

Bestimmung von Wassergehalts- Saugspannungsfunktionen für Böden, RC-Baustoffe und HMVA

**Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

bast

Bestimmung von Wassergehalts- Saugspannungsfunktionen für Böden, RC-Baustoffe und HMVA

Projektnummer

FE 05.0162/2011/LRB

Benedikt Scharnagl
Wolfgang Durner

Institut für Geoökologie
Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik
Technische Universität Braunschweig

Fachbetreuung

Birgit Kocher

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, 51427 Bergisch Gladbach

Mai 2023

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war, einen systematischen, quantitativen Datensatz der hydraulischen Eigenschaften von Ersatzbaustoffen in hoher Güte zu erarbeiten. Es wurden insgesamt 15 Materialien aus vier Materialgruppen in zweifacher Wiederholung in einer für die Verwendung im Straßenbau typischen Lagerungsdichte untersucht. Die Materialgruppen umfassten Bodenmaterialien (BM), Hausmüllverbrennungssaschen (HMVA), Recyclingbaustoffe (RC), sowie eine Stahlwerksschlacke (SWS). Die hydraulische Charakterisierung umfasste die Beziehung zwischen Wassergehalt und Kapillardruck („Retentionskurve“) sowie die Beziehung zwischen gesättigt/ungesättigter Leitfähigkeit und Wassergehalt („Leitfähigkeitskurve.“). Als Verfahren zur Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften an großen Probekörpern (6,8 Liter) diente die Verdunstungsmethode. Die Validität der Verdunstungsmethode für die durchgeführten Experimente wurde in einer Simulationsstudie bestätigt. Ergänzende Messungen erfolgten für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit mit der Methode mit konstantem Überstau und für die Wasserretention im trockenen Bereich mit der Taupunkts-Methode.

Die Retentionsdaten wurden in hoher Präzision über den gesamten Feuchtebereich, die ungesättigten Leitfähigkeitsfunktionen über den experimentell zugänglichen Feuchtebereich gewonnen. Die Ergebnisse der Parallelproben zeigten aufgrund der großen Probekörper eine hohe (BM, HMVA, SWS) bis befriedigende (RC) Wiederholungsgenauigkeit. Die ermittelten hydraulischen Eigenschaften besitzen komplexe Formen, die sich teilweise durch Makroporenanteile mit sprunghaften Änderungen der Wassergehalte und hydraulischen Leitfähigkeiten beim Übergang von Sättigung zu ungesättigten Systemzuständen (HMVA, RC), bimodalen Porengrößenverteilungen im mittleren Feuchtebereich, einem kontinuierlichen Rückgang der Wassergehalte auf den Wert null hin zum Trockenen, und hydraulischen Leitfähigkeitskurven mit Filmflusskomponenten auszeichnen. Dies kann mit gängigen Modellen für hydraulische Eigenschaften (z.B. van Genuchten, 1980) nicht befriedigend beschrieben werden. Gängige Pedotransfer-Funktionen, welche in der Vergangenheit für Böden erstellt wurden, können somit zu keiner realistischen Beschreibung der Wasserdynamik führen. Eine Erstellung von Pedotransfer-Funktionen auf Basis von einfachen analytischen Funktionsansätzen erscheint gegenwärtig nicht praktikabel.

Das Ziel weiterer Untersuchungen sollte einerseits darin liegen, geeignete Funktionen zu finden, mit denen das beobachtete hydraulische Verhalten der untersuchten Stoffe fehlerfrei wiedergegeben werden kann, andererseits Szenarien zu identifizieren, bei denen auch mit vereinfachten Funktionsansätzen befriedigend genaue Simulationen des Wasserhaushaltes in Ersatzbaustoffen in einem limitierten Feuchtebereich möglich sind.

Abstract

The aim of the project was to develop a systematic, quantitative record of the hydraulic properties of replacement construction materials in high quality. A total of 15 materials from four material groups was studied in repetitions. The material groups included soil materials (BM), municipal solid waste incineration ash (HMVA), recycled materials (RC), as well as a steel mill slag (SWS). The hydraulic characterization included the relationship between water content and capillary pressure ("retention curve") and the relationship between saturated / unsaturated conductivity and water content ("conductivity curve"). The evaporation method was used to determine the hydraulic properties of large soil columns (6.8 liter), which contained the material under investigation in a packing density that was representative for use in road construction. The validity of the evaporation method for the experimental setup was confirmed in a simulation study. Additional measurements were carried out for the saturated hydraulic conductivity using the constant head method and for water retention in the dry range with the dewpoint method.

The retention data were obtained in high precision over the entire moisture range, the unsaturated conductivity functions over the experimentally accessible moisture range. The results of the replicate samples showed a high (BM, HMVA, SWS) or satisfactory (RC) repetition accuracy due to the large specimen. The measured hydraulic properties have complex shapes that are characterized partially by the existence of macropores that lead to abrupt changes in the water contents and hydraulic conductivities at the transition from saturation to unsaturated system states (HMVA, RC), by bimodal pore-size distributions in the medium moisture range, by a continuous decline in water contents to the value of zero at the dry end, and by hydraulic conductivity curves with film and corner flow components. The resulting shape of the hydraulic functions cannot be described satisfactorily with current models for hydraulic properties (e.g., van Genuchten, 1980). Existing pedotransfer functions, which were created in the past for soils, thus lead to erroneous description of the water dynamics. Any pedotransfer function based on simple analytical functions appears currently not practical.

The aim of further investigations should be on one hand to find suitable functions which allow to simulate the observed hydraulic behavior of the investigated materials satisfactorily, and on the other hand to identify scenarios, in which simplified functions approximate with sufficient accuracy the water balance in replacement construction materials within a limited moisture range.

Inhalt

Zusammenfassung	2
Abstract	3
1. Einleitung.....	6
2. Material und Methoden.....	8
2.1 Untersuchte Materialien	8
2.2 Durchführung der Verdunstungsexperimente.....	8
2.3 Auswertung der Verdunstungsexperimente.....	13
2.4 Simulationsstudie zur Genauigkeit der Methode nach Schindler	14
2.5 Bestimmung der Retentionsdaten im trockenen Bereich	18
2.6 Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit	22
2.7 Bestimmung der van Genuchten/Mualem-Parameter	24
2.8 Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit und des pH-Werts.....	25
2.9 Bestimmung der Hysterese für Material RC3.....	25
3. Ergebnisse.....	27
4. Diskussion	88
4.1 Generelle Befunde	88
4.2 Parametrische Beschreibung der ermittelten hydraulischen Eigenschaften.....	91
4.3 van Genuchten/Mualem-Parameter	92
4.4 Prüfung von Pedotransferfunktionen.....	93
4.5 Entwicklung von Pedotransferfunktionen	94
4.6 Zusatzuntersuchungen zur Hysterese.....	95
5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	96
6. Ausblick	99
7. Literatur	100
Anhang: Fits der hydraulischen Eigenschaften mit einem flexiblen Modell.....	104

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Einbau des Probenmaterials (RC2). Links: Metallstempel zur manuellen Verdichtung des Probenmaterials. Mitte: Eingeführter Metallstab als Platzhalter für die spätere Installation des Tensiometers. Rechts: Fertig eingebautes Probenmaterial nach Verdichtung der letzten Schicht.	8
Abbildung 2:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Durchführung von Verdunstungsexperimenten.....	10
Abbildung 3: ..	Versuchsaufbau bei laufendem Verdunstungsexperiment (Probenmaterial BM3). Links: Frontalansicht, Probenzylinder mit Ventilator und am Probenzylinder eingehängten Datenlogger. Rechts: Sicht von schräg oben, Anordnung der Tensiometer (mit Isolation).....	11
Abbildung 4:	Simulierte Potentialverläufe in den vier Messtiefen für die zwei untersuchten Materialien M1 (oben) und M2 (unten).	17
Abbildung 5:	Ergebnisse der Simulationsstudie zur Genauigkeit der Methode nach Schindler. Dargestellt sind die wahren und die unter Verwendung des arithmetischen sowie des geometrischen Mittelwerts berechneten hydraulischen Eigenschaften für die zwei untersuchten Materialien M1 (oben) und M2 (unten).....	18
Abbildung 6:	WP4C-Taupunkt-Potentiometer der Firma Decagon Devices. (http://www.decagon.com/assets/Images/Product-Images/Water-Potential/wp4c2.jpg , 12.11.2013).	20
Abbildung 7:	Schematische Darstellung der Messung mit der Methode mit konstantem Überstau.....	23
Abbildung 8:	Versuchsaufbau bei der Durchführung der Experimente zur Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Materialien.....	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Untersuchte Probenmaterialien. Die Abkürzungen der Materialbezeichnungen stehen für Bodenmaterial (BM), Recyclingmaterial (RC), Hausmüllverbrennungssasche (HMVA), und Stahlwerksschlacke (SWS).....	9
Tabelle 2:	Aufspaltung des mit dem WP4C gemessenen Gesamtpotentials in eine osmotische und eine Matrixpotential-Komponente am Beispiel des Materials RC5.	21

1. Einleitung

Die Verwendung von Ersatzbaustoffen (EBS) in Straßenbauwerken ist ökonomisch und ökologisch ratsam, erfordert jedoch eine Abschätzung des Verhaltens darin geringfügig enthaltener Schadstoffe. Diese Abschätzung kann mit Hilfe numerischer Simulation modellgestützt erfolgen, wobei die genaue Kenntnis der bodenhydraulischen Eigenschaften für die Richtigkeit der Modellierung eine Schlüsselrolle einnimmt. Als hydraulische Eigenschaften gelten im Kontext der Richards-Gleichung die als konstitutive Eigenschaften definierten Beziehungen zwischen dem volumetrischen Wassergehalt θ , dem Kapillardruck h , sowie der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit K (Durner und Flüher, 2005). Fehler in der hydraulischen Charakterisierung, seien es ungenau bestimmte Parameter oder fehlerhafte Funktionsansätze, schlagen unmittelbar auf die Modellierungsergebnisse durch. Fehler in der Wasserhaushaltsmodellierung werden unmittelbar auf die Stofftransportmodellierung übertragen. Insbesondere die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit K nimmt wegen ihrer extremen Nichtlinearität in der Modellierung eine Schlüsselrolle ein. Pedotransferfunktionen (PTF) zur Abschätzung der hydraulischen Eigenschaften existieren bisher primär für Ackerböden, teilweise für Waldböden, nicht aber für EBS. Zur Ableitung einer Datenbasis für hydraulische Funktionen war es nötig, hydraulische Eigenschaften für EBS in verlässlicher Weise und hoher Qualität zu ermitteln.

Für die Bestimmung hydraulischer Eigenschaften poröser Medien an Proben im Labor steht eine weite Palette von Methoden zur Verfügung (einen Überblick geben Durner und Lipsius, 2005), wobei die meisten dieser Methoden entweder hydrostatische Verhältnisse oder Fließgleichgewicht voraussetzen, oder auf stark vereinfachenden Annahmen beruhen, welche die Anwendung analytischer Verfahren erlauben. Die Bestimmungsmethoden gelten allgemein als aufwändig. Besonders die Bestimmung der Leitfähigkeitsfunktion ist mit hohem experimentellem Aufwand verbunden, so dass in der Regel auf ihre explizite Bestimmung verzichtet und eine Vorhersage aus der Retentionsfunktion $\theta(h)$ vorgenommen wird. Dies ist für strukturierte, inhomogene poröse Medien, wie sie für EBS zu erwarten sind, extrem problematisch (Durner, 1994). Sofern die K -Vorhersage nicht aus direkt gemessenen, sondern über Pedotransferfunktionen (PTF) geschätzten $\theta(h)$ -Funktionen stammt, potenzieren sich die möglichen Fehler und können zu gravierend falschen Einschätzung des Funktionsverlaufes $K(\theta)$ und damit verbunden zu stark fehlerhaften Modellierungen führen.

Ziel des Vorhabens war somit die Erarbeitung eines systematischen, quantitativen Datensatzes der hydraulischen Eigenschaften von EBS in hoher Güte. Als EBS wurden Bodenmaterialien, Recyclingmaterialien, Hausmüllverbrennungssasche, und Hochofenschlacken in Lagerungen untersucht, wie sie für die Verwendung im Straßenbau typisch sind. Die hydraulische Charakterisierung umfasste die Beziehung zwischen Wassergehalt und Kapillardruck sowie die Beziehung zwischen gesättigt/ungesättigter Leitfähigkeit und Wassergehalt. Die Daten wurden in hoher Präzision über einen weiten Feuchtebereich gewonnen und mit hydraulischen Funktionen parametrisiert. Ein weiteres Ziel war, die ermittelten parametrischen Funktionen als Matrix in Abhängigkeit von Materialtyp und Einbautechnik zu kategorisieren und in Hinblick auf die ihre

Übereinstimmung mit gängigen PTF zu prüfen. Im finalen Schritt sollten bei Nichtübereinstimmung der Ergebnisse mit existierenden PTF auf Basis der gewonnenen Daten verbesserte PTF für EBS generiert werden.

Ersatzbaustoffe sind teilweise grobkörnig und erfordern relativ große Probekörper zur Untersuchung, um zu repräsentativen und damit aussagefähigen Ergebnissen zu kommen. In diesem Vorhaben wurden deshalb Proben von 23.2 cm Durchmesser und 16 cm Höhe eingesetzt, wie sie in der üblichen Labormesstechnik im bodenphysikalischen Bereich unüblich sind. Aus elementaren Überlegungen zur Physik von Fließpressen in ungesättigten porösen Medien geht hervor, dass für solche Probengrößen hydraulische Eigenschaften über einen weiten Feuchtebereich nur in Form *dynamischer* Fließexperimente gewonnen werden können, da die Zeiten für Gleichgewichtseinstellungen exzessiv wären. Als Methode der Wahl hat sich in diesem Vorhaben hierbei schließlich das Verdunstungsverfahren (Peters und Durner, 2008a) erwiesen. Die grundsätzliche Validität des Verfahrens und die Äquivalenz zu alternativen Verfahren wurde durch numerische Analysen und Methodenvergleiche (z.B. Schelle et al., 2011; Peters et al., 2015) nachgewiesen. Verdunstungsversuche sind aufgrund der Verwendung von Tensiometern zur Messung der Matrixpotentiale nur bis zum mittleren Feuchtebereich auswertbar. Für den trockenen Bereich wurden deshalb ergänzend Gleichgewichtsmessungen vorgenommen, bei denen kleine Probenaliquote bei definierten Wassergehalten mit dem Taupunkt-Verfahren zur Messungen der relativen Luftfeuchte zur Bestimmung von der $\theta(h)$ -Datenpaaren untersucht werden (WP4C[®], DECAGON Inc.). Verdunstungsverfahren erlauben darüber hinaus keine Identifikation des Verlaufs der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion für Werte, welche größer als ca. 1 cm d^{-1} ($\sim 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$) sind. Deshalb wurde in unabhängigen Versuchen zusätzlich für jedes Material die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit nach der Methode mit konstantem Überstau bestimmt.

2. Material und Methoden

2.1 Untersuchte Materialien

Die untersuchten Materialien wurden in Absprache mit dem Auftraggeber und den Mitgliedern des Betreuerkreises festgelegt. Sie sind in Tabelle 1 spezifiziert.

2.2 Durchführung der Verdunstungsexperimente

Die hydraulischen Eigenschaften im feuchten Bereich wurden mit Verdunstungsversuchen an großen gepackten Bodensäulen ermittelt. Abbildung 1 zeigt exemplarisch den Einbau des Probenmaterials. Das Probenmaterial wurde in einen am unteren Rand verschlossenen Probenzylinder (Höhe: 20.0 cm, Innenradius: 11.6 cm, Material: Polypropylen mit mineralischen Additiven) eingebaut. Die finale Füllhöhe betrug 16.0 cm, woraus sich ein Probenvolumen von 6780 cm^3 ergibt. Der Einbau der Probenmaterialien erfolgte beim aus den Proctorversuchen ermittelten optimalen Wassergehalt und mit vorgegebenen Verdichtungsgrad. Die Proctordaten sowie die Verdichtungsgrade werden im Ergebnisteil (Kap. 3) in den jeweiligen Datenblättern der untersuchten Materialien aufgeführt. Dazu wurde die benötigte Masse feuchten Probenmaterials in fünf Chargen in den Zylinder gegeben und mit einem Metallstempel jeweils bis zur angestrebten Füllhöhe manuell verdichtet. Die Höhen der Teilschichten richteten sich nach den Höhen der einzubauenden Tensiometer.



Abbildung 1: Einbau des Probenmaterials (RC2). Links: Metallstempel zur manuellen Verdichtung des Probenmaterials. Mitte: Eingeführter Metallstab als Platzhalter für die spätere Installation des Tensiometers. Rechts: Fertig eingebautes Probenmaterial nach Verdichtung der letzten Schicht.

Tabelle 1: Untersuchte Probenmaterialien. Die Abkürzungen der Materialbezeichnungen stehen für Bodenmaterial (BM), Recyclingmaterial (RC), Hausmüllverbrennungsasche (HMVA), und Stahlwerksschlacke (SWS). Die Abkürzung „n.v.“ steht für „nicht verfügbar“ (aufgrund unzureichender Informationen zur Körnung).

Bezeichnung	Materialbeschreibung	Boden- gruppe	Boden - art	Grobkorn [Masse- %]	Sand [Masse- %]	Schluff und Ton Masse-%]	Ungleich- förmig- keitsgrad	Herkunft/Verwendung
BM1	Kiesiger Boden	GW	n.v.	57	40	3	16	Lysimeterstation (BASt), Augsburg
BM2	Bindiger Boden	GU*	Su3G3	24	49	27	29	Lysimeterstation (BASt), Augsburg
BM3	Sandiger Boden	SW	SsG2	4	95	1	3	Aufbereitungsanlage, Moers
BM4	Füllboden	SU	n.v.	6	81	13	n.v.	Aufbereitungsanlage, Moers
BM5	Schluffiger Kies	GU*	n.v.	50	30	20	n.v.	Zentrum Geotechnik, Technische Universität München
HMVA1	Hausmüllverbrennungs- asche, 0/32 mm	GW	SsGr5	63	35	2	17	Müllverwertungsanlage Rugenberger Damm, Hamburg
HMVA2	Hausmüllverbrennungs- asche, 0/32 mm	GW	SsGr5	74	25	1	20	Müllverwertungsanlage Borsigstraße, Hamburg
HMVA3	Hausmüllverbrennungs- asche, 0/32 mm	GU	n.v.	61	33	6	25	Müllverwertungsanlage Remscheid
HMVA4	Hausmüllverbrennungs- asche, 0/32 mm	GU	n.v.	50	36	14	4	MVA ohne Ortsangabe
RC1	Praxisgemisch, 0/32 mm	GU	n.v.	43	51	6	31	RC-Anlage ohne Ortsangabe
RC2	Praxisgemisch, 0/32 mm	SU	n.v.	55	39	6	4	RC-Anlage ohne Ortsangabe
RC3	reiner Betonbruch, 0/32 mm	GW	n.v.	63	33	4	50	RC-Anlage ohne Ortsangabe
RC4	reiner Ziegelbruch, 0/32 mm	GU	n.v.	78	15	7	53	RC-Anlage ohne Ortsangabe
RC5	Siebmaterial, 0/10 mm	GU	n.v.	35	52	13	n.v.	RC-Anlage, Essen
SWS	Stahlwerksschlacke	GU	n.v.	50	36	14	n.v.	Edelstahlerzeugung, Krefeld

Die Verdichtung erfolgte in Anlehnung an DIN 18127 in kreisenden Bewegungen. Bevor das Material für die jeweils nächste Schicht eingefüllt wurde, wurde ein Metallstab in die Tensiometer-Verschraubung in der Zylinderwand eingeführt. Der Metallstab hatte dieselbe Geometrie wie Tensiometerkeramik und Tensiometerschaft und diente als Platzhalter für die spätere Installation des Tensiometers. Nach erfolgtem Einbau wurden zunächst die Tensiometer (T5, UMS GmbH, München) installiert. Im Anschluss erfolgte die langsame Aufsättigung der Probe durch ein Einlassventil am unteren Rand des Probenzylinders durch Einstau bei moderatem Überdruck mithilfe einer Mariott'schen Flasche. Die Aufsättigung erfolgte – je nach Durchlässigkeit der untersuchten Materialien – über einen Zeitraum von 6 bis 48 Stunden. Dabei wurde der anliegende hydraulische Gradient schrittweise erhöht, so dass auch bei sehr durchlässigen Materialien die Aufsättigung langsam erfolgte. Zur Aufsättigung wurde Leitungswasser verwendet, das Raumtemperatur hatte.

Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, Abb. 3 zeigt Fotos des Versuchsaufbaus bei laufendem Verdunstungsexperiment. Vier Tensiometer wurden in den Tiefen $z_1 = -2$, $z_2 = -4$, $z_3 = -8$ und $z_4 = -12$ cm installiert. Die Keramik der Tensiometer sowie der Tensiometerschaft hatten einen Durchmesser von 5 mm. Der Abstand der Keramik zur Innenwand des Probenzylinders betrug 2 cm. Der nach außen hin freiliegende Teil des Tensiometerschafts sowie der Tensiometerkorpus wurden mit Isoliermaterial gegen Luftströmungen abgeschirmt, wodurch die Präzision der Tensionsmessung erheblich erhöht werden konnte.

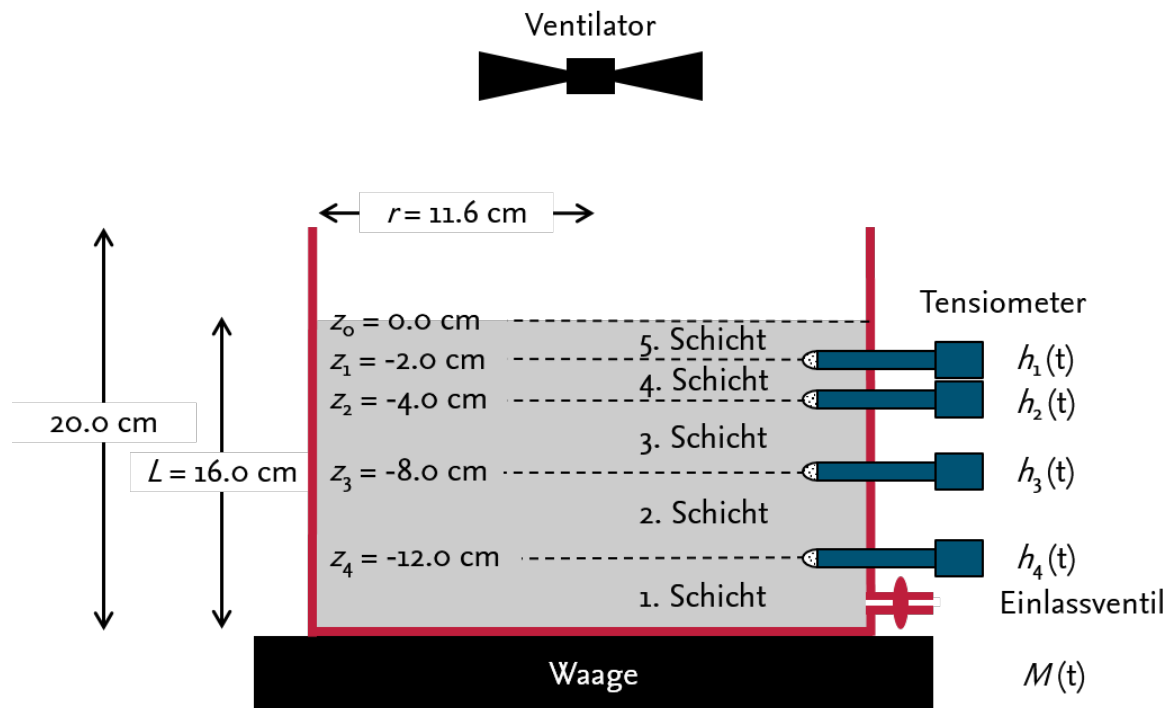


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Durchführung von Verdunstungsexperimenten.

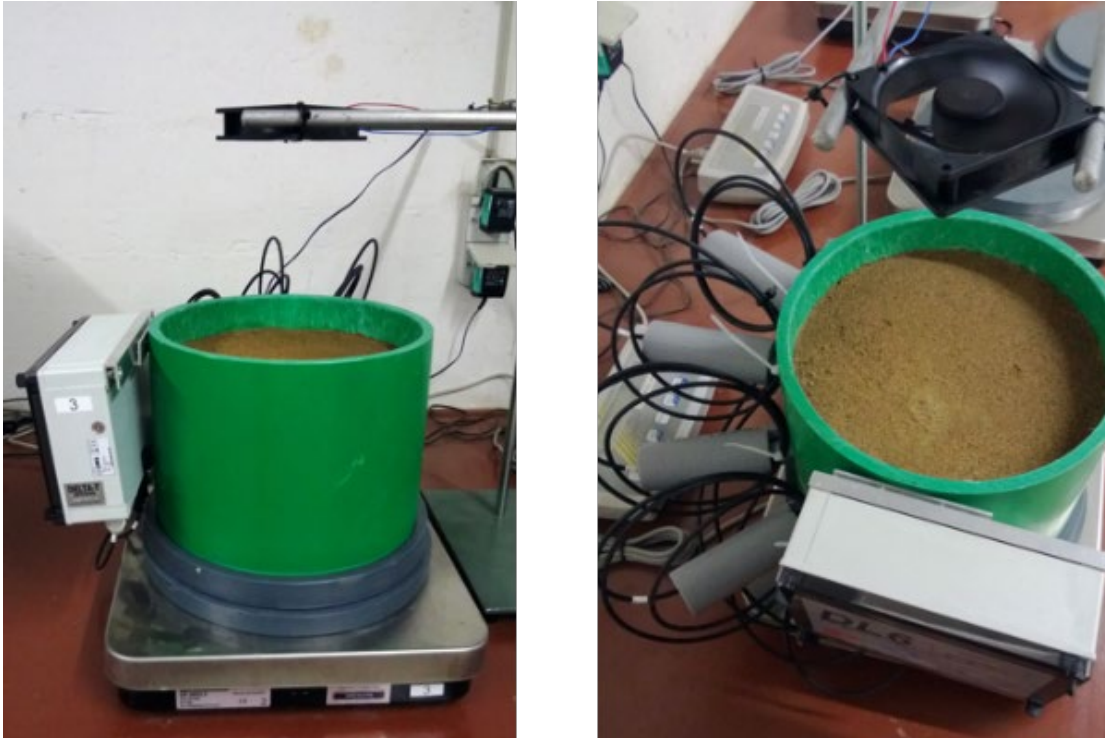


Abbildung 3: Versuchsaufbau bei laufendem Verdunstungsexperiment (Probenmaterial BM3). Links: Frontalansicht, Probenzylinder mit Ventilator und am Probenzylinder eingehängten Datenlogger. Rechts: Sicht von schräg oben, Anordnung der Tensiometer (mit Isolation).

Die Tensiometer wurden an einen Datenlogger (DL6-te, UMS GmbH, München) angeschlossen, der an einer Aufhängung am Probenzylinder befestigt wurde. Auf diese Art wurden Kabelüberführungen vermieden, die die Gewichtsmessung hätten stören können. Der Probenzylinder wurde auf eine Waage (DS 36K0.2, Kern, Ballingen-Frommern, Ablesegenauigkeit: 0.2 g) gestellt, die mithilfe einer Software (tensioVIEW, UMS GmbH, München) geloggt wurde. Zur Beschleunigung des Verdunstungsvorgangs wurde ein Ventilator (3412 NLE, ebm-papst, St. Georgen) über der Probe installiert. Der Abstand des Ventilators zur Probenoberfläche betrug 25 cm.

Dem Beginn des Verdunstungsexperiments wurde jeweils eine initiale Äquilibrierungsphase von mindestens 2 Stunden vorgeschaltet, in der die aufgezeichneten Tensionsdaten ein hydrostatisches Gleichgewicht im System anzeigten. Mithilfe der initialen Überstauhöhe und der Lage der Tensiometer konnten die Soll-Werte aller Tensiometer festgelegt und für eine In-Situ-Offset-Kalibrierung genutzt werden. Die Offsetkorrektur lag gegenüber den Werkskalibrierungen der T5-Tensiometer typischerweise im Bereich von ± 2 cm.

für die Verwendung im Straßenbau typischen Die Waage wurde zu Beginn des Verdunstungsexperiments tariert, sodass durch die Gewichtsaufzeichnung die kumulative Verdunstungsmenge erfasst wurde. Alle Messwerte wurden im 5-Minuten-Intervall aufgezeichnet. Für die Auswertung der Experimente wurden die Daten zunächst auf ein 1-Stunden-Intervall ausgedünnt. Die Gewichtsdaten wurden unter Verwendung der Methode von Savitzky und Golay (1964) geglättet. Dies erfolgte aus zwei Gründen: zum

einen wurden auf diese Art einzelne, von der Software nicht aufgezeichnete Messwerte interpoliert („gap filling“). Zum anderen konnte dadurch ein wesentlich glatterer Verlauf der aus der kumulativen Verdunstung berechneten Verdunstungsraten ermittelt werden. Dies wiederum führte zu einer deutlich reduzierten Streuung der aus den Raten abgeleiteten ungesättigten Leitfähigkeiten – besonders im Fall von Verdunstungsmengen nahe der Ablesegenauigkeit der Waage.

Um die Reproduzierbarkeit der ermittelten hydraulischen Eigenschaften zu testen, wurden alle Verdunstungsexperimente in zweifacher Wiederholung durchgeführt. Die zwei Wiederholungen werden im Folgenden mit „a“ und „b“, an die Materialbezeichnung angehängt, bezeichnet. Die Durchführung der zwei Wiederholungen erfolgte in einigen Fällen nicht zeitgleich, um den potentiellen Einfluss der Variabilität der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit im Labor auf den Verdunstungsvorgang und die daraus ermittelten hydraulischen Eigenschaften zu untersuchen. Dabei ist anzumerken, dass es sich dabei nicht um einen stringenten Test handelt. Hierzu hätte der Verdunstungsversuch an derselben Probe nach erneuter Aufsättigung unter unterschiedlichen Randbedingungen erfolgen müssen, um vermeintliche Unterschiede in den hydraulischen Eigenschaften der zwei Parallelproben ausschließen zu können. Die Ergebnisse deuten aber stark darauf hin, dass der Effekt unterschiedlicher Randbedingungen auf die ermittelten hydraulischen Eigenschaften zu vernachlässigen ist. Die Variabilität der hydraulischen Eigenschaften aus zeitgleich und nicht-zeitgleich durchgeführten Experimenten lag in etwa in derselben Größenordnung. Dies stützt unsere Hypothese, dass die beobachtete Variabilität auf echte Unterschiede in den hydraulischen Eigenschaften zweier Parallelproben zurückzuführen ist, nicht auf die Unterschiede in den Randbedingungen.

Lufttemperatur und relative Luftfeuchte wurden mit einem kombinierten Messgerät (HAXO-8, LogTag Recorders, Auckland) in unmittelbarer Nähe des Versuchsaufbaus erfasst. Die Lufttemperatur war über den gesamten Untersuchungszeitraum annähernd konstant. Jedoch zeigte die relative Luftfeuchtigkeit eine deutliche ausgeprägte Variabilität in Anhängigkeit des Wettergeschehens. Diese Daten wurden genutzt um etwaige zeitliche Variationen in den beobachteten Verdunstungsraten und Tensionsverläufen besser zu verstehen und erklären zu können. Dabei zeigte sich, dass die Schwankungen in der relativen Luftfeuchtigkeit in der Laborluft in einigen Fällen einen deutlichen Einfluss auf den Verdunstungsverlauf haben können. Ein besonders augenscheinliches Phänomen dieser Art tritt bei den Versuchen mit Material BM4 auf. Bemerkenswert ist, dass selbst in diesem extremen Fall die ermittelten hydraulischen Eigenschaften der beiden Wiederholungen keine besonders stark ausgeprägten Unterschiede aufwiesen. Das Verdunstungsverfahren mit Auswertung nach Schindler erscheint daher als robust gegenüber Schwankungen in den Randbedingungen. Die gemessenen Lufttemperaturen und relative Luftfeuchtigkeiten werden in diesem Bericht aus Platzgründen nicht wiedergegeben.

Die Verdunstungsexperimente wurden beendet, wenn das unterste Tensiometer den Bereich der Datenaufzeichnung des Datenloggers ($h = -1275$ cm) unterschritten hatte. Nach Beendigung des Experiments wurde der gravimetrische Wassergehalt der Probe nach DIN 18121-1 bestimmt.

2.3 Auswertung der Verdunstungsexperimente

Die Auswertung der Verdunstungsexperimente erfolgte mit der Methode nach Schindler (1980) Die von der Waage registrierte Masse wird im Folgenden mit M [g] bezeichnet. Die Masse des Wassers in der Probe M_w [g] zur Zeit t [h] berechnet sich nach:

$$M_w(t) = M(t) - M(t_e) + M_w(t_e)$$

Darin ist t_e die Zeit, nach der das Verdunstungsexperiment beendet wurde. Die Masse des Wassers am Ende des Verdunstungsexperiments $M_w(t_e)$ ist aus der gravimetrischen Bestimmung des Wassergehalts unmittelbar nach Beendigung des Experiments bekannt. Der geschätzte volumetrische Wassergehalt $\hat{\theta}$ [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$] in der Tiefe z_3 wird berechnet als:

$$\hat{\theta}_3(t) = \frac{M_w(t)}{\rho_w \pi r^2 L}$$

Darin ist ρ_w [g cm^{-3}] die Dichte von Wasser, r [cm] ist der (effektive) Innenradius des Probenzylinders und L [cm] die Füllhöhe des Probenzylinders. Die gemessenen Potentiale in den vier Tiefen werden im Folgenden mit h_1 , h_2 , h_3 und h_4 bezeichnet. Das dem Wassergehalt $\hat{\theta}_3$ zugeordnete Matrixpotential \hat{h}_3^θ in der Tiefe z_3 wird geschätzt als geometrisches Mittel der gemessenen Matrixpotentiale in den Tiefen z_2 und z_4 :

$$\hat{h}_3^\theta(t) = -\left(h_2(t) \cdot h_4(t)\right)^{\frac{1}{2}}$$

Dabei ist zu beachten, dass $\hat{h}_3(t)$ erst dann berechnet wurde, wenn $h_2(t)$ und $h_4(t)$ beide negativ waren. Im Gegensatz zu dem hier verwendeten geometrische Mittelwert wird in der ursprünglichen Methode nach Schindler (1980) der arithmetische Mittelwert verwendet. Die Wahl des geometrischen Mittelwerts beruht auf einer vorab durchgeführten Simulationsstudie (siehe unten), die zeigte, dass der geometrische Mittelwert generell eine bessere Approximation liefert. Dieses Ergebnis wurde mittlerweile durch eine neue Studie bestätigt (Peters et al., 2015). Die Darstellung von $\hat{\theta}_3(t)$ über $\hat{h}_3(t)$ ergibt die Datenpunkte der Retentionskurve.

Zur Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit müssen zunächst die Flussdichte und der hydraulische Gradient bestimmt werden. Die geschätzte Flussdichte \hat{q} [cm h^{-1}] in der Tiefe z_3 wird berechnet als:

$$\hat{q}_3(t) = \frac{q_0(t)}{2} = \frac{L}{2 \Delta t} \frac{\Delta M_w(t)}{\rho_w \pi r^2 L}$$

Darin ist q_0 die Flussdichte am oberen Rand der Probe, $\Delta M_w = M_w(t) - M_w(t-1)$ ist die Differenz der in der Probe befindliche Masse an Wasser in zwei aufeinander folgenden Messungen, und $\Delta t = 1$ h ist das Zeitintervall zwischen diesen beiden Messungen. Der geschätzte hydraulische Gradient $\nabla \hat{H}$ [cm cm^{-1}] in der Tiefe z_3 wird berechnet als:

$$\nabla \hat{H}_3(t) = \frac{h_4(t) - h_2(t)}{z_4 - z_2} + 1$$

Die geschätzte hydraulische Leitfähigkeit \hat{K} [cm h⁻¹] in der Tiefe z_3 ergibt sich dann aus:

$$\hat{K}_3(t) = \frac{\hat{q}_3(t)}{\nabla \hat{H}_3(t)}$$

Die hydraulische Leitfähigkeit wurde nur dann berechnet wenn $\nabla \hat{H}_3(t) > 0.15$ (Peters und Durner, 2008). Die geschätzte Leitfähigkeit $\hat{K}_3(t)$ wird dem folgenden Matrixpotential zugeordnet:

$$\hat{h}_3^K(t) = -\left(h_2(t) h_2(t-1) h_4(t) h_4(t-1)\right)^{\frac{1}{4}}$$

Die Darstellung von $\hat{K}_3(t)$ über $\hat{h}_3^K(t)$ ergibt die Datenpunkte der Leitfähigkeitskurve. Wie im Fall des zugehörigen Matrixpotentials der Retentionskurve wurde von uns hier ebenfalls das geometrische Mittel genutzt.

Für die Auswertung der Verdunstungsexperimente wurde Microsoft Excel genutzt.

2.4 Simulationsstudie zur Genauigkeit der Methode nach Schindler

Die Berechnung der Retentions- und Leitfähigkeitsdaten aus den gemessenen Potentialverläufen in zwei Tiefen, $h_2(t)$ und $h_4(t)$, sowie der Masse an Wasser im System, $M_w(t)$, nach der Methode von Schindler beruht auf einer Reihe von Annahmen. Die von Natur aus nichtlinearen Prozesse des Wasserflusses im Porenraum werden dabei sehr stark vereinfacht betrachtet. Sie werden sozusagen „linearisiert“. Zum Beispiel beruht die Schätzung des Matrixpotentials in der Mitte der Probe durch den arithmetischen Mittelwert (Schindler, 1980) auf der Annahme, dass das vertikale Profil der Matrixpotentiale in der Probe zu jedem Zeitpunkt linear ist. Zu Beginn des Verdunstungsvorgangs sind diese Annahmen in sehr guter Näherung erfüllt. Bei fortschreitender Verdunstung und Austrocknung der Probe kann sich allerdings – je nach Materialeigenschaften und Randbedingungen – ein sehr stark nichtlineares Matrixpotential-Profil ausbilden, was die Gültigkeit dieser Annahme einschränken könnte. Der hier verwendete geometrische Mittelwert entspricht analog der Annahme, dass das vertikale Profil der Matrixpotentiale linear auf der log-Skala ist.

Entsprechend dem Beispiel des geschätzten Matrixpotentials in der Mitte der Probe lassen sich alle weiteren Annahmen in der Auswertungsmethode nach Schindler als Linearisierungen eines nichtlinearen Systems betrachten. Eine genauere Betrachtung der Gültigkeit dieser Annahmen und deren komplexen Zusammenwirken in der Berechnung der Retentions- und Leitfähigkeitsdaten ist daher von besonderem Interesse. Die Genauigkeit der durch die Schindler-Methode ermittelten hydraulischen Eigenschaften lässt sich durch numerische Simulation prüfen. Dabei werden Verdunstungsexperimente numerisch simuliert und aus den „Messdaten“ dieser Simulationen die Retentions- und Leitfähigkeitsdaten nach der Schindler-Methode berechnet. Da die wahren hydraulischen

Eigenschaften in diesem Fall bekannt sind, kann so die Genauigkeit der Schindler-Methode für beliebige Materialeigenschaften und Randbedingungen untersucht werden.

Eine Simulationsstudie dieser Art wurde zuvor von Peters und Durner (2008) durchgeführt. Sie kamen dabei zu dem Ergebnis, dass die durch die Schindler-Methode ermittelten hydraulischen Eigenschaften in allen Fällen eine sehr hohe Genauigkeit aufweisen. Peters und Durner (2008) berücksichtigten in den numerischen Simulationen den Wassertransport in der Flüssigphase und verwendeten zur Parametrisierung der hydraulischen Eigenschaften das van Genuchten/ Mualem-Modell, was nach heutigem Kenntnisstand allerdings keine realistische Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften über den gesamten Feuchtebereich ermöglicht (Peters et al., 2015). Zudem wurden weitere relevante hydraulische Prozesse, wie der Wassertransport in der Dampfphase sowie Wasserretention und -leitfähigkeit aufgrund von nicht-kapillar gebundenem Wasser in der Studie von Peters und Durner (2008) nicht berücksichtigt.

Die Genauigkeit der durch die Schindler-Methode ermittelten hydraulischen Eigenschaften wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durch eine Simulationsstudie erneut überprüft. Dabei wurde ein hydraulisches Modell gewählt, was die oben genannten Prozesse beinhaltet. Auf diese Art wurde eine realistischere Beschreibung des Verdunstungsprozesses erzielt als in der Studie von Peters und Durner (2008). Zudem wurde im Rahmen dieser Simulationsstudie gezielt die Genauigkeit für relativ hohe Proben, wie sie in diesem Forschungsvorhaben eingesetzt wurden, untersucht. Generell ist davon auszugehen, dass die Gültigkeit der Linearisierungsannahmen auch von der Höhe der untersuchten Proben abhängt. Eine weitere Fragestellung war, ob generell das arithmetische oder das geometrische Mittel zur Berechnung des Matrixpotentials in der Mitte der Probe verwendet werden sollte.

Zur Modellierung des eindimensionalen, isothermen Wasserflusses wurde in dieser Studie die um eine Wasserdampffluss-Komponente erweiterte Richards-Gleichung benutzt (Saito et al., 2008):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left((K(h) + K_v(h)) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right)$$

Darin bezeichnet θ [cm³ cm⁻³] den volumetrischen Wassergehalt, K [cm h⁻¹] ist die hydraulische Leitfähigkeit von flüssigem Wasser, K_v [cm h⁻¹] die hydraulische Leitfähigkeit aufgrund von Wasserdampffluss, h [cm] ist die Druckhöhe, t [h] ist Zeit und z [cm] ist die vertikale Koordinate (positiv nach oben).

Die numerische Lösung der Richards-Gleichung erfolgte mit dem Softwarepaket HYDRUS-1D (Simunek et al., 2008). Die Diskretisierung der Modelldomäne (16 cm) erfolgte mit 161 äquidistanten Knoten. Als obere Randbedingung wurde eine gemischte Fluss-Potential-Randbedingung gewählt. Solange das simulierte Matrixpotential am oberen Rand $h_0(t) \geq h_{\min}$ gilt dabei:

$$-(K(h) + K_v(h)) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \leq q_0(t)$$

Darin ist $h_{\min} = -10^6$ cm das minimale zulässige Matrixpotential am oberen Rand. Beim Erreichen dieses Grenzwerts wird auf eine Potential-Randbedingung umgeschaltet. $q_0(t) = 0.6$ cm d⁻¹ ist die (konstante) potentielle Verdunstungsrate. Der Wert von 0.6 cm d⁻¹ ist repräsentativ für die von uns ihm Rahmen diese Forschungsvorhabens im Labor gemessen Verdunstungsraten. Der Fluss am unteren Rand ist Null.

Zur Parametrisierung der Retentions- und Leitfähigkeitsfunktionen, $\theta(h)$ und $K(h)$, wurde das Modell von Lebeau und Konrad (2010) verwendet. Die mathematische Formulierung dieses Modells ist relativ komplex. Aus Gründen der Kompaktheit wird sie daher in diesem Bericht nicht explizit wiedergegeben. Das Modell unterscheidet sich von klassischen Modellen der hydraulischen Eigenschaften (z.B., van Genuchten, 1980) darin, dass sowohl $\theta(h)$ als auch $K(h)$ aus zwei additiven Komponenten bestehen. Diese zwei Komponenten beschreiben die Retention- bzw. Leitfähigkeit aufgrund von Kapillarität zum einen, sowie aufgrund von nicht-kapillaren Prozessen wie Adsorption und Filmfluss zum anderen. Diese Modellstruktur ermöglicht es grundsätzlich, die Retentions- und Leitfähigkeitseigenschaften über den gesamten Feuchtebereich auf eine physikalisch plausible Weise zu beschreiben.

Die Parametrisierung der Funktion der Leitfähigkeit aufgrund von Wasserdampftransport, $K_v(h)$, erfolgte nach einem Standardansatz (Saito et al., 2008). Sie basiert auf der Beschreibung von Wasserdampfdiffusion im luftgefüllten Porenraum. Die zugrundeliegenden mathematischen Gleichungen werden hier ebenfalls aus Gründen der Kompaktheit nicht wiedergegeben, sie sind z.B. in Anhang 1 der Arbeit von Peters (2013) vollständig aufgeführt.

Im Folgenden werden Ergebnisse der Simulationsstudie für zwei fiktive Materialien, bezeichnet als M1 und M2, dargestellt. Die zugehörigen Parameter des Lebeau-Konrad-Modells wurden dabei so gewählt, dass die numerischen Simulationen für diese zwei Materialien zwei qualitativ unterschiedliche, für die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens repräsentative Verläufe der Matrixpotentiale zeigen. Für Material M1 laufen die Potentiale in den vier Messtiefen weitestgehend parallel und zeigen keine starke Auffächerung bei fortschreitender Verdunstung. Dieser Potentialverlauf ist charakteristisch für alle hier untersuchten Materialien bis auf die Bodenmaterialien. In den Verdunstungsversuchen mit allen Bodenmaterialien zeigte sich dagegen eine deutlicher ausgeprägte Auffächerung der Potentialverläufe. Dieses Verhalten wird in der Simulationsstudie qualitativ durch Material M2 reproduziert.

Die simulierten Potentialverläufe in den vier Messtiefen für die zwei untersuchten Szenarien sind in Abbildung 4 dargestellt. Für Material M1 verlaufen die simulierten Matrixpotentiale annähernd parallel und zeigen auch bei fortgeschrittener Austrocknung keine ausgeprägte Divergenz. Für Material M2 hingegen laufen die Matrixpotentiale mit zunehmender Austrocknung immer stärker auseinander. Das vertikale Profil der Matrixpotentiale (und damit auch der Wassergehalte) wird im Verlauf des Verdunstungsexperiments zunehmend nichtlinear.

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Simulationsstudie für die durch die Schindler-Methode aus den virtuellen Messdaten ermittelten hydraulischen Eigenschaften beider Materialien. Die Auswertung wurde hierzu mit dem arithmetischen und dem

geometrischen Mittel durchgeführt. Für Material M1 liegen die aus der Schindler-Methode gewonnenen Datenpunkte fast perfekt auf der Linie der wahren Retentions- und Leitfähigkeitsfunktion. Der Unterschied zwischen den beiden Mittelungsverfahren ist dabei verschwindend gering.

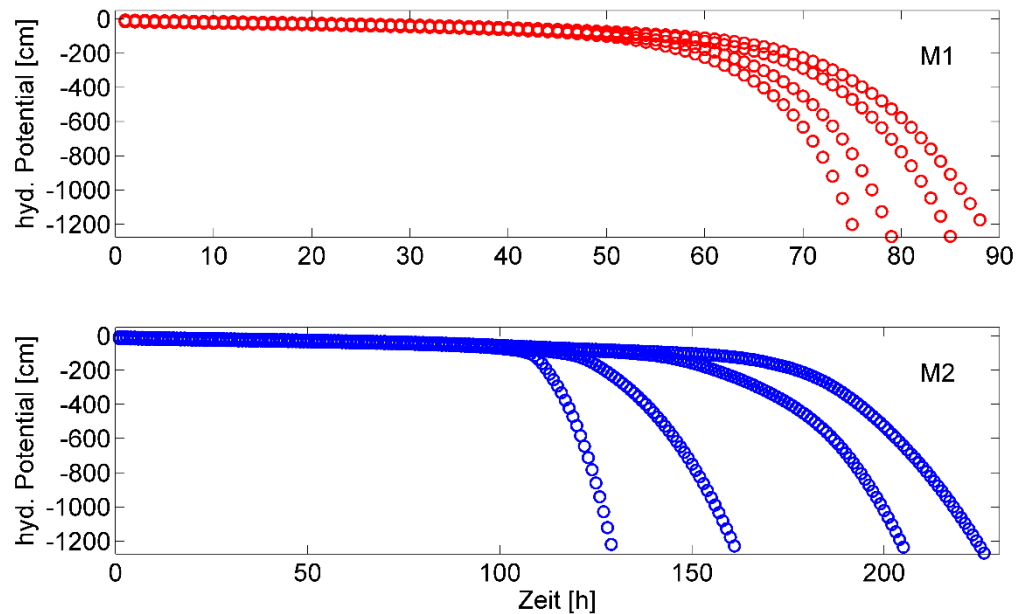


Abbildung 4: Simulierte Potentialverläufe in den vier Messtiefen für die zwei untersuchten Materialien M1 (oben) und M2 (unten).

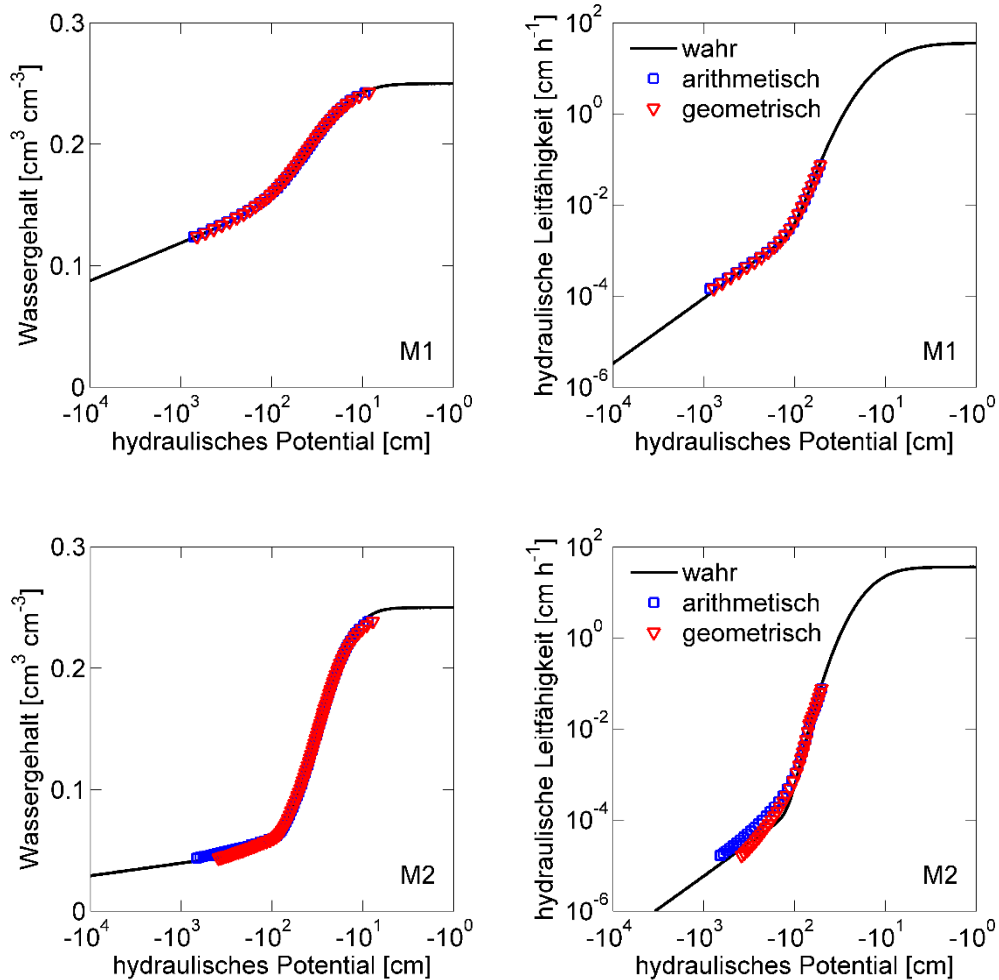


Abbildung 5: Ergebnisse der Simulationsstudie zur Genauigkeit der Methode nach Schindler. Dargestellt sind die wahren und die unter Verwendung des arithmetischen sowie des geometrischen Mittelwerts berechneten hydraulischen Eigenschaften für die zwei untersuchten Materialien M1 (oben) und M2 (unten).

Für Material M2 zeigen die aus der Schindler-Methode gewonnenen Retentions- und Leitfähigkeitsdaten dagegen eine systematische, wenn auch nicht sehr stark ausgeprägte Abweichung von den wahren hydraulischen Funktionen im mittleren Feuchtebereich. Im Vergleich der beiden Mittelungsverfahren zeigt sich, dass die mit dem geometrischen Mittelwert errechneten Retentions- und Leitfähigkeitsdaten eine geringere Abweichung von den wahren Funktionen zeigen, wenn auch die systematischen Abweichungen dadurch nicht vollständig kompensiert werden können.

2.5 Bestimmung der Retentionsdaten im trockenen Bereich

Zur Erweiterung des Messbereichs über den von den Verdunstungsversuchen abgedeckten Bereich wurde die Wasserretention im trockenen Bereich mittels Taupunkt-

Potentiometrie gemessen. Dabei stellte sich das Problem, dass das verwendete WP4C-Gerät (Decagon Devices, Pullman, WA) nur für sehr geringe Probenmengen ausgelegt ist. Einen visuellen Eindruck von den Abmessungen des WP4C-Geräts und den darin messbaren Probenvolumen vermittelt Abbildung 4. Als Lösung des daraus resultierenden Messproblems haben wir die in diesem Forschungsvorhaben eine Aliquot-Methode vorgeschlagen und umgesetzt. Dafür wurde ofentrockenes Material (jeweils ca. 1 kg) in luftdicht verschließbare Behälter gefüllt, eine definierte Wassermenge hinzugegeben und gründlich gemischt. Die Behälter wurden dann verschlossen und für mindestens zwei Wochen zur Äquilibrierung stehen gelassen. Zur Messung des Matrixpotentials wurde ein Aliquot Feinmaterial (ca. 10 g) entnommen und daran das Potential der Wasserphase gemessen. Die grundlegende Annahme dabei war, dass das Matrixpotential nach erfolgter Äquilibrierung in allen Kornfraktionen das gleiche ist, so dass die Messung am Aliquot von Feinmaterial repräsentativ für die Gesamtprobe ist.

Für jedes Material wurden acht Proben angesetzt, wobei in jeder Probe ein anderer Wassergehalt (typischerweise 0,5, 1, 2, 3, 4, 6, 8, und 10 Masse-%) eingestellt wurde. Je nach Textur des Probenmaterials kann bei diesen Wassergehalten der Messbereich des WP4C-Geräts überschritten sein. Dies führte zu einer unterschiedlichen Anzahl an vorhandenen Messpunkten im trockenen Bereich der Retentionskurve.

Um die Reproduzierbarkeit der durch die Aliquot-Methode ermittelten Retentionsdaten zu überprüfen, wurden für Material BM1 jeweils drei Wiederholungen pro eingestelltem Wassergehalt durchgeführt. Die Wiederholungen sind in der Abbildung der Retentionsfunktion für dieses Material im entsprechenden Datenblatt dargestellt. Die Wiederholungen zeigen generell eine sehr geringe Streuung, woraus wir schlussfolgerten, dass die Reproduzierbarkeit der Aliquot-Methode gegeben ist. Für alle weiteren Materialien wurde daher auf die Wiederholungen verzichtet.

In einem weiteren Versuch konnte bestätigt werden, dass der gewählte Äquilibrierungszeitraum von mindestens zwei Wochen ausreichend ist. Dafür wurde für zwei Materialien (HMVA1 und HMVA2) das Potential der Wasserphase der angesetzten Proben nach 2, 8 und 14 Wochen gemessen. Die Ergebnisse zeigten, dass auch nach deutlich längeren Äquilibrierungszeiten das gemessene Potential im wesentlichen identisch ist.



Abbildung 6: WP4C-Taupunkt-Potentiometer der Firma Decagon Devices.
(<http://www.decagon.com/assets/Images/Product-Images/Water-Potential/wp4c2.jpg>,
12.11.2013).

Es wurde die Beobachtung gemacht, dass die für einzelne Materialien, bei denen im aufgesättigten Zustand von relativ hohen Salzgehalten ausgegangen werden muss, die mit dem WP4C-Gerät (Decagon) gemessenen Retentionsdaten im trockenen Bereich einen deutlichen Versatz gegenüber den Retentionsdaten der Verdunstungsmethode im mittleren Feuchtebereich aufwiesen. Dieses Problem betrifft alle HMVA-Materialien sowie das Material RC5. Für diese Materialien zeigten die Messungen der elektrischen Leitfähigkeit im Eluat nach DIN 10529 relativ hohe Werte, mit 3.3 bis 8 cmS m^{-1} . Die Abbildungen der Retentionsfunktionen für diese Materialien verdeutlichen das Problem.

Unsere Hypothese zur Erklärung des beobachteten Versatzes ist der Einfluss von Salzen auf das osmotische Potential der Bodenlösung. Während in normalen Bodenmaterialien der Einfluss des osmotischen Potentials auf das Gesamtpotential vernachlässigt werden kann, ist dies im Fall hoher Salzkonzentrationen nicht der Fall. Die Evaporationsmethode misst systembedingt am Gesamtpotential nur die Komponente des Matrixpotentials, Retentionskurven werden im Allgemeinen auch als Wassergehalt gegen das Matrixpotential dargestellt. Die Taupunktmethode misst dagegen das Gesamtpotential des Wassers, welches das osmotische Potential einschließt. Das osmotische Potential hängt linear mit der Konzentration (bzw. Aktivität) des gelösten Salzes wie folgt zusammen:

$$\psi_o = cRT$$

mit ψ_o = osmotisches Potential [Pa], c = Konzentration [mol], R = universelle Gaskonstante [$8.14 \text{ J mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] und T = Temperatur [K]. Da wir die Konzentrationen der gelösten Salze nicht kennen, und ohne Kenntnis der Spezierung auch nicht belastbar aus der Leitfähigkeit abschätzen können, schlagen wir vor, die pF-Werte der WP4C-Daten (repräsentieren Summe aus Matrixpotential und osmotischem Potential) so zu korrigieren, dass sie im überlappenden Bereich den Messungen der Verdunstungsmethode angeglichen werden. Von dieser Angleichung ausgehend, werden alle weiteren Punkte der WP4C-Daten unter der Annahme korrigiert, dass die gelöste *Salzmenge* konstant bleibt und sich somit bei weiter abnehmendem Wassergehalt die gelöste *Salzkonzentration* entsprechend erhöht. Diese Art der Abschätzung des Anteils des osmotischen Potentials ist nicht streng hydrochemisch begründet, da Aktivitätseffekte und ggf. ein Ausfallen von Salzen bei Überschreitung des Löslichkeitsproduktes bei der Annäherung an den Wassergehalt Null unberücksichtigt bleiben. Ein streng hydrochemischer Korrekturansatz ist allerdings auf Basis der unvollkommenen Datenlage zur genauen Zusammensetzung der in situ-Lösung bei abnehmendem Wassergehalt nicht durchführbar. Gleichwohl sind wir der Meinung, dass die von uns vorgenommene Korrektur eine zumindest plausible Erweiterung der Wassergehalts-Matrixpotential-Charakteristik in den mitteltrockenen Bereich darstellt. Tabelle 2 führt die Art der Korrektur beispielhaft für das Material HMVA2a aus.

Der Aufbau der Tabelle ergibt sich wie folgt: Im ersten Schritt wird die Differenz zwischen dem mit dem WP4C gemessenen Gesamtpotential (pF $3.63 \cong 4266 \text{ cm WS}$) und dem bei gleichem Wassergehalt ermittelten Matrixpotential (pF $2.55 \cong 355 \text{ cm WS}$) ermittelt. Dies sind 3911 cm WS , die als osmotische Komponente des Gesamtpotentials interpretiert werden. Die Konzentration von CaCl_2 , die bei 20°C ein solches osmotisches Potential hervorruft, ist $c = 169 \text{ mol m}^{-3}$ (entspricht 18.8 g L^{-1}). Bei geringeren Wassergehalten steigt diese Konzentration nun durch die Eindickung der Flüssigphase invers proportional zum Wassergehalt an und führt zu einem zunehmend höheren osmotischen Potential (Tab. 2). Auch beim niedrigsten Wassergehalt, der vermessen wurde ($\theta = 0.85 \%$), liegt die errechnete Gesamtkonzentration noch unter der Löslichkeit von CaCl_2 (750 g L^{-1} bei 20°C). Bemerkenswerterweise wird der relative Anteil des osmotischen Potentials – trotz Zunahme des Absolutwertes – bei stärkerer Austrocknung immer unbedeutender; bei den drei trockensten Punkten ist der Anteil am Gesamtpotential vernachlässigbar.

Die so beschriebene Ableitung des Matrixpotentials aus dem Gesamtpotential wurde für alle HMVA-Materialien sowie für das Material RC5 durchgeführt. Das Ergebnis dieser Korrektur ist in den Abbildungen der zugehörigen Datenblätter dargestellt.

Tabelle 2: Aufspaltung des mit dem WP4C gemessenen Gesamtpotentials in eine osmotisch und eine Matrixpotential-Komponente am Beispiel des Materials RC5.

WC	WP4_total	c_osm	c_osm	h_osm	h_matrix	h_tot	Matrixpotential
----	-----------	-------	-------	-------	----------	-------	-----------------

[Vol%]	[pF]*	[mol/m ³]	[g/L]	[cm]	[cm]	[cm]	[pF]
16.56	3.63	169	19	3911	355	4266	2.55
13.25	3.87	211	23	4888	2525	7413	3.40
9.99	4.24	280	31	6482	10896	17378	4.04
6.64	4.75	421	47	9751	46483	56234	4.67
4.98	5.05	562	62	12996	99206	112202	5.00
3.32	5.44	844	94	19522	255901	275423	5.41
1.66	5.98	1692	188	39138	915854	954993	5.96
0.85	6.30	3313	368	76655	1918607	1995262	6.28

* Der pF-Wert ist nach Schofield (1937) definiert als dekadischer Logarithmus der Saugspannung, wenn diese als Druckhöhe in der Einheit cm WS ausgedrückt wird. Da 1 cm WS = 98.1 Pa entspricht somit pF 0 einer Saugspannung von etwa 100 Pa, pF 2 entspricht 1 kPa, pF 5 entspricht 1 MPa.

2.6 Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wurde nach der Methode mit konstantem Überstau gemessen (Dirksen, 1999; Hartge und Horn, 1992). Abbildung 5 zeigt eine schematische Darstellung des Messprinzips, Abb. 6 zeigt Fotos der praktischen Realisierung. Die Messung erfolgte an einer separaten Probe. Probenabmessung und Packtechnik war dieselbe wie im Falle der Verdunstungsversuche. Nach erfolgter Packung wurde am unteren Rand des Probenzylinders eine grobporöse Platte installiert, welche eine freie Verbindung zwischen dem Material und der Außenseite über die volle Säulenfläche bietet. Es wurden keine Wiederholungsmessungen durchgeführt.

Die gepackte Säule wurde in ein Becken gestellt, das mit einem Zulauf und einem höhenverstellbaren Auslauf versehen ist. In seiner Funktion als Auslauf erlaubte dies eine variable Einstellung des Wasserspiegels im Becken. Der Wasserspiegel im Becken wurde durch Zufuhr von Leitungswasser zunächst bis zur vollen Sättigung des Probenmaterials angehoben. Im zweiten Schritt wurde die Anhebung weiter erhöht, bis ein Überstau von ca. 3 cm über der Materialoberkante erreicht war. Der Wasserspiegel im inneren Teil der Säuleneinfassung wurde dann mit dem Auslauf einer Mariotte'schen Flasche verbunden, welche diesen konstant hielt. Durch Justierung des Auslaufs auf einen tiefen Level konnte so ein hydraulischer Gradient eingestellt werden, der zur Perkolation von Wasser aus der Mariotte'schen Flasche durch den Probenkörper hindurch führte.

Die Veränderung im Vorrat in der Mariotte'schen Flasche erlaubte die Messung des Zuflusses. Zur Ermittlung der Vorratsänderung war die Mariotte'schen Flasche auf einer elektronischen Waage platziert. Sobald die Zuflussrate konstant war, waren Voraussetzungen für eine Messung nach der Methode mit konstantem Überstau gegeben. Es erfolgt die Messung der effektiven Leitfähigkeit des Gesamtsystems, die durch den Widerstand des Bodens, der porösen Platte, und der Auslauffleitung bestimmt ist. Die grobporige Platte besitzt eine Leitfähigkeit von ca. 15000 cm d^{-1} , welche um mehrere Größenordnungen über der Leitfähigkeit der Materialien lag. Ihr Widerstand im Fließsystem ist somit vernachlässigbar.

Zur Auswertung wurde, welche bei 20°C durch eine e die stationäre Durchflussrate Q [$\text{cm}^3 \text{ d}^{-1}$] über lineare Regression der Auslaufdaten ermittelt. Die Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit k_f (m s^{-1}) bei konstantem Überstau erfolgte nach:

$$k_s = \frac{Q}{A_B} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta H}$$

Dabei bezeichnet Q [$\text{cm}^3 \text{ d}^{-1}$] die stationäre Strömungsrate aus der Mariotte'schen Flasche, A_B [cm^2] die durchströmte Fläche der Säule, ΔL [cm] die Länge der Bodensäule, und ΔH [cm] die hydraulische Druckhöhendifferenz.

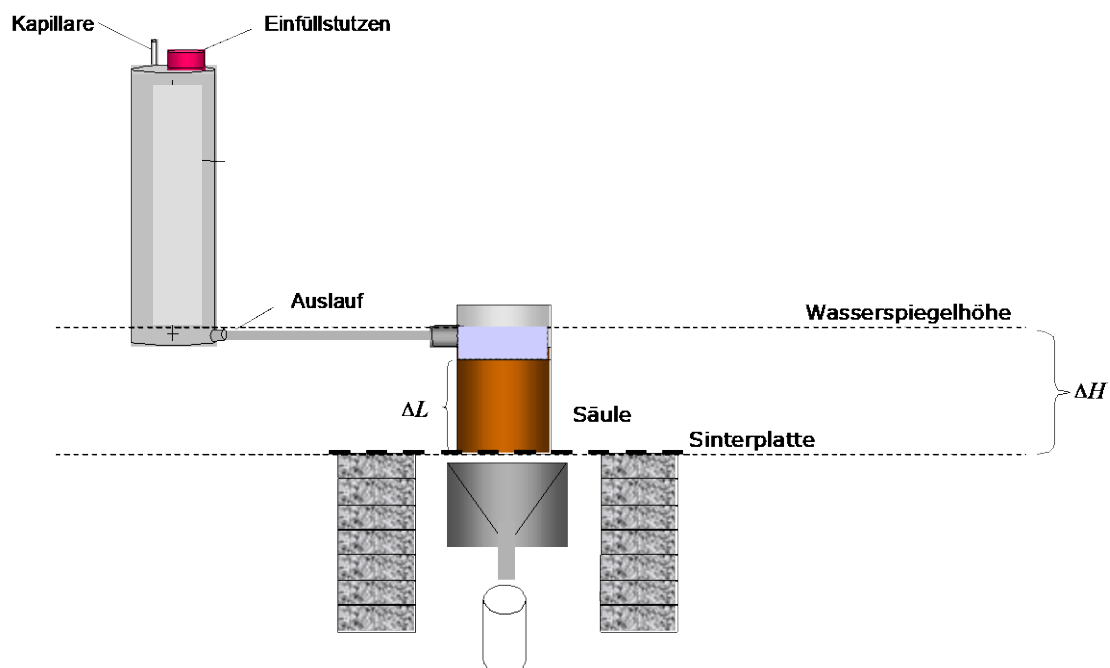


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Messung mit der Methode mit konstantem Überstau.



Abbildung 8: Versuchsaufbau bei der Durchführung der Experimente zur Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit der Materialien.

2.7 Bestimmung der van Genuchten/Mualem-Parameter

An die aus den Verdunstungsversuchen gewonnenen Datenpunkte der Retentions- und Leitfähigkeitsfunktion wurde das Modell von van Genuchten (1980) angepasst. Die Retentionsfunktion, ausgedrückt in Form der Sättigung S [dimensionslos], ist dabei gegeben durch:

$$S(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} (1 + |\alpha h|^n)^{-m} & h < 0 \\ 1 & h \geq 0 \end{cases}$$

Darin sind θ_r und θ_s [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$] der Residual- bzw. Sättigungswassergehalt. α [cm^{-1}], n und $m = 1 - 1/n$ (beide dimensionslos) sind weitere Modellparameter, die die Form der Retentionsfunktion bestimmen. Die Kombination der Retentionsfunktion von van Genuchten (1980) mit dem Kapillarbündelmodell von Mualem (1976) ergibt folgende Leitfähigkeitsfunktion:

$$K(h) = K_f S(h)^\tau (1 - (1 - S(h)^{1/m})^m)^2$$

Darin ist K_f [cm h^{-1}] die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und τ [dimensionslos] ist ein weiterer Modellparameter.

Das van Genuchten/Mualem-Modell hat sechs justierbare Parameter (θ_s , θ_r , α , n , K_f , τ). Diese Parameter wurden durch nichtlineare Regression ermittelt. Für die Anpassung der Parameter wurde die Software HYPROP-FIT (UMS GmbH, München) genutzt. Die Software ist benutzerfreundlich und frei verfügbar unter <http://www.ums-muc.de/static/HYPROP-FIT.zip> und beinhaltet die wichtigsten heute gängigen Modelle für hydraulische Eigenschaften (u.a. van Genuchten, 1980; Durner, 1994; Kosugi, 1996), sowie Exportmodule für die Daten und geschätzte Funktionen. Für alle im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Experimente sind Import-Dateien für HYPROP-FIT bereitgestellt (elektronischer Anhang). Der Nutzer hat so die Möglichkeit mit wenig Aufwand das je nach Anwendung und Fragestellung am besten geeignete hydraulische Modell an die ermittelten Daten anzupassen.

Für die Bestimmung der van Genuchten/Mualem Parameter eines Probenmaterials wurden die Daten aus der Verdunstungsmethode von beiden Parallelproben simultan in der nichtlinearen Regression verwendet. Messpunkte im feuchten Bereich (<-10 cm) wurden dabei nicht berücksichtigt, da die ermittelten Daten häufig eine – teilweise sehr stark ausgeprägte – Makroporosität zeigten, die mit dem van Genuchten/Mualem nicht beschrieben werden kann und zu erheblichen Fehlanpassung im mittleren Feuchtebereich führen würde (Durner, 1994). Die Retentionsdaten im trockenen Bereich aus der Taupunkt-Potentiometrie sowie die separat gemessene gesättigte Leitfähigkeit (siehe unten) wurden aus denselben Überlegungen ebenfalls nicht berücksichtigt.

Die auf diese Art ermittelten van Genuchten/Mualem-Parameter liefern eine – unter Verwendung dieses Modells – optimale Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften im mittleren Feuchtebereich (-10 bis etwa -1000 cm). Die van Genuchten/Mualem Parameter werden in den Datenblättern aufgeführt (Kapitel 3) . Dort sind ebenfalls die daraus resultierenden Funktionen abgebildet.

2.8 Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit und des pH-Werts

Für die Messung der elektrischen Leitfähigkeit sowie des pH-Wertes wurden die Materialien nach DIN 19529 eluiert. Dazu wurden 0.5 kg Probenmaterial mit 1 kg entionisiertem Wasser für 24 h auf dem Überkopfschüttler geschüttelt. Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Eluats erfolgte mit einer Leitfähigkeitsmesszelle (KLE1, WTW, Weilheim). Der pH-Wert des Eluats wurde mit einer pH-Elektrode (pH 537, WTW, Weilheim) bestimmt.

2.9 Bestimmung der Hysterese für Material RC3

Für Material RC3 wurde zusätzlich zu dem Verdunstungsexperiment, welches die (Erst-) Entwässerungskurve erfasst, ein Verdunstungsexperiment mit anschließender Wiederbefeuchtung durchgeführt. Der experimentelle Aufbau war dabei derselbe wie im Fall der Verdunstungsexperimente, mit dem einzigen Unterschied, dass hierfür zu Testzwecken ein Datenlogger mit erweitertem Messbereich (bis -2500 hPa) verwendet wurde. Nach Beendigung des Verdunstungsvorgangs (nach Möglichkeit kurz vor dem Aussteigen der Tensiometer in 4 cm Tiefe), wurde die Probe zunächst abgedeckt und es wurde abgewartet, bis die Tensiometer annähernd hydrostatisches Gleichgewicht

anzeigten. Dann wurde in sechs Schritten jeweils 100 g Wasser auf die Oberfläche der Probe aufgegeben. Die Wasseraufgabe erfolgte langsam und möglichst gleichverteilt über die gesamte Oberfläche mit Hilfe einer Spritze über einen Zeitraum von etwa fünf Minuten. Nach Aufgabe des Wassers wurde die Probe wieder abgedeckt und gewartet bis sich annähernd das hydrostatische Gleichgewicht eingestellt hatte. Dieser Zustand des annähernden Gleichgewichts ist in der entsprechenden Abbildung im Datenblatt zu Material RC3 (S. 75) als Messpunkt der Wiederbefeuchtungskurve aufgetragen. Der experimentelle Aufbau erlaubte nur die Bestimmung der Hysterese in der Retentions- nicht aber in der Leitfähigkeitsfunktion.

Die Bestimmung der Hysterese erfolgte ebenfalls in zweifacher Wiederholung, jedoch konnte eines der durchgeführten Experimente wegen dem Ausstieg der Tensiometers in mehreren Tiefen nicht sinnvoll ausgewertet werden. Daher werden im Datenblatt für RC3 nur die Ergebnisse für ein Experiment gezeigt.

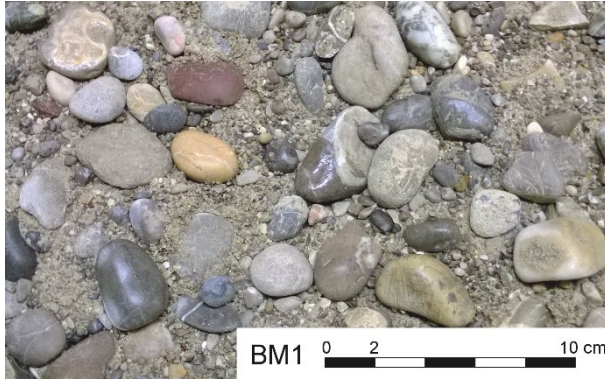
3. Ergebnisse

Alle erzielten Ergebnisse werden auf den nachfolgenden Seiten in kompakter Form auf standardisierten Tabellenblättern wiedergegeben. Jedes Blatt charakterisiert eines der 15 untersuchten Materialien mit seinen Wiederholungen. Die Blätter sind wie folgt aufgebaut:

1. Photographische Abbildung des Materials
2. Körnungssummenkurve
3. Proctorkurve
4. Kurzbeschreibung des Materials
5. Körnung nach DIN 18123: Ton und Schluff, Sand und Grobkorn [Masse-%] sowie Ungleichförmigkeitsgrad
6. Klassifikation der Bodengruppe und Bodenart nach DIN 18196 und DIN 4220
7. Chemische Eigenschaften des Eluat nach DIN 19529: Elektrische Leitfähigkeit [mS cm^{-1}] und pH-Wert
8. Daten der Proctorversuche nach DIN 18127: Proctordichte [g cm^3], Optimaler Wassergehalt [Masse-%], Verdichtungsgrad, Trockendichte [Mg m^{-3}] und Korndichte [Mg m^{-3}]
9. Wassergehalt und hydraulische Leitfähigkeit bei Sättigung: Porosität [$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$], Wassergehalt [$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$] und hydraulische Leitfähigkeit (20°C) [m s^{-1}]
10. Experimentelle Daten der hydraulischen Versuche
 - a. Gesättigter Wassergehalt [$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$]
 - b. Gesättigte Leitfähigkeit (20°C) [cm h^{-1}] und [m s^{-1}]
11. Ermittelte Retentionskurven
 - a. Gesättigter Wassergehalt (pF 0 zugeordnet)
 - b. Wassergehalte im Bereich pF 0 bis pF 3 nach der Schindler-Auswertung (rot: 1. Parallele; blau: 2. Parallele)
 - c. Wassergehalte im trockenen Bereich nach der Taupunktmethode
 - d. Anpassung des van Genuchten-Modells und Auflistung der geschätzten Parameter
12. Ermittelte Leitfähigkeitskurven
 - a. Gesättigte Wasserleitfähigkeit (pF 0.0 zugeordnet)
 - b. Ungesättigte Wasserleitfähigkeiten nach Schindler-Auswertung
 - c. Anpassung des van Genuchten/Mualem-Modells und Auflistung der geschätzten Parameter
13. Abbildung der Messdaten der Evaporationsversuche beider Parallelen
 - a. Experimentellen Verläufe der Wasserspannungen in den vier Messtiefen
 - b. Experimentellen Verläufe der mittleren Wassergehalte

Bodenmaterial 1 (BM1)

Materialcharakterisierung



Kurzbeschreibung

Kiesiger Boden

Herkunft: n.v.

Verwendung: BAST-Lysimeter-Station, Augsburg

Körnung nach DIN 18123

Ton und Schluff [Masse-%]: 3

Sand: [Masse-%]: 40

Grobkorn [Masse-%]: 57

Ungleichförmigkeitsgrad: 16

Klassifikation nach DIN 18196

und DIN 4220

Bodengruppe: GW

Bodenart: n.v.

Eluat nach DIN 19529

Elektrische Leitfähigkeit [mS cm^{-1}]: 0.4

pH-Wert: 9.2

Proctorversuche nach DIN 18127

Proctordichte [Mg m^{-3}]: 2.25

Optimaler Wassergehalt [Masse-%]: 7.7

Verdichtungsgrad: 1.00

Trockendichte [Mg m^{-3}]: 2.25

Korndichte [Mg m^{-3}]: n.v.

Wassergehalt und hyd. Leitfähigkeit

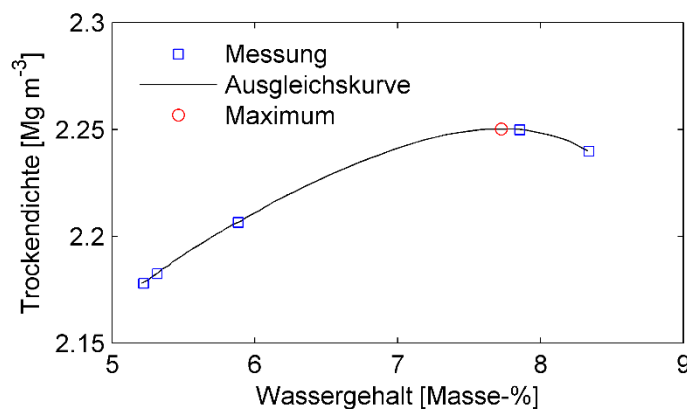
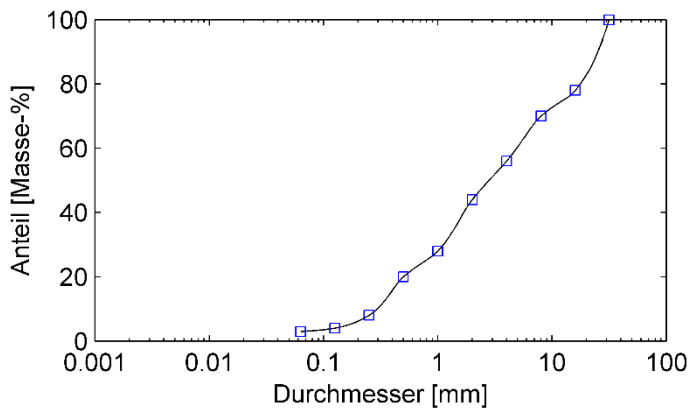
bei Sättigung

Porosität [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: n.v.

Wassergehalt [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.141 (BM1a)

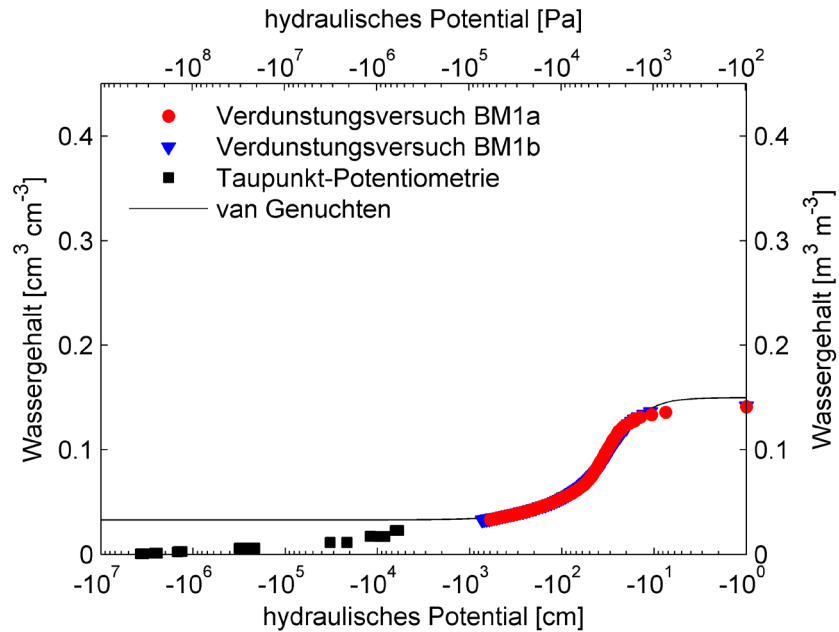
0.142 (BM1b)

hyd. Leitfähigkeit (20°C) [m s^{-1}]: 1.0×10^{-5}



Bodenmaterial 1 (BM1)

Ermittelte hydraulische Eigenschaften



van Genuchten-Mualem

Parameter

θ_s [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.150

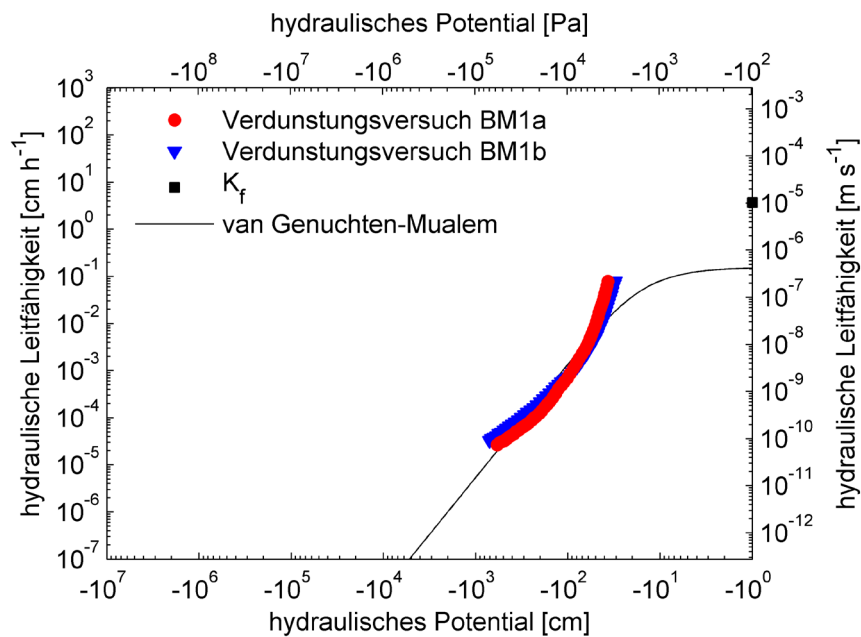
θ_r [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.033

α [m^{-1}]: 0.000428

n [-]: 2.208

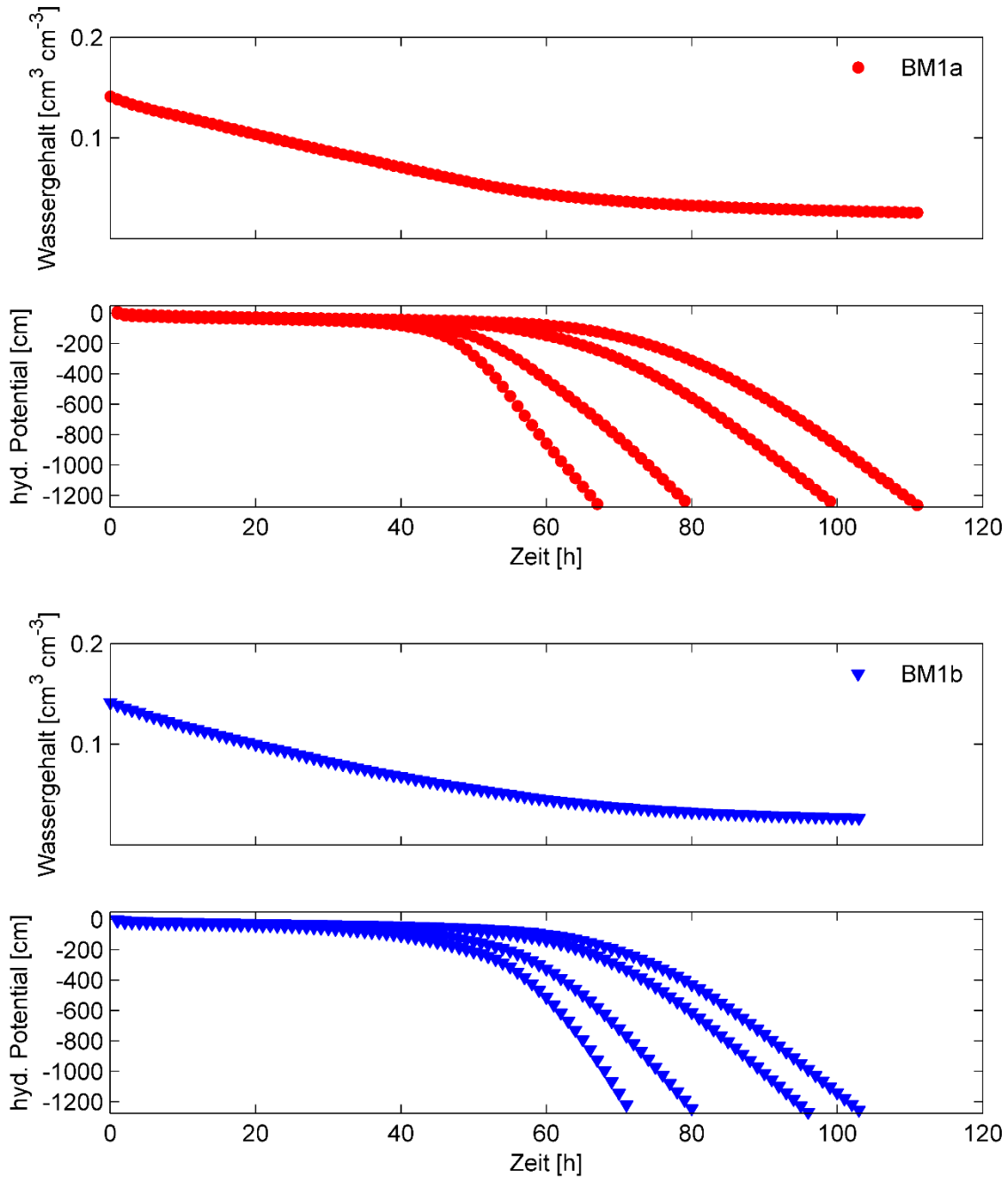
K_f [m s^{-1}]: 4.41×10^{-7}

τ [-]: -1.658



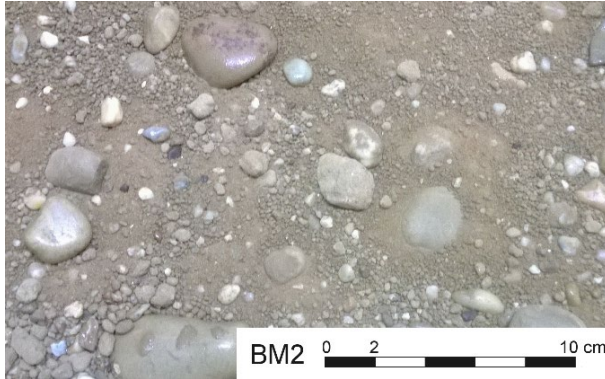
Bodenmaterial 1 (BM1)

Verdunstungsversuche



Bodenmaterial 2 (BM2)

Materialcharakterisierung



Kurzbeschreibung

Bindiger Boden

Herkunft: n.v.

Verwendung: Lysimeterstation (BAST), Augsburg

Körnung nach DIN 18123

Ton und Schluff [Masse-%]: 27

Sand: [Masse-%]: 49

Grobkorn [Masse-%]: 24

Ungleichförmigkeitsgrad: 29

Klassifikation nach DIN 18196

und DIN 4220

Bodengruppe: GU*

Bodenart: Su3G3

Klassifikation nach DIN 18196

und DIN 4220

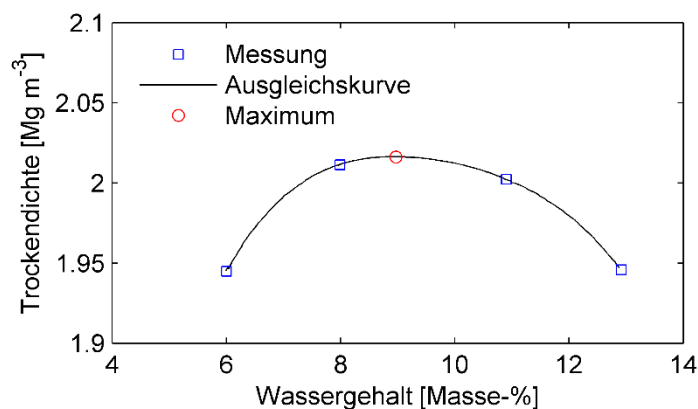
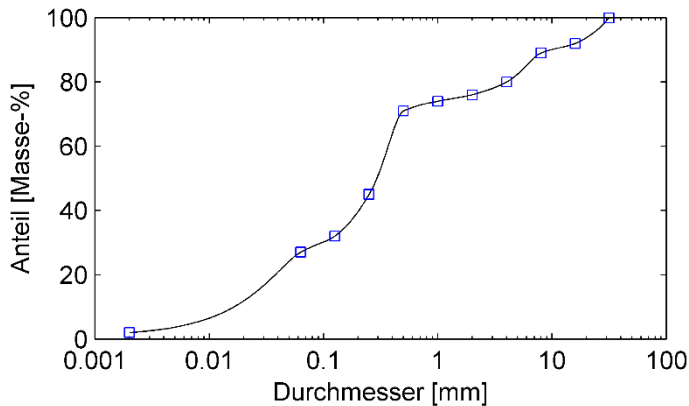
Bodengruppe: GU*

Bodenart: sS, sehr stark grusig

Eluat nach DIN 19529

Elektrische Leitfähigkeit [mS cm^{-1}]: 0.4

pH-Wert: 8.9



Proctorversuche nach DIN 18127

Proctordichte [Mg m^{-3}]: 2.02

Optimaler Wassergehalt [Masse-%]: 9.0

Verdichtungsgrad: 0.97

Trockendichte [Mg m^{-3}]: 1.96

Korndichte [Mg m^{-3}]: n.v.

Wassergehalt und hyd. Leitfähigkeit

bei Sättigung

Porosität [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: n.v.

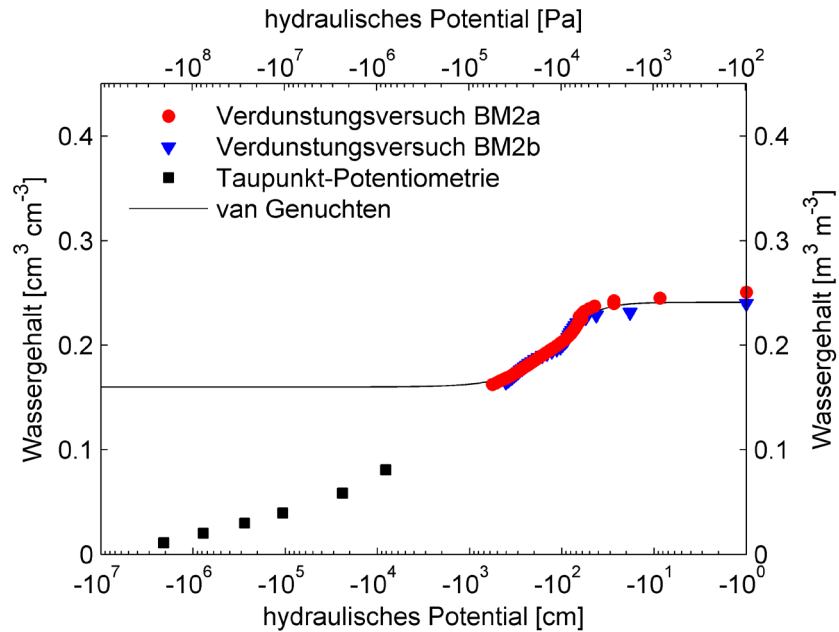
Wassergehalt [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.251 (BM2a)

0.234 (BM2b)

hyd. Leitfähigkeit (20°C) [m s^{-1}]: 6.6×10^{-8}

Bodenmaterial 2 (BM2)

Ermittelte hydraulische Eigenschaften



van Genuchten-Mualem

Parameter

θ_s [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.241

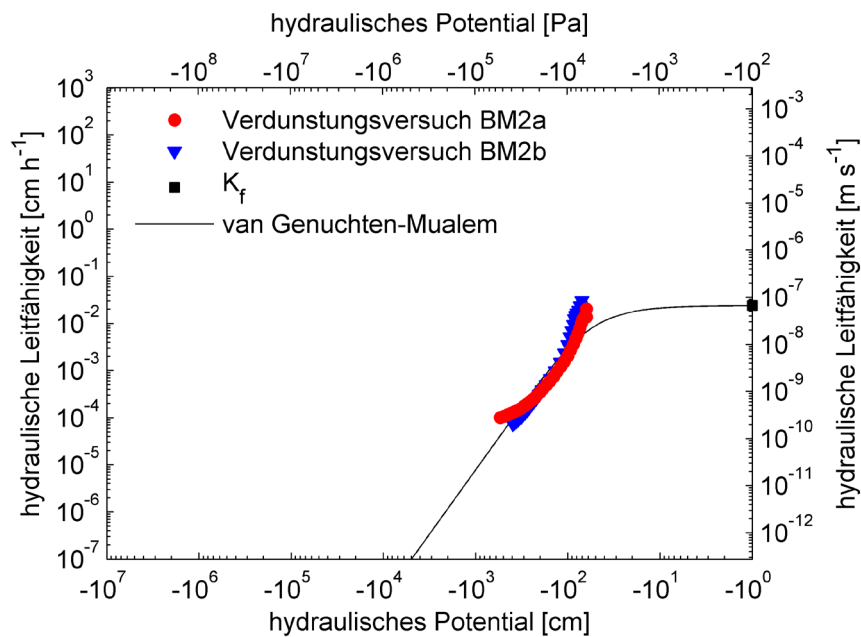
θ_r [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.160

α [m^{-1}]: 0.000125

n [-]: 2.326

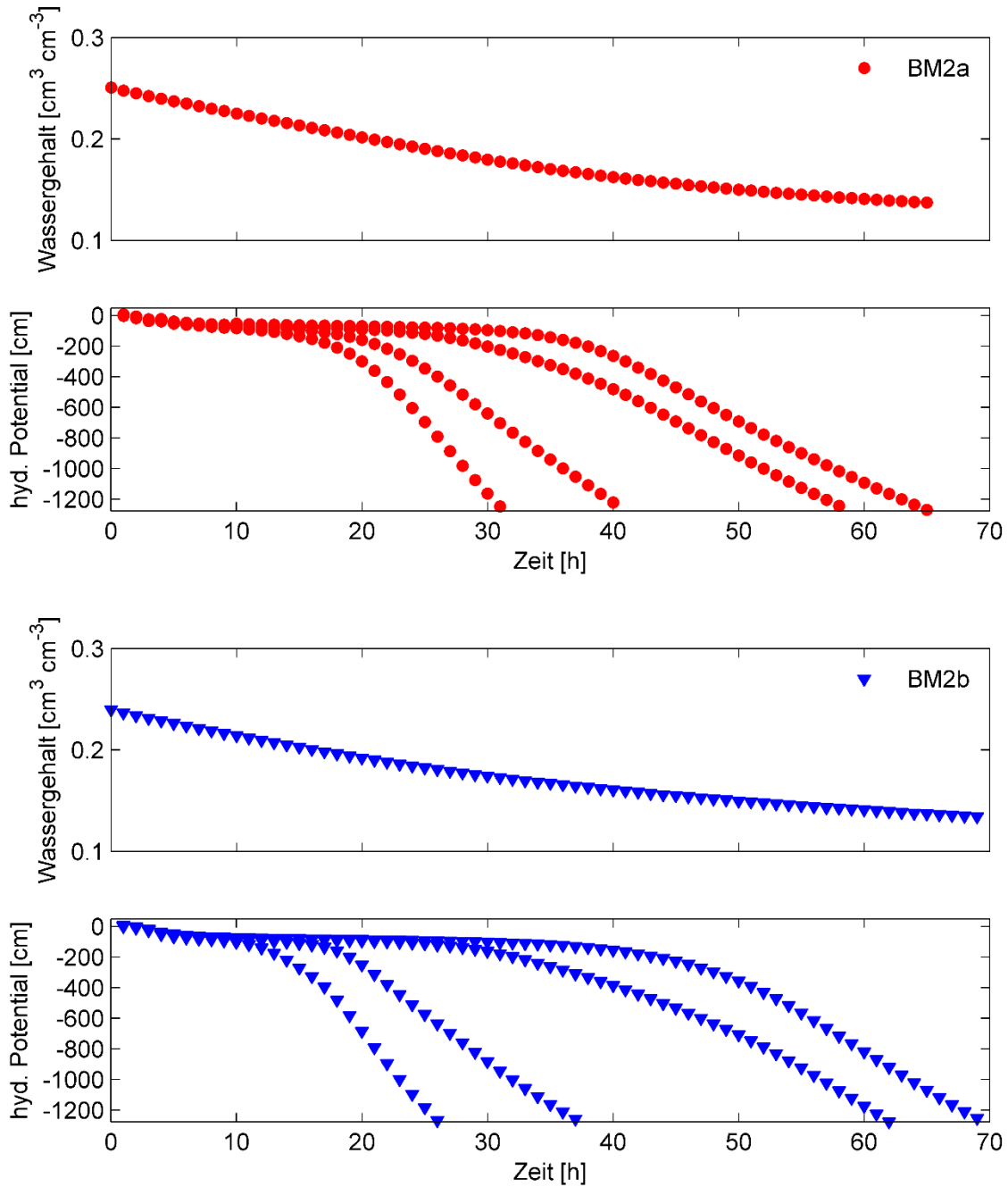
K_f [m s^{-1}]: 6.69×10^{-8}

τ [-]: -1.452



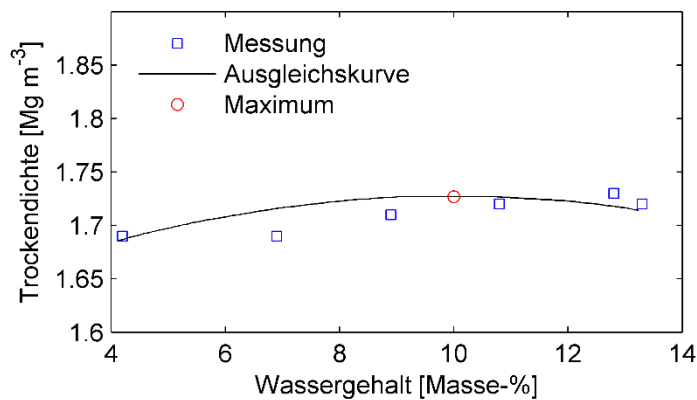
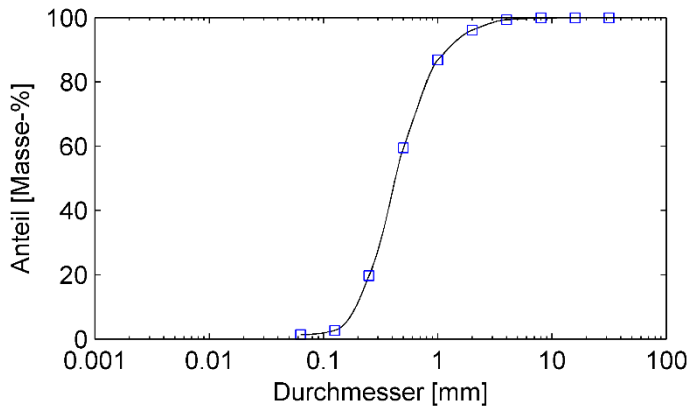
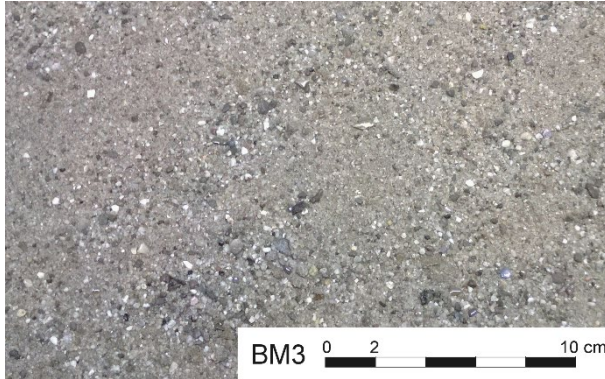
Bodenmaterial 2 (BM2)

Verdunstungsversuche



Bodenmaterial 3 (BM3)

Materialcharakterisierung



Kurzbeschreibung

Sandiger Boden

Herkunft: Aufbereitungsanlage, Moers

Körnung nach DIN 18123

Ton und Schluff [Masse-%]: 1

Sand: [Masse-%]: 95

Grobkorn [Masse-%]: 4

Ungleichförmigkeitsgrad: 3

Klassifikation nach DIN 18196

und DIN 4220

Bodengruppe: SW

Bodenart: SsG2

Eluat nach DIN 19529

Elektrische Leitfähigkeit [mS cm⁻¹]: 0.1

pH-Wert: 8.8

Proctorversuche nach DIN 18127

Proctordichte [Mg m⁻³]: 1.73

Optimaler Wassergehalt [Masse-%]: 10.0

Verdichtungsgrad: 1.00

Trockendichte [Mg m⁻³]: 1.73

Korndichte [Mg m⁻³]: 2.63

Wassergehalt und hyd. Leitfähigkeit

bei Sättigung

Porosität [m³ m⁻³]: 0.342

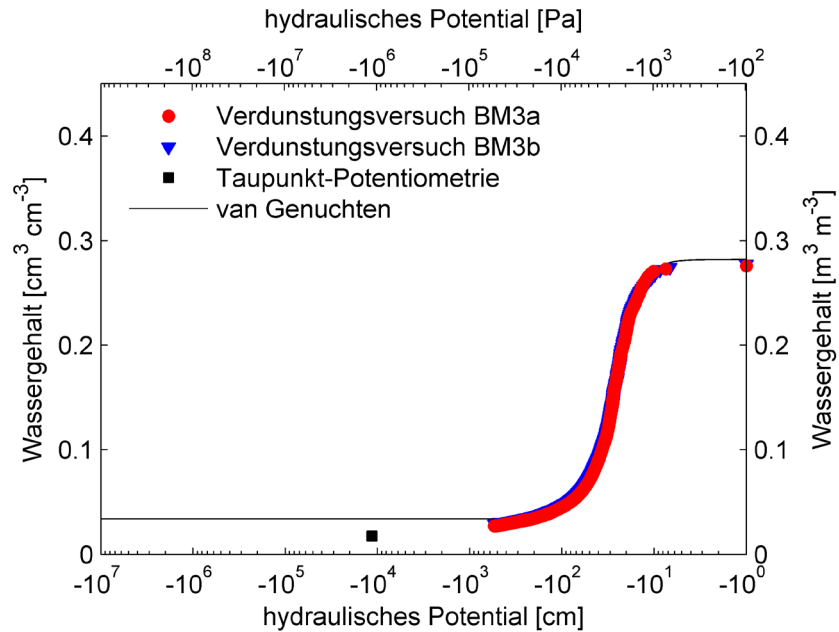
Wassergehalt [m³ m⁻³]: 0.276 (BM3a)

0.277 (BM3b)

hyd. Leitfähigkeit (20°C) [m s⁻¹]: 4.9×10⁻⁵

Bodenmaterial 3 (BM3)

Ermittelte hydraulische Eigenschaften



van Genuchten-Mualem

Parameter

θ_s [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.282

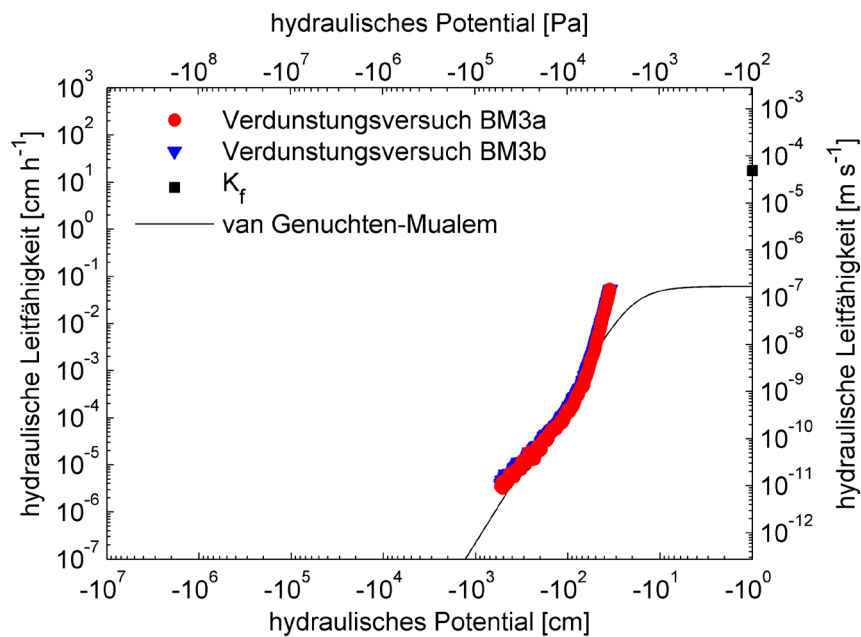
θ_r [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.034

α [m^{-1}]: 0.000430

n [-]: 3.345

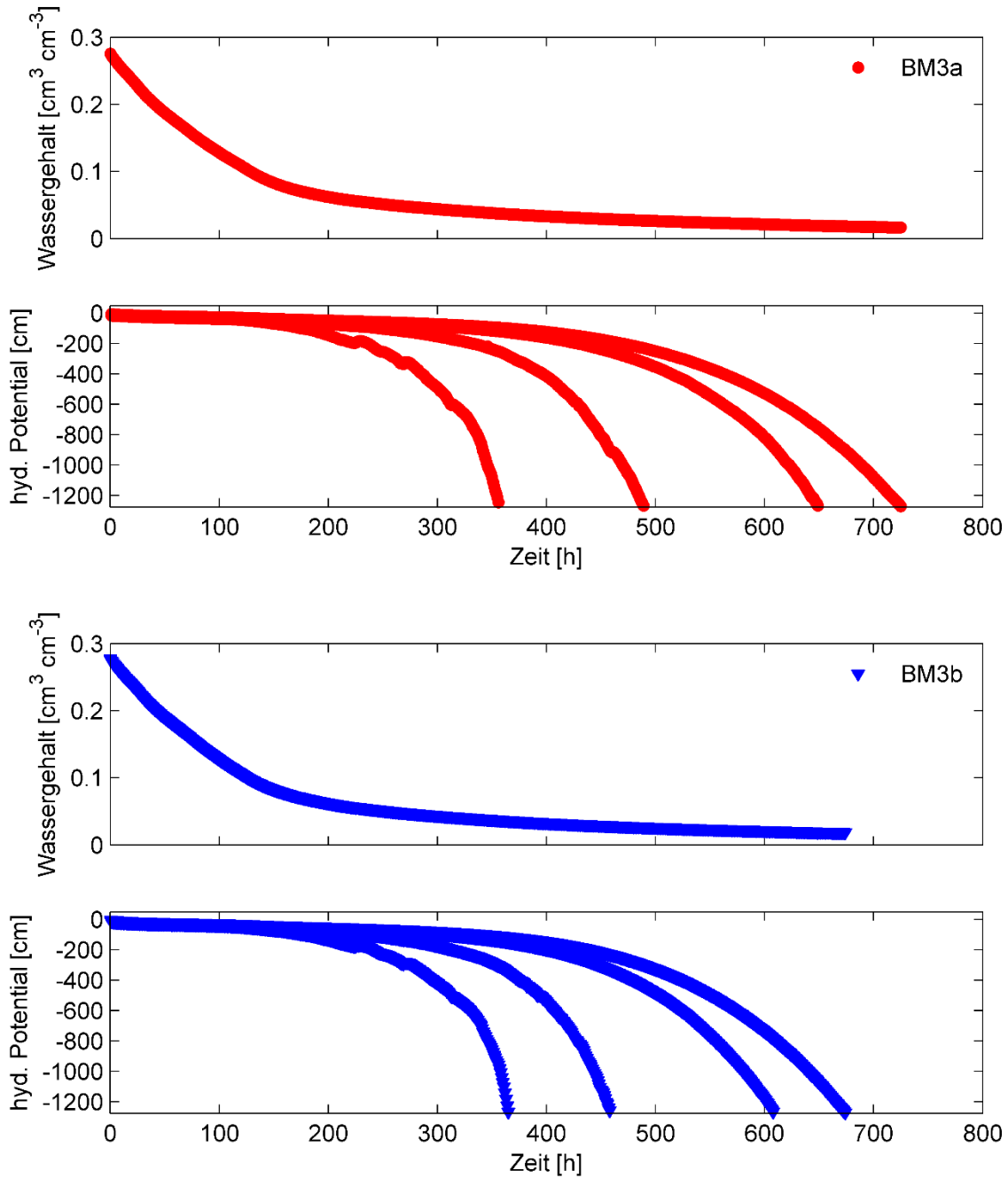
K_f [m s^{-1}]: 1.72×10^{-7}

τ [-]: -1.519



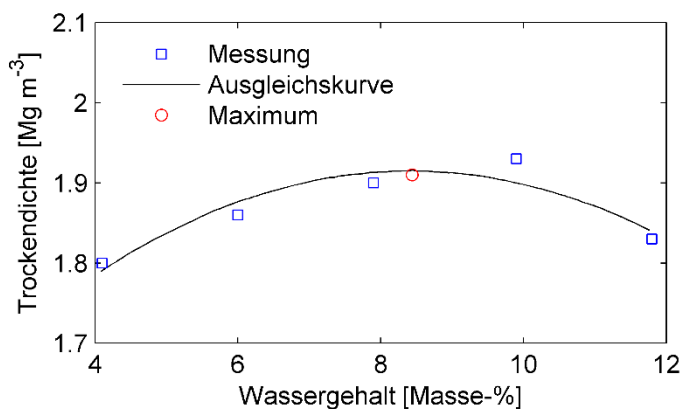
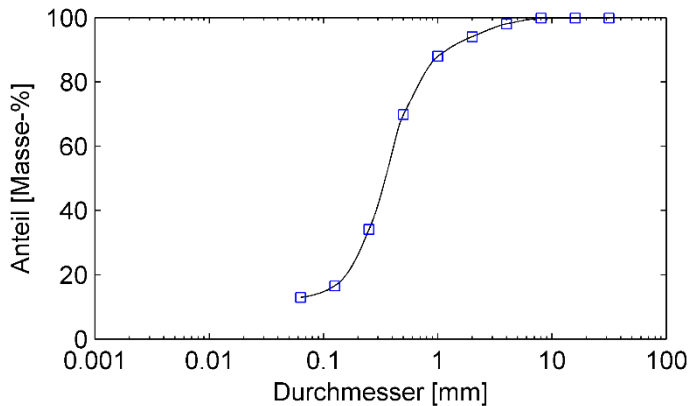
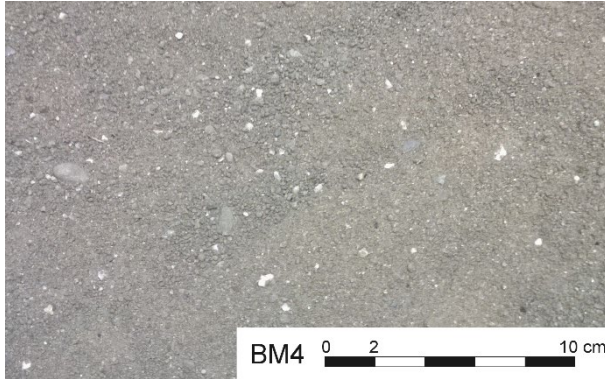
Bodenmaterial 3 (BM3)

Verdunstungsversuche



Bodenmaterial 4 (BM4)

Materialcharakterisierung



Kurzbeschreibung

Füllboden

Herkunft: Aufbereitungsanlage, Moers

Körnung nach DIN 18123

Ton und Schluff [Masse-%]: 13

Sand: [Masse-%]: 81

Grobkorn [Masse-%]: 6

Ungleichförmigkeitsgrad: n.v.

Klassifikation nach DIN 18196

und DIN 4220

Bodengruppe: SU

Bodenart: n.v.

Eluat nach DIN 19529

Elektrische Leitfähigkeit [mS cm^{-1}]: 0.4

pH-Wert: 8.4

Proctorversuche nach DIN 18127

Proctordichte [Mg m^{-3}]: 1.91

Optimaler Wassergehalt [Masse-%]: 8.4

Verdichtungsgrad: 1.00

Trockendichte [Mg m^{-3}]: 1.91

Korndichte [Mg m^{-3}]: 2.62

Wassergehalt und hyd. Leitfähigkeit bei Sättigung

Porosität [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.271

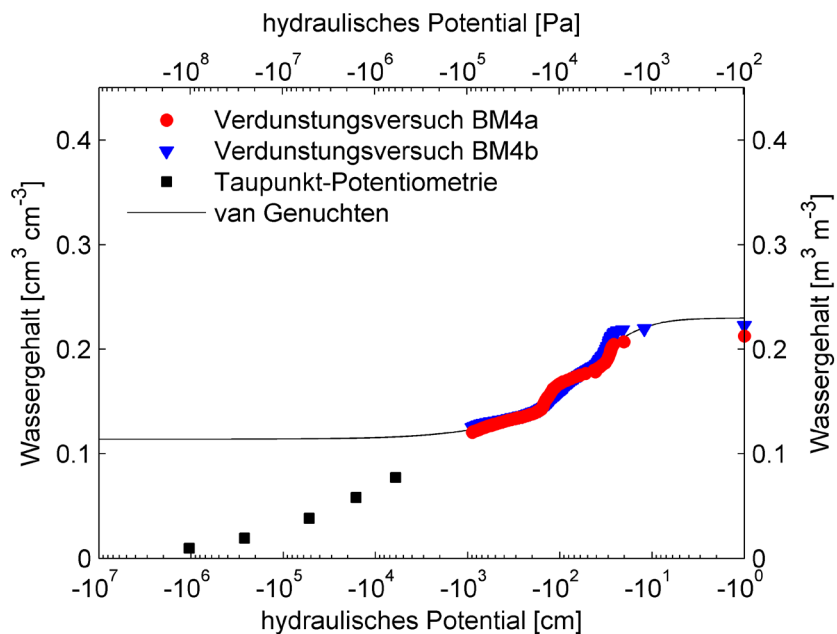
Wassergehalt [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.212 (BM4a)

0.223 (BM4b)

hyd. Leitfähigkeit (20°C) [m s^{-1}]: 1.8×10^{-7}

Bodenmaterial 4 (BM4)

Ermittelte hydraulische Eigenschaften



van Genuchten-Mualem

Parameter

θ_s [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.230

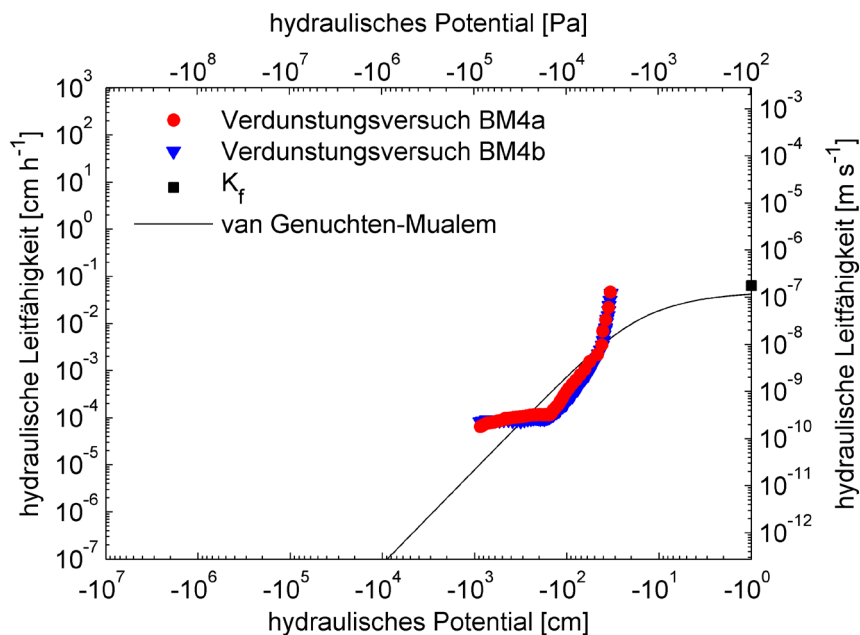
θ_r [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.114

α [m^{-1}]: 0.000336

n [-]: 1.738

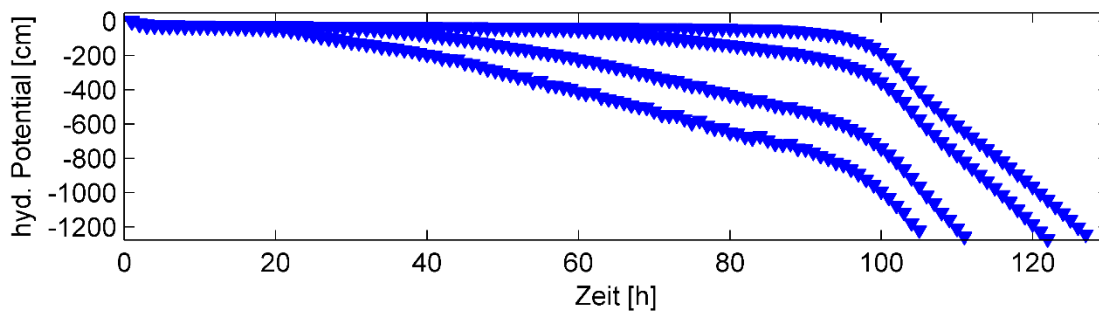
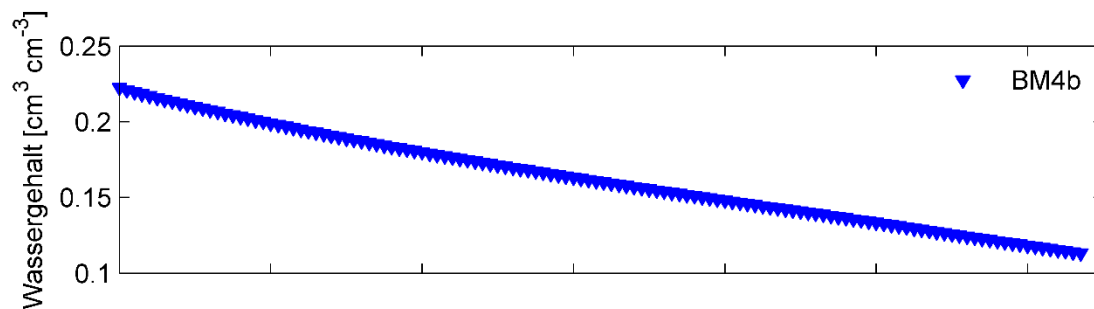
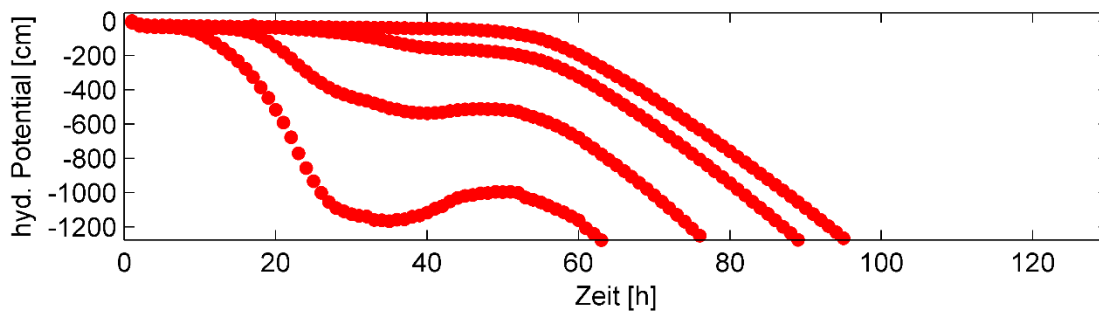
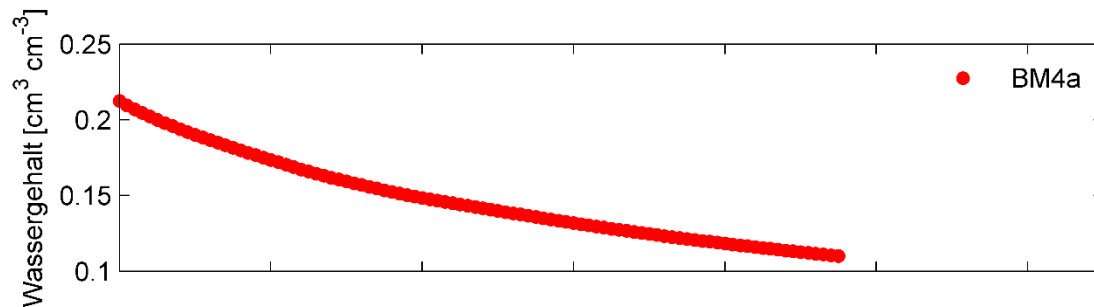
K_f [m s^{-1}]: 1.39×10^{-7}

τ [-]: -2.000 (Grenze)



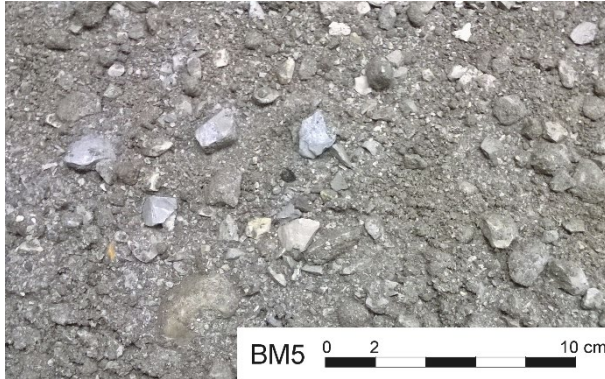
Bodenmaterial 4 (BM4)

Verdunstungsversuche



Bodenmaterial 5 (BM5)

Materialcharakterisierung



Kurzbeschreibung

Schluffiger Kies (Gemisch aus gebrochenem Kalkstein und ausgeprägt plastischem Ton)

Herkunft: Zentrum Geotechnik, Technische Universität München

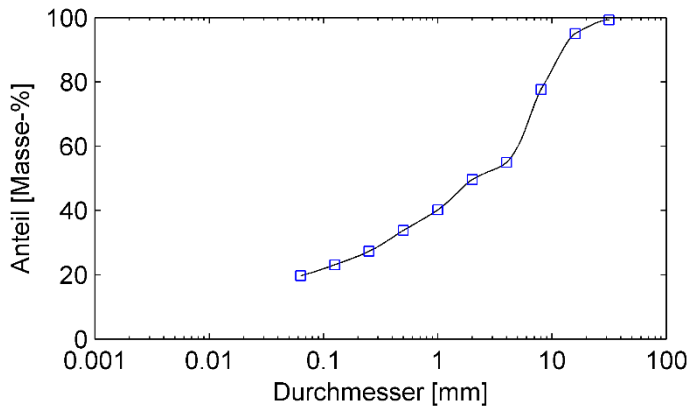
Körnung nach DIN 18123

Ton und Schluff [Masse-%]: 20

Sand: [Masse-%]: 30

Grobkorn [Masse-%]: 50

Ungleichförmigkeitsgrad: n.v.



Klassifikation nach DIN 18196 und DIN 4220

Bodengruppe: GU*

Bodenart: n.v.

Eluat nach DIN 19529

Elektrische Leitfähigkeit [mS cm^{-1}]: 0.6

pH-Wert: 8.0

Proctorversuche nach DIN 18127

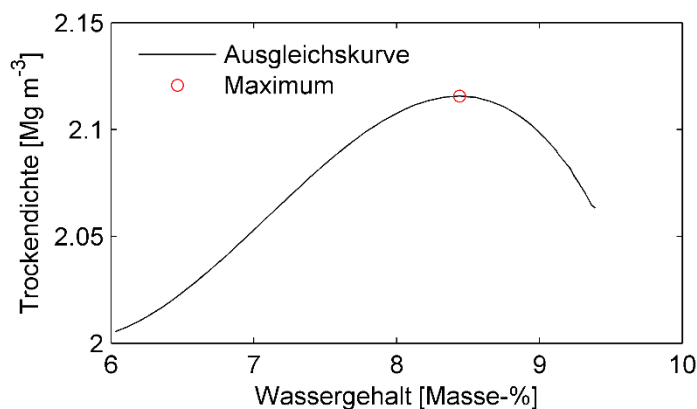
Proctordichte [Mg m^{-3}]: 2.12

Optimaler Wassergehalt [Masse-%]: 8.4

Verdichtungsgrad: 1.00

Trockendichte [Mg m^{-3}]: 2.12

Korndichte [Mg m^{-3}]: n.v.



Wassergehalt und hyd. Leitfähigkeit bei Sättigung

Porosität [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: n.v.

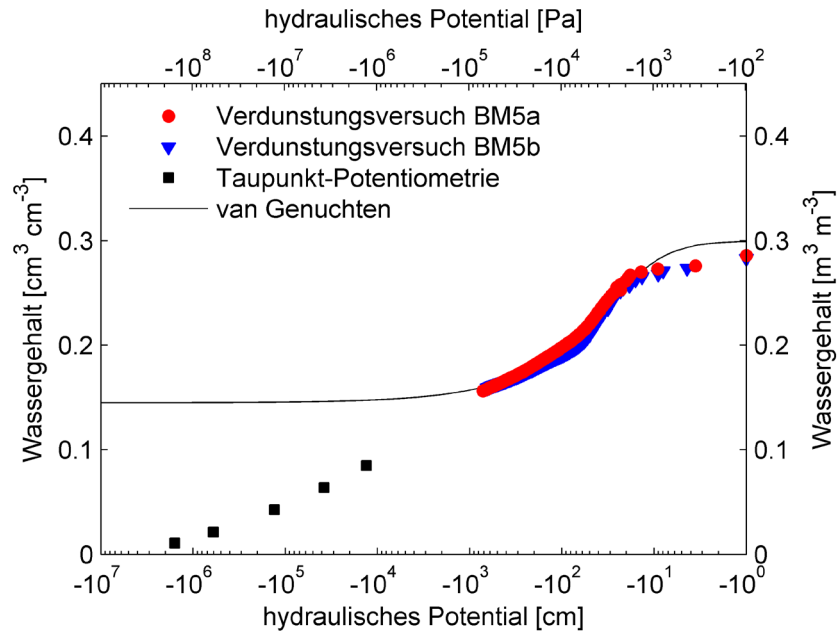
Wassergehalt [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.286 (BM5a)

0.283 (BM5b)

hyd. Leitfähigkeit (20°C) [m s^{-1}]: 7.5×10^{-6}

Bodenmaterial 5 (BM5)

Ermittelte hydraulische Eigenschaften



van Genuchten-Mualem

Parameter

θ_s [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.300

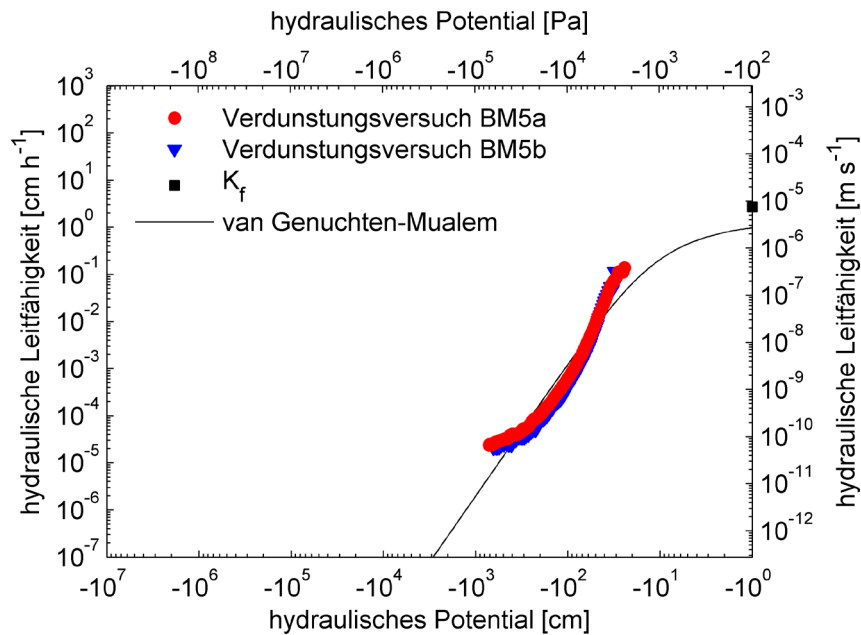
θ_r [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.145

α [m^{-1}]: 0.000606

n [-]: 1.620

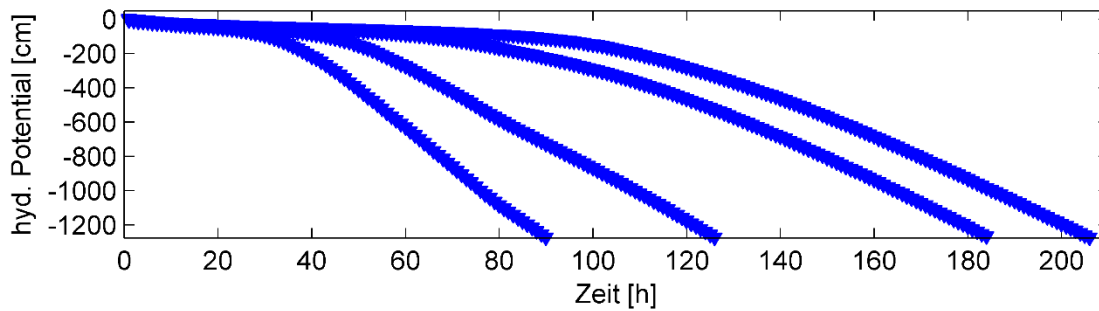
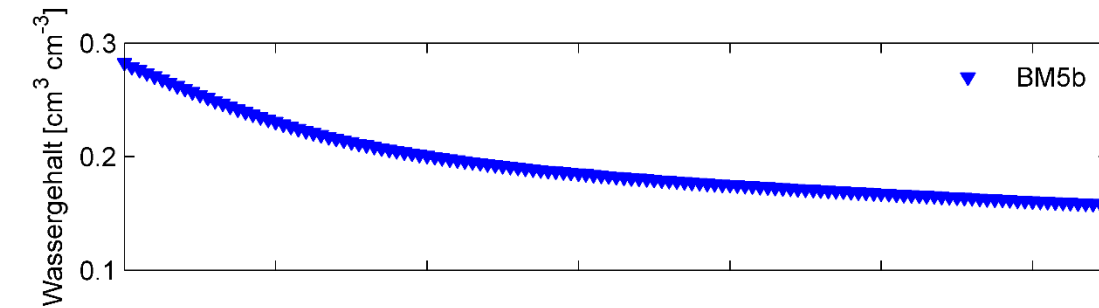
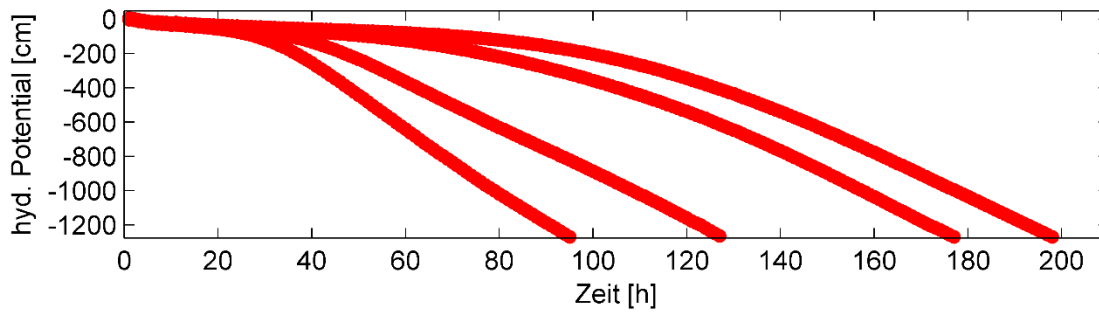
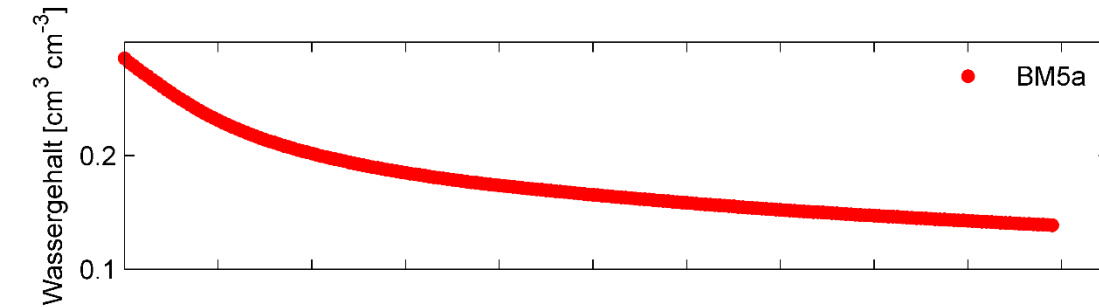
K_f [m s^{-1}]: 4.00×10^{-6}

τ [-]: -0.684



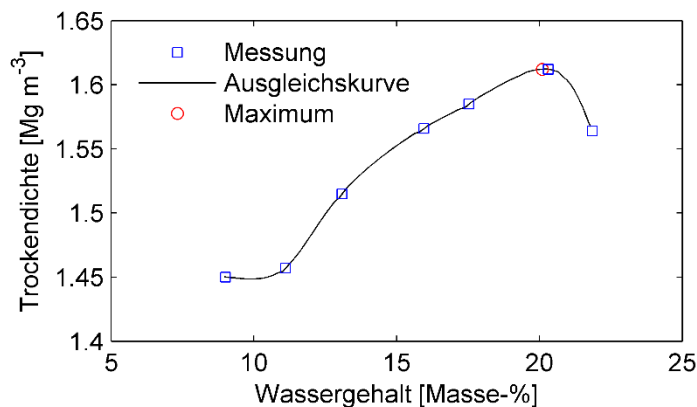
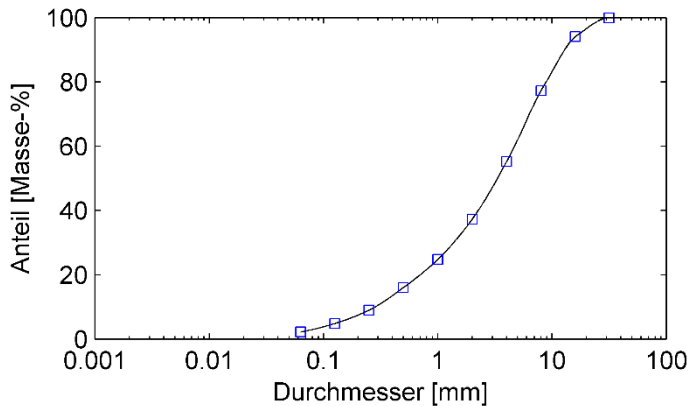
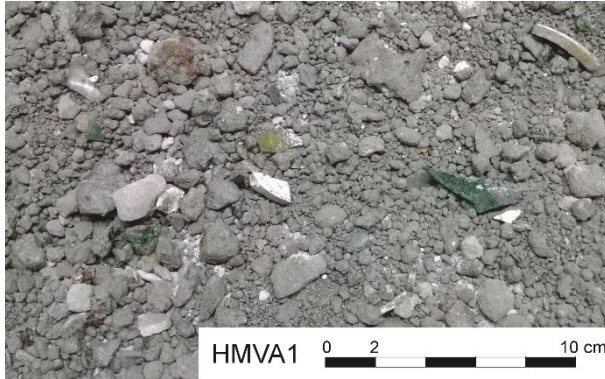
Bodenmaterial 5 (BM5)

Verdunstungsversuche



Hausmüllverbrennungsasche 1 (HMVA1)

Materialcharakterisierung



Kurzbeschreibung

Hausmüllverbrennungsasche, 0/32 mm
Herkunft: Müllverwertungsanlage
Rugenberger Damm, Hamburg

Körnung nach DIN 18123

Ton und Schluff [Masse-%]: 2
Sand: [Masse-%]: 35
Grobkorn [Masse-%]: 63
Ungleichförmigkeitsgrad: 17

Klassifikation nach DIN 18196

und DIN 4220

Bodengruppe: GW
Bodenart: sSGr5

Eluat nach DIN 19529

Elektrische Leitfähigkeit [mS cm⁻¹]: 7.0
pH-Wert: 10.5

Proctorversuche nach DIN 18127

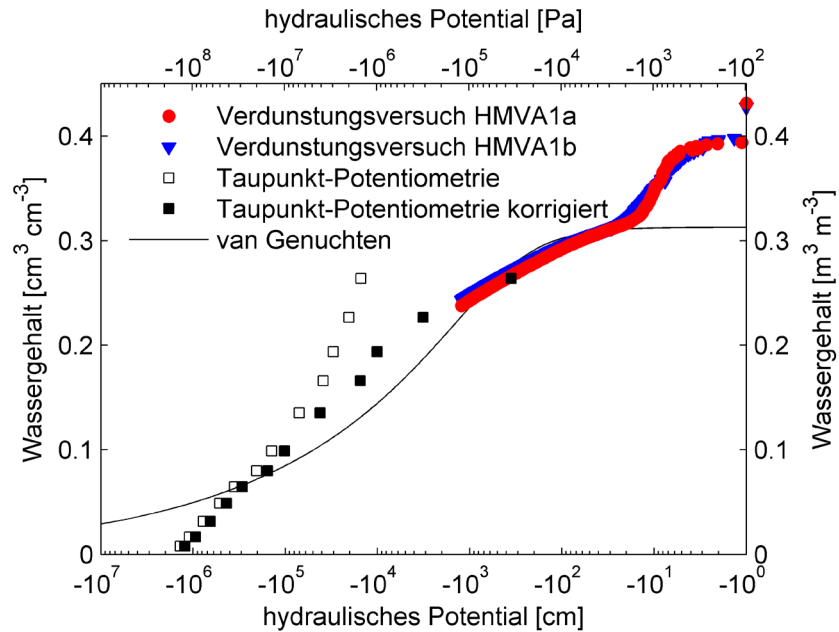
Proctordichte [Mg m⁻³]: 1.61
Optimaler Wassergehalt [Masse-%]: 20.1
Verdichtungsgrad: 1.00
Trockendichte [Mg m⁻³]: 1.61
Korndichte [Mg m⁻³]: n.v.

Wassergehalt und hyd. Leitfähigkeit bei Sättigung

Porosität [m³ m⁻³]: n.v.
Wassergehalt [m³ m⁻³]: 0.431 (HMVA1a)
0.428 (HMVA1b)
hyd. Leitfähigkeit (20°C) [m s⁻¹]: 6.4×10⁻⁵

Hausmüllverbrennungsasche 1 (HMVA1)

Ermittelte hydraulische Eigenschaften



van Genuchten-Mualem

Parameter

θ_s [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.313

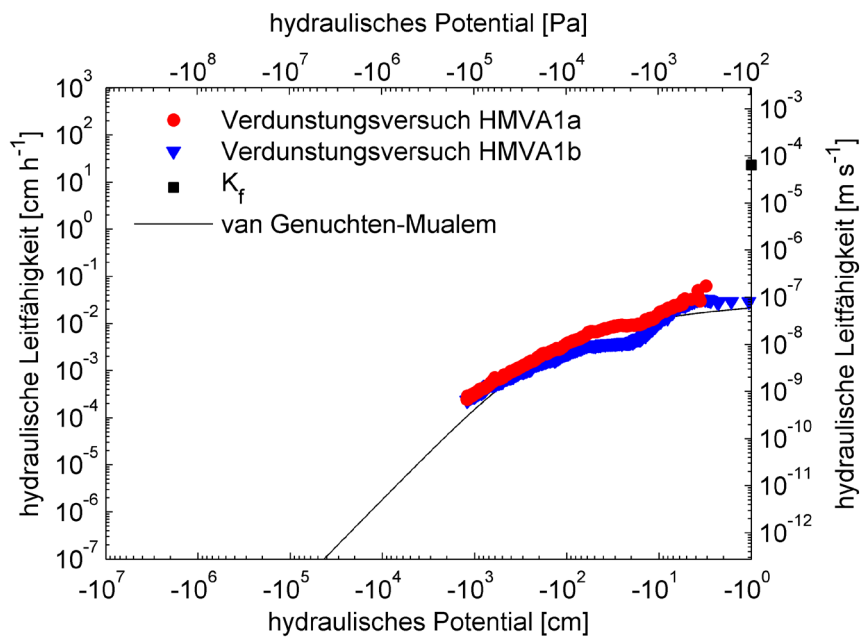
θ_r [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.000

α [m^{-1}]: 0.000027

n [-]: 1.233

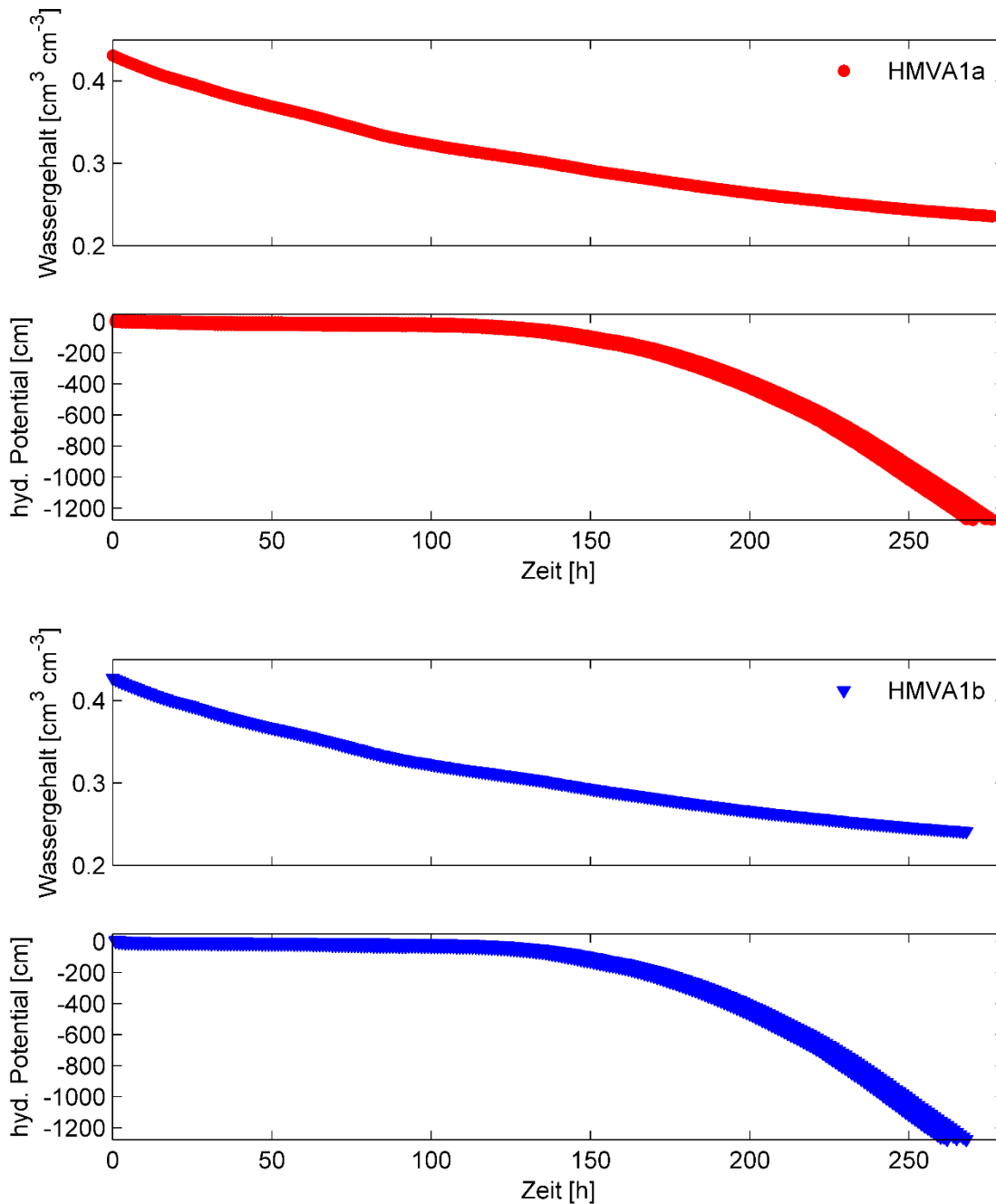
K_f [m s^{-1}]: 1.07×10^{-7}

τ [-]: -2.000 (Grenze)



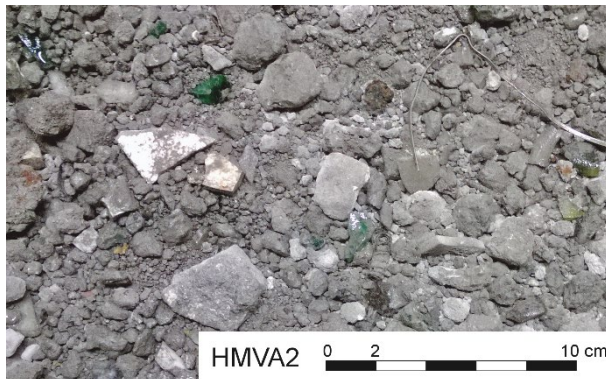
Hausmüllverbrennungsasche 1 (HMVA1)

Verdunstungsversuche



Hausmüllverbrennungsasche 2 (HMVA2)

Materialcharakterisierung



Kurzbeschreibung

Hausmüllverbrennungsasche, 0/32 mm
Herkunft: Müllverwertungsanlage
Borsigstraße, Hamburg

Körnung nach DIN 18123

Ton und Schluff [Masse-%]: 1
Sand: [Masse-%]: 25
Grobkorn [Masse-%]: 74
Ungleichförmigkeitsgrad: 20

Klassifikation nach DIN 18196

und DIN 4220

Bodengruppe: GW
Bodenart: sS, sehr stark grusig

Eluat nach DIN 19529

Elektrische Leitfähigkeit [mS cm^{-1}]: 3.5
pH-Wert: 11.0

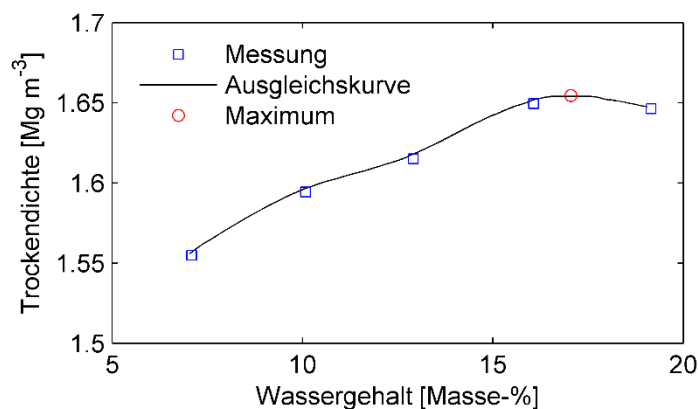
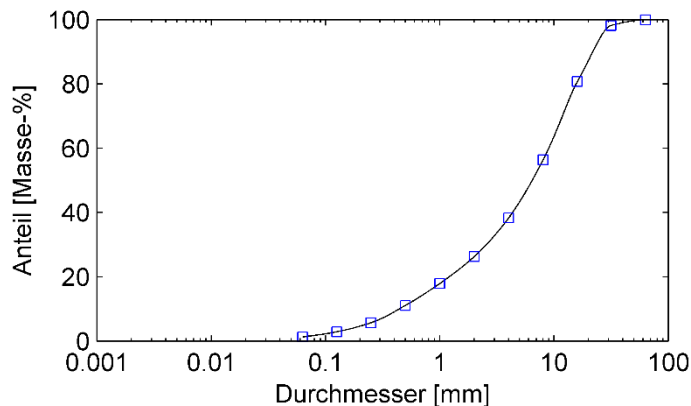
Proctorversuche nach DIN 18127

Proctordichte [Mg m^{-3}]: 1.65
Optimaler Wassergehalt [Masse-%]: 17.0
Verdichtungsgrad: 1.00
Trockendichte [Mg m^{-3}]: 1.65
Korndichte [Mg m^{-3}]: n.v.

Wassergehalt und hyd. Leitfähigkeit

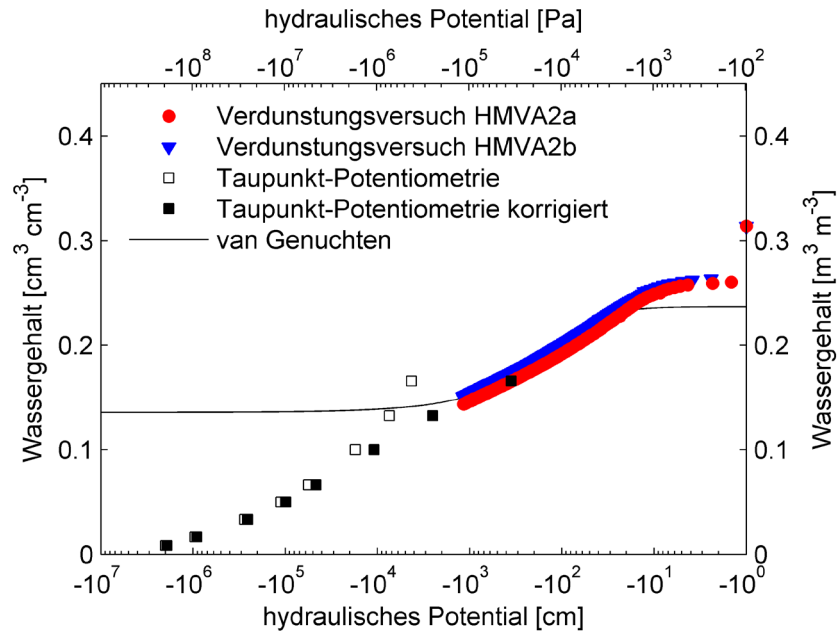
bei Sättigung

Porosität [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: n.v.
Wassergehalt [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.314 (HMVA2a)
0.314 (HMVA2b)
hyd. Leitfähigkeit (20°C) [m s^{-1}]: 6.4×10^{-5}



Hausmüllverbrennungsasche 2 (HMVA2)

Ermittelte hydraulische Eigenschaften



van Genuchten-Mualem

Parameter

θ_s [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.237

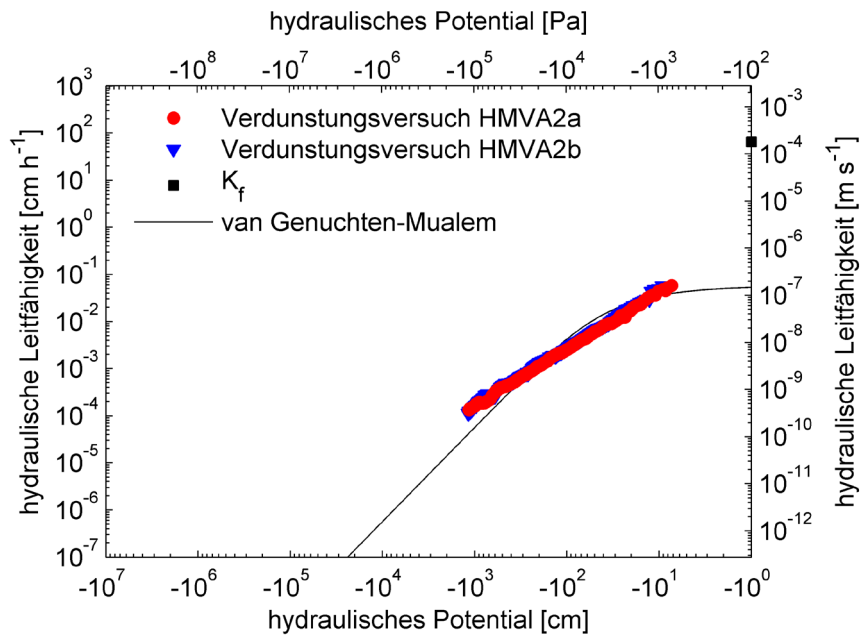
θ_r [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.136

α [m^{-1}]: 0.000134

n [-]: 1.717

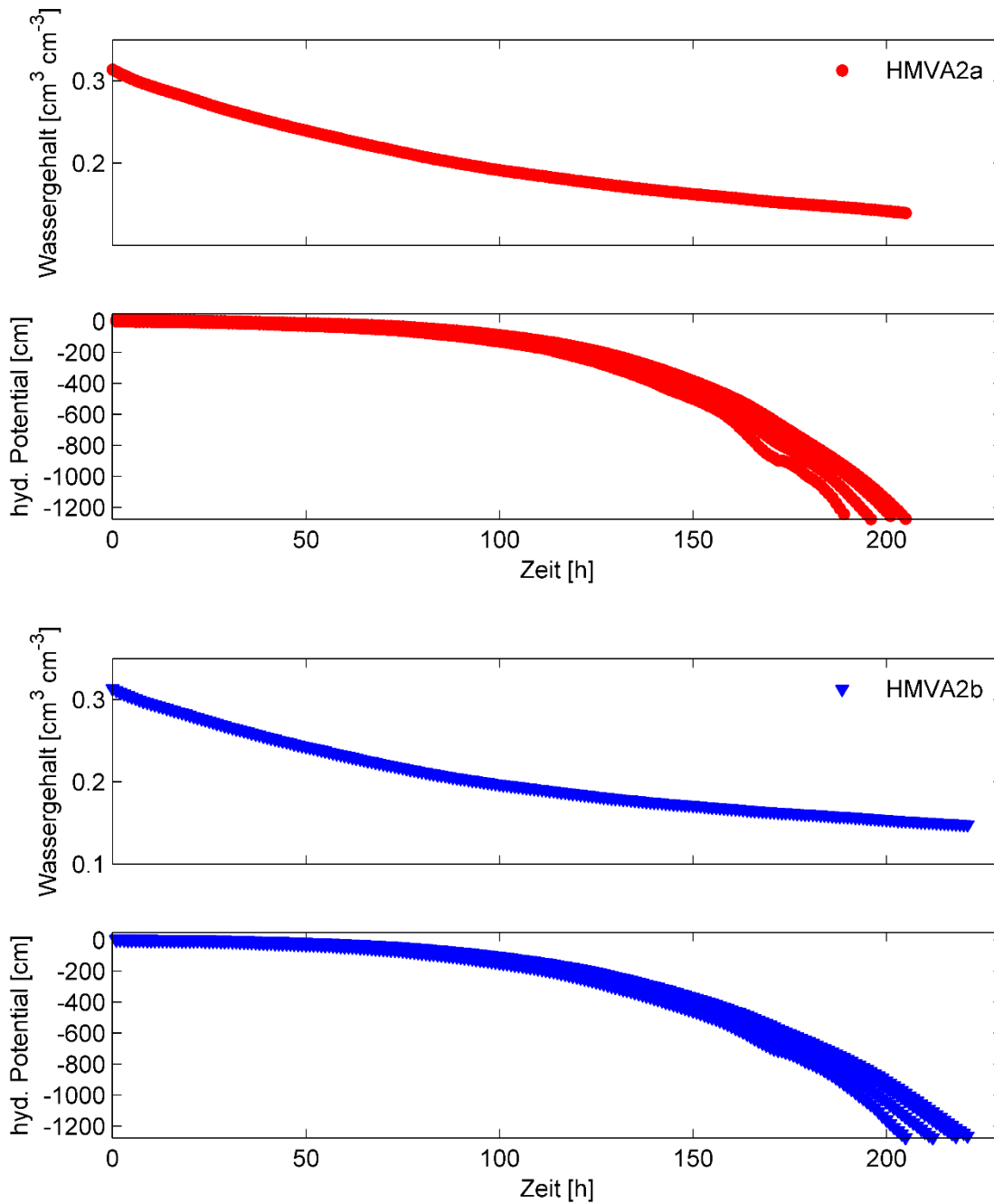
K_f [m s^{-1}]: 1.64×10^{-7}

τ [-]: -2.000 (Grenze)



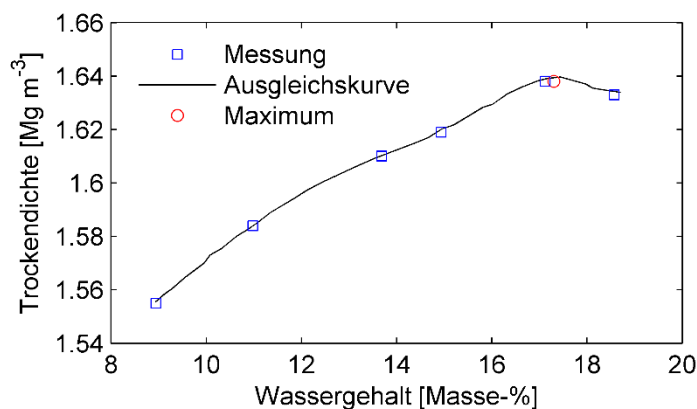
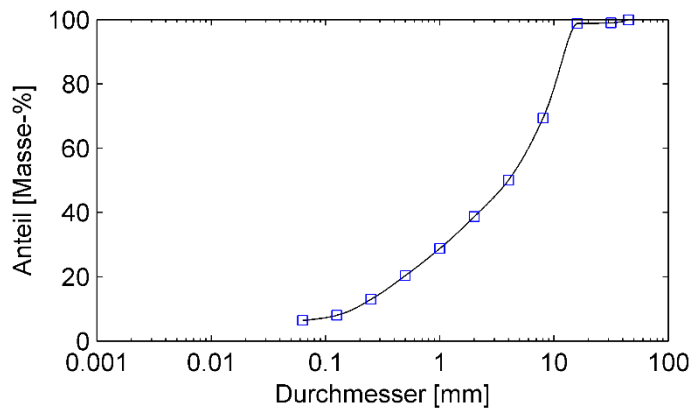
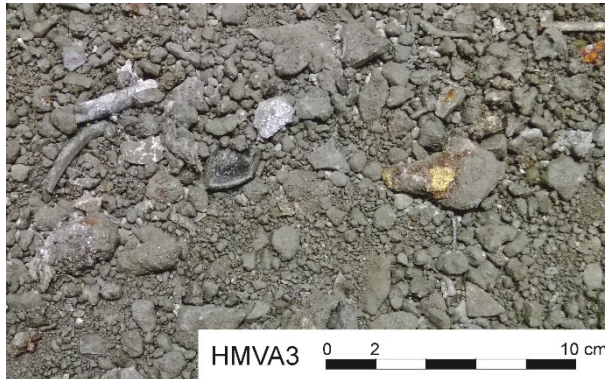
Hausmüllverbrennungsasche 2 (HMVA2)

Verdunstungsversuche



Hausmüllverbrennungsasche 3 (HMVA3)

Materialcharakterisierung



Kurzbeschreibung

Hausmüllverbrennungsasche, 0/32 mm
Herkunft: Müllverwertungsanlage
Remscheid

Körnung nach DIN 18123

Ton und Schluff [Masse-%]: 6
Sand: [Masse-%]: 33
Grobkorn [Masse-%]: 61
Ungleichförmigkeitsgrad: 25

Klassifikation nach DIN 18196

und DIN 4220

Bodengruppe: GU
Bodenart: n.v.

Eluat nach DIN 19529

Elektrische Leitfähigkeit [mS cm⁻¹]: 4.7
pH-Wert: 9.5

Proctorversuche nach DIN 18127

Proctordichte [Mg m⁻³]: 1.64
Optimaler Wassergehalt [Masse-%]: 17.3
Verdichtungsgrad: 1.00
Trockendichte [Mg m⁻³]: 1.64
Korndichte [Mg m⁻³]: n.v.

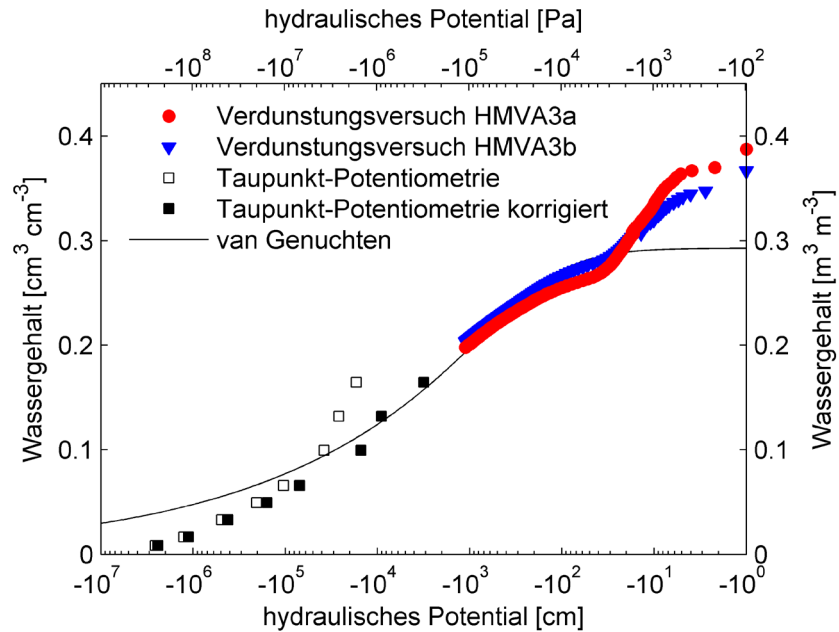
Wassergehalt und hyd. Leitfähigkeit

bei Sättigung

Porosität [m³ m⁻³]: n.v.
Wassergehalt [m³ m⁻³]: 0.388 (HMVA3a)
0.367 (HMVA3b)
hyd. Leitfähigkeit (20°C) [m s⁻¹]: 6.3×10⁻⁸

Hausmüllverbrennungsasche 3 (HMVA3)

Ermittelte hydraulische Eigenschaften



van Genuchten-Mualem

Parameter

θ_s [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.293

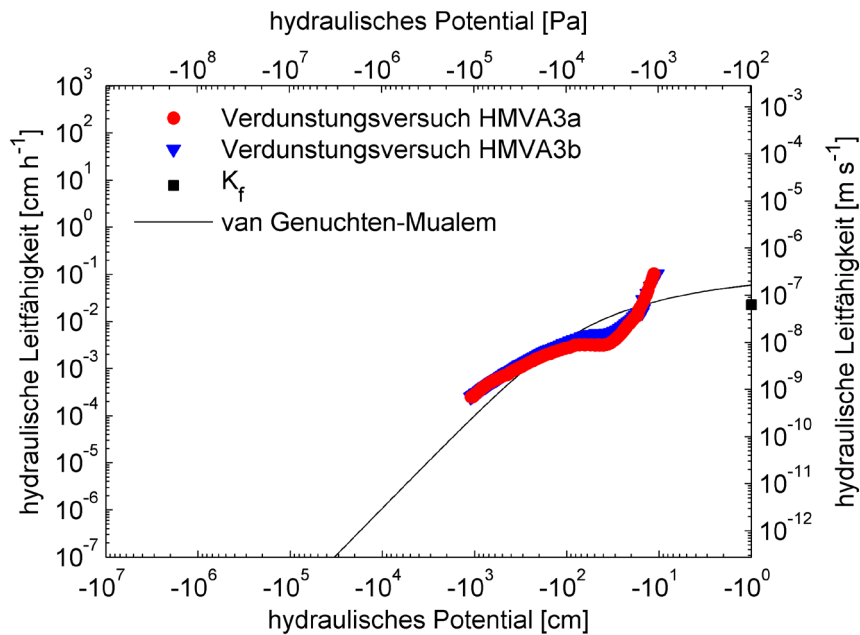
θ_r [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.000

α [m^{-1}]: 0.000061

n [-]: 1.208

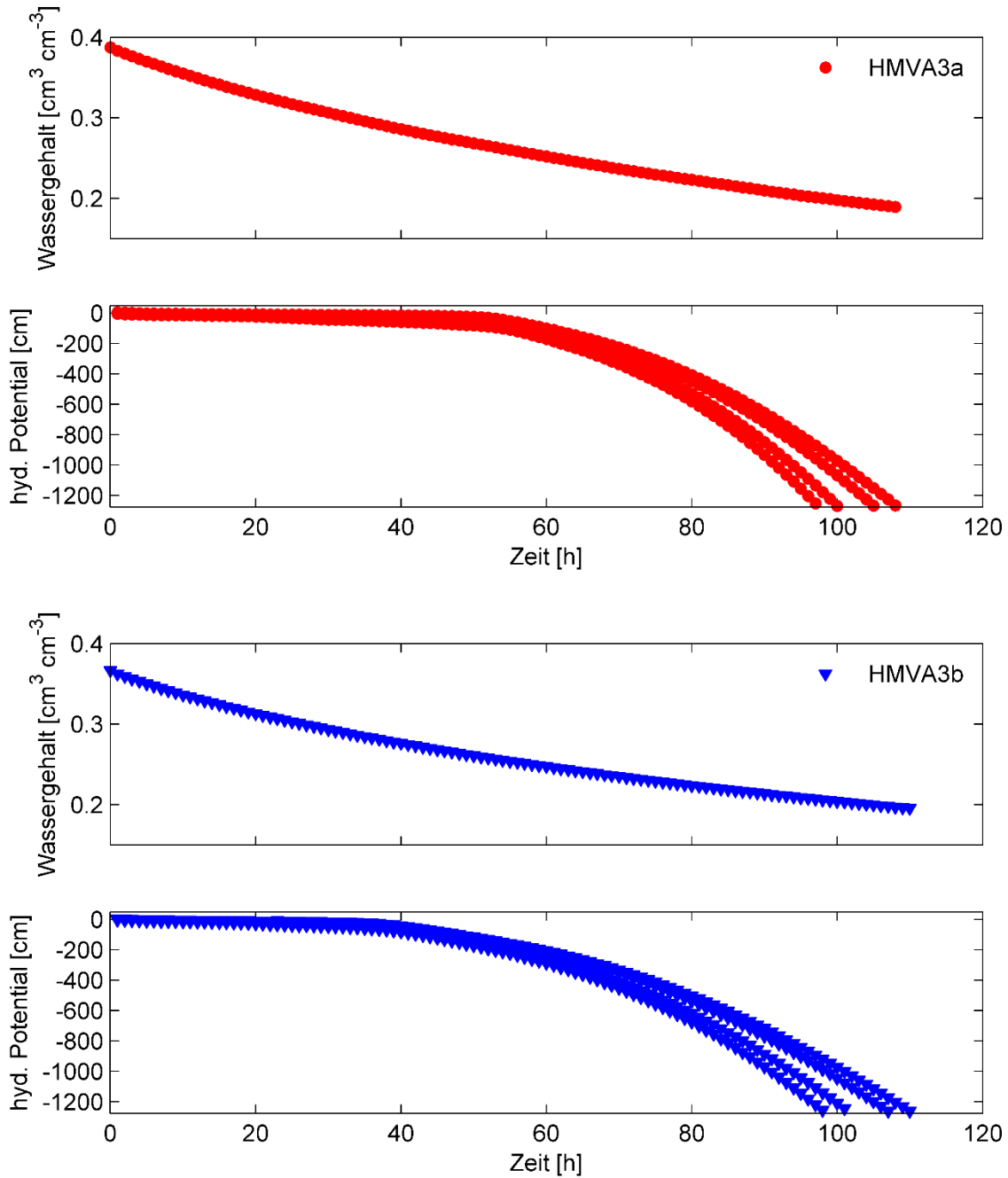
K_f [m s^{-1}]: 3.88×10^{-7}

τ [-]: -2.000 (Grenze)



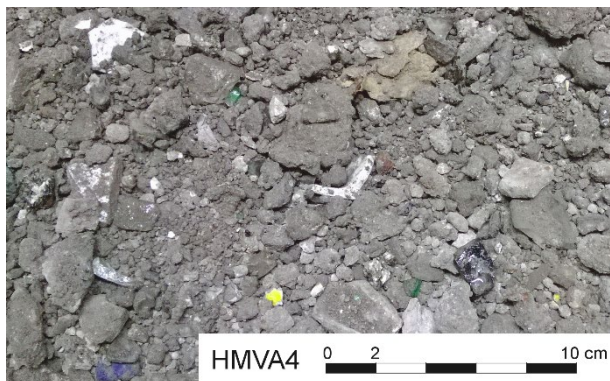
Hausmüllverbrennungsasche 3 (HMVA3)

Verdunstungsversuche



Hausmüllverbrennungsasche 4 (HMVA4)

Materialcharakterisierung



Kurzbeschreibung

Hausmüllverbrennungsasche, 0/32 mm
Herkunft: n.v.

Körnung nach DIN 18123

Ton und Schluff [Masse-%]: 14
Sand: [Masse-%]: 36
Grobkorn [Masse-%]: 50
Ungleichförmigkeitsgrad: 4

Klassifikation nach DIN 18196 und DIN 4220

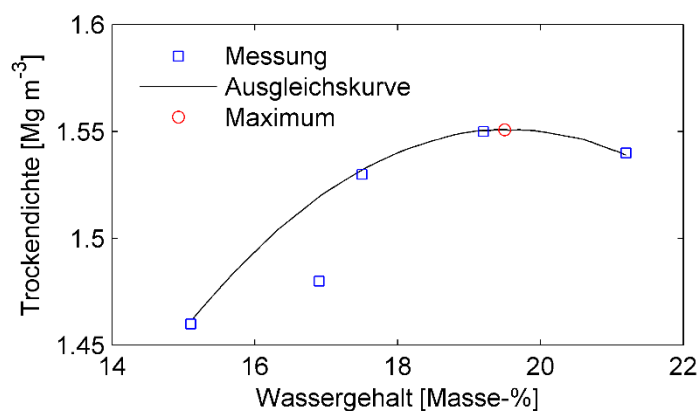
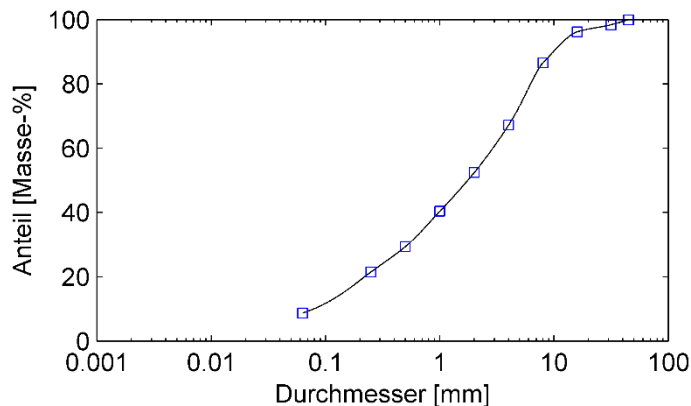
Bodengruppe: GU
Bodenart: n.v.

Eluat nach DIN 19529

Elektrische Leitfähigkeit [mS cm^{-1}]: 5.7
pH-Wert: 9.4

Proctorversuche nach DIN 18127

Proctordichte [Mg m^{-3}]: 1.55
Optimaler Wassergehalt [Masse-%]: 19.6
Verdichtungsgrad: 1.00
Trockendichte [Mg m^{-3}]: 1.55
Korndichte [Mg m^{-3}]: 2.34

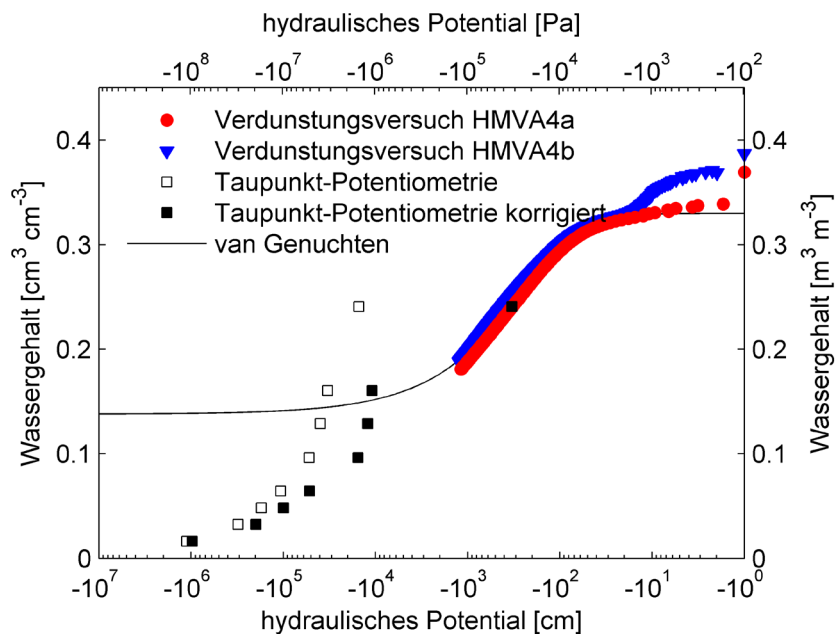


Wassergehalt und hyd. Leitfähigkeit bei Sättigung

Porosität [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.338
Wassergehalt [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.369 (HMVA4a)
0.387 (HMVA4b)
hyd. Leitfähigkeit (20°C) [m s^{-1}]: 6.4×10^{-5}

Hausmüllverbrennungsasche 4 (HMVA4)

Ermittelte hydraulische Eigenschaften



van Genuchten-Mualem

Parameter

θ_s [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.330

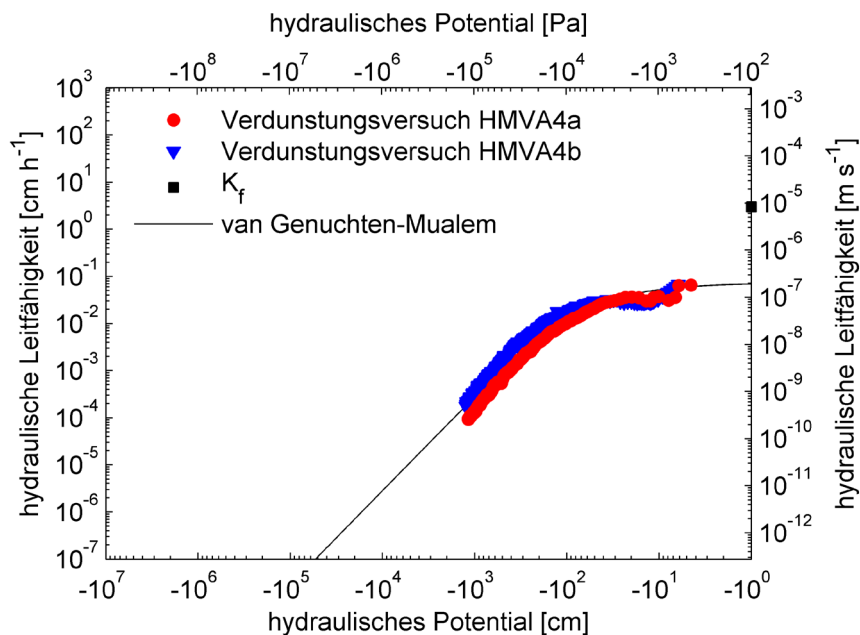
θ_r [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.138

α [m^{-1}]: 0.000063

n [-]: 1.630

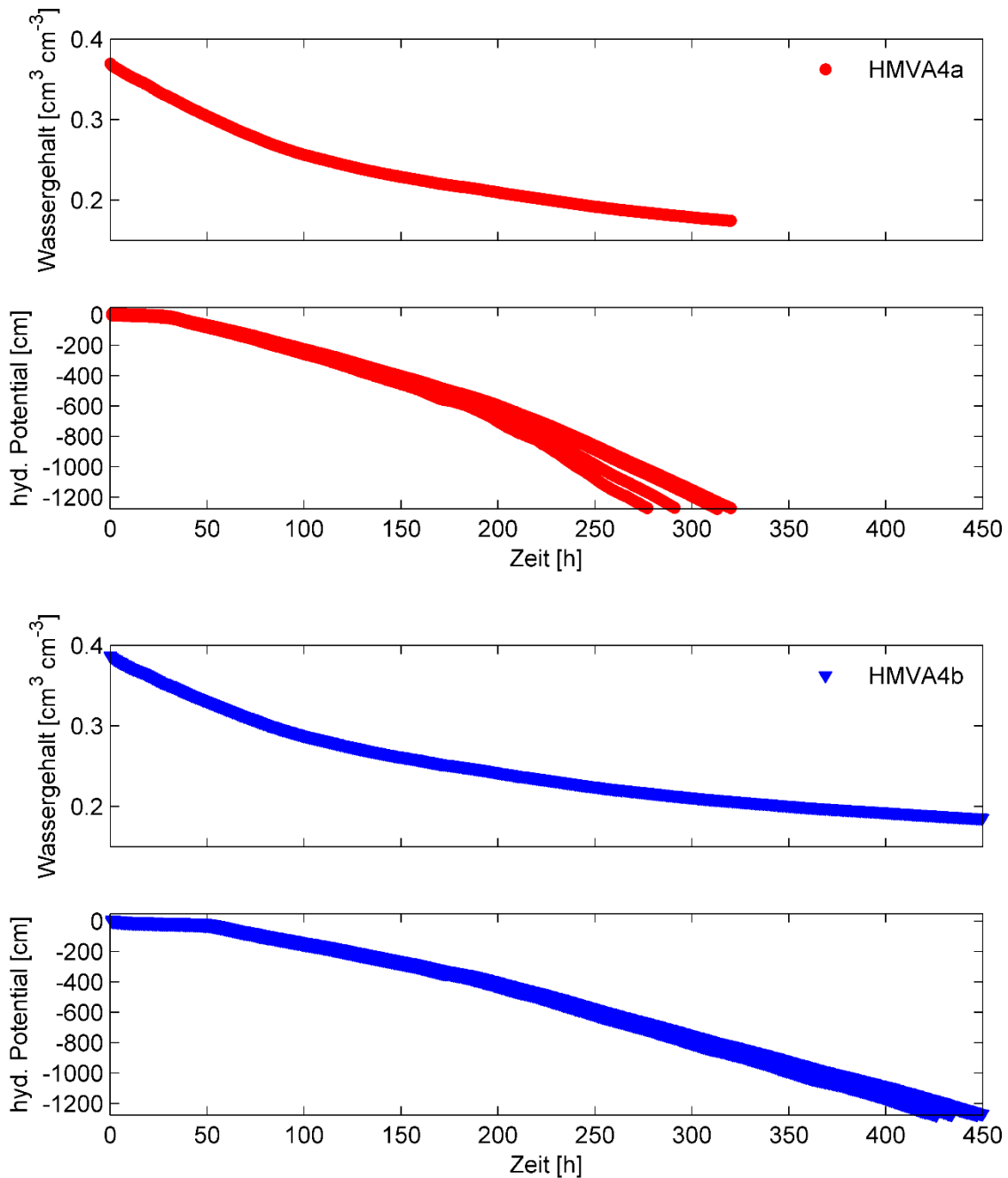
K_f [m s^{-1}]: 2.11×10^{-7}

τ [-]: -2.000 (Grenze)



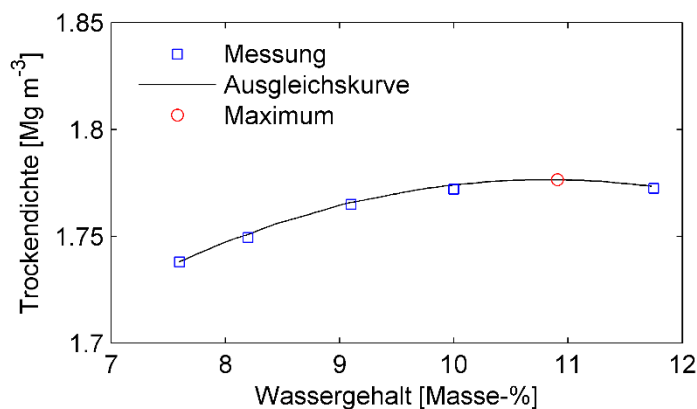
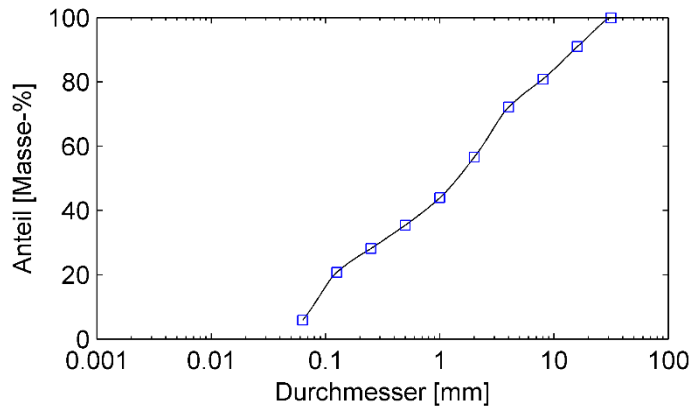
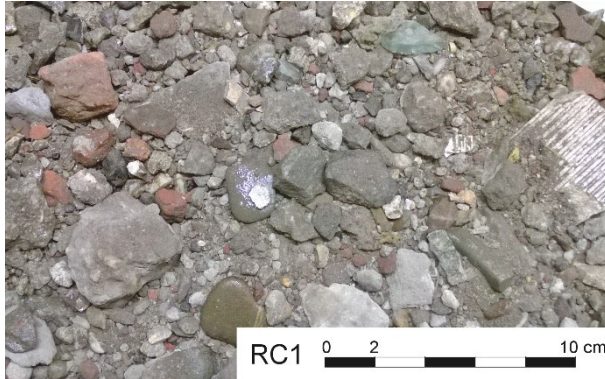
Hausmüllverbrennungsasche 4 (HMVA4)

Verdunstungsversuche



Recyclingmaterial 1 (RC1)

Materialcharakterisierung



Kurzbeschreibung

Praxisgemisch, 0/32 mm

Herkunft: RC-Anlage, n.v.

Körnung nach DIN 18123

Ton und Schluff [Masse-%]: 6

Sand: [Masse-%]: 51

Grobkorn [Masse-%]: 43

Ungleichförmigkeitsgrad: 31

Klassifikation nach DIN 18196

und DIN 4220

Bodengruppe: GU

Bodenart: n.v.

Eluat nach DIN 19529

Elektrische Leitfähigkeit [mS cm⁻¹]: 2.4

pH-Wert: 11.0

Proctorversuche nach DIN 18127

Proctordichte [Mg m⁻³]: 1.78

Optimaler Wassergehalt [Masse-%]: 10.8

Verdichtungsgrad: 1.00

Trockendichte [Mg m⁻³]: 1.78

Korndichte [Mg m⁻³]: 2.49

Wassergehalt und hyd. Leitfähigkeit

bei Sättigung

Porosität [m³ m⁻³]: 0.285

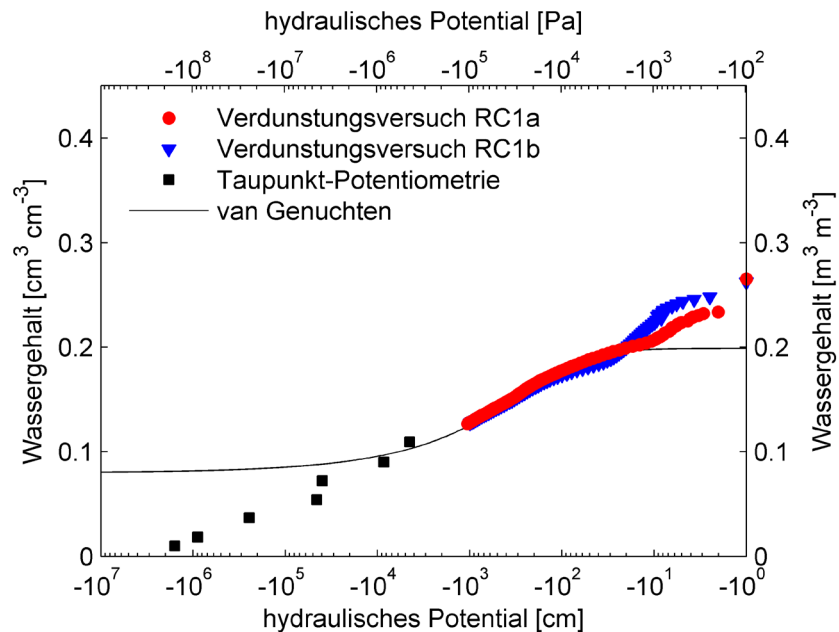
Wassergehalt [m³ m⁻³]: 0.265 (RC1a)

0.262 (RC1b)

hyd. Leitfähigkeit (20°C) [m s⁻¹]: 1.8×10⁻⁴

Recyclingmaterial 1 (RC1)

Ermittelte hydraulische Eigenschaften



van Genuchten-Mualem

Parameter

θ_s [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.199

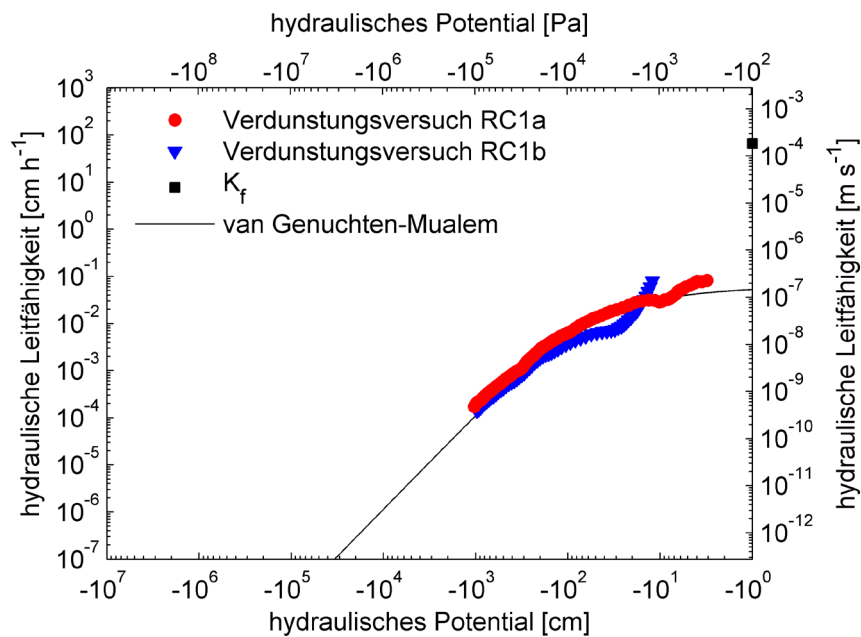
r [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.080

α [m^{-1}]: 0.000076

n [-]: 1.467

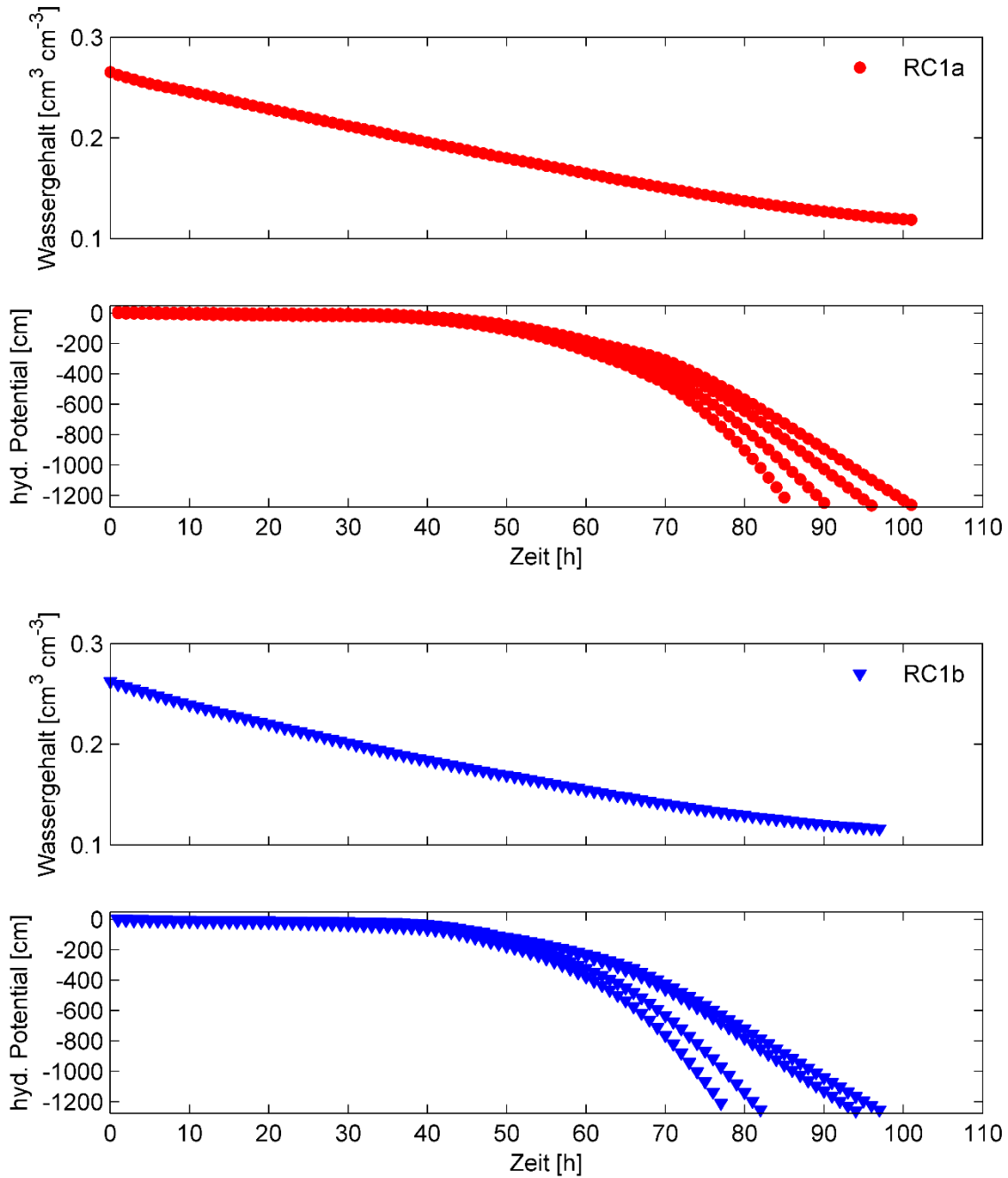
K_f [m s^{-1}]: 1.83×10^{-7}

τ [-]: -2.000 (Grenze)



Recyclingmaterial 1 (RC1)

Verdunstungsversuche



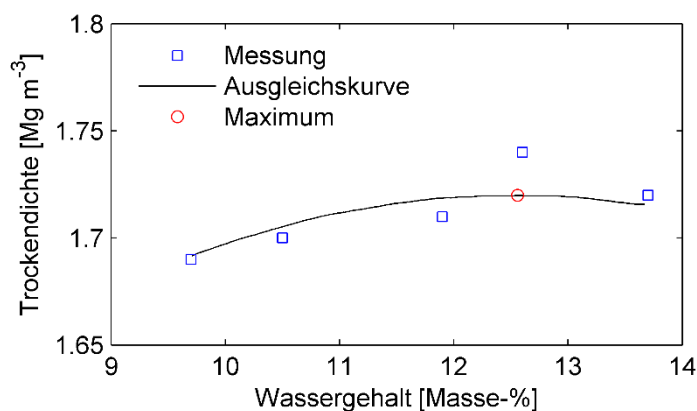
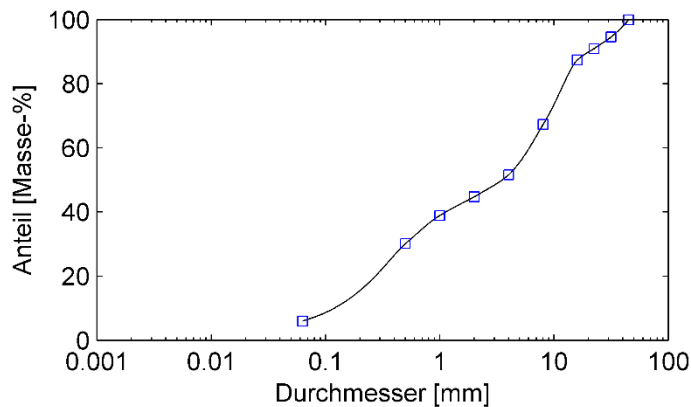
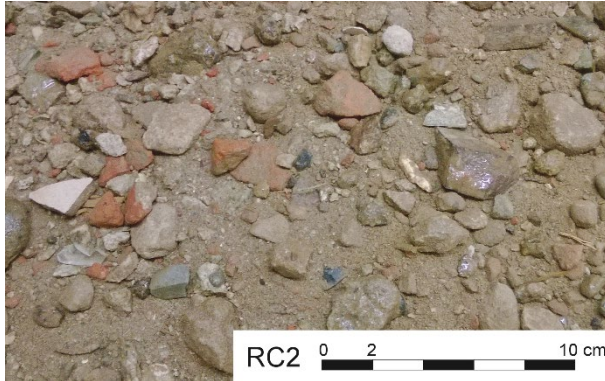
Recyclingmaterial 1 (RC1)

Stoffliche Kennzeichnung nach TP Gestein-StB Teil 3.1.5

Schwimmendes Material	[cm ³ kg ⁻¹]	FL	5.3
Nicht schwimmende Fremdstoffe wie Gummi, Kunststoffe, Textilien, Pappe und Papier	[Masse-%]	X	0.3
Eisen und nichteisenhaltige Metalle	[Masse-%]	X _i	0.0
Beton, Betonprodukte, Mauerstein aus Beton, zementgebundene Gesteinskörnung	[Masse-%]	R _c	64.5
Natürliche und industriell hergestellte Gesteinskörnung	[Masse-%]	R _u	12.9
Klinker, Ziegel und Steinzeug	[Masse-%]	R _b	14.4
Kalksandstein, Mörtel und ähnliche Stoffe	[Masse-%]	R _{bk}	2.7
Mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe, nicht schwimmender Porenbeton und Bims	[Masse-%]	R _{bm}	0.3
Asphaltgranulat	[Masse-%]	R _a	4.3
Glas	[Masse-%]	R _g	0.6
Gipshaltige Baustoffe	[Masse-%]	R _y	0.0

Recyclingmaterial 2 (RC2)

Materialcharakterisierung



Kurzbeschreibung

Praxisgemisch, 0/32 mm
Herkunft: RC-Anlage, n.v.

Körnung nach DIN 18123

Ton und Schluff [Masse-%]: 6
Sand: [Masse-%]: 39
Grobkorn [Masse-%]: 55
Ungleichförmigkeitsgrad: 4

Klassifikation nach DIN 18196 und DIN 4220

Bodengruppe: SU
Bodenart: n.v.

Eluat nach DIN 19529

Elektrische Leitfähigkeit [mS cm^{-1}]: 2.4
pH-Wert: 10.0

Proctorversuche nach DIN 18127

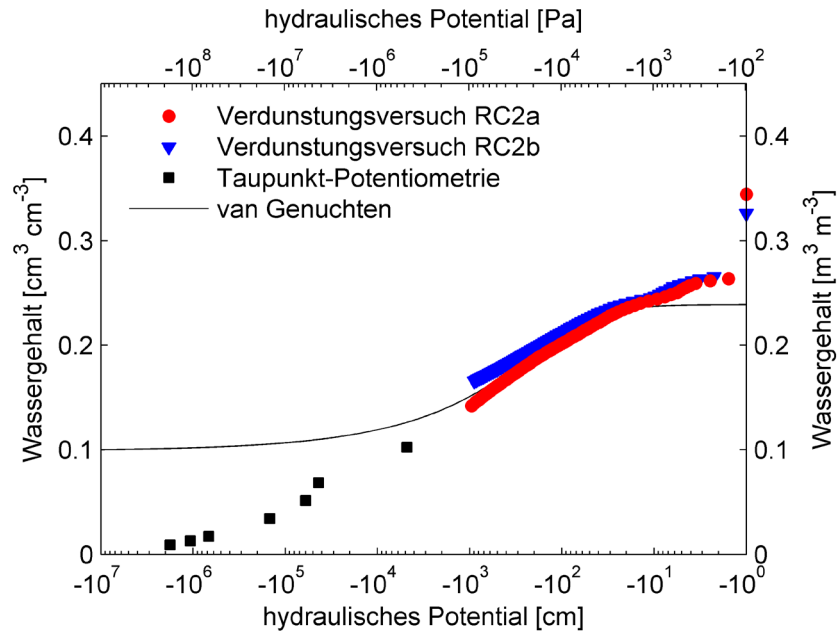
Proctordichte [Mg m^{-3}]: 1.72
Optimaler Wassergehalt [Masse-%]: 12.6
Verdichtungsgrad: 1.00
Trockendichte [Mg m^{-3}]: 1.72
Korndichte [Mg m^{-3}]: 2.43

Wassergehalt und hyd. Leitfähigkeit bei Sättigung

Porosität [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.292
Wassergehalt [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.344 (RC2a)
0.326 (RC2b)
hyd. Leitfähigkeit (20°C) [m s^{-1}]: 1.8×10^{-6}

Recyclingmaterial 2 (RC2)

Ermittelte hydraulische Eigenschaften



van Genuchten-Mualem

Parameter

θ_s [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.239

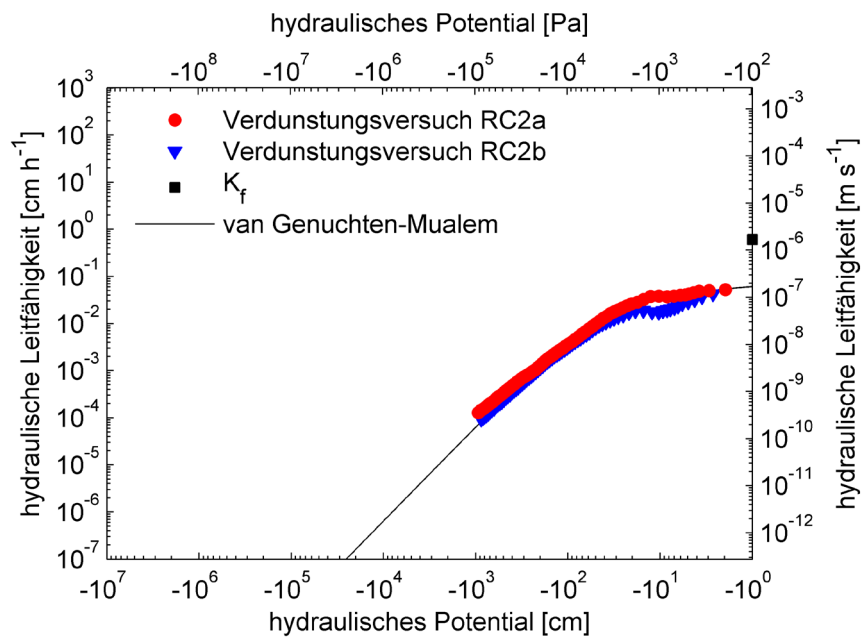
θ_r [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.099

α [m^{-1}]: 0.000106

n [-]: 1.415

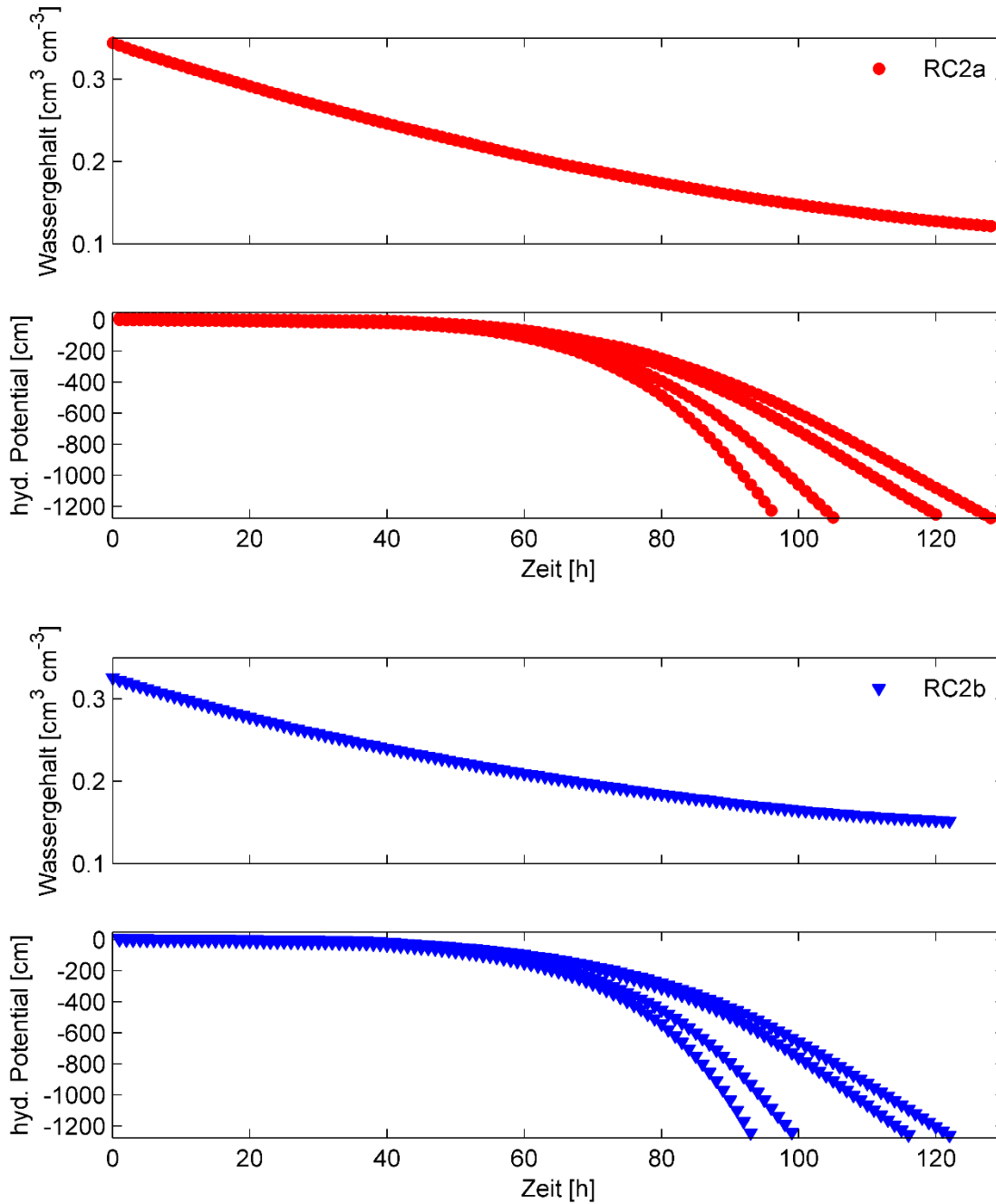
K_f [m s^{-1}]: 2.36×10^{-7}

τ [-]: -2.000 (Grenze)



Recyclingmaterial 2 (RC2)

Verdunstungsversuche



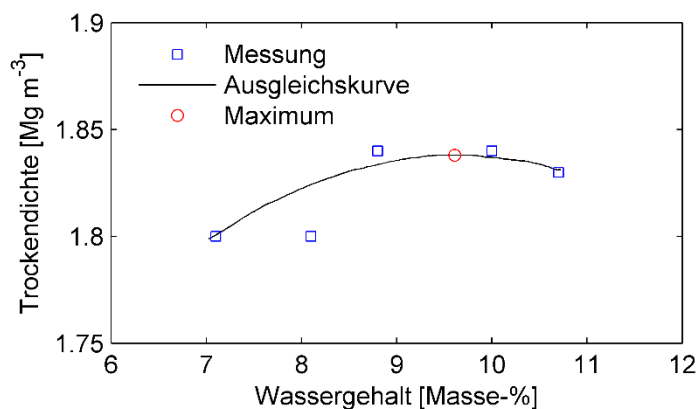
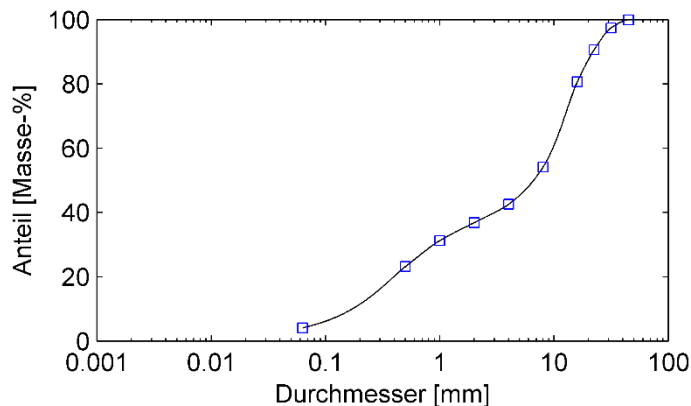
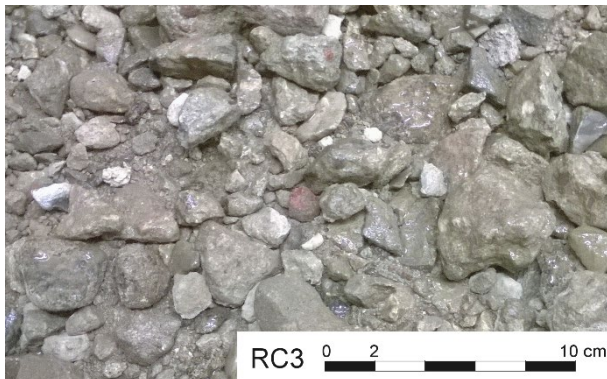
Recyclingmaterial 2 (RC2)

Stoffliche Kennzeichnung nach TP Gestein-StB Teil 3.1.5

Schwimmendes Material	[cm ³ kg ⁻¹]	FL	6.7
Nicht schwimmende Fremdstoffe wie Gummi, Kunststoffe, Textilien, Pappe und Papier	[Masse-%]	X	0.2
Eisen und nichteisenhaltige Metalle	[Masse-%]	X _i	0.1
Beton, Betonprodukte, Mauerstein aus Beton, zementgebundene Gesteinskörnung	[Masse-%]	R _c	52.4
Natürliche und industriell hergestellte Gesteinskörnung	[Masse-%]	R _u	10.4
Klinker, Ziegel und Steinzeug	[Masse-%]	R _b	17.3
Kalksandstein, Mörtel und ähnliche Stoffe	[Masse-%]	R _{bk}	18.7
Mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe, nicht schwimmender Porenbeton und Bims	[Masse-%]	R _{bm}	0.3
Asphaltgranulat	[Masse-%]	R _a	0.0
Glas	[Masse-%]	R _g	0.5
Gipshaltige Baustoffe	[Masse-%]	R _y	0.1

Recyclingmaterial 3 (RC3)

Materialcharakterisierung



Kurzbeschreibung

Reiner Betonbruch, 0/32 mm
Herkunft: RC-Anlage, n.v.

Körnung nach DIN 18123

Ton und Schluff [Masse-%]: 4
Sand: [Masse-%]: 33
Grobkorn [Masse-%]: 63
Ungleichförmigkeitsgrad: 50.0

Klassifikation nach DIN 18196 und DIN 4220

Bodengruppe: GW
Bodenart: n.v.

Eluat nach DIN 19529

Elektrische Leitfähigkeit [mS cm⁻¹]: 1.8
pH-Wert: 11.4

Proctorversuche nach DIN 18127

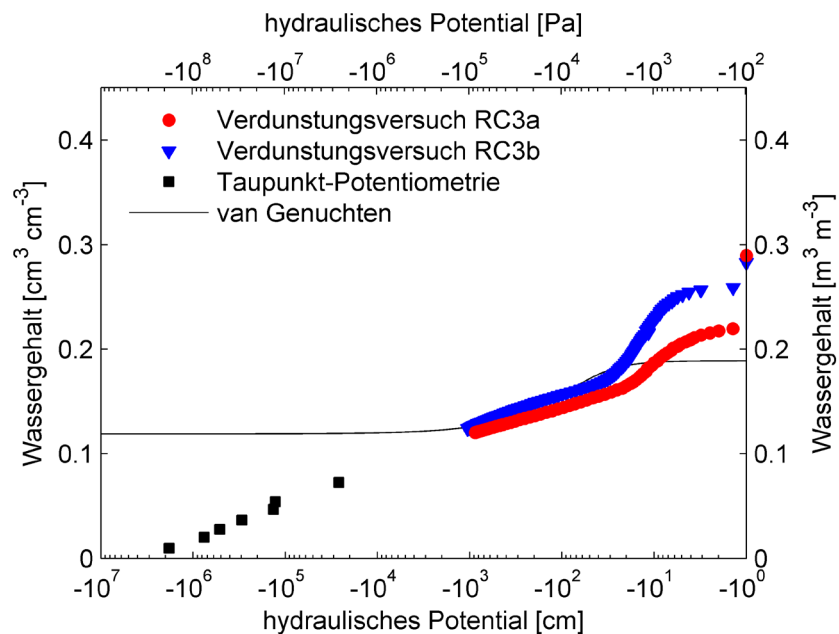
Proctordichte [Mg m⁻³]: 1.84
Optimaler Wassergehalt [Masse-%]: 9.6
Verdichtungsgrad: 1.00
Trockendichte [Mg m⁻³]: 1.84
Korndichte [Mg m⁻³]: 2.48

Wassergehalt und hyd. Leitfähigkeit bei Sättigung

Porosität [m³ m⁻³]: 0.258
Wassergehalt [m³ m⁻³]: 0.290 (RC3a)
0.283 (RC3b)
hyd. Leitfähigkeit (20°C) [m s⁻¹]: 1.6×10⁻⁵

Recyclingmaterial 3 (RC3)

Ermittelte hydraulische Eigenschaften



van Genuchten-Mualem

Parameter

θ_s [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.189

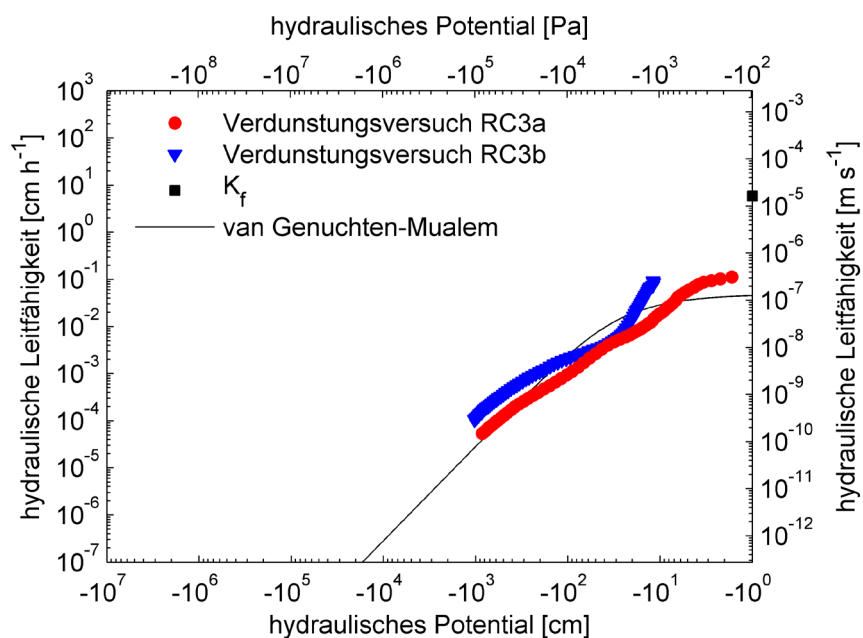
θ_r [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.119

α [m^{-1}]: 0.000185

n [-]: 1.802

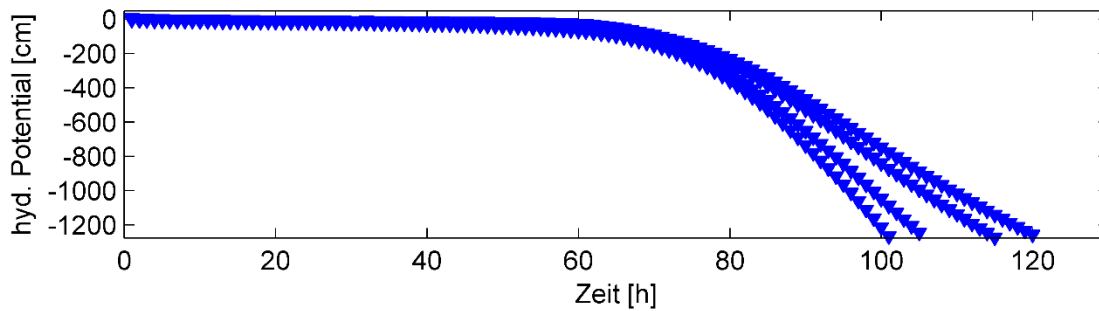
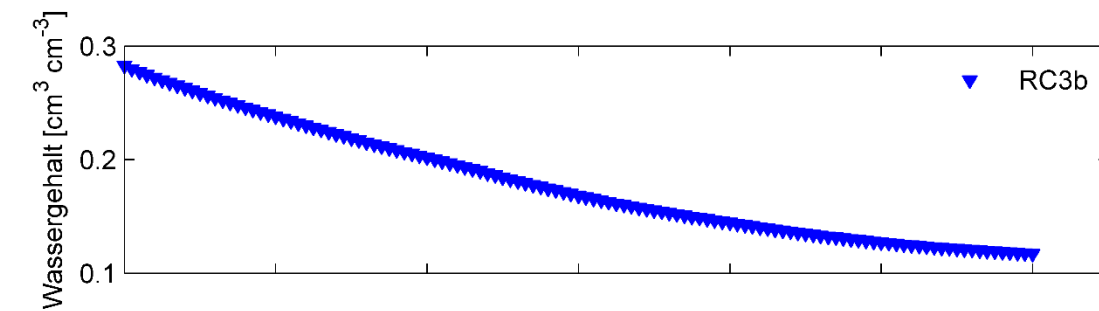
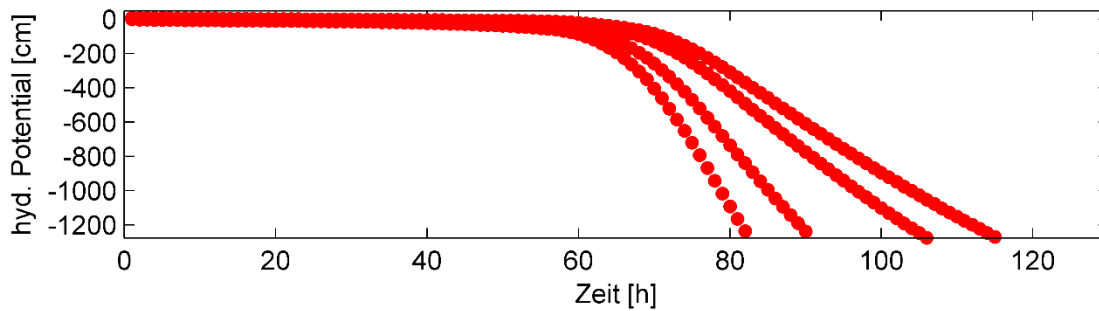
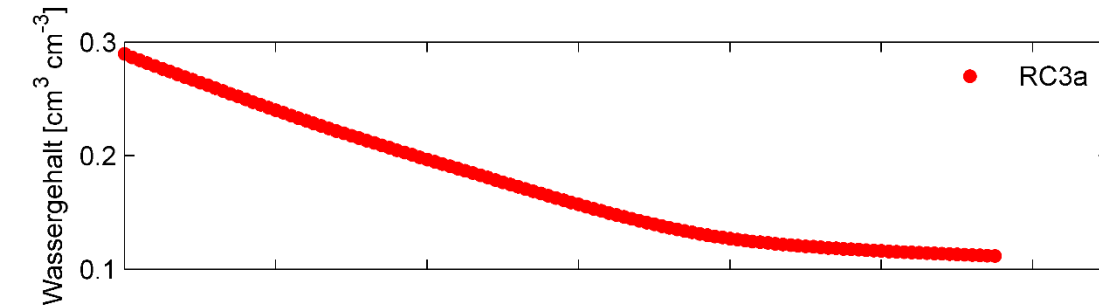
K_f [m s^{-1}]: 1.38×10^{-7}

τ [-]: -2.000 (Grenze)



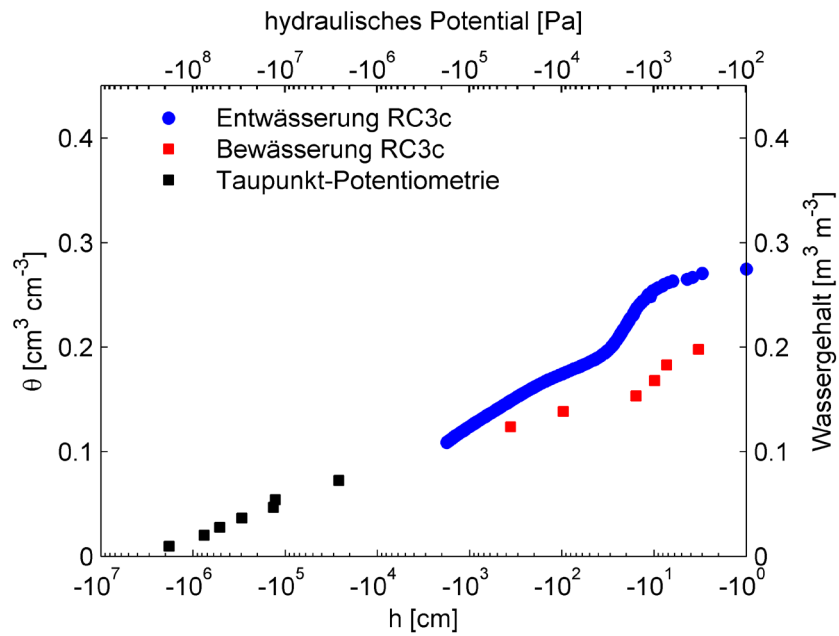
Recyclingmaterial 3 (RC3)

Verdunstungsversuche



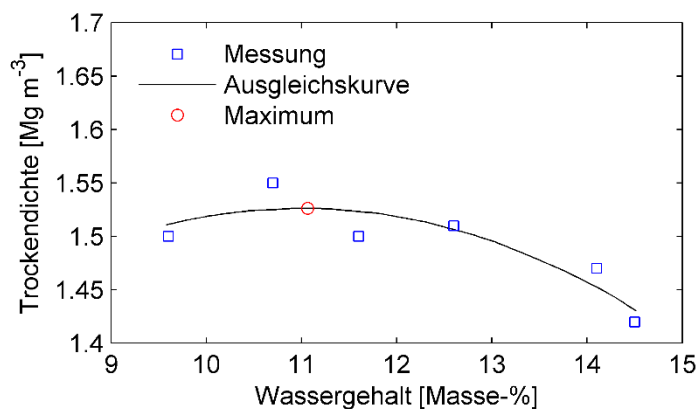
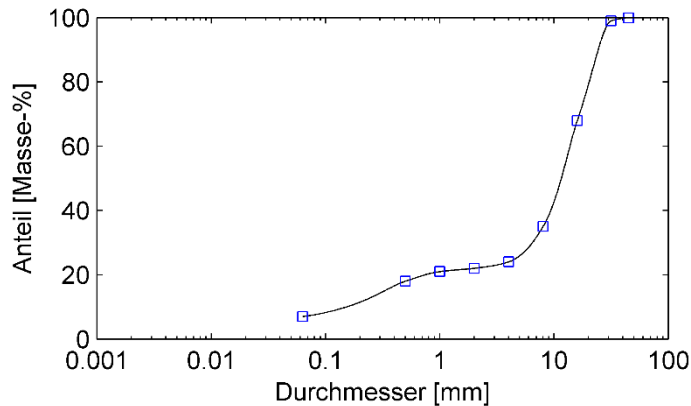
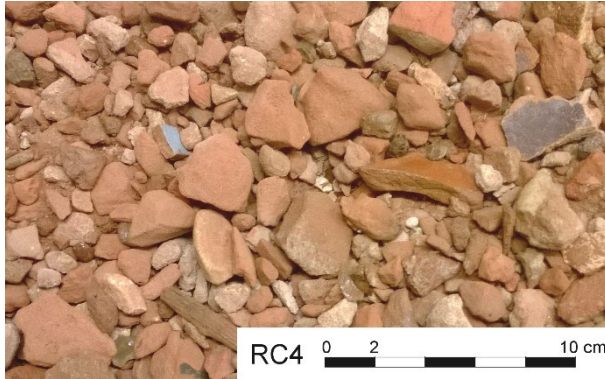
Recyclingmaterial 3 (RC3)

Ermittelte Hysterese



Recyclingmaterial 4 (RC4)

Materialcharakterisierung



Kurzbeschreibung

Reiner Ziegelbruch, 0/32 mm
Herkunft: RC-Anlage, n.v.

Körnung nach DIN 18123

Ton und Schluff [Masse-%]: 7
Sand: [Masse-%]: 15
Grobkorn [Masse-%]: 78
Ungleichförmigkeitsgrad: 53

Klassifikation nach DIN 18196 und DIN 4220

Bodengruppe: GU
Bodenart: n.v.

Eluat nach DIN 19529

Elektrische Leitfähigkeit [mS cm⁻¹]: 2.7
pH-Wert: 8.9

Proctorversuche nach DIN 18127

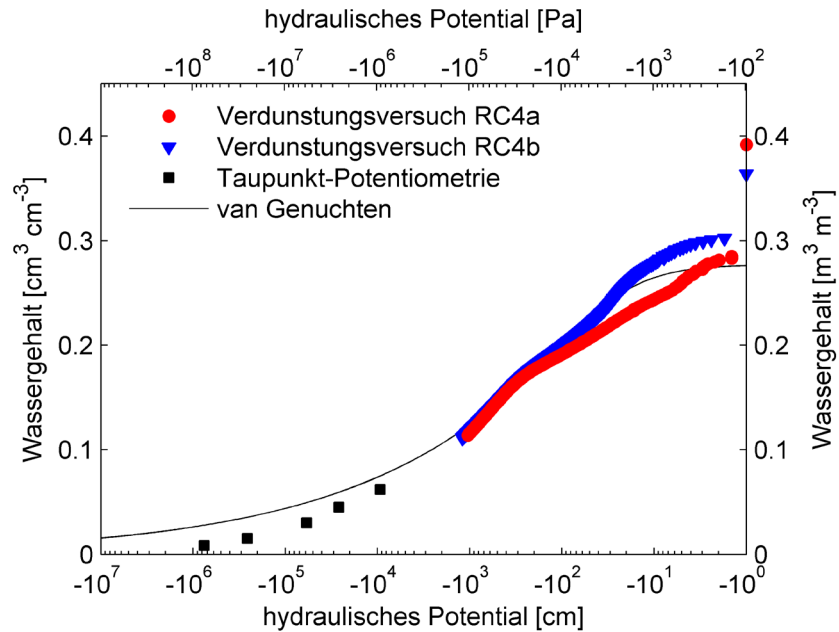
Proctordichte [Mg m⁻³]: 1.53
Optimaler Wassergehalt [Masse-%]: 11.0
Verdichtungsgrad: 0.98
Trockendichte [Mg m⁻³]: 1.50
Korndichte [Mg m⁻³]: 2.39

Wassergehalt und hyd. Leitfähigkeit bei Sättigung

Porosität [m³ m⁻³]: 0.372
Wassergehalt [m³ m⁻³]: 0.392 (RC4a)
0.364 (RC4b)
hyd. Leitfähigkeit (20°C) [m s⁻¹]: 6.8×10⁻⁴

Recyclingmaterial 4 (RC4)

Ermittelte hydraulische Eigenschaften



van Genuchten-Mualem

Parameter

θ_s [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.277

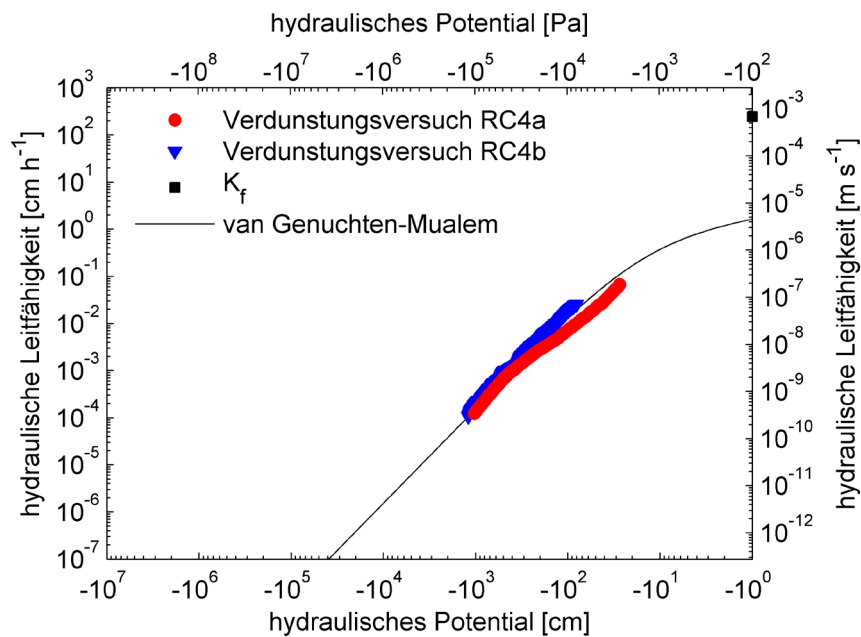
θ_r [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.000

α [m^{-1}]: 0.0355

n [-]: 1.225

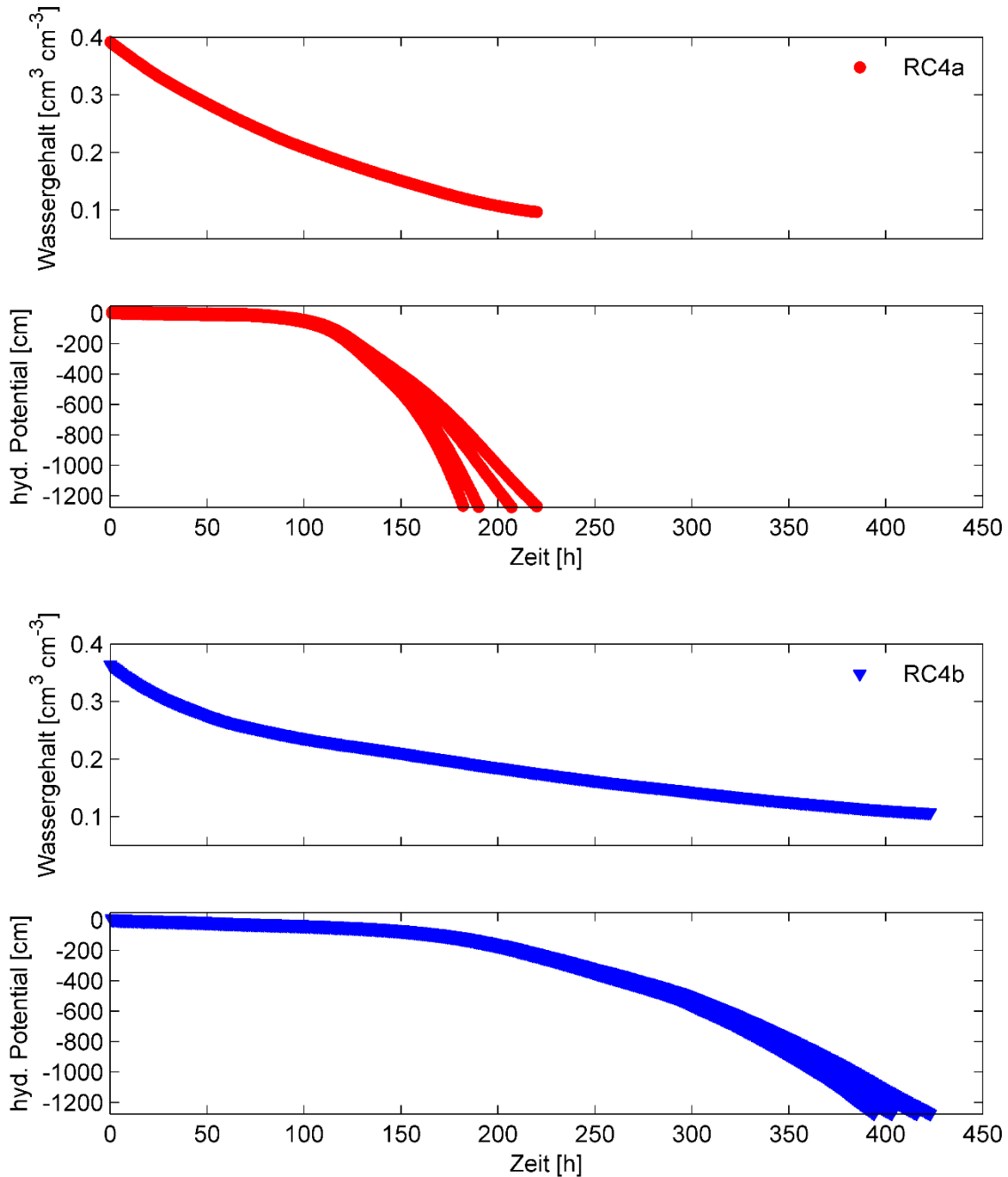
K_f [m s^{-1}]: 1.61×10^{-5}

τ [-]: -2.000 (Grenze)



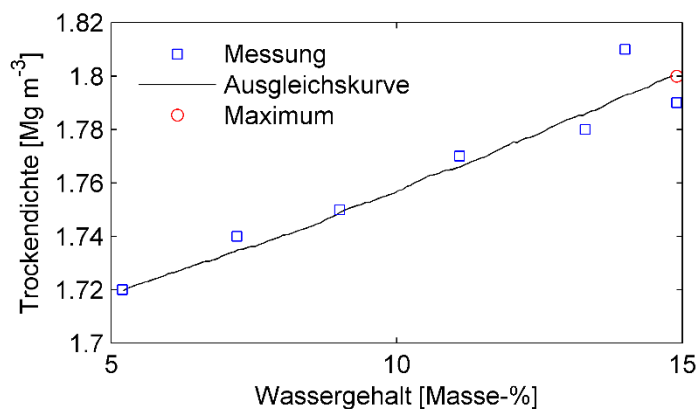
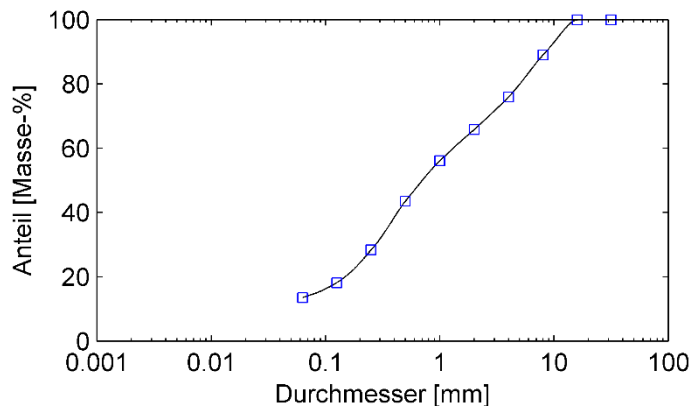
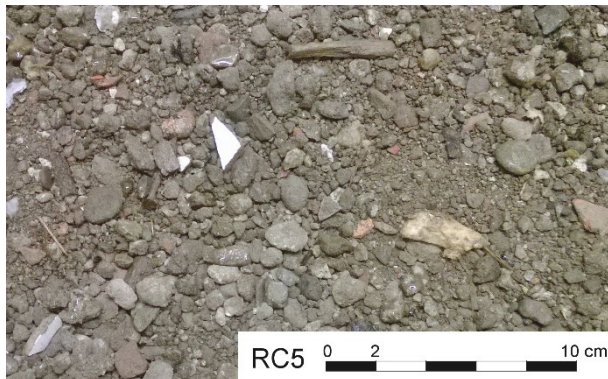
Recyclingmaterial 4 (RC4)

Verdunstungsversuche



Recyclingmaterial 5 (RC5)

Materialcharakterisierung



Kurzbeschreibung

Siebmaterial, 0/10 mm

Herkunft: RC-Anlage, Essen

Körnung nach DIN 18123

Ton und Schluff [Masse-%]: 13

Sand: [Masse-%]: 52

Grobkorn [Masse-%]: 35

Ungleichförmigkeitsgrad: n.v.

Klassifikation nach DIN 18196

und DIN 4220

Bodengruppe: GU

Bodenart: n.v.

Eluat nach DIN 19529

Elektrische Leitfähigkeit [mS cm⁻¹]: 3.3

pH-Wert: 10.6

Proctorversuche nach DIN 18127

Proctordichte [Mg m⁻³]: 1.80

Optimaler Wassergehalt [Masse-%]: 14.9

Verdichtungsgrad: 0.98

Trockendichte [Mg m⁻³]: 1.76

Korndichte [Mg m⁻³]: 2.57

Wassergehalt und hyd. Leitfähigkeit bei Sättigung

Porosität [m³ m⁻³]: 0.315

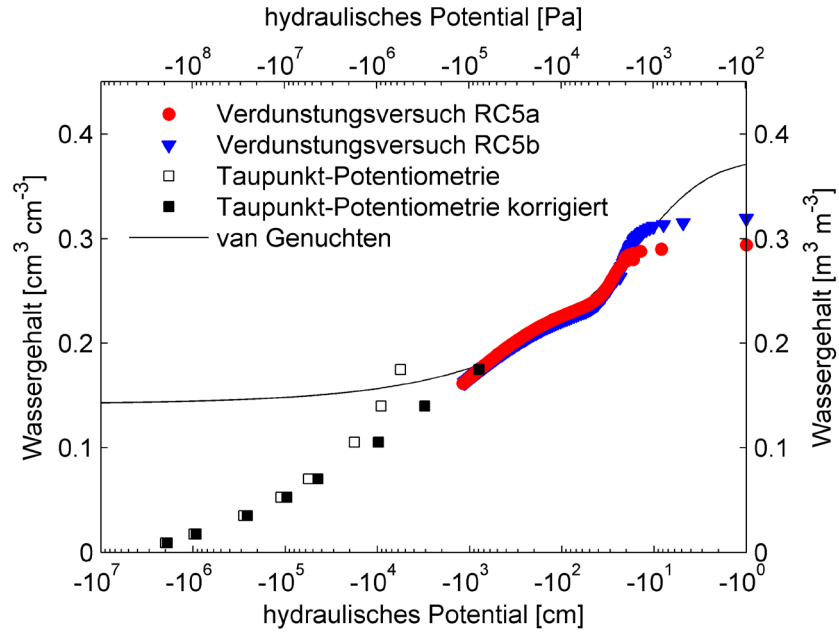
Wassergehalt [m³ m⁻³]: 0.294 (RC5a)

0.319 (RC5b)

hyd. Leitfähigkeit (20°C) [m s⁻¹]: 1.2×10⁻⁶

Recyclingmaterial 5 (RC5)

Ermittelte hydraulische Eigenschaften



van Genuchten-Mualem

Parameter

ϑ_s [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.377

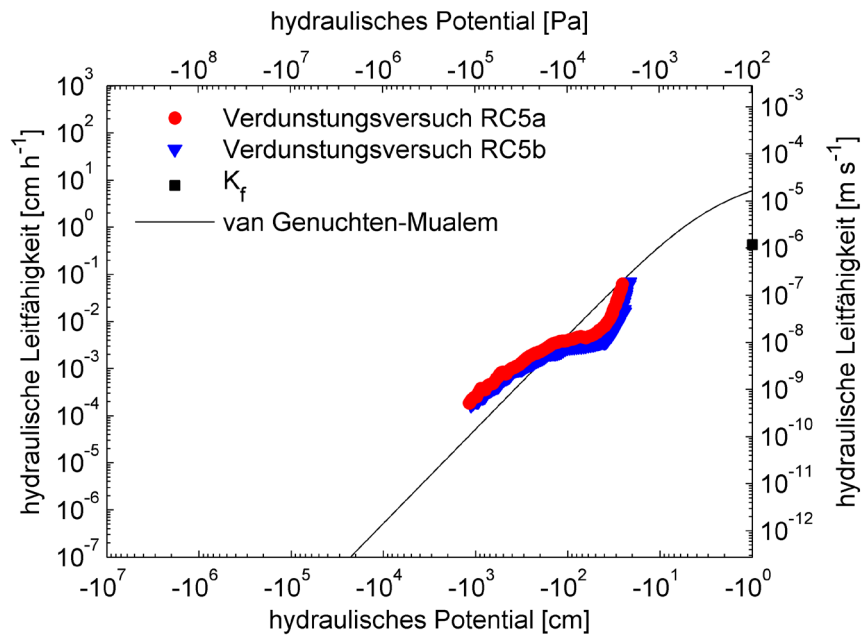
ϑ_r [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.142

α [m^{-1}]: 0.001866

n [-]: 1.368

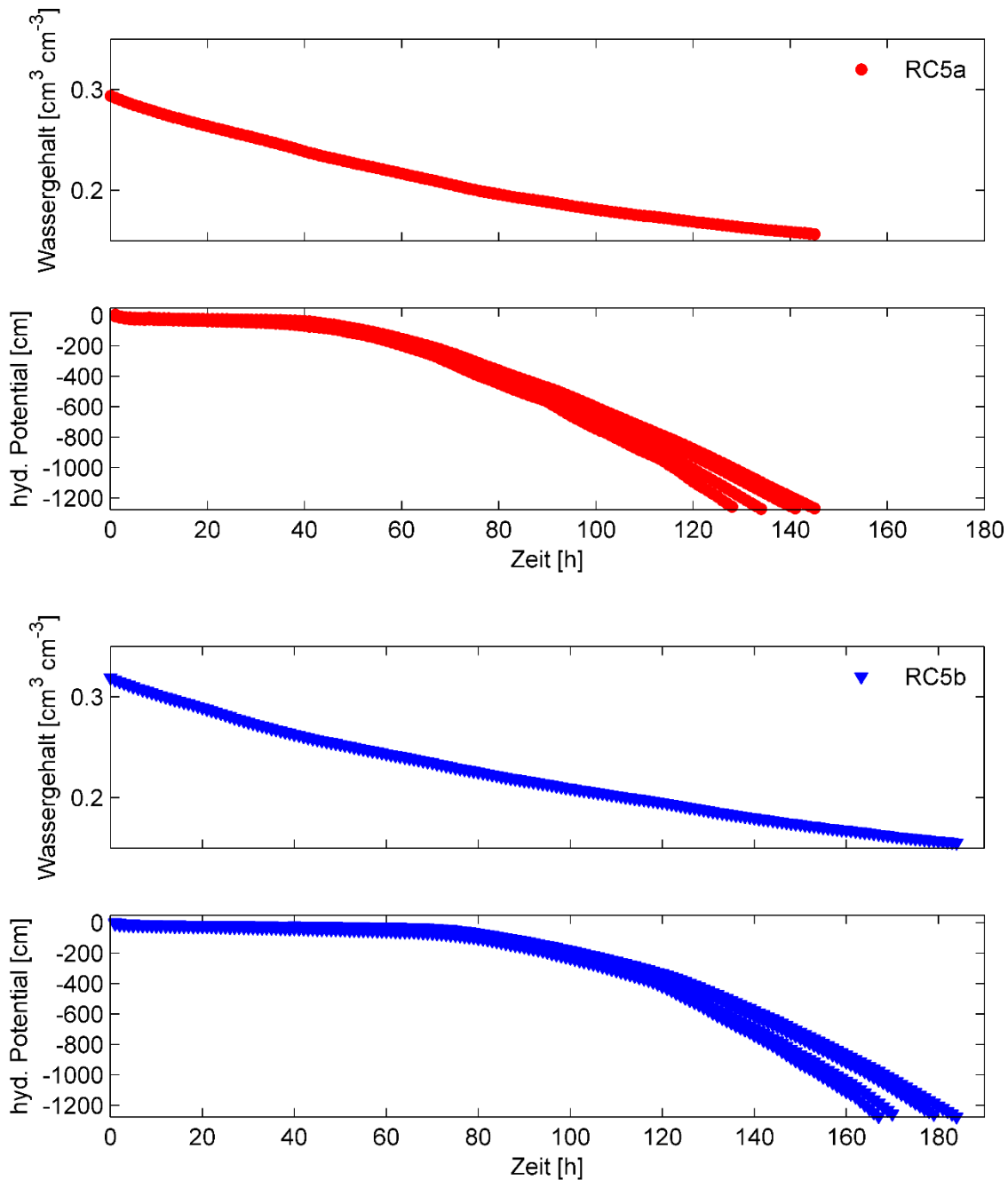
K_f [m s^{-1}]: 7.03×10^{-5}

τ [-]: -2.000 (Grenze)



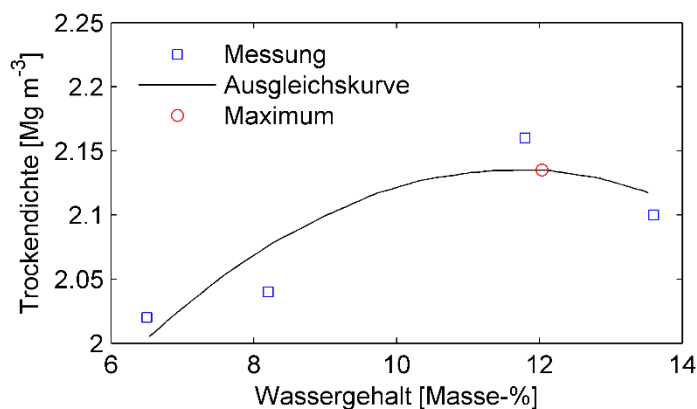
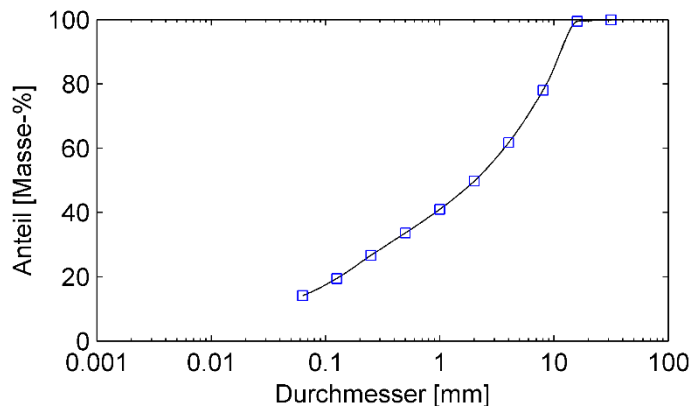
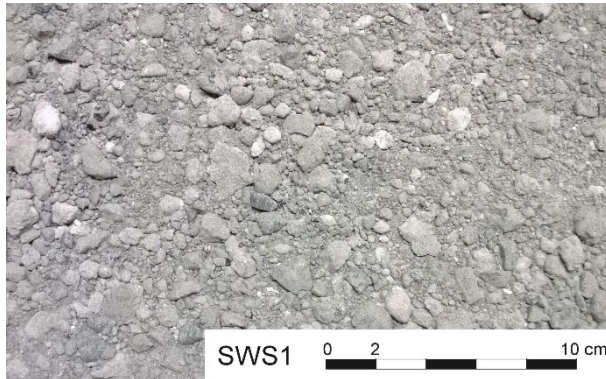
Recyclingmaterial 5 (RC5)

Verdunstungsversuche



Stahlwerksschlacke (SWS)

Materialcharakterisierung



Kurzbeschreibung

Stahlwerksschlacke

Herkunft: Edelstahlherzeugung, Krefeld

Körnung nach DIN 18123

Ton und Schluff [Masse-%]: 14

Sand: [Masse-%]: 36

Grobkorn [Masse-%]: 50

Ungleichförmigkeitsgrad: n.v.

Klassifikation nach DIN 18196

und DIN 4220

Bodengruppe: GU

Bodenart: n.v.

Eluat nach DIN 19529

Elektrische Leitfähigkeit [mS cm⁻¹]: 8.1

pH-Wert: 12.5

Proctorversuche nach DIN 18127

Proctordichte [Mg m⁻³]: 2.13

Optimaler Wassergehalt [Masse-%]: 11.7

Verdichtungsgrad: 1.00

Trockendichte [Mg m⁻³]: 2.13

Korndichte [Mg m⁻³]: 3.07

Wassergehalt und hyd. Leitfähigkeit bei Sättigung

Porosität [m³ m⁻³]: 0.306

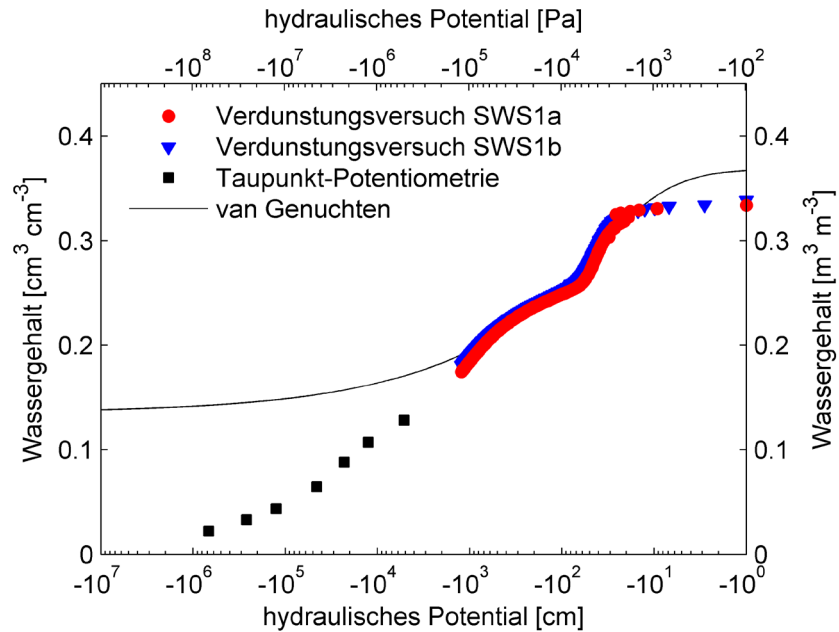
Wassergehalt [m³ m⁻³]: 0.334 (SWS1a)

0.339 (SWS1b)

hyd. Leitfähigkeit (20°C) [m s⁻¹]: 1.2×10⁻⁶

Stahlwerksschlacke (SWS)

Ermittelte hydraulische Eigenschaften



van Genuchten-Mualem

Parameter

θ_s [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.369

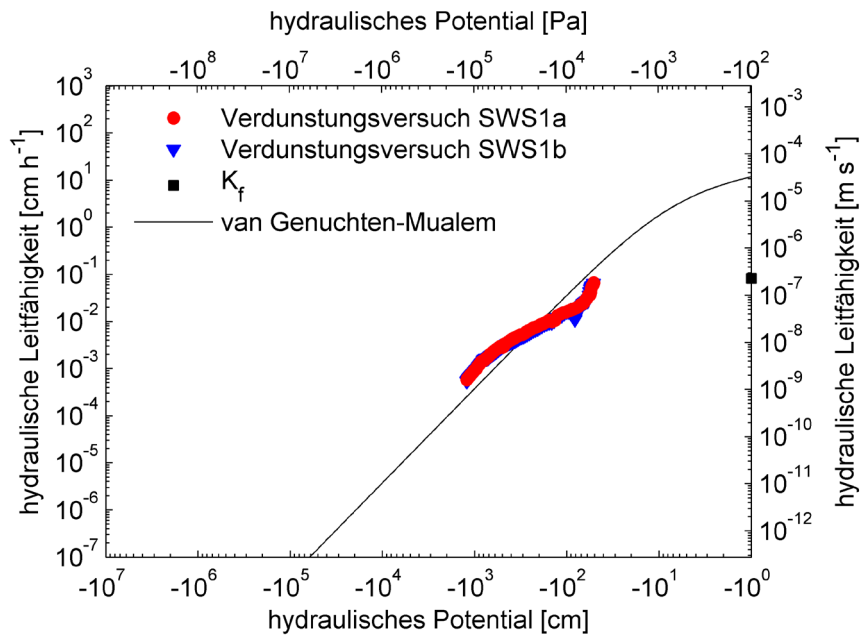
θ_r [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]: 0.135

α [m^{-1}]: 0.000747

n [-]: 1.316

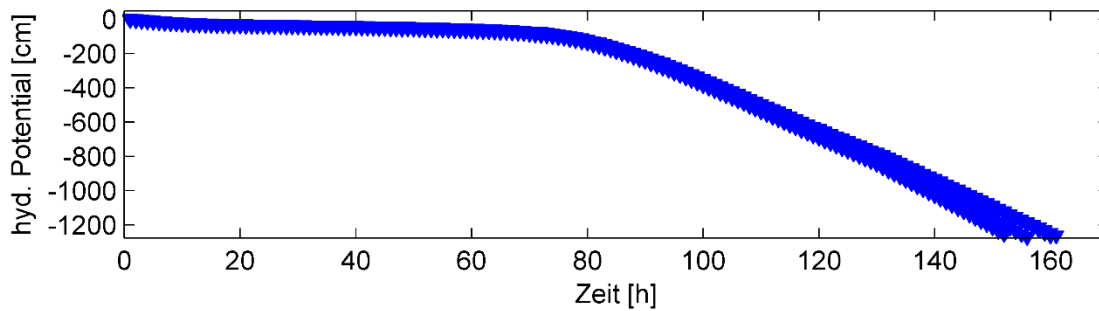
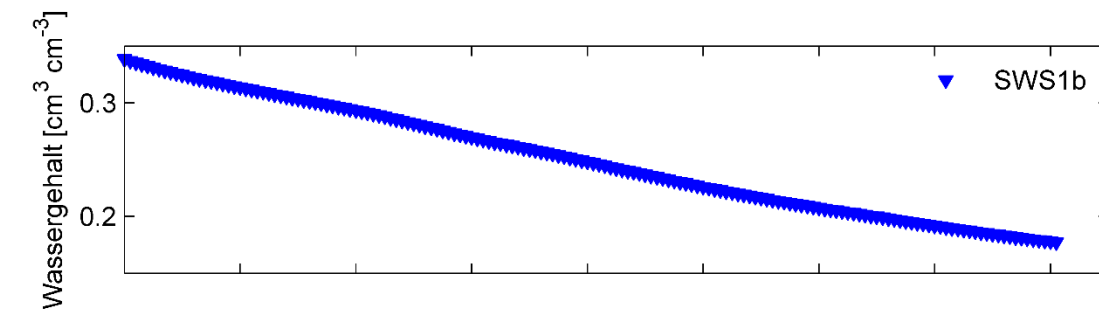
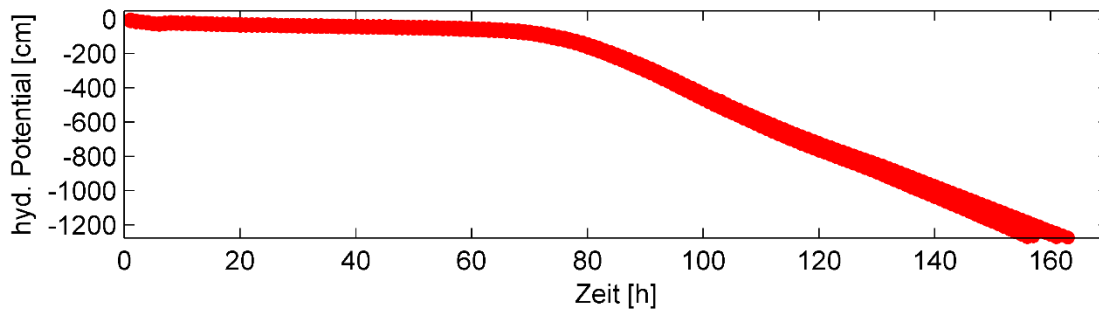
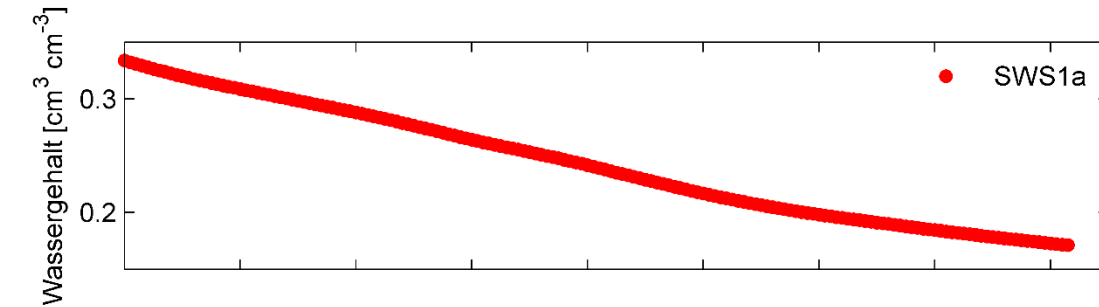
K_f [m s^{-1}]: 1.03×10^{-4}

τ [-]: -2.000 (Grenze)



Stahlwerksschlacke (SWS)

Verdunstungsversuche



4. Diskussion

4.1 Generelle Befunde

Unsere Messungen ergaben für die untersuchten Materialien präzise und verlässlich bestimmte hydraulische Funktionen über den gesamten Feuchtebereich. Die Streubreite der Paralleluntersuchungen war relativ gering. Die verbleibende Streuung zeigte aber, dass die Verwendung großer Proben und der damit verbundene experimentelle Aufwand mit der Kombination von drei Methoden (KSAT - Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit; EVA - Messung der Wasserretention und der ungesättigten Leitfähigkeit; WP4 – Messung der Wasserretention im trockenen Bereich) für die meisten Materialien gerechtfertigt war. Die zunächst vorgesehene zusätzliche Kombination mit Multi-Step-Ausfluss-Experimenten stellte sich als nicht praktikabel heraus. Der Verzicht auf die MSO-Experimente schmälert die Aussagekraft der erzielten Ergebnisse jedoch nur unwesentlich.

Als wesentliche Ergebnisse ergaben sich:

- 1) Die fünf untersuchten **Bodenmaterialien (BM)** besitzen hydraulische Eigenschaften, wie sie auch von natürlichen Böden erwartet werden können. Ein Unterschied im Vergleich zu natürlichen Böden liegt verdichtungsbedingt in der geringen Gesamtporosität und damit in geringen *gesättigten volumetrischen Wassergehalten*, welche zwischen 14 % (BM1) und 28 % (BM5) liegen. Demzufolge ist auch die gesamte Wasserkapazität der BM-Materialien gering und ihre Fähigkeit, z.B. Infiltrationsfronten abzupuffern, im Vergleich zu natürlichen Böden reduziert.

Für alle BM-Materialien liegen die Maxima der Porengrößenverteilung im Bereich zwischen pF 1 und pF 2, d.h. bei Äquivalentporenradien von 30 bis 300 μm . Für die gut sortierten Materialien (BM1, BM3) fallen die *Retentionskurven* in diesem Bereich steil ab, während dies für die BM mit größerem Feinkornanteil weniger steil erfolgt. Bei den ungleichförmigen BM-Materialien zeigt der Verlauf der Retentionskurve zudem eine schwach (BM2, BM5) bis erheblich (BM4) ausgeprägte Bimodalität des Porensystems an. Die Wassergehalte aller BM-Proben (wie überhaupt aller untersuchten Materialien) gehen bei zunehmender Austrocknung kontinuierlich zurück und erreichen zur Ofentrockenheit (pF 6,8) hin annähernd linear abfallend den Wert $\theta = 0$. Dieser physikalisch zwingende Befund verursacht erhebliche konzeptionelle Probleme beim Versuch, die Retentionskurven über den gesamten Feuchtebereich mit der Gleichung von van Genuchten zu beschreiben, weil dieses vom Konzept eines „Restwassergehaltes“ ausgeht.

Die *gesättigten Leitfähigkeiten* K_f der BM-Materialien sind für die gut sortierten Materialien mit Werten um 10^{-5} m s^{-1} als „hoch“ bis „sehr hoch“, für die Materialien mit höherem Feinkornanteil mit Werten um 10^{-7} m s^{-1} als „gering“ einzustufen (AG Boden, 2005, Tab. 80).

Die *ungesättigten Leitfähigkeiten* $K(h)$ fallen im Bereich der kapillaren Entwässerung der dominanten Porenbereiche alle in erwartbarer Weise steil ab; der Abfall wird bei weiterem Wasserverlust auf der $\log K(pF)$ -Darstellung flacher. Dies verursacht in der $\log K(pF)$ -Darstellung eine konkave Form der Leitfähigkeitskurve. Man kann somit annehmen, dass bei der Perkolation von Infiltrationswasser der hydraulische Zustand oft bei etwas pF 2 liegen wird.

Als singuläres Spezifikum ist für Material BM4 ein extrem flacher Verlauf der ungesättigten Leitfähigkeit im Feuchtebereich pF 2 bis 3 erkennbar. Dieser ungewöhnliche Befund würde in einer Einzelprobe als Hinweis auf einen Messfehler eingestuft werden, da er als Prozess schwer erklärbar ist. Der Befund tritt aber in beiden Parallelen ausschließlich für dieses Material auf, wobei die Parallelmessungen nicht zeitgleich und zudem unter verschiedenen Randbedingungen erfolgten. Wir haben derzeit keine schlüssige Erklärung für dieses Phänomen.

- 2) Die Messdaten der vier untersuchten **Hausmüllverbrennungsgaschen (HMVA)** zeigen Gemeinsamkeiten, welche sie von Bodenmaterialien unterscheiden. Die *Porositäten* sind trotz der sehr hohen Grobkorn-Anteile generell höher als für die untersuchten BM-Materialien, was auf eine geringere Verdichtbarkeit hinweist. Die *gesättigten Wassergehalte* liegen generell über 30%, mit Werten bis zu 43% (HMVA1). Drei der vier untersuchten HMVA zeigen eine ausgeprägte Makroporosität, welche sich in einem ausgeprägten Abfall des volumetrischen Wassergehalts von der Sättigung zum ungesättigten Zustand äußert (bis 5% Wasserverlust von Sättigung auf $h = -3 \text{ cm} \cong pF = 0,5$).

Der daran anschließende Verlauf der *Retentionsdaten* im gesamten ungesättigten Bereich ähnelt dem von Lehmen, d.h., die Entwässerung erfolgt ziemlich gleichmäßig über den gesamten pF -Bereich, wobei bei drei der vier untersuchten HMVA (Ausnahme: HMVA2) eine verstärkte Entwässerung im Bereich um pF 1 ($h = -10 \text{ cm}$) erkennbar ist, was zu einer Bimodalität der Retentionskurve führt.

Im Unterschied zu den BM-Daten schließen sich bei den HMVA die Messdaten der Taupunktmethode nicht nahtlos an die Daten der Verdunstungsmethode an. Wir erklären dies mit einer durch erhöhte Salzkonzentrationen verursachten osmotischen Komponente im Gesamtpotential (vgl. Kapitel 2.5). Die im Vergleich zu den anderen Materialien deutlich erhöhten elektrischen Leitfähigkeiten von 3.5 bis 7.0 mS cm^{-1} im Eluat nach DIN 19529 lassen diese Hypothese als plausibel erscheinen. Die Ergebnisabbildungen der HMVA in Kapitel 3 zeigen dementsprechend neben den originalen WP4-Messwerten (Gesamtpotential) zusätzlich empirisch korrigierte Werte für das Matrixpotential. Die zugrundeliegende Methodik wurde in Kapitel 2.5 ausgeführt.

Die *gesättigten Leitfähigkeiten* der HMVA sind mit Ausnahme des Materials HMVA3 mit Werten $> 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ als „sehr hoch“ zu klassifizieren (AG Boden, S. 355). Sie fallen beim Übergang zum ungesättigten Zustand unmittelbar um 2 bis 3 Größenordnungen ab. Dies bestätigt den Befund der Retentionskurven, welcher

für drei der Materialien eine ausgeprägte Makroporosität anzeigt. Das Material HMVA3 ist in der Hinsicht eine Ausnahme: es zeigt keine Makroporosität und hat zudem eine außerordentliche geringe gesättigte Wasserleitfähigkeit $< 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$, welche sogar unter den ermittelten ungesättigten Leitfähigkeitswerten liegt. Dies ist ein ungewöhnliches Phänomen, das sich eventuell durch eine einsetzende Aggregation des Materials im Zuge der ersten Austrocknung mit der Neubildung von Interaggregatporen erklären ließe. Ein solches Phänomen war uns bisher unbekannt und ließe weitere gezielte Untersuchungen zu Veränderungen des Materials als Folge von hydrodynamischen Prozessen und Alterung als lohnend erscheinen.

Generell fallen die *ungesättigten Leitfähigkeiten* aller HMVA-Materialien bei Auftragung gegen den pF -Wert im kapillaren Bereich ungewöhnlich flach ab. Dies steht im Kontrast zum Verhalten der BM-Materialien. Ein solch flacher Abfall ist nach unseren Erfahrungen für Böden eher ungewöhnlich. Es konnte außerdem ein Einfluss des osmotischen Potentials festgestellt werden (siehe RC5).

Als singuläres Spezifikum für Material HMVA1 zeigt sich im Verlauf der Retentionskurve zum Trockenen hin eine Konvergenz der Retentionskurve zum Wassergehalt $\theta = 0$ bei pF 6,2. Nach thermodynamischen Berechnungen müsste dies, wie bei allen Materialien beobachtet, zum Wert pF 6.8 erfolgen (Schneider und Goss, 2012). Wir haben für den bei HMVA1 gemessenen Verlauf keine Erklärung.

- 3) Die **Recyclingmaterialien (RC1 bis RC4)** zeichnen sich als Bruchmaterialien im Praxisgemisch (RC1, RC2) bzw. als reiner Beton-(RC3) und Ziegelbruch (RC4) durch hohe Massenanteile oberhalb der Feinbodengrenze (2 mm) aus (43 bis 78 %). Die Streuung der Wiederholungsmessungen war dementsprechend für diese Materialklasse am höchsten, liegt jedoch aufgrund der großen Proben noch in einem akzeptablen Rahmen.

Die *gesättigten volumetrischen Wassergehalte* dieser Materialien liegen bei rund 30 bis 40 %. Makroporosität ist für alle RC-Materialien deutlich ausgeprägt. Die Retentionskurven fallen im ungesättigten Bereich gleichmäßig, im Fall von Material RC 3 mit einer ausgeprägten Bimodalität über den gesamten pF -Bereich ab.

Die *gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten* ergaben für diese Materialklasse die höchsten Werte aller untersuchten Materialien, mit Spitzenwerten bis 10^{-3} m s^{-1} (RC 4). Die *hydraulischen Leitfähigkeitsverläufe* nehmen dementsprechend ähnlich wie bei den HMVA unmittelbar beim Übergang zum ungesättigten Bereich zunächst drastisch ab, mit bis zu 3 Größenordnungen (RC1, RC4), um dann im ungesättigten Bereich einigermaßen gleichmäßig mit ca. 1.5 Größenordnungen pro pF -Einheit weiter abzufallen.

- 4) Das **Recyclingmaterial 5** (RC5; Siebmaterial 0/10) sowie die **Stahlwerksschlacke** (SWS) sind in Hinblick auf ihre hydraulischen Eigenschaften vergleichbar, so dass sie gemeinsam als vierte Gruppe diskutiert werden können.

Die beiden Materialien verhalten sich ähnlich wie verdichtete lehmige oder tonige Sande. Die *gesättigten Wassergehalte* liegen bei rund 30 bis 33%, die *gesättigte Wasserleitfähigkeit* bei $K_f = 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$, es liegt keine Makroporosität vor, und die *Retentions- und Leitfähigkeitskurven* weisen eine ausgeprägte Bimodalität mit einem Maximum des strukturellen Porensystem bei etwa pF 1.5 auf.

Material RC5 weist ferner eine Besonderheit auf, die sich auch bei allen HMVA fand und dort diskutiert wurde: die Messdaten der Retentionskurve, welche mit der Taupunktmethode erhoben wurden, zeigen einen deutlichen Einfluss des osmotischen Potentials. In der Abbildung im Ergebnisteil sind deshalb zusätzlich korrigierte Daten gezeigt, wobei die Zuordnung der Wassergehaltswerte zum Matrixpotential analog zu den HMVA empirisch skaliert wurde (siehe Tab. 2).

4.2 Parametrische Beschreibung der ermittelten hydraulischen Eigenschaften

Materialübergreifend zeigte sich, dass die hydraulischen Eigenschaften der untersuchten Materialien durch das häufig verwendete van Genuchten/Mualem-Modell nicht hinreichend genau beschrieben werden können. Häufig vorkommende Befunde sind (i) erhebliche Anteile des Wassers, welches sich unter gesättigten Verhältnissen in großräumigen Porenraumanteilen („Makroporen“) und nicht vom Boden gebunden werden kann. Dies ist vermutlich durch Hohlräume in unmittelbarer Umgebung der kiesigen bzw. grusigen Kornanteile bedingt. Weitere häufig vorkommende Befunde sind zunächst sehr steil abstürzende, dann ungewöhnlich flach abfallende ungesättigte Leitfähigkeitsfunktionen, sowie ausgeprägte Einflüsse der Salze auf das osmotische Potential mit entsprechenden Auswirkungen auf die Kombination der zwei verwendeten Methoden zur Bestimmung von Retentionsdaten.

Es gibt somit vier Gründe, warum das van Genuchten/Mualem-Modell für keines der untersuchten Materialien vollständig geeignet ist:

1. Die van Genuchten-Retentionskurve approximiert in der Regel einen Wassergehalt größer Null im trockenen Bereich, der durch den sogenannten Residualwassergehalt θ_r ausgedrückt wird. Die Bedeutung dieses Residualwassergehalts ist in der Literatur umstritten. Verschiedentlich wurde versucht, ihn physikalisch zu deuten als Wassergehalt, bei dem die Flüssigwasserbewegung zum Stehen kommt. Jedoch ist der Grenzwert, ab dem kein Flüssigwassertransport mehr stattfindet, nicht klar definiert. Darüber hinaus ist der Residualwassergehalt in der Praxis eine Fitting-Größe, die stark vom Ausmaß verfügbarer Messdaten abhängt. Unsere Anpassungen des van Genuchten-Modells an die Daten aus der Verdunstungsmethode verdeutlichen dies. Die so ermittelten Kurven extrapolieren in keinem einzigen Fall zutreffend in den trockenen Bereich. Eine tiefere Diskussion dieser Problematik an dieser Stelle würde den Rahmen dieses Berichtes sprengen. Der interessierte Leser sei auf einen der jüngeren Übersichtsartikel verwiesen, z.B. Peters (2013) oder Durner et al. (2014).

2. Die Retentionsdaten der Hausmüllverbrennungssaschen und Recyclingmaterialien zeigen nahe Sättigung eine starke Erhöhung der Wassergehalte an. Das unimodale van Genuchten-Modell kann diese sogenannten Makroporen nicht abbilden. Hierfür wären semi-empirische Porengrößenverteilungsmodelle nötig, welche explizit Makroporen berücksichtigen. Näheres zur Problematik findet sich z.B. bei Jarvis (2007).
3. Die meisten Materialien zeigen weiterhin keine einfachen sigmoidal geformten Verläufe der Retentionskurve, sondern geschwungene Formen, welche mehrere Porengrößenmaxima anzeigen (z.B. SWS). Die Ursache hierfür kann in einer Kombination von innerer Porosität der Materialbestandteile und der Packungsporosität zwischen den Bestandteilen liegen. Die Beschreibung solcher Böden erfordert mehrmodale Retentionskurven (Durner, 1994).
4. Ein vierter Punkt, bei dem die Inadäquatheit des van Genuchten/Mualem-Modells klar zum Ausdruck kommt, betrifft die Form der Leitfähigkeitsdaten. Dies ist selbst für Materialien evident, die auf der Retentionsseite einigermaßen gut durch das van Genuchten/Mualem-Modell gefittet werden könnten (z.B. BM1 und BM3). Die Ursache hierfür liegt an einem konzeptionellen Defizit der van Genuchten/Mualem-Leitfähigkeitsfunktion. Diese beruht auf einem Modell, bei dem die van Genuchten-Retentionskurve eine etwa lognormal-verteilte effektive Porengrößenverteilung eines Bündels von Kapillaren widerspiegelt, und die Leitfähigkeit für dieses Kapillarbündel aus Überlegungen zur laminaren Strömung in Röhren abgeleitet wird (Hagen-Poiseuille-Gesetz; Mualem, 1976). Als Resultat dieser Kombination muss die Leitfähigkeitskurve im ungesättigten Bereich in Form einer Potenzfunktion (also einer Gerade bei einer log-log-Auftragung) abfallen. Die gemessenen Leitfähigkeiten zeigen, dass dies (in Übereinstimmung mit theoretischen Überlegungen) nicht generell zutrifft. Für alle BM-Materialien wird deutlich dass die gemessenen Leitfähigkeiten zum trockeneren Bereich hin weniger steil abfallen, was bei einer log-log-Auftragung eine konkave Form der Leitfähigkeitskurve erfordert. Der beobachtete Abfall wird durch Wasserfluss in den Ecken von unregelmäßig geformten Poren („corner flow“) und durch Wasserfluss auf den Oberflächen („film flow“) erklärt, welche im van Genuchten/Mualem-Modell ignoriert werden. Nähere Informationen zu dieser Problematik finden sich z.B. bei Tuller und Or (2001) oder bei Peters und Durner (2008).

4.3 van Genuchten/Mualem-Parameter

Die Anpassung des van Genuchten/Mualem-Modells an die experimentellen Daten erfolgte trotz der strukturellen Inadäquatheit auf ausdrücklichen Wunsch des Auftraggebers. Da eine Gesamtanpassung völlig unsinnige Werte ergäbe, wurden nur die Daten im mittleren Feuchtebereich zur Modellanpassung verwendet. Als „mittlerer Feuchtebereich“ wurde hierbei der Bereich definiert, in dem auf Basis der Evaporationsmessungen sowohl Leitfähigkeits- als auch Retentionsdaten zur Verfügung stehen. Diese Daten liegen in der Regel im Bereich zwischen pF 1 und pF 3 vor. Sie sind im elektronischen Anhang dieses Berichtes im Verzeichnis HYPROP-FIT_VGM

zusammen mit den Anpassungen als Dateien mit der Endung „.fit“ aufgeführt. Diese Dateien können mit der Software HYPROP-FIT (UMS GmbH, 2013) aufgerufen, visualisiert, und bei Bedarf mit alternativen Modellen neu gefittet werden. Die Software HYPROP-FIT ist über <http://ums-muc.de/static/HYPROP-FIT.zip> kostenfrei verfügbar. Die Parameter der angepassten van-Genuchten/Mualem-Funktionen sind in den Kennblättern im Ergebnisteil aufgeführt. Die angepassten Funktionen werden in den Abbildungen der Retentions- und Leitfähigkeitsdaten gezeigt.

Die Konsequenzen der Verwendung der nicht ausreichend genauen van-Genuchten/Mualem-Funktion in numerischen Simulationen des Wasserhaushaltes dieser Materialien sind pauschal schwer abzuschätzen, und sollten in einem eigenen Forschungsvorhaben näher untersucht werden. Basierend auf grundsätzlichen Überlegungen kann man die Hypothese aufstellen, dass in Simulationen, bei denen nur der mittlere Feuchtebereich „erfahren“ wird, die fehlerhafte Abbildung der hydraulischen Eigenschaften im sehr feuchten und sehr trockenen Bereich ohne große Konsequenzen für das Simulationsergebnis bleiben. Dagegen würde das Austrocknen solcher Materialien an der Oberfläche, oder die Durchströmung mit sehr hohen Wasserinfiltrationsraten (etwa durch die Bündelung von Niederschlägen in einer engen Zone) ein adäquateres Modell der hydraulischen Eigenschaften im trockenen bzw. nassen Bereich erfordern.

Sofern das van-Genuchten/Mualem-Modell oder andere existierende und in numerische Simulationssoftware implementierte Modelle im moderat feuchten bis moderat trockenen Zustand eine gute Approximation der Messdaten zeigen, können sie also dazu dienen, hydraulische Fließprozesse in Szenarien zu simulieren, in denen der Systemzustand innerhalb dieses Feuchtebereiches bleibt. Konkret wäre dies denkbar in einer Konstellation, in der der Baustoff von einem anderen Material mit geringerer gesättigter Leitfähigkeit in einer gewissen Mindestmächtigkeit überschichtet ist, so dass weder eine völlige Durchfeuchtung noch eine völlige Austrocknung vorkommen kann.

4.4 Prüfung von Pedotransferfunktionen

Existierende Pedotransfer-Funktionen (z.B. ROSETTA, Schaap et al., 2001) basieren auf dem van-Genuchten/Mualem-Modell und schätzen die in diesem Modell enthaltenen Parameter auf Grundlage verschiedener Prediktorvariablen. Die Verwendung des van-Genuchten/Mualem-Modells in numerischen Simulationen unserer Verdunstungsexperimente führte zu Verläufen der Wasserflüsse und Matrixpotentiale, die mit den beobachteten Werten in keiner Weise in Deckung standen. Dies betrifft sowohl die Verwendung der in Kap. 4.4. beschriebenen Funktionen in der Vorwärtssimulation, als auch den Versuch, mit dem van-Genuchten/Mualem-Modell über inverse Simulation zu einer Beschreibung der Messdaten zu kommen (in diesem Bericht nicht gezeigt).

Als Schlussfolgerung ergibt sich, dass existierende Pedotransfer-Funktionen die in diesem Vorhaben ermittelten Funktionen nicht befriedigend vorhersagen können, und dass diese Standardfunktionen das hydraulische Verhalten der Materialien nicht beschreiben können. Ihre Verwendung in numerischen Simulationen wird somit zu einer unzutreffenden Abbildung des Wasserregimes in EBS führen.

4.5 Entwicklung von Pedotransferfunktionen

Ein zutreffendes Modell für hydraulische Eigenschaften von EBS erfordert Funktionen, welche

- (i) in der Lage sind, bimodale oder trimodale Porengrößenverteilungen zu repräsentieren (Durner, 1994),
- (ii) neben einem kapillaren einen adsorptiven Wassergehalt ausweisen, so dass der Gesamtwassergehalt bei völliger Austrocknung gegen null geht und nicht einen Restwassergehalt approximiert (z.B., Campbell und Shiozawa, 1999; Fayer and Simmons, 1995; Webb, 2000),
- (iii) in der Leitfähigkeitsfunktion im Bereich zwischen völliger Sättigung und schwach ungesättigten Verhältnissen den Effekt von Makroporen auf die Leitfähigkeitsfunktion wiedergeben können,
- (iv) in der Leitfähigkeitsfunktion den Beitrag des nichtkapillaren Wasseranteils zur Gesamtleitfähigkeit berücksichtigen (z.B., Tokunaga, 2009; Lebeau und Konrad, 2010), und
- (v) in der Leitfähigkeitsfunktion im trockenen Feuchtebereich berücksichtigen, dass der Wasserdampftransport dominant wird und somit die Richards-Gleichung strukturell nur verwendet werden kann, wenn der entsprechende Beitrag der Wasserdampfdiffusion der hydraulischen Leitfähigkeit zugeschlagen wird (z.B., Saito et al., 2006, Peters, 2013).

Die Verwendung verbesserter, strukturell korrekter Ansätze zur Beschreibung hydraulischer Eigenschaften (z.B. Peters, 2013) ist möglich und wird von uns verfolgt, muss aber im Moment noch als wissenschaftliches Neuland angesehen werden. Ein universelles Modell, welches alle oben genannte Prozesse berücksichtigt, wäre das PDI-Modell (Peters et al., 2015), welches allerdings zum Abschluss der Arbeiten an diesem Vorhaben noch nicht zur Verfügung stand.

Vor diesem Hintergrund, aber auch angesichts der relativ geringen Anzahl vollständig charakterisierter Materialien in Verbindung mit der Variabilität der Ergebnisse für die verschiedenen EBS – auch innerhalb der selben Stoffklasse – erscheint die vorgesehene Entwicklung einer neuen Pedotransfer-Funktion zur Abschätzung der hydraulischen Eigenschaften straßenbaulich relevanter Materialien zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht praktikabel.

Die Entwicklung einer solchen Pedotransfer-Funktion bedarf weiterführender Arbeiten, die vom Umfang her ein Anschluss-Forschungsvorhaben rechtfertigen würden. In einem solchen Forschungsvorhaben sollte zunächst die Datengrundlage erweitert werden – unter Verwendung der in diesem Forschungsvorhaben entwickelten Methoden zur Messung hydraulischer Eigenschaften an grobtexturierten Materialien. Aufgrund dieser erweiterten Datengrundlage könnte dann eine Pedotransfer-Funktion entwickelt werden.

Um dennoch zu Funktionen zu gelangen, welche in numerischen Simulationen des Wassertransports verwendet werden können, wurden von uns die gemessenen Daten mit einem sehr flexiblen Modell, welches auf Basisüberlegungen von Peters (2013) beruht, angepasst und in Tabellenform gespeichert. Solche Tabellen können von Simulationsmodellen, wie z.B. der weit verbreiteten Simulationssoftware HYDRUS

(Simunek et al., 2005), eingelesen und verwendet werden. Die entsprechenden Fits sind in Anhang 1 gezeigt, die tabellierten Funktionen im elektronischen Anhang in der EXCEL-Datei BAST-ALLDATA.xlsx abgelegt.

4.6 Zusatzuntersuchungen zur Hysterese

Für Material RC3 wurde zusätzlich zu dem Verdunstungsexperiment, welches die (Erst-) Entwässerungskurve erfasst, ein Experiment mit anschließender Wiederbefeuchtung durchgeführt. Der Ablauf wurde in Kap. 2.9 dargestellt, das Ergebnis ist im Ergebnisblatt auf Seite 75 gezeigt. Die Untersuchung ergab, dass das Material eine ganz erhebliche Hysterese aufweist. Selbst wenn die ermittelte Erstentwässerungskurve korrekt parametrisiert wird, wird ihre Verwendung in numerischen Simulationsmodellen unter wechselfeuchten Bedingungen die auftretenden Wasserflüsse überschätzen, da Hysterese allgemein zu einer Dämpfung der Wasserbewegung bei wechselnden Randbedingungen führt (Jaynes, 1992; McNamara 2014).

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ziel des Vorhabens war, einen validen und systematischen quantitativen Überblick über hydraulische Eigenschaften von Ersatzbaustoffen zu bekommen, die in einer Lagerung vorliegen, die für die Verwendung im Straßenbau typisch ist. Die hydraulische Charakterisierung umfasste die Wassergehalts-Saugspannungsfunktion („Retentionskurve“) sowie den Zusammenhang zwischen hydraulischer Leitfähigkeit und Saugspannung („Leitfähigkeitskurve“). Die Funktionen sollten in hoher Genauigkeit und Präzision über einen weiten Feuchtebereich gewonnen werden, mit geeigneten hydraulischen Funktionen parametrisiert, und in Hinblick auf die Verwendung in modifizierten Pedotransfer-Funktionen in Abhängigkeit von Materialtyp und Lagerungsdichte ausgewertet werden.

Konkret umfasste die Planung des Forschungsvorhabens folgende Schritte, die vollständig umgesetzt wurden:

1. Auswahl der Probematerialien in Absprache mit dem Auftraggeber
2. Festlegung des Einbauverfahrens für die Laborproben
3. Fertigung der Anlagen für die experimentellen Untersuchungen
4. Bestimmung der hydraulischen Funktionen durch Verdunstungs-Experimente
5. Bestimmung der $\theta(h)$ -Beziehung im trockenen Bereich
6. Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften mit analytischen Funktionen

Untersucht wurden 15 Materialien der Stoffklassen Bodenmaterialien, Hausmüllverbrennungssaschen, Recyclingmaterialien, und eine Stahlwerksschlacke. Alle Materialien wurden hierzu in jeweils zwei Parallelen auf vorgegebenen Verdichtungsgrad in relativ große Probekörper (23 cm Durchmesser, 16 cm Höhe) gepackt und nach dem Verdunstungsverfahren, das den state-of-the-art in diesem Bereich markiert, vermessen. Die Durchführung von dynamischen Fließexperimenten war nötig, weil herkömmliche Gleichgewichtsmethoden für diese Probengrößen nicht praktikabel sind. Die aus den Verdunstungsexperimenten gewonnenen Daten wurden mit separaten Messungen der Wasserretention im trockenen Bereich nach dem Taupunktverfahren und Messungen der gesättigten Wasserleitfähigkeit nach dem Verfahren mit konstantem Überstau kombiniert.

In methodischer Hinsicht betraten die Untersuchungen Neuland in Hinblick auf folgende Merkmale:

- Erfassung der hydraulischen Eigenschaften im nassen und mittleren Feuchtebereich an großen Probekörpern, welche mit traditionellen Gleichgewichtsmethoden nicht bestimmbar sind.
- Ermittlung von Retentionskurven im nassen bis mittleren Feuchtebereich in sehr hoher Auflösung, so dass Spezifika der Form der Retentionskurve klar werden, die bei traditioneller Messtechnik verborgen bleiben.
- Nachweis der Validität der vorgenommenen Auswertungstechnik für Proben der verwendeten Größe und der untersuchten Materialien durch numerische Simulation.

- Anwendung der Taupunkt-Methode zur Bestimmung von einzelnen Punkten der Retentionskurve im trockenen Feuchtebereich. Für die verwendeten Materialien erforderte dies eine Modifikation der Standardmethode, welche es ermöglichte, auch Materialien mit Grobkornanteil zu untersuchen. Diese innovative Methodik wurde erfolgreich geprüft und für alle Materialien eingesetzt.

Zur Prüfung der Validität der mit der Verdunstungsmethode ermittelten Daten wurde eine Simulationsstudie durchgeführt. Diese ergab, dass die Auswertung durch die Schindler-Methode für alle untersuchten Materialien und die untersuchte Probengröße zuverlässige Ergebnisse liefert. Die ermittelten Retentions- und Leitfähigkeiten wiesen für alle untersuchten Materialien eine akzeptable Genauigkeit auf. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass das geometrische Mittel in der dem arithmetischen Mittel generell vorzuziehen ist. Dem entsprechend wurden von uns im Auswertungsverfahren die ermittelten Leitfähigkeiten und Wassergehalte dem geometrischen Mittel des Matrixpotentials zugeordnet (Kap 2.3).

Das Forschungsvorhaben erbrachte schlüssige Resultate und belastbare Erkenntnisse. Die hydraulischen Eigenschaften der untersuchten Böden und Ersatzbaustoffe unterscheiden sich in wesentlichen Punkten von „normalen“ Böden im bodenkundlichen Sinn. Primäre Unterschiede sind (i) ein weites Korngrößenspektrum bis hin zu Steinen von 32 mm Durchmesser, (ii) hohe bis sehr hohe Packungsdichten mit entsprechend geringem Gesamtporenvolumen, hoher Lagerungsdichte und reduzierter Wasserdurchlässigkeit, (iii) teilweise hohe Salinitäten.

Die hydraulischen Eigenschaften sind dem entsprechend von komplexer Form, zeigen oft einen Makroporenanteil (HMVA, RC), Bimodalität der effektiven Porengrößenverteilung, sowie einen Abfall der ungesättigten Leitfähigkeit, der nicht in Form einer einfachen Potenzfunktion (d.h., als eine Gerade auf der log-log-Darstellung der Leitfähigkeitsfunktion) erfolgt. Dies bedeutet, dass die zunächst vorgesehene Beschreibung der resultierenden Eigenschaften durch das van Genuchten/Mualem-Modell nicht zielführend war. Eine Prüfung der Vorhersagegenauigkeit der üblicherweise verwendeten $\theta - h - K$ -Modelle zeigte, dass diese das hydraulische Verhalten nicht valide wiedergeben können.

Aufgrund der in diesem Bericht aufgezeigten Inadäquatheit des van Genuchten/Mualem-Modells, die hydraulischen Eigenschaften von Ersatzbaustoffen über den gesamten Feuchtebereich zu beschreiben, konnte der letzte Schritt des Vorhabens, d.h. die Prüfung und Weiterentwicklung von Pedotransfer-Funktionen, somit nur in qualitativ/deskriptiver Weise umgesetzt werden. Wir haben stattdessen die hydraulischen Eigenschaften einerseits beschränkt auf den mittleren Feuchtebereich mit der van Genuchten/Mualem-Funktion angepasst. Zusätzlich wurde mit einem sehr flexiblen Modell („PDI“, Iden und Durner, 2014) eine Beschreibung der hydraulischen Funktionen im gesamten Feuchtebereich vorgenommen, die als Tabellen abgelegt wurden. Diese können von numerischen Simulationscodes eingelesen und zur Simulation verwendet werden. Eine Generalisierung im Sinne einer Pedotransferfunktion erscheint gegenwärtig aufgrund der relativ kleinen Datenbasis nicht möglich.

Eine zusätzliche Untersuchung an einem RC-Material ergab, dass das Material eine erhebliche Hysterese aufweist. Selbst wenn die ermittelte Erstentwässerungskurve korrekt parametrisiert wird, wird ihre Verwendung in numerischen Simulationsmodellen unter wechselfeuchten Bedingungen die auftretenden Wasserflüsse überschätzen, da Hysterese allgemein zu einer Dämpfung der Wasserbewegung bei wechselnden Randbedingungen führt.

Die Simulation der Hydraulik von Baukörpern mit Ersatzbaustoffen, als Grundlage für Stofftransport-Abschätzungen, erscheint daher zur Zeit – auch unter Einbeziehung der Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens – noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Dies trifft in besonderem Maße auf Fälle zu, bei denen die Simulationsszenarien einen weiten Feuchtebereich abdecken sollen.

6. Ausblick

Es wäre für diese Fragestellung dienlich, gezielt zu prüfen, in wie weit für praxisgerechte Szenarien sich allgemeine Muster des Wasser- und Stofftransports ableiten lassen, welche dann für konkrete Fälle mit existierenden vereinfachenden Modelle approximiert werden können. Dies wäre möglich anhand gezielter Simulationsstudien an „virtuellen Realitäten“ (z.B. Schlüter et al., 2013; Schelle et al, 2013), welche mit weitgehend fehlerfreien Parametrisierungen der hydraulischen Eigenschaften durchgeführt werden können. Ein solcher Ansatz erlaubt für die Praxis abzuschätzen, inwieweit auch wesentlich vereinfachte Funktionen genutzt werden können, um das hydraulische Verhalten vor dem Hintergrund der Fragestellungen im reaktiven Stofftransport (mittlere Verweilzeiten; mittlere Transportgeschwindigkeiten, ungefähre Wassersättigung und Reaktionszeiten, Interaktion chemischer und physikalischer Prozesse) befriedigend genau widerzugeben.

Die Konsequenzen der Verwendung der nicht ausreichend genauen van Genuchten/Mualem-Funktion in numerischen Simulationen des Wasserhaushaltes dieser Materialien sind pauschal schwer abzuschätzen und sollten in einem eigenen Forschungsvorhaben näher untersucht werden. Eine weitere offene Frage ist das Ausmaß des dämpfenden Einflusses der Hysterese unter wechselnden Feuchtebedingungen.

7. Literatur

AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

Campbell, G. S., und S. Shiozawa (1992): Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data, in Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, edited by M. T. van Genuchten, F. J. Leij und L. J. Lund, pp. 317–328, Univ. of Calif., Riverside.

DIN 18121-1 (1998): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Wassergehalt, Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung, April 1998.

DIN 18123 (1996): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung, November 1996.

DIN 18127 (1997). Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch, November 1997.

DIN 18196 (2006): Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Juni 2006.

DIN 19529 (2009): Elution von Feststoffen – Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg, Januar 2009.

DIN 4220 (1998). Bodenkundliche Standortbeurteilung – Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten (normative und nominale Skalierungen), Juli 1998.

Dirksen, C. (1999): Soil physical measurements, Catena Verlag, Reiskirchen, Germany.

Durner, W. (1994): Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, Water Resour. Res. 30, 211-223.

Durner, W., und H. Flühler (2005): Chapter 74: Soil Hydraulic Properties, in: Anderson M.G. and J. J. McDonnell, Encyclopedia of Hydrological Sciences, Chapter 74, 1103-1120, John Wiley & Sons, Ltd.

Durner, W., und K. Lipsius (2005): Chapter 75: Determining Soil Hydraulic Properties, in: Anderson M.G. and J. J. McDonnell, Encyclopedia of Hydrological Sciences, Chapter 75, 1121-1144, John Wiley & Sons, Ltd.

Durner, W., S.C. Iden, H. Schelle und A. Peters (2011): Determination of hydraulic properties of porous media across the whole moisture range, in Schuhmann, R. (Hrsg): »Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis«, Berichtsband zur Tagung, 12.10. – 14.10.2011 am KIT, Karlsruhe, 13-24-

Durner, W., E. Diamantopoulos, S.C. Iden und B. Scharnagl (2014): Hydraulic properties and non-equilibrium water flow in soils, Chapter 5.3 in: Teixeira, W. et al. (eds.): Application of soil physics in environmental analyses: measuring, modelling and data integration. Springer, New York (im Druck).

Fayer, M. J. und C. S. Simmons (1995): Modified soil water retention functions for all matric suctions, *Water Resour. Res.*, 31(5), 1233–1238, doi:10.1029/95WR00173.

Hartge K.-H., und R. Horn (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden. 3. Auflage. Enke Verlag, Stuttgart.

Hopmans, J.W., J. Šimunek, N. Romano und W. Durner (2002): Simultaneous determination of water transmission and retention properties - Inverse methods. p 963-1008., In J.H. Dane and G.C. Topp (Eds.): *Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods*. 4th Edition. SSSA Book Series No. 5, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 2002.

Iden, S.C., und W. Durner (2007): Free-Form estimation of the unsaturated soil hydraulic properties by inverse modelling using global optimization, *Water Resources Research* VOL. 43, W07451.

Iden, S.C., and W. Durner (2014): Comment to “Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range” by A. Peters., *Water Resour. Res.*, 50, 7530–7534.

Jaynes, D. B. (1992): Estimating hysteresis in the soil water retention function, in *Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*, eds van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., Lund, L.J. (eds.), University of California, Riverside, CA, 219–232.

Jarvis, N. J. (2007): A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, 58, 523-546.

Kosugi, K. (1996): Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, *Water Resources Research*, 32, 2697-2703.

Lebeau, M., und J.M. Konrad (2010): A new capillary and thin film flow model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 46(12).

McNamara, H. (2014): An estimate of energy dissipation due to soil-moisture hysteresis, *Water Resour. Res.*, 50, doi:10.1002/2012WR012634.

Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, 12, 513-522.

Peters, A. (2013): Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range. *Water Resources Research*, 49, 6765-6780.

Peters, A., und W. Durner (2008a): Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties, *Journal of Hydrology*, 356, 147-162.

Peters, A., und W. Durner (2008b): A simple model for describing hydraulic conductivity in unsaturated porous media accounting for film and capillary flow. *Water Resources Research*, 44, W11417.

Peters, A., S.C. Iden und W. Durner (2015): Revisiting the simplified evaporation method: Identification of hydraulic functions considering vapor, film and corner flow, *Journal of Hydrology* 527, 531-542.

Saito, H., J. Simunek und B. P. Mohanty (2006): Numerical analysis of coupled water, vapor und heat transport in the vadose zone, *Vadose Zone J.*, 5, 784–800, doi:10.2136/vzj2006.0007.

Savitzky, A., und M. J. E Golay. (1964): Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures, *Analytical Chemistry*, 36, 1627-1639.

Schaap, M. G., F. J. Leij und M. Th. van Genuchten (2001): ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions, *Journal of Hydrology*, 251, 163-176.

Schelle, H., S.C. Iden, A. Peters und W. Durner (2010): Analysis of the agreement of soil hydraulic properties obtained from multistep-outflow and evaporation methods, *Vadose Zone Journal*, 9, 1080-1091[^].

Schelle, H., W. Durner, S. Schlüter, H.-J. Vogel, and J. Vanderborght (2013): Virtual Soils: Moisture measurements and their interpretation by inverse modeling, *Vadose Zone Journal* 12:3, doi:10.2136/vzj2012.0168.

Schlüter, S., H.-J. Vogel, O. Ippisch, P. Bastian, K. Roth, H. Schelle, W. Durner, R. Kasteel, and J. Vanderborght (2012): Virtual soils: Assessment of the effects of soil structure on the hydraulic behavior of cultivated soils, *Vadose Zone Journal* 11(3), doi:10.2136/vzj2011.0174.

Schindler, U. (1980): Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben, *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde*, 24, 1-7.

Schindler, U., W. Durner, G. von Unold und L. Müller (2010): Evaporation Method for Measuring Unsaturated Hydraulic Properties of Soils: Extending the Measurement Range, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74:1071-1083.

Schneider, M., and K.-U. Goss (2012): Prediction of the water sorption isotherm in air dry soils, *Geoderma*, 170, 64–69, doi:10.1016/j.geoderma.2011.10.008.

Schofield, R. K. (1935): The pF of the water in soil. *Trans. Int. Congr. Soil Sci.* 3rd, II, 38, 48.

Simunek, J., M. T. van Genuchten und M. Sejna (2005): The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat und multiple solutes in variably-saturated media. *University of California-Riverside Research Reports*, 3, 1-240.

Tokunaga, T. K. (2009): Hydraulic properties of adsorbed water films in unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, 45(6), W06415, doi:10.1029/2009WR007734.

Tuller, M, und D. Or (2001): Hydraulic conductivity of variably saturated porous media: film and corner flow in angular pore space. *Water Resources Research* 37, 1257–76.

Van Genuchten, M. Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.

Webb, S. W. (2000): A simple extension of two-phase characteristic curves to include the dry region, *Water Resour. Res.*, 36(6), 1425–1430, doi:10.1029/2000WR900057.

Anhang: Fits der hydraulischen Eigenschaften mit einem flexiblen Modell

Nachfolgend werden die gemessenen Daten der 15 Materialien zusammen mit Anpassung eines State-of-the-Art-Modells gezeigt (Iden und Durner, 2014). WICHTIG: Bei den gezeigten Daten und Modellen wurde der Bereich unmittelbar bei Sättigung bewusst weggelassen; die Funktionen beschreiben somit den ungesättigten Bereich, etwa ab $h = 3\text{ cm} \cong pF 0.5^1$. Der Makroporenbereich wird somit sowohl auf der Retentionsseite als auch der Leitfähigkeitsseite außen vor gelassen. Dies sollte unproblematisch sein, solange die maximal auftretenden Wasserflusssichten im System unterhalb der höchsten Leitfähigkeiten bleiben.

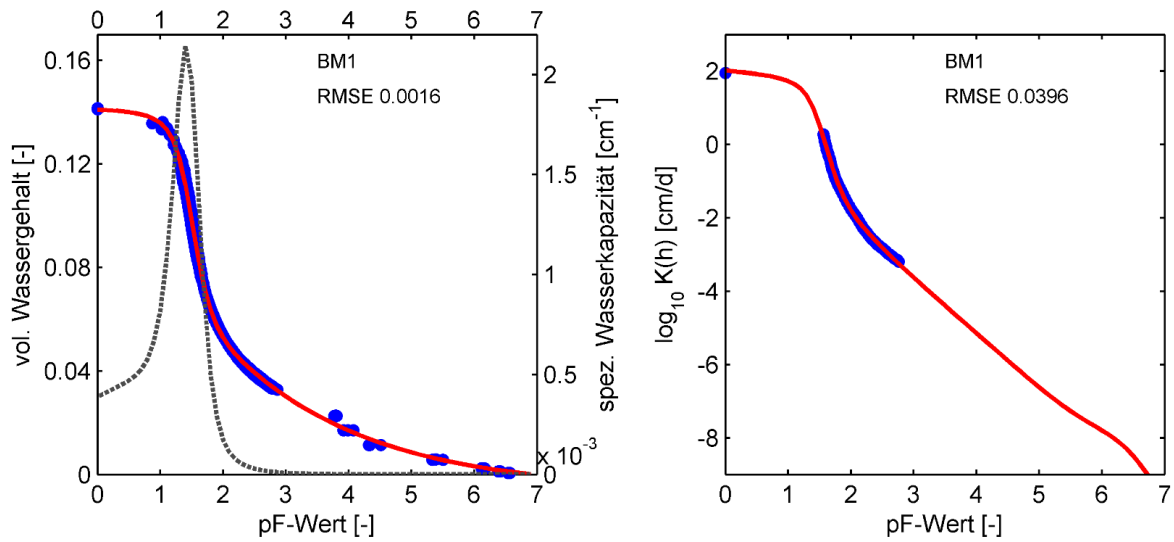
Das zur Beschreibung der Messdaten verwendete Modell lehnt sich an Peters (2013) an, jedoch sind einzelne Komponenten weiter entwickelt, wie etwa die Verwendung einer bimodalen Grundfunktion. Grundsätzliche Features des Modelles sind

- Verwendung einer uni- oder bimodalen Grundfunktion nach van Genuchten (1980) bzw. Durner (1994) für die Darstellung des kapillaren Anteils an der Retentionskurve
- Verwendung eines nichtkapillaren Wasseranteils für den trockenen Teil der Retentionskurve
- Approximation des Wassergehalts Null bei Ofentrockenheit des Materials, d.h. $pF 6,8$.
- Bestimmung der Form der Leitfähigkeitskurve im feuchten Bereich durch das Kapillarbündelmodell von Mualem (1976), analog zum traditionellen van Genuchten/Mualem-Modell
- Bestimmung der Form der Leitfähigkeitskurve im trockenen Bereich (etwa $pF 2,5$ bis $pF 5$) durch ein Filmfluss-Modell, wie in Peters (2013) ausgeführt
- Addition einer Komponente für isotherme Wasserdampfdiffusion auf die Leitfähigkeitsfunktion im sehr trockenen Bereich, wie bei Peters (2013) ausgeführt.

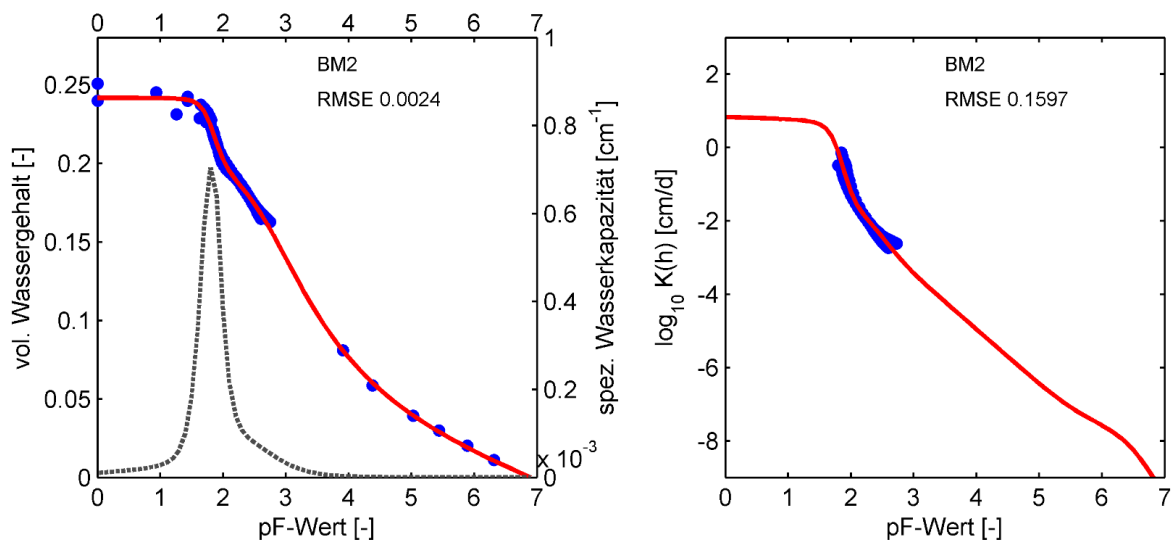
Die exakte mathematische Formulierung der zugrundeliegenden Funktion ist im Rahmen dieses Berichtes ohne Bedeutung, da der Zweck der Anpassungen darin liegt, die beobachteten Retentions- und Leitfähigkeitsdaten optimal und physikalisch sinnvoll inter- und extrapolieren und die resultierenden hydraulischen Funktionen in Form von standardisierten Tabellen abzulegen. Solche Tabellen können dann von numerischen Simulationsmodellen eingelesen und für die Simulation von Szenarien verwendet werden. Sie werden in diesem Bericht nicht numerisch gelistet, sondern in der EXCEL-Tabelle bereitgestellt.

¹ Der pF -Wert ist nach Schofield (1937) definiert als dekadischer Logarithmus der Saugspannung, wenn diese als Druckhöhe in der Einheit cm WS ausgedrückt wird. Da $1\text{ cm WS} = 98.1\text{ Pa}$ entspricht somit $pF 0$ einer Saugspannung von etwa 100 Pa , $pF 2$ entspricht 1 kPa , $pF 5$ entspricht 1 MPa .

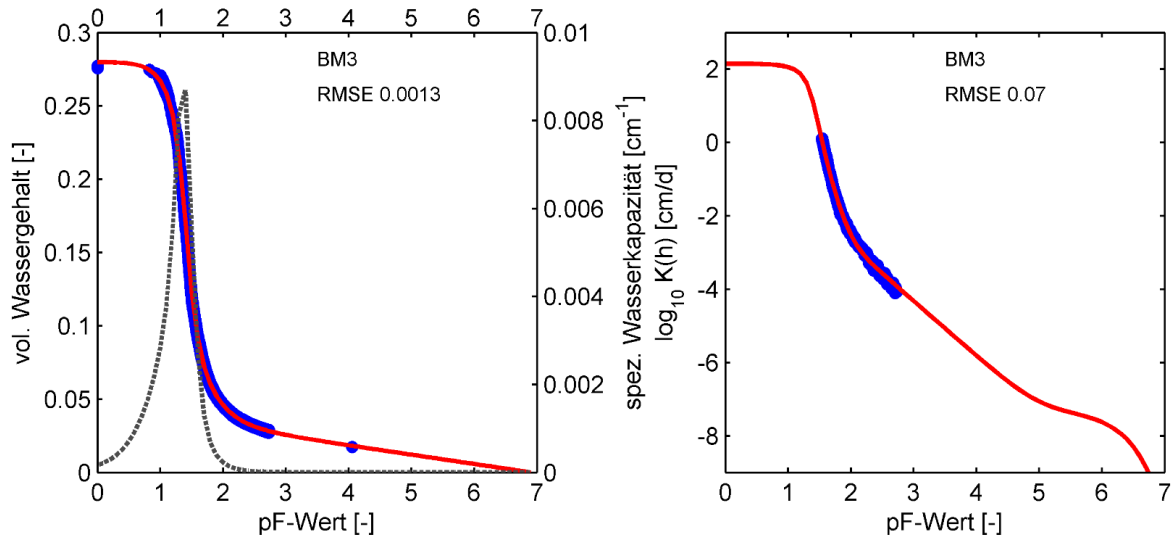
BM1



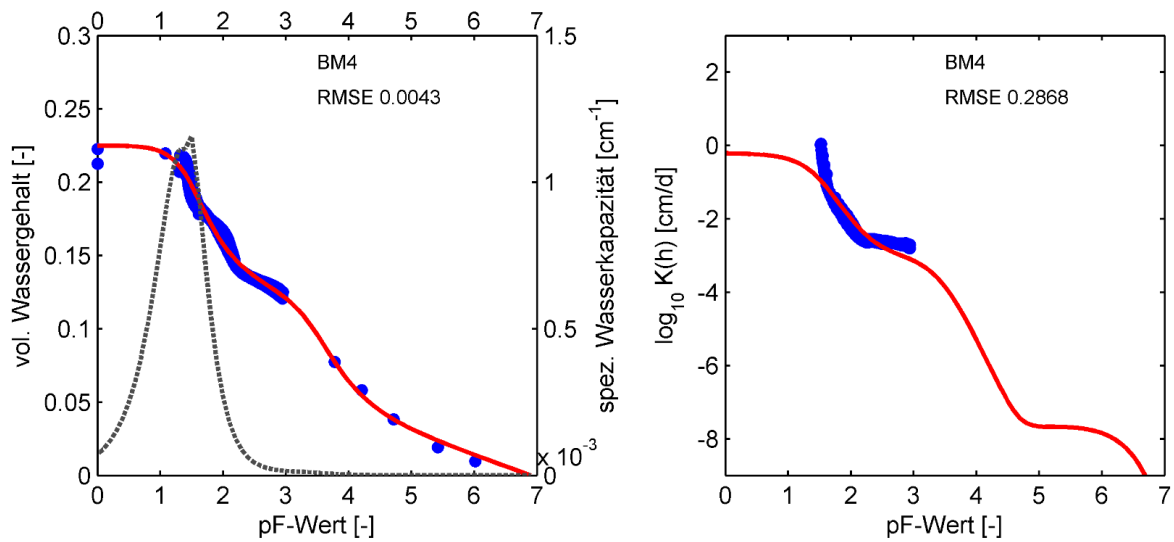
BM2



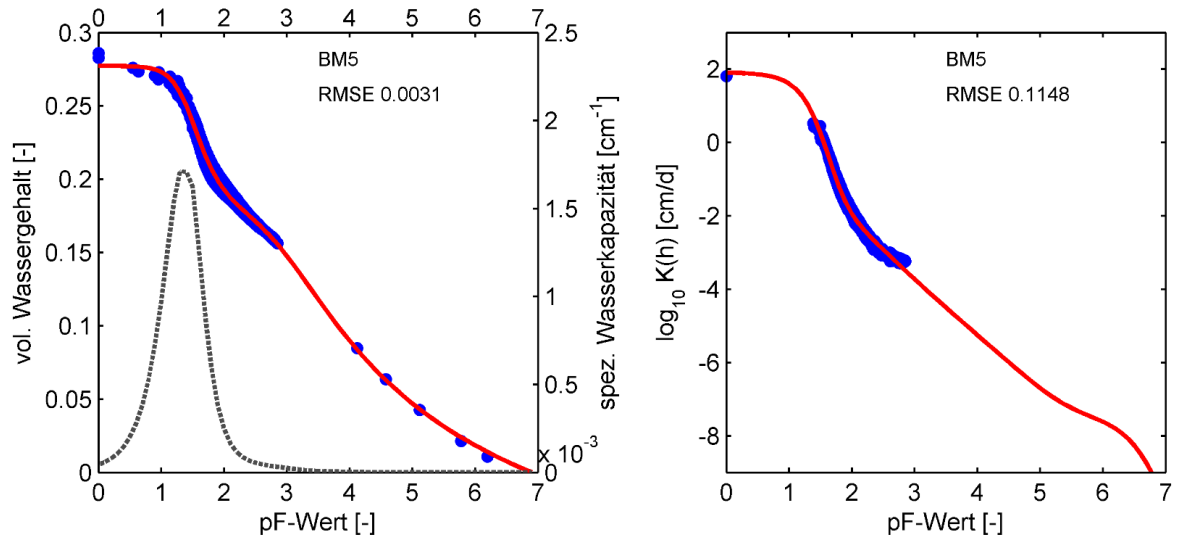
BM3



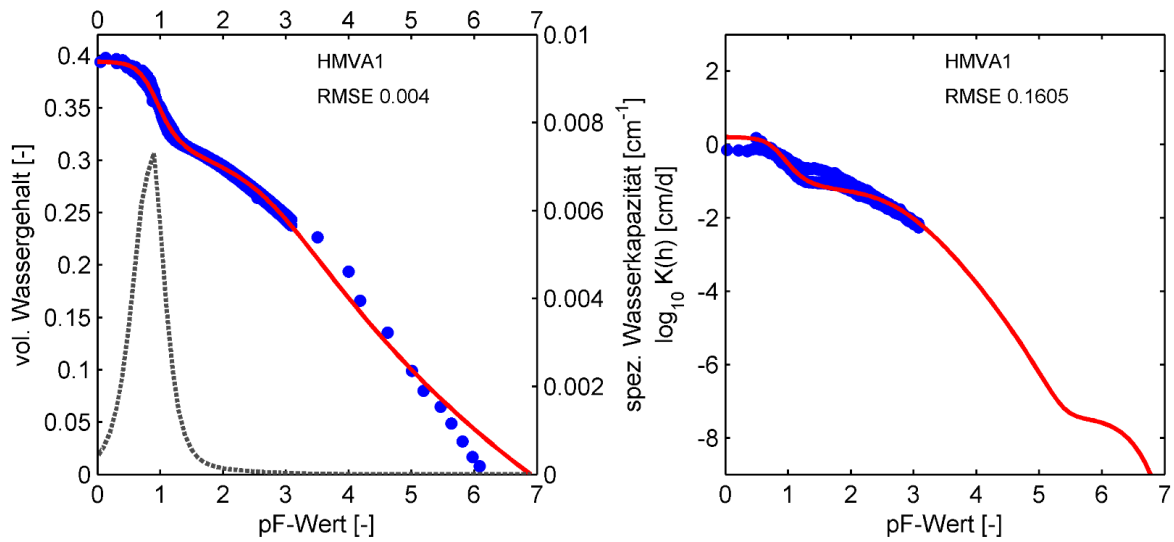
BM4



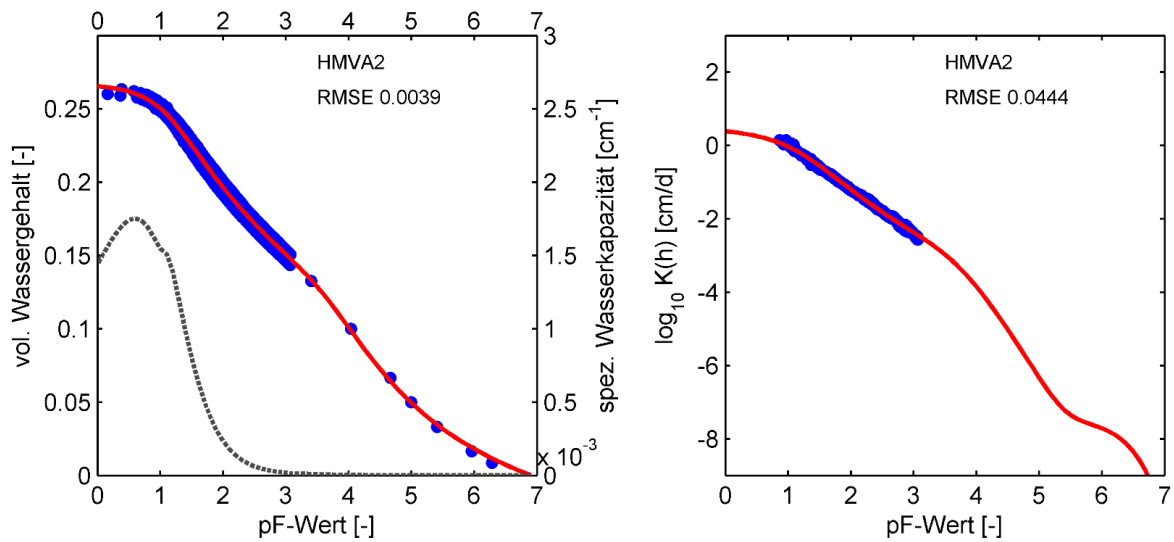
BM5



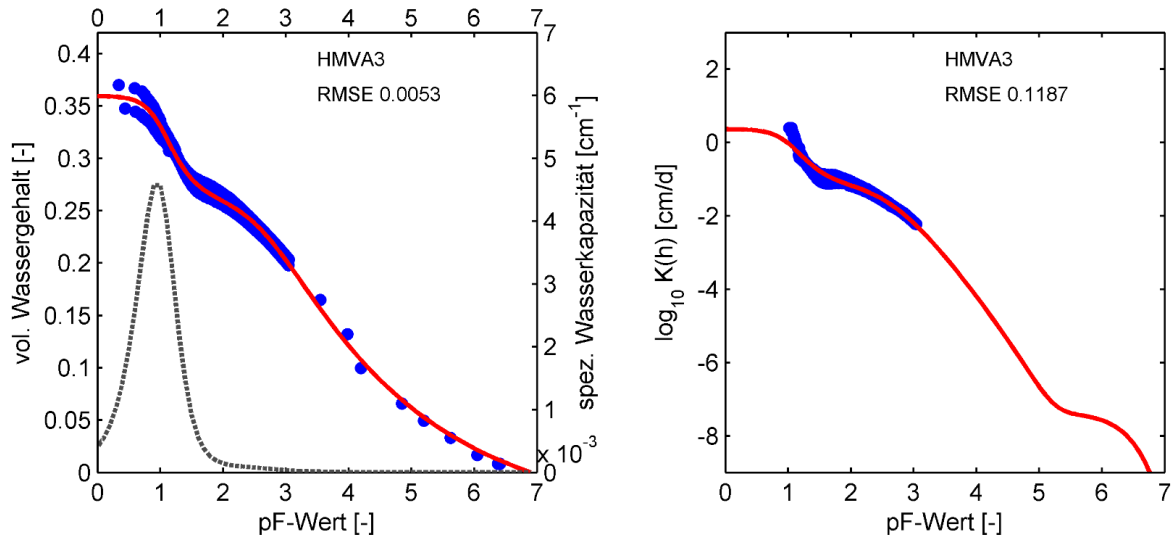
HMVA1



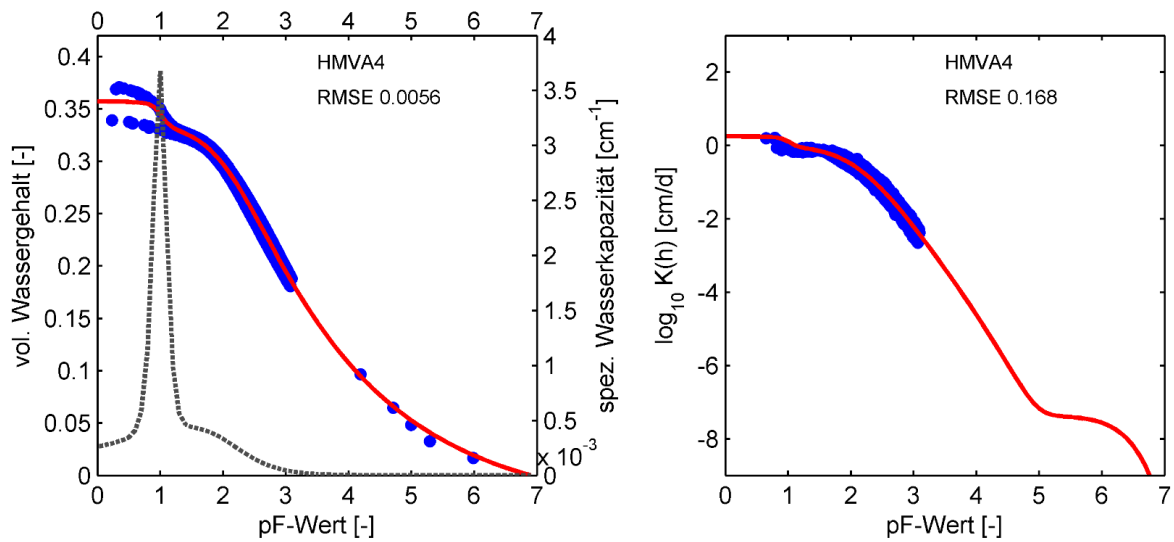
HMVA2



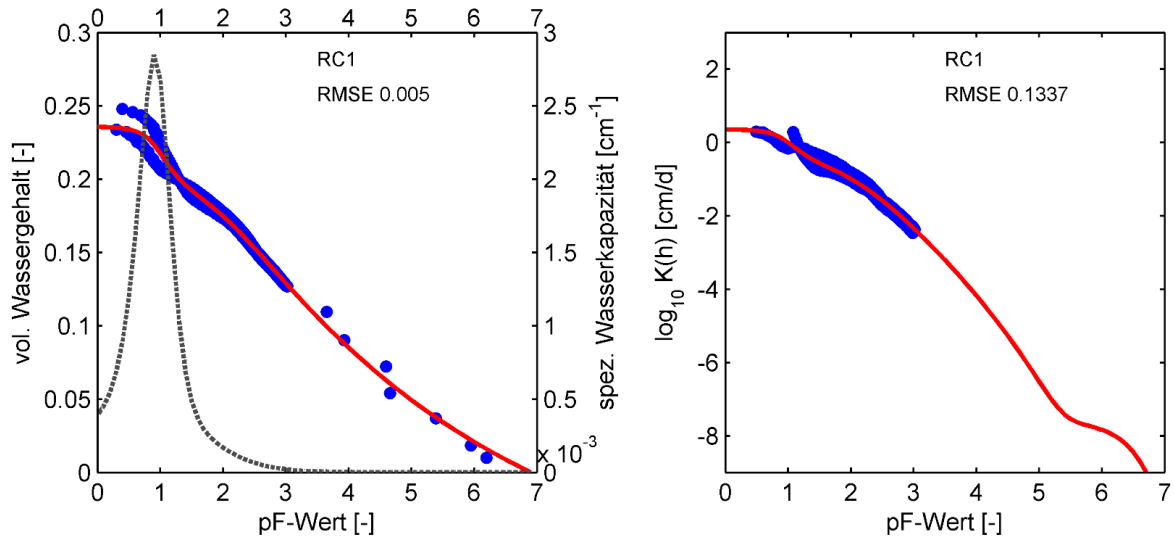
HMVA3



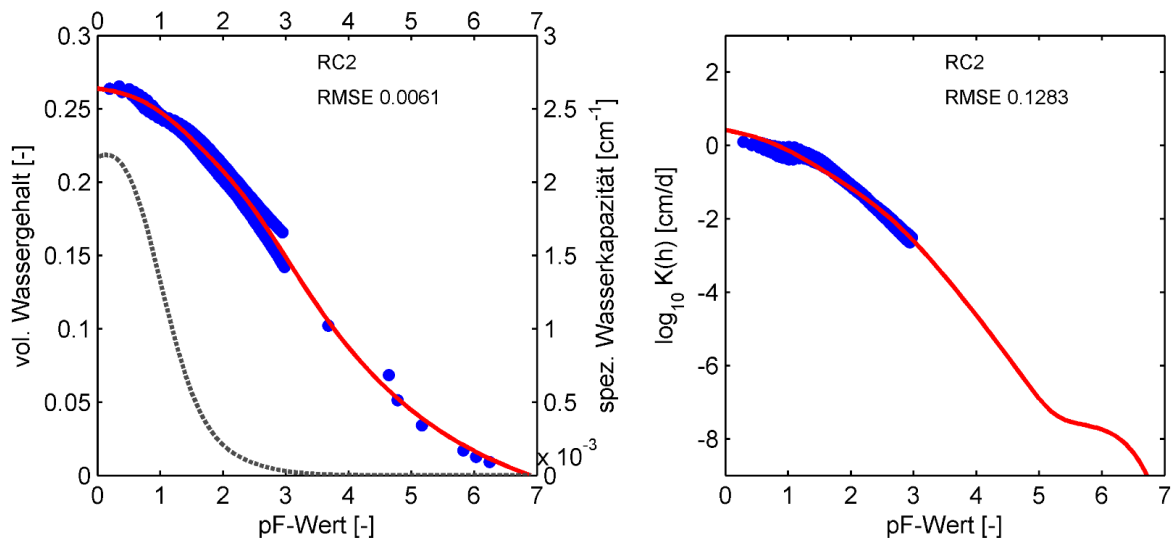
HMVA4



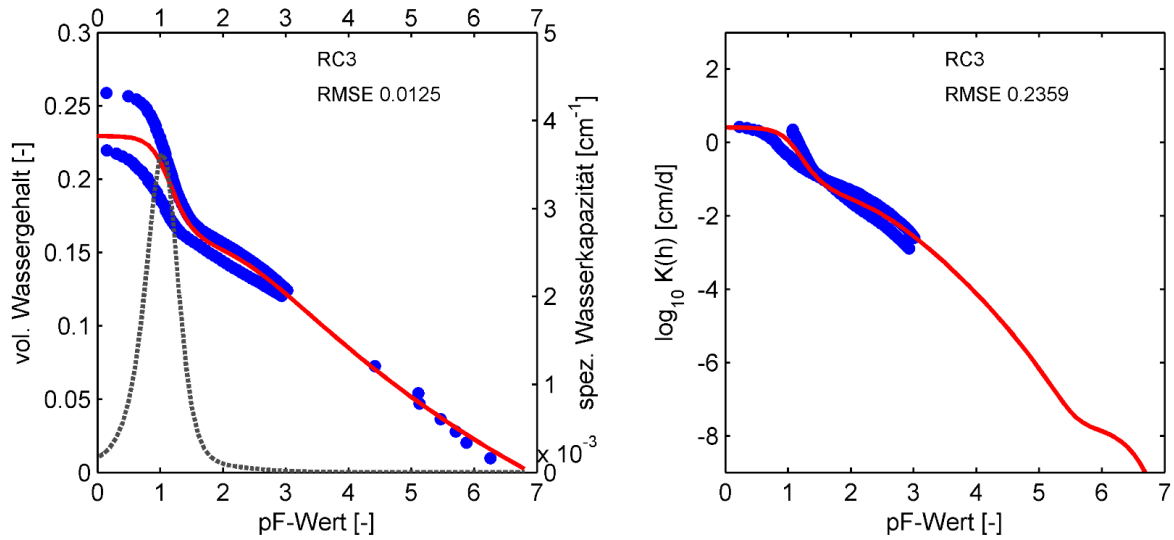
RC1



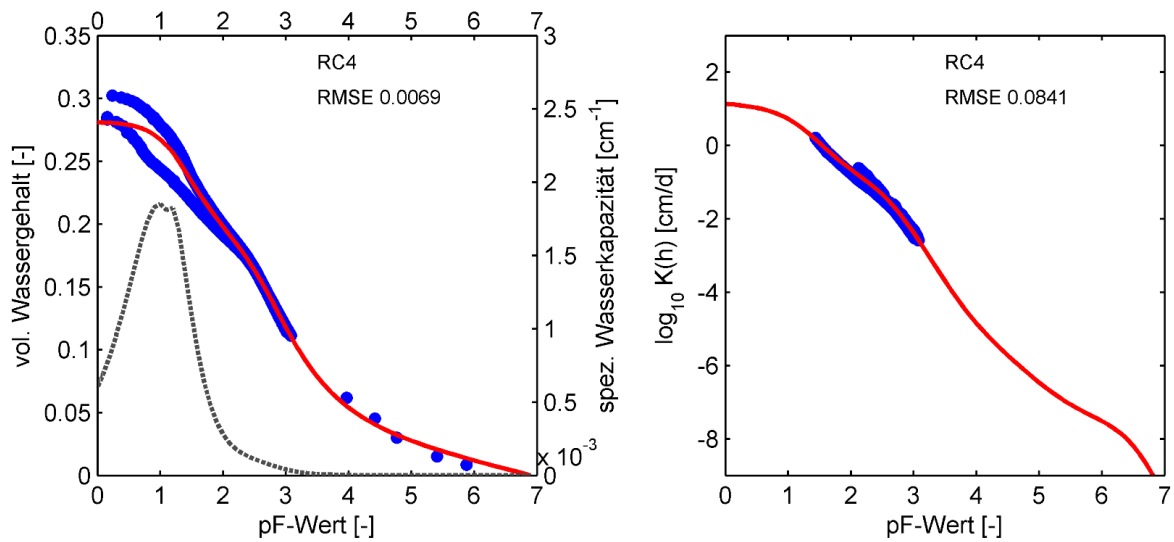
RC2



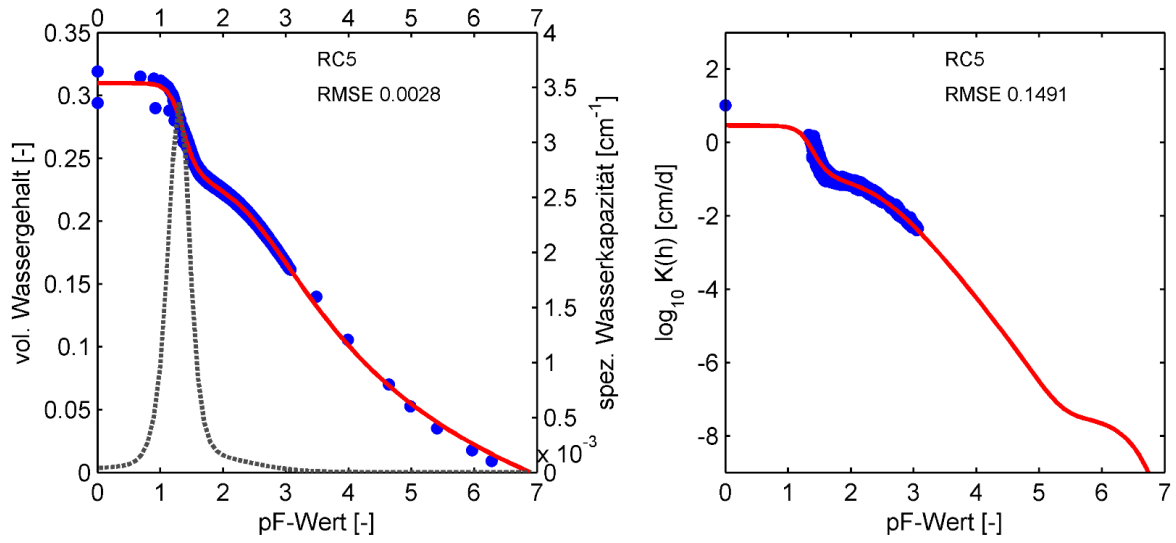
RC3



RC4



RC5



SWS

