerät an einer Probe durchgeführt, die schrittweise befeuchtet wurde, während für die Tensiometermessungen mehrere Proben hergestellt wurden, an denen jeweils nur eine Messung durchgeführt wurde (siehe dazu auch Abschnitt 6.7.3). Dadurch mussten die im Vergleich zu den WP 4 - Proben deutlich größeren Probekörper für die Tensiometermessungen nur auf einen angestrebten Wassergehalt befeuchtet werden und konnten gleichzeitig homogenisieren. Im Vergleich zu einer Probe, die mehrmals hätte befeuchtet werden müssen, konnte der Zeitaufwand zur Durchführung der Messungen damit deutlich reduziert werden.

Die am Ton mit organischen Beimengungen ermittelten Kurven der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung sind schematisch in Abb. 6.75 dargestellt. Eine Übersicht über die ausgeführten Versuche gibt die Tab. 6.15.

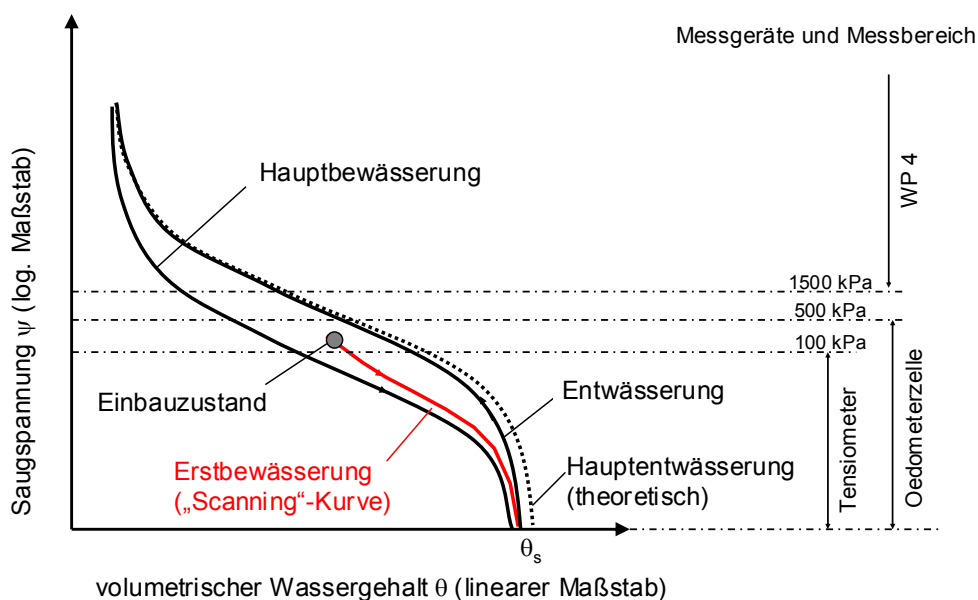


Abb. 6.75: Prinzipielle Darstellung der am Ton mit organischen Beimengungen experimentell ermittelten Kurven der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung

Versuchsart	Versuchsgeräte	Einbaubedingungen	Versuchsbezeichnungen
Bewässerung ausgehend vom Einbauzustand (Erstbewässerung) und Entwässerung	Oedometerzelle / WP 4	nass	9135-n
	Tensiometer	nass	9135-TE-n
	Oedometerzelle / WP 4	trocken	9135-t
Hauptbewässerung	WP 4	nass	9135-WP4B-n
	Tensiometer	nass	9135-TB-n

Tab. 6.15: Übersicht über die am Ton mit organischen Beimengungen durchgeführten Saugspannungsuntersuchungen

Die Kennwerte der beiden in den Oedometerzellen untersuchten Proben sind in der Tab. 6.16 angegeben. Der Einbauwassergehalt der nass verdichteten Probe lag mit 73 % etwas unterhalb des angestrebten Wertes von 75 %, der Wassergehalt der trocken verdichteten Probe mit 59 % etwas oberhalb des angestrebten Wertes von 55 %. Die erzielten Einbautrockendichten liegen mit $0,760 \text{ g/cm}^3$ und $0,774 \text{ g/cm}^3$ jeweils etwas unterhalb der angestrebten Trockendichte von $0,8 \text{ g/cm}^3$. Weitere Parameter zum Zustand nach der Bewässerung und am Ende der Entwässerung können der Tab. 6.16 entnommen werden.

Die für die Tensiometermessungen hergestellten Proben wiesen einen Einbauwassergehalt von im Mittel 77,2 %, eine Einbautrockendichte von i. M. $0,795 \text{ g/cm}^3$ und einen Einbausättigungsgrad von i. M. 97 % auf.

Probe		$w_a / w_0 / w_e$ [%]	$\rho_{d,a} / \rho_{d,0} / \rho_{d,e}$ [g/cm ³]	$n_a / n_0 / n_e$ [-]	$e_a / e_0 / e_e$ [-]	$S_{r,a} / S_{r,0} / S_{r,e}$ [-]	$n_{\text{Luft},a}$ [-]	C_m [-]
9135-t	Einbau	58,7	0,760	0,656	1,908	0,68	0,210	0,054
	Ende Bew.	80,8	0,785	0,645	1,816	0,98		
	Ende Entw.	42,0	0,806	0,635	1,742	0,53		
9135-n	Einbau	73,3	0,774	0,650	1,857	0,87	0,083	0,092
	Ende Bew.	79,0	0,790	0,643	1,799	0,97		
	Ende Entw.	41,8	0,830	0,624	1,663	0,56		

Tab. 6.16: Kennwerte der in den Oedometerzellen untersuchten Proben des Tons mit organischen Beimengungen

Die Abb. 6.76 stellt den Zusammenhang zwischen Saugspannung und Wassergehalt für die bei Wassergehalten von 59 % und 73 % verdichteten Proben dar. Die Erstbewässerungskurve konnte nur für die trocken verdichtete Probe ermittelt werden, da der Anfangssättigungsgrad der bei 73 % Wassergehalt verdichteten Probe bereits bei 87 % lag und die Probe davon ausgehend direkt unter einer Saugspannung von 2,5 kPa aufgesättigt wurde. Vergleicht man die beiden Entwässerungskurven miteinander, ist zu erkennen, dass die bei einem Wassergehalt von 59 % verdichtete Probe bereits bei Matrixspannungen $> 10 \text{ kPa}$ eine deutliche Entwässerung erfährt, während dies bei der mit 73 % Wassergehalt verdichteten Probe erst bei Matrixspannungen $> 100 \text{ kPa}$ auftritt. Im hohen Saugspannungsbereich ($> 300 \text{ kPa}$) dagegen liegen die beiden Kurven etwa deckungsgleich übereinander. Diese Beobachtung stimmt mit den Ergebnissen der Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen überein, wonach sich die Porengrößenverteilung der trocken und nass verdichteten Probe maßgeblich nur im Bereich von Poren größer $1,5 \mu\text{m}$ unterscheiden (vgl. Abb. 6.28), was nach Gleichung (6.6) Kapillarspannungen $< 200 \text{ kPa}$ entspricht. Im Porenbereich $< 1,5 \mu\text{m}$ dagegen liegen die Porengrößenverteilungen der trocken und nass verdichteten Probe näherungsweise übereinander. Entsprechend der bei der Auswertung der Quecksilberporosimetrie zugrunde liegenden Vorstellung eines Bündels von Kapillaren unterschiedlicher Durchmesser ergeben sich daraus für die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung im entsprechenden Saugspannungsbereich $> 200 \text{ kPa}$ ebenfalls übereinander liegende Kurven.

Ähnliches gilt für die in Abb. 6.77 dargestellte Beziehung zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad. So weist die trocken verdichtete Probe einen deutlich geringeren Lufttrittspunkt als die nass verdichtete Probe auf. Erst bei Saugspannungen oberhalb von ca. 1000 kPa liegen die beiden Kurven wieder näherungsweise übereinander. Dabei ist der Einfluss der geringfügig unterschiedli-

chen Dichten der beiden Proben erkennbar. So ist der Abstand zwischen den auf den Sättigungsgrad bezogenen Entwässerungskurven der beiden Proben aufgrund der geringfügig höheren Dichte der nass verdichteten Probe etwas größer als beim Bezug der Entwässerungskurven auf den gravimetrischen Wassergehalt. Dadurch liegen die Kurven der trocken und nass verdichteten Probe erst ab der Saugspannung von ca. 1000 kPa wieder näherungsweise übereinander. Würden die beiden Proben dieselbe Dichte aufweisen, ergäbe sich dafür wieder der Wert von ca. 200 kPa.

Bei Betrachtung der mit Hilfe der Tensiometer ermittelten Messwerte der Entwässerungskurve, ist zu erkennen, dass sie bei Bezug auf den gravimetrischen Wassergehalt tendenziell geringfügig oberhalb der anhand der Oedometerversuche bestimmten Werte liegen. Für die Beziehung zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad ist jedoch eine sehr gute Übereinstimmung der mit Hilfe von Tensiometern und in den Oedometerzellen untersuchten Proben festzustellen.

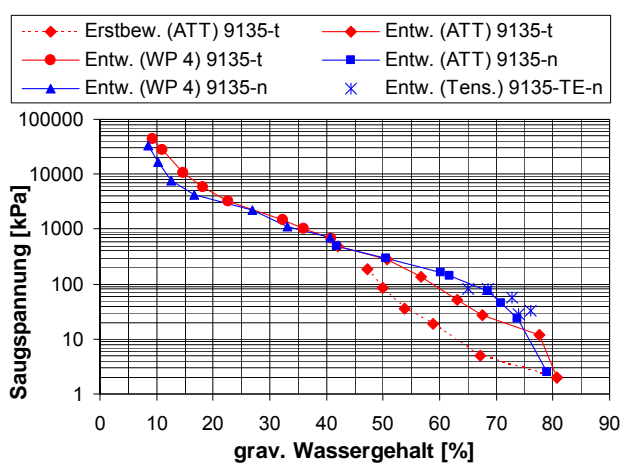


Abb. 6.76: Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt für die Proben 9135-n, 9135-TE-n, und 9135-t

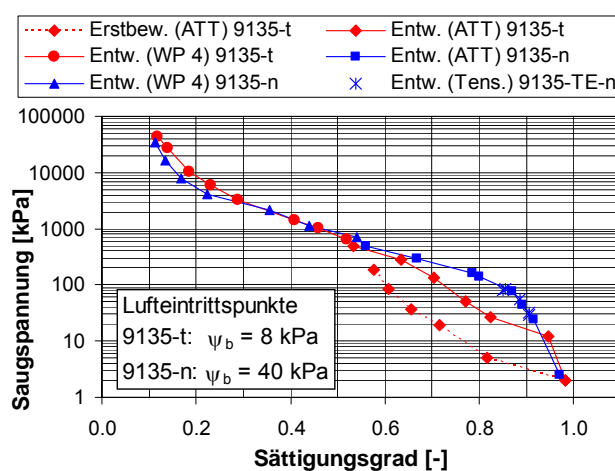


Abb. 6.77: Beziehung zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad für die Proben 9135-n, 9135-TE-n und 9135-t

Die experimentell ermittelten Kurven wurden mit den in Abschnitt 4.1.3 dargestellten Ansätzen nach *van Genuchten* und *Fredlund&Xing* parametrisiert. Wie auch für die Proben des Lias-Tons wurde die Parametrisierung dabei für die Beziehung zwischen der Saugspannung und dem volumetrischen Wassergehalt durchgeführt, wobei diese sowohl unter Berücksichtigung der Volumenänderungen der Proben als auch unter Annahme eines konstanten Volumens entsprechend dem Einbauzustand ermittelt wurden. Da die Böden nach Einbau in der in Abschnitt 8 beschriebenen Versuchsschüttung Saugspannungen deutlich unterhalb von 1500 kPa aufweisen, und ein Überschreiten der Saugspannungen von 1500 kPa infolge von Austrocknung nicht zu erwarten ist, wurde die Parametrisierung mit dem Ziel einer optimalen Anpassung der im Saugspannungsbereich zwischen 0 kPa und 1500 kPa vorliegenden Messwerte durchgeführt.

Die **Abb. 6.78** stellt die messtechnisch ermittelten und mit den Ansätzen nach *van Genuchten* (a) bzw. *Fredlund&Xing* (b) parametrisierten Entwässerungskurven der trocken verdichteten Probe dar. Die mit „V=var.“ bezeichneten Entwässerungskurven wurden dabei unter Berücksichtigung der Volumenänderungen ermittelt, während die mit „V=const.“ bezeichneten Kurven unter der Annahme eines konstant bleibenden Volumens bestimmt wurden. Es ist zu erkennen, dass aus der Annahme eines konstanten Probenvolumens etwas niedrigere volumetrische Wassergehalte resultieren. Dies

hat allerdings keinen nennenswerten Einfluss auf den Lufttrittspunkt und die Neigung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung, sondern führt nur zu einem geringeren maximalen Wassergehalt und zu einer Parallelverschiebung der Kurve. Dementsprechend ergeben sich bei der Parametrisierung nach *van Genuchten* für beide Fälle sehr ähnliche α - und n -Werte. Bei der Parametrisierung nach *Fredlund&Xing* stellen sich ebenfalls für beide Fälle sehr ähnliche a_r , n_r , und m_r -Werte ein.

Ähnliche Beobachtungen können für die Probe 9135-n gemacht werden (siehe [Abb. 6.79](#)). So führt die Annahme eines konstanten Probenvolumens auch dort im Wesentlichen nur zu einer Verringerung des maximalen Wassergehaltes und hat nur einen geringen Einfluss auf den Lufttrittspunkt und die Neigung der Kurve.

Wie die [Abb. 6.79](#) zeigt, lassen sich die Messwerte der nass verdichteten Probe sowohl mit dem Modell nach *Fredlund&Xing* als auch mit dem Modell nach *van Genuchten* sehr gut abbilden. Im Gegensatz dazu sind die Messwerte der trocken verdichteten Probe aufgrund ihrer bimodalen Porengrößenverteilung sowohl mit dem Ansatz nach *van Genuchten* als auch mit dem Ansatz nach *Fredlund&Xing* deutlich schlechter anzupassen. Der hohe Saugspannungsbereich > 1500 kPa, dessen Messdaten bei der Parametrisierung nicht berücksichtigt wurde, wird für beide Proben mit dem Modell nach *Fredlund&Xing* vergleichsweise besser abgebildet als mit dem Ansatz nach *van Genuchten*.

Die für die nasse Einbaubedingung ermittelten Messwerte der Hauptbewässerungskurve sind in der [Abb. A1.11](#) in Anhang 1 dargestellt. Auch diese wurden mit den Ansätzen nach *van Genuchten* und *Fredlund&Xing* parametrisiert. Der maximale Wassergehalt wurde dabei nicht iteriert, sondern entsprechend dem für die Entwässerungskurve ermittelten Wert angesetzt. Die Ergebnisse der verschiedenen Parametrisierungen sind in der [Tab. 6.17](#) und der [Tab. 6.18](#) dargestellt.

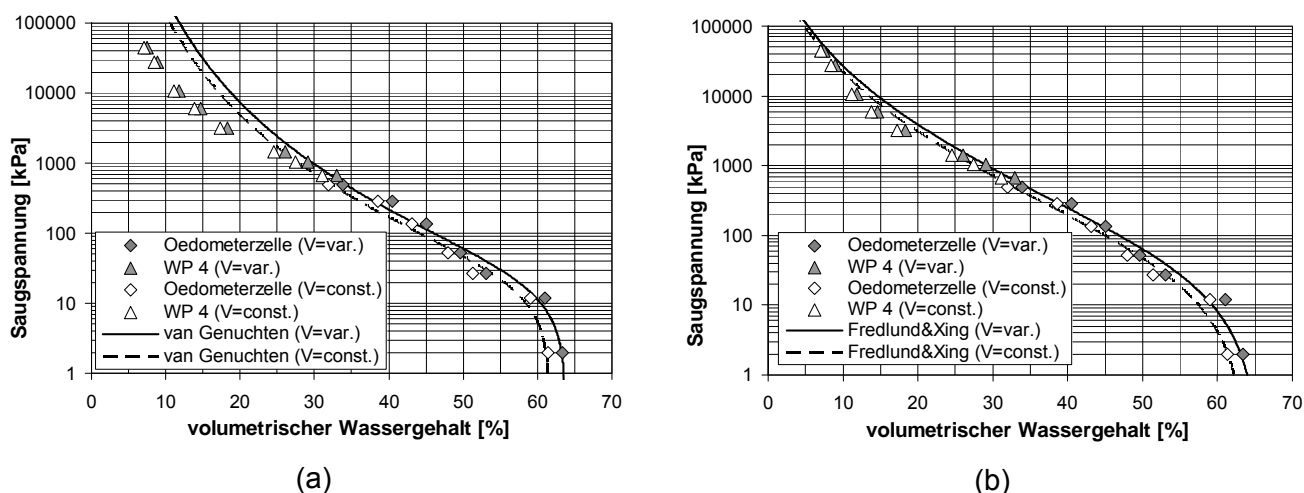


Abb. 6.78: Entwässerungskurven der Probe 9135-t, Vergleich der Messdaten mit den Parametrisierungen nach *van Genuchten* (a) und *Fredlund&Xing* (b)

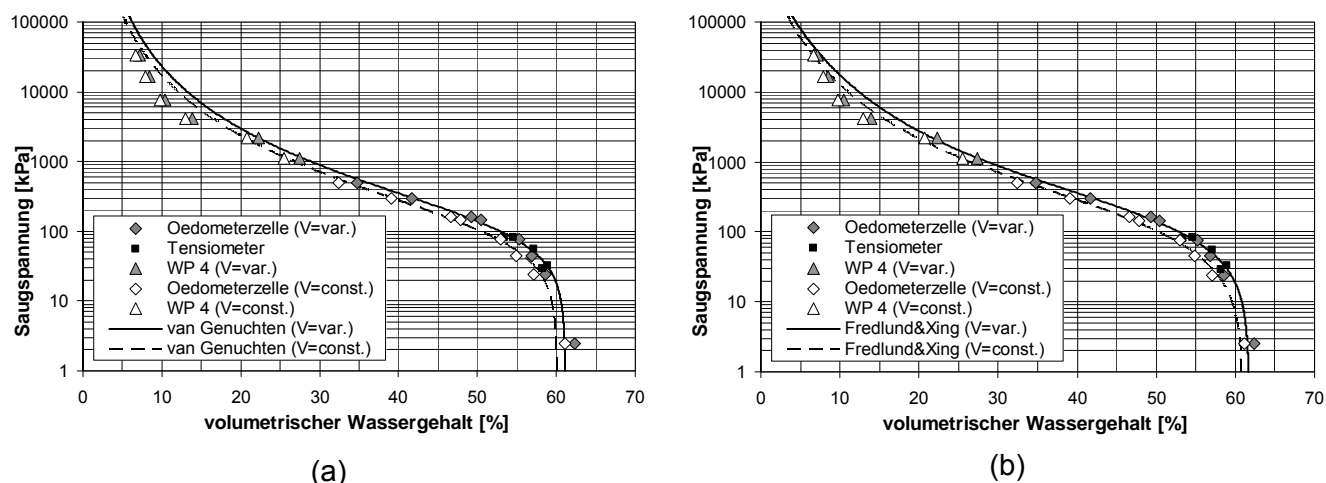


Abb. 6.79: Entwässerungskurven der Probe 9135-n, Vergleich der Messdaten mit den Parametrisierungen nach van Genuchten (a) und Fredlund&Xing (b)

Probe	Volumenänderung	θ_{min} [%]	θ_{max} [%]	α [1/kPa]	n [-]	$m = 1-1/n$ [-]
9135-t (Entwässerung)	V=var.	0	63,8	0,045	1,20	0,167
	V=const	0	61,7	0,043	1,21	0,174
9135-n (Entwässerung)	V=var.	0,8	61,1	0,008	1,36	0,265
	V=const	0	60,1	0,0096	1,35	0,259
9135-n (Hauptbewässerung)	V=var.	0	61,1	0,074	1,23	0,187

Tab. 6.17: Kennwerte der Proben 9135-t und 9135-n für das Modell nach van Genuchten

Probe	Volumenänderung	θ_{min} [%]	θ_{max} [%]	a_f [kPa]	n_f [-]	m_f [-]
9135-t (Entwässerung)	V=var.	0	65,6	70	0,63	1,030
	V=const	0	63,9	70	0,63	1,070
9135-n (Entwässerung)	V=var.	0	61,7	170	1,1	0,870
	V=const	0	60,9	160	1,01	0,980
9135-n (Hauptbewässerung)	V=var.	0	61,7	37	0,66	1,030

Tab. 6.18: Kennwerte der Proben 9135-t und 9135-n für das Modell nach Fredlund&Xing

In der Abb. 6.80 ist der in der Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzelle ermittelte Zusammenhang zwischen der Saugspannung und der Porenzahl dargestellt. Die trocken verdichtete Probe zeigt keine relevante Änderung der Porenzahl im Zuge der Aufsättigung. Dies bedeutet, dass die Probe unter der im Versuch vorhandenen Auflastspannung von 30 kPa keine Quell- oder Sackungserscheinungen erfährt. Im Zuge der Entwässerung stellt sich bei beiden Proben eine Abnahme der Porenzahl ein, wobei die nass verdichtete Probe eine stärkere Schrumpfung erfährt. Für den Saugspannungsbereich zwischen 30 kPa und 500 kPa kann die Beziehung zwischen der Porenzahl und der Saugspannung im halblogarithmischen Maßstab wiederum durch eine Gerade gut angenähert werden. Die für die einzelnen Proben ermittelten Stauchungsbeiwerte C_m sind in der Tab. 6.16 angegeben.

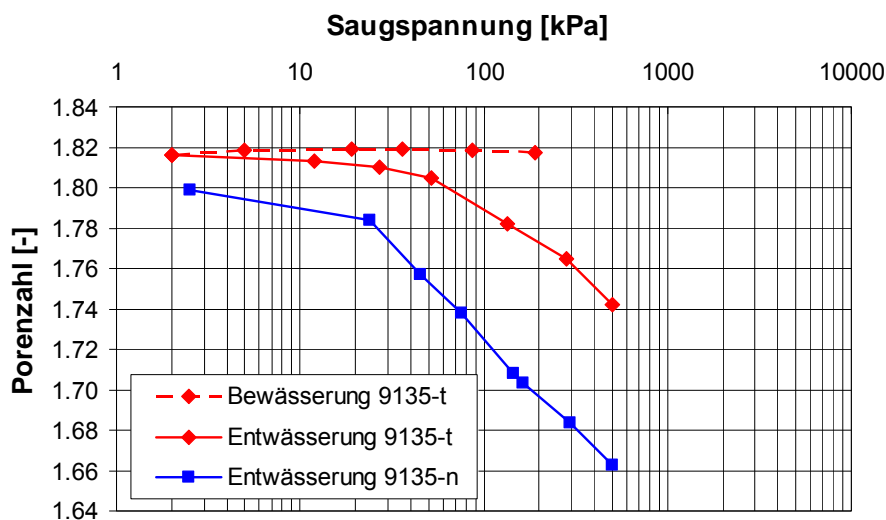


Abb. 6.80: Saugspannungs-Porenzahl-Diagramm für die Proben 9135-n und 9135-t

6.7.6 Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung mittels PTF

Wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, wurden verschiedene Pedotransferfunktionen (PTF) entwickelt, um die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung auf Grundlage von einfach zu bestimmenden Bodenkennwerten abzuschätzen. Allerdings stammen diese überwiegend aus der Bodenkunde und wurden an natürlich abgelagerten Böden abgeleitet. Um zu prüfen, inwieweit mit gebräuchlichen PTF die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der untersuchten Böden abgebildet werden können, wurden die in der Tab. 4.4 im Abschnitt 4.3.1 aufgeführten PTF auf die untersuchten Böden angewandt.

Da bei den Funktionen nach GUBTA UND LARSON (1979), ARYA UND PARIS (1981), VEREECKEN ET AL. (1989) und SCHEINOST ET AL. (1997) neben den materialspezifischen Eigenschaften (Korngrößenverteilung und organische Substanz) als zustandsabhängige Größe nur die Dichte Berücksichtigung findet, kann der in den experimentellen Untersuchungen studierte Einfluss unterschiedlicher Einbauwassergehalte damit nicht abgebildet werden. Dies gilt prinzipiell auch für die Ansätze von RAWLS ET AL. (1982); jedoch finden bei zwei der drei Ansätze von RAWLS ET AL. (1982) zusätzlich diskrete Messwerte Berücksichtigung in den Regressionsgleichungen, so dass bei Vorliegen dieser Messwerte die sich durch unterschiedliche Einbauwassergehalte ergebenden Unterschiede im Bodenverhalten berücksichtigt werden können. Liegen keine Messwerte vor, bleibt der Einfluss des Einbauwassergehaltes bei RAWLS ET AL. (1982) ebenfalls unberücksichtigt. Einzig der explizit für verdichtete Böden entwickelte Ansatz nach TINJUM ET AL. (1997, 1999) ermöglicht die Berücksichtigung des Einbauwassergehaltes.

Die Abb. 6.81 stellt die Lösungen der Ansätze nach *Gubta&Larson*, *Arya&Paris*, *Vereecken et al.* und *Scheinost et al.* im Vergleich zu den experimentell ermittelten Entwässerungskurven (bei Berücksichtigung der Volumenänderungen) für die Proben P4 und P8 des Lias-Tons dar. Da die Trockendichten der beiden Proben sehr ähnlich sind, ergeben sich für die beiden Proben für alle Ansätze jeweils sehr ähnliche Kurvenverläufe. Würden die beiden Proben dieselbe Dichte aufweisen, würden die vorhergesagten Kurven jeweils übereinander liegen. Weiter ist zu erkennen, dass alle

Ansätze die experimentell ermittelten Werte in keiner zufriedenstellenden Weise wiedergeben können. So wird der Lufteintrittspunkt bei allen Modellen deutlich unterschätzt. Für die Prognose mit dem Modell nach *Arya&Paris* wurde dabei zunächst von einem α -Wert von 1,38 ausgegangen, wie er von den Autoren empfohlen wurde. Damit ergibt sich zwar eine ähnliche Steigung der Kurve im mittleren Bereich wie für die Messdaten, jedoch ist der Lufteintrittspunkt zu niedrig. Erhöht man die α -Werte nehmen sowohl der Lufteintrittspunkt als auch die Steigung der Kurve zu. Damit ergibt sich zwar tendenziell eine bessere Anpassung an die Messdaten, aufgrund der zu großen Steigung der Kurve können diese aber dennoch nicht zufriedenstellend wiedergegeben werden, wie aus den in Abb. 6.81 abgebildeten Kurvenverläufen für einen α -Wert von 1,75 ersichtlich wird.

Die Abb. 6.82 stellt die mit dem Ansatz nach *Tinjum et al.* prognostizierten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen im Vergleich zu den Messdaten für die Proben P4 und P8 des Lias-Tons dar. Auch wenn die Regressionsgleichungen nach *Tinjum et al.* explizit für verdichtete feinkörnige Böden entwickelt wurden und der Einbauwassergehalt im Vergleich zum Proctorwassergehalt als Eingangsgröße berücksichtigt wird, zeigt sich keine zufrieden stellende Prognose der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der Proben P4 und P8 des Lias-Tons. So wird zum einen der Lufteintrittspunkt der beiden Proben deutlich unterschätzt und zum anderen ist die Neigung der Kurve im Vergleich zu den gemessenen Werten deutlich zu steil.

Die Abb. 6.83 stellt die mit den Ansätzen von *Rawls et al.* ermittelten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen für die Probe P4 des Lias-Tons dar. Der Ansatz ohne Berücksichtigung von Messwerten ergibt dabei eine sehr stark von den experimentell ermittelten Werten abweichende Beziehung. Auch wenn im zweiten Ansatz nach *Rawls et al.* der bei einer Saugspannung von 1500 kPa gemessene Wassergehalt berücksichtigt wird, weichen die prognostizierten Werte von den gemessenen Werten sehr stark ab. Der dritte Ansatz greift auf zwei Messwerte zurück, indem zusätzlich der bei einer Saugspannung von 33 kPa gemessene Wassergehalt berücksichtigt wird. Dennoch kann der tatsächliche Verlauf der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung der Probe P4 damit nicht gut angenähert werden, da die Kurve im Vergleich zu den gemessenen Werten zu flach verläuft. Ähnliche Beobachtungen können für die mit den Ansätzen nach *Rawls et al.* prognostizierten Verläufe für die Probe P8 gemacht werden (siehe Abb. A1.12 in Anhang 1).

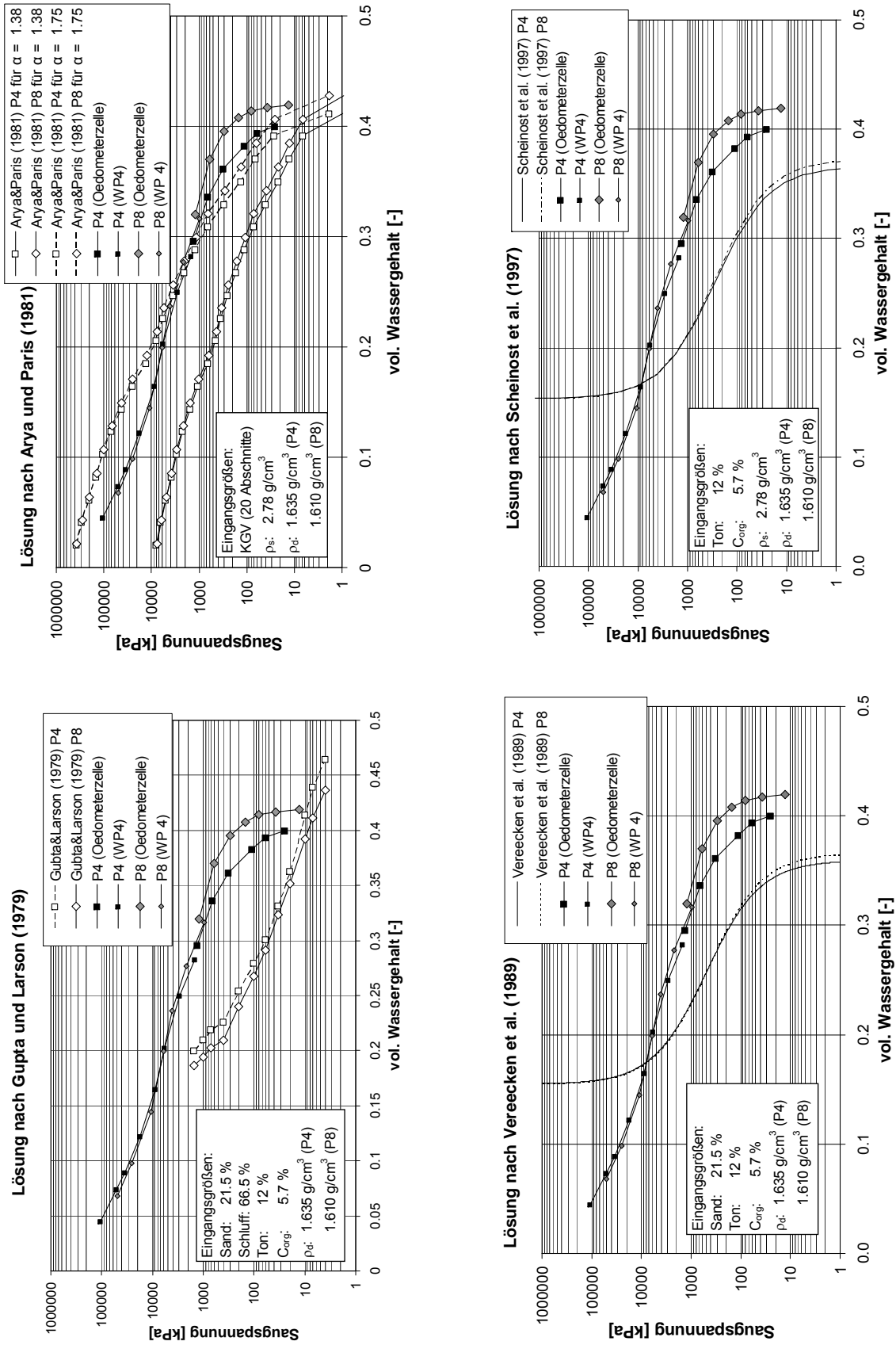


Abb. 6.81: Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den Vorhersagen unterschiedlicher PTF für die Proben P4 und P8 des Lias-Tons

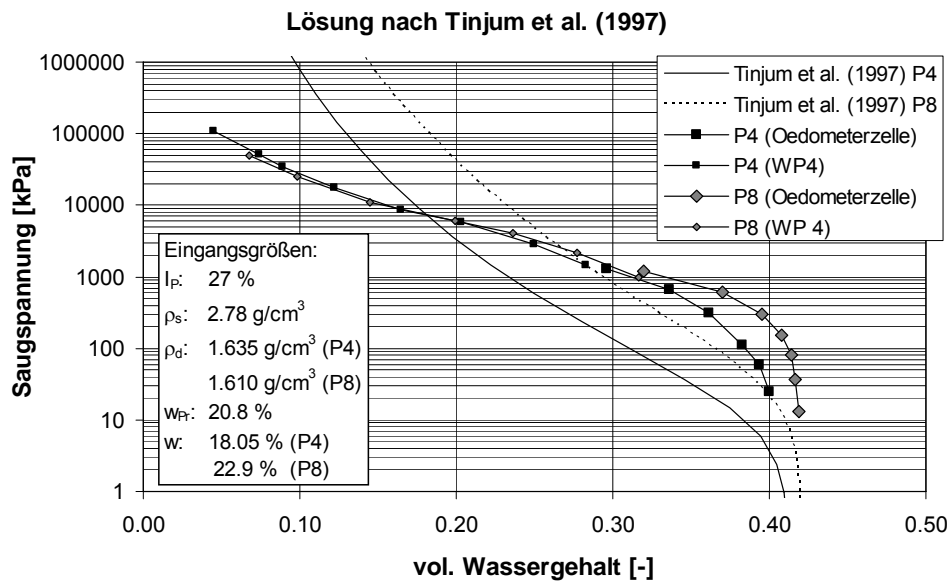


Abb. 6.82: Vergleich der Vorhersage nach *Tinjum et al.* mit den experimentell ermittelten Werten für die Proben P4 und P8 des Lias-Tons

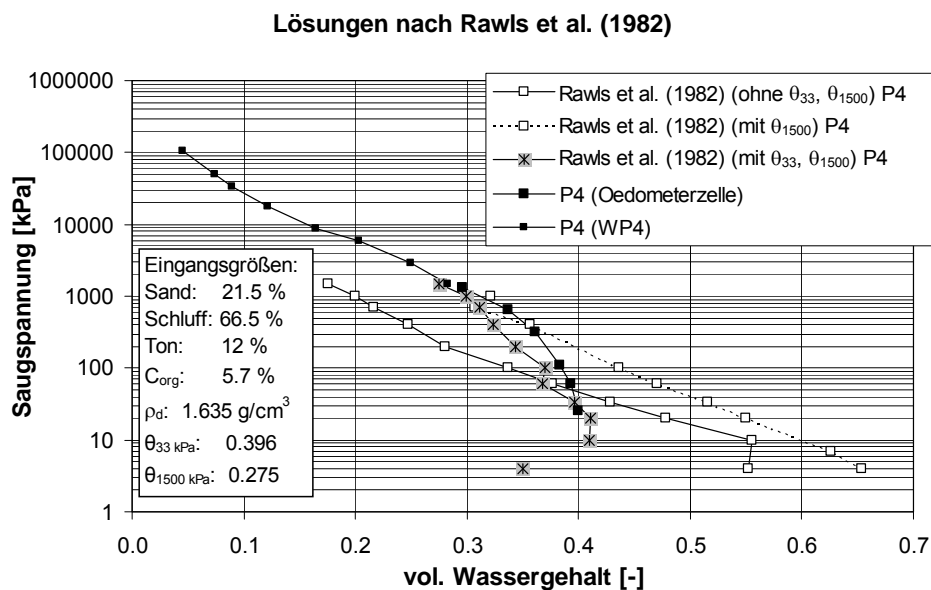


Abb. 6.83: Vergleich der Vorhersage nach *Rawls et al.* mit den experimentell ermittelten Werten für die Probe P4 des Lias-Tons

Für den Lösslehm wurden die aufgeführten Pedotransferfunktionen auf die in den Oedometerzellen untersuchten Proben L-P1 und L-P8 angewandt und mit den Messwerten verglichen. Wie die [Abb. 6.84](#) zeigt, geben die Funktionen nach *Gupta&Larson*, *Vereecken et al.* und *Scheinost et al.* die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung der Probe L-P1 vergleichsweise gut wieder. Da bei diesen Funktionen nur Informationen zur Korngrößenverteilung, zum organischen Anteil und zur Dichte Eingang finden, ergeben sich für die bei ähnlicher Dichte hergestellten Proben L-P1 und L-

P8 fast deckungsgleiche Verläufe. Die auf unterschiedlichen Einbauwassergehalten beruhenden Unterschiede zwischen den Proben L-P1 und L-P8 können damit nicht abgebildet werden.

Für das Modell nach *Arya&Paris* ergibt sich mit einem α -Wert von 1,38, der für den Fall, dass keine messtechnisch ermittelten Daten vorliegen, in der Regel angenommen wird, keine zufrieden stellende Annäherung an die gemessenen Werte. Mit einem α -Wert von 1,65 lassen sich die Messwerte der trocken verdichteten Probe L-P1 sehr gut wiedergeben. Eine Anpassung an die nass verdichtete Probe L-P8 ist dagegen deutlich schlechter möglich, da sich die Form der Saugspannungs-Wassergehalt-Beziehung der Probe L-P8 auch bei freier Wahl des α -wertes mit dem Modell nach *Arya&Paris* nicht zufrieden stellend wiedergegen lässt. Am ehesten gelingt eine Anpassung mit einem α -Wert von 1,85.

Die Abschätzungen mit dem Modell nach *Rawls et al.* für die Probe L-P1 sind in der [Abb. 6.86](#) dargestellt. Der Ansatz ohne Berücksichtigung von Messwerten ergibt dabei eine sehr stark von den experimentell ermittelten Werten abweichende Beziehung. Auch mit dem zweiten Ansatz nach *Rawls et al.*, bei dem der bei einer Saugspannung von 1500 kPa gemessene Wassergehalt berücksichtigt wird, erhält man keine bessere Anpassung an die Messwerte. Der dritte Ansatz greift auf zwei Messwerte zurück, indem zusätzlich der bei einer Saugspannung von 33 kPa gemessene Wassergehalt berücksichtigt wird. Damit lässt sich der Verlauf der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung der Probe L-P1 im Bereich zwischen 33 kPa und 1500 kPa gut darstellen. Für die nass verdichtete Probe (L-P8) dagegen ergibt sich mit dem dritten Ansatz dennoch ein deutlich unterschiedlicher Verlauf im Vergleich zu den Messdaten (siehe [Abb. A1.13](#) im Anhang 1).

Wie die [Abb. 6.85](#) zeigt, lässt sich mit dem Ansatz nach *Tinjum et al.* die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung der trocken verdichteten Probe L-P1 im niedrigen Saugspannungsbereich bis ca. 1000 kPa sehr gut wiedergeben. Auch die Messdaten der nass verdichteten Probe werden durch die Regression nach *Tinjum et al.* zumindest bis ca. 500 kPa gut angenähert. Bei höheren Saugspannungen weicht die Vorhersage von den gemessenen Werten für beide Proben jedoch sehr stark ab.

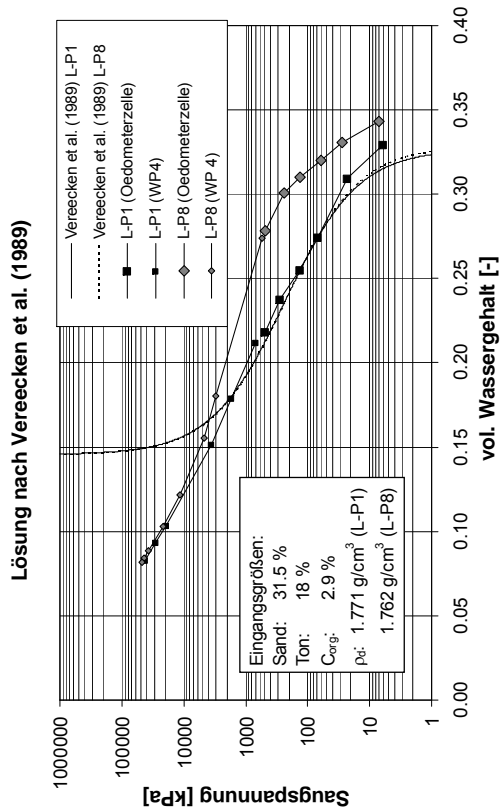
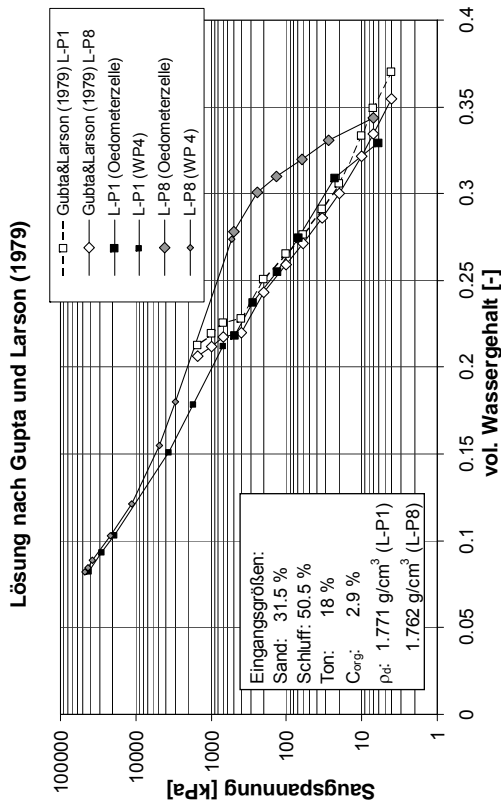
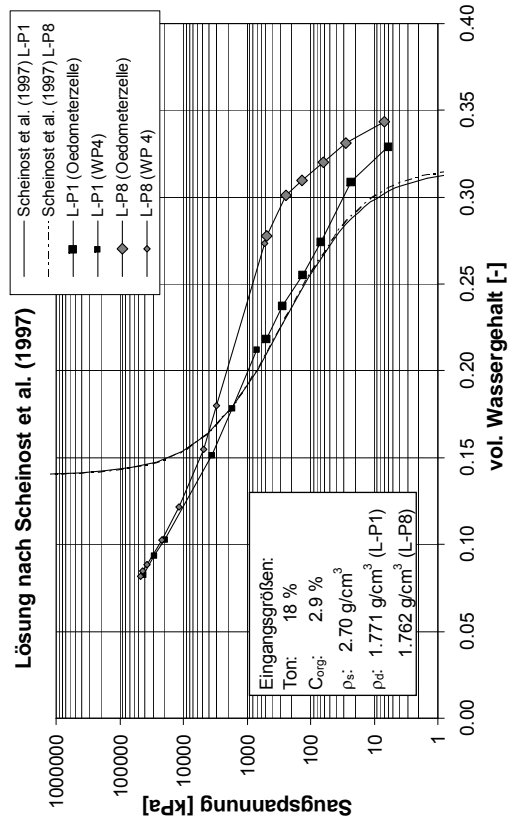
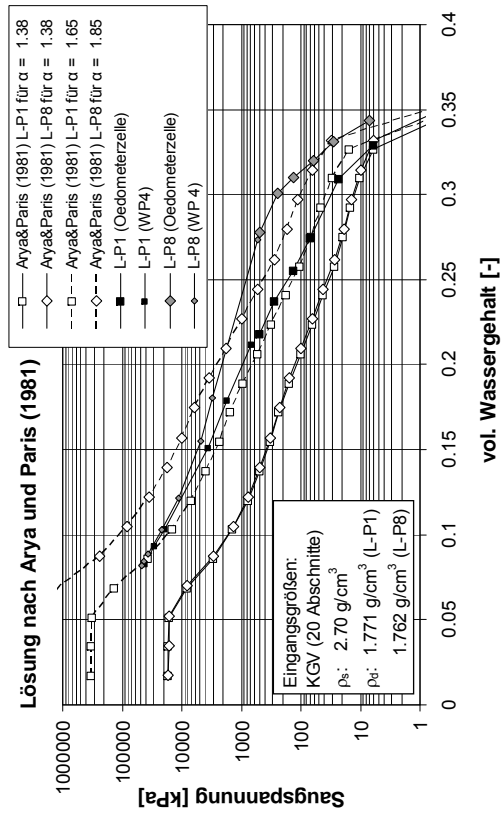


Abb. 6.84: Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den Vorhersagen unterschiedlicher PTF für die Proben L-P1 und L-P8 des Lösslehms

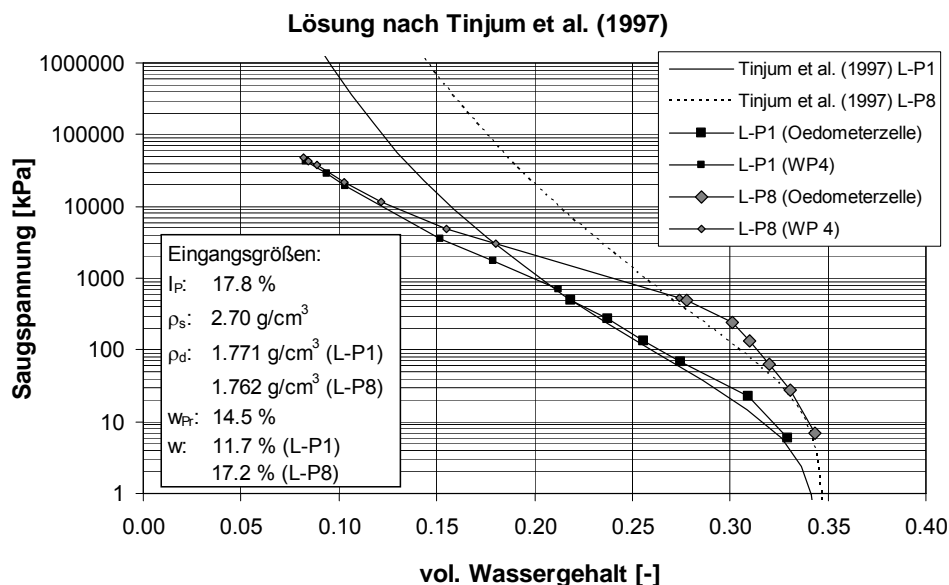


Abb. 6.85: Vergleich der Vorhersage nach *Tinjum et al.* mit den experimentell ermittelten Werten für die Proben L-P1 und L-P8 des Lösslehms

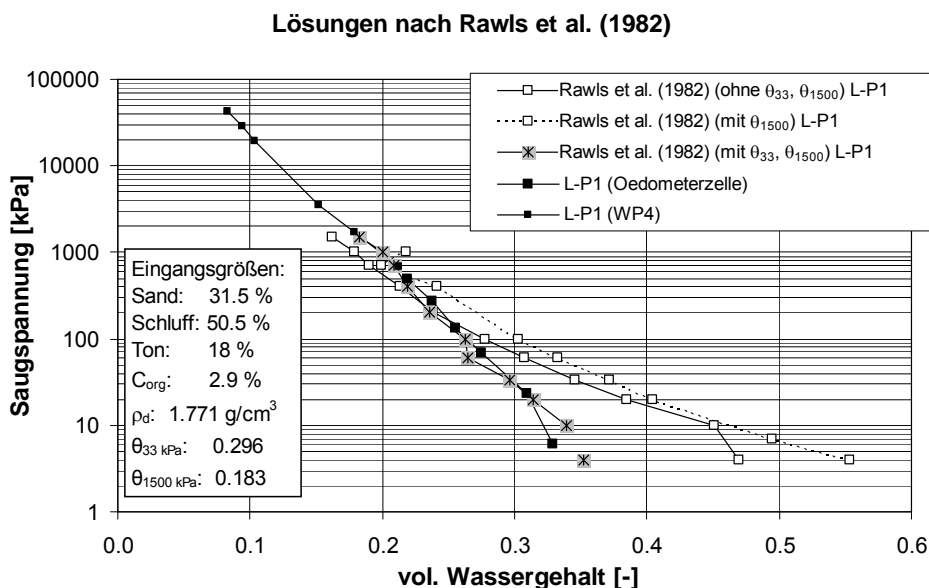


Abb. 6.86: Vergleich der Vorhersage nach *Rawls et al.* mit den experimentell ermittelten Werten für die Probe L-P1 des Lösslehms

Für den Ton mit organischen Beimengungen geben die Funktionen nach *Gupta&Larson*, *Rawls et al.*, *Vereecken et al.* und *Scheinost et al.* nur eine ungenügende Vorhersage der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung (siehe [Abb. A1.14](#) im Anhang 1). Mit dem Ansatz nach *Arya&Paris* ist eine zufrieden stellende Annäherung an die gemessenen Werte möglich, wenn die α -Werte entsprechend angepasst werden. Mit einem α -Wert von 1,38, der für den Fall, dass keine messtechnisch ermittelten Daten vorliegen, in der Regel angenommen wird, ergibt sich eine Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung, die im niedrigen Saugspannungsbereich bis ca. 70 kPa die ex-

perimentell ermittelte Entwässerungskurve der trocken verdichteten Probe 9135-t gut wiedergibt. Da die nass und trocken verdichteten Proben 9135-t und 9135-n eine sehr ähnliche Dichte aufweisen, liegen die nach dem Modell von *Arya&Paris* prognostizierten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der beiden Proben fast deckungsgleich übereinander, weshalb in der Darstellung in der Abb. 6.87 nur die für die Probe 9135-t ermittelte Beziehung dargestellt ist. Für die nass verdichtete Probe erhält man mit dem Modell nach *Arya&Paris* eine sehr gute Anpassung an die experimentell ermittelten Daten für einen α -Wert von 1,55.

Mit dem Ansatz nach *Tinjum et al.* lässt sich die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung der trocken verdichteten Probe im niedrigen Saugspannungsbereich bis ca. 1000 kPa zufrieden stellend wiedergehen, wohingegen die Saugspannungen für die nass verdichtete Probe deutlich überschätzt werden (siehe Abb. A1.15 im Anhang 1).

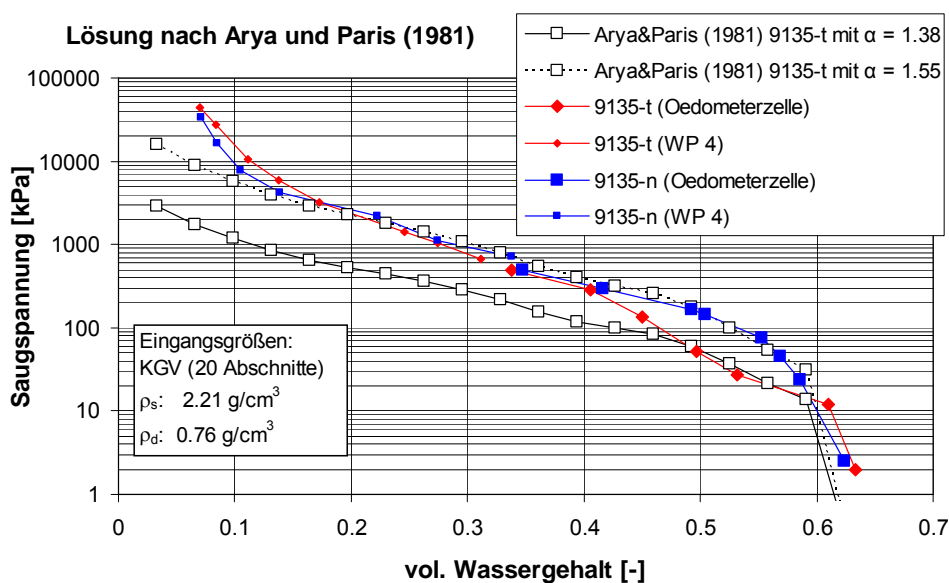


Abb. 6.87: Vergleich der Vorhersage nach *Arya&Paris* mit den experimentell ermittelten Werten für die Proben 9135-t und 9135-n des Tons mit organischen Beimengungen

6.8 Hydraulische Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand

6.8.1 Mehrstufen-Ausfluss-Methode

Die hydraulische Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand wurde aus den Untersuchungen in den Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen mit Hilfe der Mehrstufen-Ausfluss-Methode ermittelt. Die Auswertung erfolgte auf Grundlage der von GARDNER (1956) entwickelten Zusammenhänge unter Berücksichtigung des Einflusses der verwendeten gering durchlässigen Keramiken. Im Folgenden werden die theoretischen Zusammenhänge, die von ROMERO (1999) ausführlich erläutert wurden, zusammenfassend dargestellt.

Die infolge der Änderung der Matrixspannung in der Oedometerzelle erzwungene eindimensionale Wasserbewegung lässt sich mit der Gleichung (4.32) nach RICHARDS (1931) beschreiben. Für den zugrunde liegenden eindimensionalen Fall reduziert sich diese zu:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \cdot \frac{\partial H_m}{\partial z} + 1 \right] = C(H_m) \frac{\partial H_m}{\partial t} \quad (6.16)$$

Dabei stellt z die Koordinate für die vertikale Achse dar; $C(H_m)$ bezeichnet die Kapillarkapazität entsprechend der Gleichung (4.33).

Da das Matrixpotential H_m gegenüber dem Gravitationspotential in feinkörnigen Böden deutlich überwiegt, können Einflüsse infolge der Schwerkraft vernachlässigt werden und es ergibt sich für Gleichung (6.16):

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \cdot \frac{\partial H_m}{\partial z} \right] = C(H_m) \frac{\partial H_m}{\partial t} \quad (6.17)$$

Unter der Annahme, dass sich die hydraulische Leitfähigkeit in z -Richtung nicht ändert, ergibt sich daraus:

$$k(\theta) \cdot \frac{\partial H_m}{\partial z^2} = C(H_m) \frac{\partial H_m}{\partial t} \quad (6.18)$$

Durch Einführung des Diffusionskoeffizienten $D_w = k(\theta)/C(H_m)$ vereinfacht sich Gleichung (6.18) zu:

$$D_w \cdot \frac{\partial H_m}{\partial z^2} = \frac{\partial H_m}{\partial t} \quad (6.19)$$

Die Auswertung geht davon aus, dass sich die hydraulische Leitfähigkeit mit der geringen Wassergehaltsänderung infolge einer Änderung des Matrixpotentials nicht ändert. Diese Annahme ist im Allgemeinen nicht richtig, vereinfacht die Auswertung allerdings deutlich. Die ursprünglich von GARDNER (1956) entwickelte Methode geht weiter davon aus, dass das Matrixpotential linear mit dem volumetrischen Wassergehalt nach folgender Gleichung verbunden ist:

$$H_m = a + b \cdot \theta \quad (6.20)$$

Dabei sind a und b Konstanten. Für geringe Saugspannungsänderungen kann dieser Ansatz als zutreffend angenommen werden. Der durch die poröse Keramik hervorgerufene Fließwiderstand wird vernachlässigt. Außerdem wird angenommen, dass die Probe homogen und starr ist. D.h. eine Wasserabgabe infolge einer Reduzierung des Porenraumes bleibt unberücksichtigt. Als Anfangsbedingung für den Versuch gilt, dass zum Zeitpunkt $t = 0$, d.h. vor Aufbringen einer Druckänderung das Matrixpotential über die gesamte Probe der Dicke L konstant ist:

$$H_m(z, t) = H_{m,0} \quad \text{für } t = 0 \text{ und } 0 \leq z \leq L \quad (6.21)$$

Die Randbedingung am unteren Rand nach einer Änderung des Matrixpotentials um ΔH_m lautet:

$$H_m(z = 0, t) = H_{m,0} + \Delta H_m \quad \text{für } t > 0 \quad (6.22)$$

Am oberen Rand der Probe dringt nur Luft ein; die Filtergeschwindigkeit des Wassers ist Null. Mathematisch lässt sich das folgendermaßen darstellen:

$$\left. \frac{\partial H_m}{\partial z} \right|_{z=L} = 0 \quad (6.23)$$

GARDNER (1956) integrierte die Fourier-Reihen-Lösung von $H_m(t)$ über das Probenvolumen, um die zu einem bestimmten Zeitpunkt t zu- bzw. abgeflossene Wassermenge zu bestimmen und erhielt folgende Gleichung:

$$\frac{V(t)}{V_0} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2 \cdot m + 1)^2} \exp\left(- (2 \cdot m + 1)^2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot D_w \cdot t}{4 \cdot L^2}\right) \quad (6.24)$$

Dabei stellt V_0 die gesamte abgegebene bzw. aufgenommene Wassermenge und $V(t)$ die bis zum Zeitpunkt t abgegebene bzw. aufgenommene Wassermenge dar. L bezeichnet die Dicke der Probe.

Verschiedene Autoren (u. a. KUNZE UND KIRKHAM, 1962; OLSON UND DANIEL, 1981) entwickelten Ansätze, um den Fließwiderstand infolge der verwendeten Membranen zu berücksichtigen. Der am weitesten verbreitete Ansatz geht auf KUNZE UND KIRKHAM (1962) zurück, die ihren Ansatz anhand von Versuchsergebnissen mit unterschiedlichen Böden und unterschiedlichen Keramiken belegen konnten.

Nach KUNZE UND KIRKHAM (1962) können die gemessenen Zu- bzw. Abflüsse unter Berücksichtigung des Verhältnisses zwischen dem Fließwiderstand der keramischen Platte und des Bodens folgendermaßen ausgewertet werden:

$$\frac{V(t)}{V_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \exp\left(-\alpha_n^2 \cdot D_w \cdot t / L^2\right)}{\alpha_n^2 \cdot \left(a + \csc^2(\alpha_n)\right)} \quad (6.25)$$

Dabei ist V_0 der gesamte Zu- bzw. Abfluss infolge einer Druckänderung, $V(t)$ die bis zum Zeitpunkt t abgegebene bzw. aufgenommene Wassermenge und L die Dicke der Bodenprobe; \csc bezeichnet die Kosekansfunktion, α_n ist die n -te Lösung der Gleichung $a \cdot \alpha_n = \cot(\alpha_n)$ mit $n = 1, 2, \dots$ und a steht für das Verhältnis des Fließwiderstandes zwischen der keramischen Platte und dem Boden:

$$a = \frac{k/L}{k_d/e} \quad (6.26)$$

Dabei sind k die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens, k_d der Durchlässigkeitsbeiwert der keramischen Platte, und e die Dicke der Platte. Mit den entsprechenden Messdaten zu den aufgenommenen und abgegebenen Wassermengen lässt sich aus der Gleichung (6.25) der Diffusionskoeffizient D_w bestimmen. Unter Berücksichtigung der aufgetragenen Änderung des Matrixpotentials und der

daraus resultierten Wassergehaltsänderung kann anschließend die hydraulische Leitfähigkeit ermittelt werden:

$$k = \frac{D_w \cdot \Delta\theta}{\Delta(H_m)} \quad (6.27)$$

Mit $\Delta\theta = V_0 / V_{\text{ges}}$ und $\Delta H_m = \Delta(u_a - u_w) / \gamma_w$ erhält man daraus:

$$k = \frac{D_w \cdot V_0 \cdot \gamma_w}{V_{\text{ges}} \cdot \Delta(u_a - u_w)} \quad (6.28)$$

Dabei sind V_0 der gesamte Zu- bzw. Abfluss infolge einer Druckänderung, γ_w die Wichte des Wassers, $\Delta(u_a - u_w)$ die Änderung des Luft- und Wasserdruckes in der Probe und V_{ges} das Gesamtvolumen der Probe.

6.8.2 Vorgehensweise

Die Anwendung der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Mehrstufen-Ausfluss-Methode erfordert eine ausreichend genaue zeitliche Auflösung der über die poröse Keramik in die Probe ein- bzw. ausströmenden Wassermengen. Ursprünglich sollte dies über die Messung des Wasserstandes in den Standrohren mit Hilfe von Differential-Druckaufnehmern erfolgen. Während der Versuche hat sich jedoch gezeigt, dass die verwendeten Druckaufnehmer beim angelegten Wasserdruck von 3 bar (300 kPa) zum Teil deutliche Schwankungen im Messsignal aufweisen und dadurch keine ausreichend genaue Messung des Wasserstandes ermöglichen. Nach Rücksprache mit dem Hersteller lässt sich dies auf ein Systemproblem zurückführen, wonach Druckaufnehmer, die für kleine Drücke sehr sensitiv sind, eine Beeinflussung ihres Messsignals durch hohe Druckniveaus erleiden. Demnach wären die verwendeten Druckaufnehmer für Messungen unter Atmosphärenluftdruck deutlich besser geeignet als bei dem angelegten Druckniveau von 300 kPa gegenüber dem Atmosphärendruck. Aus diesem Grund wurde die Wasserspiegelhöhe in den Standrohren abgesehen vom Versuch P4 am Lias-Ton zusätzlich in regelmäßigen Abständen abgelesen.

Die Ablesegenauigkeit wie auch die maximale Genauigkeit der Druckaufnehmer beträgt 1 mm, was unter Berücksichtigung der beiden Standrohre und des angelegten Wasserdruckes von 3 bar (300 kPa) etwa 0,1 g Wasser entspricht. Bei einer Höhe der Proben von 1 cm und einer Trockendichte von 1,6 g/cm³ bedeutet dies eine Änderung des Wassergehaltes von ca. 0,15 %.

Die aus der Probe infolge der Erhöhung bzw. Verringerung der Saugspannungen ein- bzw. austretende Wassermenge wurde mit den Lösungen nach *Gardner* und nach *Kunze&Kirkham* wiedergegeben. Dazu wurde der Diffusionskoeffizient D_w mit Hilfe des Rechenprogramms Maple (Version 10) iterativ so bestimmt, dass die gemessenen Daten bestmöglich angenähert werden (siehe Anhang A1.6). Dies wurde für jede Saugspannungsstufe der einzelnen Versuche durchgeführt. Nur beim Versuch P4 wurde diese Vorgehensweise nicht für alle Saugspannungsstufen realisiert, da der zeitliche Verlauf der Wasserstände in den Standrohren aufgrund der bereits beschriebenen Schwierigkeiten mit dem Druckaufnehmer nicht in ausreichender Genauigkeit erfasst werden konnte.

Bei der Auswertung wurden jeweils die ersten beiden Terme der Reihenlösungen berücksichtigt. Die Werte für α_1 und α_2 wurden dabei in den Bereichen $0 \leq \alpha_1 \leq \pi / 2$ und $\pi \leq \alpha_2 \leq 3 \pi / 2$ ermittelt.

In Abb. 6.88 ist beispielhaft für die Probe P8 die im Zuge der Erhöhung der Saugspannung gemessene ausströmende Wassermenge zusammen mit den theoretischen Lösungen nach *Gardner* und *Kunze&Kirkham* dargestellt. Nennenswerte Unterschiede zwischen den Lösungen nach *Gardner* und *Kunze&Kirkham* sind nur im Bereich niedriger Saugspannungen, wenn die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens in einer ähnlichen Größenordnung wie der Durchlässigkeitsbeiwert der porösen Keramik liegt, feststellbar. Ansonsten ist der Einfluss des Durchlässigkeitsbeiwertes der porösen Keramik gegenüber der Durchlässigkeit des Bodens vernachlässigbar.

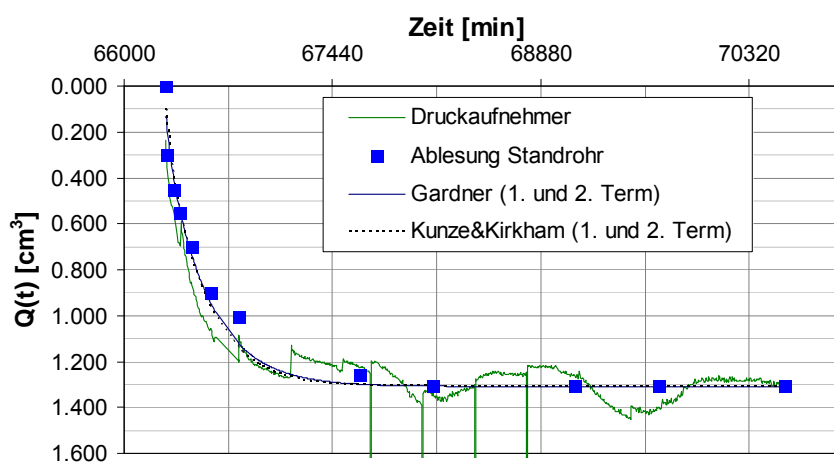


Abb. 6.88: Ausströmende Wassermenge bei einer Erhöhung der Saugspannung von 300 kPa auf 605 kPa beim Versuch P8 am Lias-Ton

6.8.3 Ergebnisse

Die mit Hilfe der Lösung nach *Kunze&Kirkham* für die Proben P4, P5, P7 und P8 des Lias-Tons ermittelten Zusammenhänge zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit und der Saugspannung sind in der Abb. 6.89 dargestellt. Zusätzlich sind darin die mit den Modellen nach *van Genuchten&Mualem*, *Averjanov* und *Fredlund et al.* prognostizierten Beziehungen abgebildet. Als Eingangsparameter liegen den Modellen nach *van Genuchten&Mualem* und *Fredlund et al.* die unter Berücksichtigung der Volumenänderungen ermittelten Parametersätze der einzelnen Proben zur Beschreibung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung nach *van Genuchten* bzw. *Fredlund&Xing* zugrunde (siehe Tab. 6.9 und Tab. 6.10). Desweiteren erfordern die Modelle als Eingangsparameter die Durchlässigkeit im gesättigten Zustand. Diese wurde aus den Ergebnissen der Durchlässigkeitsversuche abgeleitet. Aufgrund der zum Teil etwas unterschiedlichen Trockendichten der in den Durchlässigkeitszellen und in den Oedometerzellen untersuchten Proben wurde der Durchlässigkeitsbeiwert für die Proben P4 und P5 dazu mit Hilfe der in der Abb. 6.31 dargestellten Exponentialfunktion aus den Trockendichten der Proben abgeschätzt. Für die Proben P7 und P8 wurden die Durchlässigkeitsbeiwerte der Proben Pv_7 und Pv_8 herangezogen.

Es ist zu erkennen, dass die hydraulische Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand mit den verwendeten Modellen für alle Proben überschätzt wird, wobei der mit dem Modell nach *van Genuch-*

ten&Mualem prognostizierte Verlauf den Messwerten noch am nächsten kommt. Beim Modell nach Averjanov wurde der von AVERJANOV (1950) vorgeschlagene δ -Wert von 3,5 verwendet. Bei Wahl größerer δ -Werte kann die Kurve zwar etwas in Richtung der Messdaten verschoben werden, im Vergleich zum Modell nach van Genuchten&Mualem wird damit aber keine bessere Anpassung an die Messwerte erreicht.

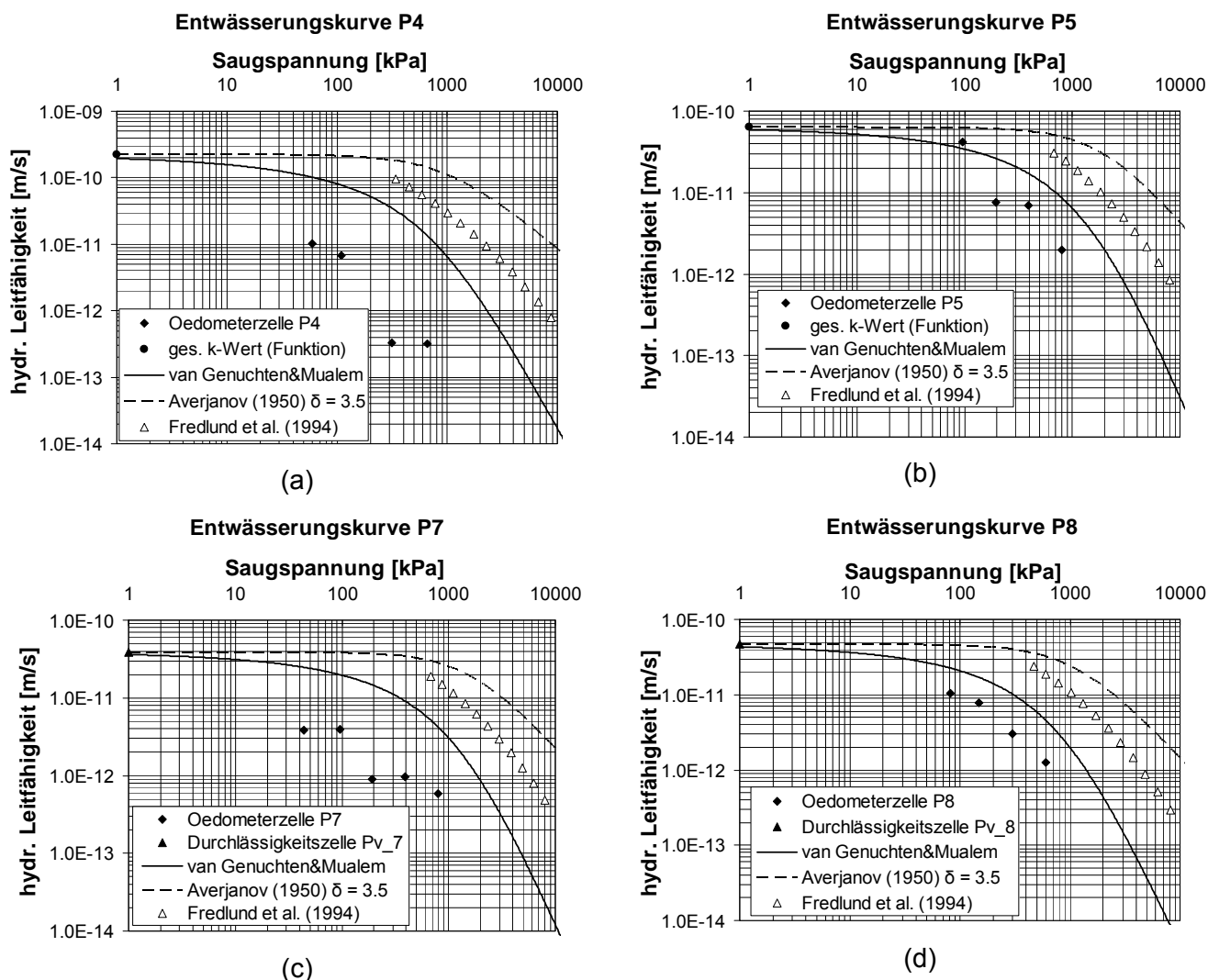


Abb. 6.89: Vergleich der experimentell ermittelten hydraulischen Leitfähigkeit mit den Vorhersagen nach van Genuchten&Mualem, Averjanov und Fredlund et al. für den Lias-Ton

Die Abb. 6.90 stellt die Beziehung zwischen der Saugspannung und der hydraulischen Leitfähigkeit für die Proben L-P1 und L-P8 des Lösslehms dar. Auch wenn die Messwerte mit dem Modell nach van Genuchten&Mualem etwas überschätzt werden, kann der Zusammenhang zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit und der Saugspannung damit insgesamt gut abgebildet werden. Im Vergleich dazu überschätzen die Vorhersagen nach Fredlund et al. und Averjanov bei Ansatz eines δ -Wertes von 3,5 die Messwerte deutlich. Durch die Wahl eines δ -Wertes von 17 können die Prognosen nach Averjanov etwas besser an die Messwerte angepasst werden.

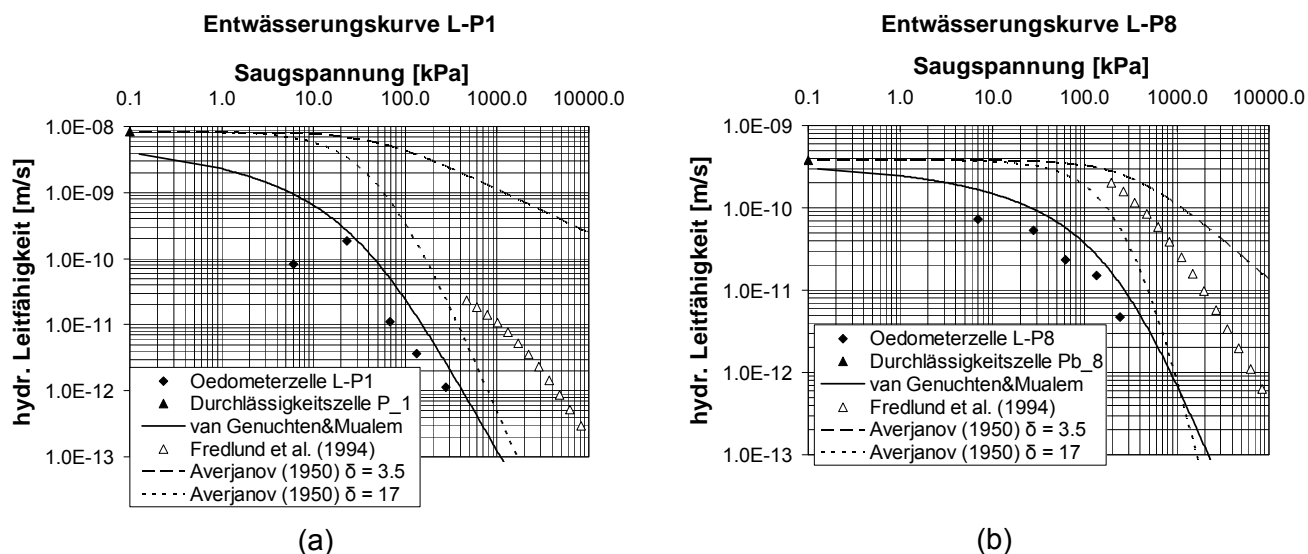


Abb. 6.90: Vergleich der experimentell ermittelten hydraulischen Leitfähigkeit mit den Vorhersagen nach *van Genuchten&Mualem*, *Averjanov* und *Fredlund et al.* für den Lösslehm

Die **Abb. 6.91** stellt die Beziehung zwischen der Saugspannung und der hydraulischen Leitfähigkeit für die untersuchten Proben des Tons mit organischen Beimengungen dar. Es ist zu erkennen, dass sowohl für die trocken verdichtete Probe als auch für die nass verdichtete Probe die experimentell ermittelten Daten mit der Prognose nach *van Genuchten&Mualem* zutreffend wiedergegeben werden. Dagegen wird die hydraulische Leitfähigkeit sowohl mit dem Modell nach *Fredlund et al.* als auch mit dem Modell nach *Averjanov* bei Ansatz eines δ -Wertes von 3,5 deutlich überschätzt. Mit dem Modell nach *Averjanov* kann eine deutlich bessere Anpassung an die experimentell ermittelten Daten mit einem δ -Wert von 17 erzielt werden. Auffallend ist, dass die experimentell ermittelten Werte bei kleinen Saugspannungen < 10 kPa deutlich geringere Durchlässigkeitsbeiwerte ergeben als die in den Durchlässigkeitsversuchen ermittelten Werte für den gesättigten Zustand. Es wird angenommen, dass sich dabei der Einfluss von Luftblasen bei den nicht vollständig gesättigten Oedometerproben bemerkbar macht. Würde die Entwässerungskurve von einer vollständig gesättigten Probe ausgehend ermittelt werden (Hauptentwässerungskurve), wären im niedrigen Saugspannungsbereich höhere Werte der hydraulischen Leitfähigkeit zu erwarten.

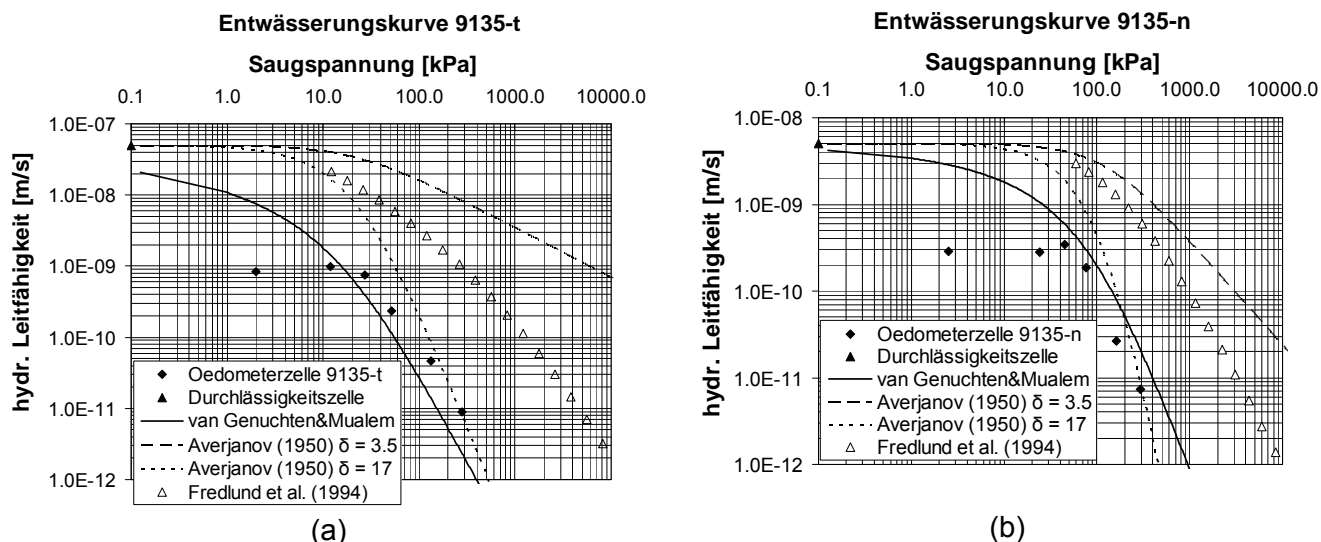


Abb. 6.91: Vergleich der experimentell ermittelten hydraulischen Leitfähigkeit mit den Vorhersagen nach *van Genuchten&Mualem*, *Averjanov* und *Fredlund et al.* für den Ton mit organischen Beimengungen

6.9 Zusammenfassung

Der Einfluss unterschiedlicher Einbaubedingungen auf die Poren- und Aggregatstruktur verdichteter feinkörniger Böden wurde anhand von Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen studiert. Danach zeigt sich, dass sich bei einer Verdichtung auf der trockenen Seite des Proctroptimums eine bimodale Porengrößenverteilung (PGV), welche in einen Interaggregat- und einen Intraaggregatporenraum aufgeteilt werden kann, einstellt. Mit zunehmendem Einbauwassergehalt bei gleich bleibender Trockendichte nehmen der Interaggregatporenraum ab und der Porendurchmesser des Maximalwertes der Dichtefunktion der Porengrößenverteilung zu. Bei einer Verdichtung auf der nassen Seite des Proctroptimums führt dies zu einer unimodalen Porengrößenverteilung. Wird bei einem Einbauwassergehalt auf der trockenen Seite des Proctroptimums die Einbaudichte erhöht, werden die Interaggregatporen reduziert, wodurch sich eine zunehmend unimodale Verteilung einstellt. Die Größe des Intraaggregatporenraumes bleibt dabei von der Einbaudichte allerdings weitgehend unbeeinflusst. Schematisch sind die Ergebnisse in der Abb. 6.93 zusammengefasst.

Die hydraulischen Eigenschaften der bei unterschiedlichen Einbauwassergehalten und Einbaudichten hergestellten Proben wurden auf Grundlage von verschiedenen Versuchen ermittelt. Danach lassen sich folgende Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses der Einbaubedingungen festhalten (siehe auch Abb. 6.94):

- Die **Saugspannungen im Einbauzustand** sind für Einbauwassergehalte unterhalb des Proctorwassergehaltes nur vom Wassergehalt, nicht aber von der Einbaudichte abhängig (siehe Abb. 6.92). Bei Einbauwassergehalten oberhalb des Proctorwassergehaltes nehmen die Saugspannungen im Einbauzustand mit abnehmendem Luftporenanteil ab. Dies lässt sich aus den Ergebnissen der Quecksilberporosimetrie erklären, wonach der Intraaggregatporenraum bei einer Zunahme der Trockendichte weitgehend unbeeinflusst bleibt, sofern der Einbauwassergehalt unterhalb des Proctroptimums liegt. Die aus der Erhöhung der Einbaudichte resultierende Redu-

zierung des Interaggregatporenraums hat auf die Saugspannungen im Einbauzustand keine Auswirkung, da der Interaggregatporenraum bei Wassergehalten unterhalb des Proctoroptimums nicht mit Wasser gefüllt ist und die zwischen Bodenwasser und Bodenmatrix wirkenden Bindungskräfte durch die Porenstruktur innerhalb der Aggregate (Intraaggregatporenraum) bestimmt werden.

- Die **Beziehung zwischen Saugspannung und gravimetrischem Wassergehalt** ist im niedrigen Wassergehaltsbereich weitgehend unbeeinflusst von den Einbaubedingungen (siehe Abb. 6.92). Als Grenzwassergehalt, ab dem ein Einfluss des Einbauwassergehaltes auftritt, kann näherungsweise der Wassergehalt an der Schrumpfgrenze angenommen werden. Desweiteren zeigt sich, dass sich eine Veränderung der Einbaudichte bei gleichem Einbauwassergehalt auf die Beziehung zwischen Saugspannung und gravimetrischem Wassergehalt nur im hohen Wassergehaltsbereich bemerkbar macht.
- Im Hinblick auf die **Beziehung zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad** lassen sich folgende Erkenntnisse festhalten: Mit zunehmendem Einbauwassergehalt bei gleicher Einbaudichte nehmen der Lufteintrittspunkt zu und die Steigung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung oberhalb des Lufteintrittspunktes ab (Sättigungsgrad auf der Abszisse und Saugspannung auf der Ordinate). Wird die Einbaudichte bei einem Einbauwassergehalt unterhalb des Proctorwassergehaltes erhöht, nehmen der Lufteintrittspunkt ebenfalls zu und die Steigung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung ebenfalls ab (siehe Abb. 6.92). Beide Fälle sind auf den jeweiligen Anteil an Interaggregatporen zurückzuführen. So findet bei Proben, die auf der trockenen Seite der Proctorkurve verdichtet wurden und dadurch einen großen Anteil an Interaggregatporen aufweisen, bereits bei geringen Saugspannungen eine deutliche Entwässerung statt. Im Vergleich dazu wird das Porenwasser bei „nass“ verdichteten Böden infolge der geringeren Anzahl an Interaggregatporen durch Kapillarspannungen stärker gebunden und eine Entwässerung setzt deshalb erst bei höheren Saugspannungen ein. Prinzipiell gilt außerdem, dass die Saugspannungen bei einem bestimmten Sättigungsgrad mit zunehmender Einbaudichte zunehmen.
- Die Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche belegen, dass die **Durchlässigkeit im gesättigten Zustand** mit zunehmendem Einbauwassergehalt bei konstanter Einbaudichte und mit zunehmender Einbaudichte bei konstantem Einbauwassergehalt abnehmen. Dies kann ebenfalls auf den jeweiligen Anteil an Interaggregatporen zurückgeführt werden.
- Desweiteren ist mit zunehmendem Einbauwassergehalt eine Zunahme der **Schrumpferformungen** im Falle einer Wasserabgabe verbunden. Außerdem nimmt der Wassergehalt an der Schrumpfgrenze als Übergang von der Primär- in die Sekundärschrumpfung mit zunehmendem Einbauwassergehalt zu. Dagegen hat eine Zunahme der Einbaudichte bei einer Verdichtung auf der trockenen Seite des Proctoroptimums keinen nennenswerten Einfluss auf das Schrumpfpotential und die Schrumpfgrenze. Das bedeutet, dass das Schrumpfverhalten einer unbelasteten Probe einzig von den Aggregaten beeinflusst wird, nicht aber vom Anteil der zwischen den Aggregaten vorhandenen Interaggregatporen.
- Bei einer Verdichtung auf der trockenen Seite des Proctoroptimums kann eine Wasserzugabe prinzipiell zu **Sackungen** führen. Wie die Untersuchungen zeigen, nehmen diese mit zunehmender Einbaudichte ab bzw. stellen sich zunehmend Quellhebungen bei einer Wasseraufnahme ein. Die Sackungen beruhen auf einer Reduzierung der Kapillarspannungen zwischen den Aggregaten, wodurch die Kontaktkräfte zwischen den Aggregaten reduziert werden und die Aggregate infolge einer äußeren Belastung näher aneinander geschoben werden. Damit verbun-

den ist im Wesentlichen eine Reduzierung des Interaggregatporenraumes. Werden die Interaggregatporen im Zuge der Verdichtung bereits minimiert, werden auch mögliche Sackungsercheinungen minimiert.

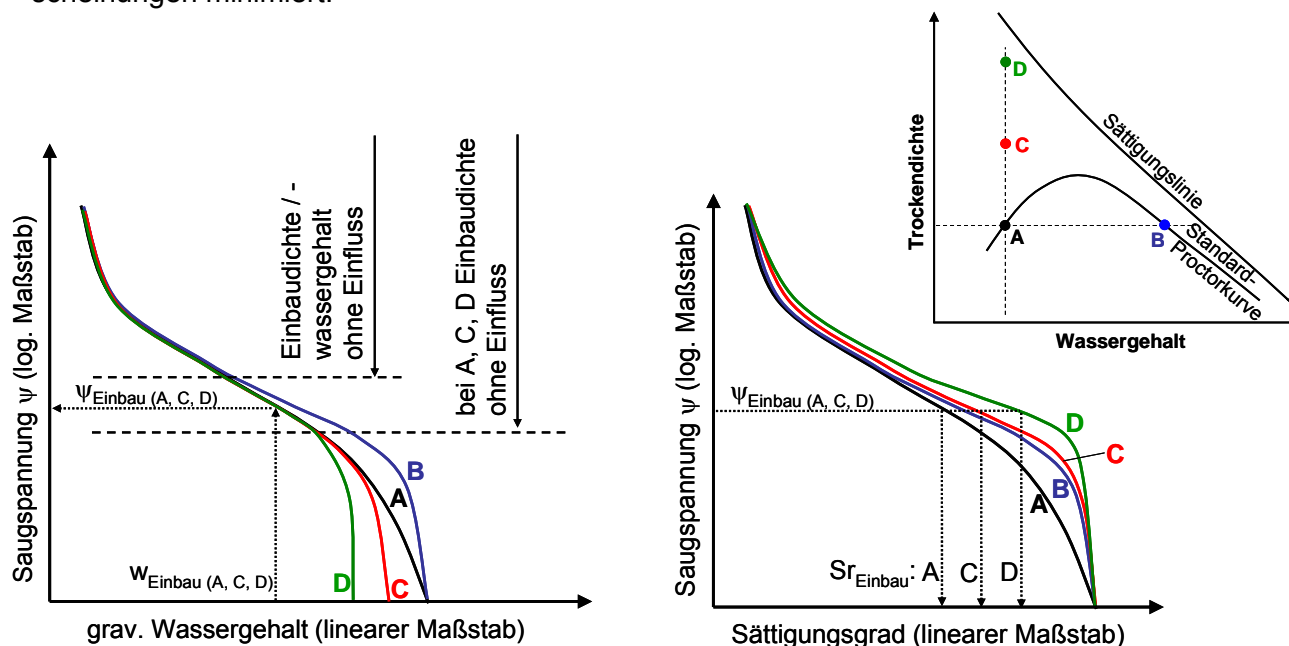


Abb. 6.92: Prinzipdarstellungen zur Beziehung zwischen Saugspannung und grav. Wassergehalt sowie Saugspannung und Sättigungsgrad für unterschiedliche Einbaubedingungen

Im Hinblick auf die hydraulische Leitfähigkeit zeigen die Untersuchungen in den Saugspannungskontrollierten Oedometerzellen für die gering durchlässigen Proben des Lias-Tons deutlich geringere Werte als die Prognosen mit den Ansätzen nach *van Genuchten&Mualem* und *Fredlund et al.* Für die Proben des Lösslehms und des organogenen Tons dagegen konnten die Messwerte der hydraulischen Leitfähigkeit mit dem Ansatz nach *van Genuchten&Mualem* gut wiedergegeben werden. Prinzipiell ist bei der Bewertung dieser Ergebnisse aber zu beachten, dass die Ableitung der hydraulischen Leitfähigkeit mit Hilfe der Mehrstufen-Ausfluss-Methode insbesondere für die sehr gering durchlässigen Proben des Lias-Tons ($k < 1 \cdot 10^{-10}$ m/s) aufgrund der geringen Probenhöhe (1 cm) und der damit verbundenen sehr geringen ausfließenden Wassermenge mit Schwierigkeiten verbunden ist. Im Vergleich dazu ist die Aussagefähigkeit der an den 2 cm hohen Proben des Tons mit organischen Beimengungen durchgeführten Versuche aufgrund der größeren Durchlässigkeit als deutlich höher zu bewerten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen wie auch die Untersuchungen am Lösslehm, dass die hydraulische Leitfähigkeit sowohl für die auf der trockenen als auch auf der nassen Seite des Proctroptimums verdichteten Proben mit dem Ansatz nach *van Genuchten&Mualem* gut wiedergegeben werden kann. Mit dem Ansatz nach *Fredlund et al.* dagegen wird die hydraulische Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand deutlich überschätzt.

Außerdem wurde geprüft, inwieweit mit gebräuchlichen Pedotransferfunktionen die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung verdichteter Böden abgebildet werden kann. Dazu wurden die in der Bodenkunde weit verbreiteten Pedotransferfunktionen nach *Arya&Paris*, *Gupta&Larson*, *Rawls et al.*, *Vereecken et al.*, *Scheinost et al.* sowie das von *Tinjum et al.* für verdichtete Böden entwickelte Modell herangezogen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Einfluss unterschiedlicher Einbauwassergehalte mit den Funktionen nach *Gupta&Larson*, *Arya&Paris*, *Vereecken et al.*

und *Scheinost et al.* a priori nicht abgebildet werden kann, da außer den materialspezifischen Eigenschaften (Korngrößenverteilung und organische Substanz) als zustandsabhängige Größe nur die Dichte Berücksichtigung findet. Einzig der Ansatz nach *Tinjum et al.* wäre dazu prinzipiell ohne Heranziehen von Messwerten in der Lage. Jedoch konnten damit nur die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der Proben des Lösslehms im niedrigen Saugspannungsbereich zutreffend wiedergegeben werden. Für die Proben des Lias-Tons und des Tons mit organischen Beimengungen wurden mit dem Ansatz nach *Tinjum et al.* keine zufriedenstellenden Prognosen erzielt. Mit den Ansätzen nach *Gupta&Larson*, *Vereecken et al.* und *Scheinost et al.* konnte nur für die trocken verdichtete Probe des Lösslehms eine gute Vorhersage erzielt werden. Das Modell nach *Rawls et al.* ermöglichte ebenfalls eine zutreffende Vorhersage für die trocken verdichtete Probe des Lösslehms, sofern zusätzlich Messwerte als Eingangsparameter zugrundegelegt wurden. Mit dem Modell nach *Arya&Paris* konnte bei Ansatz eines α -Wertes von 1,35 im Allgemeinen keine zufriedenstellende Anpassung an die Messwerte erreicht werden. Durch eine Erhöhung des α -Wertes konnten zumindest die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der auf der trockenen Seite des Proctroptimums verdichteten Proben zufriedenstellend angenähert werden.

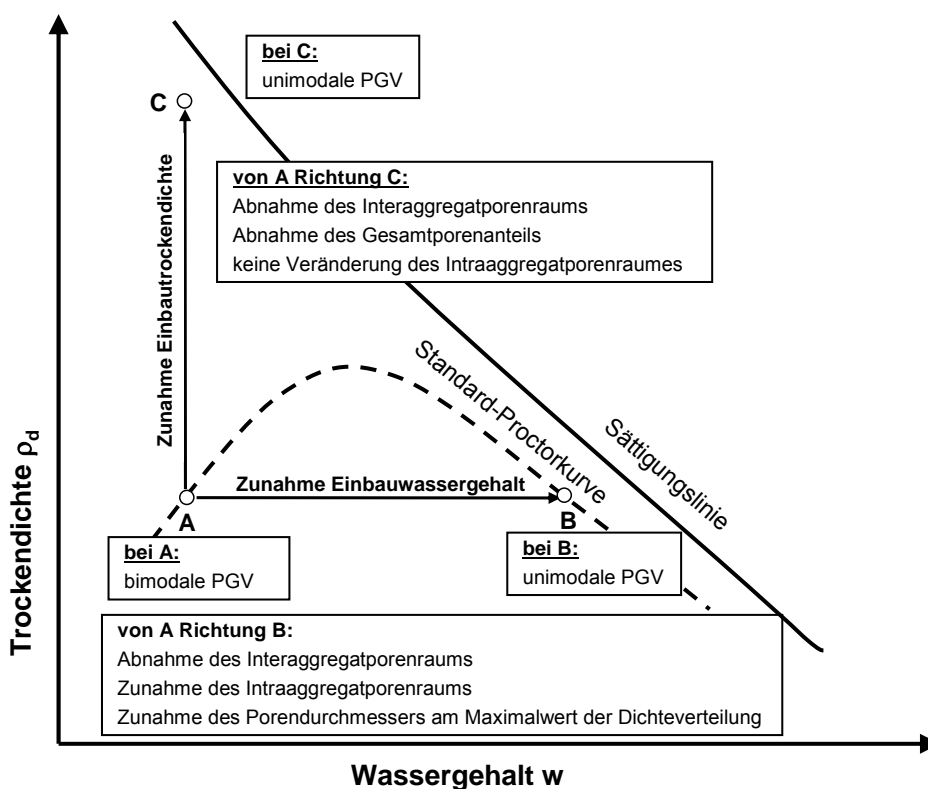


Abb. 6.93: Einfluss der Einbaubedingungen auf die Porenstruktur

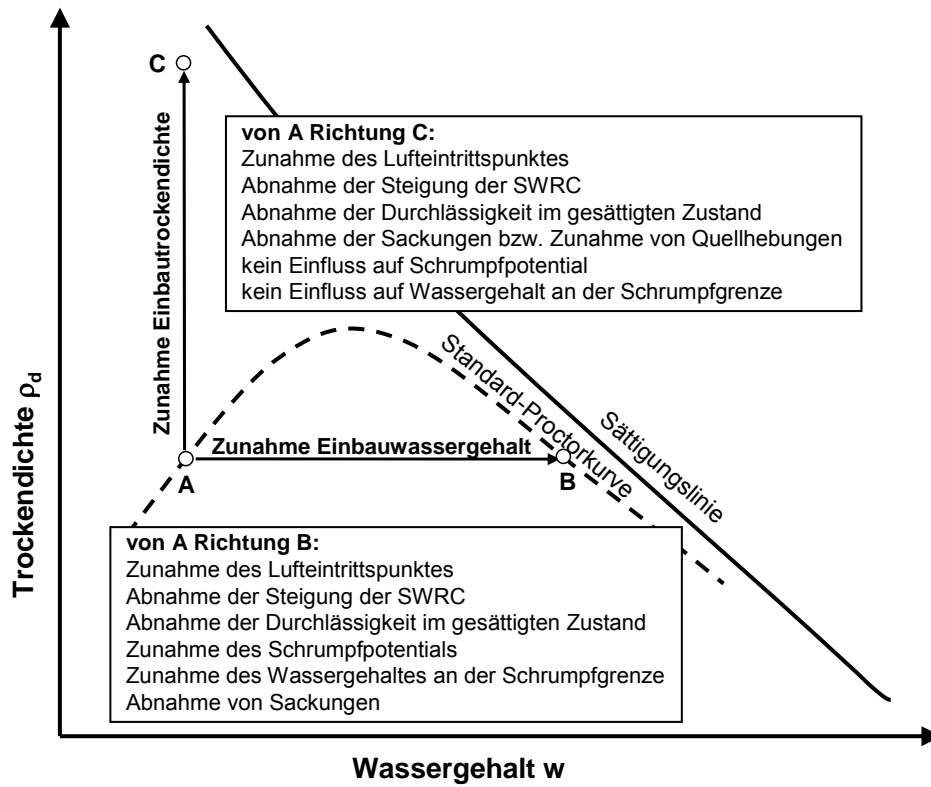


Abb. 6.94: Einfluss der Einbaubedingungen auf verschiedene bodenmechanische Eigenschaften

7 Ableitung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung auf Grundlage der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand

7.1 Zielsetzung

Wie die Untersuchungen gezeigt haben, können die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der untersuchten Böden mit den in Abschnitt 6.7.6 aufgeführten Pedotransferfunktionen nicht zufriedenstellend wiedergegeben werden, sofern keine Messdaten vorliegen. Die Einflüsse unterschiedlicher Einbauwassergehalte auf die Poren- und Aggregatstruktur und damit auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung können dabei abgesehen von der Beziehung nach *Tinjum et al.* a priori nicht berücksichtigt werden. Die Beziehung nach *Tinjum et al.* ermöglicht für die Proben des Lias-Tons und des Tons mit organischen Beimengungen jedoch keine zufriedenstellende Vorhersage der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung und konnte die an den Proben des Lösslehms bestimmten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen auch nur im niedrigen Saugspannungsbereich in geeigneter Weise wiedergeben. Es ist deshalb festzustellen, dass eine zutreffende Vorhersage der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung für verdichtete feinkörnige Böden mit den vorhandenen Pedotransferfunktionen nicht möglich ist.

Vor diesem Hintergrund wurde auf Grundlage der Ergebnisse der in Abschnitt 6 dargestellten experimentellen Untersuchungen analysiert, inwieweit die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung für verdichtete feinkörnige Böden durch Berücksichtigung weiterer bodenmechanischer Kenngrößen abgeschätzt werden kann. Bei den in Abschnitt 6.7.6 untersuchten Pedotransferfunktionen wird als Zustands-beschreibender Kennwert nur die Dichte des Bodens berücksichtigt. Um die Besonderheiten verdichteter Böden erfassen zu können, ist es erforderlich, die Veränderungen der Poren- und Aggregatstruktur bei unterschiedlichen Einbauwassergehalten zu erfassen. Wie die eigenen Untersuchungen sowie zahlreiche Publikationen (z.B. MITCHELL ET AL., 1965; HEYER, 2001) belegen, gibt es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und dem Einbauwassergehalt verdichteter feinkörniger Böden. Da die experimentelle Bestimmung der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand im Vergleich zur Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung mit deutlich geringerem Aufwand verbunden ist und für die meisten Fragestellungen ohnehin erforderlich ist, eignet sie sich prinzipiell als Eingangsgröße zur Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung.

Im Folgenden werden zunächst theoretische Betrachtungen am Kapillarrohr zum Zusammenhang zwischen der kapillaren Steighöhe und der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand dargestellt, bevor anschließend die entsprechenden Ergebnisse der in Abschnitt 6 dargestellten Untersuchungen miteinander korreliert werden und ein Ansatz zur Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung auf Grundlage der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand beschrieben wird.

7.2 Zusammenhang zwischen der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und dem Luft-eintrittspunkt

7.2.1 Theoretische Betrachtungen am Kapillarrohr

Die laminare Wasserbewegung in einem Kapillarrohr lässt sich mit der Gleichung nach Hagen-Poiseuille beschreiben:

$$v_p = -\frac{d^2 \cdot g}{32 \cdot \nu} \cdot i \quad (7.1)$$

Hierin bedeuten:

v_p	mittlere Fließgeschwindigkeit	[m/s]
d	Durchmesser des Kapillarrohrs	[m]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
ν	kinematische Viskosität von Wasser	[m ² /s]
i	hydraulischer Gradient	[-]

Betrachtet man ein poröses Medium, das entsprechend der [Abb. 4.4](#) aus Kapillarrohren mit konstanten Durchmessern besteht, erhält man durch Multiplikation der mittleren Fließgeschwindigkeit v_p mit dem Porenanteil n die Filtergeschwindigkeit v :

$$v = n \cdot v_p = -\frac{n \cdot d^2 \cdot g}{32 \cdot \nu} \cdot i \quad (7.2)$$

Unter Berücksichtigung des Gesetzes nach DARCY (1856) lässt sich damit für die Wasserdurchlässigkeit k schreiben:

$$k = \frac{n \cdot d^2 \cdot g}{32 \cdot \nu} \quad (7.3)$$

Es ist zu erkennen, dass die Wasserdurchlässigkeit des Kapillarrohres wesentlich von dessen Durchmesser d abhängt. Ebenfalls vom Durchmesser abhängig ist der kapillare Wasseraufstieg in einem zylindrischen Rohr. Dieser lässt sich mit Hilfe der bereits in Abschnitt 3.4.2 dargestellten Gleichung (3.1) beschreiben. Löst man die Gleichung (3.1) nach dem Durchmesser auf und setzt diesen Ausdruck in die Gleichung (7.3) ein, erhält man nach einigen Umformungen folgenden Zusammenhang zwischen der kapillaren Steighöhe und der Wasserdurchlässigkeit im gesättigten Zustand:

$$h_k = k^{-0,5} \cdot \sqrt{\frac{n \cdot \sigma^2 \cdot \cos^2 \theta}{2 \cdot \eta \cdot \rho_w \cdot g}} \quad (7.4)$$

Für Wasser mit einer Temperatur von 20°C, einer Oberflächenspannung $\sigma = 0,0727$ N/m, einer dynamischen Viskosität $\eta = 0,001$ Ns/m² und einer Dichte $\rho_w = 998,2$ kg/m³ vereinfacht sich Gleichung (7.4) bei Ansatz eines Randwinkels $\theta = 0^\circ$ zu:

$$h_k = 0,01643 \left[\frac{\text{m}^{1,5}}{\text{s}^{0,5}} \right] \cdot k^{-0,5} \cdot \sqrt{n} \quad (7.5)$$

Betrachtet man anstelle der kapillaren Steighöhe den entsprechenden Kapillardruck, ergibt sich aus den Gleichungen (7.4) und (7.5):

$$\psi_k = h_k \cdot \rho_w \cdot g = k^{-0,5} \cdot \sqrt{\frac{n \cdot \sigma^2 \cdot \cos^2 \theta \cdot \rho_w \cdot g}{2 \cdot \eta}} \quad (7.6)$$

bzw.

$$\psi_k = 0,00168 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^{1,5} \cdot \text{s}^{0,5}} \right] \cdot k^{-0,5} \cdot \sqrt{n} \quad (7.7)$$

Mit Hilfe der Gleichung (7.7) lässt sich der Kapillardruck für ein poröses Medium, welches entsprechend der Abb. 4.4 nur aus gleichförmigen zylindrischen Poren mit einem konstanten Durchmesser besteht, aus der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand ermitteln. Dieser ist gleichbedeutend mit dem Lufteintrittspunkt, da es bei diesem Porenmodell beim Überschreiten des Kapillardruckes zu einer vollständigen Entwässerung aller Poren kommt. In der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung äußert sich dies in einem horizontalen Verlauf nach Überschreiten des Kapillardruckes (siehe Abb. 7.1).

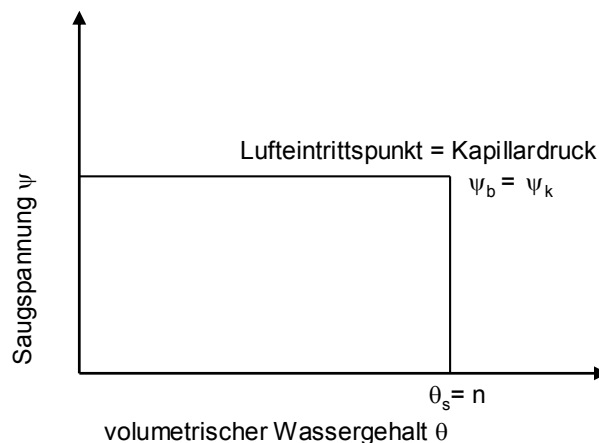


Abb. 7.1: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung für ein Kapillarmodell bestehend aus parallelen Kapillaren mit gleichen und in Strömungsrichtung gleich bleibenden Durchmessern

7.2.2 Empirischer Zusammenhang auf Basis der Versuchsergebnisse

Zur Ermittlung eines möglichen Zusammenhanges zwischen der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und dem Lufteintrittspunkt wurden die Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche und der Saugspannungsuntersuchungen an den drei untersuchten Böden herangezogen. Dabei wurden die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte mit den Lufteintrittspunkten korreliert. Für die Proben P4 und P5 des Lias-Tons wurde der Durchlässigkeitsbeiwert unter Berücksichtigung der Dichte der Proben

aus der in Abb. 6.31 dargestellten logarithmischen Beziehung abgeleitet. Die Durchlässigkeitsbeiwerte der Proben P7 und P8 wurden entsprechend den Ergebnissen der Durchlässigkeitsversuche Pv_7 und Pkb_8 angenommen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Dichten der Proben P7 und P8 etwas unterhalb der Dichten der in den Durchlässigkeitsversuchen untersuchten Proben Pv_7 und Pkb_8 liegen, und demnach etwas höhere Durchlässigkeitsbeiwerte für die Proben P7 und P8 zu erwarten wären.

Die Durchlässigkeit im gesättigten Zustand der in den Oedometerzellen untersuchten Proben L-P1 und L-P8 des Lösslehms wurden entsprechend der an den Proben P_1 und Pb_8 in Durchlässigkeitsuntersuchungen gewonnenen Werten angesetzt.

Für die in den Oedometerzellen untersuchten Proben des Tons mit organischen Beimengungen wurden entsprechend den Ergebnissen der Durchlässigkeitsversuche k-Werte von $5 \cdot 10^{-8}$ m/s (9135-t) bzw. $5 \cdot 10^{-9}$ m/s (9135-n) angenommen.

In der Abb. 7.2 sind für die untersuchten Proben die Durchlässigkeitsbeiwerte im gesättigten Zustand den Lufteintrittspunkten im doppellogarithmischen Maßstab gegenüber gestellt. Ergänzend ist darin der für das einfache Kapillarmodell mit konstanten Porendurchmessern ermittelte Zusammenhang dargestellt, wobei für den Porenanteil $n = 0,4$ angenommen wurde. Da es sich bei der Gleichung (7.7) um eine Potenzfunktion handelt, stellt sich die Beziehung zwischen dem Durchlässigkeitsbeiwert und dem Lufteintrittspunkt für das Kapillarmodell in der doppellogarithmischen Abbildung als Gerade dar. Wie die in Abb. 7.2 eingefügte Trendlinie zeigt, lassen sich auch die Versuchsergebnisse sehr gut durch eine Gerade annähern, was bedeutet, dass der Zusammenhang zwischen dem Lufteintrittspunkt und dem Durchlässigkeitsbeiwert für die verdichteten Proben ebenfalls durch eine Potenzfunktion wiedergegeben werden kann.

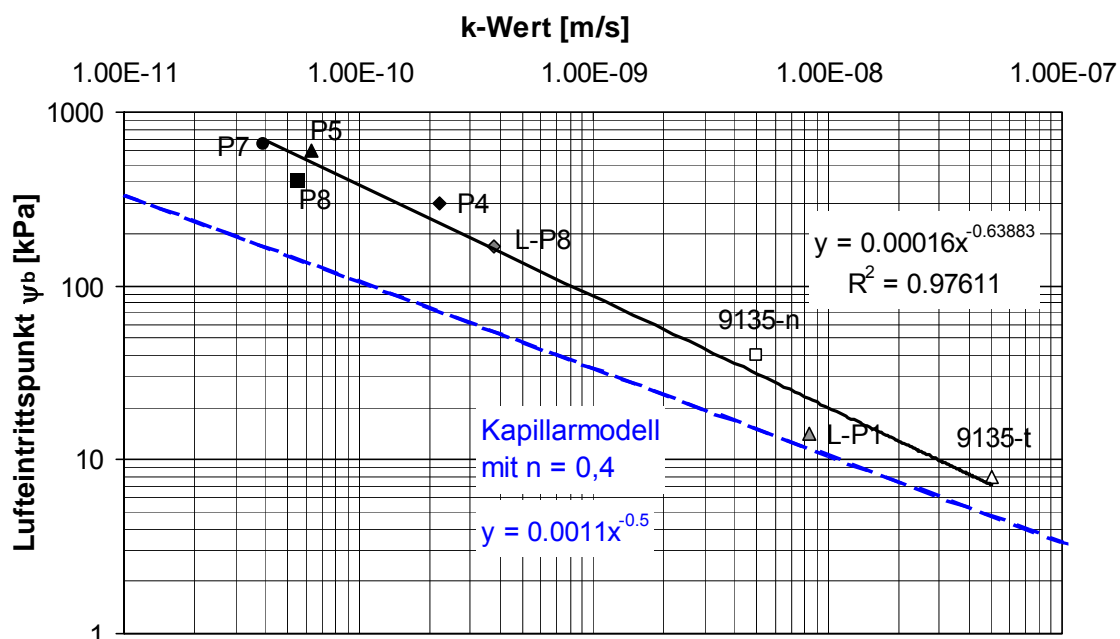


Abb. 7.2: Korrelation zwischen der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und dem Lufteintrittspunkt für die untersuchten Böden und beim Kapillarmodell

In der Abb. 7.2 bleibt allerdings unberücksichtigt, dass die einzelnen Proben unterschiedliche Porenanteile aufweisen. Für das Kapillarmodell empfiehlt es sich deshalb, die Gleichung (7.7) umzustellen und den Dichte-bezogenen Kapillardruck $\psi_{k,n}$ einzuführen:

$$\psi_{k,n} = \frac{\psi_k}{\sqrt{n}} = 0,00168 \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^{1,5} \cdot \text{s}^{0,5}} \right] \cdot k^{-0,5} \quad (7.8)$$

Bezieht man in entsprechender Weise die aus den Saugspannungsuntersuchungen ermittelten Lufteintrittspunkte auf den Porenanteil, können die Durchlässigkeitsbeiwerte gegenüber den Dichte-bezogenen Lufteintrittspunkten aufgetragen werden. Für die untersuchten Proben ergibt sich damit der in der Abb. 7.3 dargestellte Zusammenhang. Wie die eingefügte Trendlinie zeigt, können die Versuchswerte sehr gut durch folgende Potenzfunktion angenähert werden:

$$\psi_{b,n} = \frac{\psi_b}{\sqrt{n}} = 0,000125 \cdot k^{-0,6687} \quad k \text{ in [m/s], } \psi_{b,n} \text{ in [kPa]} \quad (7.9)$$

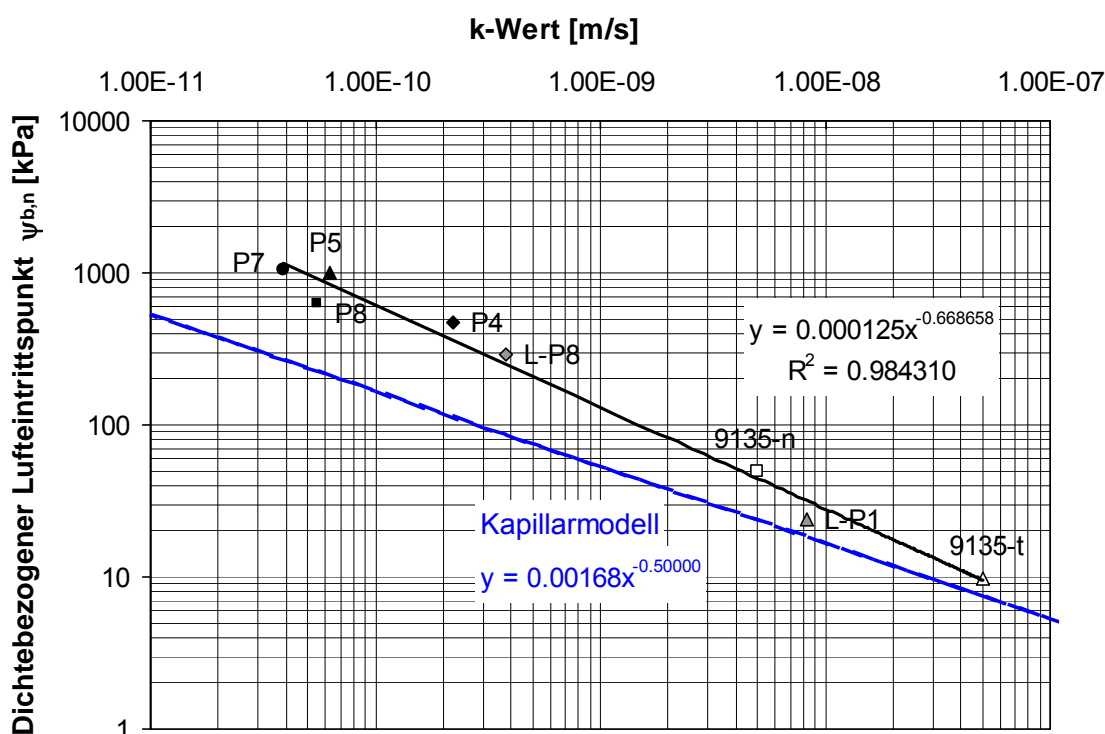


Abb. 7.3: Korrelation zwischen der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und dem Dichte-bezogenen Lufteintrittspunkt für die untersuchten Böden und beim Kapillarmodell

Die Gleichung (7.9) ermöglicht es, den Lufteintrittspunkt eines verdichteten feinkörnigen Bodens aus dem Durchlässigkeitsbeiwert im gesättigten Zustand unter Berücksichtigung des Porenanteils der Probe abzuschätzen. Im Vergleich zum einfachen Kapillarmodell stellen sich nach dieser Beziehung größere Lufteintrittspunkte ein. Dies ist plausibel, wenn berücksichtigt wird, dass die Poren eines Bodens in Wirklichkeit keine konstanten Durchmesser aufweisen, sondern diese entlang der

Pore variieren. Der Lufteintrittspunkt einer idealisierten Pore mit veränderlichem Durchmesser wird jedoch von den Porenengstellen bestimmt (siehe auch Abschnitt 4.1.3.1). Sofern die Porenengstelle denselben Durchmesser aufweist wie die Pore mit konstantem Durchmesser, ergibt sich im Falle einer Entwässerung derselbe Lufteintrittspunkt (siehe Abb. 7.4). Allerdings ist für die Probe mit veränderlichen Porendurchmessern ein größerer Durchlässigkeitsbeiwert zu erwarten, da der Fließwiderstand in den Porenbereichen mit größeren Durchmessern geringer ist.

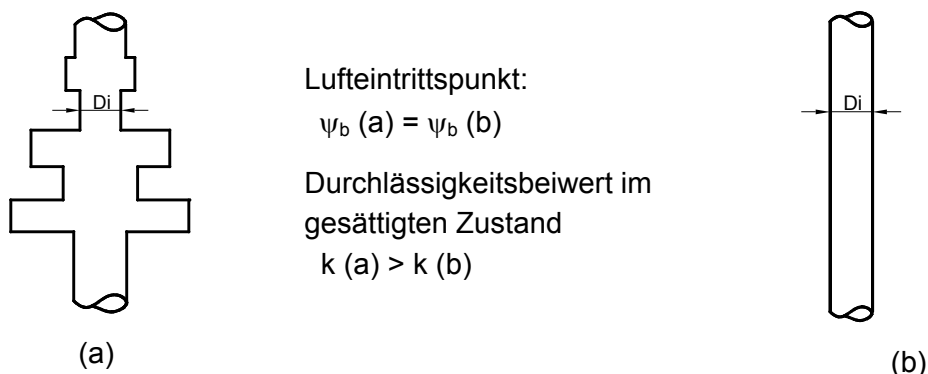


Abb. 7.4: Kapillarmodelle: (a) Kapillarrohr mit veränderlichem Durchmesser, (b) Kapillarrohr mit konstantem Durchmesser

7.3 Parameterregression zur Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung

7.3.1 Ohne Berücksichtigung von Messdaten

Wie im Abschnitt 7.2.2 dargestellt, lässt sich der Lufteintrittspunkt für die untersuchten Proben aus der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand ableiten. Da der van Genuchten-Parameter α ebenso wie der Lufteintrittspunkt ein Maß darstellt, bei welcher Saugspannung der Boden zu entwässern beginnt, zeigt sich für die untersuchten Proben auch eine gute Korrelation zwischen der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und dem van Genuchten-Parameter α (siehe Abb. 7.5). Demnach lässt sich der van Genuchten-Parameter α unabhängig von der Dichte des Bodens aus der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand folgendermaßen ableiten:

$$\alpha = 157,35 \cdot k^{0,6219} \quad k \text{ in [m/s], } \alpha \text{ in [1/cm]} \quad (7.10)$$

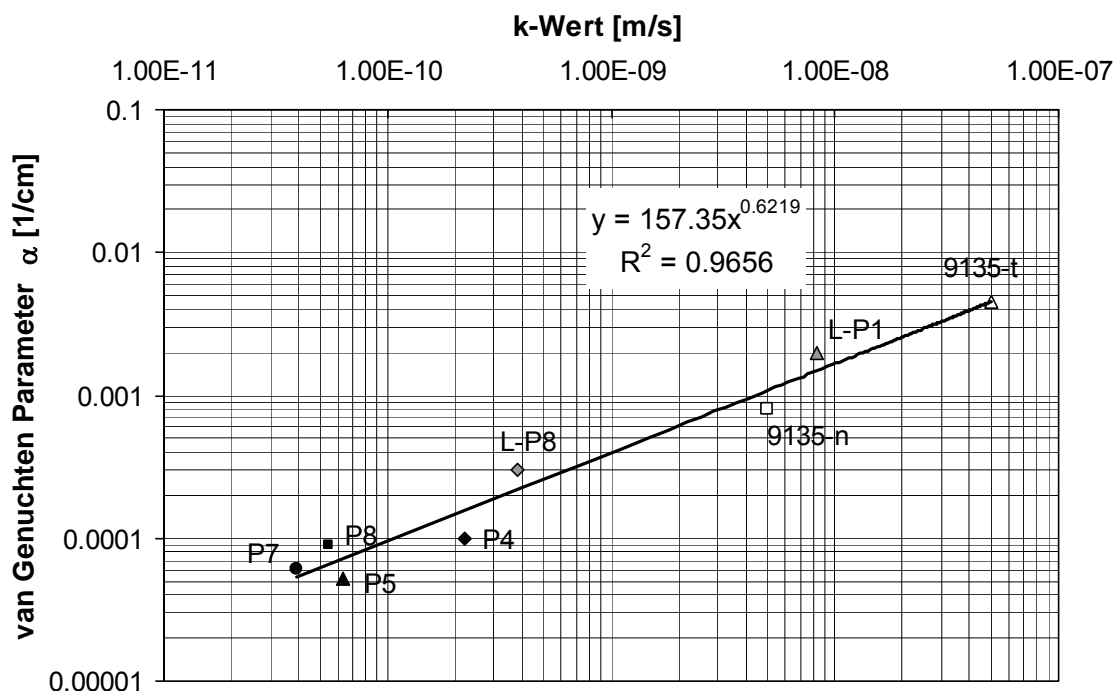


Abb. 7.5: Korrelation zwischen der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und dem van Genuchten-Parameter α

Daneben wurde die Durchlässigkeit im gesättigten Zustand gegenüber dem van Genuchten-Parameter n dargestellt (Abb. 7.6). Betrachtet man die einzelnen Proben des Lias-Tons, des Lösslehms und des Tons mit organischen Beimengungen unabhängig voneinander, ist zu erkennen, dass der Parameter n prinzipiell mit abnehmender Durchlässigkeit im gesättigten Zustand zunimmt. Jedoch zeigen sich im Hinblick auf die Größe des Parameters n zwischen den drei untersuchten Bodenarten deutliche Unterschiede. Dies wird auf die unterschiedlichen bodenspezifischen Eigenschaften zurückgeführt (Tonanteil, Tonmineralogie, organischer Anteil), der die Größe und Struktur der Bodenaggregate und der darin befindlichen Intraaggregatporen maßgeblich beeinflusst. Aus diesem Grund wird zur Abschätzung des van Genuchten-Parameters n zusätzlich die Plastizität des Bodens als bodenspezifische Kenngröße herangezogen. Wie die Abb. 7.7 zeigt, lässt sich der van Genuchten-Parameter n aus der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand unter Berücksichtigung der Plastizitätszahl für die untersuchten Proben durch folgende Gleichung sehr gut abschätzen:

$$n = I_p^{0,13} \cdot (-0,0506 \cdot \ln(k) + 0,5196) \quad k \text{ in [m/s]} \quad (7.11)$$

Da für das Modell nach van Genuchten n größer als 1,0 sein muss, ist die Gleichung (7.11) bei niedrigen Plastizitätszahlen nur für geringe Durchlässigkeitsbeiwerte ($k < 1 \cdot 10^{-7}$ m/s) anwendbar.

Prinzipiell ist zu beachten, dass die Gleichung (7.11) einen rein empirisch ermittelten Zusammenhang darstellt und nur auf einer vergleichsweise geringen Datenbasis von acht Proben basiert. Vor der Anwendung in der Ingenieurpraxis sollte die Gleichung (7.11) deshalb anhand von weiteren experimentellen Untersuchungen überprüft werden.

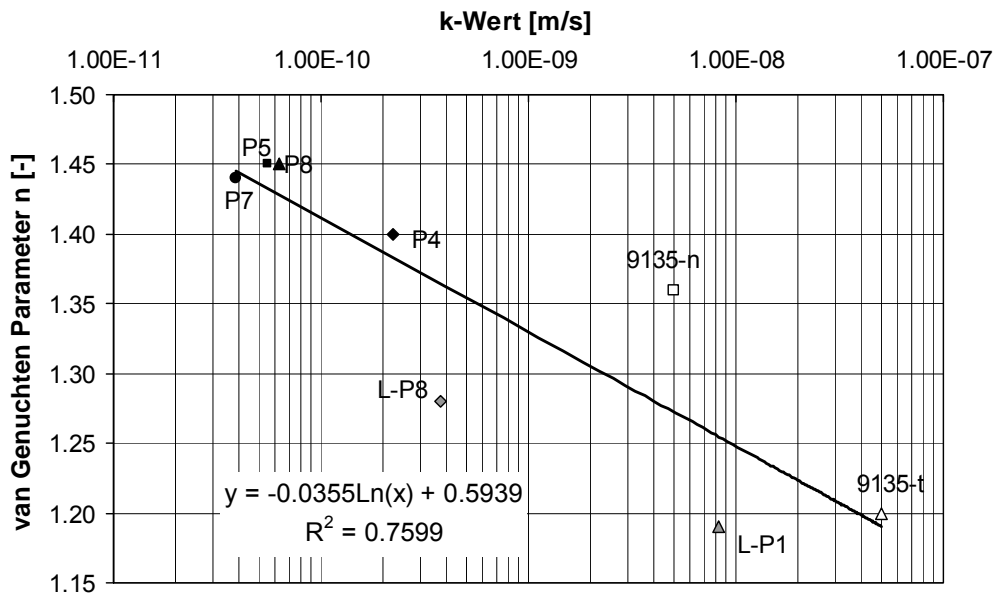


Abb. 7.6: Korrelation zwischen der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und dem van Genuchten-Parameter n

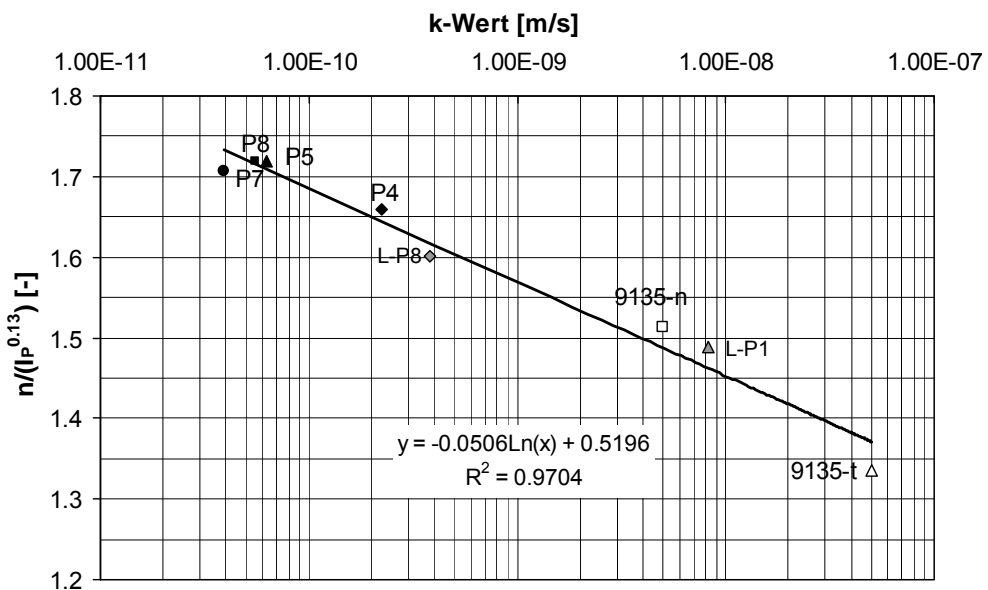


Abb. 7.7: Korrelation zwischen der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und dem van Genuchten-Parameter n unter Berücksichtigung der Plastizitätszahl

Die Funktion nach *van Genuchten* (4.7) zur Beschreibung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung lässt sich unter Berücksichtigung der Gleichung (4.9), $m = 1-1/n$, folgendermaßen darstellen:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \right]^{1 - \frac{1}{n}} \quad (7.12)$$

Unter der Annahme, dass der Restwassergehalt den Wert Null annimmt, $\theta_r = 0$, und berücksichtigend, dass der volumetrische Wassergehalt bei Sättigung θ_s dem Porenanteil n entspricht, genügt zur Beschreibung des Modells nach *van Genuchten* entsprechend der Gleichung (4.12) die Ermittlung der Parameter α und n . Die Gleichungen (7.10) und (7.11) zur Bestimmung der Parameter α und n sind damit prinzipiell ausreichend, um die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung zu beschreiben.

7.3.2 Mit Einpunkt-Messung

Wie in Abschnitt 7.3.1 dargestellt, ist die Regressionsgleichung (7.11) zur Abschätzung des van Genuchten-Parameters n mit Unsicherheiten behaftet. Die Regressionsgleichung zur Abschätzung des van Genuchten-Parameters α dagegen wird als vergleichsweise robust angesehen, da der zugrunde liegende Zusammenhang zwischen der Durchlässigkeit und dem Lufteintrittspunkt auch physikalisch belegt werden kann, wie die Betrachtung am einfachen Kapillarmodell zeigt. Zur Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit ist es deshalb sinnvoll, Messwerte zur Bestimmung des Parameters n heranzuziehen. Für das zwei-parametrische Modell nach *van Genuchten* genügt dabei prinzipiell ein Messwert. Der gemessene Saugspannungswert sollte dabei ausreichend weit oberhalb des Lufteintrittspunktes liegen. Wie die durchgeführten Untersuchungen gezeigt haben, ist der Zusammenhang zwischen der Saugspannung und dem Wassergehalt im Bereich geringer Wassergehalte unabhängig von der Dichte des Bodens. Als oberer Grenzwert dieses Wassergehaltsbereiches kann die Schrumpfgrenze des Bodens angenommen werden. Für die betrachteten feinkörnigen Böden ist bei diesem Wassergehaltsbereich eine Saugspannung oberhalb von 1500 kPa zu erwarten, so dass ein Feuchtigkeitsmessgerät nach der Taupunktmethode (WP 4) zur Bestimmung der totalen Saugspannung zum Einsatz kommen kann. Damit ist die Messung der totalen Saugspannung in vergleichsweise kurzer Zeit möglich (Messdauer 30 min). Die Messung muss dabei nicht zwingend an einer verdichteten Probe durchgeführt werden. Vielmehr kann der Sättigungsgrad aus dem gemessenen gravimetrischen Wassergehalt für eine vorgegebene Trockendichte ermittelt werden.

Für die Abschätzung der van Genuchten-Parameter werden damit folgende Eingangsparameter benötigt:

- Durchlässigkeitsbeiwert im gesättigten Zustand als Messwert an der verdichteten Probe
- Porenanteil der verdichteten Probe
- Messwert der totalen Saugspannung am verdichteten oder unverdichteten Boden für einen Wassergehalt $w \leq w_s$

Die Abschätzung des van Genuchten-Parameters α erfolgt aus dem Durchlässigkeitsbeiwert mit Hilfe der Gleichung (7.10). Der volumetrische Wassergehalt bei Sättigung wird wiederum über den Porenanteil ermittelt. Der Restwassergehalt wird zu Null angenommen. Anschließend lässt sich der van Genuchten-Parameter n durch Einsetzen des Messwertes in die Gleichung nach van Genuchten (Gleichung (4.8)) mit Hilfe numerischer Methoden ermitteln. Für die vorliegende Arbeit wurde dazu das Rechenprogramm Maple (Version 10) herangezogen (siehe Anhang 2).

Schematisch ist die Vorgehensweise zur Beschreibung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung unter Verwendung des Ansatzes nach *van Genuchten* im Flussdiagramm in Abb. 7.8 zusammengefasst.

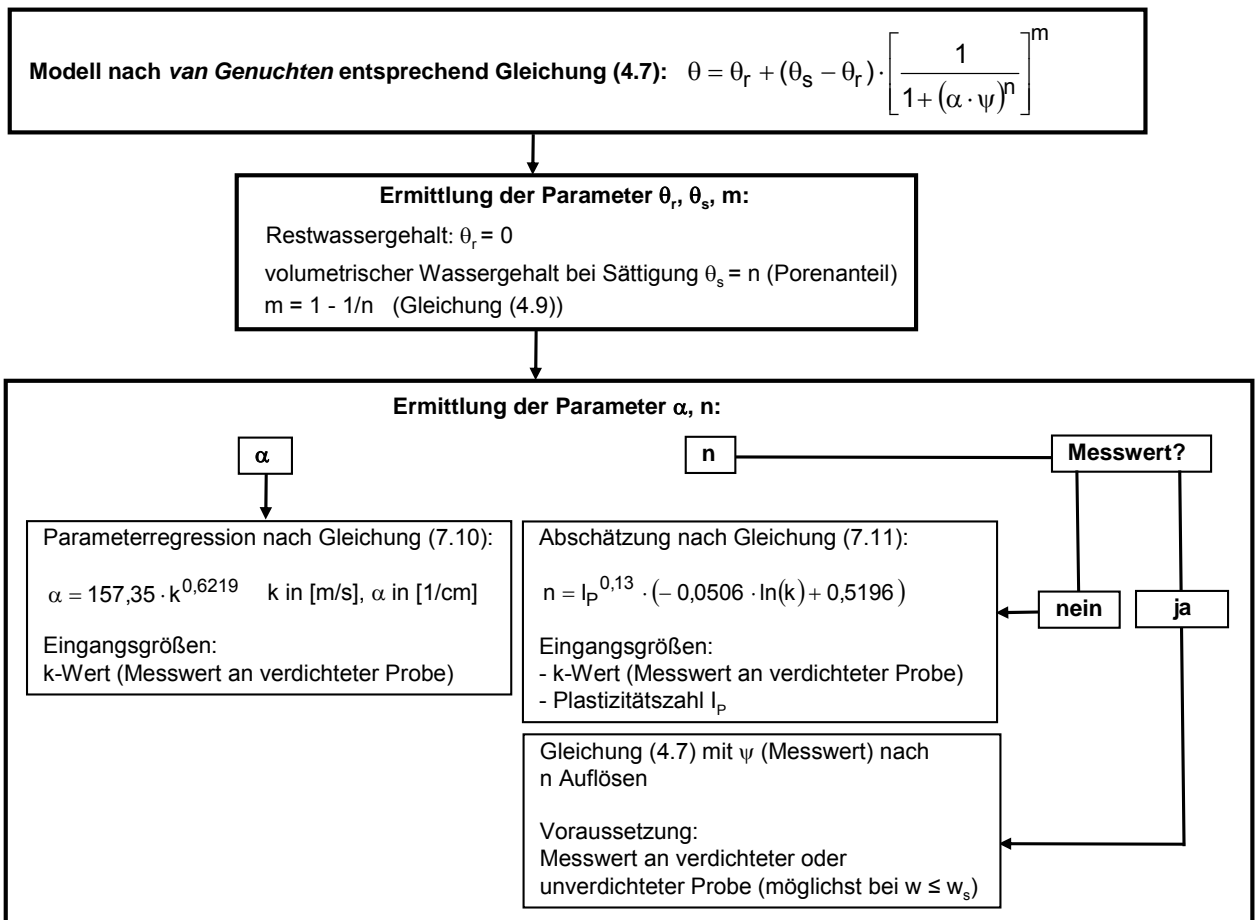


Abb. 7.8: Flussdiagramm zur Ermittlung der van Genuchten-Parameter

Die Abb. 6.91 stellt beispielhaft die mit Hilfe der beiden vorgestellten Regressionsmethoden für die Proben P5 und 9135-n ermittelten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen dar. Erwartungsgemäß ergibt sich für beide Proben mit beiden Methoden eine gute Annäherung an die gemessenen Werte.

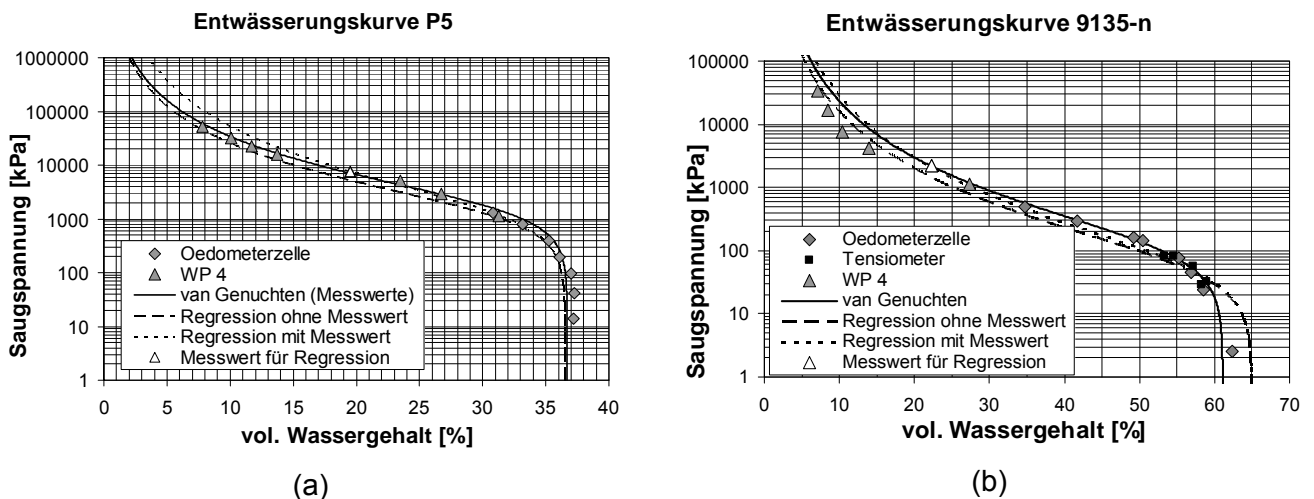


Abb. 7.9: Vergleich der auf Basis der Messwerte und mit Hilfe der Regressionsgleichungen ermittelten Beziehungen nach van Genuchten für die Proben P5 (a) und 9135-n (b)

8 Versuchsschüttung am Münchner Flughafen

8.1 Ziele der Untersuchungen

Im Zuge der Planungen einer 3. Start- und Landebahn am Münchner Flughafen wurden umfangreiche Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwendung von organischen Böden in Geländeaufschüttungen durchgeführt. Die im Zuge des Baus der 3. Start- und Landebahn anfallenden organischen Böden sollen u. a. für Lärm- und Sichtschutzhügel verwendet werden. Dabei ist zu beachten, dass die betreffenden organischen Böden natürlich bedingt einen erhöhten Anteil an Arsen aufweisen und dadurch bei der erdbautechnischen Verwendung der Böden technische Sicherungsmaßnahmen erforderlich werden, um eine Durchsickerung dieser Böden und einen damit verbundenen Schadstoffaustrag zu vermeiden. Das Merkblatt über Bauweisen für Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau (FGSV, 2009) stellt insgesamt sechs unterschiedliche Bauweisen für Straßendämme, die entsprechend auch auf andere Erdbauwerke (z.B. Lärm- und Sichtschutzwälle) übertragbar sind, vor. Diese können prinzipiell in Bauweisen mit Abdichtungen, Bauweisen mit gering durchlässigem Körper aus Böden oder Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen und Kernbauweisen ohne Abdichtungen unterschieden werden. Da die im Bereich der 3. Start- und Landebahn vorliegenden Tone mit organischen Beimengungen im verdichteten Zustand bereits einen sehr geringen Durchlässigkeitsbeiwert aufweisen, sollen die aus diesen Böden zu errichtenden Lärm- bzw. Sichtschutzwälle gemäß der Bauweise E des Merkblatts als Kernbauweise unter Verzicht auf eine zusätzliche Dichtungsschicht errichtet werden. Danach wird der gering durchlässige Boden mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen nur mit einer Dränmatte und einer Oberbodenschicht überdeckt. Ein zusätzliches Abdichtungselement oberhalb der verdichteten organischen Böden ist nicht vorgesehen.

Das hydraulische Verhalten der vorliegenden Tone mit organischen Beimengungen hängt sehr stark von den Einbaubedingungen ab. Die Einbaubedingungen sind dabei so zu wählen, dass langfristig eine möglichst geringe Durchsickerung der Böden im eingebauten Zustand erzielt wird. Allerdings ist zu beachten, dass der Wassergehalt der Böden im natürlichen Zustand sehr starken Schwankungen unterworfen ist. So können die Böden einerseits bedingt durch die organische Substanz infolge von Niederschlagsereignissen sehr hohe Wassergehalte aufweisen, andererseits kommt es in trockenen Phasen zu einer starken Abnahme des Wassergehaltes. Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens wurden deshalb umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss der Einbaubedingungen auf die hydraulischen Eigenschaften der Tone mit organischen Beimengungen im verdichteten Zustand durchgeführt. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand dabei eine großmaßstäbliche Versuchsschüttung, die zur Erfassung des Wasserhaushaltes sowie der Wasserbewegung im Boden messtechnisch umfangreich ausgestattet wurde. Der Aufbau der Versuchsschüttung und die durchgeführten Messungen sind ausführlich im Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben „Grundbautechnische Untersuchungen und umweltgerechte Verwendung von organischen Böden in Geländeaufschüttungen“ (Zentrum Geotechnik, 2010) enthalten und werden

nachfolgend zusammenfassend dargestellt. Erste Ergebnisse wurden bereits von BIRLE ET AL. (2010) veröffentlicht.

8.2 Böden

Bei dem für die Versuchsschüttung verwendeten Boden handelt es sich um den bereits in Abschnitt 6 dargestellten Ton mit organischen Beimengungen. Da dieser im Kern der Versuchsschüttung eingebaut wurde, wird dieser im Folgenden auch als Kernmaterial bezeichnet.

Der für die Andeckung der Versuchsschüttung verwendete Boden, der im Folgenden als Oberboden bezeichnet wird, weist ähnliche Eigenschaften wie das Kernmaterial auf. Mit einer Fließgrenze $w_L = 93,3 \%$ und einer Ausrollgrenze $w_P = 56,3 \%$ handelt es sich nach DIN 18196 um einen Ton mit organischen Beimengungen bzw. organogenen Ton (OT). Der Glühverlust beträgt im Mittel $V_{GL} = 25,3 \%$.

8.3 Aufbau der Versuchsschüttung

Die Versuchsschüttung ist im Grundriss und Schnitt in [Abb. 8.1](#) und [Abb. 8.2](#) dargestellt. Die Versuchsschüttung hat eine Grundfläche von ca. 25 m x 30 m und eine Höhe von ca. 5 m und ist in zwei Bereiche aufgeteilt (West und Ost). In der westlichen Hälfte sollte der Boden mit einem Wassergehalt von ca. 55 % und in der östlichen Hälfte mit ca. 75 % eingebaut werden. Der natürliche Wassergehalt des Bodens im Abtragsbereich lag, je nach vorangegangenen Witterungsverhältnissen, zwischen 57,5 % und 98,7 %, i. M. um 80,7 %. Bei der Festlegung der beiden Einbauwassergehalte wurde auf Grundlage der durchgeführten Laborversuche der höchste und niedrigste Wassergehalt gewählt, bei dem die Versuchsschüttung aus erdbautechnischer und bodenmechanischer Sicht anforderungsgerecht errichtet werden kann. Der Wassergehalt von 75 % stellt dabei den für den verwendeten Boden höchsten Einbauwassergehalt dar, bei dem noch eine maximale Einbaudichte von ca. $0,8 \text{ g/cm}^3$ erzielbar war. Bei höheren Wassergehalten treten im Zuge der Verdichtung Porenwasserüberdrücke auf und es kommt zu einer Abnahme der erzielbaren Trockendichten. Bei niedrigeren Wassergehalten nimmt die Durchlässigkeit im gesättigten Zustand zu. Bei einem Wassergehalt von 55 % sollte der Boden entsprechend den Ergebnissen der Proctorversuche auf eine Trockendichte von ca. $0,8 \text{ g/cm}^3$ verdichtet werden können und die Durchlässigkeit im gesättigten Zustand sollte dabei noch im Bereich von ca. $5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ liegen. Dieser Wert war im Vorfeld der Untersuchungen als oberste Grenze erachtet worden und sollte im Hinblick auf die zu erwartenden Sickerwassermengen nicht überschritten werden.

Um das Kernmaterial für die trockene Einbaubedingung auf den vorgegebenen Wassergehalt von $w \cong 55 \%$ zu trocknen, wurde es auf einer befestigten Fläche bei trockener Witterung mit einem Radlader mit Hilfe einer Separatorschaufel lagenweise verteilt (siehe [Abb. A3.1](#) im Anhang 3). Der Wassergehalt des ausgebreiteten Materials wurde visuell überprüft. Sobald das ausgebreitete Bodenmaterial den gewünschten Wassergehalt aufwies, wurde es zusammen geschoben und wieder auf Miete gelagert und mit Folien gegen Witterungseinflüsse abgedeckt. Durch die Bearbeitung des Materials im Zuge der Ausbreitung mit der Separatorschaufel fand gleichzeitig eine Zerkleinerung und Homogenisierung statt. Das Bodenmaterial für die nasse Einbaubedingung ($w \cong 75 \%$) wurde

über die Separatorschaufel des Radladers zerkleinert und homogenisiert (siehe Abb. A3.2 im Anhang 3).

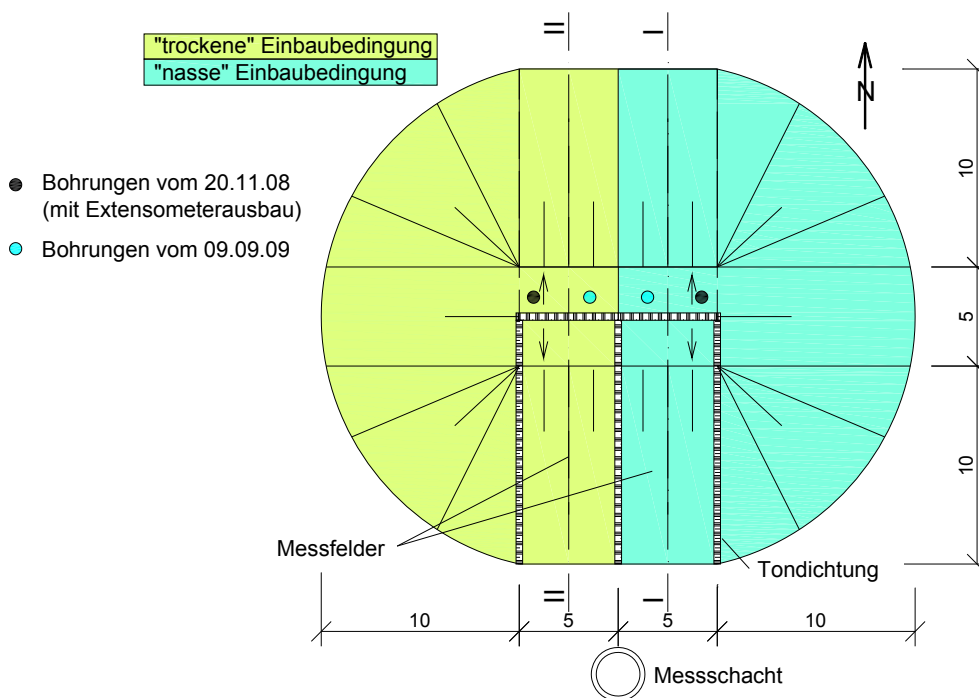


Abb. 8.1: Grundriss der Versuchsschüttung (Prinzipdarstellung), Abmessungen in m

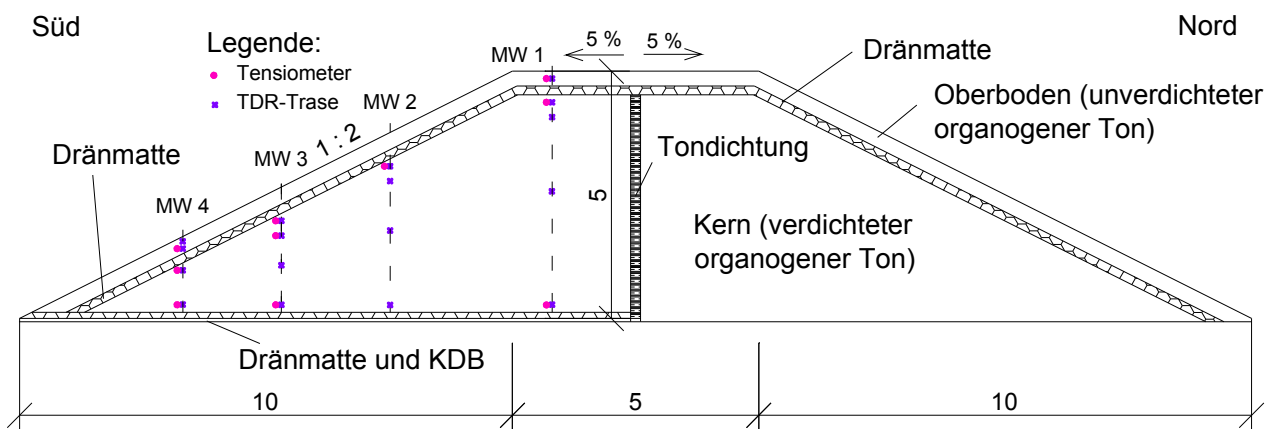


Abb. 8.2: Schnitt II-II durch die Versuchsschüttung (Prinzipdarstellung) mit Darstellung der entlang den Messlinien MW1 bis MW4 vorgesehenen Sensoren, Abmessungen in m

Die Versuchsschüttung erhielt eine Nord-Süd-Ausrichtung. In der Südhälfte wurden zwei je 5 m breite und 12 m lange Messfelder angelegt (siehe Abb. 8.1). Um einen Sickerwasseraustritt aus dem verdichteten organogenen Ton erfassen zu können, wurden die beiden Messfelder in der Aufstandsfläche mit einer Kunststoffdichtungsbahn (KDB) versehen, auf der eine geotextile Dränmatte als Kontrolldränage aufgebracht wurde (siehe Abb. 8.3). Die KDB wurde mit einem trichterförmigen Gefälle von ca. 2,5 % nach innen errichtet. An der tiefsten Stelle wurde die KDB an ein Abflussrohr angeschlossen, welches das gesammelte Wasser zu einem Messschacht führt, wo es getrennt für die beiden Versuchsfelder mit Hilfe von Kippwaagen quantifiziert wird (siehe Abb. A3.3 in Anhang

3). Zur Aufnahme von Spreizkräften und zur Vermeidung des Eintrages von Zugspannungen in die Kunststoffdichtungsbahn wurde oberhalb der Dränmatte in der Breite der beiden Versuchsabschnitte in Nord-Süd-Richtung ein Geogitter verlegt.

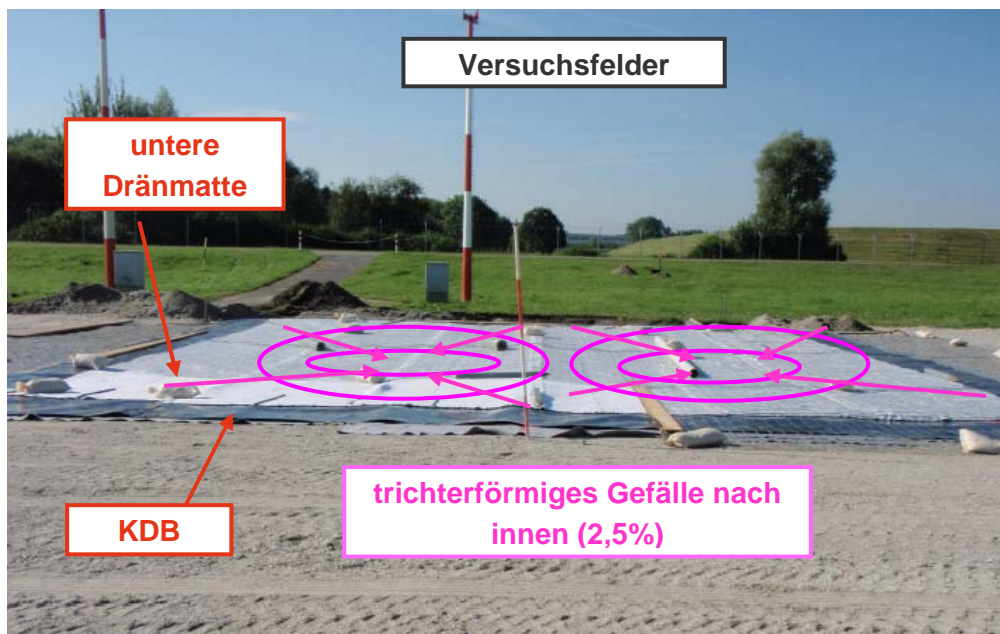


Abb. 8.3: Aufbau der Versuchsfelder in der Aufstandsfläche

Die Verdichtung des organogenen Tons erfolgte mit einer 25-t-Walze, die über eine Polygonbandage verfügt. Durch die Nachverdichtung mit einer Glattmantelwalze konnten die oberflächennahen Auflockerungen, die durch die Polygonbandage entstanden sind, behoben werden (siehe [Abb. A3.4](#) und [Abb. A3.5](#) im Anhang 3). Um eine Wasseraufnahme durch den trocken verdichteten organogenen Ton infolge von Niederschlägen zu vermeiden, wurde das trocken verdichtete Material während der Bauphase in Schlechtwetterphasen mit Plastikfolien abgedeckt.

Während der Bauphase wurde das eingebaute verdichtete Kernmaterial mittels Ausstechzylinderverfahren beprobt. An den entnommenen Proben wurden u. a. die Dichte und der Wassergehalt sowie der Glühverlust bestimmt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass von sehr gleichmäßigen Verhältnissen im Probehügel ausgegangen werden kann. Der an 66 Proben ermittelte Glühverlust betrug i. M. 27,9 %. Die an 66 Proben bestimmten Einbauwassergehalte und Trockendichten sind getrennt für beide Einbaubedingungen in [Abb. 8.4](#) dargestellt. Die Ergebnisse geben den anhand der Proctorversuche ermittelten Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und der Trockendichte gut wieder (vgl. [Abb. 6.4](#)). Es ist erkennbar, dass die Einbauwassergehalte auf der nassen Seite überwiegend zwischen 70 % und 85 % und auf der trockenen Seite überwiegend zwischen 40 % und 54 % liegen. Die Mittelwerte betrugen 75,3 % für die nasse bzw. 48,9 % für die trockene Einbaubedingung. Der Wassergehalt für die nasse Einbaubedingung lag damit im Mittel geringfügig über dem angestrebten Wassergehalt von 75 %. Auf der trockenen Seite wurde der angestrebte Wassergehalt von 55 % im Mittel um 6,1 % unterschritten.

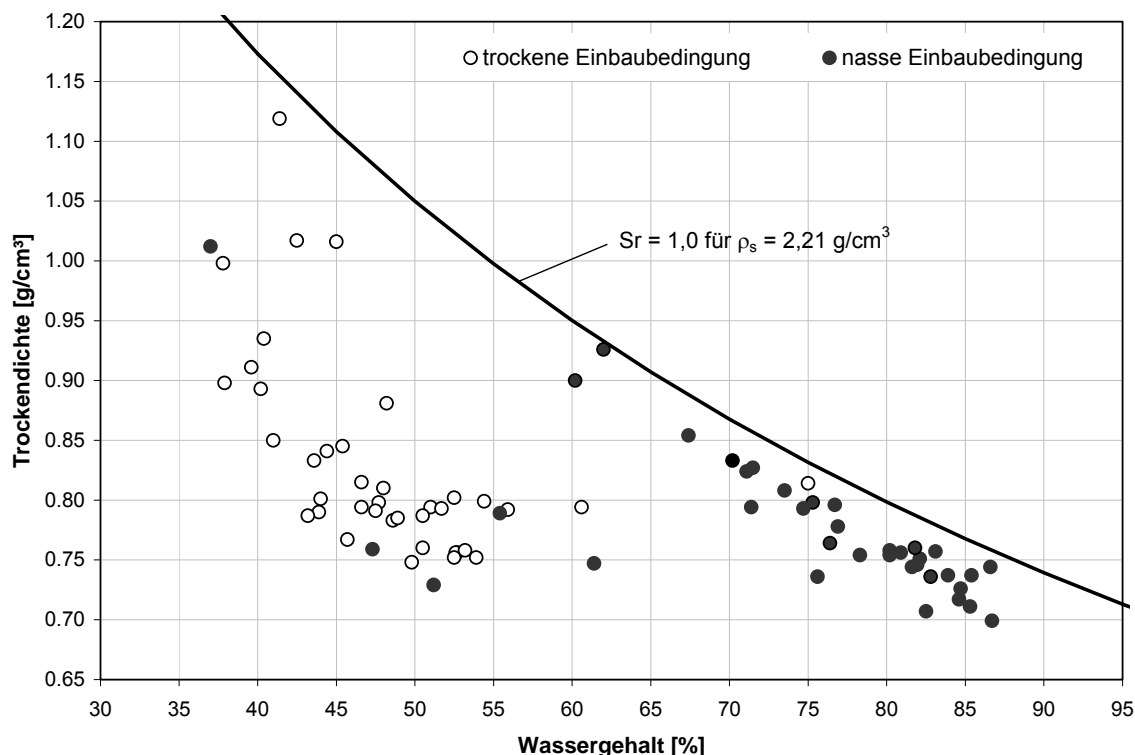


Abb. 8.4: Zusammenhang zwischen Trockendichte und Wassergehalt bei nasser und trockener Einbaubedingung

Die beiden Versuchsabschnitte wurden voneinander und zu benachbarten Dammbereichen mit vier Dichtwänden vertikal abgeschottet. Diese wurden aus dem bereits in Abschnitt 6 beschriebenen Lösslehm hergestellt. Zur Erzielung von Durchlässigkeitsbeiwerten $k \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ wurde der Lösslehm auf der nassen Seite des Proctoroptimums verdichtet. Die bei einer mineralischen Tondichtung prinzipiell zu beachtende Problematik einer Austrocknung besteht nur in den oberen Bereichen nahe der Dränmatte und ist deshalb im Hinblick auf die Funktionstüchtigkeit der Dichtung als nicht relevant anzusehen. Der Einbau des Tons erfolgte lagenweise im Zuge des Hügelaufbaus. (siehe [Abb. A3.6](#) und [Abb. A3.7](#) in Anhang 3).

Oberhalb des verdichteten organogenen Tons wurde, wie in der [Abb. 8.2](#) skizziert, eine Dränmatte zur Ableitung des in den Oberboden eingedrungenen Niederschlagswassers aufgebracht (siehe [Abb. A3.8](#) in Anhang 3). Die Dichtwände enden unmittelbar unterhalb der Dränmatte. Entsprechend den Planvorgaben weist die Dränmatte im Kronenbereich eine Neigung von 5 % auf. Abflüsse in der Dränmatte werden am südseitigen Böschungsfuß in einem Rinnenkörper getrennt für die beiden Versuchsabschnitte gefasst und mit Hilfe von Rohrleitungen in den Messschacht geführt (siehe [Abb. A3.9](#) in Anhang 3). Ebenfalls über Kippwaagen erfolgt eine Quantifizierung der Wassermengen. Vom Messschacht wird das Wasser anschließend in einen Drainageschacht gepumpt und an der Ostseite des Hügels über eine Sickerleitung versickert (siehe [Abb. A3.10](#) in Anhang 3).

Oberhalb der Dränmatte bildet eine ca. 60 cm mächtige unverdichtete Oberbodenschicht aus dem in Abschnitt 8.2 beschriebenen organogenen Ton den oberen Abschluss der Versuchsschüttung. Der Einbau erfolgte mit Hilfe eines Baggers (siehe [Abb. A3.11](#) in Anhang 3).

Zur Ermittlung und späteren Modellierung des Wasserhaushaltes werden die klimatischen Verhältnisse, das in der oberen Dränmatte und an der Basis anfallende Sickerwasser sowie Feuchte- und Saugspannungsänderungen in der Versuchsschüttung messtechnisch erfasst. Dazu wurden von Mitarbeitern des Zentrums Geotechnik in beide Versuchsabschnitte insgesamt 28 TDR-Sonden zur Erfassung der Wassergehaltsänderungen und 18 Tensiometer zur Ermittlung von Saugspannungsänderungen eingebaut. Die genaue Lage der Messgeber wurde durch eine geodätische Einmessung nach Einbau ermittelt. Für die Verlegung der Kabel der TDR-Sonden bzw. der Tensiometer wurden Gräben ausgehoben, in denen die Kabel in Leerrohren zum Messschacht geführt wurden (siehe [Abb. A3.13](#) in Anhang 3). Dies war erforderlich, um die Messkabel vor Beschädigung im Zuge der Verdichtung des Bodens mit den schweren Verdichtungsgeräten zu schützen. Vor Einbau der Sonden im Boden wurden an den dafür vorgesehenen Stellen im Rahmen der Einbauprüfungen Bodenproben mittels Ausstechzylinder entnommen. Die Tensiometer wurden mit einer Neigung von 15° gegenüber der Horizontalen eingebaut. Die TDR-Sonden wurden horizontal verlegt (siehe [Abb. A3.12](#) und [Abb. A3.14](#) in Anhang 3). Das entnommene Erdreich wurde unmittelbar oberhalb der Sensoren von Hand eingebaut und verdichtet.

Im Zuge der Begrünung des beschriebenen Oberbodens wurden im südwestlichen und nordöstlichen Bereich des Hügels Erosionsschuttmatten verlegt. Außerdem wurde zur schnellen Begrünung eine Saatgutmischung im Anspritzverfahren auf den gesamten Hügel aufgebracht (siehe [Abb. A3.15](#), [Abb. A3.16](#) und [Abb. A3.17](#) in Anhang 3).

Zur Überprüfung der mit den eingebauten Sensoren gewonnenen Messdaten sowie zur Ermittlung der hydraulischen und bodenmechanischen Eigenschaften des verdichteten Bodens wurde im November 2008 sowie im September 2009 je eine Bohrung im Bereich der westlichen und östlichen Böschungskrone außerhalb der beiden Versuchsabschnitte abgeteuft (siehe [Abb. 8.1](#)).

Die ersten Bohrungen mit Probenentnahme wurden nach kompletter Fertigstellung des Baus am 20.11.2008 abgeteuft. Als Bohrverfahren wurde eine Aufschlussbohrung im Linerverfahren gewählt. Dieses Verfahren gewährleistet eine durchgehende Probengewinnung des organischen Kernmaterials bis zum Kies. Das Bohrgerät wurde von einem Autokran auf den Hügel gehoben. Zur Erfassung des Verformungsverhaltens des Hügels wurden die abgeteuften Bohrungen nach der Probenahme mit je einem 2-fach-Vertikalexstensometer ausgestattet (siehe auch Abschnitt 8.4.5).

Die zweiten Aufschlussbohrungen wurden am 09.09.2009 abgeteuft. Allerdings wurde im Gegensatz zu den ersten Bohrungen ein anderes Aufschlussverfahren gewählt, da die an den im Linerverfahren gewonnenen Proben durchgeführten Durchlässigkeitsversuche gegenüber der Einbauprüfung deutlich erhöhte Durchlässigkeitsbeiwerte zeigten, und dies auf die Probenahme über das Linerverfahren zurückgeführt werden konnte. Durch die Reibung zwischen der Probe und der Innenwand des Liners kam es zu einer Störung der Bodenstruktur während des Hineinrutschens der Probe in die 1 m langen Linerrohre. Aufgrund dessen wurden die Sonderproben der zweiten Bohrungen mithilfe von Entnahmestutzen gewonnen. Die Sonderprobe wurde dabei jeweils aus dem ungestörten Bereich unterhalb der Verrohrung entnommen. Insgesamt wurden aus den beiden Bohrungen jeweils 10 Sonderproben aus dem verdichteten organogenen Ton entnommen. Aus den zwischen den Sonderproben gelegenen Bodenbereichen wurden Eimerproben entnommen. Wie am 20.11.2008 wurde das Bohrgerät mit einem Autokran auf den Hügel gehoben (siehe [Abb. 8.5](#)).



Abb. 8.5: Versuchsschüttung mit Autokran und Bohrgerät

8.4 Messtechnische Instrumentierung

Zur Ermittlung und späteren Modellierung des Wasserhaushaltes wurden die klimatischen Verhältnisse, die an der Basis und in der Dränmatte im Bereich der Versuchsfelder anfallenden Sickerwassermengen sowie die im verdichteten organogenen Ton und im unverdichteten Oberboden im Bereich der Versuchsfelder auftretenden Wassergehalts- und Saugspannungsänderungen messtechnisch erfasst.

8.4.1 Tensiometer/Temperatursensoren

Zur Ermittlung von Saugspannungs- und Temperaturänderungen wurden in den beiden Versuchsabschnitten jeweils acht Tensiometer in das Kernmaterial sowie zwei in den Oberboden eingebaut. Der Einbau der Tensiometer erfolgte im Zuge des Aufbaus der Versuchsschüttung. In der Abb. 8.2 ist die geplante Lage der Sensoren im Bereich des westlichen Versuchsfeldes dargestellt. Die tatsächliche Lage der Sonden nach dem Einbau weicht von der Ausführungsplanung ab und kann dem in Anhang 3.1 beigefügten Bestandsplan entnommen werden.

Es kamen die Tensiometer T8 der Firma UMS zum Einsatz (Abb. A3.18). Diese ermöglichen die Messung von Kapillarspannungen bis ca. 85 kPa. Bei höheren Saugspannungen kann infolge von Kavitation Luft über die Keramik in das Tensiometer eindringen. In diesem Fall ist der Messbereich der Tensiometer überschritten. Verlässliche Messwerte können erst nach einer erneuten Entlüftung des Tensiometers erhalten werden. Dazu sind die Tensiometer T8 mit einer externen Befüllleitung ausgestattet und können damit auch im eingebauten Zustand befüllt werden. Liegen im Boden Porenwasserüberdrücke vor, werden diese ebenfalls auf das Tensiometer übertragen. In diesem Fall

zeigt der Druckaufnehmer einen positiven Druck an (max. 100 kPa). Die Kalibrierungskurve zur Ableitung des Porenwasserdruckes aus dem Ausgangssignal des Druckaufnehmers wurde von der Firma UMS mitgeliefert.

8.4.2 TDR-Sonden

Änderungen des Wassergehaltes in den organogenen Tonen werden mit Hilfe von insgesamt 31 unbeschichteten, 20 cm langen TDR-Sonden (time domain reflectometry) des Systems „Minitrase“ der Fa. Soilmoisture equipment corp. ermittelt. Die TDR-Sonden wurden im Zuge des Aufbaus der Versuchsschüttung eingebaut. Jeweils 14 Sonden wurden in den beiden Versuchsfeldern entlang der vier Messlinien in das verdichtete Kernmaterial eingebaut. Drei TDR-Sonden befinden sich in der unverdichteten Oberbodenschicht. Zur Vergleichbarkeit der TDR-Messungen mit den Saugspannungsmessungen wurde darauf geachtet, dass sich die TDR-Sonden nach Einbau auf der gleichen Höhe wie die Keramiken der an der entsprechenden Stelle vorgesehenen Tensiometer befunden haben. Die tatsächliche Lage der Sonden nach dem Einbau weicht teilweise von der Ausführungsplanung ab und kann dem in Anhang 3.1 beigefügten Bestandsplan entnommen werden.

Mit der TDR-Technik (Time Domain Reflectometry) wird die Laufzeit eines elektromagnetischen Impulses durch die in einem Medium befindlichen Elektrodenstäbe bestimmt. Die Geschwindigkeit, mit der sich der elektromagnetische Impuls im Medium ausbreitet, ist von dessen Dielektrizitätszahl abhängig. Die Dielektrizitätszahl von Wasser (ca. 80) ist deutlich größer als die von Luft (1,8) und des Feststoffs des Bodens (3-4) und kann deshalb als ein Maß für den volumetrischen Wassergehalt herangezogen werden. Die TDR-Sonde setzt sich aus einem Koaxialkabel und den Elektrodenstäben zusammen. Das Koaxialkabel besteht aus zwei elektrischen Leitern und einem dazwischen liegenden dielektrischen Stoff. Der innere elektrische Leiter ist mit dem mittleren und der äußere elektrische Leiter mit den äußeren Elektrodenstäben verbunden. Damit stellen die Elektrodenstäbe prinzipiell eine Verlängerung des Koaxialkabels dar. In der Abb. A3.19 im Anhang 3 ist der Aufbau einer TDR-Sonde aus Koaxialkabel und Elektrodenstäben schematisch dargestellt.

Die TDR-Sonden müssen vor Einbau bodenspezifisch kalibriert werden. Entsprechend den technischen Angaben zum verwendeten Produkt kann der volumetrische Wassergehalt nach einer Kalibrierung mit einer Genauigkeit von $\pm 2\%$ bestimmt werden. Zur Ermittlung der Kalibrierungskurve musste die Dielektrizitätszahl für den in der Versuchsschüttung verwendeten organogenen Ton bei unterschiedlichen Wassergehalten gemessen werden. Dazu wurde der organogene Ton in einem Zylinder (47 cm Durchmesser, 21 cm Höhe) bei einem definierten Wassergehalt und einer vorgegebenen Trockendichte von ca. $0,8 \text{ g/cm}^3$ statisch in mehreren Lagen verdichtet. In der Mitte des Zylinders wurde im Zuge der Verdichtung eine TDR-Sonde eingelegt (siehe Abb. A3.20 in Anhang 3). Nach Einbau des gesamten Bodenmaterials wurde das Ausgangssignal der TDR-Sonde gemessen. Dieser Vorgang wurde an demselben Bodenmaterial bei neun verschiedenen gravimetrischen Wassergehalten (45 % bis 75 %) durchgeführt. In der Abb. 8.6 sind die so ermittelten Messdaten dargestellt. Zur Ermittlung der volumetrischen Wassergehalte aus den an der Versuchsschüttung gemessenen Werten wurden die Messwerte durch eine logarithmische Funktion angepasst.

Vergleichend ist in Abb. 8.6 die Kalibrierungskurve nach TOPP ET AL. (1980) für einen mineralischen Boden dargestellt. TOPP ET AL. (1980) führten Untersuchungen an vier mineralischen Böden mit unterschiedlichen Korngrößenverteilungen im Bereich von Sand bis Ton durch. Auf Grundlage der Untersuchungen stellten sie eine Gleichung auf, die unabhängig von der Dichte, der Temperatur

und der Salzkonzentration des Bodenwassers der untersuchten Böden war. Aufgrund des hohen organischen Anteils weicht die Kalibrierungskurve des organogenen Tons von der Kalibrierungskurve nach TOPP ET AL. (1980) stark ab.

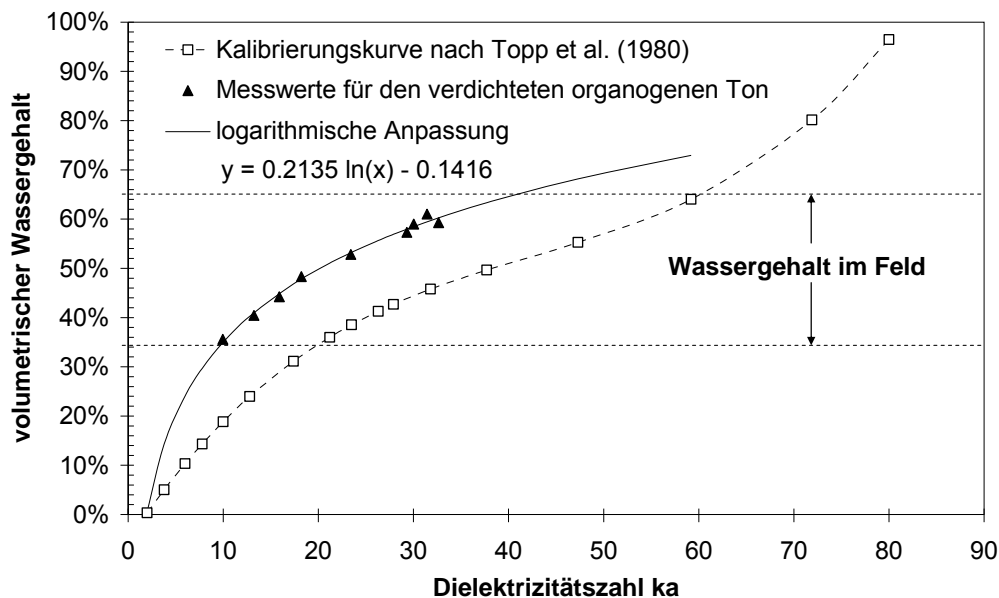


Abb. 8.6: Experimentell ermittelte Kalibrierungskurve der TDR-Sonden für den organogenen Ton im Vergleich zur Kalibrierungskurve nach TOPP ET AL. (1980)

8.4.3 Klimastation

Zur Ermittlung der klimatischen Verhältnisse wurde eine Klimastation am Fuße der Versuchsschüttung errichtet. Sie besteht aus einem Strahlungsbilanzgeber, einem Windgeschwindigkeitsmesser, einem Windrichtungsmesser und einem Luftfeuchte- und Temperaturfühler (siehe [Abb. A3.21](#) in Anhang 3). Darüber hinaus wurde ein Niederschlagssammler südlich der Versuchsschüttung bodengleich eingebaut (siehe [Abb. A3.22](#) in Anhang 3). Über einen Datenlogger im Messschacht wurden die gemessenen meteorologischen Daten halbstündlich erfasst. Zusätzlich wurde die Verteilung des Niederschlages auf der Versuchsschüttung über insgesamt vier über den Damm verteilte Regensammler ermittelt (siehe [Abb. A3.23](#) in Anhang 3). Die damit gesammelte Wassermenge wurde in der Regel einmal pro Woche durch Wägung quantifiziert.

8.4.4 Kippwaagen

Abflüsse aus der auf dem verdichteten organogenen Ton gelegenen Dränmatte werden am Böschungsfuß getrennt für die beiden Versuchsabschnitte gefasst und über Abflussrohre zum Messschacht geführt. Die an der Basis anfallenden Sickerwassermengen werden ebenfalls getrennt für die beiden Versuchsabschnitte über die in der Basis gelegene KDB gefasst und über Abflussrohre zum Messschacht geführt. Im Messschacht wurden die einzelnen Abflüsse mit Hilfe von Kippwaagen quantifiziert. Da angenommen wurde, dass nur geringe Mengen an Sickerwasser über die Kunststoffdichtungsbahn an der Basis anfallen würden, wurden dafür kleine Kippwaagen mit einem Kippvolumen von 4 ml gewählt (siehe [Abb. A3.24](#) in Anhang 3). Im Vergleich dazu wurden für das in der oberen Dränmatte anfallende Sickerwasser größere Mengen erwartet. Zur Quantifizierung

dieser Abflüsse wurden daher Kippwaagen mit einem Kippvolumen von 100 ml gewählt (siehe [Abb. A3.25](#) in Anhang 3).

Da angenommen wurde, dass das an der Basis anfallende Sickerwasser mit Arsen belastet ist, wurde es nach der Quantifizierung über die Kippwaagen in einen Pumpensumpf geführt und von dort über eine Leitung in einen Sickerwassertank gepumpt (siehe [Abb. A3.26](#) und [Abb. A3.27](#) in Anhang 3). Der Sickerwassertank kann bei Bedarf entleert und das Sickerwasser gesondert entsorgt werden.

Das aus der Dränmatte oberhalb des verdichteten organogenen Tons anfallende Sickerwasser wird, nachdem es über Kippwaagen quantifiziert wurde, ebenfalls in einen Pumpensumpf geführt und von dort in einen Sickerschacht gepumpt. Dort kann das Wasser über eine Sickerleitung (siehe [Abb. A3.10](#) in Anhang 3) an der Ostseite der Versuchsschüttung versickern.

8.4.5 Extensometer

Zur Erfassung des Verformungsverhaltens der Versuchsschüttung wurden die am 20.11.2008 abgeteuften Bohrungen mit je einem 2-fach-Vertikalextensometer ausgestattet. Ein Extensometer besteht grundsätzlich aus einem Ankerteil am Extensometerfuß, dem Messgestänge im Schutzrohr, einem Messanschlag und dem Extensometerkopf. Das Ankerteil wird so im Bohrloch eingebaut, dass es mit dem anstehenden Boden fest verbunden ist. Über das Messgestänge ist der Extensometerkopf mit dem verankerten Extensometerfuß verbunden. Über die Messung des Abstandes zwischen dem Extensometerkopf und dem Messanschlag kann die Verformung zwischen dem im Boden fixierten Extensometerfuß und dem an der Geländeoberfläche befindlichen Messanschlag ermittelt werden. Es können damit aber keine Informationen gewonnen werden, in welchen Bereichen zwischen Extensometerfuß und Extensometerkopf die Verformungen auftreten. Aus diesem Grunde wurde in jede Bohrung ein 2-fach Extensometer eingebaut (siehe [Abb. A3.28](#) und [Abb. A3.29](#) in Anhang 3). Die gewählte Anordnung der Extensometer ermöglicht es, die in der unteren Hälfte des verdichteten Kernmaterials auftretenden Verformungen getrennt von den in der oberen Hälfte auftretenden Verformungen zu erfassen. Der längere Extensometer wurde im kiesigen Bodenaustauschmaterial unterhalb der Versuchsschüttung, der kürzere Extensometer etwa in der Mitte des verdichteten Kernmaterials mit Hilfe von Schnellzement fixiert (siehe [Abb. A3.31](#) und [Abb. A3.32](#) in Anhang 3). Oberhalb der Ankerteile wurde das Bohrloch mit einem Kaolin-Zement-Gemisch verfüllt (siehe [Abb. A3.30](#) in Anhang 3). Die Rezeptur wurde dabei so gewählt, dass der Kaolin nach Abbinden zwar eine feste Konsistenz erreicht, seine Steifigkeit dabei aber nicht höher ist als die des umgebenden Bodens. Dadurch soll vermieden werden, dass die Verformungen des Bodens durch eine zu hohe Eigensteifigkeit des Messsystems beeinflusst werden. Die Messgenauigkeit der mit Hilfe einer Schiebelehre gemessenen Extensometer liegt in einem Bereich von etwa 0,1 mm.

8.5 Messergebnisse

Die [Abb. 8.7](#) stellt den Wasserhaushalt der Versuchsschüttung schematisch dar. Der Niederschlag wird zum Teil als Oberflächenabfluss abgeführt, zum Teil infiltriert er in den Oberboden und zum Teil verdunstet er direkt. Das in den Oberboden eingedrungene Wasser kann dort gespeichert oder wieder abgegeben werden. Dies geschieht zum Teil über Verdunstung (Evaporation) und über die

Aufnahme durch Pflanzen (Transpiration) und zum Teil über einen Abfluss in der Oberbodenschicht (Zwischenabfluss) und als Wasseraustritt in die Dränmatte. Das Sickerwasser, welches die Dränmatte erreicht, wird teilweise vom verdichteten organogenen Ton aufgenommen, teilweise fließt es in der Dränmatte ab. Das in den Kern infiltrierende Sickerwasser kann von diesem gespeichert werden, was sich in einer Änderung des Wassergehaltes äußert, kann zu einem Sickerwasseraustritt an der Basis führen und kann theoretisch über Verdunstung in die Dränmatte abgegeben werden. Aufgrund der kapillarbrechenden Wirkung der Dränmatte kann das Wasser des verdichteten organischen Bodens von flachwurzelnden Pflanzen nicht erreicht werden.

Der Niederschlag an der Versuchsschüttung wurde mit Hilfe der Niederschlagssammler gemessen. Die Verdunstung an der Bodenoberfläche und die Wasseraufnahme durch die Pflanzen wurde aus den meteorologischen Messdaten und den Wassergehaltsmessungen im Oberboden mit dem Ansatz nach Penman-Monteith abgeschätzt (siehe Abschnitt 8.5.5). Anhand der beschriebenen Kippwaagen wurde das in der oberen Dränmatte abfließende Sickerwasser sowie das an der Basis aus dem verdichteten Kern austretende Sickerwasser getrennt für die beiden Versuchsfelder quantifiziert. Über die eingebauten TDR-Sonden und Tensiometer können Rückschlüsse über Wassergehaltsänderungen im unverdichteten Oberboden und im verdichteten Kern gewonnen werden.

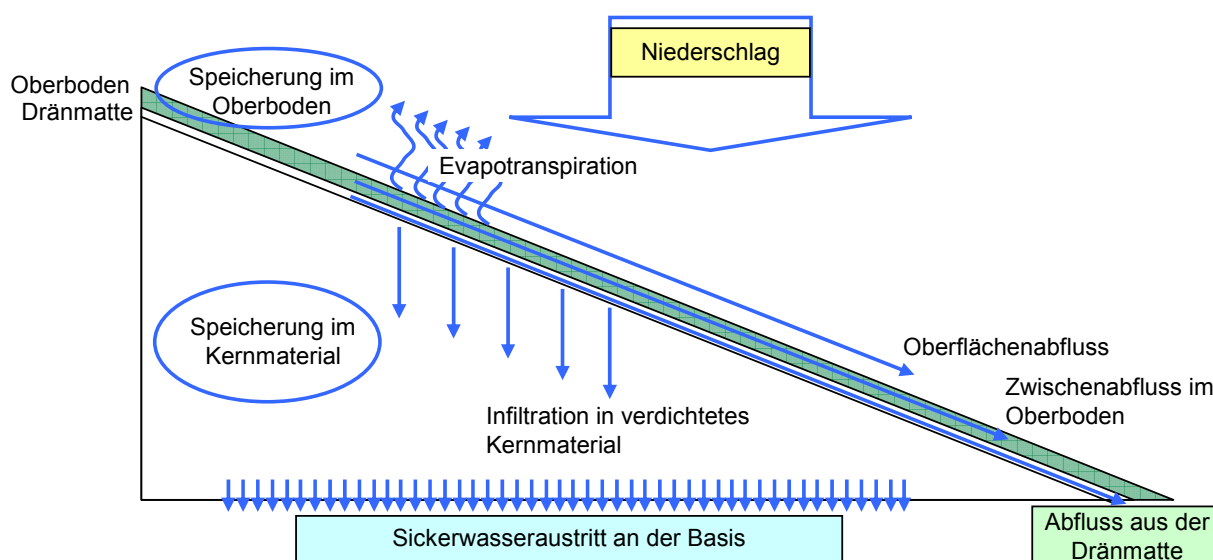


Abb. 8.7: Schematische Darstellung des Wasserhaushaltes der Versuchsschüttung

8.5.1 Niederschlag

In der Abb. 8.8 sind die Tageswerte des Niederschlages zwischen November 2008 und Juli 2010 dargestellt. Sehr vereinzelt kam es zu Problemen mit dem Datenerfassungssystem. In derartigen Fällen, wenn keine oder nur eingeschränkt verwertbare Daten des eigenen Niederschlagssammlers vorlagen, wurde auf die Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für den Flughafen München zurückgegriffen. Zur besseren Übersicht sind in der Abb. 8.9 zusätzlich Monatswerte des Niederschlages für den Zeitraum zwischen November 2008 und Juli 2010 angegeben.

Die Verteilung des Niederschlages auf dem Hügel wurde mit Hilfe von insgesamt vier Regensammlern erfasst (siehe Abb. A3.23 in Anhang 3). Diese wurden am südlichen, nördlichen und westlichen

Dammfuß sowie auf der Dammkrone angeordnet. Die Niederschlagsmengen wurden etwa wöchentlich durch Wägung bestimmt. In der [Abb. A3.33](#) in Anhang 3 sind für die einzelnen Regensammler die akkumulierten Werte dargestellt. Zusätzlich sind die mit Hilfe des bodengleich eingebauten Niederschlagssammlers und dessen Kippwaage aufgezeichneten Werte angegeben. Es ist zu erkennen, dass die Niederschlagsverteilung insgesamt sehr gleichmäßig ist. Im Vergleich zur Kippwaage zeigen die vier Regensammler deutlich geringere Werte. Dies ist auf eine Verdunstung der in den Regensammlern gefassten Wassermengen zurückzuführen.

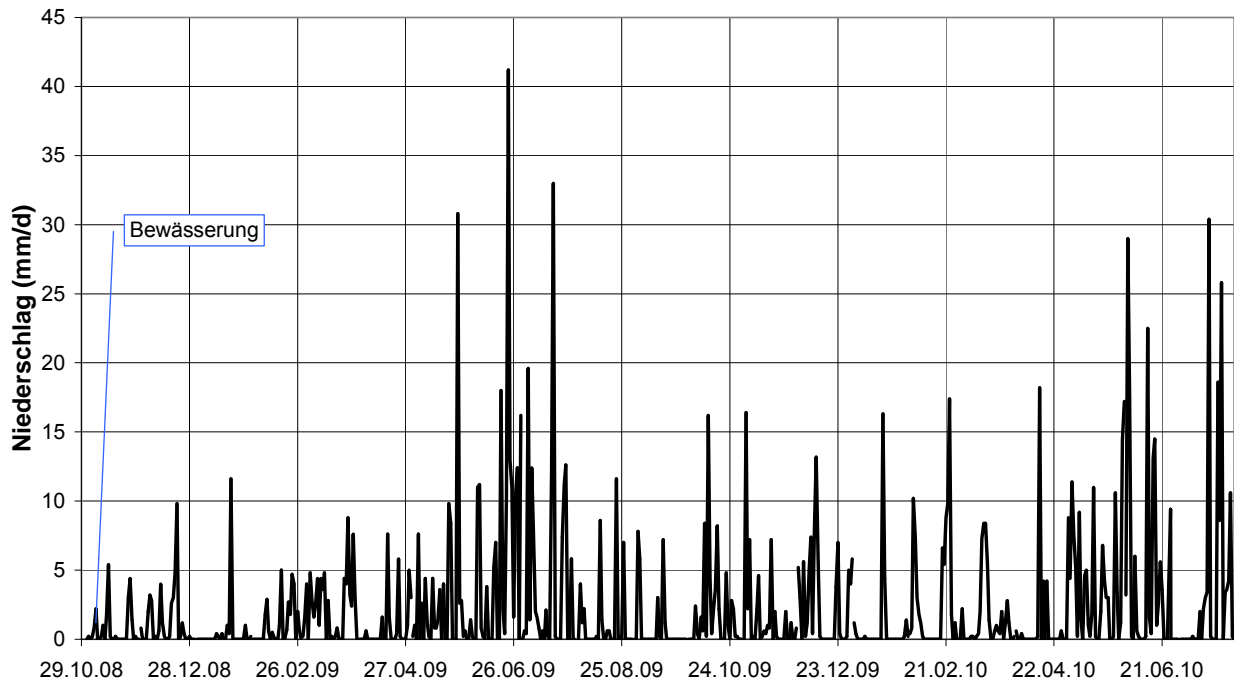


Abb. 8.8: An der Versuchsschüttung aufgezeichnete Tageswerte des Niederschlags

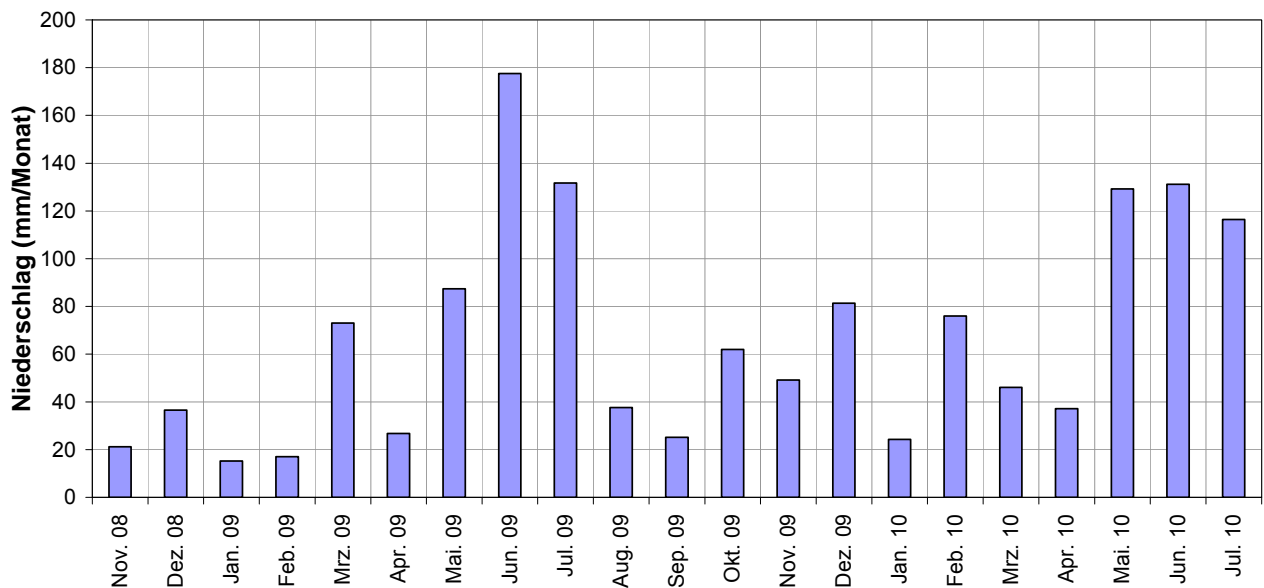


Abb. 8.9: An der Versuchsschüttung aufgezeichnete Monatswerte des Niederschlags

8.5.2 Sickerwasser

In [Abb. 8.11](#) und [Abb. 8.12](#) sind die Tages- bzw. Monatsmittelwerte der an der Basis gesammelten Sickerwassermengen getrennt für die beiden Einbaubedingungen dargestellt. Um die Sickerwassermengen mit dem Niederschlag besser vergleichen zu können, wurden diese auf die Basisfläche der Versuchsfelder bezogen. Auf der nassen Seite wurden bereits während der Herstellung der Versuchsschüttung infolge der Verdichtung des eingebauten organischen Bodens Sickerwasser austritte beobachtet und quantifiziert (siehe [Abb. 8.10](#)). Diese betragen während des Baus Anfang September 2008 ca. 0,5 mm/d und nehmen anschließend stetig ab. Zu Beginn der kontinuierlichen Aufzeichnungen Anfang November 2008 wurden Sickerwassermengen von ca. 0,2 mm/d bzw. 5 mm/Monat gemessen. Diese nehmen bis Ende April 2009 auf einen Wert von ca. 0,05 mm/d bzw. 1,6 mm/Monat und im weiteren Verlauf bis Ende März 2010 auf einen Wert von ca. 0,01 mm/d bzw. 0,3 mm/Monat ab. Seit März 2010 liegen die an der Basis der nassen Seite gefassten Sickerwassermengen zwischen 0,005 mm/d und 0,01 mm/d. Als Monatswerte wurden seit März 2010 Werte zwischen 0,13 mm und 0,26 mm ermittelt.

Auf der trockenen Seite wurde während der Herstellung der Versuchsschüttung kein Sickerwasser und ab Beginn der kontinuierlichen Aufzeichnung Anfang November 2008 nur ein sehr geringer Sickerwasseranfall aufgezeichnet. Dieser betrug anfänglich ca. 0,01 mm/d und hat bis Ende November 2009 auf etwa 0,001 mm/d abgenommen. Seitdem wurden Sickerwassermengen zwischen 0,0005 mm/d und 0,001 mm/d aufgezeichnet.

Die zu Beginn vergleichsweise hohen Sickerwassermengen an der Basis der nassen Seite sind auf die Entstehung von Porenwasserüberdrücken infolge der Verdichtung des Bodens zurückzuführen. Diese bauen sich im Zuge der beobachteten Konsolidierung durch die Abgabe von Porenwasser langsam ab. Dieses Verhalten ist gut erkennbar an den in [Abb. 8.13](#) dargestellten Messergebnissen des Tensiometers MO1A, das sich etwa in der Mitte der Versuchsschüttung 15 cm oberhalb der unteren Dränmatte in der nassen Seite befindet. Infolge der Verdichtung des organischen Bodens zeigt das Tensiometer während des Einbaus im August 2008 Wasserdrücke von bis zu 300 hPa. Diese bauen sich bis Ende April 2009 auf einen konstanten Wert von ca. 10 hPa ab. Es kann demnach von einer annähernd vollständigen Sättigung des nass verdichteten organogenen Tons in diesem Bereich ausgegangen werden.

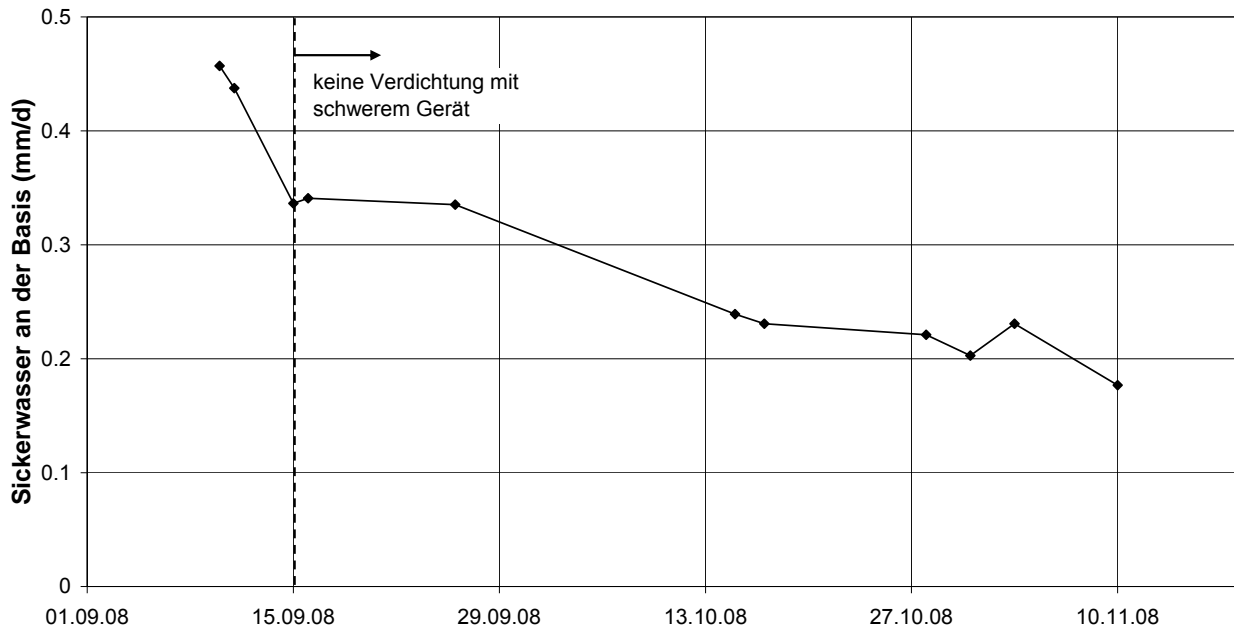


Abb. 8.10: Tagesmittelwerte des Sickerwassers an der Basis der nassen Seite im Zeitraum zwischen September und November 2008 (Einbau)

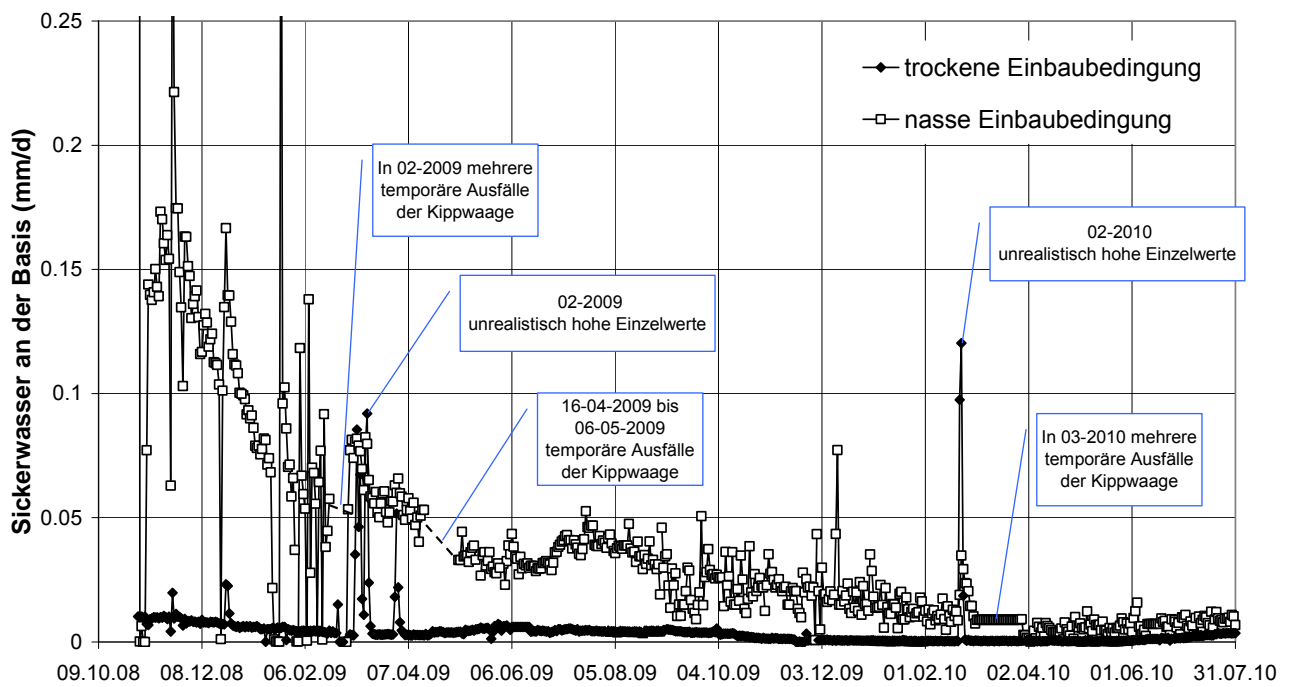


Abb. 8.11: Tagesmittelwerte des Sickerwassers an der Basis im Zeitraum zwischen November 2008 und Juli 2010

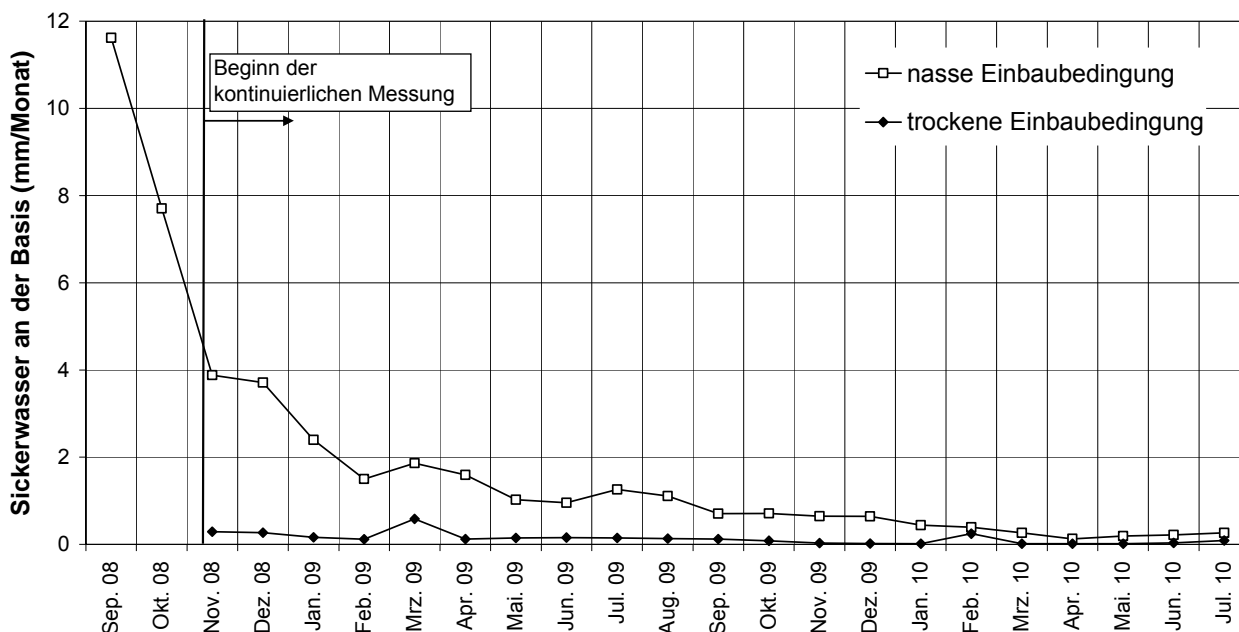


Abb. 8.12: Monatsmittelwerte des Sickerwassers an der Basis im Zeitraum zwischen September 2008 und Juli 2010

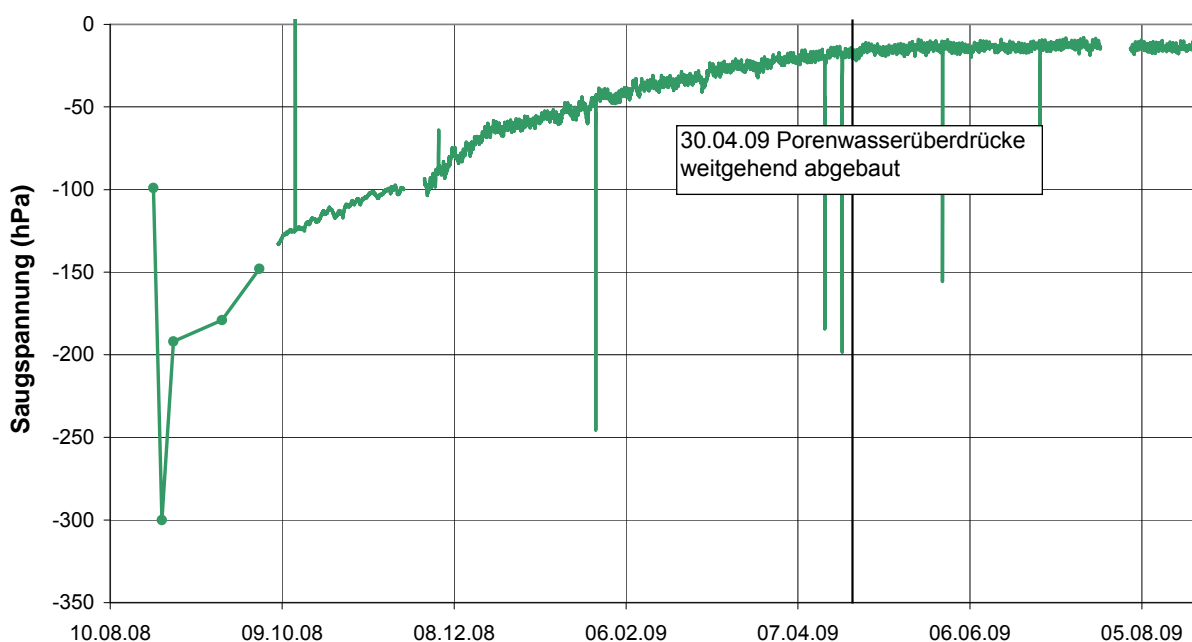


Abb. 8.13: Saugspannungsmessungen für das Tensiometer MO1A (Basis nass) im Zeitraum zwischen August 2008 und August 2009

Die aus der oberen Dränmatte im Bereich der nassen und trockenen Einbaubedingung gefassten Sickerwassermengen sind in der Abb. 8.14 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass insbesondere in den ersten Monaten nach Herstellung der Versuchsschüttung vergleichsweise regelmäßig Sickerwasser anfiel. Ab Ende April 2009 wurden nur zeitweise nennenswerte Sickerwassermengen aus der oberen Dränmatte gefasst. Vergleicht man den zeitlichen Verlauf der Sickerwassermengen mit

den im Oberboden gemessenen Wassergehalten, ist zu erkennen, dass ein Sickerwasseranfall in der Dränmatte nur bei fast vollständiger Sättigung des Oberbodens stattfindet. Dies ist deutlich am Verlauf des Wassergehaltes im Bereich der TDR-Sonde MW4C in [Abb. 8.15](#) zu erkennen. Diese befindet sich ca. 0,5 m unterhalb der Böschungsoberfläche und damit nur ca. 10 cm oberhalb der Dränmatte. Erst wenn auch in dieser Tiefe ein volumetrischer Wassergehalt im Bereich von ca. 50 % vorliegt, was gemäß den Saugspannungsmessungen des an dieser Messstelle befindlichen Tensiometers (siehe [Abb. A3.34](#) im Anhang 3) einer fast vollständigen Sättigung des Oberbodens entspricht, findet eine Sickerwasserabgabe in die Dränmatte statt.

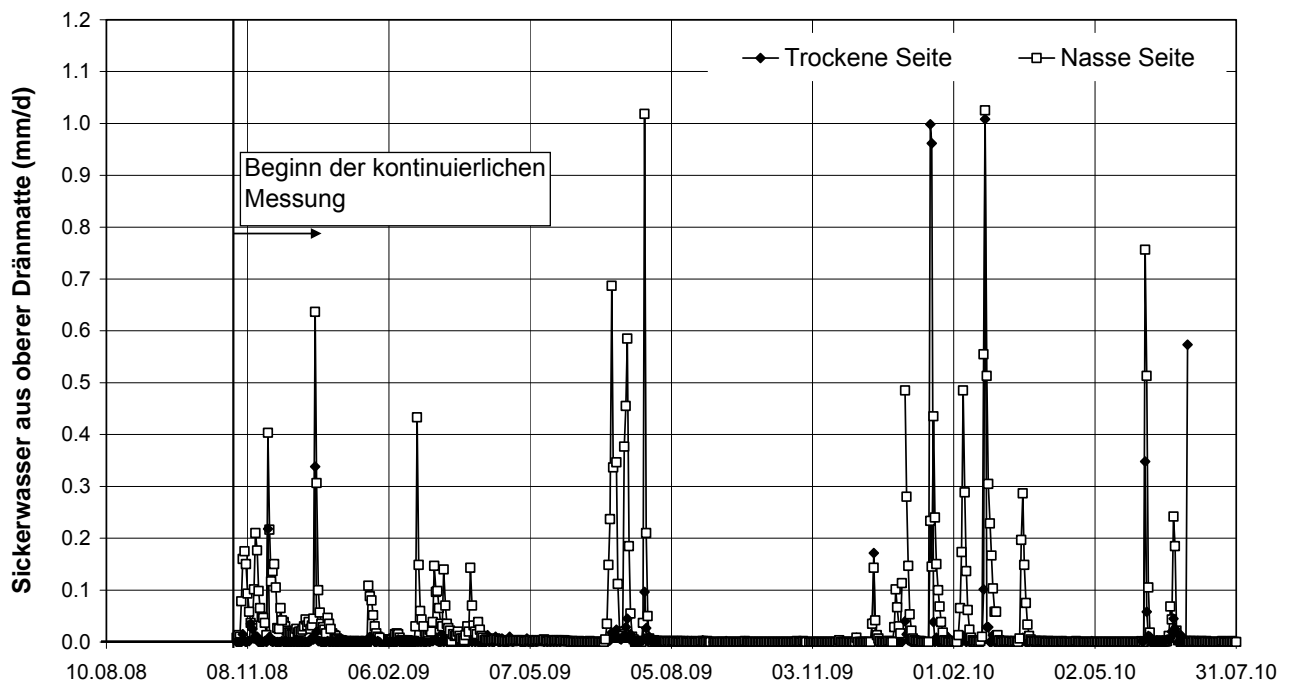


Abb. 8.14: Tagesmittelwerte des Sickerwassers aus der oberen Dränmatte

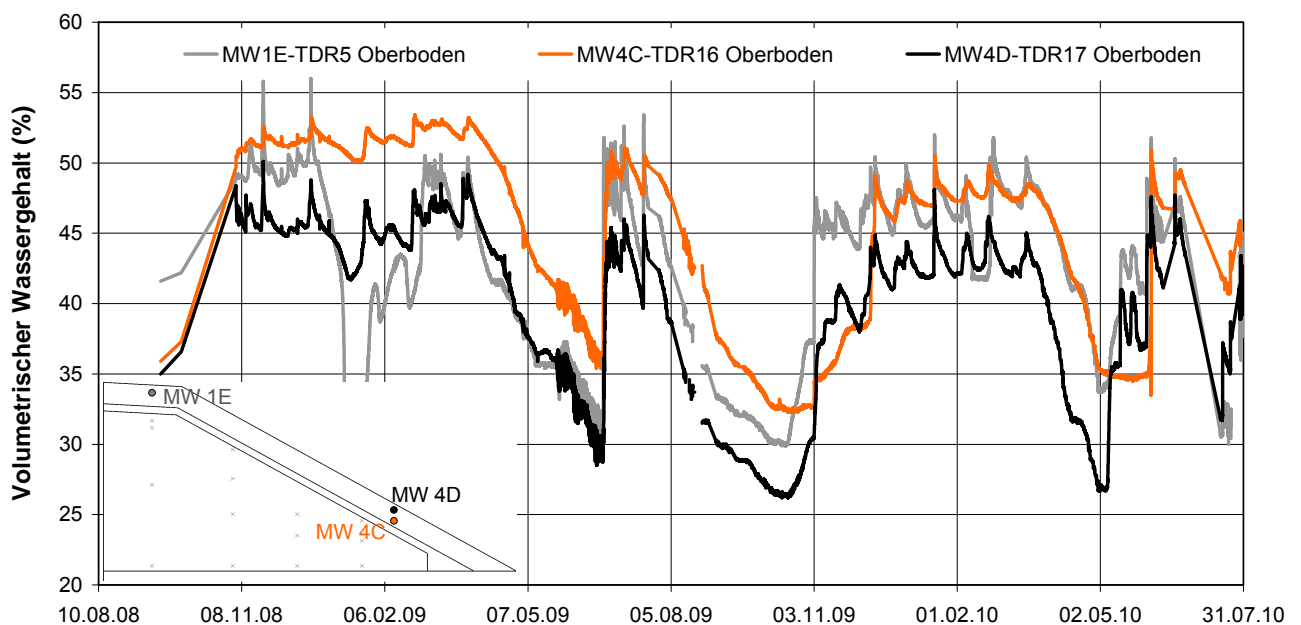


Abb. 8.15: Wassergehalte in den Messpunkten MW1E, MW4C und MW4D im Oberboden

Aus der Abb. 8.14 ist weiter zu erkennen, dass in der oberen Dränmatte oberhalb der trockenen Einbaubedingung weniger Wasser abgeführt wird als im Bereich der nassen Einbaubedingung. Dies beruht auf den kapillaren Eigenschaften des auf der trockenen Seite des Proctoroptimums verdichteten organogenen Tons. Aufgrund von Saugspannungen wird das in der oberen Dränmatte befindliche Sickerwasser überwiegend vom organogenen Ton aufgenommen und gespeichert.

In der Abb. 8.16 sind die akkumulierten Werte für den Niederschlag, den Sickerwasserabfluss an der Basis und aus der oberen Dränmatte für die beiden Einbaubedingungen für den Zeitraum zwischen November 2008 und Juli 2010 dargestellt. Um die Sickerwassermengen mit dem Niederschlag vergleichen zu können, wurden diese dabei auf die Grundfläche der Versuchsschüttung bezogen. Der akkumulierte Niederschlag beträgt ca. 1200 mm. Als Sickerwasser an der Basis der nassen Einbaubedingung wurden im betrachteten Zeitraum ca. 43 mm gefasst. Darin enthalten sind die unmittelbar nach Herstellung der Versuchsschüttung im September und Oktober aufgetretenen Sickerwassermengen (19 mm). Das akkumulierte Sickerwasser aus der oberen Dränmatte der nassen Seite beträgt insgesamt 24 mm und ist damit ähnlich groß wie das in diesem Zeitraum gefasste Sickerwasser an der Basis.

An der Basis der trockenen Seite wurden im betrachteten Zeitraum insgesamt nur 2,7 mm gefasst. Das akkumulierte Sickerwasser aus der oberen Dränmatte oberhalb der trockenen Einbaubedingung beträgt 6,5 mm.

Betrachtet man nur die nach Abklingen der Konsolidationsvorgänge seit Mai 2009 angefallenen Wassermengen, ergeben sich für die nasse Einbaubedingung akkumulierte Sickerwassermengen an der Basis von ca. 9 mm und für die obere Dränmatte von ca. 16,2 mm. Im Bereich der trockenen Einbaubedingung wurden im betrachteten Zeitraum an der Basis akkumulierte Werte von 1,2 mm und aus der oberen Dränmatte von 5,5 mm gemessen. Der im betrachteten Zeitraum zwischen Mai 2009 und Juli 2010 aufgetretene Niederschlag beträgt ca. 1000 mm. Für die nasse Einbaubedingung betragen die Sickerwasserabflüsse bezogen auf den Niederschlag in diesem Zeitraum ca. 1 % an der Basis und ca. 1,6 % aus der oberen Dränmatte. Für die trockene Einbaubedingung betragen die Abflüsse an der Basis und aus der oberen Dränmatte 0,12 % bzw. 0,55 % des Niederschlages.

Für den Zeitraum zwischen Mai 2009 und Juli 2010 ergibt sich damit für die nasse Einbaubedingung eine mittlere monatliche Sickerwasserabgabe an der Basis von 0,6 mm. Dies entspricht einer Sickerwasserabgabe von $2,3 \cdot 10^{-10}$ m/s. Dabei ist zu beachten, dass die Sickerwasserabgabe im betrachteten Zeitraum weiterhin abgenommen hat und Ende Juli 2010 eine monatliche Sickerwasserabgabe von ca. 0,25 mm vorlag, was einem Wert von $1,0 \cdot 10^{-10}$ m/s entspricht. Prinzipiell ist aus dem sehr gleichmäßigen Verlauf der Sickerwasserabgabe an der Basis zu erkennen, dass diese weitgehend unabhängig von Niederschlagsereignissen ist und in ihrem Verlauf wesentlich vom Einbauzustand abhängt.

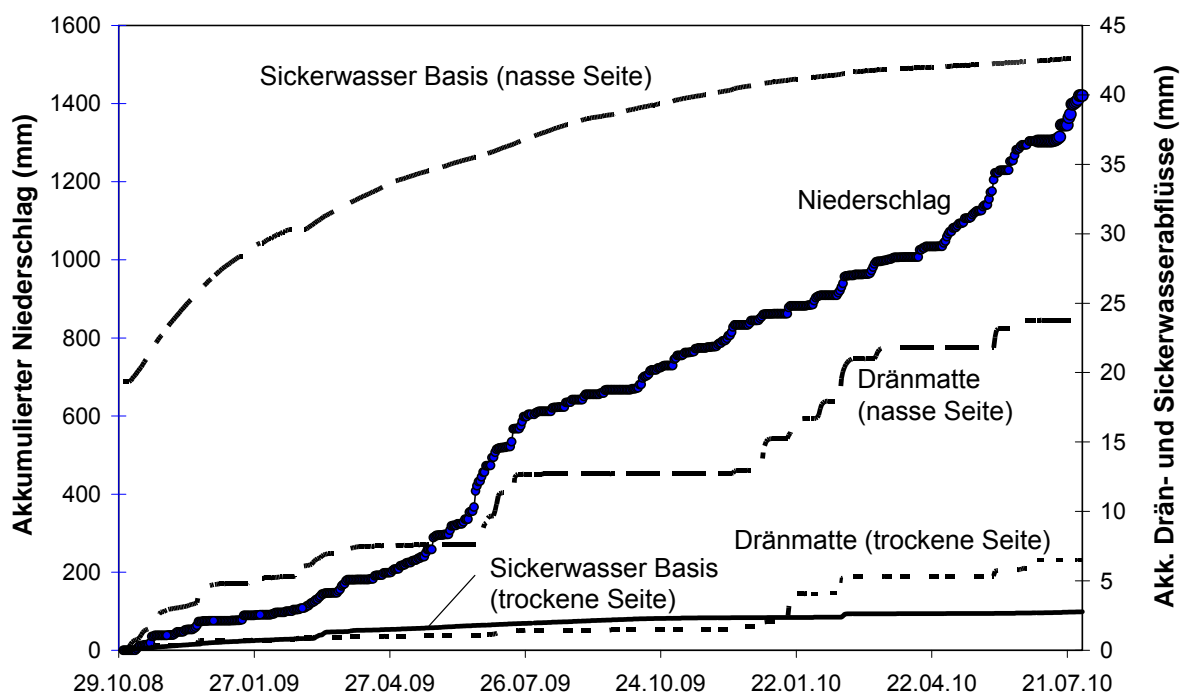


Abb. 8.16: Akkumulierte Wassermengen des Niederschlags, des Sickerwassers an der Basis und des Sickerwassers aus der oberen Dränmatte

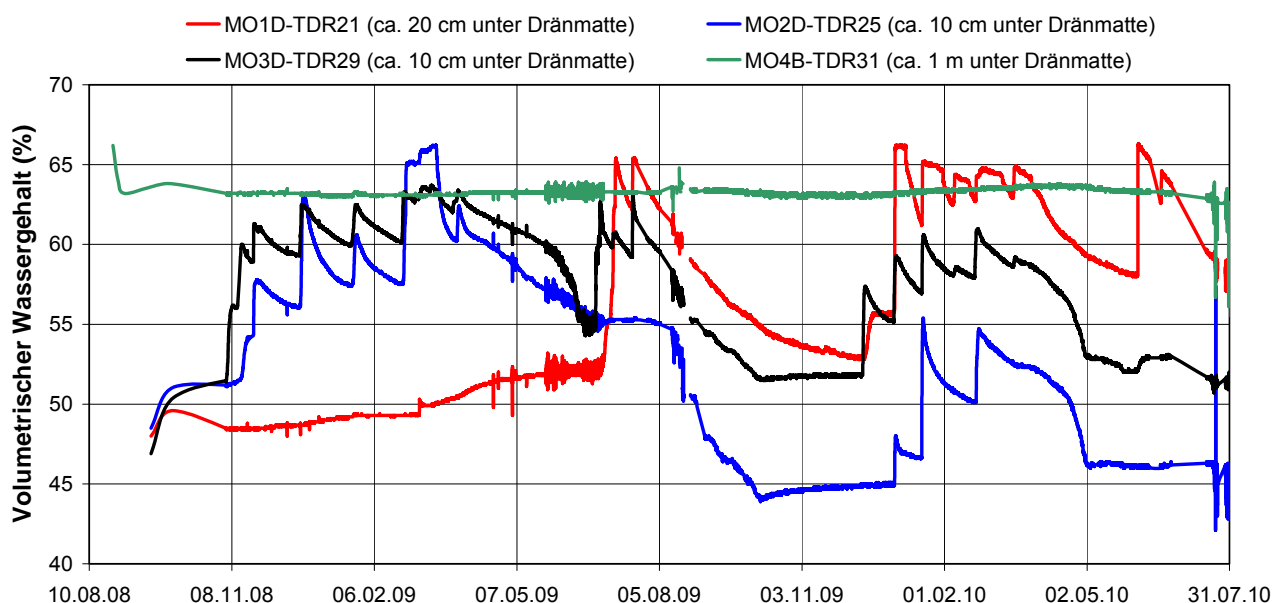
8.5.3 Tensiometer- und TDR-Messungen

Maßgebliche Änderungen des Wassergehaltes und der Saugspannungen wurden insbesondere im Oberboden sowie im verdichteten organogenen Ton in Bereichen nahe der oberen Dränmatte beobachtet. Der Wassergehalt im Oberboden wird wesentlich von den klimatischen Verhältnissen beeinflusst. Infolge von Niederschlagsereignissen kommt es zu einer Infiltration in den Oberboden und damit zu einer Zunahme des Wassergehaltes. Zusätzlich kommt es zu einer Wasserabgabe aus dem Oberboden infolge einer Verdunstung an der Oberfläche (Evaporation) und der Wasseraufnahme durch den Bewuchs (Transpiration). Die Höhe der Evaporation und Transpiration hängt u. a. von der Sonneneinstrahlung, der Windgeschwindigkeit, der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit ab. Im Sommerhalbjahr ist sie deutlich ausgeprägter als im Winterhalbjahr. Der in [Abb. 8.15](#) dargestellte zeitliche Verlauf des Wassergehaltes an den im Oberboden befindlichen TDR-Sonden zeigt für das Sommerhalbjahr zwischen April und Oktober prinzipiell starke Schwankungen. Im Vergleich dazu ändert sich der Wassergehalt zwischen November und März nur geringfügig. Dies resultiert u. a. aus dem im Sommerhalbjahr sehr starken Einfluss der Evapotranspiration auf den Wassergehalt des Oberbodens. So nimmt der Wassergehalt in trockenen Phasen sehr stark ab, kann jedoch in niederschlagsreichen Phasen auch innerhalb kurzer Zeit wieder deutlich ansteigen.

Im verdichteten Kernmaterial wurden Änderungen des Wassergehaltes und der Saugspannungen besonders ausgeprägt in den oberen Bereichen nahe der oberen Dränmatte beobachtet, da diese Bereiche bei Wasserzutritt aus der Dränmatte als erstes Wasser aufnehmen und an tiefer liegende Bereiche bzw. in geringem Umfang an die Dränmatte über Verdunstung abgeben. Entsprechend dem Bestandsplan liegen die Messpunkte MO1D, MO2D, MO3D und MO4B in der nassen Seite

bzw. MW1D, MW2D, MW3D und MW4B in der trockenen Seite in geringem Abstand unterhalb der Dränmatte.

In [Abb. 8.17](#) sind die zeitlichen Verläufe der volumetrischen Wassergehalte an den Messpunkten MO1D, MO2D, MO3D und MO4B für die nasse Einbaubedingung dargestellt. Nach Einbau lagen die volumetrischen Wassergehalte zwischen 48 % und 52 % und damit deutlich unter dem Mittelwert der nassen Einbaubedingung ($w_{\text{vol}} = 60 \%$). Es ist zu erkennen, dass die Wassergehalte im zeitlichen Verlauf zum Teil sehr starken Schwankungen unterworfen sind. Diese finden jedoch über größere Zeiträume statt und korrespondieren nicht unmittelbar mit den dokumentierten Niederschlagsereignissen. Vergleicht man die aus der oberen Dränmatte gefassten Wassermengen ([Abb. 8.14](#)) mit den Wassergehaltsänderungen dieser Sensoren, ist zu erkennen, dass eine nennenswerte Wasseraufnahme erwartungsgemäß in den Phasen stattfindet, in denen auch ein nennenswerter Abfluss in der oberen Dränmatte registriert wurde.



[Abb. 8.17](#): Wassergehaltsmessungen in den Messpunkten MO1D, MO2D, MO3D und MO4B

Die nahe an der Basis gelegenen TDR-Sonden MO1A, MO1B, MO1C und MO1D dagegen zeigen keine wesentlichen Änderungen des Wassergehaltes im Zeitraum zwischen dem Einbau im August 2008 und Juli 2010 (siehe [Abb. A3.35](#) in Anhang 3). Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese Bodenbereiche annähernd wassergesättigt sind. Wasserbewegungen können unter gesättigten Verhältnissen stattfinden, ohne dass Änderungen des Wassergehaltes bzw. der Saugspannungen erkennbar sind.

In der [Abb. 8.18](#) sind die an den Messpunkte MW1D, MW2D, MW3D und MW4B gemessenen Wassergehalte dargestellt. Diese befinden sich mit Ausnahme der Sonde MW4B im trocken verdichteten Kernmaterial ca. 20 cm unterhalb der Dränmatte. Die Sonde MW4B liegt ca. 1 m unterhalb der Dränmatte. Die volumetrischen Wassergehalte nach Einbau lagen zwischen 27 % und 37 % und damit geringfügig unter dem Mittelwert der trockenen Einbaubedingung ($w_{\text{vol}} = 38 \%$). Alle vier Messpunkte zeigen mit unterschiedlicher zeitlicher Entwicklung eine deutliche Zunahme des Wassergehaltes auf Maximalwerte von $w_{\text{vol}} \approx 55 \%$. In Abhängigkeit von der Tiefe der einzel-

nen Sensoren wurden erste Wassergehaltsänderungen bereits im November 2008 (MW3D) bzw. erst im März 2009 (MW4B) beobachtet. Wie auch im Bereich der nassen Einbaubedingung beobachtet, kommt es im Sommerhalbjahr in trockenen Phasen zu einer Abnahme des Wassergehaltes. Diese ist jedoch deutlich schwächer ausgeprägt als im Bereich der nassen Einbaubedingung, so dass über den gesamten Verlauf zwischen August 2008 und Juli 2010 eine deutliche Zunahme des Wassergehaltes zu verzeichnen ist.

In der Abb. 8.19 sind die Wassergehaltsmessungen an den Messstellen MW1A, MW2A, MW3A und MW4A dargestellt. Diese befinden sich an der Basis des trocken verdichteten organogenen Tons ca. 10 cm oberhalb der unteren Dränmatte. Im Vergleich zu den nahe der oberen Dränmatte gelegenen Sensoren zeigen sie deutlich geringere Schwankungen. Im gesamten Verlauf ist für die Sensoren MW1A, MW2A und MW3A eine Zunahme des Wassergehaltes von ca. 3 % erkennbar. Die Sonde MW4A, die vergleichsweise nah am Böschungsfuß liegt, weist im betrachteten Zeitraum eine deutlich Zunahme des Wassergehaltes von ca. 10 % auf.

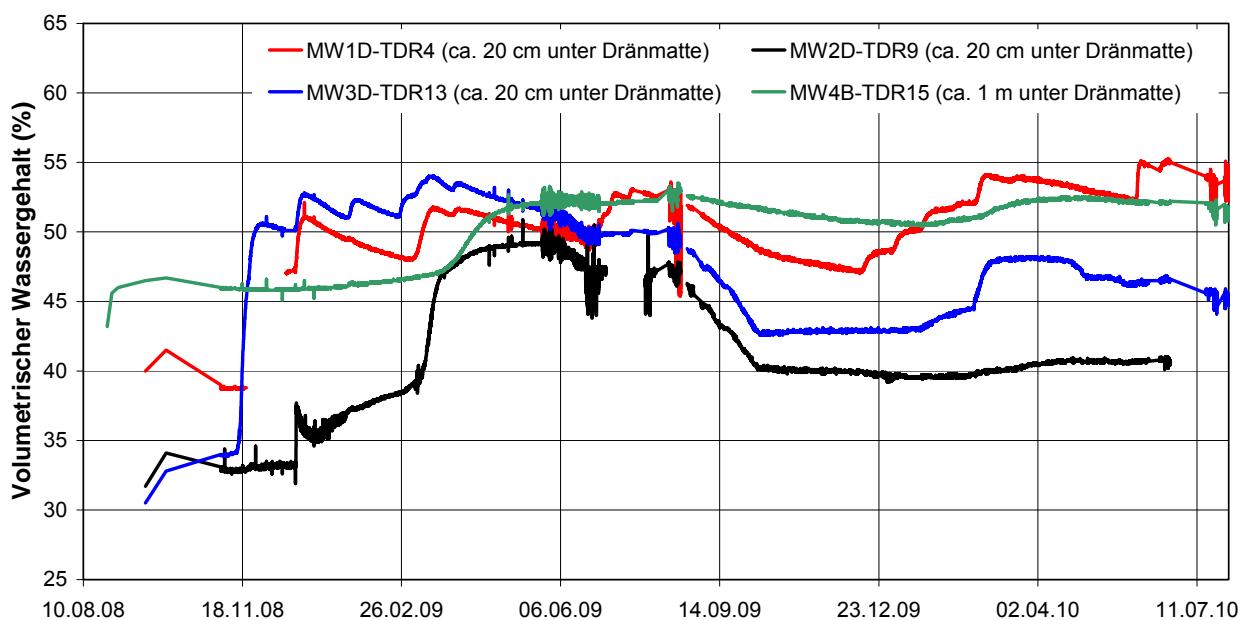


Abb. 8.18: Wassergehaltsmessungen in den Messpunkten MW1D, MW2D, MW3D und MW4B

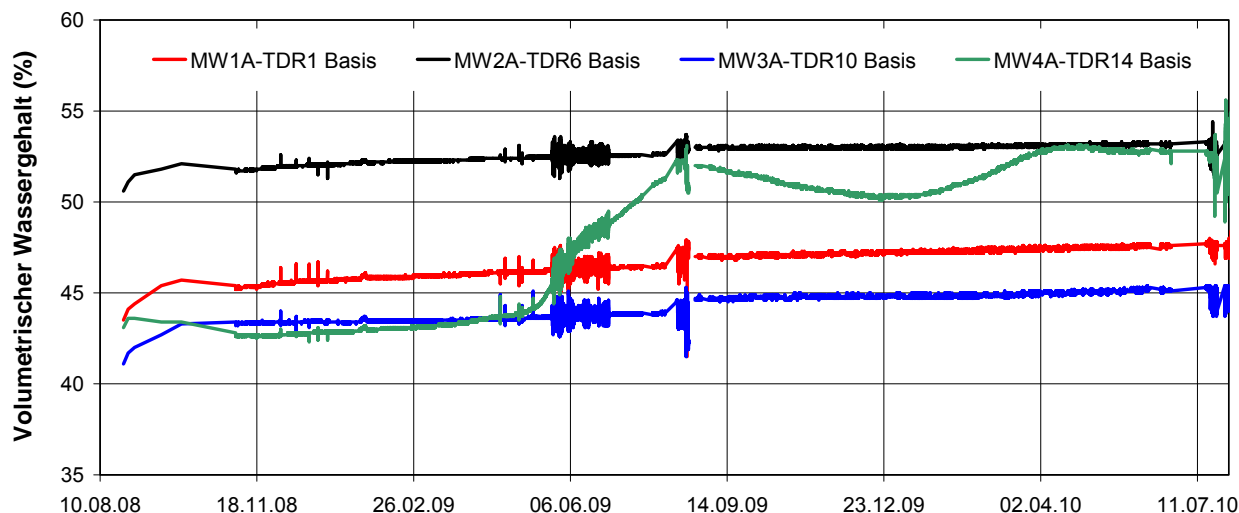


Abb. 8.19: Wassergehaltsmessungen im trocken verdichteten organogenen Ton an der Basis

8.5.4 Temperaturverläufe

In der [Abb. 8.20](#) sind die mit Hilfe der in den Tensiometern integrierten Temperatursensoren im westlichen Bereich der Versuchsschüttung gemessenen Temperaturverläufe dargestellt. Diese umfassen die in unterschiedlichen Tiefen im trocken verdichteten Kern befindlichen Tensiometer MW1A, MW3A, MW3C, MW3D und das im Oberboden gelegene Tensiometer MW4C. Die jahreszeitliche Schwankung der Lufttemperatur wird durch den im Oberboden befindlichen Sensor gut wiedergegeben. Im strengen Winter 2009/2010 wurden dort Minimalwerte von ca. 0°C gemessen. Mit zunehmendem Abstand der Sensoren von der Bodenoberfläche nimmt der Unterschied zwischen den gemessenen Maximal- und Minimalwerten ab. Außerdem treten die Maximal- und Minimalwerte im Vergleich zum zeitlichen Verlauf der Lufttemperatur mit zunehmender Tiefe verzögert auf. So zeigt das etwa in der Mitte der Versuchsschüttung an der Basis gelegene Tensiometer MW1A ein sehr träges Verhalten mit einem Maximalwert der Temperatur im Winter und einem Minimalwert im Sommer. Dies resultiert aus der geringen Wärmeleitfähigkeit und dem damit verbundenen langsamen Wärmetransport im trocken verdichteten organogenen Ton.

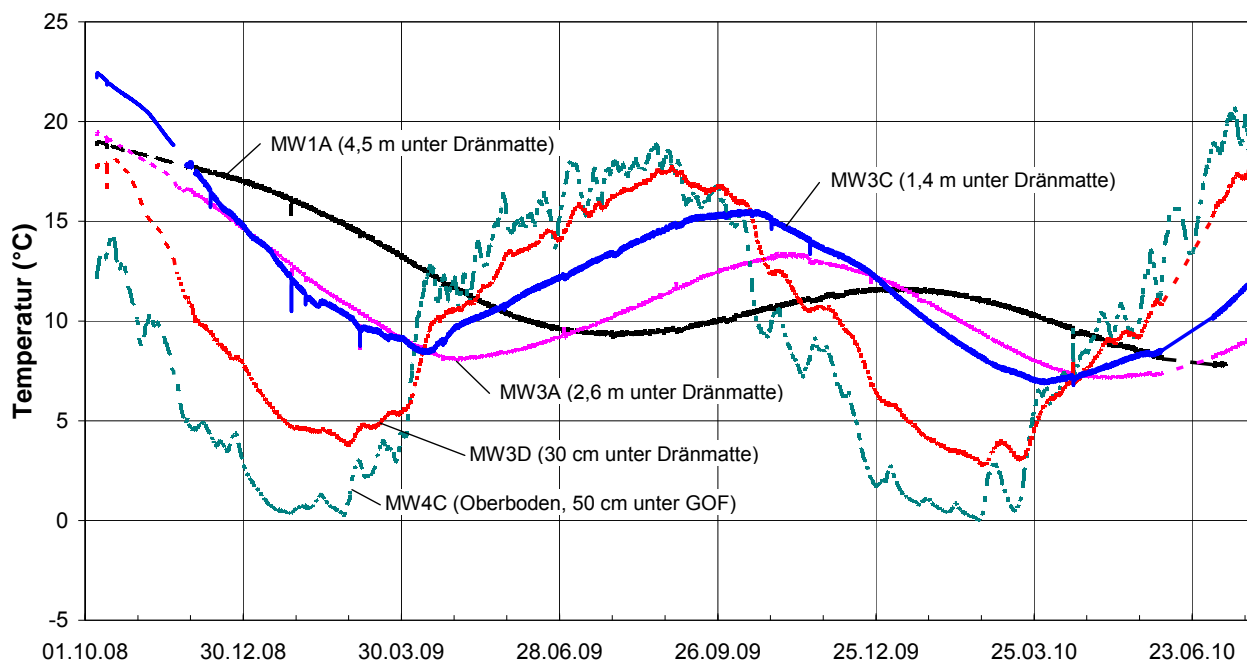


Abb. 8.20: Temperaturverläufe im westlichen Bereich der Versuchsschüttung

8.5.5 Evapotranspiration

Mit der an der Versuchsschüttung installierten Klimastation werden neben den Niederschlägen, die Nettostrahlung, die Windrichtung, die Windgeschwindigkeit, die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit gemessen. Diese Daten wurden verwendet, um den zeitlichen Verlauf der Evapotranspiration für die Versuchsfelder der Versuchsschüttung abzuschätzen. Die potentielle Evapotranspiration ET_p einer horizontalen Fläche wurde dabei mit Hilfe der in Anhang 3.5 beschriebenen Methode nach Penman-Monteith ermittelt. Zur Ermittlung des von MONTEITH (1965) eingeführten aerodynamischen Widerstandes wurde für den mit Gras bewachsenen Versuchshügel eine Bewuchshöhe von 15 cm angenommen. Für den Blattflächenindex LAI ergibt sich daraus bei Ansatz der Abschätzung nach ALLEN ET AL. (1998) ein Wert von 3,6. Der Bestandswiderstand r_s wurde damit zu 56 s/m abgeschätzt.

Das Verfahren nach Penman-Monteith zur Ermittlung der potentiellen Evapotranspiration setzt allerdings eine horizontale Bezugsfläche voraus. Auf geneigten Flächen stellen sich aufgrund der unterschiedlichen Strahlungsexposition und der größeren Fläche der geneigten Oberfläche im Vergleich zu einer horizontalen Fläche andere Verdunstungsraten ein. Deshalb wurde die nach Penman-Monteith ermittelte potentielle Evapotranspiration unter Berücksichtigung der von GOLF (1981) aufgestellten Diagramme korrigiert. Für die südseitig ausgerichteten, unter $26,5^\circ$ geneigten Versuchsfelder wurde dabei ein Korrekturfaktor $f_h = 2,0$ für das Winterhalbjahr und $f_h = 1,25$ für das Sommerhalbjahr abgelesen. Durch Multiplikation dieses Faktors mit der nach Penman-Monteith ermittelten potentiellen Evapotranspiration wurde die auf die Horizontalprojektion der Versuchsfelder bezogene potentielle Evapotranspiration bestimmt.

Die potentielle Evapotranspiration umfasst die direkte Verdunstung von der Bodenoberfläche und die Wasseraufnahme durch die Vegetation bei vollständiger Sättigung des Bodens. Nimmt der Sät-

tigungsgrad des Bodens im Zuge der Verdunstung jedoch ab, reduziert sich auch die hydraulische Leitfähigkeit. Dies führt zu einer Abnahme der direkten Verdunstung von der Bodenoberfläche und zu einer Reduzierung des von der Vegetation aufgenommenen Bodenwassers. Man spricht in diesem Fall von der tatsächlichen Evapotranspiration. Mit dem verwendeten Ansatz nach Penman-Monteith lässt sich jedoch nur die potentielle vegetationsspezifische Evapotranspiration ermitteln. Zur Bestimmung der tatsächlichen Evapotranspiration muss die Abhängigkeit der Wasseraufnahme durch die Vegetation vom Bodenwassergehalt berücksichtigt werden. Dazu wurde der Ansatz nach DISSE (1999) herangezogen:

$$ET_a = \frac{1 - e^{-r \cdot \frac{\theta - \theta_{PWP}}{\theta_{FK} - \theta_{PWP}}}}{1 - 2 \cdot e^{-r} + e^{-r \cdot \frac{\theta - \theta_{PWP}}{\theta_{FK} - \theta_{PWP}}}} \cdot ET_p \quad (8.1)$$

Dabei ist r [-] ein vegetationsspezifischer Parameter, θ der aktuelle volumetrische Wassergehalt, θ_{PWP} der volumetrische Wassergehalt beim permanenten Welkepunkt und θ_{FK} der volumetrische Wassergehalt bei der Feldkapazität.

Der Parameter r wurde unter Berücksichtigung des Grasbewuchses der Versuchsschüttung nach DISSE (1999) mit $r = 4$ angenommen. Der volumetrische Wassergehalt beim permanenten Welkepunkt wurde aus der für den Oberboden ermittelten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung zu 0,24 ermittelt (siehe Abschnitt 8.6.3). Nach SCHEFFER UND SCHACHTSCHABEL (2002) wurde dabei angenommen, dass der permanente Welkepunkt bei einer Matrixspannung von 1500 kPa liegt. Die Feldkapazität wurde unter Berücksichtigung der im Frühjahr 2010 zu Beginn der Vegetationsperiode gemessenen Wassergehalte im Oberboden zu 0,45 angesetzt (vgl. [Abb. 8.15](#)).

Der pflanzenverfügbare, aktuelle volumetrische Wassergehalt im Oberboden wurde aus den Feldmessdaten unter Heranziehung der ca. 50 cm unter der Geländeoberfläche im Böschungsbereich befindlichen TDR-Sonde MW4C (siehe [Abb. 8.15](#)) bestimmt.

In [Abb. 8.21](#) und [Abb. 8.22](#) sind die Tageswerte bzw. Monatswerte der so ermittelten tatsächlichen Evapotranspiration für den Zeitraum zwischen Oktober 2008 und Juli 2010 dargestellt.

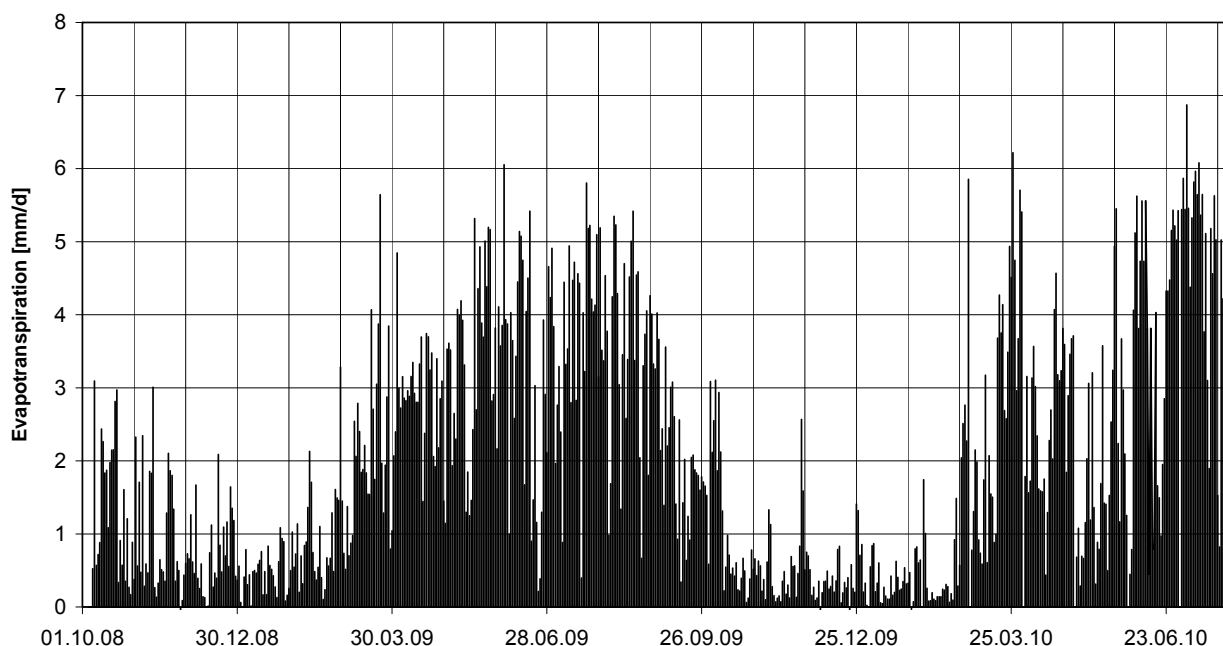


Abb. 8.21: Tageswerte der tatsächlichen Evapotranspiration (für die südseitige Böschung)

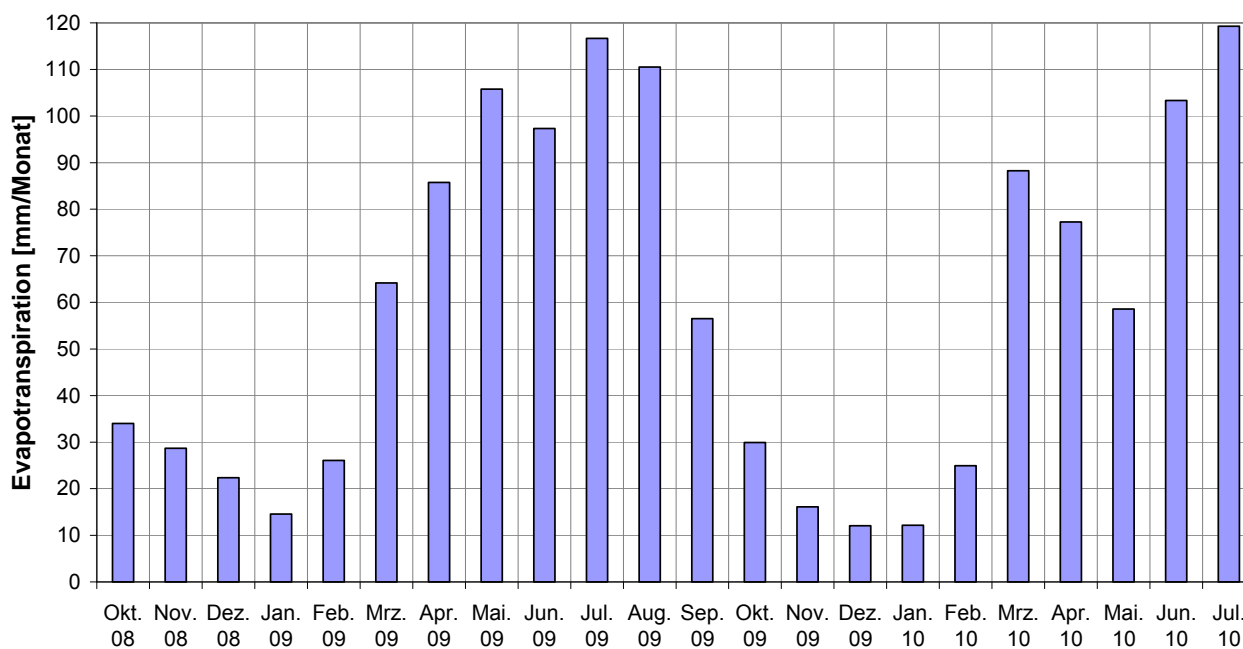


Abb. 8.22: Monatswerte der tatsächlichen Evapotranspiration (für die südseitige Böschung)

Für den Zeitraum zwischen Oktober 2008 und Juli 2010 erhält man daraus für die südseitige Böschung eine gesamte tatsächliche Evapotranspiration von 1304 mm. Dem steht ein gemessener Gesamtniederschlag von 1420 mm gegenüber. Damit ergibt sich ein auf den Niederschlag bezogener Anteil der Evapotranspiration von ca. 92 %.

8.5.6 Zusammenfassung

Die Messergebnisse und die auf Basis der Klimadaten abgeschätzte Evapotranspiration zeigen, dass vom Oberboden bezogen auf den Niederschlag nur sehr wenig Sickerwasser an die darunter liegende Dränmatte abgegeben wird. Dies beruht zum einen auf dem großen Speichervermögen des Oberbodens und der großen Wasseraufnahme durch den Bewuchs. Zum anderen wird dies unterstützt durch die zwischen dem Oberboden und dem verdichteten organogenen Ton gelegene Dränmatte. Diese wirkt als Kapillarsperre und unterbindet damit einen kapillaren Wassertransport vom Oberboden in den verdichteten Kernbereich. Eine Wasserabgabe aus dem Oberboden in die Dränmatte kann dadurch erst bei einer fast vollständigen Sättigung des Oberbodens erfolgen. Damit trägt die Dränmatte zu einer Reduzierung des in den verdichteten Kern eindringenden Sickerwassers bei, auch wenn in dieser nur wenig Sickerwasser abgeführt wird. Durch ihre Wirkung als Kapillarsperre unterbindet die Dränmatte allerdings auch einen bezüglich der Sickerwassermengen an der Basis günstigen kapillaren Wassertransport vom verdichteten Kern in den Oberboden.

Die Sickerwasserabgabe aus dem verdichteten organogenen Ton ist nicht direkt abhängig von einzelnen Niederschlagsereignissen. Einen großen Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Sickerwassermengen hat der Einbauwassergehalt. Bei hohen Einbauwassergehalten kann es im Zuge der Verdichtung zur Entstehung von Porenwasserüberdrücken kommen, was einen Konsolidationsvorgang verbunden mit einer Porenwasserabgabe nach sich zieht. Unabhängig von einem möglichen Konsolidationsvorgang strebt der Boden prinzipiell einen Wassergehalt an, den er unter den vorgegebenen Randbedingungen gegen die Schwerkraft zurückhalten kann. Dieser ist jedoch von verschiedenen Parametern, u. a. der Poren- und Aggregatstruktur des Bodens abhängig. Für die nasse Einbaubedingung kann entsprechend den Messergebnissen davon ausgegangen werden, dass sich im verdichteten organogenen Ton seit etwa Januar 2010 näherungsweise ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Dabei ist zu beachten, dass ein vollkommener Gleichgewichtszustand aufgrund der stets variablen klimatischen Verhältnisse nicht möglich ist. Entsprechend den durchgeführten Bohrungen hat der gravimetrische Wassergehalt des nass verdichteten organogenen Tons im September 2009 im Mittel etwa 65 % betragen. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der TDR-Sonden wird angenommen, dass sich der Wassergehalt im Mittel seither nicht wesentlich verändert hat. Die Sickerwasserrate an der Basis der nassen Seite ist seit Januar 2010 äußerst gering, da wie beschrieben prinzipiell nur ein geringer Anteil des Niederschlages vom Oberboden an die Dränmatte abgegeben wird und der überwiegende Teil des abgegebenen Wassers in der Dränmatte abgeführt wird.

Im Bereich der trockenen Einbaubedingung liegt der Wassergehalt, den der trocken verdichtete organogene Ton gegen die Schwerkraft zurück halten kann, über dem Einbauwassergehalt. Dementsprechend kommt es im trocken verdichteten organogenen Ton zu einer Speicherung des über die Dränmatte aufgenommenen Wassers. Dieser Prozess ist jedoch äußerst langsam, da insgesamt nur sehr wenig Wasser in der Dränmatte abgeführt wird und vom verdichteten organogenen Ton aufgenommen werden kann. Es ist jedoch zukünftig von einer weiteren Zunahme des durchschnittlichen Wassergehaltes im trocken verdichteten Ton auszugehen. Langfristig ist damit auch eine Zunahme der Sickerwasserrate an der Basis des trocken verdichteten Tons möglich.

8.6 Numerische Modellierung des Wasserhaushaltes der Versuchsschüttung

Da die an der Versuchsschüttung gewonnenen Ergebnisse auf andere Erdbauwerke mit ähnlichen Randbedingungen übertragen werden sollen, wurde geprüft, inwieweit der Wasserhaushalt der Versuchsschüttung mit Hilfe einer numerischen Modellierung abgebildet werden kann.

Die Untersuchungen wurden mit dem Grundwassermodell FEFLOW (Version 5.4) der DHI Wasy GmbH, Berlin, durchgeführt. Damit kann die Wasserbewegung in der gesättigten wie auch ungesättigten Zone unter stationären und instationären Bedingungen beschrieben werden. Durch die Wahl eines Grundwassermodells beschränkt man sich bei der Abbildung der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Boden auf die Simulation des in den Boden eindringenden Sickerwassers infolge von Niederschlagsereignissen. Die Wasserbewegung im Boden wird auf Grundlage der in Abschnitt 4.1.5 dargestellten Richards-Gleichung beschrieben. Die partielle, nichtlineare Differentialgleichung wird unter Anwendung der Finite-Elemente-Methode numerisch gelöst. Die Beziehungen zwischen der Saugspannung und dem volumetrischen Wassergehalt sowie der hydraulischen Leitfähigkeit und dem volumetrischen Wassergehalt werden mit dem in Abschnitt 4.1 dargestellten Ansatz nach VAN GENUCHTEN (1980) und MUALEM (1976) beschrieben.

Dadurch, dass das verwendete Sickerwassermodell nur die Wasserbewegung im Boden abbilden kann, lassen sich die durch Evapotranspiration abgegebene Wassermenge und die als Oberflächenwasser abgeführte Wassermenge aus diesen Modellen nicht ermitteln, sondern müssen getrennt davon abgeschätzt werden und bei der Ermittlung der in den Boden infiltrierenden Wassermenge berücksichtigt werden. Dies ist jedoch mit Schwierigkeiten verbunden, da die Evapotranspiration, der Oberflächenabfluss und die Infiltration nicht nur von den klimatischen Verhältnissen (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Strahlung) abhängen, sondern auch durch die zustandsabhängigen Eigenschaften des Bodens (Sättigungsgrad) beeinflusst werden und die Vorgänge an der Bodenoberfläche damit mit der Wasserbewegung im Boden gekoppelt sind. Bei Ansatz von realitätsnahen zeitlich variablen Randbedingungen sind derartige Sickerwassermodelle daher nur eingeschränkt zur Beschreibung des Wasserhaushaltes geeignet. Für den vorliegenden Fall konnte ein Sickerwassermodell verwendet werden, da ausreichend Messdaten zur Verfügung standen, um die Evapotranspiration abzuschätzen. Jedoch mussten im Hinblick auf den Oberflächenabfluss, zu dem keine Messdaten vorliegen, Vereinfachungen getroffen werden.

8.6.1 Vorgehensweise

Zunächst wurde die Geometrie der Versuchsschüttung unter Berücksichtigung der Funktion der einzelnen Schichten entsprechend den Modellanforderungen modifiziert. Danach wurden das FE-Netz generiert und Bodenkennwerte und Randbedingungen zugewiesen. Zur Analyse des Wasserhaushaltes der Versuchsschüttung wurden Berechnungen unter Ansatz von zeitlich variablen Randbedingungen unter Berücksichtigung der Evapotranspiration durchgeführt. Die Höhe der Evapotranspiration wurde wie in Abschnitt 8.5.5 beschrieben nach dem Modell von Penman-Monteith abgeschätzt. Über den Oberflächenabfluss lagen keine Messdaten vor. Da dieser auch nicht anhand einfacher Formeln abgeschätzt werden konnte, wurde vereinfachend angenommen, dass kein Oberflächenabfluss stattfindet. Der auf der Modelloberfläche definierte Zu- bzw. Abfluss ergibt sich demnach als Differenz aus dem gemessenen Niederschlag und der abgeschätzten Eva-

potranspiration. Aus den halbstündlich erfassten Messdaten wurden dazu Tageswerte des Niederschlages und der Evapotranspiration gebildet.

8.6.2 Modellgeometrie

Die in den Messfeldern der Versuchsschüttung vorliegenden 2-dimensionalen Strömungsverhältnisse wurden in Form des in [Abb. 8.23](#) dargestellten Querschnittes abgebildet.

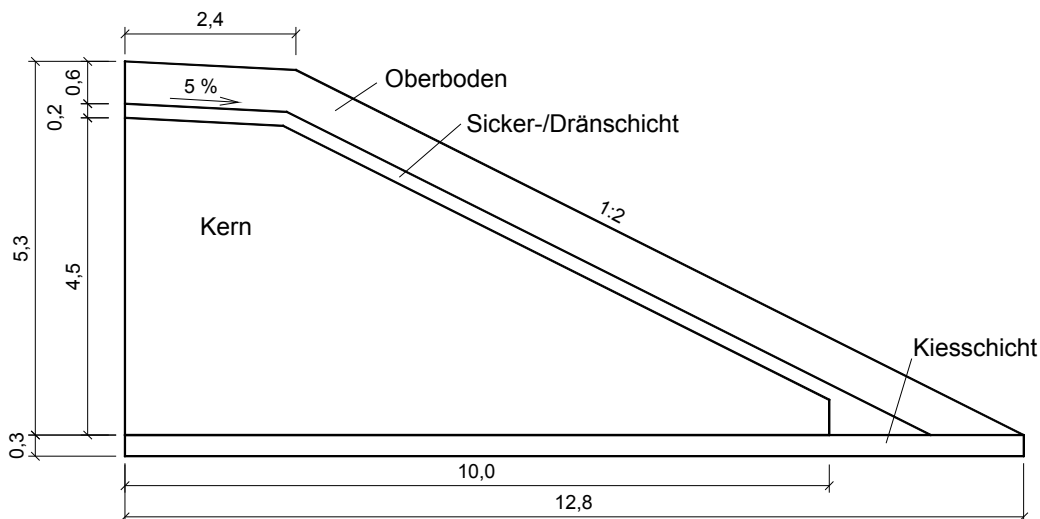


Abb. 8.23: Querschnitt des 2-D-Modells (Abmessungen in m)

Die zwischen Oberboden und Kernmaterial eingebrachte Dränmatte wurde aus Gründen der Modellierbarkeit als 20 cm dicke Kiesschicht modelliert. Sehr dünne Elemente bereiten Schwierigkeiten bei der Generierung des Finite-Elemente-Netzes und können zu erheblichen numerischen Problemen führen.

Das FE-Netz besteht aus ca. 47.000 Dreieckselementen. Im Bereich der Oberboden- und der Sickerschicht, in denen die größte Wasserbewegung zu erwarten ist, wurde das Netz jeweils lokal verfeinert (siehe [Abb. 8.24](#)).

8.6.3 Bodenkennwerte

Die Bodenkennwerte für den verdichteten organogenen Ton wurden entsprechend den in Abschnitt 6.7.5 dargestellten Ergebnissen der durchgeführten Laboruntersuchungen angenommen. Die Hysterese der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung wird in FEFLOW mit einem Ansatz nach SCOTT ET AL. (1983) beschrieben. Die Hauptbewässerungskurve der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung wurde für die trocken verdichtete Probe experimentell nicht ermittelt und wurde deshalb aus den Messwerten für die Erstabwässerung der Probe 9135-t abgeschätzt (siehe [Abb. A3.36](#) in Anhang 3).

Zur Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung des Oberbodens wurden ergänzend Laboruntersuchungen durchgeführt. Diese erfolgten wie die Untersuchungen am verdichteten organogenen Ton in einer Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzelle und mit Hilfe von Tensio- metern. Die Versuchsdurchführung entsprach den in Abschnitt 6.7.2.2 und 6.7.3 enthaltenen Aus-

führungen zum Ton mit organischen Beimengungen. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen mit der parametrisierten Darstellung nach van Genuchten sind in der Abb. A3.37 in Anhang 3 dargestellt. Die van Genuchten-Parameter für den Hauptbewässerungs- und Hauptentwässerungsast sind in der Tab. 8.1 für das Kernmaterial und den Oberboden zusammenfassend dargestellt.

Als Durchlässigkeitsbeiwerte im gesättigten Zustand wurden für den verdichteten Ton mit organischen Beimengungen $k = 5 \cdot 10^{-8}$ m/s (trockene Seite) bzw. $k = 5 \cdot 10^{-9}$ m/s (nasse Seite) angesetzt. Für den Oberboden lagen keine verlässlichen Laborversuche zur Durchlässigkeit im gesättigten Zustand vor. Beim zunächst angenommenen Durchlässigkeitsbeiwert von $k = 5 \cdot 10^{-8}$ m/s kam es zu numerischen Schwierigkeiten, da die auf der Dammoberfläche definierte Infiltrationsrate vom Oberboden nicht aufgenommen werden konnte. Dies ist darauf zurück zu führen, dass bei hohen vorgegebenen Infiltrationsraten aufgrund des geringen Durchlässigkeitsbeiwertes von $k = 5 \cdot 10^{-8}$ m/s nicht die gesamte Wassermenge infiltrieren kann und es deshalb zu einem Oberflächenabfluss kommen müsste. Ein Oberflächenabfluss kann in den Modellberechnungen jedoch nicht abgebildet werden. Zur Vermeidung der numerischen Probleme wurde der Durchlässigkeitsbeiwert des Oberbodens deshalb mit $k = 5 \cdot 10^{-7}$ m/s angesetzt. Damit konnte die über die Randbedingung definierte Infiltrationsrate vom Oberboden vollständig aufgenommen werden.

Für die Dränschicht wurden die von EKBLAD UND ISACSSON (2007) an einem schwach schluffigen Kies (6 % Feinkornanteil, GU nach DIN 18196) experimentell ermittelten Bodenkennwerte herangezogen. Zum Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens machen EKBLAD UND ISACSSON (2007) keine Angaben; dieser wurde zu $k = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s abgeschätzt.

Der unterhalb des Kernmaterials modellierten Kiesschicht wurden ebenfalls die Parameter nach EKBLAD UND ISACSSON (2007) zugewiesen. Um eine mögliche Wasseraufnahme des Kernmaterials über die unterhalb gelegene Kiesschicht im Zuge der Modellberechnungen zu minimieren, wurde der Durchlässigkeitsbeiwert im gesättigten Zustand dabei allerdings auf $k = 5 \cdot 10^{-5}$ m/s verringert.

Schicht	Oberboden		Kernboden – trocken		Kernboden - nass		Drän- / Kies-schicht
	OT		OT		OT		GW/GU
DIN 18196	Bewässerung	Entwässerung	Bewässerung	Entwässerung	Bewässerung	Entwässerung	Be-/ Entwässerung
k_f [m/s]	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-3} / 5 \cdot 10^{-5}$
S_s	1	1	1	1	1	1	1
S_r	0	0	0	0	0	0.013	0.048
A [m^{-1}]	1	0.11	3.2	0.45	0.74	0.08	46
n	1.24	1.24	1.18	1.20	1.23	1.36	1.79
$m = 1-(1/n)$	0.194	0.194	0.153	0.137	0.187	0.259	0.441
Porenanteil	0.630	0.630	0.638	0.638	0.611	0.611	0.23

Tab. 8.1: Bodenkennwerte für die Simulationsberechnungen

8.6.4 Anfangsbedingungen

Im Zuge der Herstellung der Versuchsschüttung wurde das Kernmaterial in der Osthälfte mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von ca. 75 % und in der Westhälfte mit einem durchschnittlichen

Wassergehalt von ca. 49 % eingebaut. Dies entspricht Sättigungsgraden von ca. 98 % in der Osthälfte und ca. 66 % in der Westhälfte. Der Wassergehalt des Oberbodens betrug beim Einbau ca. 50 %, der Sättigungsgrad ca. 80 %. Damit liegt im Einbauzustand in der Versuchsschüttung kein Gleichgewichtszustand vor, da entsprechend den Sättigungsgraden und den Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen im Einbauzustand der Oberboden und das Kernmaterial unterschiedliche Matrixpotentiale aufweisen. Dadurch kommt es im Bestreben eines Potentialausgleiches zu Wasserbewegungen im Hügel. Den Modellberechnungen konnte dieser Zustand nicht als Anfangsbedingung zugrunde gelegt werden, da in den Modellberechnungen von einer derartigen Situation ausgehend kein rechnerisch stabiler Zustand gefunden werden konnte. Vereinfachend wurde daher im gesamten Modell ein konstantes Matrixpotential angesetzt. Dieses wurde so gewählt, dass im Kernmaterial im Anfangszustand ein Sättigungsgrad von 66 % (trocken) bzw. 98 % (nass) vorlag. Für die nasse Einbaubedingung ergab sich daraus eine Matrixspannung von -3 kPa und für die trockene Einbaubedingung von -35 kPa. Im Oberboden führten diese zu Sättigungsgraden von 98 % bzw. 79 %. Für die nasse Einbaubedingung wurde der Anfangssättigungsgrad des Oberbodens im Modell damit deutlich überschätzt. Bei der Definition dieser Randbedingung ist zu beachten, dass daraus zwar keine Sprünge im hydraulischen Potential an den Schichtgrenzen resultieren, im Modell aber kein Gleichgewichtszustand vorliegt und es beispielsweise bei der nassen Einbaubedingung zu einer Schwerkraft-bedingten Wasserabgabe kommt.

8.6.5 Randbedingungen

Mit dem gewählten Berechnungsmodell kann wie bereits einführend beschrieben prinzipiell nur die Wasserbewegung im Boden abgebildet werden. Die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse der Evapotranspiration, des Oberflächenabflusses und der Infiltration müssen dabei vorab quantifiziert und über die Randbedingung definiert werden. Die Infiltration ergibt sich prinzipiell aus der Differenz zwischen dem Niederschlag und dem Oberflächenabfluss abzüglich der Verdunstung an der Bodenoberfläche. Der Niederschlag wurde entsprechend den mit der Klimastation gewonnenen Messdaten angesetzt. Die Evapotranspiration wurde wie in Abschnitt 8.5.5 beschrieben anhand der Messdaten mit dem Modell nach Penman-Monteith ermittelt. Der Oberflächenabfluss wurde im Hinblick auf die Sickerwassermengen an der Basis auf der sicheren Seite liegend zu Null angenommen. An der Oberfläche der fiktiven Dränschicht wurde dementsprechend als Randbedingung die Differenz zwischen dem Niederschlag und der nach Penman-Monteith abgeschätzten Evapotranspiration in Form von Tageswerten angesetzt. Da die auf die Böschungsoberfläche bezogene Höhe des Niederschlages und der Evapotranspiration u. a. von der Geländeneigung abhängt, wurden der Kronen- und der Böschungsbereich dabei getrennt voneinander betrachtet (siehe [Abb. A3.38](#) und [Abb. A3.39](#) in Anhang 3).

An der Modellunterseite wurde ein konstantes Potential von -1 m definiert, was einem Abstand der Grundwasseroberfläche von der Unterseite des verdichteten organogenen Tons von einem Meter entspricht. Der linke Modellrand ist undurchlässig und bildet damit eine feste Berandung. In [Abb. 8.24](#) ist das verwendete Modell mit den Randbedingungen dargestellt.

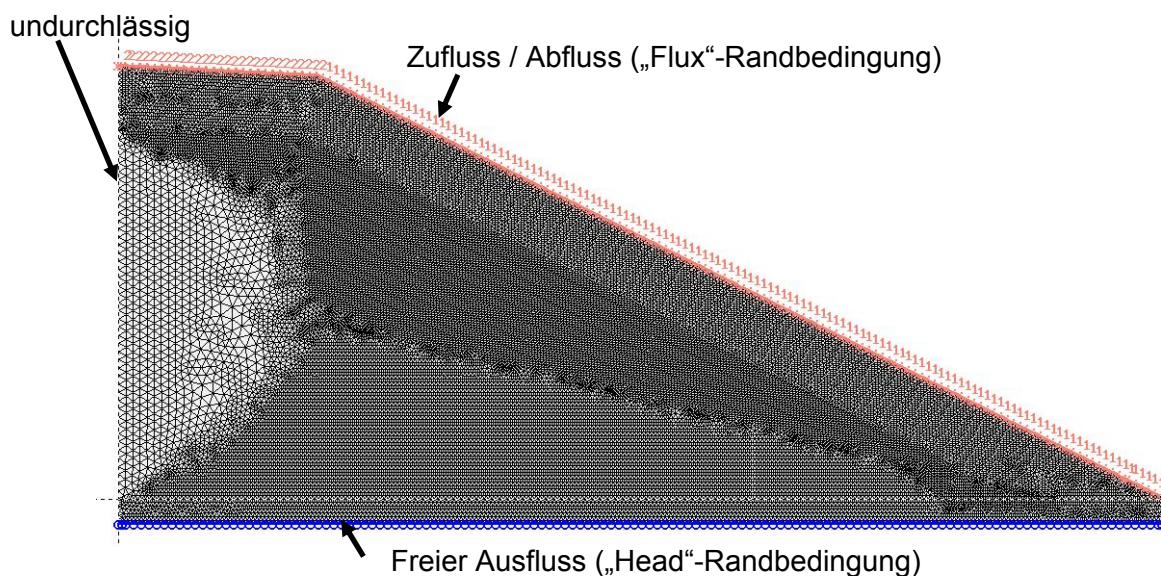


Abb. 8.24: FE-Modell mit Randbedingungen

8.6.6 Ergebnisse

8.6.6.1 Nasse Einbaubedingung

Die Berechnungen zur nassen Einbaubedingung stellten sich als sehr zeitaufwändig heraus. So betrug die Berechnungsdauer für die untersuchten 662 Tage auf dem verwendeten herkömmlichen Arbeitsplatzrechner ca. 4 Tage. Insbesondere hohe Tagesniederschläge führen zu einer sehr kleinen Zeitdiskretisierung, woraus letztlich lange Rechenzeiten resultierten.

Die [Abb. 8.25](#) stellt die in das Berechnungsmodell einströmenden und ausfließenden Wassermengen akkumuliert über die Berechnungsdauer von 662 Tagen und bezogen auf die Grundfläche mit 12,8 m Länge dar. Die in das Modell einströmenden Wassermengen („Infiltration in den Oberboden“) ergeben sich dabei aus der an der Modelloberseite definierten Randbedingung. An der Modellunterseite wird Wasser sowohl aus dem Kern als auch über die Dränschicht und den Oberboden abgegeben. Am Berechnungsende nach 662 Tagen sind dem Modell insgesamt 179 mm zugeströmt. An der Basis des Modells wurden über die Dränschicht 160 mm, den Oberboden 35 mm und den Kern 7 mm, insgesamt 207 mm, abgegeben. Dies bedeutet, dass 28 mm mehr abgegeben als aufgenommen wurden. Dies ist auf die definierte Anfangsbedingung einer Matrixspannung von -3 kPa im gesamten Modellbereich zurückzuführen, wodurch zu Beginn der Berechnung im Damm insgesamt eine größere Wassermenge vorhanden ist als vom Boden gegen die Schwerkraft zurückgehalten werden kann. Infolgedessen kommt es auch bei fehlendem Niederschlag zu einer Wasserabgabe an der Basis des Dammes.

Zusätzlich ist in [Abb. 8.25](#) die von der Dränschicht in den Kern infiltrierende Wassermenge dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die vom Kern aufgenommene Wassermenge etwa auch der an der Basis vom Kern abgegebenen Wassermenge entspricht. Betrachtet man allerdings die zeitlichen Verläufe der Infiltration und der Wasserabgabe (siehe [Abb. 8.26](#)), sind deutliche Unterschiede er-

kennbar. So tritt die Wasserabgabe an der Basis im zeitlichen Verlauf sehr gleichmäßig auf, wobei sie von anfänglich 0,014 mm/d auf 0,009 mm/d am Berechnungsende abnimmt. Die Infiltration in den Kern dagegen tritt nur in bestimmten Phasen auf und es kommt zeitweise sogar zu einer Wasserabgabe vom Kern an die darüber liegende Dränschicht. Desweiteren zeigt sich aus der Abb. 8.26, dass die Infiltration in den Kern mit der Wasserabgabe aus der Dränschicht korreliert. So findet ein Abfluss aus der Dränschicht nur in Phasen statt, in denen es auch zu einer Infiltration in den Kern kommt. Im Vergleich zu der in den Kern infiltrierenden Wassermenge werden dabei zeitweise sehr große Wassermengen von der Dränschicht am Dammfuß abgegeben. Wann und wieviel Wasser von der Dränschicht abgegeben wird, hängt wiederum vom Zustand des Oberbodens ab. Nur wenn dieser bereits fast vollständig gesättigt ist, wird Wasser in die Dränmatte abgegeben und kommt es zu einer Infiltration in den Kern bzw. einem Abfluss aus der Dränschicht (siehe Abb. 8.27). Dieser Zustand liegt in der Regel im Herbst bzw. Winter vor, wenn es zu keiner Verdunstung kommt, kann aber im Zuge von lang anhaltenden feuchten Perioden auch im Frühjahr oder Sommer auftreten.

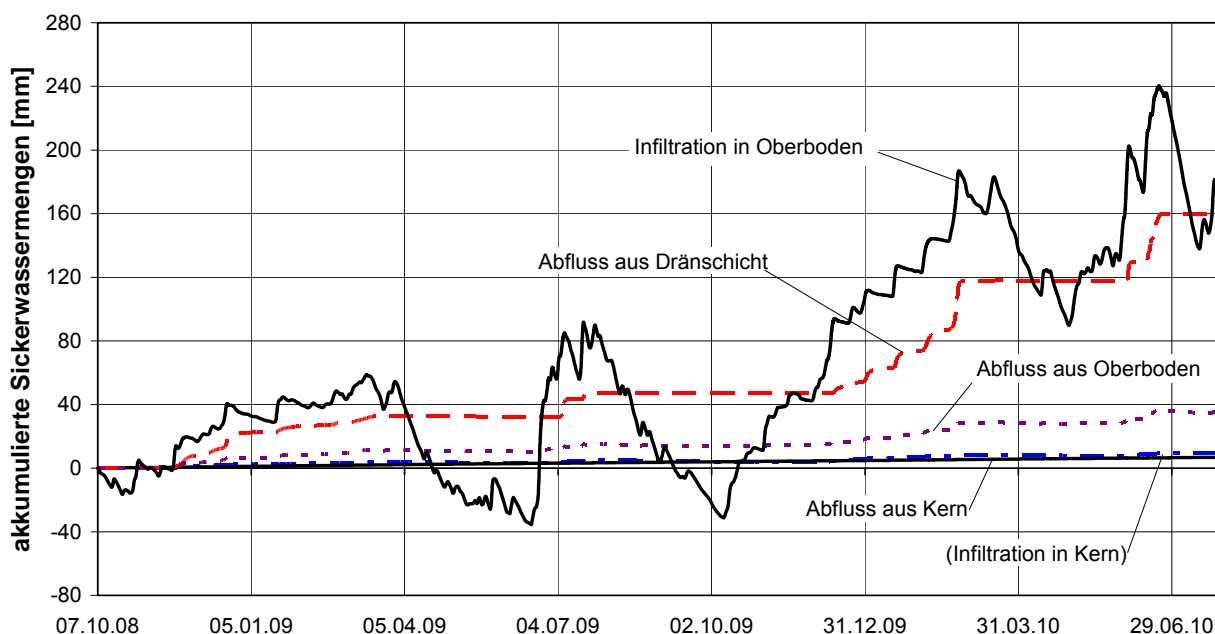


Abb. 8.25: Bilanz der Zu- und Abflüsse (Berechnung für nasse Seite)

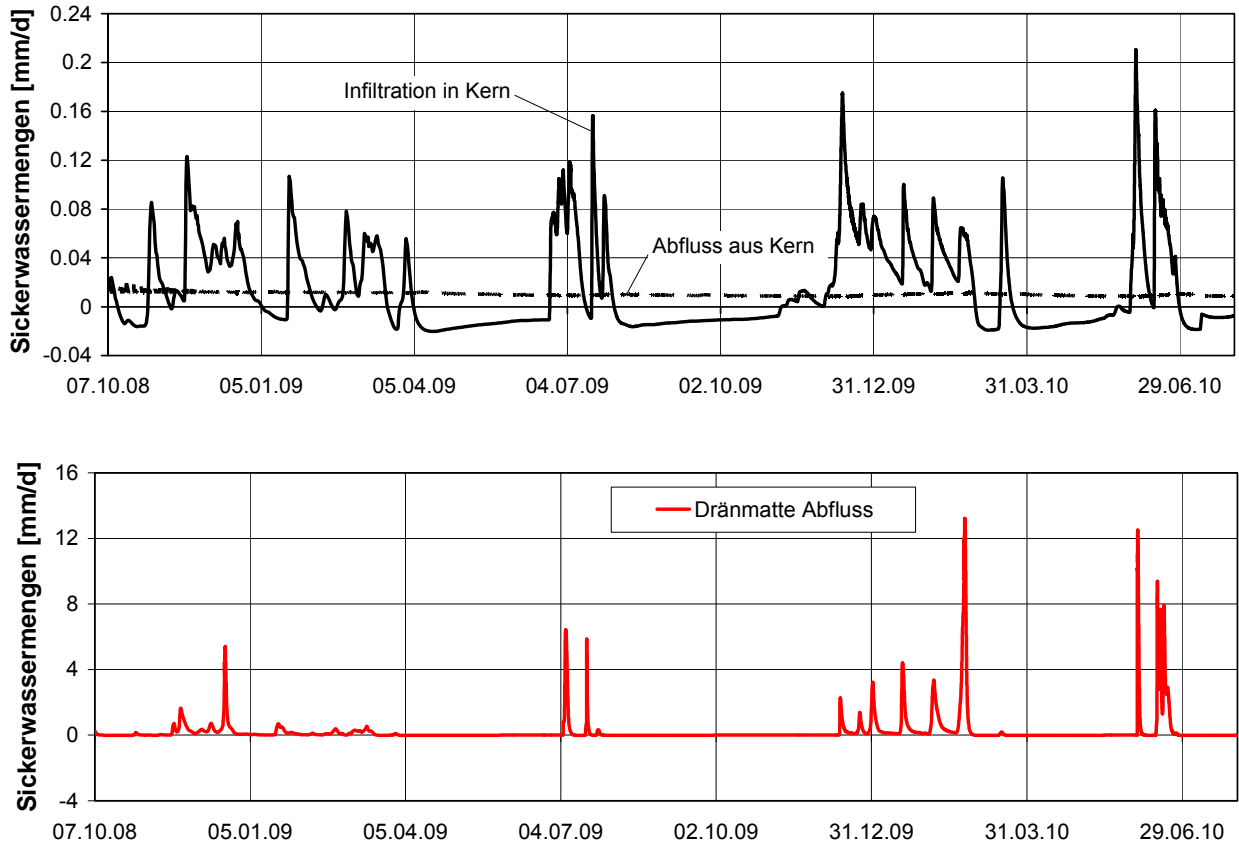


Abb. 8.26: Infiltration in Kern, Abflüsse aus Kern und Dränschicht (Berechnung für nasse Seite)

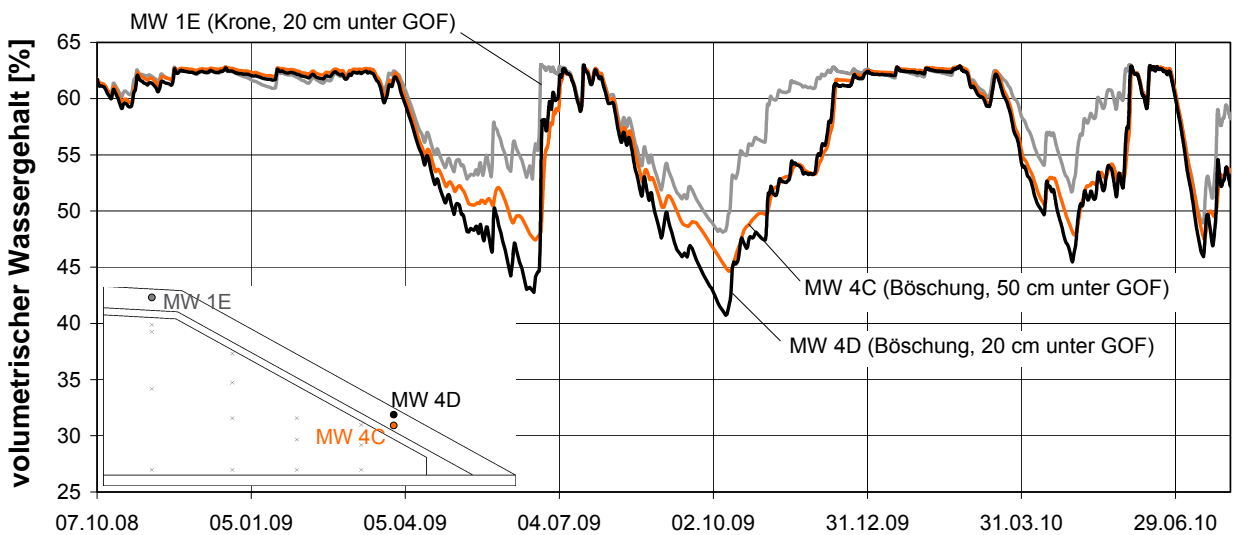


Abb. 8.27: Wassergehalte im Oberboden (Berechnung für nasse Seite)

8.6.6.2 Trockene Einbaubedingung

In der [Abb. 8.28](#) sind für die trockene Einbaubedingung die ins Modell einströmenden und ausfließenden Wassermengen akkumuliert über die Berechnungsdauer von 662 Tagen und bezogen auf die Grundfläche mit 12,8 m Länge dargestellt. Die auf der Bodenoberfläche in das Modell einströmenden Wassermengen („Infiltration in den Oberboden“) resultieren aus der dort definierten Randbedingung und entsprechen folglich weitgehend denen der nassen Einbaubedingung. Geringe Unterschiede zu dem für die nasse Einbaubedingung ermittelten Verlauf der Infiltration in den Oberboden ergeben sich aus Ungenauigkeiten bei der Auswertung mit dem Postprozessor, da die Wassermengen aus den errechneten Potentialen an den einzelnen Knoten und den zustandsabhängigen Sättigungsgraden in einer Nachlaufrechnung ermittelt werden. Insgesamt kam es im betrachteten Zeitraum zu einer Wasseraufnahme an der Dammoberfläche von 177 mm. Anders als bei der nassen Einbaubedingung findet im simulierten Zeitraum keine Sickerwasserabgabe an der Basis aus dem Kernmaterial statt. Ebenso sind die über die Dränschicht und den Oberboden abgegebenen Wassermengen deutlich geringer als bei der Berechnung für die nasse Einbaubedingung. So wurden über die Dränschicht 57 mm und den Oberboden 15 mm abgegeben. Dies bedeutet, dass von insgesamt 177 mm, die an der Dammoberfläche aufgenommen wurden, nur 72 mm an der Basis des Dammes ausgeströmt sind. Das übrige Wasser wird im Oberboden und im trocken verdichteten Kernmaterial gespeichert. Dazu ist in der [Abb. 8.28](#) ergänzend der Verlauf für die in den Kern infiltrierende Wassermenge dargestellt.

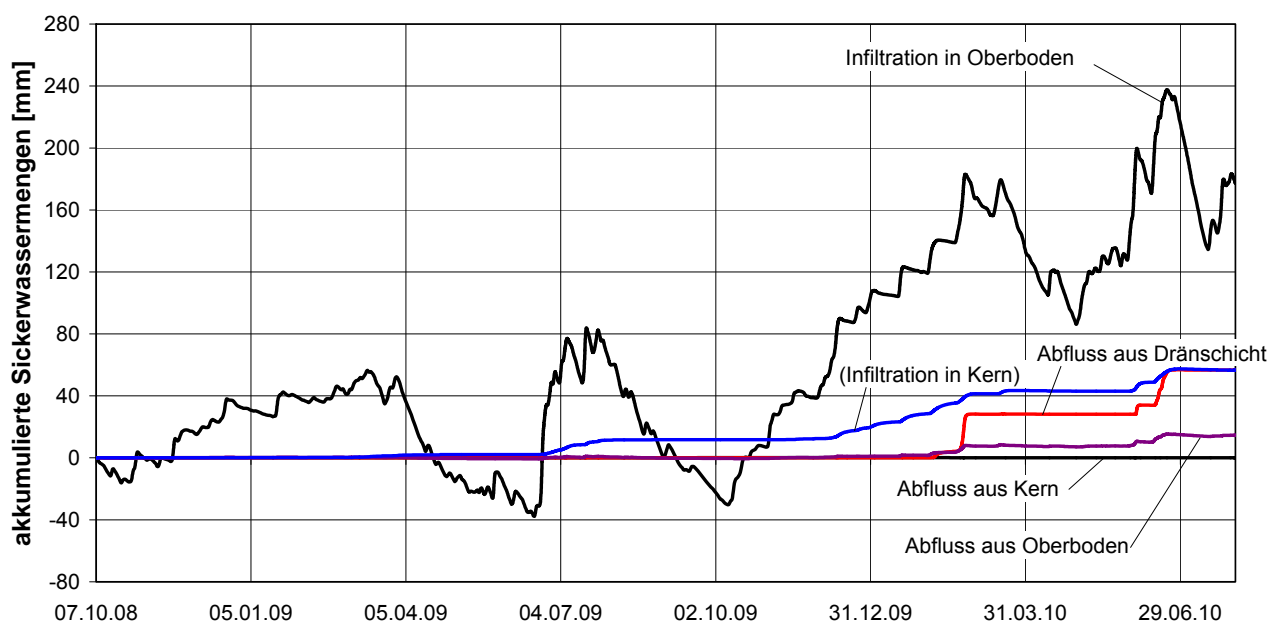
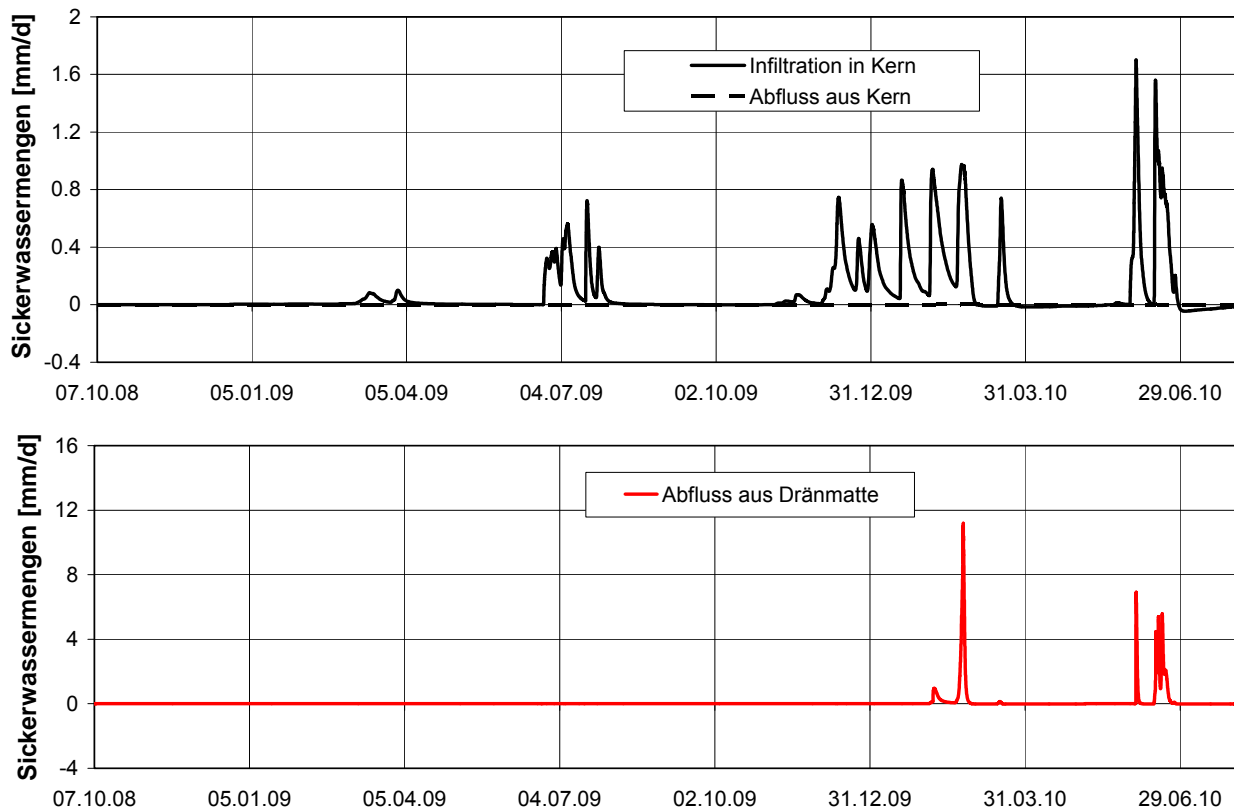


Abb. 8.28: Bilanz der Zu- und Abflüsse (Berechnung für trockene Seite)

Betrachtet man den in der [Abb. 8.29](#) dargestellten zeitlichen Verlauf der Infiltration in den Kern, ist zu erkennen, dass es nur zeitweise zu einer Wasseraufnahme durch das trocken verdichtete Kernmaterial und im Vergleich dazu nur selten zu einer Wasserabgabe aus der Dränschicht kommt. Wie auch bei der Berechnung für die nasse Einbaubedingung festgestellt wurde, hängt der zeitliche Verlauf der Wasseraufnahme durch den Kern stark vom Wassergehalt des Oberbodens

ab und tritt eine Wasserabgabe aus dem Oberboden nur bei fast vollständiger Sättigung des Oberbodens auf (siehe [Abb. 8.30](#)). Wie aus der [Abb. 8.32](#) hervorgeht, nimmt der Sättigungsgrad im Kernmaterial mit zunehmender Berechnungsdauer von der Dränmatte ausgehend zu, wobei zunächst die Bereiche unterhalb der Krone und erst später auch die in der Böschung gelegenen Bereiche Wasser aufnehmen (siehe [Abb. 8.31](#)). Die Verteilung des Sättigungsgrades nach 662 Tagen zeigt deutlich, dass erst ein vergleichsweise geringer Teil des Kernmaterials aufgesättigt ist.



[Abb. 8.29](#): Infiltration in Kern, Abflüsse aus Kern und Dränschicht (Berechnung für trockene Seite)

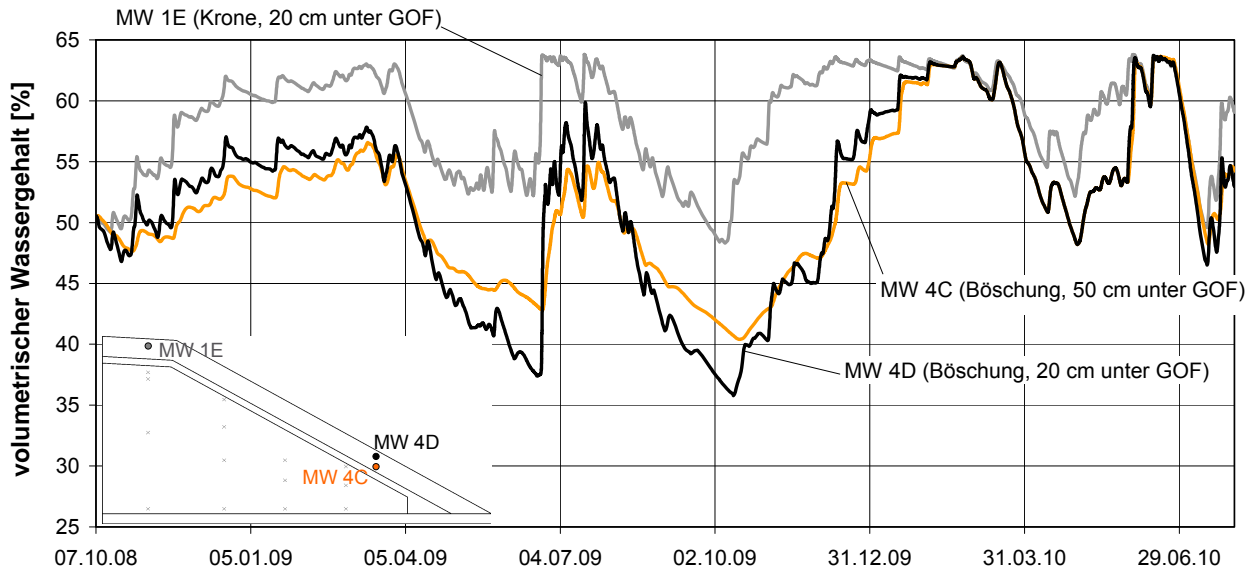


Abb. 8.30: Wassergehalte im Oberboden (Berechnung für trockene Seite)

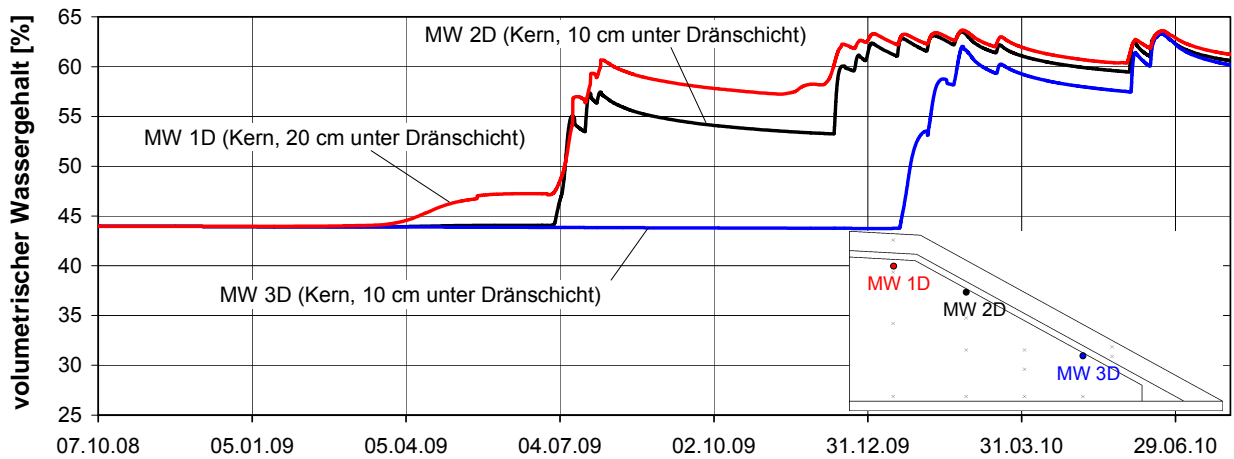


Abb. 8.31: Wassergehalte im Kern (Berechnung für trockene Seite)

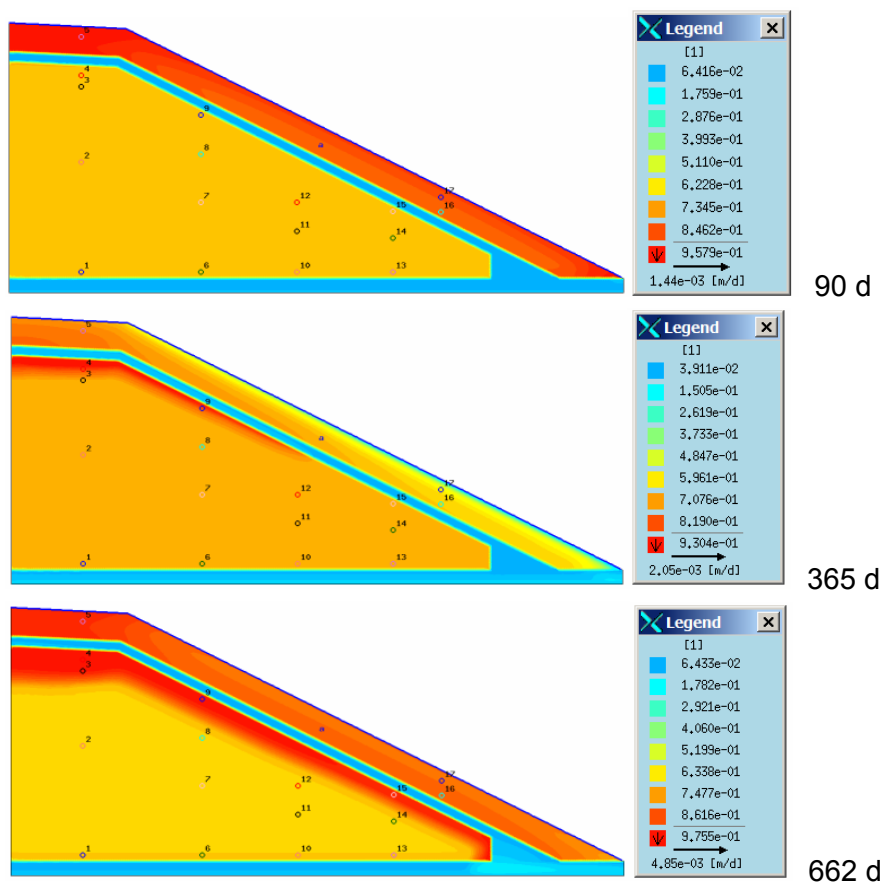


Abb. 8.32: Verteilung des Sättigungsgrades nach 90 d, 365 d, 662 d (Berechnung für trockene Seite)

8.6.7 Vergleich Berechnungsergebnisse - Messungen

Die [Abb. 8.33](#) und die [Abb. 8.34](#) stellen die Tageswerte der zwischen Oktober 2008 und Juli 2010 gemessenen Sickerwasserabflüsse aus der Dränmatte für die trockene und nasse Einbaubedingung im Vergleich zu den Ergebnissen der Simulationsberechnungen dar. Für beide Einbaubedingungen wird die zeitliche Verteilung des Sickerwasseranfalls gut wiedergegeben. Die Wassermengen werden in den Berechnungen in beiden Fällen jedoch sehr stark überschätzt. Dies wird besonders bei einem Vergleich der gemessenen und berechneten Sickerwassermengen deutlich (siehe [Abb. 8.35](#)). So wurden für die nasse Einbaubedingung im betrachteten Zeitraum aus der Dränmatte insgesamt 24 mm gefasst, während sich in der Berechnung eine Gesamtwassermenge von 160 mm ergibt. Für die trockene Seite stellen sich die Verhältnisse ähnlich dar. Die Messungen haben eine Gesamtmenge von 7 mm erbracht, während in den Berechnungen ein Sickerwasseranfall aus der Dränmatte von 50 mm ermittelt wurde. Als maßgebliche Ursache dafür wird die den Berechnungen zugrunde gelegte Annahme, dass kein Oberflächenabfluss auftritt und der gesamte Niederschlag in den Oberboden infiltriert, erachtet. Dafür spricht auch die Tatsache, dass im Modell die Durchlässigkeit des Oberbodens gegenüber den Ergebnissen aus Durchlässigkeitsuntersuchungen von etwa $5 \cdot 10^{-8}$ m/s auf $5 \cdot 10^{-7}$ m/s angehoben werden musste, damit der gesamte Niederschlag in den Oberboden eindringen konnte. Dadurch kommt es in feuchten Phasen, wenn der

Oberboden weitgehend aufgesättigt ist, entsprechend dem höheren Durchlässigkeitsbeiwert zu einer erhöhten Sickerwasserabgabe an die Dränschicht.

Für das aus dem verdichteten Kernmaterial an der Basis austretende Sickerwasser dagegen werden die akkumulierten Mengen in den Berechnungen unterschätzt. So wurden für die nasse Einbaubedingung an der Versuchsschüttung insgesamt 43 mm gefasst, während im Modell im betrachteten Zeitraum nur 7 mm angefallen sind. Dies ist auf den Einbauzustand des Bodens im Feld und auf die Schwierigkeit der Abbildung der Einbaubedingung im Modell zurück zu führen. So wurde der organogene Ton in der östlichen Hälfte der Versuchsschüttung mit einem gravimetrischen Wassergehalt von im Mittel 75 % verdichtet, was wie in Abschnitt 8.5.2 beschrieben zu einem Konsolidationsprozess im Zuge der Dammschüttung geführt hat. Durch die Entstehung von Porenwasserüberdrücken kam es dadurch insbesondere in den ersten Monaten nach Herstellung der Dammschüttung zu einem vergleichsweise großen Sickerwasseranfall an der Basis. Diese aus Konsolidationsvorgängen resultierende Sickerwasserabgabe kann mit dem verwendeten Strömungsmodell jedoch nicht beschrieben werden. In Abhängigkeit von der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung und dem Anfangswassergehalt kann es allerdings zu einer Schwerkraftbedingten Wasserabgabe kommen. Diese tritt auf, wenn im Damm mehr Wasser vorhanden ist, als vom Boden durch Kapillarkräfte gegen die Schwerkraft gehalten werden kann. Wie die Berechnungsergebnisse zeigen, stellt sich im Modell für die nasse Einbaubedingung zwar zu Beginn eine derartige Wasserabgabe bei der zugrunde gelegten Saugspannung von 3 kPa als Anfangsbedingung ein, im Vergleich zu den infolge des Konsolidationsprozesses an der Versuchsschüttung gemessenen Sickerwassermengen sind diese allerdings gering. Der Verlauf der berechneten Sickerwasserabgabe an der Basis der nassen Seite ist wie auch der gemessene sehr gleichmäßig und es ist keine unmittelbare Abhängigkeit vom Niederschlag erkennbar. Bei Betrachtung der letzten sechs Monate, die vom Anfangszustand deutlich geringer beeinflusst werden, zeigen die Modellberechnungen für die Sickerwasserabgabe aus dem Kern sehr ähnliche Werte wie die Messungen an der Versuchsschüttung. So wurde im Modell in diesem Zeitraum eine konstante Wassermenge von ca. 0,01 mm/d, d.h. ca. 0,3 mm pro Monat abgegeben.

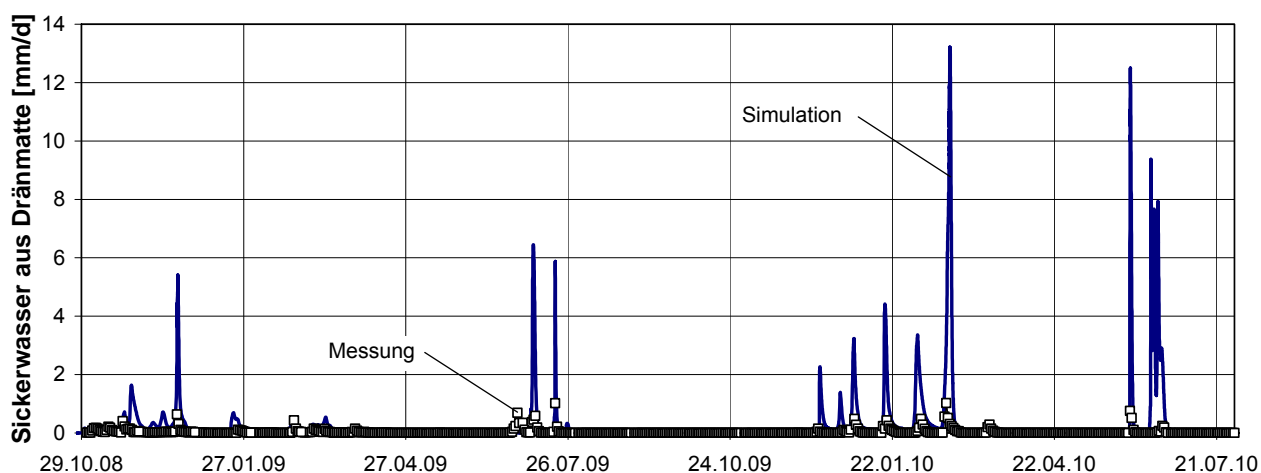


Abb. 8.33: Sickerwasserabfluss aus der Dränmatte (nasse Seite), Vergleich Simulation - Messung

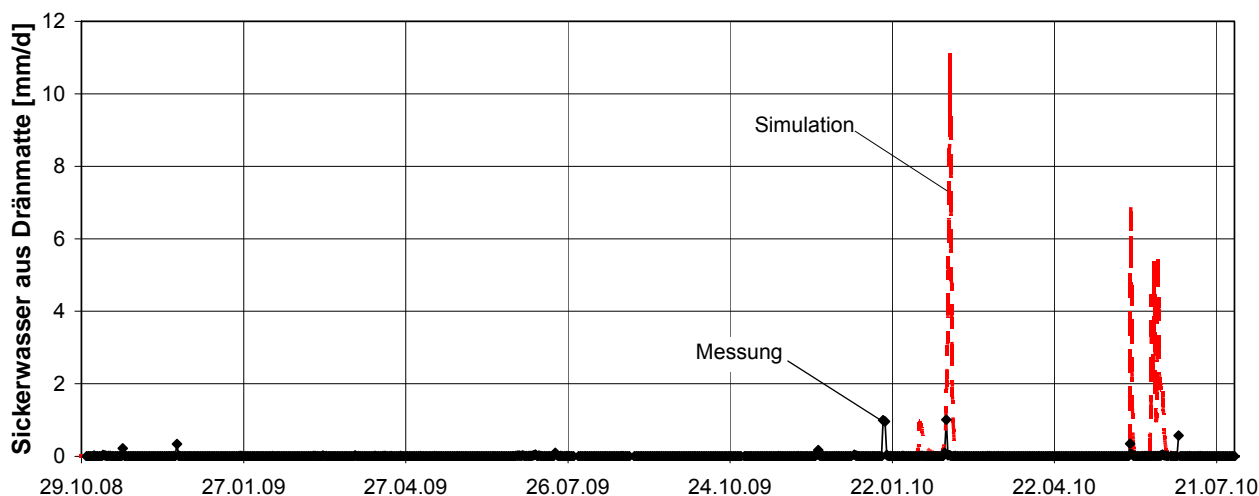


Abb. 8.34: Sickerwasserabfluss aus der Dränmatte (trockene Seite), Vergleich Simulation - Messung

Für die trockene Einbaubedingung ist im Modell keine Sickerwasserabgabe aus dem Kernmaterial an der Basis aufgetreten, sondern das in den Kern infiltrierende Sickerwasser wurde vollständig im Kern gespeichert. Dies passt sehr gut zu den Messungen an der Versuchsschüttung. Dort wurden zwar sehr geringe Sickerwassermengen gemessen, diese sind aber nicht auf eine bereits eingetretene vollständige Aufsättigung des Kerns zurück zu führen, sondern beruhen vermutlich auf einzelnen lokalen Wasserwegigkeiten.

Vergleicht man die in das trocken und das nass verdichtete Kernmaterial infiltrierenden Sickerwassermengen, sind deutliche Unterschiede zu erkennen. So wurden vom trocken verdichteten Boden im betrachteten Zeitraum entsprechend den Berechnungsergebnissen 57 mm und vom nass verdichteten Boden nur 7 mm aufgenommen. Für das langfristige Verhalten der Versuchsschüttung ist dies von großer Bedeutung, da davon auszugehen ist, dass der trocken verdichtete Boden weiterhin Wasser aufnimmt und es langfristig zu einer Sickerwasserabgabe an der Basis kommen kann. Für diesen Zustand werden aufgrund der größeren Durchlässigkeit des trocken verdichteten Bodens größere Wassermengen als für den nass verdichteten Boden erwartet. Allerdings ist zu beachten, dass der Sättigungsprozess sehr langsam verläuft und damit voraussichtlich erst nach vielen Jahren eine Sickerwasserabgabe aus dem trocken verdichteten Boden auftritt.

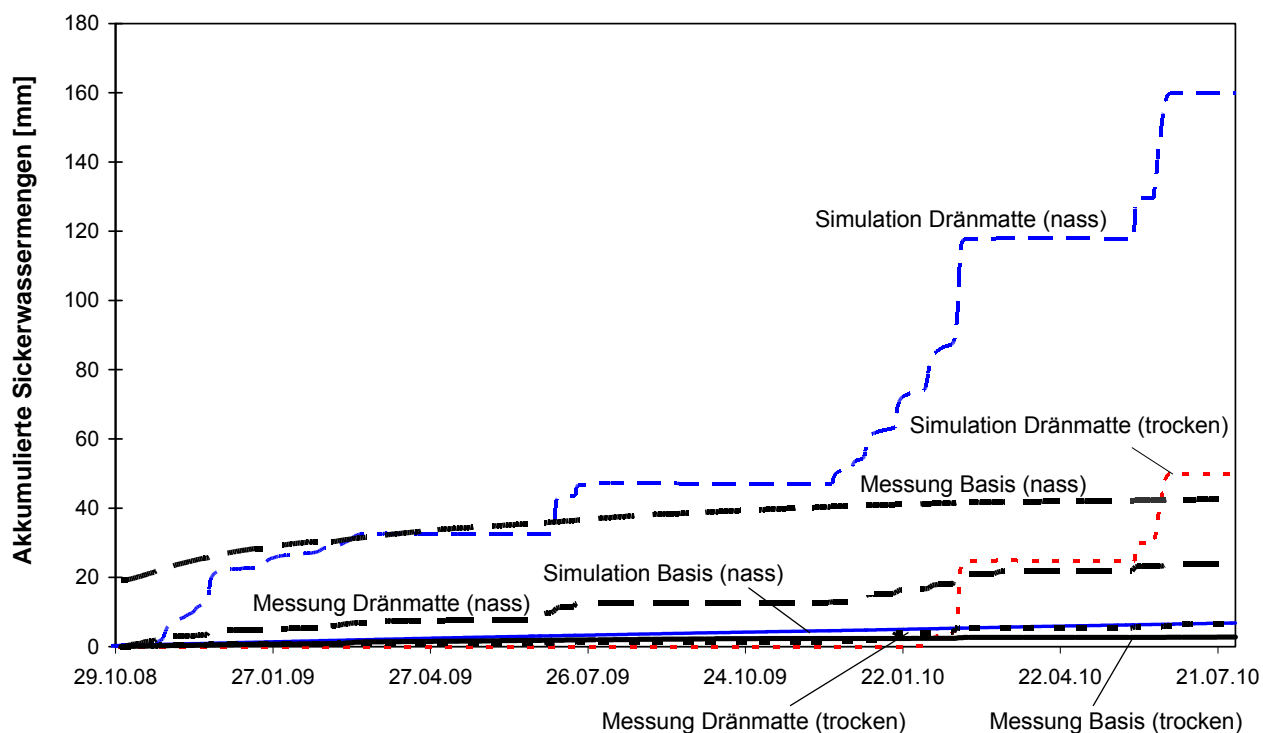


Abb. 8.35: Akkumulierte Sickerwassermengen, Vergleich Simulation - Messung

Die [Abb. 8.36](#) stellt die berechneten und gemessenen zeitlichen Verläufe der Wassergehalte im Oberboden dar. Aufgrund unterschiedlicher angesetzter Porenanteile für den Oberboden sind die gemessenen und berechneten Kurven des volumetrischen Wassergehaltes zwar zueinander versetzt, die sich im zeitlichen Verlauf einstellenden Wassergehaltsänderungen sind aber sehr ähnlich. Dies bestätigt die Ergebnisse zum Sickerwasseranfall aus der Dränschicht, wonach vom Oberboden nur in feuchten Phasen, wenn dieser über die gesamte Dicke fast vollständig aufgesättigt ist, Sickerwasser an die Dränschicht abgegeben wird.

Für die in den Kern infiltrierenden Wassermengen stellt sich in den Berechnungen trotz der größeren Sickerwasserabgabe aus dem Oberboden in die Dränschicht keine signifikante Zunahme ein, da die aus der Dränschicht in den Kern infiltrierenden Sickerwassermengen für die nasse Einbaubedingung sehr gering sind und in der Regel mehr Wasser aus dem Oberboden in die Dränschicht abgegeben wird als vom Kern aufgenommen werden kann. Vielmehr hängt die in den Kern infiltrierende Sickerwassermenge maßgeblich von der zeitlichen Verteilung des Sickerwasseranfalls in der Dränmatte ab. So ist davon auszugehen, dass vom Kern Sickerwasser aufgenommen wird, sobald Sickerwasser vom Oberboden in die Dränmatte abgegeben wird, d. h. wenn der Oberboden fast vollständig gesättigt ist. Dies bedeutet, dass die Vernachlässigung des Oberflächenabflusses und die daraus resultierende höhere Infiltration zwar zu einer größeren Sickerwasserabgabe aus der Dränschicht, nicht aber zu einer nennenswerten Zunahme der in den Kern infiltrierenden Sickerwassermenge führen.

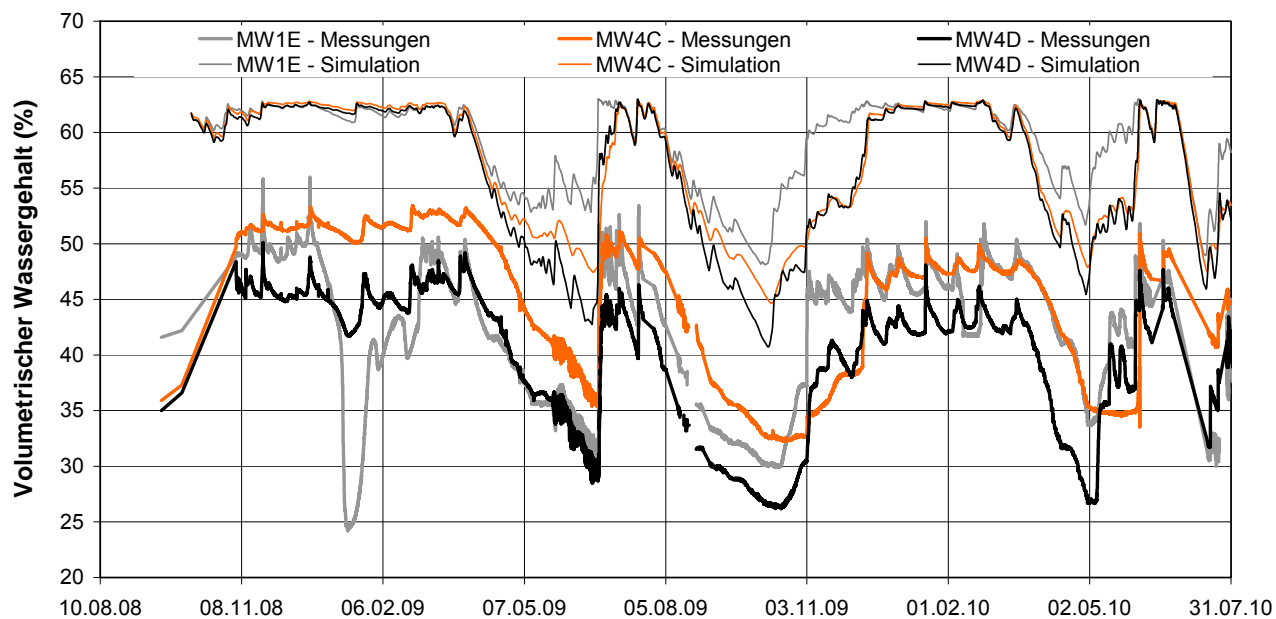


Abb. 8.36: Wassergehalte im Oberboden, Vergleich Simulation - Messungen

9 Folgerungen für die Praxis

9.1 Allgemeines

Bei der Verwendung von schadstoffbelasteten Böden im Erdbau können technische Sicherungsmaßnahmen erforderlich werden, um die Durchsickerung der Bauwerke und einen Austrag von Schadstoffen zu verhindern. Wie die in Abschnitt 8 dargestellten Untersuchungen zeigen, kann auf zusätzliche Dichtungselemente unter Umständen verzichtet werden, wenn die schadstoffbelasteten Böden selbst bereits eine geringe Durchlässigkeit aufweisen. Allerdings sind in diesem Fall Untersuchungen zu den sich einstellenden Sickerwassermengen erforderlich. Darüber hinaus sind bei verformungsempfindlichen Bauwerken (z. B. Straßendämme) neben den stets zu erbringenden Nachweisen der Tragfähigkeit (u. a. Standsicherheit der Erdbauwerke, Abgleiten einzelner Schichten) auch Fragestellungen zur Gebrauchstauglichkeit zu beantworten. Probleme können sich bei feinkörnigen Böden prinzipiell infolge von Sackungs- oder Quellerscheinungen ergeben. Wie die experimentellen Untersuchungen in Abschnitt 6 gezeigt haben, werden sowohl der Wasserhaushalt und die sich einstellenden Sickerwassermengen als auch das Verformungsverhalten wesentlich von den Einbaubedingungen beeinflusst. Im Folgenden werden die aus den durchgeführten Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse zum Einfluss des Einbauwassergehaltes auf das hydraulische Verhalten von Erdbauwerken aus verdichteten Tonen zusammen getragen. Anschließend werden Hinweise zur rechnerischen Prognose von Sickerwassermengen bei Erdbauwerken gegeben.

9.2 Einfluss der Einbaubedingungen auf das hydraulische Verhalten von Erdbauwerken aus verdichteten Tonen

Entsprechend den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB, 2009) wird als Verdichtungsanforderung für Straßendämme ein Verdichtungsgrad von 97 % gefordert, wobei empfohlen wird, den Luftporenanteil auf 8 % zu beschränken. Maximal darf dieser 12 % aufweisen. Damit sind die Möglichkeiten der Verdichtung feinkörniger Böden bei Einbauwassergehalten unterhalb des Proctorwassergehaltes zwar bereits eingeschränkt, dennoch verbleibt eine große Spanne hinsichtlich des möglichen Einbauwassergehaltes. So ist prinzipiell auch ein vergleichsweise trockener Einbau möglich, wenn der Boden durch einen größeren Energieeintrag als mit Proctorenergie verdichtet wird.

Auf Grundlage der in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Ausführungen sind bei einer Verdichtung bei Wassergehalten oberhalb des Proctoroptimums folgende Aspekte zu beachten:

- Wie die Untersuchungen in Abschnitt 8 zeigen, kann die Verdichtung zur Entstehung von Porenwasserüberdrücken und einer damit verbundenen Sickerwasserabgabe führen. Bei schadstoffbelasteten Böden kann es dadurch temporär zu einem vergleichsweise großen Austrag von Schadstoffen kommen.

- Aufgrund des bereits hohen Anfangssättigungsgrades kann infiltrierendes Sickerwasser nicht im Boden gespeichert werden, sondern führt zu einer Sickerwasserabgabe aus dem verdichteten Boden.
- Die sich langfristig einstellenden Sickerwassermengen sind aufgrund der geringen Durchlässigkeit im gesättigten Zustand aber vergleichsweise gering.
- Wie die Untersuchungen in Abschnitt 5 und 6 zeigen, führt die Verdichtung auf der nassen Seite des Proctoroptimums zu einer Reduzierung des Interaggregatporenraums, was sich in einer vergleichsweise großen passiven kapillaren Steighöhe äußert. Dadurch wird das im Boden befindliche Wasser kapillar stark gebunden und weisen derartig verdichtete Bauwerke dauerhaft hohe Wassergehalte auf, sofern eine klimatisch bedingte Austrocknung vermieden wird.
- Eine Abnahme des Wassergehaltes (z. B. infolge von Austrocknungsvorgängen) führt zu Schrumpfverformungen. Diese sind im Vergleich zu einer Verdichtung auf der trockenen Seite des Proctoroptimums deutlich ausgeprägter.
- Mit dem Eintrag von Sickerwasser sind in der Regel keine relevanten Sackungs- bzw. Quellerscheinungen verbunden.
- Im Vergleich zu einer Verdichtung auf der trockenen Seite des Proctoroptimums können vergleichsweise große Kriechverformungen auftreten. Dabei ist der Anteil an organischer Substanz von besonderer Bedeutung.

Bei einer Verdichtung auf der trockenen Seite des Proctoroptimums sind folgende Aspekte besonder zu beachten:

- Die Verdichtung des Bodens führt zu keiner Konsolidations-bedingten Sickerwasserabgabe.
- Aufgrund des vergleichsweise geringen Anfangssättigungsgrades weisen Erdkörper, die auf der trockenen Seite des Proctoroptimums verdichtet wurden, ein vergleichsweise großes Speichervermögen auf. Dadurch kommt es bei einem Eintrag von Sickerwasser zunächst zu einer Wasserspeicherung im Boden, bevor Sickerwasser an den Untergrund abgegeben wird. Der Zeitpunkt, zu dem erstmals Sickerwasser in signifikanter Größe abgegeben wird, hängt damit stark vom Bodenvolumen und der eingetragenen Sickerwassermenge ab. So kann es erst nach Jahren bzw. Jahrzehnten zu einer Sickerwasserabgabe kommen.
- Aufgrund der größeren Durchlässigkeit im gesättigten Zustand sind nach der Aufsättigungsphase im Vergleich zu einer Verdichtung auf der nassen Seite des Proctoroptimums höhere Sickerwasserraten zu erwarten.
- Aufgrund des höheren Interaggregatporenanteils weisen die auf der trockenen Seite des Proctoroptimums verdichteten Böden einen geringeren Lufteintrittspunkt (d. h. eine geringere passive kapillare Steighöhe) auf, wodurch sich langfristig im Mittel geringere Wassergehalte als bei einem auf der nassen Seite des Proctoroptimums verdichteten Boden einstellen.
- Mit dem vergleichsweise geringen Einbauwassergehalt ist eine geringe Schrumpfneigung verbunden. Diese ist auch nicht erhöht, wenn der Boden bei gleichem Einbauwassergehalt höher verdichtet wird.
- Durch eine Wasseraufnahme kann es zu Sackungs- bzw. Quellerscheinungen kommen. Quellerscheinungen sind insbesondere bei hoch verdichteten Böden zu erwarten.

Bei den aufgeführten Aspekten handelt es sich um allgemeine Erkenntnisse. Die sich tatsächlich einstellenden Verhältnisse und Vorgänge hängen von den jeweiligen Randbedingungen ab. Diese betreffen in besonderer Weise die geometrischen Verhältnisse des Erdbauwerkes, die Versicke-

rungsmöglichkeiten im Bereich der Dammkrone (Vorhandensein einer undurchlässigen Fahrbahn), die Eigenschaften des Oberbodens (Dicke, Durchlässigkeit, Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung) und des Bewuchses, das Vorhandensein von Drän- oder Sickerschichten und damit verbundene Kapillarsperreneffekte sowie die klimatischen Verhältnisse. Der Wasserhaushalt von verdichteten Erdbauwerken mit den sich einstellenden Sickerwassermengen und möglichen Wassergehaltsänderungen im Bauwerk lässt sich prinzipiell nur unter Berücksichtigung aller genannten Aspekte zutreffend ermitteln. Basierend auf einer Analyse des Wasserhaushaltes und der zeitabhängigen Sickerwasserbewegung im Boden lassen sich Fragestellungen bezüglich möglicher Volumenänderungen infolge von Wassergehaltsänderungen (Quellen, Sacken, Schrumpfen) beantworten. Experimentell können diese hydraulisch-mechanisch gekoppelten Bodeneigenschaften mit Hilfe der in Abschnitt 6 beschriebenen Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen untersucht werden.

9.3 Hinweise zur Prognose von Sickerwassermengen mit numerischen Modellen

Die in Abschnitt 8 dargestellten Untersuchungen zeigen, dass die Wasserbewegung in verdichteten Erdbauwerken mit numerischen Modellen auf Basis der Richards-Gleichung zutreffend beschrieben werden kann. Allerdings ist zur Beschreibung des Wasserhaushaltes die Kenntnis der hydraulischen Bodeneigenschaften, der Einbaubedingungen sowie der zeitabhängigen klimatischen Verhältnisse erforderlich.

Ermittlung der Bodeneigenschaften:

Die hydraulischen Eigenschaften im gesättigten und ungesättigten Zustand sind unter Berücksichtigung der Einbaubedingungen zu ermitteln. Dazu sind vorab neben den klassifizierenden Untersuchungen die Verdichtungseigenschaften der Böden zu untersuchen. Für die in Betracht kommenden Einbauzustände ist anschließend die Durchlässigkeit im gesättigten Zustand zu ermitteln. Da die zulässigen Einbaubedingungen in der Regel in gewissen Grenzen variieren, kann es hierbei zielführend sein, Grenzbetrachtungen für den minimal und den maximal zulässigen Einbauwasser-gehalt durchzuführen. Da die experimentelle Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften im ungesättigten Zustand zeit- und kosteintensiv ist, kann die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung für Voruntersuchungen mit Hilfe der in Abschnitt 7 dargestellten Parameterregression unter Anwendung des Ansatzes nach *van Genuchten* abgeschätzt werden. Die Beziehung zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit und dem Wassergehalt kann mit dem Ansatz nach *van Genuchten & Mualem* zutreffend beschrieben werden. Wie die in Abschnitt 6 dargestellten Untersuchungen zeigen, sind die in der Bodenkunde weit verbreiteten Pedotransferfunktionen zur Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung verdichteter Tone ungeeignet.

Für detaillierte Untersuchungen sollte die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung experimentell bestimmt werden. Dazu eignen sich bei feinkörnigen Böden in besonderer Weise Untersuchungen in Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen unter Anwendung der Achsen-Translations-Technik, da damit auch der Spannungszustand berücksichtigt wird und Informationen zum Verformungsverhalten gewonnen werden. Damit können Fragestellungen zu möglichen Sackungs-, Quell- und Schrumpfvorgängen untersucht werden.

Zur Abbildung der Wasserbewegung in einem verdichteten Erdbauwerk sind die hydraulischen Eigenschaften aller Bodenschichten zu bestimmen. In besonderer Weise betrifft dies den Oberboden,

da dieser einen großen Einfluss auf die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse (Infiltration, Evapotranspiration und Oberflächenabfluss) ausübt. Daher sollten dessen hydraulische Eigenschaften für detaillierte Untersuchungen ebenfalls möglichst experimentell ermittelt werden. Zur Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung eines unverdichteten Oberbodens können Pedotransferfunktionen herangezogen werden.

Definition des Anfangszustandes:

Wie im Zusammenhang mit der Versuchsschüttung am Münchner Flughafen in Abschnitt 8 beschrieben liegt in einem Erdbauwerk unmittelbar nach Verdichtung kein hydraulischer Gleichgewichtszustand vor, sondern es kommt in Abhängigkeit von den Einbaubedingungen zu ausgleichenden Wasserbewegungen. Dieser Zustand lässt sich in numerischen Berechnungen in der Regel nicht abbilden. Um eine stabile Berechnung zu ermöglichen, ist es angeraten, von einem hydraulischen Gleichgewichtszustand (z. B. durch Definition eines konstanten Potentials im gesamten Modell) zu starten.

Definition der Randbedingungen:

Um das Verhalten des Bauwerkes realitätsnah abbilden zu können, sind instationäre Berechnungen unter Berücksichtigung von zeitlich variablen klimatischen Verhältnissen erforderlich. Dazu können für den jeweiligen Standort repräsentative, gemessene Zeitreihen von Klimadaten herangezogen werden. Sofern wie in der vorliegenden Arbeit Grundwassermodelle verwendet werden, mit denen die an Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse der Infiltration, Verdunstung, Transpiration und des Oberflächenabflusses nicht abgebildet werden können, müssen diese vorab auf Grundlage der Klimadaten abgeschätzt werden. Da die Abhängigkeit der einzelnen Prozesse von den zustandsabhängigen Eigenschaften des Oberbodens bei dieser Vorgehensweise nicht berücksichtigt werden kann, sind dabei Annahmen und Vereinfachungen zu treffen. Dies betrifft in besonderer Weise den sich einstellenden Oberflächenabfluss. Zur Abschätzung der Evapotranspiration kann bei Vorliegen der erforderlichen Klimadaten der in Anhang 3.5 zusammenfassend dargestellte Ansatz nach *Penman-Monteith* herangezogen werden.

Vor diesem Hintergrund ist es zu empfehlen, zur Beschreibung des Wasserhaushaltes von Erdbauwerken hydrologische Modelle, bei denen die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse unter Berücksichtigung der zustandsabhängigen Eigenschaften abgebildet werden, zu verwenden (z. B. Hydrus, Vadose/W, SV Flux). Bei der Wahl eines hydrologischen Modells ist allerdings im Besonderen zu prüfen, ob die Wasserbewegung im Boden selbst damit in geeigneter Weise beschrieben werden kann.

Da der Wasserhaushalt von Erdbauwerken aus verdichteten Tonen stark vom Anfangszustand abhängt, sollten die Berechnungen für die Beurteilung der sich langfristig einstellenden Sickerwassermengen für einen ausreichend langen Betrachtungszeitraum (10 bis 20 Jahre) durchgeführt werden.

Auswertung der Berechnungen:

Bei instationären Berechnungen sollte die Auswertung der Berechnungen im Hinblick auf den Wasserhaushalt unter Betrachtung von akkumulierten Wassermengen erfolgen. Zur quantitativen Beurteilung der Sickerwassermengen können diese in Relation zum Niederschlag gesetzt werden.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind Untersuchungen zu den hydraulischen Eigenschaften verdichteter Tone. Vor dem Hintergrund des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes, wonach schadstoffbelastete Böden und Baustoffe weitgehend wieder zu verwenden sind und auf eine Deponierung verzichtet werden soll, kommt der Fragestellung der Wasserbewegung in ungesättigten Böden eine besondere Bedeutung zu. Sofern die Schadstoffkonzentrationen gewisse Grenzwerte nicht überschreiten und eine Durchsickerung nachgewiesener Maßen hinreichend klein ist, können schadstoffbelastete Böden im Erdbau ungesichert, d.h. ohne zusätzliche Maßnahmen eingesetzt werden. Andernfalls können technische Sicherungsmaßnahmen zum Schutz des Grundwassers vor Verunreinigungen erforderlich werden. Da der Austrag von Schadstoffen aus Böden in der Regel hauptsächlich über die flüssige Phase erfolgt, sind die Erdbauwerke so auszulegen, dass eine Durchsickerung dieser Böden infolge von Niederschlagswasser weitgehend verhindert wird. Zur Beurteilung der Wirksamkeit einer Bauweise ist die Analyse des Wasserhaushaltes mit der Ermittlung von Sickerwassermengen erforderlich. Dazu sind sowohl die klimatischen Bedingungen als auch die hydraulischen Eigenschaften der Erdbaustoffe in geeigneter Weise abzubilden. Die hydraulischen Eigenschaften eines porösen Mediums im ungesättigten Zustand lassen sich prinzipiell durch die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung und die Beziehung zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit und dem Wassergehalt darstellen. Diese Beziehungen sind allerdings keine Bodenkonstanten, sondern werden maßgeblich von der Dichte und der Porenstruktur des Bodens beeinflusst. Bei verdichteten feinkörnigen Böden kommt dabei dem Einbauzustand eine besondere Bedeutung zu, da sich in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt und der Einbaudichte unterschiedliche Aggregat- und Porenstrukturen ergeben. Vor diesem Hintergrund widmet sich die vorliegende Arbeit in besonderer Weise dem Einfluss des Einbauwassergehaltes und der Einbaudichte auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung und die Durchlässigkeit im gesättigten und ungesättigten Zustand.

Dazu wurden im ersten Teil der Arbeit die Ergebnisse von umfangreichen experimentellen Untersuchungen an drei Tonen dargestellt. Der Schwerpunkt der experimentellen Versuche lag dabei auf Untersuchungen zur Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung und der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand. Daneben wurden u. a. Durchlässigkeitsversuche zur Ermittlung der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen zur Charakterisierung der Poren- und Aggregatstruktur durchgeführt.

Die Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie-Untersuchungen zeigen, dass insbesondere der Einbauwassergehalt einen großen Einfluss auf die Porenstruktur nimmt. So weisen Proben, die bei Wassergehalten unterhalb des Proctoroptimums verdichtet wurden, eine ausgeprägt bimodale Porengrößenverteilung auf, die in einen Porenraum zwischen den Bodenkrümeln (Interaggregatporen) und einen Porenraum innerhalb der Aggregate (Intraaggregatporen) aufgeteilt werden kann. Mit zunehmendem Einbauwassergehalt bei gleichbleibender Trockendichte nimmt der Anteil der größeren Interaggregatporen ab und die Porengrößenverteilung geht in eine zunehmend unimodale Form über. Eine Veränderung der Einbaudichte wirkt sich fast ausschließlich auf die Interaggregatporen aus. So führt eine Zunahme der Einbaudichte bei konstantem Einbauwassergehalt zu einer Reduzierung des Interaggregatporenraumes, während die Größe des Intraaggregatporenraumes

davon näherungsweise unbeeinflusst bleibt. Da die Porenstruktur maßgeblichen Einfluss auf die Durchlässigkeits- und Saugspannungseigenschaften nimmt, spiegeln sich diese Zusammenhänge auch in den Ergebnissen der durchgeführten Saugspannungs- und Durchlässigkeitsuntersuchungen wieder.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Einbaubedingungen auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung und die hydraulische Leitfähigkeit wurden durch experimentelle Untersuchungen unter Anwendung der Achsen-Translations-Technik studiert. Standardgeräte aus der Bodenkunde, die auf diesem Versuchsprinzip basieren, stellten sich dabei als ungeeignet heraus, um die bei bindigen Böden gekoppelten hydraulischen und mechanischen Eigenschaften erfassen zu können. Deshalb wurde in Anlehnung an Geräte, die u.a. bereits an Universitäten in Barcelona und Hong Kong im Einsatz sind, ein neuer Versuchsstand mit Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen entwickelt. Damit konnten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen unter definierten oedometrischen Spannungszuständen ermittelt werden. Da im Zuge der Versuchsdurchführung außerdem das Verformungsverhalten der Proben infolge von Saugspannungsänderungen und einer damit verbundenen Wasseraufnahme bzw. Wasserabgabe erfasst wird, können damit Aussagen zu möglichen Schrumpf-, Quell- oder Sackungsvorgängen gewonnen werden. Durch eine Auswertung der unter den jeweiligen Saugspannungsstufen im zeitlichen Verlauf abgegebenen bzw. aufgenommenen Wassermengen können zudem Informationen zum Zusammenhang zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit und dem Wassergehalt erhalten werden. Zur Untersuchung des hohen Saugspannungsbereiches kam ein Feuchtigkeitsmessgerät nach der Taupunktmethode zum Einsatz. Die Durchlässigkeit im gesättigten Zustand wurde in Druckzellen ermittelt.

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen konnten folgende wesentliche Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses der Einbaubedingungen auf die hydraulischen Eigenschaften festgehalten werden:

- Die **Beziehung zwischen Saugspannung und gravimetrischem Wassergehalt** ist im niedrigen Wassergehaltsbereich weitgehend unabhängig vom Einbauwassergehalt und der Einbaudichte. Proben, die bei gleichem Einbauwassergehalt aber mit unterschiedlicher Dichte hergestellt wurden, weisen nur im hohen Wassergehaltsbereich Unterschiede in der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung auf.
- Im Hinblick auf die **Beziehung zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad** gilt, dass der Lufteintrittspunkt mit zunehmendem Einbauwassergehalt bei gleicher Einbaudichte zunimmt und die Steigung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung oberhalb des Lufteintrittspunktes abnimmt (Wassergehalt auf der Abszisse und Saugspannung auf der Ordinate). Bei Einbauwassergehalten unterhalb des Proctoroptimums führt eine Erhöhung der Einbaudichte ebenfalls zu einer Zunahme des Lufteintrittspunktes und zu einer Abnahme der Steigung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung. Prinzipiell gilt außerdem, dass die Saugspannungen bei einem bestimmten Sättigungsgrad mit zunehmender Einbaudichte zunehmen.
- Die Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche belegen, dass die **Durchlässigkeit im gesättigten Zustand** mit zunehmendem Einbauwassergehalt bei konstanter Einbaudichte und mit zunehmender Einbaudichte bei konstantem Einbauwassergehalt abnehmen.

Im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften konnten aus den Untersuchungen in der Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzelle und den zusätzlich durchgeführten Schrumpfuntersuchungen folgende grundsätzliche Aspekte festgehalten werden:

- Wie auch für Proben, die an der Fließgrenze aufbereitet werden, kann das **Schrumpfverhalten** verdichteter Proben in eine Primär- und eine Sekundärschrumpfung unterteilt werden. Dabei nimmt das Schrumpfpotential mit zunehmendem Einbauwassergehalt zu. Außerdem nimmt der Wassergehalt an der Schrumpfgrenze als Übergang von der Primär- in die Sekundärschrumpfung mit zunehmendem Einbauwassergehalt zu. Dagegen hat eine Zunahme der Einbaudichte bei einer Verdichtung auf der trockenen Seite des Proctoroptimums keinen nennenswerten Einfluss auf das Schrumpfpotential und die Schrumpfgrenze.
- Bei einer Verdichtung auf der trockenen Seite des Proctoroptimums kann eine Wasserzugabe prinzipiell zu **Sackungen** führen. Mit zunehmender Einbaudichte nehmen diese aber ab bzw. stellen sich zunehmend Quellhebungen infolge einer Wasseraufnahme ein.

Die Entwässerungskurven der experimentell ermittelten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen wurden mit den in der Praxis sehr weit verbreiteten Ansätzen nach VAN GENUCHTEN (1980) und FREDLUND UND XING (1994) parametrisiert. Für die bei geringen Einbauluftporenanteilen verdichteten Proben konnten die Versuchsdaten mit beiden Beziehungen sehr gut wiedergegeben werden. Für Proben, die auf der trockenen Seite des Proctoroptimums verdichtet wurden, ergaben sich aufgrund ihrer bimodalen Porengrößenverteilung mit den untersuchten Ansätzen teilweise etwas größere Abweichungen zwischen der Parametrisierung und den Messwerten.

Zur Ermittlung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand wurden die in den Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen durchgeführten Versuche mit der Mehrstufen-Ausfluss-Methode ausgewertet. Dabei hat sich gezeigt, dass die Methode für sehr gering durchlässige Proben ($k < 1 \cdot 10^{-10}$ m/s) aufgrund der geringen Probenhöhe (1 cm) und der damit verbundenen sehr geringen ausfließenden Wassermenge mit Schwierigkeiten verbunden ist. Für durchlässigere Proben ($k > 5 \cdot 10^{-9}$ m/s) und größere Probenhöhen (2 cm) dagegen konnten aussagekräftigere Versuchsergebnisse erzielt werden, die mit der Mehrstufen-Ausfluss-Methode gut ausgewertet werden konnten. Die an diesen Proben ermittelten Daten zur Beziehung zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit und dem Wassergehalt konnten mit dem Ansatz nach VAN GENUCHTEN (1980) und MUALEM (1976) gut wiedergegeben werden. Der Ansatz nach FREDLUND ET AL. (1994) dagegen führt bei den untersuchten Proben zu einer deutlichen Überschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand.

Da die experimentelle Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung aus Laborversuchen zeitintensiv ist, werden diese häufig mit Hilfe von sogenannten Pedotransferfunktionen aus bekannten, einfach zu bestimmenden Bodenkenngrößen abgeleitet. Diese Funktionen wurden überwiegend in der Bodenkunde für unverdichtete, natürlich abgelagerte Böden entwickelt. Zur Anwendbarkeit dieser Funktionen für verdichtete feinkörnige Böden gibt es bisher jedoch erst sehr wenige Untersuchungen. Deshalb wurde im Rahmen der Arbeit geprüft, inwieweit die experimentell ermittelten Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen der unterschiedlich verdichteten Proben mit verschiedenen, weit verbreiteten Pedotransferfunktionen abgebildet werden können. Dabei hat sich gezeigt, dass der Einfluss unterschiedlicher Einbauwassergehalte auf die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen mit den untersuchten Pedotransferfunktionen abgesehen von dem für verdichtete Böden von *Tinjum et al.* entwickelten Modell a priori nicht abgebildet werden kann, sofern keine Messdaten vorliegen. Aber auch mit dem Ansatz nach *Tinjum et al.* konnten nur für einzelne Proben zufrieden stellende Vorhersagen erzielt werden.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der Arbeit auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen analysiert, inwieweit die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung verdichteter feinkörniger Böden durch Berücksichtigung geeigneter bodenmechanischer Kenngrößen abgeschätzt werden kann. Dazu musste eine Kenngröße herangezogen werden, mit der die Veränderungen der Poren- und Aggregatstruktur bei unterschiedlichen Einbauzuständen erfasst werden kann. Wie die eigenen Untersuchungen und zahlreiche Publikationen belegen, gibt es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und dem Einbauwassergehalt verdichteter feinkörniger Böden. Daneben wurde in der vorliegenden Arbeit anhand von theoretischen Betrachtungen am Kapillarrohr und auf Grundlage der experimentell ermittelten Daten ein Zusammenhang zwischen der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und dem Lufteintrittspunkt der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung dargestellt. Auf Grundlage dessen wurden zwei Regressionsgleichungen zur Abschätzung der van Genuchten-Parameter in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand und der Plastizitätszahl aufgestellt. Da diesen eine vergleichsweise geringe Datenbasis zugrund liegt, wurde empfohlen, die Regressionsgleichungen vor der Anwendung in der Ingenieurpraxis anhand von weiteren experimentellen Untersuchungen zunächst zu überprüfen. Zusätzlich wurde eine Methode unter Berücksichtigung einer Ein-Punkt-Messung dargestellt, die eine höhere Zuverlässigkeit der Vorhersagegenauigkeit erwarten lässt.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde an einer großmaßstäblichen Versuchsschüttung am Münchner Flughafen der Einfluss unterschiedlicher Einbaubedingungen auf den Wasserhaushalt und die Sickerwassermengen studiert. Die experimentell gewonnenen Ergebnisse belegen, dass der Einbauwassergehalt die sich einstellenden zeitabhängigen Sickerwassermengen maßgebend beeinflusst. So kann der verdichtete Einbau bei Wassergehalten oberhalb des Proctoro optimums zur Entstehung von Porenwasserüberdrücken und einer damit verbundenen Sickerwasserabgabe führen. Sind die Böden schadstoffbelastet, kann es dadurch temporär zu einem vergleichsweise großen Austrag von Schadstoffen kommen. Außerdem liegt nach einer Verdichtung auf der nassen Seite des Proctoro optimums ein hoher Anfangssättigungsgrad im Boden vor, wodurch infiltrierendes Sickerwasser im Boden nicht gespeichert werden kann, sondern unmittelbar zu einer Sickerwasserabgabe aus dem verdichteten Boden führt. Eine Verdichtung auf der trockenen Seite des Proctoro optimums dagegen führt zu einem vergleichsweise geringen Anfangssättigungsgrad. Damit verbunden ist ein vergleichsweise großes Speichervermögen, wodurch es bei einem Eintrag von Sickerwasser zunächst zu einem Wasserrückhalt im Boden kommt, bevor Sickerwasser an den Untergrund abgegeben wird. Der Zeitpunkt, zu dem erstmals Sickerwasser in signifikanter Größe abgegeben wird, hängt damit stark vom Bodenvolumen und der eingetragenen Sickerwassermenge ab. So kann es erst nach Jahren bzw. Jahrzehnten zu einer Sickerwasserabgabe aus dem verdichteten Erdkörper kommen.

Außerdem wurde anhand der Versuchsschüttung am Münchner Flughafen untersucht, inwieweit die Wasserbewegung in ungesättigten Erddämmen mit Hilfe von theoretischen Untersuchungen analysiert werden kann. Dabei hat sich gezeigt, dass die Wasserbewegung in verdichteten Erdbauwerken mit numerischen Modellen auf Basis der Richards-Gleichung prinzipiell zutreffend beschrieben werden kann. Neben den hydraulischen Bodeneigenschaften sind dazu allerdings in besonderer Weise die an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse in geeigneter Weise abzubilden. Da sowohl die Infiltration als auch die Evapotranspiration und der Oberflächenabfluss von den klimatischen Verhältnissen und den (zustandsabhängigen) Eigenschaften des Oberbodens abhängen, ist eine Betrachtung dieser Prozesse, getrennt von der Wasserbewegung im Erdbauwerk, mit

Schwierigkeiten verbunden. Deshalb sind für eine zutreffende Beschreibung des Wasserhaushaltes von Erdbauwerken Berechnungsmodelle zu empfehlen, die eine gekoppelte Analyse der an der Bodenoberfläche stattfindenden Prozesse und der Wasserbewegung im Boden ermöglichen.

Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden auf das Studium der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung feinkörniger Böden ausgerichtet. Dabei wurden jedoch nur Untersuchungen zur Entwässerungskurve ausgehend vom Einbauzustand und nach einer Erstabwässerung untersucht. Es konnte nicht untersucht werden, welche Ent- und Bewässerungskurven sich im Zuge mehrmaliger Trocken-Nass-Zyklen einstellen. Ebenso konnte die Hystere der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung der verdichteten Tone nicht näher untersucht werden. Insbesondere für oberflächennahe Bodenbereiche sind diese Aspekte aber von Bedeutung, da dort in Abhängigkeit von den klimatischen Verhältnissen entsprechende Wassergehaltsschwankungen auftreten. Um zu klären, ob die vorhandenen Modelle zur mathematischen Beschreibung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung unter Berücksichtigung der Hystere auf verdichtete Tone angewandt werden können, sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Ebenso konnten in der vorliegenden Arbeit zur hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand zwar einzelne Erkenntnisse gewonnen werden, jedoch konnte der Einfluss der Einbaubedingungen auf die hydraulische Leitfähigkeit nicht systematisch untersucht werden. Ziel weiterer Untersuchungen sollte es sein, insbesondere für sehr gering durchlässige Böden in Abhängigkeit von den Einbaubedingungen den Zusammenhang zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit und dem Wassergehalt zu ermitteln und auf Basis dessen zu prüfen, inwieweit verschiedene, häufig verwendete Modelle in der Lage sind, diesen zu beschreiben. Damit können wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, die es ermöglichen, bei der rechnerischen Simulation der Wasserbewegung in Erdbauwerken geeignete Ansätze zur Beschreibung der Saugspannungs- und Durchlässigkeitseigenschaften der verdichteten Böden heranzuziehen und damit eine zutreffende Prognose der zu erwartenden Wassermengen zu erhalten.

Literaturverzeichnis

- Agus, S.; Schanz, T. (2005a): Comparison of four methods for measuring total suction, *Vadose Zone Journal*, 2005.
- Agus, S.; Schanz, T. (2005b): Effect of shrinking and swelling on microstructures and fabric of a compacted bentonite-sand mixture, *Proceedings of International Conference on Problematic Soils, Famagusta, Cyprus*, 2005.
- Ahmed, S.; Lovell, C. W.; Diamond, S. (1974): Pore sizes and strength of compacted clay, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE)*, Vol. 100, No. GT4, pp. 407-425.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO irrigation and drainage paper 56, <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm>, Zugriff am 22.12.2009.
- Al-Muhktar, M.; Qi, Y.; Alcover, J.-F.; Bergaya, F. (1999): Oedometric and water-retention behavior of highly compacted unsaturated smectites, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36, pp. 675-684.
- Arya, L. M.; Paris, J. F. (1981): A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 45, No. 4, pp. 1023-1030.
- Averjanov, S. F. (1950): About Permeability of Subsurface Soils in Case of Incomplete Saturation, *Eng. Collect.*, Vol. 7, zitiert in Fredlund und Rahardjo (1993).
- Barden, L.; Sides, G. R. (1970): Engineering behavior and structure of compacted clay, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE)*, No. 96 (SM 4), pp. 1171-1200.
- Bauer, B.; Horn, R.; Taubner, H.; Tippkötter, R. (2004): Primäre und sekundäre Grobporen in mineralischen Oberflächendichtungen, *Müll und Abfall*, 10 - 04, S. 496-502.
- Birle, E.; Heyer, D.; Vogt, N. (2008): Influence of the initial water content and dry density on the soil-water retention curve and the shrinkage behaviour of a compacted clay, *Acta Geotechnica*, Vol. 3, No. 3, September 2008, pp. 191-200.
- Birle, E.; Boso, M.; Heyer, D. (2010): Investigation of the water flow in an embankment built of organic soil: Experimental results and large scale field test, *Fifth International Conference on Unsaturated Soils, Barcelona*, 6.-8. September 2010, Tagungsband Volume II, pp. 1299-1304.
- Birle, E. (2010): Geohydraulisches Verhalten ungesättigter verdichteter organischer Tone, 31. Bau- grundtagung der DGGT, Beiträge der Spezialsitzung „Forum für junge Geotechnik-Ingenieure“, S. 159-166, 3.-5. November 2010, München.
- Bjerrum, L.; Huder, J. (1957): Measurement of the permeability of compacted clays, *Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London*, Vol. 1, pp. 6-8.
- Boso, M. (2005): Shear strength behavior of a reconstituted partially saturated clayey silt, PhD dissertation, *Università degli Studi di Trento*.
- Brooks, R.; Corey, A. (1964): Hydraulic properties of porous media, *Hydrology Papers Colorado State University*.

- Buckingham, E. (1907): Studies on the movement of soil moisture, U.S. Dept. Agric. Bur. Soils Bull. 38, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Burdine, N. T. (1953): Relative permeability calculation from size distribution data, Transactions, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 198, pp. 71-78, zitiert in Mualem (1986).
- Campbell, E. C.; Campbell, G. S.; Barlow, W. K. (1973): A dewpoint hygrometer for water potential measurement, Agricultural Meteorology, Vol. 12, pp. 113-121.
- Catana, M. C.; Vanapalli, S. K.; Garga, V. K. (2006): The Water Retention Characteristics of Compacted Clays, Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils, Arizona, 2006, Published by ASCE, Vol. 2, pp. 1348-1359.
- Childs, E. C.; Collis-George, G. N. (1950): The permeability of porous materials, Proc. Royal Soc. of London, Series A, London, U.K., 201, pp. 392-405, zitiert in Leong und Rahardjo (1997a).
- Corey, A. T. (1977): Mechanics of heterogeneous fluids in porous media, Water Resources Publ., Fort Collins, CO, zitiert in Fredlund und Rahardjo (1993).
- Croney, D.; Coleman, J. D. (1954): Soil structure in relation to soil suction (pF), Journal of Soil Science, Vol. 5, No. 1, pp. 75-84.
- Cuisinier, O.; Masroui, F. (2004): Testing the hydromechanical behaviour of a compacted swelling soil, Geotechnical Testing Journal, Vol. 27, No. 6, pp. 598-606.
- Dalton, J. (1801): On evaporation, In: Experimental Essays. 3: 574-594, zitiert in Schöniger und Dietrich (2009).
- Daniel, D. E.; Wu, Y.-K. (1993): Compacted clay liners and covers for arid sites, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 2, pp. 227-237.
- Darcy, H. (1856): Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Victor Dalmont, Paris.
- Davidson, J. M.; Stone, L. R.; Nielson, D. R.; Larue, M. E. (1969): Field measurements and use of soil-water properties, Water Resources Research, Vol. 5, pp. 1312-1321.
- Decagon Devices, Inc. (2003): WP4 Dewpoint PotentiaMeter, Operator's Manual for models WP4 and WP4-T, Version 2.2.
- Delage, P.; Lefebvre, G. (1984): Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 21, pp. 21-35.
- Delage, P.; Audiguier, M.; Cui, Y. J.; Howat, M. D. (1996): Microstructure of a compacted silt, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33, pp. 150-159.
- Diamond, S. (1970): Pore size distributions in clays, Clays and Clay Minerals, Vol. 18, pp. 7-23, Pergamon Press, 1970.
- Disse, M. (1999): Validation of a Simple Model to Determine Regional Evapotranspiration and Groundwater Recharge Rates, Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 24, No. 4, pp. 325-330, Elsevier Science Ltd.
- Durner, W. (1991): Vorhersage der hydraulischen Leitfähigkeit strukturierter Böden, Bayreuther Bodenkundliche Berichte, Band 20.
- Durner, W.; Foit, K.; Beyer, C.; Iden, S. (2003): Effektive hydraulische Eigenschaften heterogener Bodenstrukturen, Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 102, S. 59-60.

- DVWK (1996): DVWK-Merkblatt 238/1996: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., Bonn.
- Dyck, S. (1980): Angewandte Hydrologie, Teil 2: Der Wasserhaushalt der Flussgebiete, 2. Auflage, Verlag Ernst und Sohn, Berlin – München.
- Dyck, S.; Peschke, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie, 3. Auflage, Verlag für Bauwesen Berlin.
- Edlefsen, N. E.; Anderson, A. B. C. (1943): Thermodynamics of Soil Moisture, Hilgardia, Vol. 15, pp. 31-298, 1943, zitiert in Fredlund und Rahardjo (1993)
- Ekblad, J.; Isacsson, U. (2007): Time domain reflectometry measurements and soil-water characteristic curves of coarse granular materials used in road pavements, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 44, No. 7, pp. 858-872.
- FGSV (2009): Merkblatt über Bauweisen für Technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau, FGSV Verlag Köln, 2009.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. (1993): Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley & Sons, Inc.
- Fredlund, D. G.; Xing, A. (1994): Equations for the soil-water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 521-532.
- Fredlund, D. G.; Xing, A.; Huang, S. (1994): Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 533-546.
- Fredlund, D. G.; Houston, S. L. (2009): Protocol for the assessment of unsaturated soil properties in geotechnical engineering practice, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 46, pp. 694-707.
- Gardner, W. R. (1956): Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data, in Soil Science Society of America Proceedings, Vol. 20, pp. 317-320.
- Gardner, W. R. (1958): Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table, Soil Science, Vol. 85, No. 4, pp. 228-232.
- Gens, A. (1996): Constitutive modelling: Application to compacted soils, in Proc. 1st Int. Conf. Unsaturated Soils, Paris 3, pp. 1179-1200.
- Gitirana, F. N.; Fredlund, D. G. (2004): Soil-water characteristic curve equation with independent properties, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 130:2, pp. 209-212.
- Golf, W. (1981): Ermittlung der Wasserressourcen im Mittelgebirge, Wasserwirtschaft und Wassertechnik 31, S. 93-95, zitiert in DVWK Merkblatt 238/1996: Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen.
- Gupta, S. C.; Larson, W. E. (1979): Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density; Water Resources Research, Vol. 15, No. 6, pp. 1633-1635.
- Haines, W. (1923): The volume-change associated with variations of water content in soil, Journal of Agricultural Science, Vol. 13, pp. 296-310.
- Haude, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise, Mitt. Dt. Wetterd. 2 (11), Bad Kissingen (Dt. Wetterd.), zitiert in Schöniger und Dietrich (2009).

- Heyer, D. (2001): Die Durchlässigkeit mineralischer Dichtungsstoffe unter besonderer Berücksichtigung des Sättigungsvorganges, Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der TU München, Heft 30.
- Hilf, J. W. (1956): An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils, PhD Thesis, Technical Memo No. 654, United States Bureau of Reclamation, Denver, zitiert in Fredlund und Rahardjo (1993).
- Irmay, S. (1954): On the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Trans. Am. Geophysics Union, 35, zitiert in Leong und Rahardjo (1997a)
- Kleppe, J. H.; Olson, R. E. (1985): Desiccation cracking of soil barriers, Hydraulic Barriers in Soil and Rock, ASTM STP 874, pp. 263-275.
- Kunze, R. J.; Kirkham, D. (1962): Simplified accounting for membrane impedance in capillary conductivity measurements, Soil Science Society of America Journal, Vol. 26, pp. 421-426.
- Lambe, T. W. (1954): The permeability of compacted fine-grained soils, Symposium on Permeability of Soils, ASTM STP 163, pp. 56-67.
- Leong, E. C., Tripathy, S., Rahardjo, H. (2003): Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled-mirror dew-point technique, in *Géotechnique* 53, No. 2, pp. 173-182.
- Leong E. C.; Rahardjo, H. (1997a): Review of soil-water characteristic curve equations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. 1106-1117.
- Leong E. C.; Rahardjo, H. (1997b): Permeability functions for unsaturated soils, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, pp. 1118-1126.
- Li, X.; Zhang, L. M. (2009): Characterization of dual-structure pore-size distribution of soil, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, pp. 129-141.
- Lloret, A.; Villar, M. V.; Sanchez, M.; Gens, A.; Pintado, X.; Alonso, E. E. (2003): Mechanical behaviour of heavily compacted bentonite under high suction changes, *Géotechnique* 53, No. 1, pp. 27-40.
- Lu, N.; Likos, W. (2004): *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley & Sons, Inc.
- Meerdink, J. S.; Benson, C. H.; Khire, M. V. (1996): Unsaturated hydraulic conductivity of two compacted barrier soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 7, pp. 565-576.
- Miao, L.; Jing, F.; Houston, S. L. (2006): Soil-water Characteristic Curve of Remolded Expansive Soils, Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils, Arizona, 2006, Published by ASCE, Vol. 1, pp. 997-1004.
- Miller, C. J.; Yesiller, N.; Yaldo, K.; Merayyan, S. (2002): Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, No. 9, pp. 733-742.
- Mitchell, J. K.; Hooper, D. R.; Campanella, G. (1965): Permeability of compacted clay, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering*, ASCE, Vol. 91, No. SM 4, July, 1965, pp. 41-65.
- Mitchell, J. K.; Soga, K. (2005): *Fundamentals of soil behavior*, John Wiley & Sons, Inc.

- Monteith, J. L. (1965): Evaporation and environment, In: Foggy, G.T. (ed): Sympos. The state and movement of water in living organism, 205-234, Cambridge (Univ Press), zitiert in Schöniger und Dietrich (2009).
- Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 513-522.
- Mualem, Y. (1978): Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: generalized macroscopic approach, *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 2, pp. 325-334.
- Mualem, Y. (1986): Hydraulic conductivity of unsaturated soils: Prediction and formulas, in *Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed., A. Klute, ed., Number 9 in the series of Agronomy, American Society of Agronomy, pp. 799-823.
- Ng, C. W. W.; Pang, Y. W. (2000a): Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Febr. 2000, pp. 167-188.
- Ng, C. W. W.; Pang, Y. W. (2000b): Experimental investigations of the soil-water characteristics of a volcanic soil, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, No. 61, pp. 1252-1264.
- Olson, R. E.; Daniel, D. E. (1981): Measurement of hydraulic conductivity of fine-grained soils, *ASTM STP 746*, 1981, pp. 18-64.
- Penman, H. L. (1956): Estimating evaporation, *Trans. Amer. Geophys. Union* 37, pp. 43-46, zitiert in Schöniger und Dietrich (2009).
- Perez-Garcia, N.; Houston, S. L.; Houston, W. N.; Padilla, J. M. (2008): An oedometer-type pressure plate SWCC Apparatus, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 31, No. 2, pp. 115-123.
- Philip, J. R.; De Vries, D. A. (1957): Moisture movement in porous materials under temperature gradients, *Transactions of American Geophysical Union*, Vol. 38, pp. 222-237, zitiert in Mitchell und Soga (2005).
- Rawls, W. J.; Brakensiek; D. L., Saxton; K. E. (1982): Estimation of soil water properties, *Trans. ASAE* 25, pp. 1316-1320.
- Richards, L. A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous medium, *J. Physics*, Vol.1, pp. 318-333, zitiert in Fredlund und Rahardjo (1993).
- Ridley, A. M.; Burland, J. B. (1993): A new instrument for the measurement of soil moisture suction, *Géotechnique* Vol. 43, No. 2, pp. 312-324.
- Rijtema, P. E. (1965): An analysis of actual evapotranspiration, *Agricultural Research Reports (Wageningen)* No. 659, zitiert in Fredlund et al. (1994).
- Romero, E. M. (1999): Characterisation and Thermo-Hydro-Mechanical Behaviour of Unsaturated Boom Clay: An Experimental Study, Ph.D. thesis, Universitat Polytechnica de Catalunya, Barcelona.
- Romero, E.; Gens, A.; Lloret, A. (1999): Water permeability, water retention and microstructure of unsaturated compacted Boom clay, *Engineering Geology*, Vol. 54, pp. 117-127.
- Romero, E.; Vaunat, J. (2000): Retention curves of deformable clays, *Proceedings of an international workshop on unsaturated soils, Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils*, Trento, 2000, pp. 91-106.
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde*, Spektrum Akademischer Verlag, 15. Auflage, Heidelberg, 2002.

- Scheinost, A. C.; Sinowski, W.; Auerswald, K. (1997): Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function, *Geoderma* 78, S. 129-143.
- Schick, P. (2003): Ein quantitatives Zwei-Komponenten-Modell der Porenwasser-Bindekräfte in teilgesättigten Böden, *Mitteilungen des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau der Universität der Bundeswehr München*, Heft 17.
- Schneider, R. (2006): Untersuchungen zum Einfluss des Einbauzustandes auf den Zusammenhang zwischen Saugspannung und Wassergehalt bei aufbereiteten feinkörnigen Böden, nicht veröffentlichte Diplomarbeit am Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der TU München.
- Schnittger, A. (2006): Untersuchung der hydraulischen Durchlässigkeit aufbereiteter, ungesättigter feinkörniger Böden mittels Laborversuchen und FE-Simulation, nicht veröffentlichte Diplomarbeit am Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der TU München.
- Schöniger, M.; Dietrich, J. (2009): *Hydroskript*, <http://www.hydroskript.de>, Uni Braunschweig, Stand 2009, Zugriff am 03.12.09.
- Schubert, H. (1982): *Kapillarität in porösen Feststoffsystemen*, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 1982.
- Schulz, H.-H. (1996): Untersuchungen zur Bestimmung der Struktur poröser Körper, *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 3: Verfahrenstechnik*, Nr. 424, VDI Verlag, Düsseldorf, 1996.
- Scott, P. S.; Farquhar, G. J.; Kouwen, N. (1983): Hysteretic effects on net infiltration, *Advances in Infiltration*, Publ. 11 - 83, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, pp. 163-170.
- Seed, H. B.; Chan, C. K. (1959): Structure and strength characteristics of compacted clay, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE)*, No. 85 (SM 5), pp. 87-128.
- Shuttleworth, W. J. (1993): Evaporation, in Maidment, D. R.: *Handbook of Hydrology* (chapter 4), McGraw-Hill Verlag.
- Simms, P. H.; Yanful, E. K. (2002): Predicting soil-water characteristic curves of compacted plastic soils from measured pore-size distribution, *Géotechnique*, Vol. 52, No. 4, pp. 269-278.
- Simms, P. H.; Yanful, E. K. (2004): A discussion of the application of mercury intrusion porosimetry for the investigation of soils including an evaluation of its use to estimate volume change in compacted clayey soils, *Géotechnique*, Vol. 54, No. 6, pp. 421-426.
- Sivakumar, V.; Wheeler, J. (2000): Influence of compaction procedure on the mechanical behavior of an unsaturated compacted clay Part I: Wetting and isotropic compression, *Géotechnique*, Vol. 50, No. 4, pp. 359-368.
- Sivakumar, V.; Tan, W. C.; Murray, E. J.; McKinley, J. D. (2006): Wetting, drying and compression characteristics of compacted clay, *Géotechnique*, Vol. 56, No. 1, pp. 57-62.
- Sreedeeep, S.; Singh, D. N. (2005): A study to investigate the influence of soil properties on suction, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 33, No. 1, pp. 61-66.
- Sridharan, A. M., Altschaeffl, A. G., Diamond, S. (1971): Pore size distribution studies, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97 (SM5), pp. 771-787.

- Sun, D.; Sheng, D. C.; Cui, H. B.; Li, J. (2006): Effect of density on the soil-water-retention behaviour of compacted soil, Proceedings of the Fourth International Conference on Unsaturated Soils, Arizona, 2006, Published by ASCE, Vol. 2, pp. 1338-1347.
- Sverdrup, H. U. (1936): Das maritime Verdunstungsproblem, Ann. Hydrogr. u. Marit. Meteorol. 64, H. 2, zitiert in DVWK-Merkblatt 238/1996.
- Tarantino, A.; Tombolato, S. (2005): Coupling of hydraulic and mechanical behaviour in unsaturated compacted clay, Géotechnique Vol. 55, No. 4, pp. 307-317.
- Thakur, V. K. S.; Sreedeeep, S.; Singh, D. N. (2005): Parameters affecting soil-water characteristic curves of fine-grained soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 4, pp. 521-524.
- Thom, R.; Sivakumar, R.; Sivakumar, V.; Murray, E. J.; Mackinnon, P. (2007): Pore size distribution of unsaturated compacted kaolin: the initial states and final states following saturation, Géotechnique, Vol. 57, No. 5, pp. 469-474.
- Thorntwaite, C. W. (1948): An approach toward a rational classification of climate, The Geogr. Rev. 38 (1), pp. 55-94, zitiert in Schöniger und Dietrich (2009).
- Tietje, O.; Hennings, V. (1993): Bewertung von Pedotransferfunktionen zur Schätzung der Wasserspannungskurve, Z. Pflanzenernähr. Bodenk., Nr. 156, S. 447-455.
- Tinjum, J. M.; Benson, C. H.; Blotz, L. R. (1997): Soil-water characteristic curves for compacted clays, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 11, pp. 1060-1069.
- Tinjum, J. M.; Benson, C. H.; Blotz, L. R. (1999): Soil-water characteristic curves for compacted clays; closure to the discussion by E. C. Leong and H. Rahardjo, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 125, No. 7, p. 630.
- Topp, G. C.; Davis, J. L.; Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, Water Resour. Res., Vol. 16, pp. 574-582.
- van Genuchten, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, pp. 892-898.
- Vanapalli, S. K.; Fredlund, D. G.; Pufahl, D. E. (1999): The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till, Géotechnique, Vol. 49, No. 2, pp. 143-159.
- Vereecken, H.; Maes, J.; Feyen, J.; Darius, P. (1989): Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content, Soil Science, Vol. 148, No. 6, pp. 389-403.
- Villar, M. V. (1999): Investigation of the behaviour of bentonite by means of suction-controlled oedometer tests, Engineering Geology, Vol. 54, pp. 67-73.
- Washburn, E. W. (1921): Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material, Proc. Nat. Acad. Sci. U.S. No. 7, pp. 115-116, zitiert in Diamond (1970).
- Webb, P. A. (2001): An introduction to the physical characterization of materials by mercury intrusion porosimetry with emphasis on reduction and presentation of experimental data, Micromeritics Instrument Corp., Norcross, Georgia.
- Wind, G. P. (1955): Field experiment concerning capillary rise of moisture in heavy clay soil, Netherlands Journal of Agricultural Science, Vol. 3, pp. 60-69.

- Yuster, S. T. (1951): Theoretical consideration of multiphase flow in idealized capillary systems, Proc. Third World Pet. Congr. (2), pp. 437-445, zitiert in Leong und Rahardjo (1997a).
- Zentrum Geotechnik (2010): Schlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Grundbautechnische Untersuchungen und umweltgerechte Verwendung von organischen Böden in Geländeaufschüttungen“ mit Datum vom 11.08.2010, Zentrum Geotechnik der TU München, unveröffentlicht.
- ZTV E-StB (2009): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), FGSV Verlag Köln, 2009.

Anhang

Anhang 1: Eigene Untersuchungen zum Einfluss der Einbaubedingungen auf die hydraulischen Eigenschaften verdichteter Tone

- A1.1 Plastizitätsdiagramm (Lias-Ton, Lösslehm, Ton mit organischen Beimengungen)
- A1.2 Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie
- A1.3 Funktionsprinzip des Versuchsstandes der Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzelle
- A1.4 Ergebnisse der Untersuchungen in den Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen
- A1.5 Vorhersage der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen mit Hilfe von PTF
- A1.6 Maple-Ausdruck zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand mit Hilfe der Mehrstufen-Ausfluss-Methode nach *Gardner* und *Kunze&Kirkham*

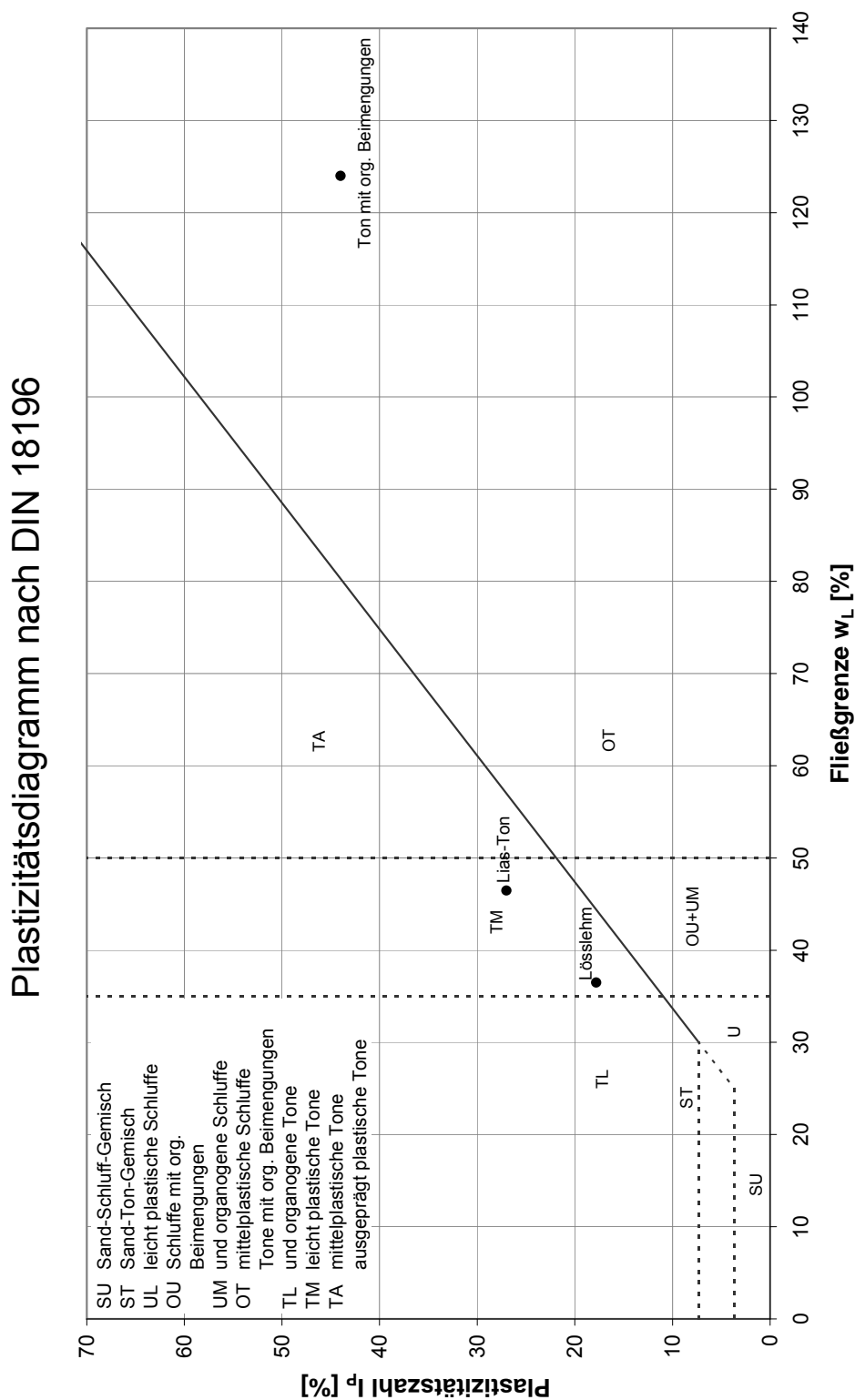
Anhang 2: Ableitung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung auf Grundlage der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand

- Maple-Ausdruck zur Ermittlung des van Genuchten Parameters n mit Hilfe eines Messwertes

Anhang 3: Versuchsschüttung am Münchner Flughafen

- A3.1 Probehügel Meßeinrichtungen Bestandsplan, Schnitte, FMG-TEL-I vom 04.02.2009
- A3.2 Aufbau der Versuchsschüttung
- A3.3 Messtechnische Instrumentierung
- A3.4 Messergebnisse
- A3.5 Ansatz nach Penman-Monteith zur Ermittlung der potentiellen Evapotranspiration
- A3.6 Numerische Modellierung des Wasserhaushaltes der Versuchsschüttung

A1.1 Plastizitätsdiagramm (Lias-Ton, Lösslehm, Ton mit organischen Beimengungen)



A1.2 Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie

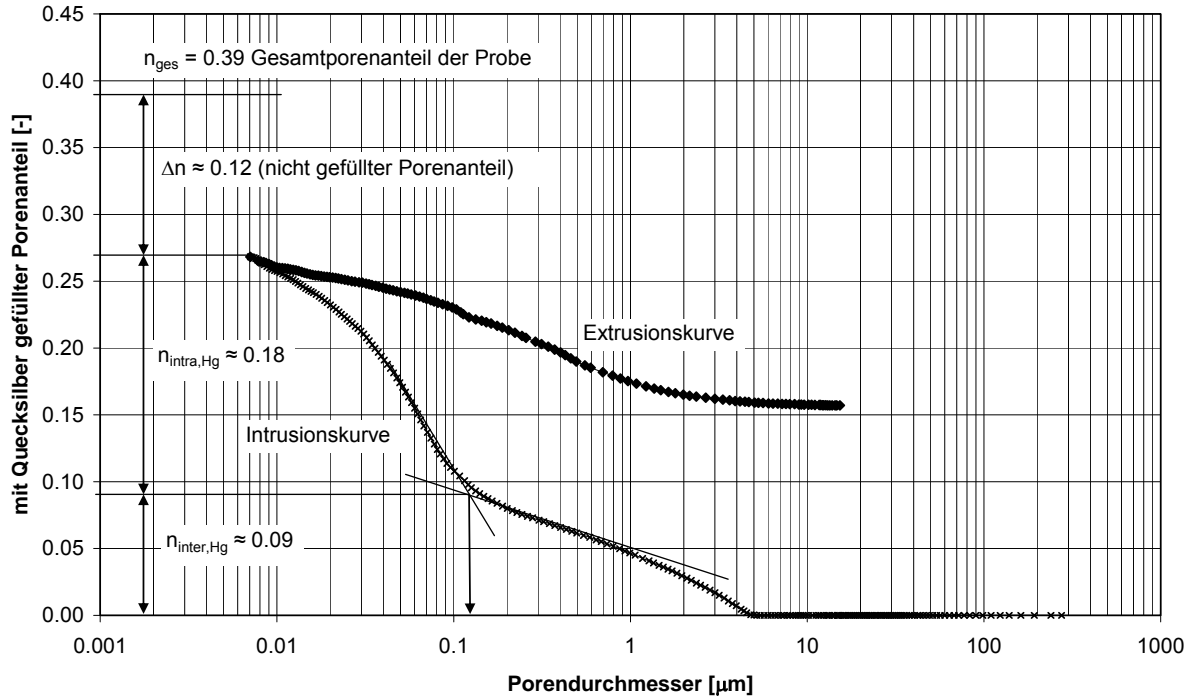


Abb. A1.1: Intrusions- und Extrusionskurven der Probe Pm2

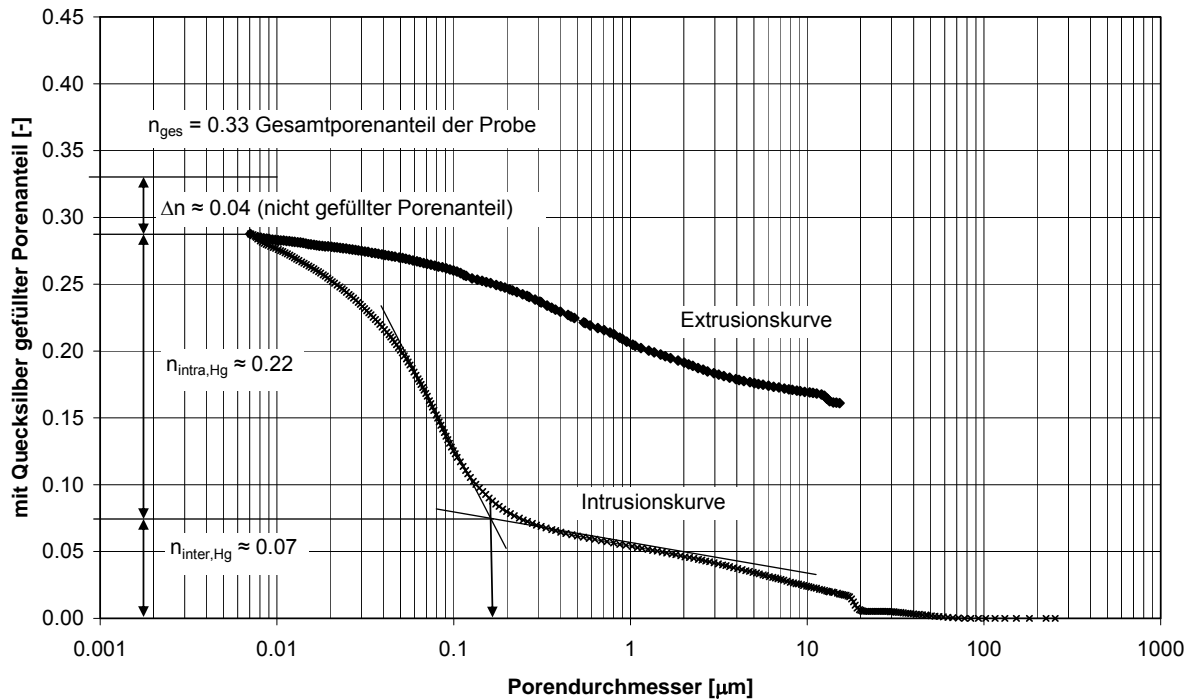


Abb. A1.2: Intrusions- und Extrusionskurven der Probe Pm3

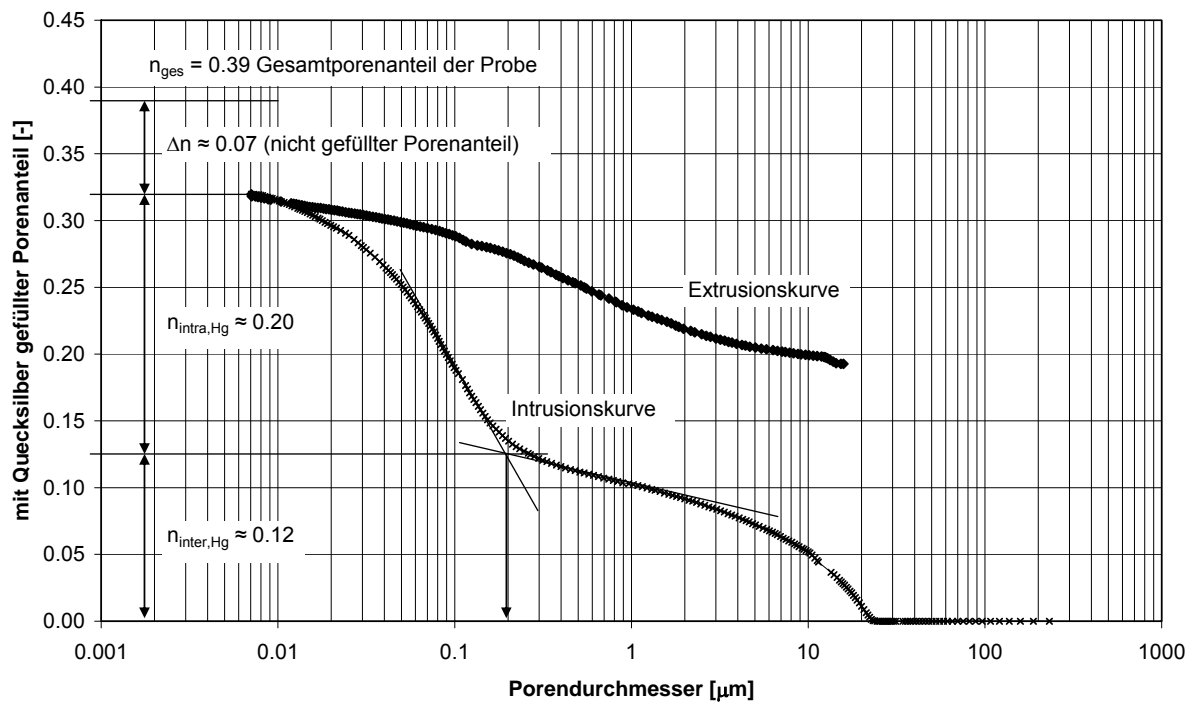


Abb. A1.3: Intrusions- und Extrusionskurven der Probe Pm4

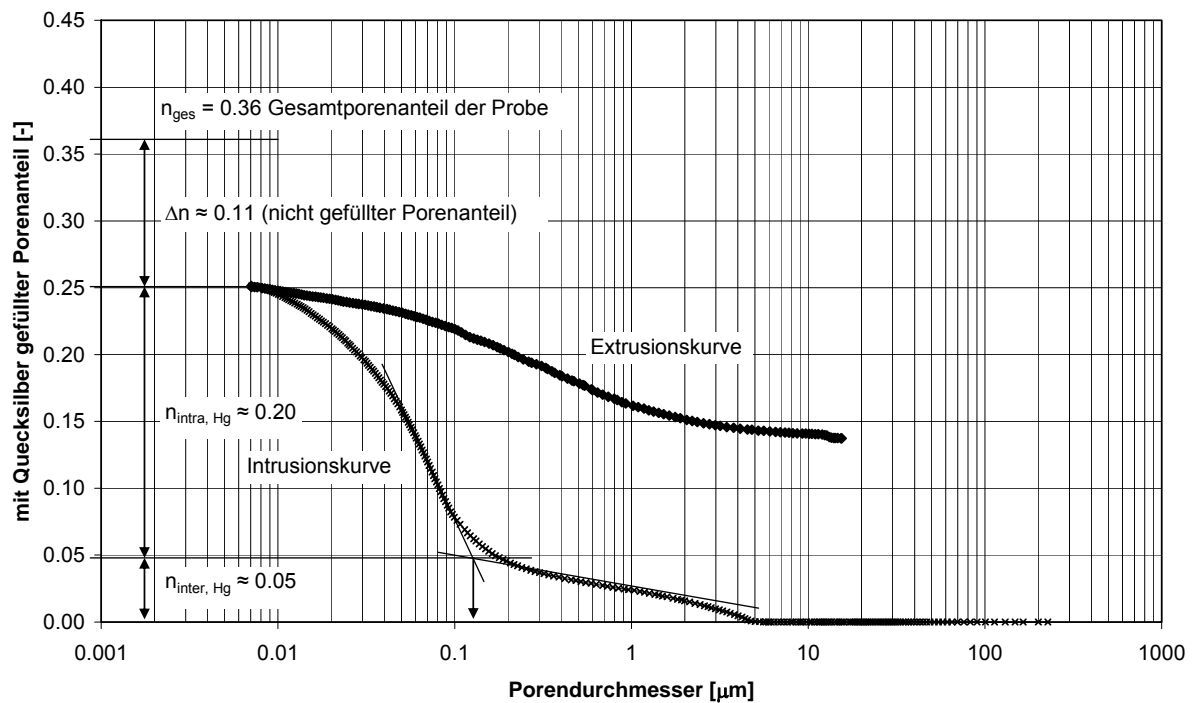


Abb. A1.4: Intrusions- und Extrusionskurven der Probe Pm5

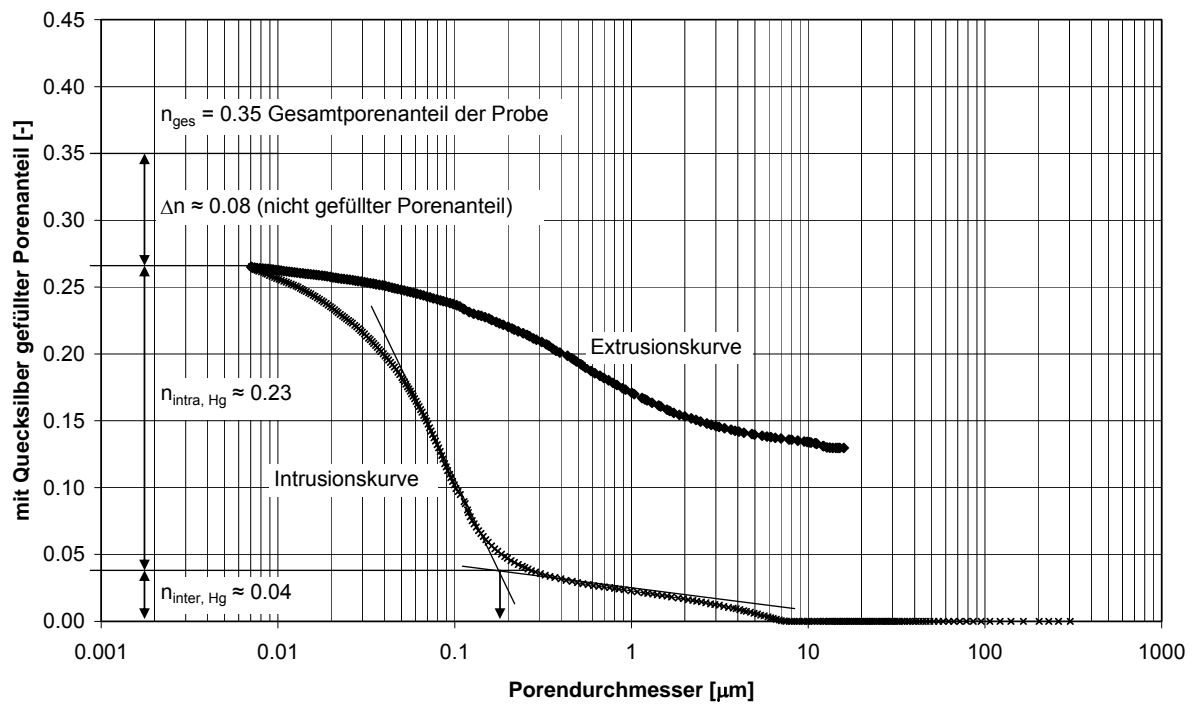


Abb. A1.5: Intrusions- und Extrusionskurven der Probe Pm6

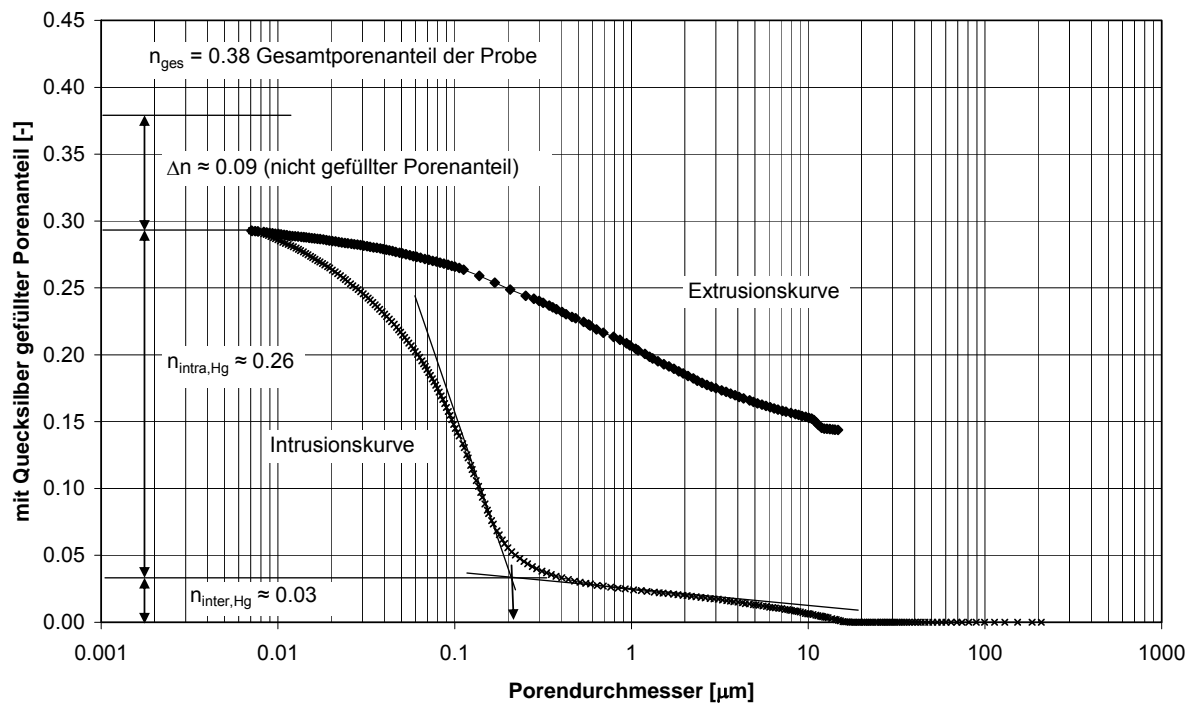


Abb. A1.6: Intrusions- und Extrusionskurven der Probe Pm7

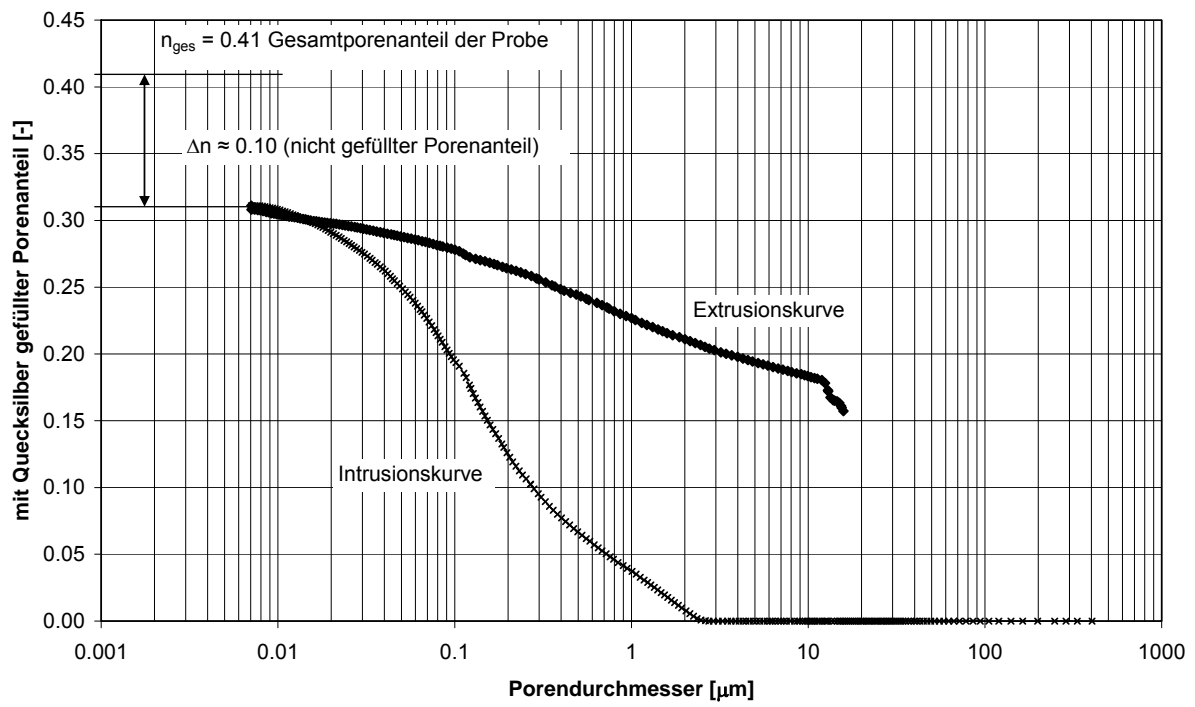
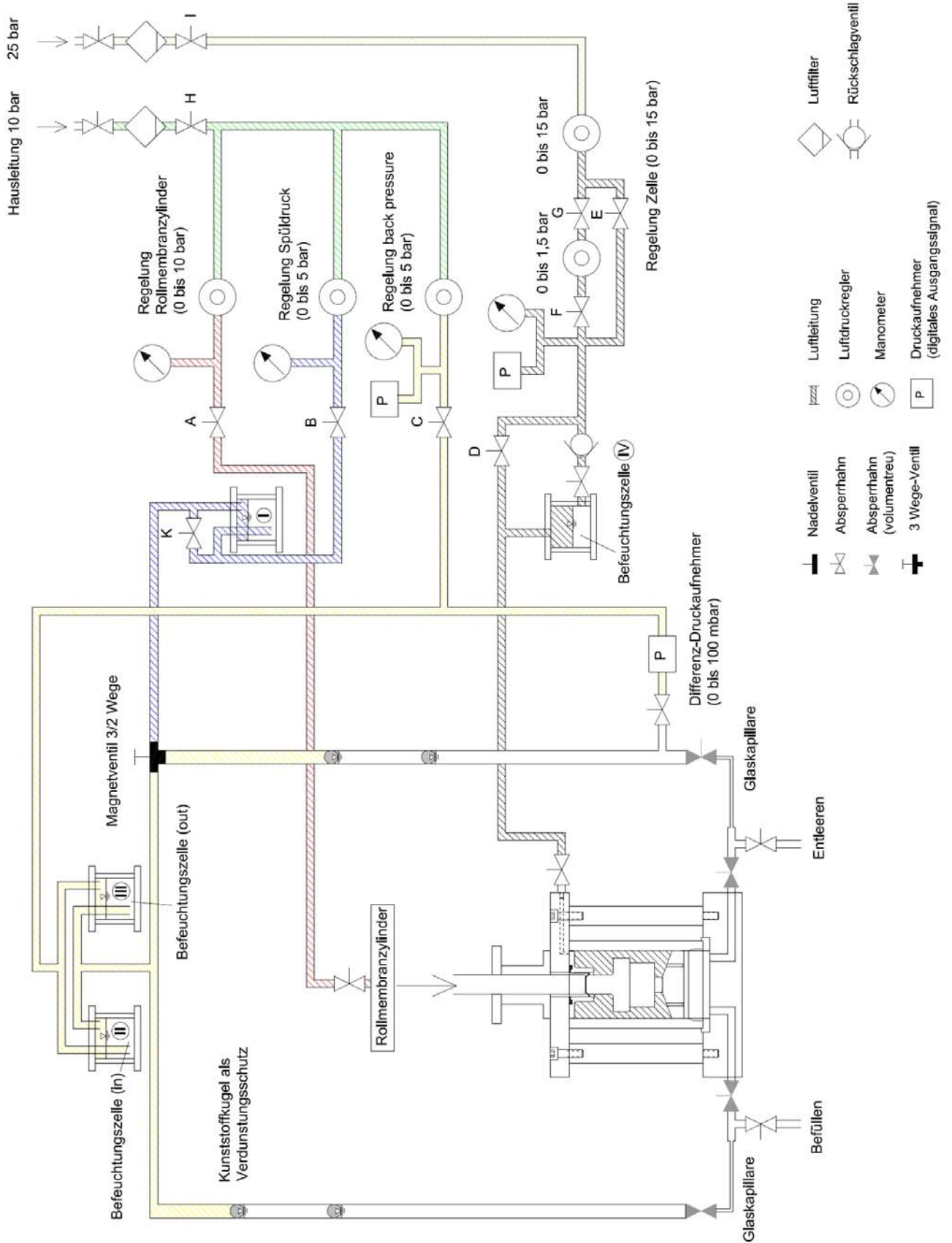


Abb. A1.7: Intrusions- und Extrusionskurven der Probe Pm8

A1.3 Funktionsprinzip des Versuchszustandes der Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzelle



A1.4 Ergebnisse der Untersuchungen in den Saugspannungs-kontrollierten Oedometerzellen

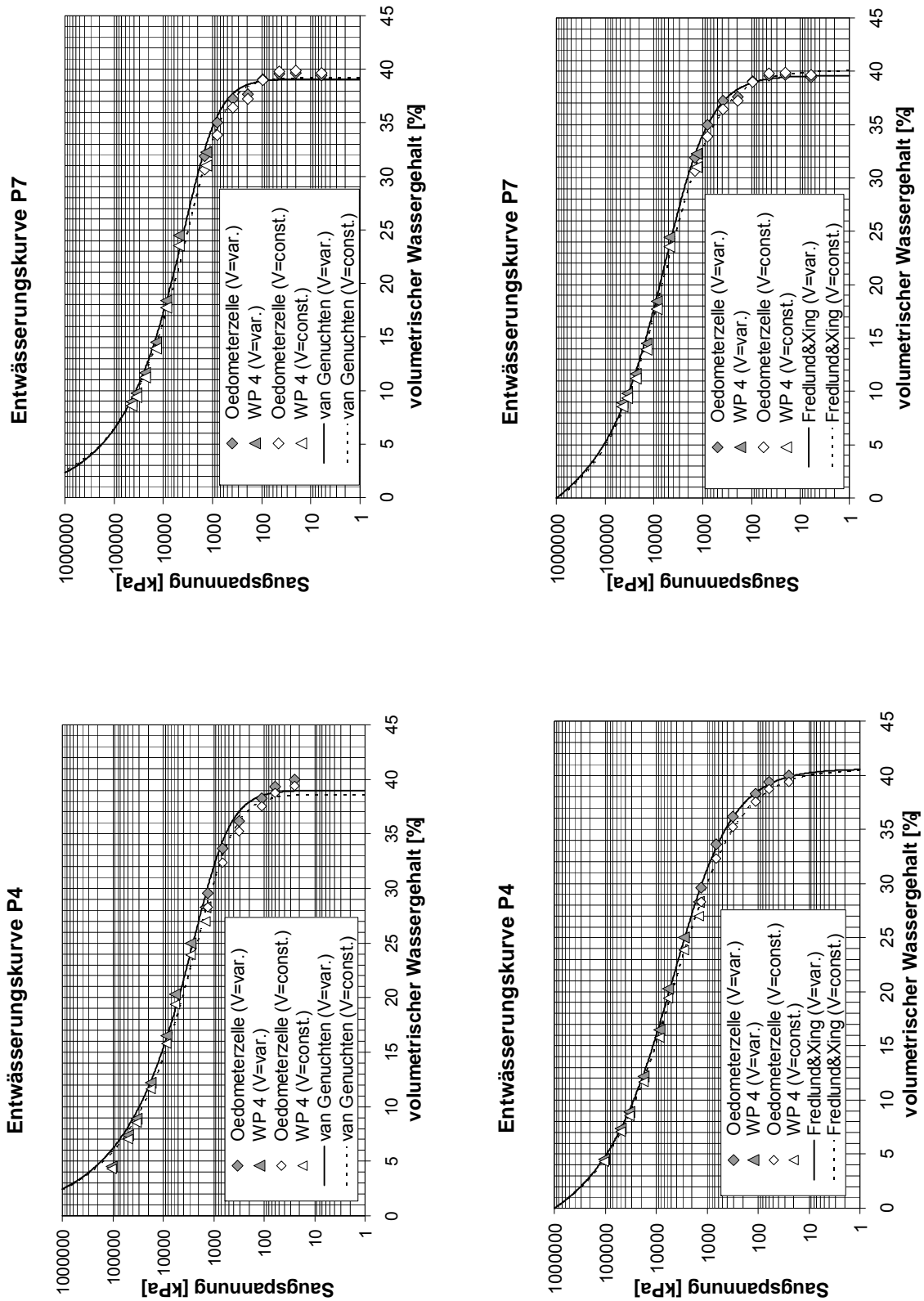


Abb. A1.8: Vergleich der Messdaten mit den Parametrisierungen nach van Genuchten und Fredlund&Xing für die Proben P4 und P7

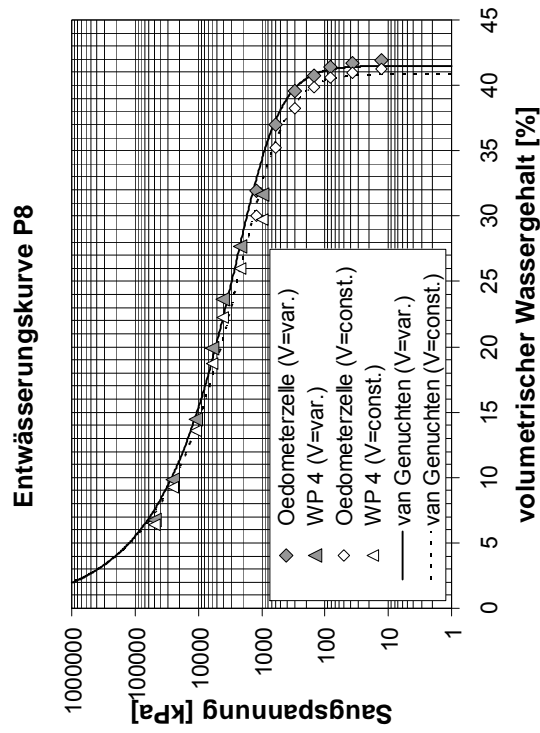
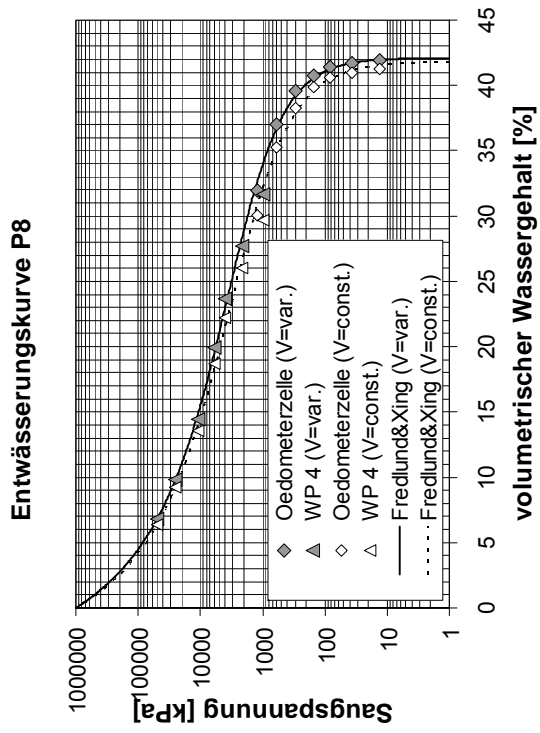


Abb. A1.9: Vergleich der Messdaten mit den Parametrisierungen nach van Genuchten und Fredlund&Xing für die Probe P8

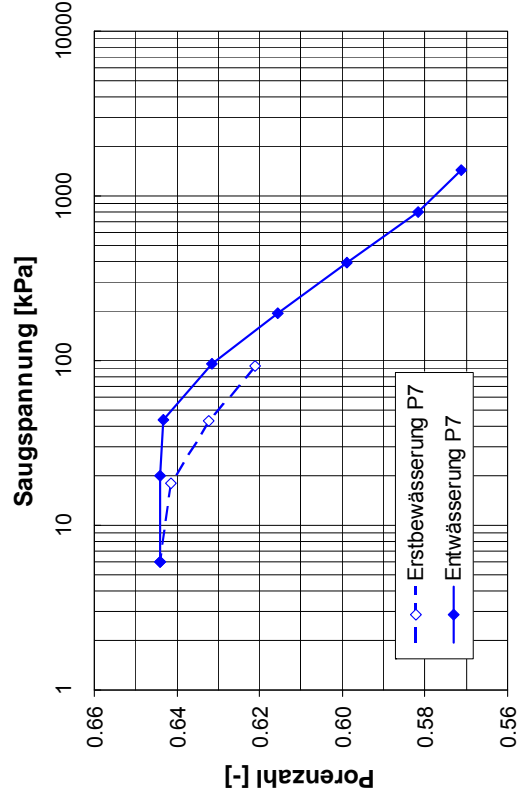
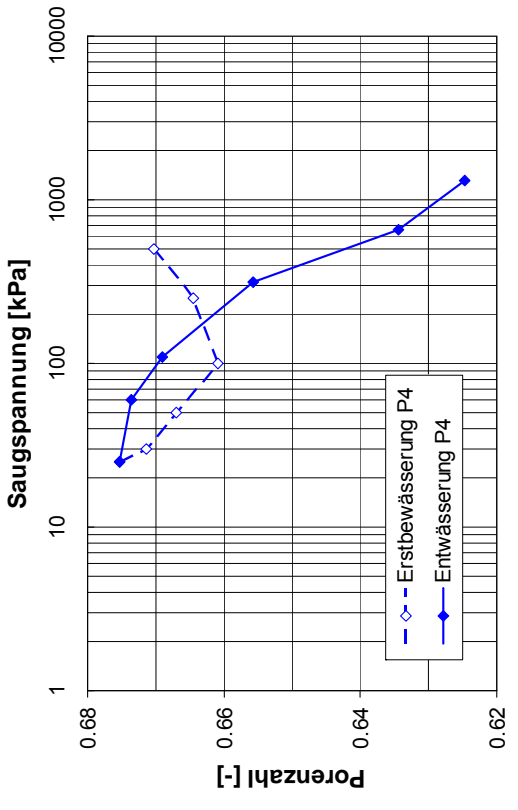
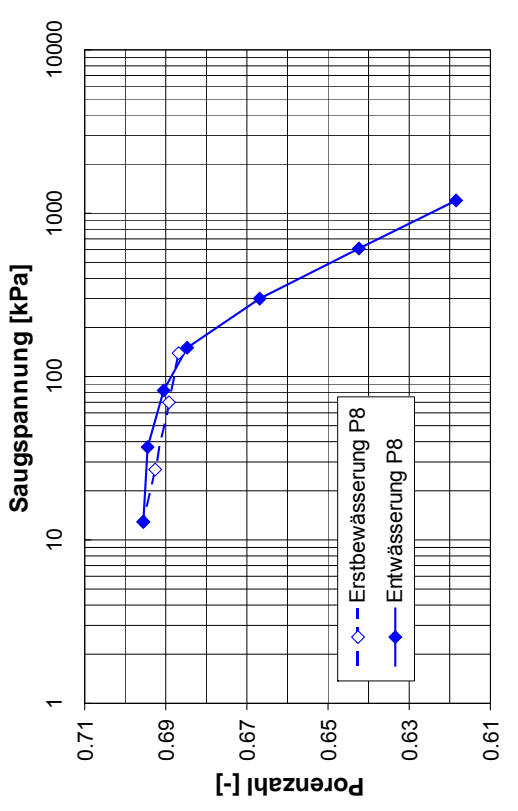
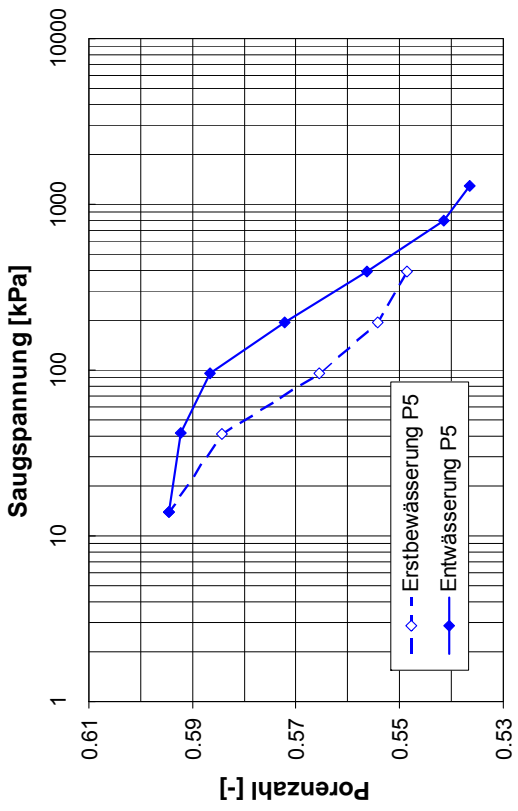


Abb. A1.10: Saugspannungs-Porenzahl-Diagramm für die Proben P4, P5, P7 und P8

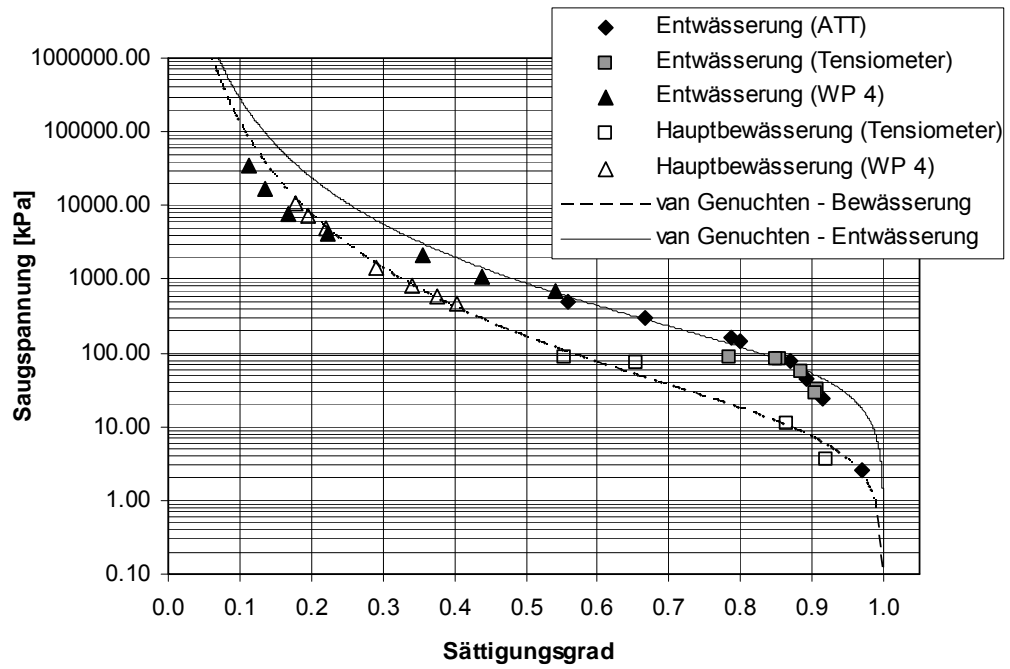


Abb. A1.11: Beziehung zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad für die Probe 9135-n mit Messwerten der Hauptbewässerung

A1.4 Vorhersage der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehungen mit Hilfe von PTF

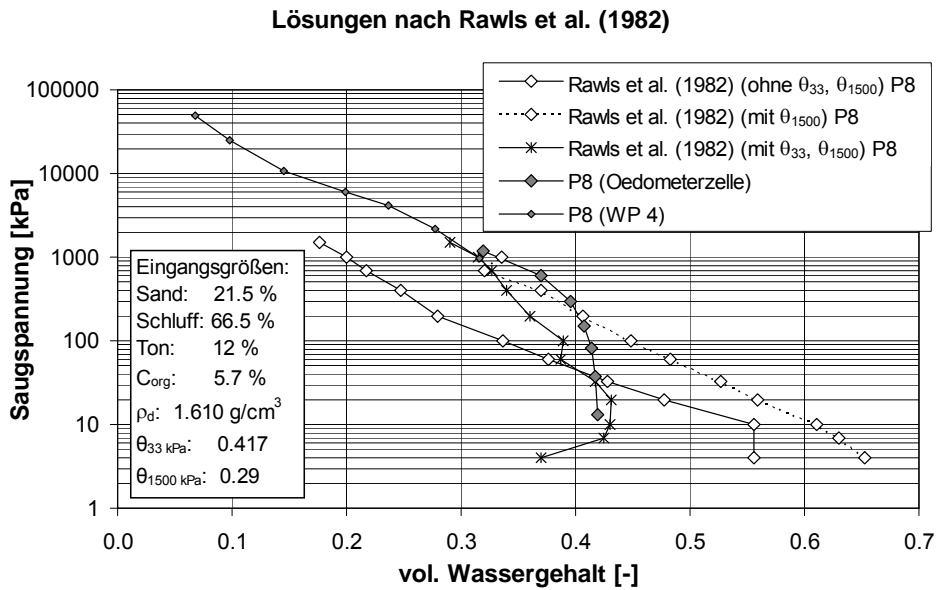


Abb. A1.12: Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den Vorhersagen nach Rawls et al. für die Probe P8 des Lias-Tons

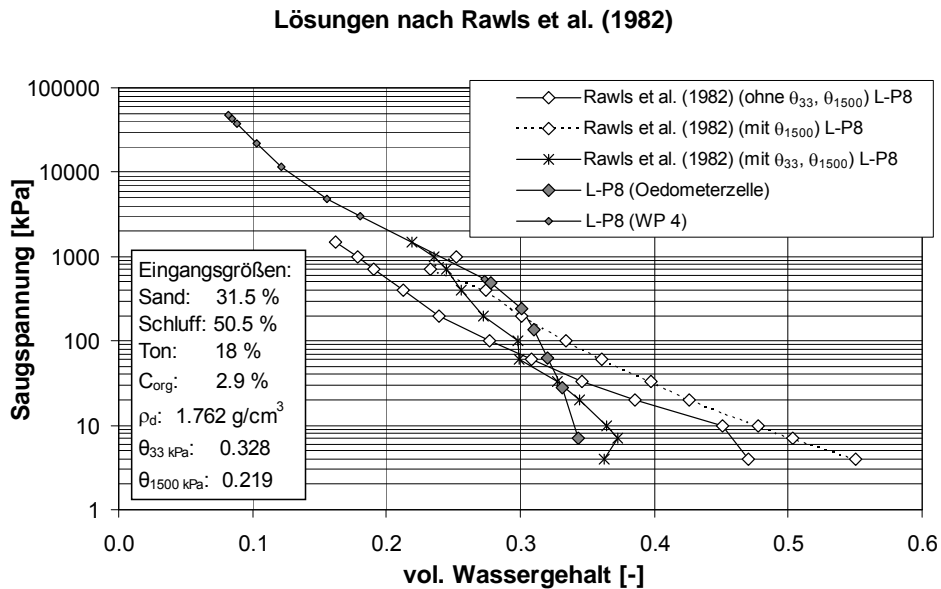


Abb. A1.13: Vergleich der Vorhersage nach Rawls et al. mit den experimentell ermittelten Werten für die Probe L-P8 des Lösslehms

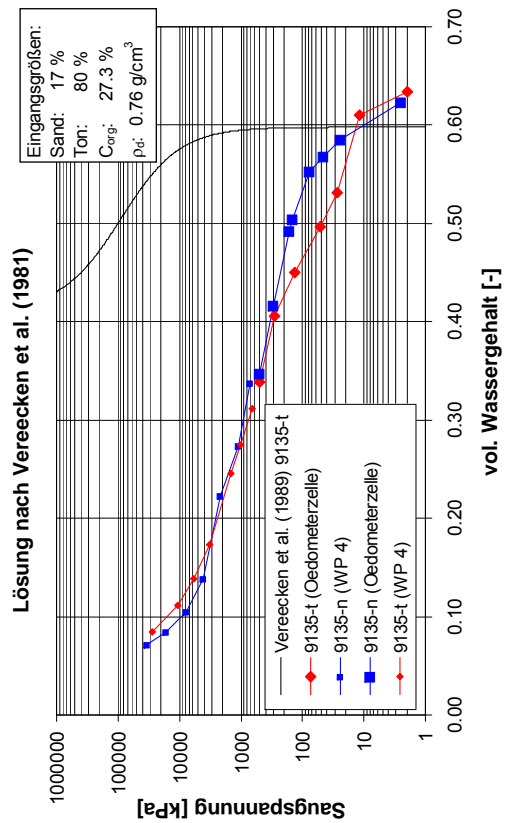
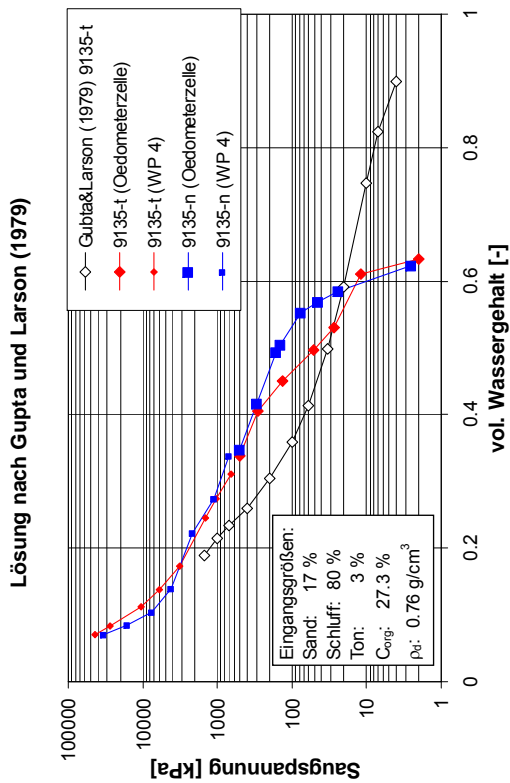
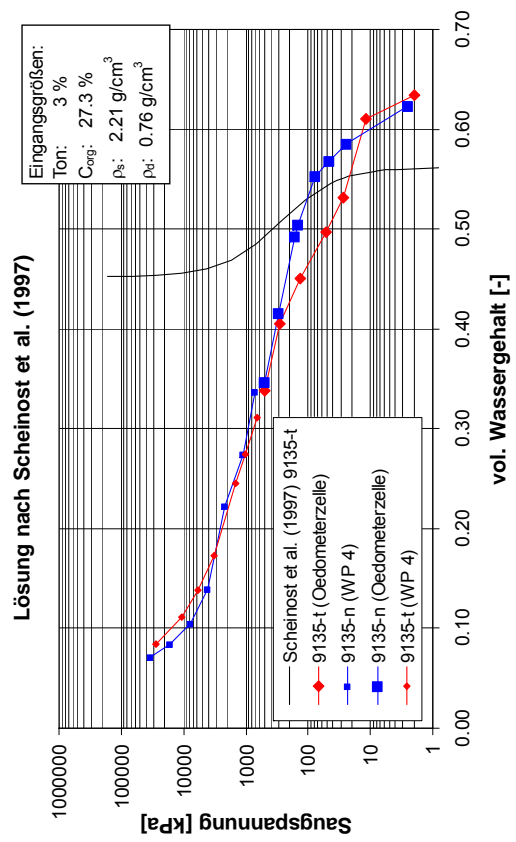
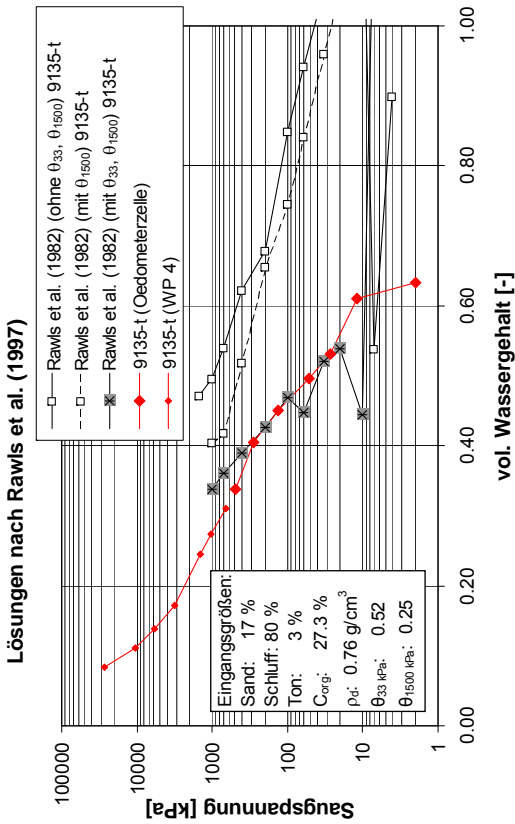


Abb. A1.14: Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den Vorhersagen unterschiedlicher PTF für die Proben 9135-t und 9135-n des Tons mit organischen Beimengungen

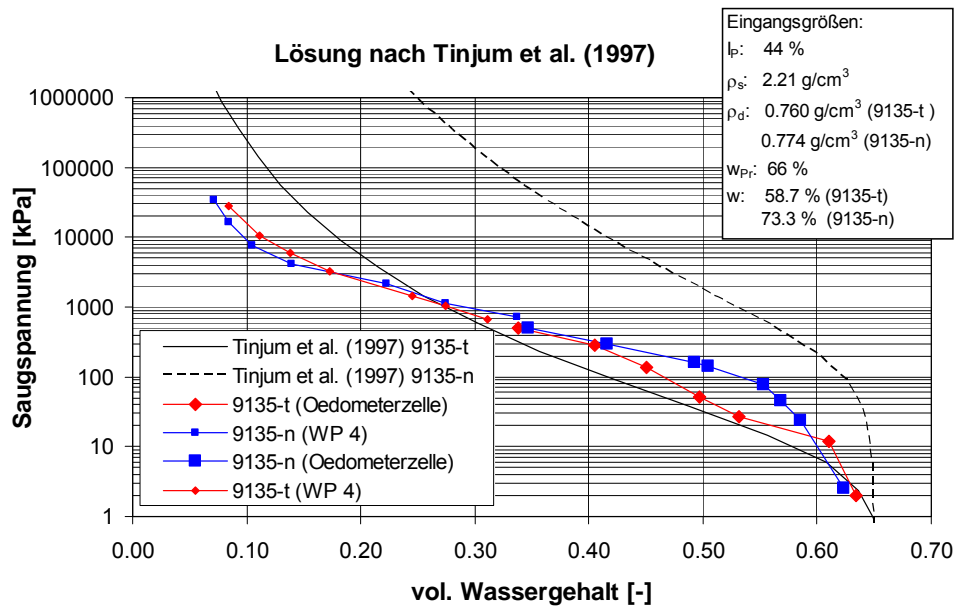


Abb. A1.15: Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den Vorhersagen nach *Tinjum et al.* für die Probe 9135-t und 9135-n des Tons mit organischen Beimengungen

A1.6 Maple-Ausdruck zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand mit Hilfe der Mehrstufen-Ausfluss-Methode nach *Gardner* und *Kunze&Kirkham*

```

> restart;
> with (linalg):
Warning, the protected names norm and trace have been redefined and unprotected
> with(LinearAlgebra):
Warning, the name GramSchmidt has been rebound
> with(geometry):
Warning, the name CrossProduct has been rebound
> with(SolveTools):
Warning, the name Basis has been rebound

```

▼ **Auswertung der Leitfähigkeit**

▼ **Allgemeine Angaben**

```

Dicke der Probe [m]
> L:=0.0094:
Durchlässigkeit der Keramik [m/s]
> kd:=7.4E-10:
Dicke der Keramik [m]
> e:=0.006:
ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Probe [m/s] - Schätzwert
> kw:=0.0000000000002:
Gesamtzufluss bzw. -ausfluss [m3]
> V0:=5.53916E-07:
Auswertungszeitpunkt t [s]
> t:=1375:
Zufluss bzw. Ausfluss bis zum Zeitpunkt t [m3]
> Vt:=2.01424E-07:
Druckänderung [N/m2]
> Deltapsi:=17000:
Durchmesser der Probe [m]
> Dm:=0.07:
Volumen der Probe [m3]
> Vges :=  $\frac{1}{4} Dm^2 \pi L$ :
Wichte des Wassers [N/m3]
> gammaw:=10000:

```

▼ **Kunze und Kirkham (1. und 2. Term)**

```

Ermittlung von alphan
Vorbelegen des Fehlers
> Deltakw_log:=1:

```

▼ **Iteration**

```

> while Deltakw_log>0.0001 do
>   kw_log:=evalf(log10(kw)):
>   a := kw*e/(L*kd);
>   h1 := alpha1*a = 1/tan(alpha1):
>   h2 := alpha2*a = 1/tan(alpha2):
>   h3 := fsolve(h1, {alpha1 = 0 .. 1/2*Pi}):
>   h4 := fsolve(h2, {alpha2 = Pi .. 3/2*Pi}):
>   assign(h3):
>   alpha1;
>   assign(h4):
>   alpha2;
>   f:=Vt/V0=1-((2*exp(-alpha1^2*Dw*t/L^2)/(alpha1^2*(a+csc
(alpha1)^2)))+(2*exp(-alpha2^2*Dw*t/L^2)/(alpha2^2*(a+
(csc(alpha2))^2)))));
>   h5:= fsolve(f, Dw);
>   kw2 := h5*V0*gamma_w/(Vges*Deltapsi):
>   evalf(kw2);
>   kw2_log:=evalf(log10(kw2)):
>   Deltakw_log:=evalf(sqrt((kw2_log-kw_log)^2));
>   kw:=evalf(kw2):
>   hh3:=alpha1;
>   hh4:=alpha2;
>   unassign('alpha1','alpha2'):
> end do:

```

▼ Gardner (1. und 2. Term)

```

> g:=(Vt/V0)=1-(8/(Pi^2))*sum((1/(2*i+1)^2)*exp(-(2*i+1)
^2*Pi^2*Dg*t/(4*L^2)),i=0..1):
> h6:=fsolve(g,Dg):
> kg:=h6*V0*gamma_w/(Vges*Deltapsi):
> h7:=evalf(kg):

```

Ausgabe Spalten A bis E: Kunze und Kirkham: k, Dw, a, alpha1, alpha2

Ausgabe Spalten F und G: Gardner: k, Dw

exp							
	A	B	C	D	E	F	G
1	8.323 10 ⁻¹¹	9.241 10 ⁻⁹	0.0718	1.4659	4.4060	6.009 10 ⁻¹¹	6.672 10 ⁻⁹

Anhang 2: Ableitung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung auf Grundlage der Durchlässigkeit im gesättigten Zustand

Maple-Ausdruck zur Ermittlung des van Genuchten Parameters n mit Hilfe eines Messwertes

```

> restart;
> with (linalg):
Warning, the protected names norm and trace have been redefined and unprotected
> with(LinearAlgebra):
Warning, the name GramSchmidt has been rebound
> with(geometry):
Warning, the name CrossProduct has been rebound
> with(SolveTools):
Warning, the name Basis has been rebound
> with(plots):
Warning, the name changecoords has been redefined

```

▼ Abschätzung der van Genuchten-Parameter unter Berücksichtigung eines Messwertes

```

> unassign('a_vg', 'n', 'n_vg', 'thetas', 'thetar', 'psi_mess',
'theta_mess', 'funktion', 'n_mess', 'm_vg', 'theta_vg', 'ks');

```

Eingabe gesättigter Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

```

> ks:=6.3E-11;
ks := 6.3 10-11 (1.1)

```

Eingabe Porenanteil [-]

```

> n:=0.365;
n := 0.365 (1.2)

```

Eingabe Messwerte [kPa]

```

> psi_mess:=7673;
psi_mess := 7673 (1.3)

```

```

> theta_mess:=0.195;
theta_mess := 0.195 (1.4)

```

Abschätzung alpha-Wert [1/kPa]

```

> a_vg:=1573.35*ks^0.6219;
a_vg := 0.0007129108627 (1.5)

```

Ermittlung theta_max [-]

```

> thetas:=n;
thetas := 0.365 (1.6)

```

Annahme theta_min [-]

```

> thetar:=0;
thetar := 0 (1.7)

```

Auswertung

```

> funktion:=-theta_mess + thetar+(thetas-thetar)*(1/(1+
(psi_mess*a_vg)^n_mess))^(1-1/n_mess)=0;

```

$$funktion := -0.195 + 0.365 \left(\frac{1}{1 + 5.470165049^{n_{mess}}} \right)^{\left(1 - \frac{1}{n_{mess}}\right)} = 0 \quad (1.8)$$

```

> n_vg:=fsolve(funktion,n_mess=1..2);
n_vg := 1.354223818 (1.9)

```

```

> m_vg:=1-1/n_vg;
m_vg := 0.265776182 (1.10)

```

```
m_vg:=0.2615696263 (1.10)
```

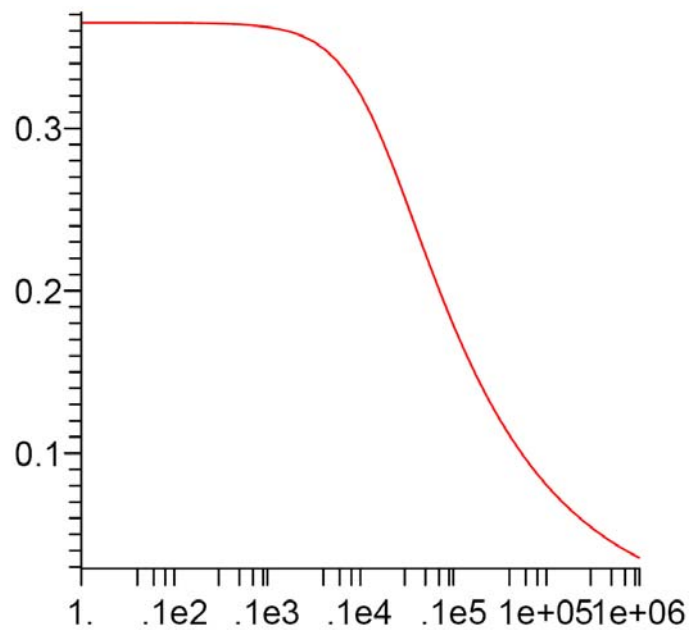
```
> theta_vg := psi -> thetar+(thetas-thetar)*(1/(1+(psi*a_vg)  
^n_vg))^m_vg;
```

$$\theta_{vg} := \psi \rightarrow \text{thetar} + (\text{thetas} - \text{thetar}) \left(\frac{1}{1 + (\psi a_{vg})^{n_{vg}}} \right)^{m_{vg}} \quad (1.11)$$

```
> eval(theta_vg(psi),psi=psi_mess);
```

```
0.1950000001 (1.12)
```

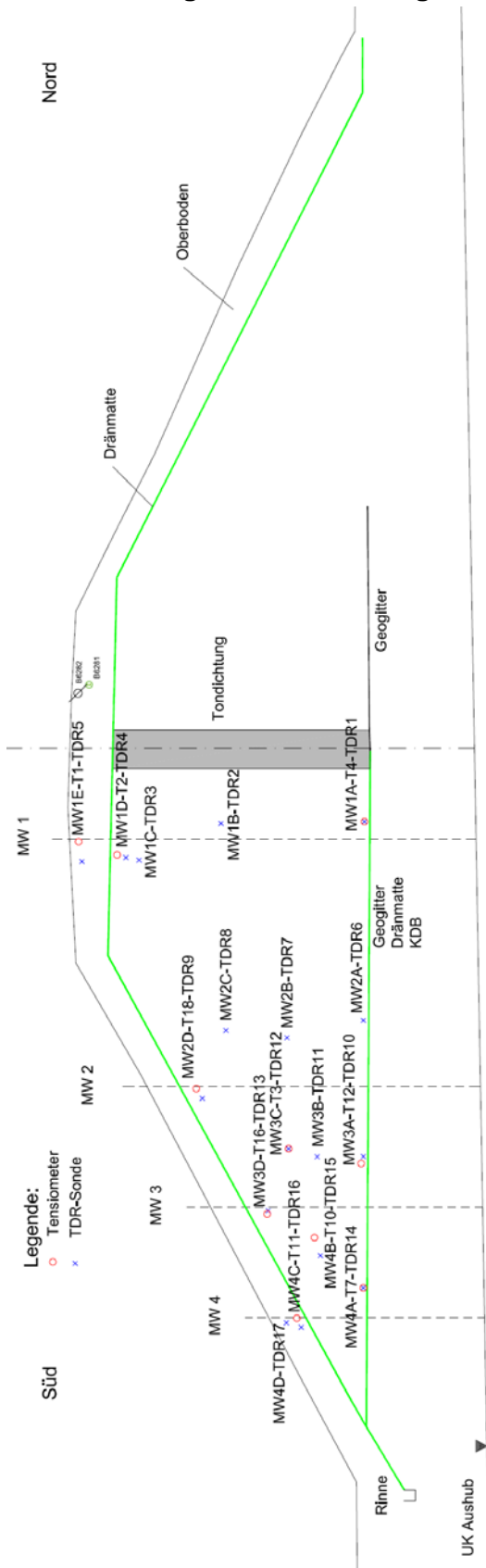
```
> semilogplot (theta_vg,1..1000000);
```



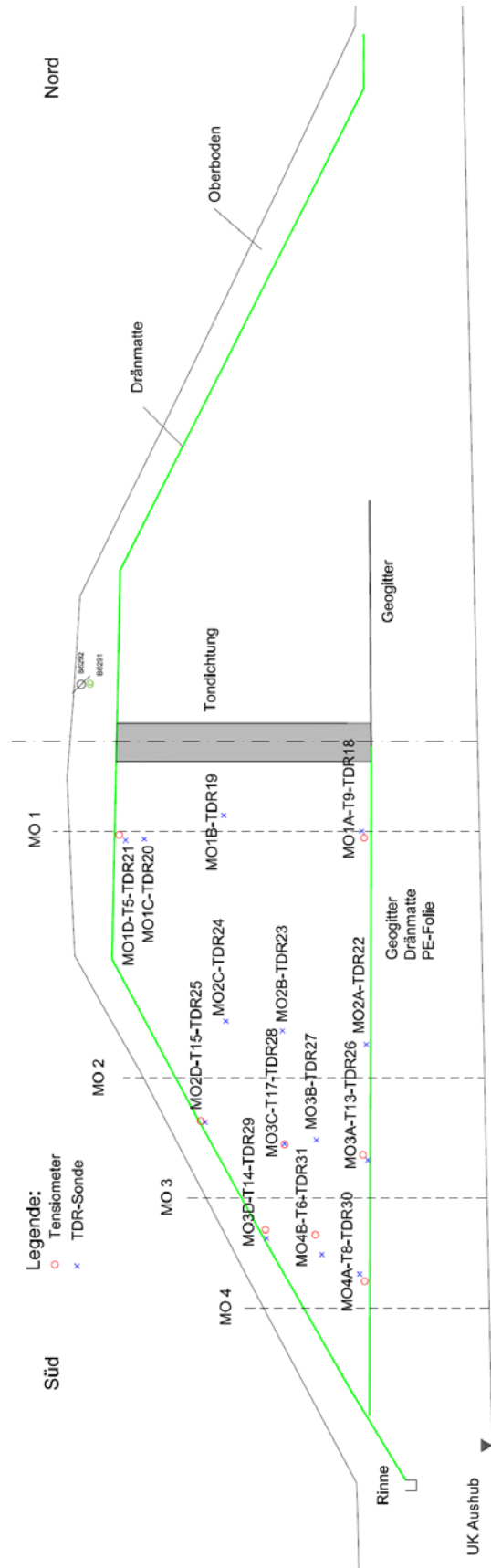
```
>
```


Anhang 3: Versuchsschüttung am Münchner Flughafen

A3.1 Probehügel Meßeinrichtungen Bestandsplan, Schnitte, FMG-TEL-I vom 04.02.2009



Schnitt durch die Versuchsschüttung im Bereich der trockenen Einbaubedingung



Schnitt durch die Versuchsschüttung im Bereich der nassen Einbaubedingung

A3.2 Aufbau der Versuchsschüttung



Abb. A3.1: Ausbreiten des Kernmaterials zum Trocknen



Abb. A3.2: Homogenisieren des Kernmaterials



Abb. A3.3: Anschlüsse in der Aufstandsfläche der Versuchsschüttung



Abb. A3.4: Polygonwalze (25t)



Abb. A3.5: Glattmantelwalze



Abb. A3.6: Dichtwandanschluss an Geogitter und Dränmatte



Abb. A3.7: Einbau und Verdichtung des Lösslehms



Abb. A3.8: Verlegen der Dränmatte



Abb. A3.9: Rinnenkörper und Anschluss an Messschacht



Abb. A3.10: Herstellen der Sickerleitung



Abb. A3.11: Aufbringen des Oberbodens



Abb. A3.13: Verlegen der Leerrohre



Abb. A3.12: Kabelanschluss

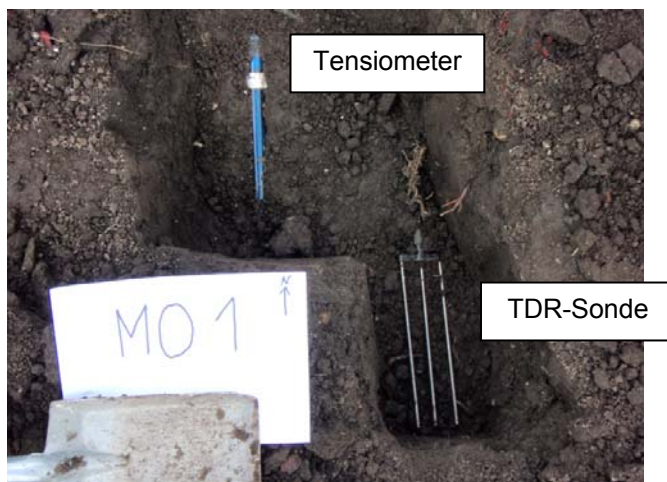


Abb. A3.14: Tensiometer und TDR-Sonde im eingebauten Zustand



Abb. A3.15: Erosionsschutzmatten



Abb. A3.16: Aufbringen der Anspritzbegrünung



Abb. A3.17: Probehügel nach Anspritzbegrünung

A3.3 Messtechnische Instrumentierung

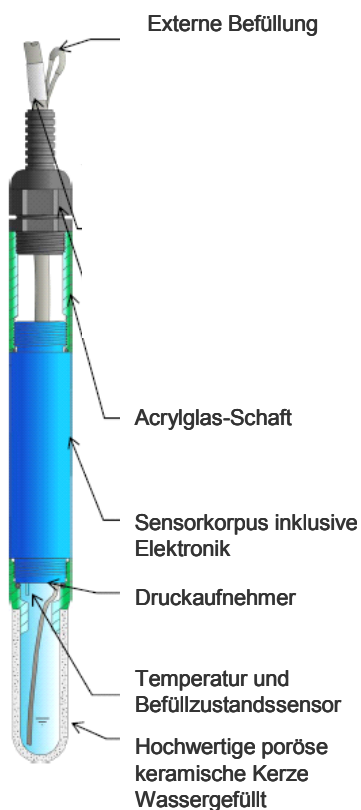


Abb. A3.18: Tensiometer T8 (entnommen von www.ums-muc.de und ergänzt)

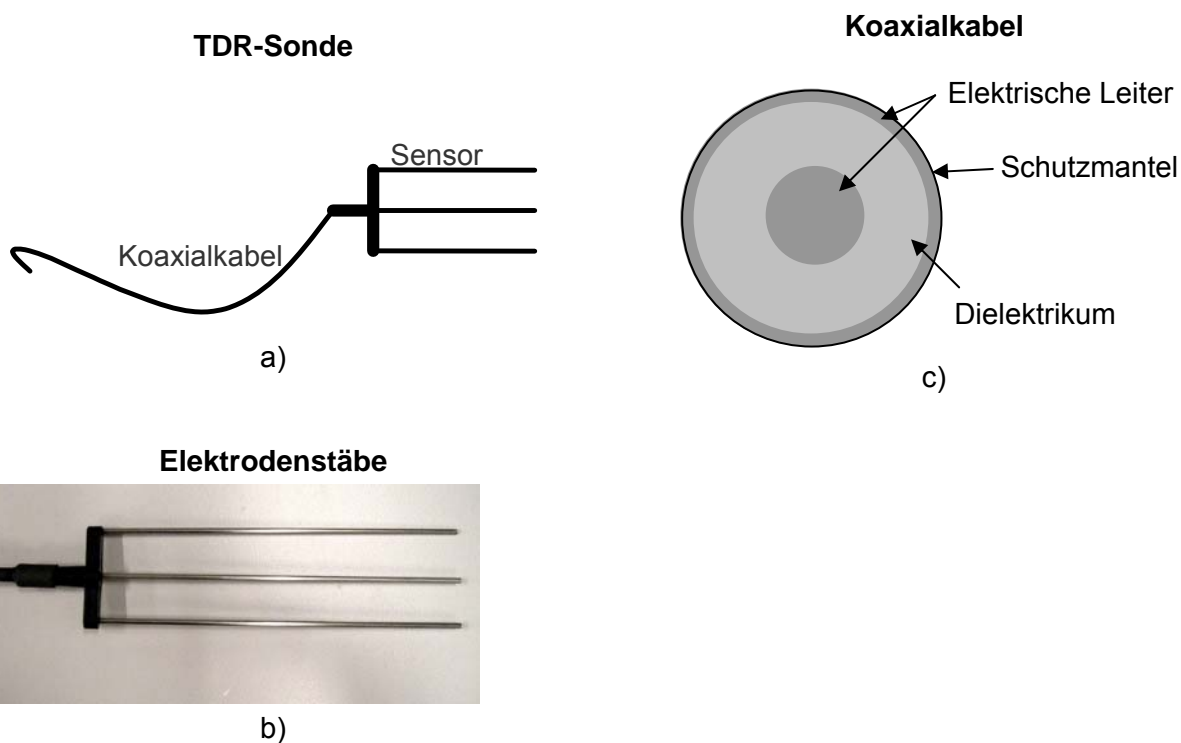


Abb. A3.19: Aufbau einer TDR-Sonde (a), Foto der Elektrodenstäbe (b), Aufbau eines Koaxialkabels (c)



a)



b)

Abb. A3.20: Kalibrierung der TDR-Sonden: a) Lagerweise Verdichtung des Bodens, b) Einbau der Sonde



Luftfeuchte- / Lufttemperatursensor



Windgeschwindigkeitsensor



Strahlungssensor



Windrichtungssensor



Klimamast mit den Sensoren

Abb. A3.21: Klimastation mit Darstellung der einzelnen Sensoren

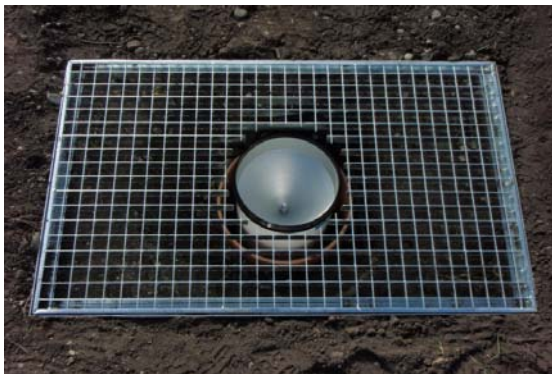


Abb. A3.22: Bodengleich eingebauter Niederschlagsammler



Abb. A3.23: Regensammler

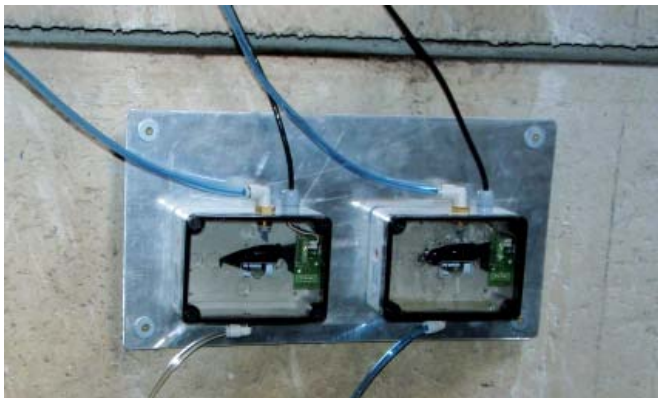


Abb. A3.24: Kippwaagen für an der Basis anfallendes Sickerwasser (Kippvolumen 4 ml)



Abb. A3.25: Kippwaage für Sickerwasser aus der oberen Dränmatte (Kippvolumen 100 ml)



Abb. A3.26: Pumpensumpf



Abb. A3.27: Sickerwassertank



Abb. A3.28: Draufsicht auf eingebauten 2-fach Extensometer

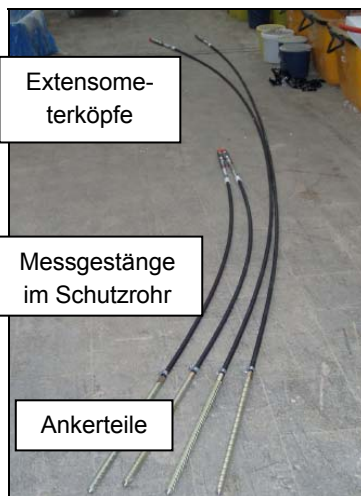


Abb. A3.29: Extensometer vor Einbau



Abb. A3.30: Befüllen des Bohrlochs mit einem Kaolin-Zement-Gemisch

B-6291 (nass)

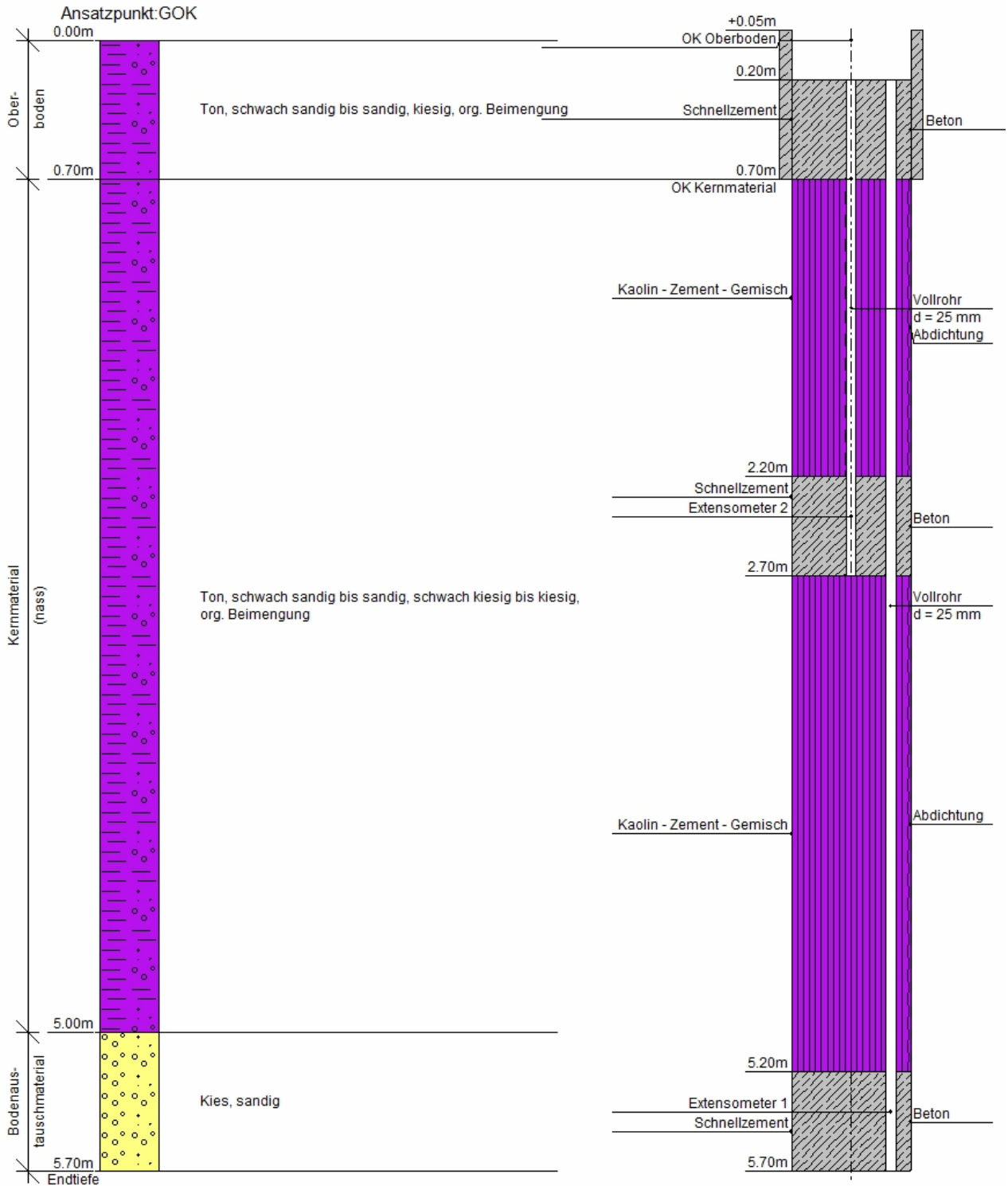


Abb. A3.31: Bohrprofil und Ausbauplan mit Darstellung der Extensometer für die Bohrung B6291 (nasse Seite)

B-6281 (trocken)

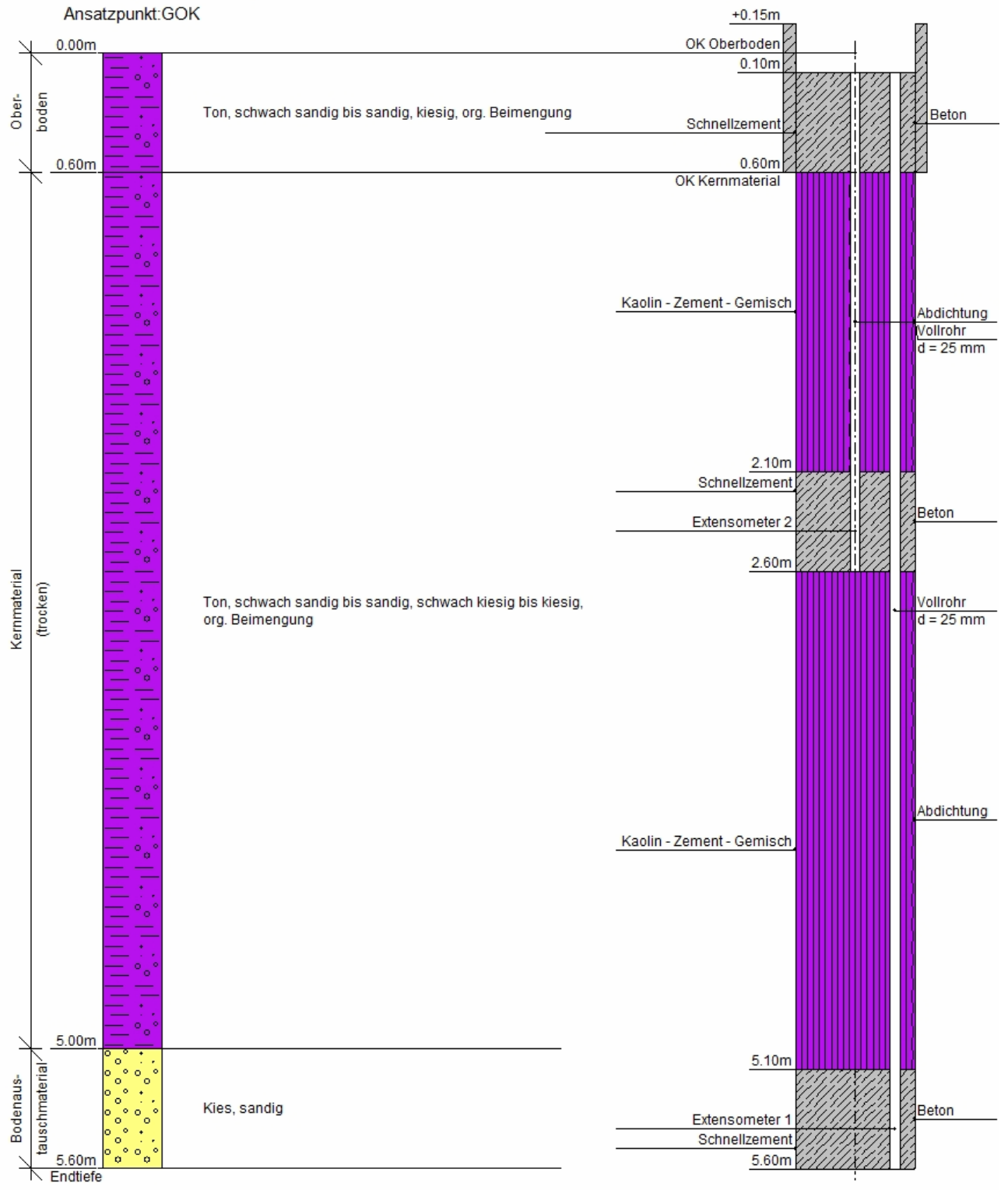


Abb. A3.32: Bohrprofil und Ausbauplan mit Darstellung der Extensometer für die Bohrung B-6281 (trockene Seite)

A3.4 Messergebnisse

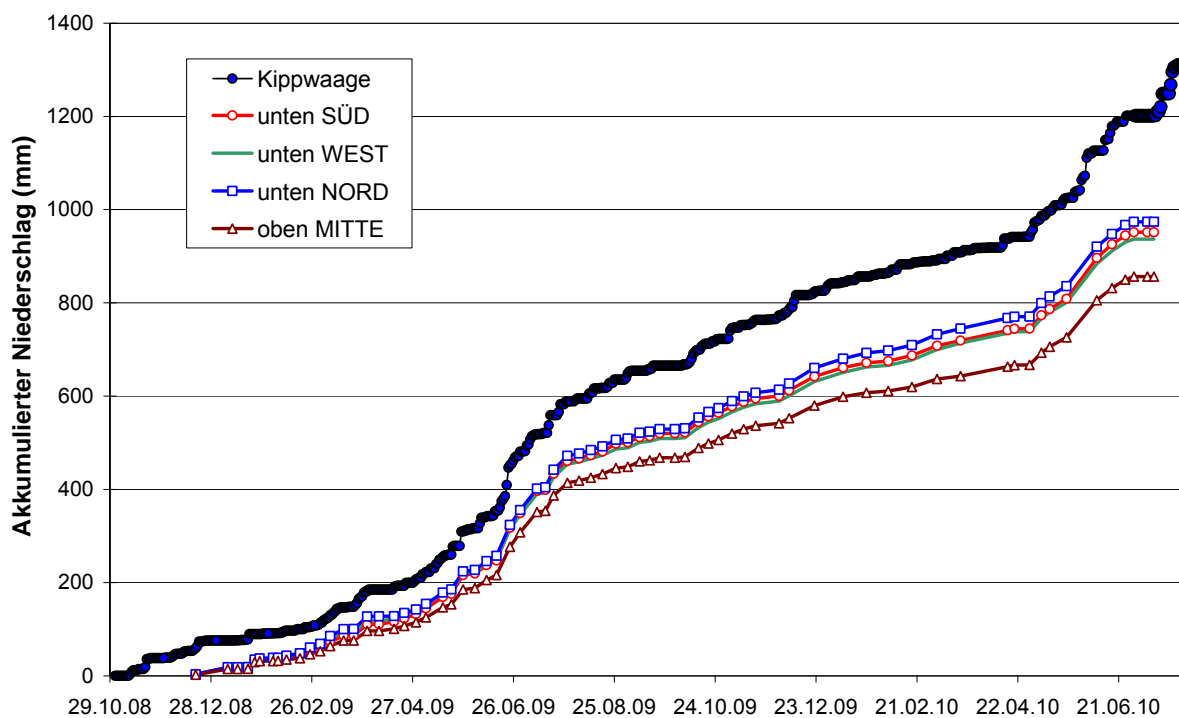


Abb. A3.33: Akkumulierte Niederschlagswerte der Regensammler und des bodengleich eingebauten Niederschlagssammlers

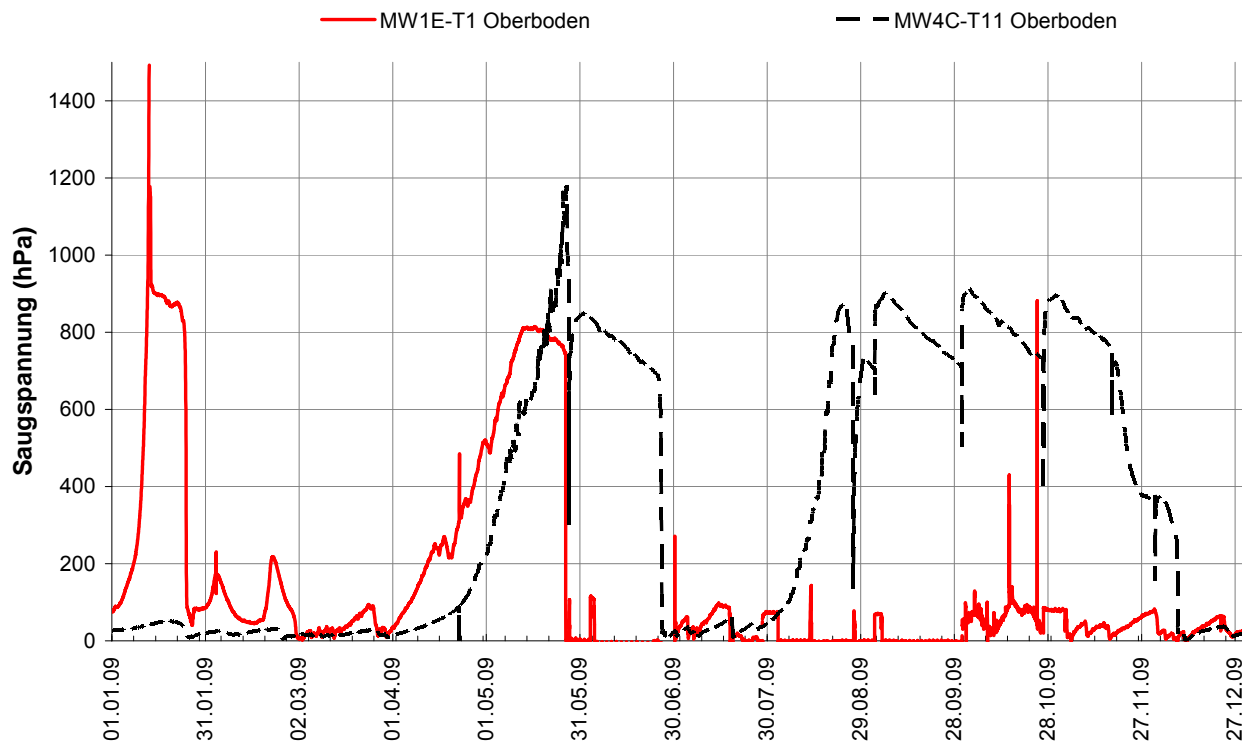


Abb. A3.34: Messwerte der Tensiometer im Oberboden für das Jahr 2009

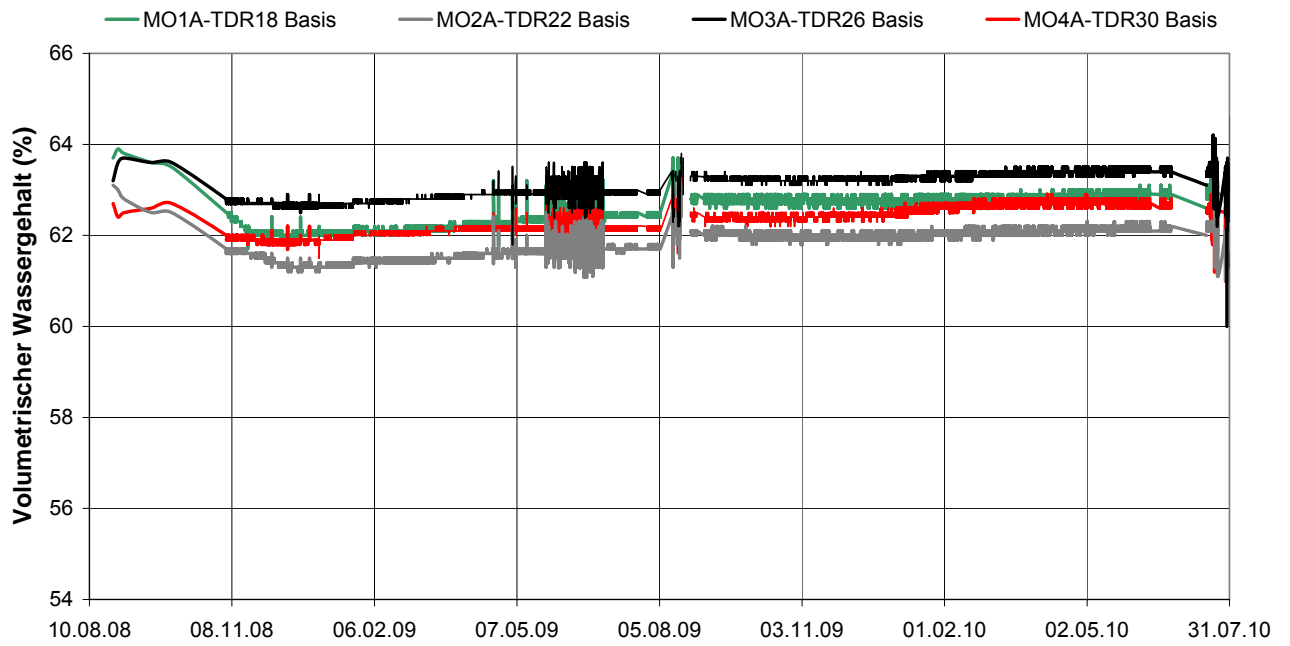


Abb. A3.35: Wassergehaltmessungen in den Messpunkten MO1A, MO2A, MO3A und MO4A (nasse Seite) an der Basis

A3.5 Ansatz nach Penman-Monteith zur Ermittlung der potentiellen Evapotranspiration

Die Gleichung nach Penman-Monteith zur Ermittlung der potentiellen Evapotranspiration ET_p einer horizontalen Fläche lautet: (DYCK UND PESCHKE, 1995; SHUTTLEWORTH, 1993; ALLEN ET AL., 1998)

$$ET_p = \frac{1}{L} \cdot \frac{s \cdot (R_n - G) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{p_s - p}{r_a}}{s + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad [\text{mm}] \quad (\text{A3.1})$$

Dabei ist L die latente Verdunstungswärme [MJ/kg], s die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [$\text{kN}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$], R_n die Nettostrahlung [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$], G der Bodenwärmestrom [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$], ρ die Dichte der Luft [kg/m^3], c_p die spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck [$\text{MJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$], p_s der Sättigungsdampfdruck [kN/m^2], p der Dampfdruck [kN/m^2], γ die Psychrometerkonstante [$\text{kN}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$], r_a der aerodynamische Widerstand [s/m] und r_s der Oberflächenwiderstand [s/m].

Der Sättigungsdampfdruck p_s [kN/m^2] lässt sich näherungsweise aus der Lufttemperatur T [$^\circ\text{C}$] mit Hilfe der empirischen Magnus-Formel berechnen:

$$p_s = 0,6112 \cdot e^{\left(\frac{17,3 \cdot T}{237,3 + T}\right)} \quad (\text{A3.2})$$

Aus der Differentiation dieser Gleichung erhält man die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve s [$\text{kN}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]:

$$s = p_s(T) \cdot \frac{4098}{(T + 237,3)^2} \quad (\text{A3.3})$$

Der Dampfdruck p [kN/m^2] der Luft lässt sich aus dem Sättigungsdampfdruck und der relativen Luftfeuchtigkeit rh [-] bestimmen:

$$p = p_s \cdot rh \quad (\text{A3.4})$$

Die latente Verdunstungswärme L beschreibt die Energiemenge [MJ/kg], die benötigt wird um 1 kg Wasser an einem Tag zu verdampfen. Diese ist von der Lufttemperatur T [$^\circ\text{C}$] abhängig und errechnet sich aus

$$L = 2,501 - 0,002361 \cdot T \quad (\text{A3.5})$$

Die Psychrometerkonstante γ [$\text{kN}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$] berechnet sich folgendermaßen:

$$\gamma = \frac{c_p \cdot p_f}{\varepsilon \cdot L} \quad (\text{A3.6})$$

Dabei bezeichnen p_f den Luftdruck [kN/m^2], ε das Verhältnis der Molgewichte des Wasserdampfes und der trockenen Luft ($\varepsilon = 0,622$ [-]), und c_p die spezifische Wärmekapazität von Luft bei 100 % Luftfeuchtigkeit ($c_p = 0,001013$ [$\text{MJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]). L [MJ/kg] stellt die latente Verdunstungswärme entsprechend Gleichung (A3.5) dar.

Die Nettostrahlung R_n [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$] bezeichnet die Differenz zwischen der auf die Bodenoberfläche auftreffenden und der von der Bodenoberfläche abgegebenen lang- und kurzwelligeren Strahlung. Der Bodenwärmestrom G [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$] gibt die Energiemenge an, die zur Bodenerwärmung führt. In den Nachtstunden findet eine Abkühlung statt. Vereinfachend lässt sich der Bodenwärmestrom getrennt für die Tag- und Nachtstunden folgendermaßen abschätzen (ALLEN ET AL., 1998):

$$G = 0,1 \cdot R_n \quad (\text{tagsüber}) \quad (\text{A3.7})$$

$$G = 0,5 \cdot R_n \quad (\text{nachts}) \quad (\text{A3.8})$$

Betrachtet man die Luft näherungsweise als ideales Gas, lässt sich ihre Dichte ρ_t [kg/m^3] aus dem Luftdruck p_t [N/m^2], der Lufttemperatur T [$^\circ\text{C}$] und der Gaskonstanten $R = 287,058$ [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$] folgendermaßen berechnen:

$$\rho_t = \frac{p_t}{R \cdot T} = \frac{p_t}{1,01 \cdot (T + 273) \cdot 0,287} \quad (\text{A3.9})$$

Diese Betrachtungsweise ist für trockene Luft zutreffend. Zur exakten Bestimmung der Luftdichte muss jedoch ihre Feuchtigkeit berücksichtigt werden. Unter Verwendung der Gaskonstanten für Wasserdampf $R_d = 461,51$ [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$] lässt sich die Luftdichte [kg/m^3] in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit rh [-], dem Sättigungsdampfdruck p_s [N/m^2] und dem vorhandenen Luftdruck p_f [N/m^2] bestimmen:

$$\rho_f = \frac{1}{(T + 273)} \cdot \left(\frac{p_f}{R} - rh \cdot p_s \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_d} \right) \right) \quad (\text{A3.10})$$

Bei den von MONTEITH (1965) eingeführten vegetationsspezifischen Parametern handelt es sich um den aerodynamischen Widerstand und den Oberflächenwiderstand der Vegetation (Bestandeswiderstand). Mit Hilfe dieser beiden Widerstände konnte er die von PENMAN (1956) aufgestellte Gleichung zur Beschreibung der potentiellen Evaporation um die aus der Transpiration der Pflanzen resultierenden Effekte erweitern. Der aerodynamische Widerstand r_a [s/m] beschreibt den Einfluss der Vegetation auf die Windgeschwindigkeit. Er lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{om}}\right) \cdot \ln\left(\frac{z_m - d}{z_{oh}}\right)}{k^2 \cdot v} \quad (\text{A3.11})$$

Dabei sind z_m die Höhe, in der die Windgeschwindigkeit gemessen wird [m], d die Verdrängungshöhe [m], z_{om} die aerodynamische Rauigkeitslänge [m], z_{oh} die Rauigkeitslänge [m] für Wärme und Dampf, k die Karman-Konstante (0,41 [-]) und v die Windgeschwindigkeit [m/s].

Der Bestandeswiderstand beschreibt die Wasseraufnahme durch die Vegetation. Er stellt damit den entscheidenden Parameter zur Bestimmung der tatsächlichen Evapotranspiration dar. Die Ermittlung des Bestandeswiderstandes ist jedoch mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, da dieser u. a. von der Pflanzenart – und -entwicklung (Blattfläche), dem Sättigungsgrad des Bodens und von Umwelteinflüssen abhängt. Es wurden jedoch brauchbare Näherungen zur Ermittlung des minimalen Bestandeswiderstandes bei ausreichender Wasserversorgung aufgestellt. Weit verbreitet ist eine einfache Näherung nach SHUTTLEWORTH (1993):

$$r_s = \frac{200}{\text{LAI}} \text{ [s/m]} \quad (\text{A3.12})$$

Der Blattflächenindex LAI gibt dabei das Verhältnis zwischen der Blattfläche und der Bodenfläche wieder. Für Gras lässt er sich folgendermaßen abschätzen (ALLEN ET AL., 1998):

$$\text{LAI} = 24 \cdot h \quad \text{mit } h: \text{ Höhe des Bewuchses [m]} \quad (\text{A3.13})$$

A3.6 Numerische Modellierung des Wasserhaushaltes der Versuchsschüttung

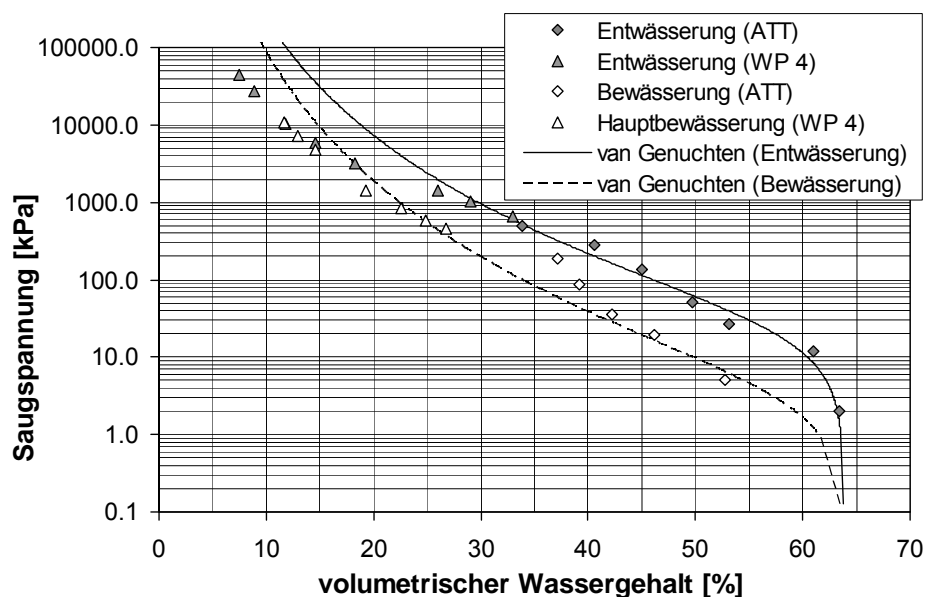


Abb. A3.36: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung des organogenen Tons (Probe 9135-t)

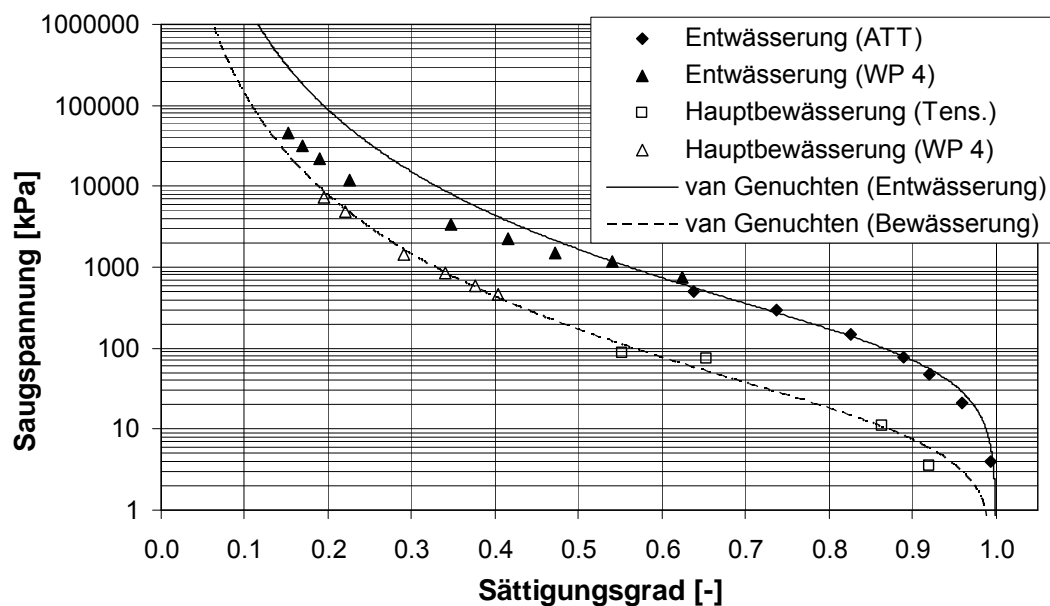


Abb. A3.37: Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung des Oberbodens

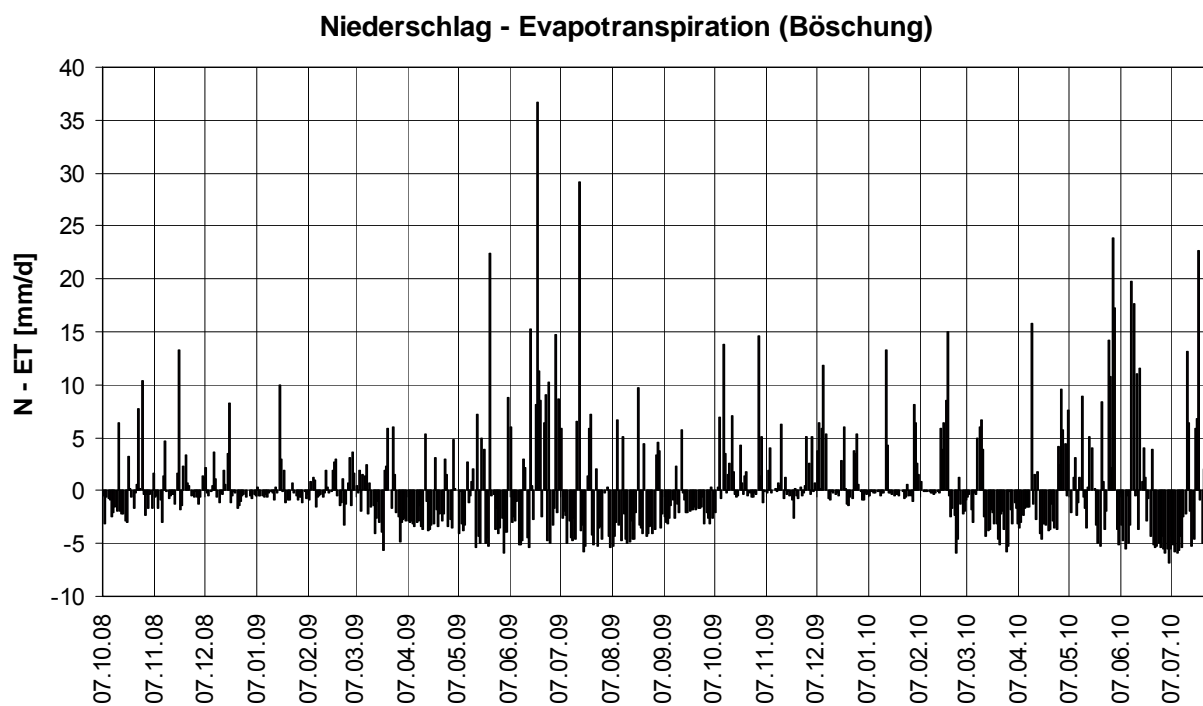


Abb. A3.38: Differenz zwischen Niederschlag und Evapotranspiration als Randbedingung im Böschungsbereich beim FE-Modell

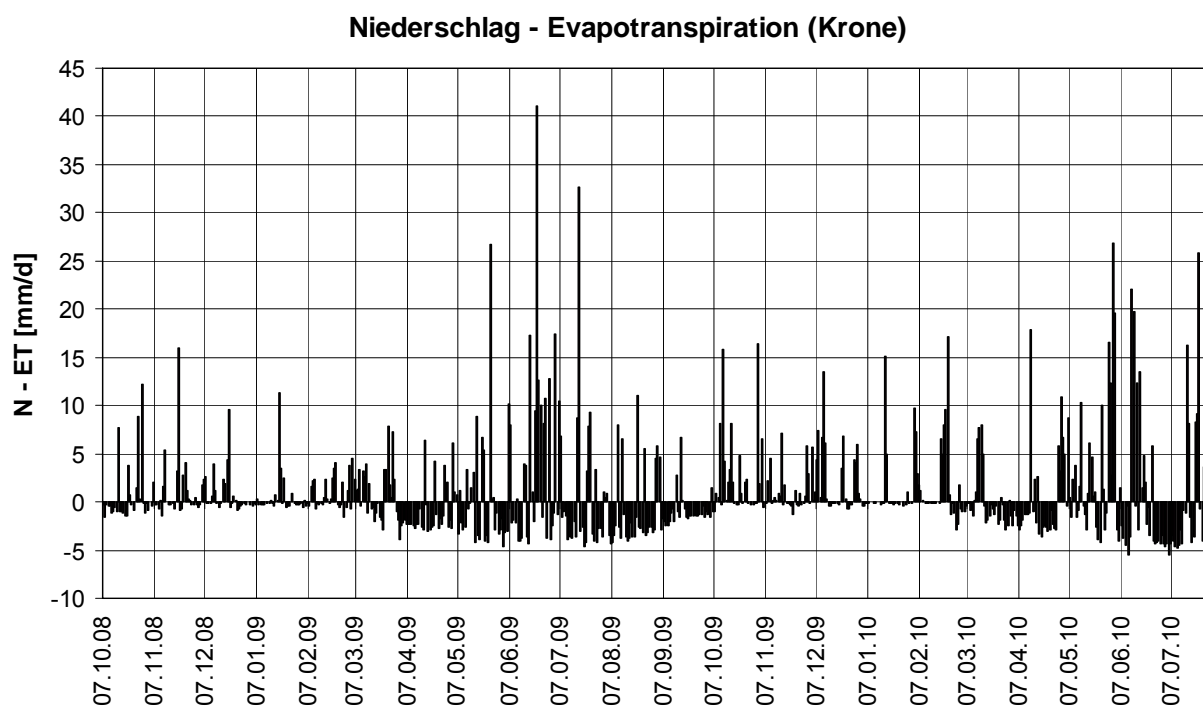


Abb. A3.39: Differenz zwischen Niederschlag und Evapotranspiration als Randbedingung im Kronenbereich beim FE-Modell