

Innovative Bestimmungsverfahren für hydraulische Materialeigenschaften

W. Durner¹, S. C. Iden¹, H. Schelle¹, U. Schindler², G. von Unold³ und A. Peters⁴

¹ Institut für Geoökologie (IGÖ), TU Braunschweig (w.durner@tu-bs.de)

² Leibniz-Zentrum für Landwirtschaftliche Landschaftsforschung (ZALF), Müncheberg

³ UMS GmbH, Gmunder Str. 37, 81379 München München

⁴ FG Standortkunde und Bodenschutz, Institut für Ökologie, TU Berlin

Kurzfassung

Die Beschreibung des Wassertransports in porösen Medien erfordert die Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften. Die simultane Messung dieser Beziehungen erfordert im allgemeinen instationäre Methoden. Am populärsten darunter sind die inverse Simulation von Multi-Step-Ausfluss-Experimenten und die Auswertung von Verdunstungsexperimenten. Für beide Grundmethoden haben sich in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte ergeben. In diesem Beitrag werden Entwicklungen bei der Verdunstungsmethode beschrieben, welche die zeitliche Interpolation der Messdaten, die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten im vertikalen Wassergehaltsverlauf, die Validitätsprüfung ermittelter Leitfähigkeitsdaten, und die Erweiterung des Messbereichs betreffen.

Abstract

Modelling water dynamics in porous media requires an accurate knowledge of the hydraulic properties, namely the relationship between the volumetric water content, θ , and the capillary pressure, h , and the hydraulic conductivity function $K(\theta)$. The multistep-outflow and the evaporation methods are the most popular among the transient experimental methods which allow the quick and simultaneous determination of these functions in the laboratory. The evaluation techniques of both experimental types have undergone considerable improvements during the last years. This paper addresses improvements of the evaporation method, which lie in the interpolation of data, the consideration of nonlinear water contents near saturation, the selection of valid conductivity data, and the extension of the measurement range.

Kontaktadresse:

Prof. Dr. Wolfgang Durner

Institut für Geoökologie

Langer Kamp 19c

38106 BRAUNESCHWEIG

Tel: +49-531-391-5605

Fax: +49-531-391-5637

E-mail: w.durner@tu-bs.de

Web: <http://www.soil.tu-bs.de>

1. Einleitung

Als hydraulische Eigenschaften poröser Medien verstehen wir im engeren Sinne die sogenannte „Retentionskurve“, welche die Abhängigkeit des volumetrischen Wassergehalts θ vom Kapillardruck h quantifiziert, sowie die hydraulische Leitfähigkeitsbeziehung, die sowohl als Funktion des Kapillardrucks $K(h)$ als auch des Wassergehalts $K(\theta)$ ausgedrückt werden kann. Beide Kennfunktionen sind im Rahmen der Kontinuumstheorie definiert, welche die Beschreibung des Wasserflusses in porösen Medien über die Richards-Gleichung erlaubt (DURNER und FLÜHLER, 2005). In Abwesenheit von Quellen und Senken und in eindimensionaler Form ist diese gegeben durch:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

wobei t die Zeit und z die nach oben positive Raumkoordinate ist. $C(h)$ ist die aus der Retentionskurve abgeleitete spezifische Wasserkapazität, definiert als Änderung des Wassergehaltes mit der Druckhöhe, $C = \partial\theta/\partial h$. Die Gleichung ist geeignet zur Beschreibung des Wassertransports in porösen Medien, sofern die Gültigkeitsvoraussetzungen (makroskopisch homogenes, rigides Porensystem, vernachlässigbarer Widerstand für die Gasphasenströmung, inkompressibles Fluid) nicht zu sehr verletzt werden.

Die Messung der hydraulischen Eigenschaften erfordert im allgemeinen instationäre Methoden, da im ungesättigten Feuchtebereich die Einstellung mehrerer hydrostatischer Gleichgewichte bei verschiedenen Druckhöhen für die Bestimmung der Retentionseigenschaften bzw. stationärer Strömungen für die Bestimmung der Leitfähigkeitsfunktion extrem viel Zeit benötigen würde (DURNER und LIPSUS, 2005). Als Labor-Standardverfahren haben sich im bodenphysikalischen Bereich Multi-Step-Ausfluss-Verfahren (HOPMANS et al., 2002) und Verdunstungsverfahren (WIND, 1968) zur simultanen Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften etabliert.

In diesem Beitrag soll der Fokus auf Verbesserungen der Verdunstungsverfahren gelegt werden. Diese Verbesserungen umfassen die zeitliche Interpolation der diskreten zeitlichen Messdaten, die Berücksichtigung der gemessenen Wassergehalte als Mittelwerte, die Wahl eines geeigneten Kriteriums zum Herausfiltern von unzuverlässigen $K(h)$ -Daten nahe Sättigung, und die Erweiterung des Messbereichs zum Trockenen hin durch Nutzung des Lufteintrittspunktes der im Rahmen der Messung austrocknenden Tensiometer. Mit diesen Verbesserungen ergeben sich Retentions- und Leitfähigkeitsdaten für einzelne Bodenproben ohne systematischen Fehler über einen relativ weiten Feuchtebereich.

2. Methodik

2.1 Verdunstungsmethode nach Wind

Das Verdunstungsverfahren geht auf WIND (1968) zurück, der die Idee hatte, den natürlichen Prozess der Austrocknung einer Bodenprobe zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften zu nutzen. Es erfordert im Originaldesign die Instrumentierung einer Bodenprobe mit Tensiometern in mehreren Höhen zur Bestimmung des Kapillardrucks,

und die Aufnahme des Gewichts der Bodenprobe zur Bestimmung des gesamten Wassergehalts. Die Probe wird an den Seiten und an der Basis verschlossen, und ist oben offen für die Verdunstung zur Atmosphäre. Die Ermittlung der Retentionsfunktion ergibt sich in einer iterativen Optimierungsprozedur unter der Annahme, dass die Funktion durch einen Spline oder eine geschlossene parametrische Funktion, wie die van Genuchten-Funktion (VAN GENUCHTEN, 1980), beschrieben werden kann, und dass zu jedem Messzeitpunkt allen Schichten, die durch jeweils ein Tensiometer erfasst sind, ein zugehöriger einheitlicher Wassergehalt zugeordnet werden kann. Näheres zur Methodik findet sich in IDEN und DURNER (2008). Unter Kenntnis der so ermittelten Retentionsfunktion können dann für jede Schicht und jeden Zeitpunkt der lokale Wassergehalt, und aus der Differenz der von der No-flux-Grenze integrierten Wassergehalte die lokalen Wasserflüsse errechnet werden. Die folgende Auswertung erfolgt nach der „instantaneous profile method“ (WATSON, 1966) durch Invertierung des Darcy-Gesetzes und ergibt eine Punktwolke für die $K(h)$ -Beziehung. Diese kann zur Verwendung in Simulationsmodellen wiederum durch analytische Funktionen gefittet werden, wobei je nach benötigter Flexibilität z.B. die van Genuchten-Mualem Leitfähigkeitsfunktion (VAN GENUCHTEN, 1980), die bimodale Funktion (PRIESACK und DURNER, 2006), oder frei geformte Funktionen (IDEN und DURNER, 2007) zur Verwendung kommen.

2.2 Vereinfachte Verdunstungsmethode nach Schindler

Eine Vereinfachung des Verfahrens zur Bestimmung der bodenhydraulischen Eigenschaften aus Verdunstungsexperimenten wurde von SCHINDLER (1980) vorgeschlagen. Hierbei werden die Veränderungen des Gesamtgewichts und der Tensionen in zwei Tiefen und mit der Zeit erfasst. Im Gegensatz zur originalen Methode werden die Flüsse sowie die Potential- und Wassergehaltsverteilung über den gesamten Raum der Bodenprobe linearisiert. Bild 1 zeigt schematisch den experimentellen Aufbau und die intrinsische Annahme, dass die Hälfte des Massenverlustes der Gesamtprobe als Wasserfluss durch die mittlere Ebene der Bodenprobe hindurchtritt. Durch die Vereinfachung können der Umfang der teuren Tensiometermessungen reduziert und die damit verbundenen mechanischen Eingriffe in die Bodenprobe minimiert werden.

Das Verfahren erlaubt grundsätzlich eine sehr gute Bestimmung von hydraulischen Retentionsdaten vom feuchten bis zum mittleren Feuchtebereich, sowie von Leitfähigkeitsdaten im mittleren Feuchtebereich. Die Anwendbarkeit des Verfahrens zum Trockenen hin ist eingeschränkt durch den begrenzten Messbereich der Tensiometer zur Matrixpotentialmessung im Bodenkörper. Ferner erlauben Verdunstungsverfahren grundsätzlich nicht die Bestimmung von hydraulischen Leitfähigkeiten im nassen Bereich, wo die hydraulische Leitfähigkeit von Böden deutlich über der Verdunstungsrate im Experiment liegt.

Die Auswertung des vereinfachten Verdunstungsverfahrens beruht auf 4 Linearisierungsannahmen: (1) Der zeitliche Verlauf der Gewichtsänderung zwischen zwei Messzeitpunkten ist linear, (2) die zeitlichen Verläufe der Matrixpotentialänderung zwischen zwei Messzeitpunkten sind linear, (3) die räumliche Verteilung der Wassergehalte und (4) des Potentials über die gesamte Säulenhöhe sind zu allen Zeiten linear. Messungen

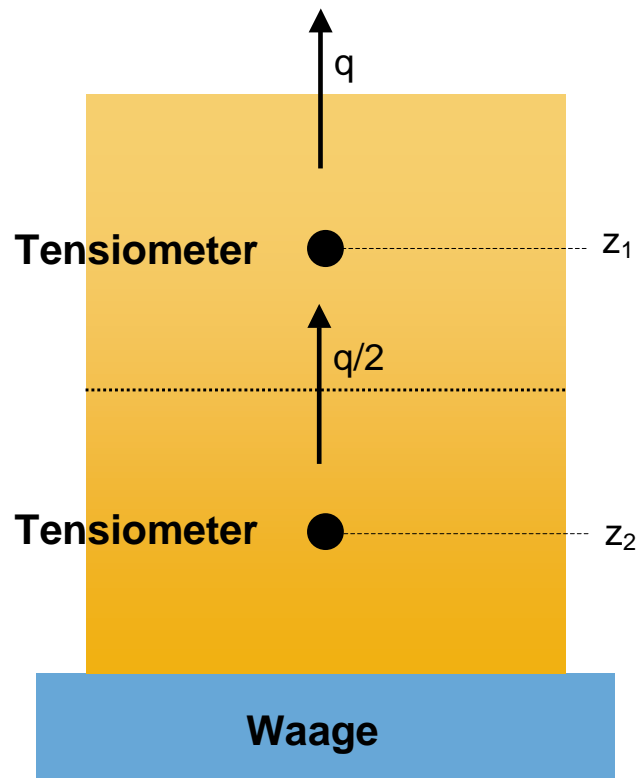


Bild 1: Schematische Darstellung des vereinfachten Verdunstungsverfahrens. Das Symbol q bezeichnet den Wasserfluss durch Verdunstung. Die Hälfte des Wasserflusses passiert die Probenmitte. Die beiden Tensiometer sind symmetrisch um die Probenmitte eingebaut.

und numerische Simulationen auf Basis der Richardsgleichung zeigen, dass all diese Annahmen in mehr oder weniger starkem Umfang verletzt werden. PETERS und DURNER (2008a) analysierten das Verfahren und zeigten, dass unter Annahme homogener Bodeneigenschaften die erstgenannten Linearisierungsfehler minimiert und der dritte ganz vermieden werden kann. Sie fanden ferner, dass der vierte Linearisierungsfehler keinen Fehler in den ermittelten Daten hervorruft. Falls innerhalb der untersuchten Probe Schichtungen auftreten, ist das Verfahren noch anwendbar, wenn die Bodenarten nicht zu stark differieren. Bei stark heterogenen Materialien können allerdings keine effektiven homogenen Bodeneigenschaften definiert werden (siehe Durner et al., 2008).

2.3 Minimierung des zeitlichen Linearisierungsfehlers

Zur Abschwächung des zeitlichen Linearisierungsfehlers bei größeren zeitlichen Messintervallen können Hermitesche Splines zur Dateninterpolation verwendet werden (Bild 2). Diese Funktionen schwingen nicht zwischen den Stützstellen, und stellen einen idealen Kompromiss zwischen hoher Flexibilität und „Glattheit“ der Interpolation dar. PETERS und DURNER (2008a) zeigten, dass bei Interpolation mit Hermiteschen Splines für Sande und Lehme eine zeitliche Messauflösung von einem Tag genügt. Für Tone und strukturierte Böden sollten die Tensionen in höherer Auflösung gemessen werden.

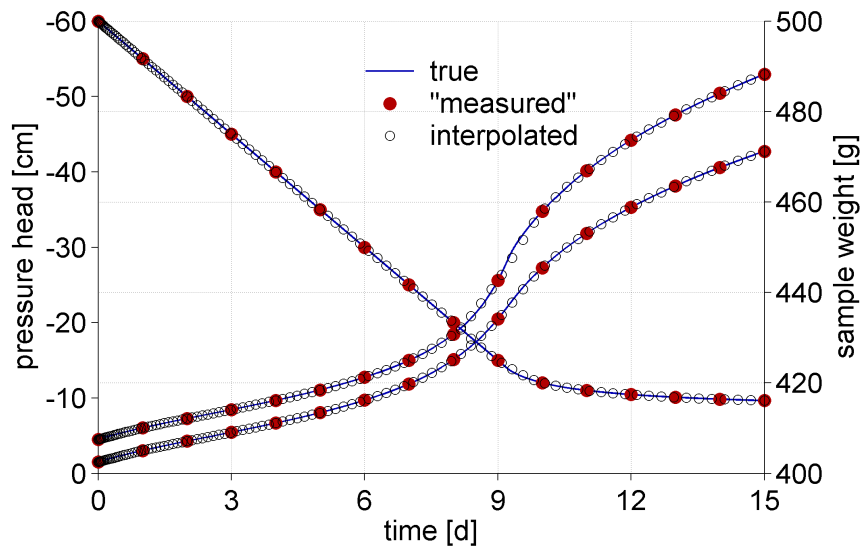


Bild 2: Zeitlicher Verlauf der in zwei Tiefen erfassten Matrixpotentiale (von links nach rechts ansteigende Linien, bei Austrocknung zunehmend negativ, linke Achse) und des Gewichts (von links nach rechts abfallende Linie, rechte Achse) der Bodensäule bei Verdunstung aus Sand. Die Austrocknung erfolgt im Beispiel 9 Tage lang mit gleichbleibender Verdunstungsrate und flacht dann ab. Aus den Interpolationen ergeben sich die diskreten Daten für die nachfolgende Auswertung.

2.4 Beseitigung des räumlichen Linearisierungsfehlers für die Wassergehaltverteilung

Die räumlichen Linearisierungsannahmen sind für die Potentialverteilung in der ersten Phase der Verdunstungsmessung erfüllt, bei der Wassergehaltsverteilung jedoch häufig nicht (Bild 3). Durch die Zuordnung eines mittleren Wassergehaltes zu einer mittleren Tension im Zuge der Auswertung wird der wahre Verlauf der Retentionsfunktion nahe Sättigung „verschmiert“, d.h. geglättet (Bild 4 und Bild 5).

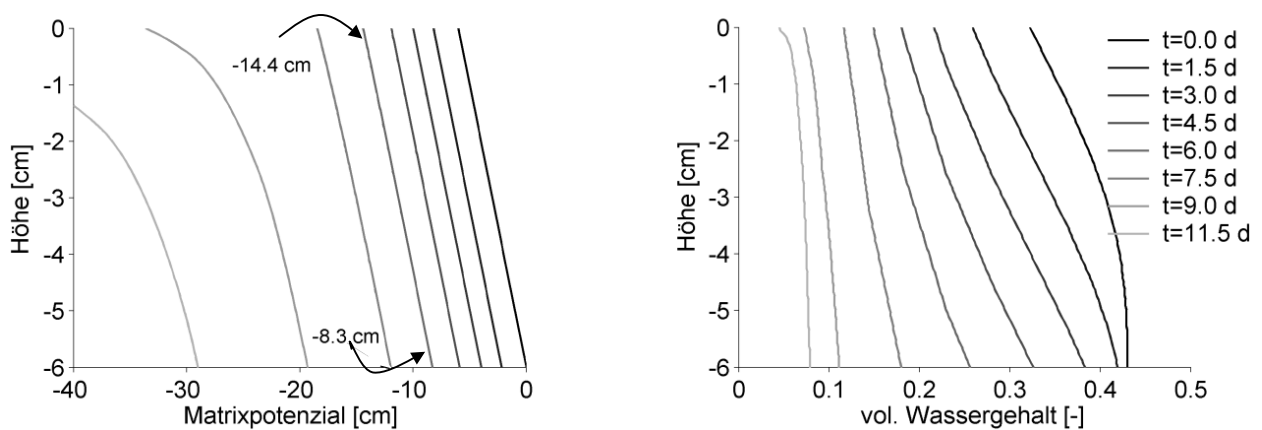


Bild 3: Potentialverteilung und Wassergehaltsverteilung über die Säulenhöhe zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei einem Sand.

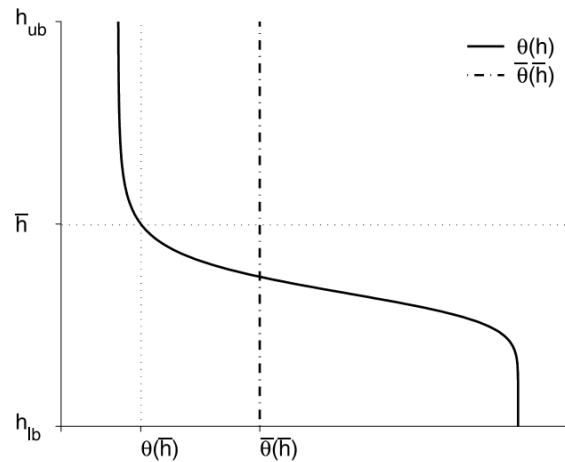


Bild 4: Schematische Illustration einer nichtlinearen Wassergehaltsverteilung in einer Bodenprobe bei voller Wassersättigung am unteren Probenrand. Das Matrixpotential h ist als Abszisse in der Abbildung vertikal aufgetragen. Unter hydrostatischen Bedingungen entspricht h numerisch gerade dem Abstand z vom unteren Rand: ($h(z) = -z$). Der skizzierte Wassergehalt zeigt somit den vertikalen Verlauf $\theta(z)$. h_{lb} und h_{ub} sind die Matrixpotentiale am unteren und oberen Rand der Probe. Die Abbildung verdeutlicht, dass der mittlere Wassergehalt der Probe $\bar{\theta}(\bar{h})$, welcher in der üblichen Auswertungsmethodik dem mittleren Matrixpotential \bar{h} zugeordnet wird, nicht mit dem wahren Wassergehalt beim mittleren Matrixpotential $\theta(\bar{h})$ übereinstimmt.

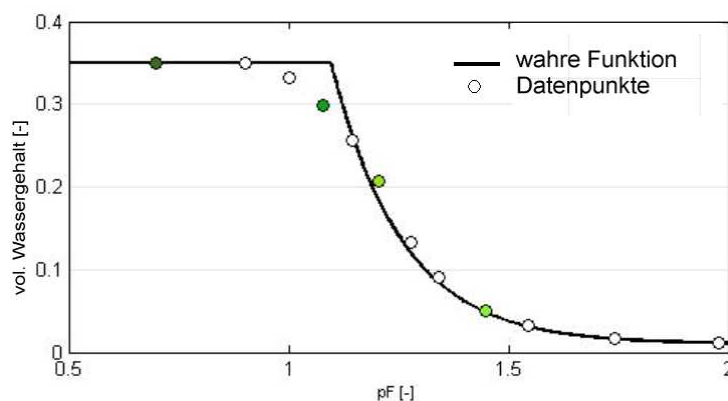


Bild 5: Fehlerhafte Glättung einer Brooks-und-Corey Retentionsfunktion bei klassischer Auswertungstechnik. Der pF -Wert ist definiert durch $pF := \lg(-h)$, mit h = Druckhöhe in cm. $pF = 0$ entspricht einer Wassersäule von -0.01 m, $pF = 2$ einer Wassersäule von -1.0 m.

Bei bekannter Potentialverteilung kann auf die Annahme der linearen Wassergehaltsverteilung verzichtet werden, wenn bei der Parameterschätzung zur Beschreibung der Messdaten ein integraler Ansatz gewählt wird (PETERS und DURNER, 2006). Dieser Ansatz interpretiert die gemessenen Wassergehalte nicht als Punktmessungen, sondern als Mittelwerte einer Wassergehaltverteilung über die Säulenhöhe. Dieser Mittelwert wird ermittelt durch Integration der Retentionsfunktion vom Potential am unteren Säulenrand, h_{lb} , bis zum Potential am oberen Säulenrand, h_{ub} :

$$\bar{\theta}(h) = \frac{1}{h_{ub} - h_{lb}} \int_{h_{lb}}^{h_{ub}} \theta(h) dh \quad (2)$$

Die zu minimierende Zielfunktion für die integrale Methode wird somit durch Gleichung 3 beschrieben:

$$\Phi(\boldsymbol{\beta}) = \sum_{i=1}^r w_i \left[\bar{\theta}_i - \frac{1}{L} \int_{h_{lb_i}}^{h_{ub_i}} \hat{\theta}(\boldsymbol{\beta}, h) dh \right]^2 \quad (3)$$

wobei r die Anzahl und w_i die Wichtungen der einzelnen Messungen sind. $\bar{\theta}_i$ ist der zum Zeitpunkt i gemessenen mittlere Wassergehalt, L ist die Säulenhöhe, und $\hat{\theta}$ ist die modellierte Retentionsfunktion in Abhängigkeit vom Matrixpotential und dem Parametervektor $\boldsymbol{\beta}$, der die zu optimierenden Größen Restwassergehalt, Sättigungswassergehalt, gesättigten Leitfähigkeit, etc. enthält. Der errechnete Wassergehalt entspricht in (3) dem Integral der Wassergehaltsverteilung über die Bodensäule. Zur Minimierung von $\Phi(\boldsymbol{\beta})$ können beliebige Methoden der nichtlinearen Regression eingesetzt werden.

Durch die integrale Methode wird der räumliche Linearisierungsfehler eliminiert. Bild 6 illustriert dies an einem Beispiel mit synthetischen (d.h. bekannten) Daten. Die über einen klassischen Fit ermittelte Retentionsfunktion liegt perfekt auf den mittlere Werte ausdrückenden Messdaten, und weicht deshalb systematisch ab von der wahren zugrundeliegenden Funktion. Die durch den integralen Fit ermittelte Retentionskurve liegt (scheinbar falsch) neben den Messdaten, repräsentiert aber fehlerlos die wahre Funktion. Bild 7 verdeutlicht, dass die Unterschiede insbesondere dann bedeutend sein können, wenn strukturierte Porensysteme vorliegen und die Retentionsfunktion zur Vorhersage der hydraulischen Leitfähigkeit verwendet wird. Beides ist in realen Böden die Regel.

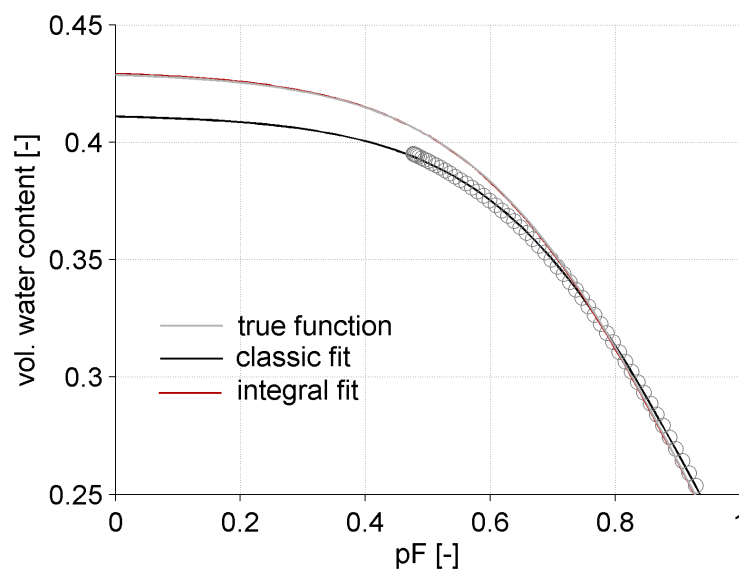


Bild 6: Vergleich von klassischer und integraler Anpassung mit wahrer Funktion bei einem Grobsand. Die wahre Funktion (grau), mit der die Messdaten erzeugt wurden (graue Kreise) ist von der durch den „integral fit“ ermittelten Funktion (rot, durchgezogen) nicht zu unterscheiden, d.h., die Identifikation ist fehlerfrei.

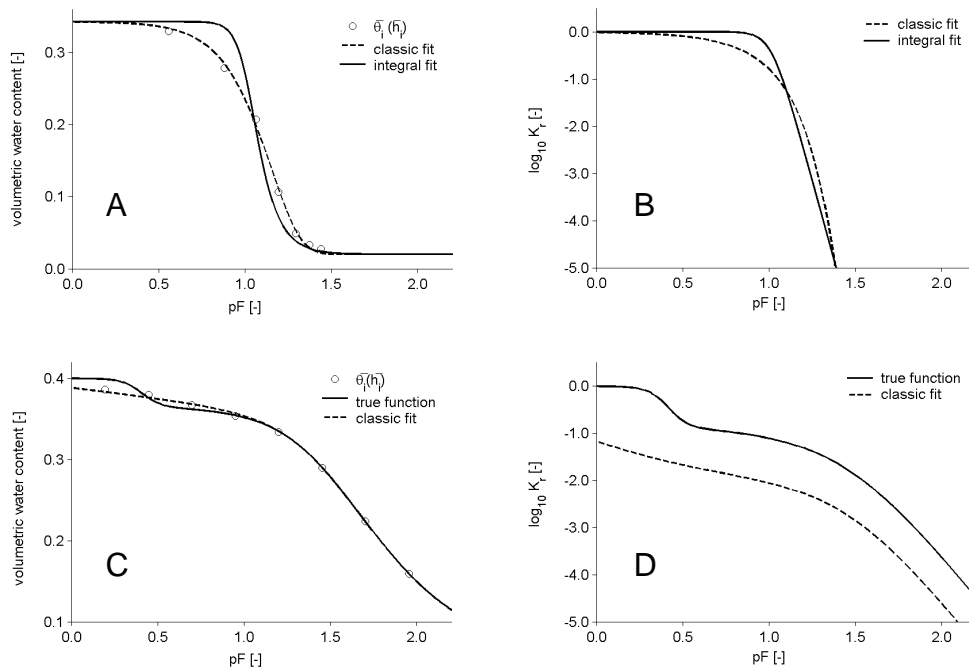


Bild 7: A) Vergleich des klassischen und integralen Fits bei einer unimodalen Retentionsfunktion. B) Vorhersage der relativen hydraulischen Leitfähigkeit aus A) mit dem Mualem-Integral. C) Anwendung der klassischen und integralen Methode auf reale Messdaten mit Strukturporensystem. D) Daraus resultierende Vorhersage der relativen hydraulischen Leitfähigkeit. Es ist erkennbar, dass der vorhergesagte Leitfähigkeitsverlauf in strukturierten Porensystemen im feuchten Bereich dramatisch falsch eingeschätzt wird, was sich auf den gesamten Leitfähigkeitsverlauf auswirkt, wenn die gesättigte Leitfähigkeit als „matching Point“ verwendet wird (Durner, 1994).

2.5 Bestimmung der $K(h)$ -Funktion nahe Sättigung

Eine Limitierung der Verdunstungsmethode liegt darin, dass sie aufgrund großer Unsicherheiten bei der Berechnung des hydraulischen Gradienten (∇H) nur wenig Informationen für die $K(h)$ -Funktion nahe Sättigung liefert. Die Unsicherheit von ∇H ist gegeben durch: $\sigma_{\text{gradH}} = (\sigma_h \cdot \sqrt{2}) / \Delta z$. Dabei sind σ_h der Fehler einer einzelnen Tensionsmessung und Δz der als fehlerlos angenommene Tensiometerabstand. Wir schlagen vor, alle $K(h)$ -Datenpaare die aus einem Gradienten kleiner als $6 \cdot \sigma_{\text{gradH}}$ resultieren aufgrund der hohen Unsicherheit zu verwerfen (Bild 8).

2.6 Erweiterung des Messbereichs zum Trockenen

Die Anwendbarkeit des Verdunstungsverfahrens ist zum trockenen Bereich hin eingeschränkt durch den begrenzten Messbereich der bisher verwendeten Tensiometer. Eine Erweiterung bietet die Verwendung neuartiger Tensiometer. Mit Siedeverzug konnten Saugspannungen bis 430 kPa gemessen werden, mit osmotischen Tensiometern bis 1600 kPa (van der Ploeg et al., 2009). Eine weitergehende Erweiterung liegt in der Nutzung des Luftdurchtrittspunktes des keramischen Materials der Tensiometerzelle, welches die erweiterte Quantifizierung der hydraulischen Kennfunktionen bis etwa 800 kPa erlaubt. Ein Beispiel an Messdaten eines tonigen Substrates ist in Bild 9 zu sehen, die Erweiterung für die Auswertung in Bild 10.

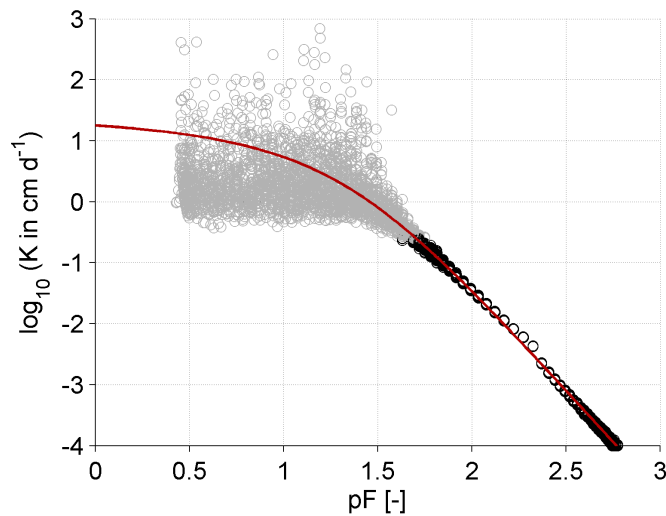


Bild 8: Wahre $K(h)$ -Funktion (Linie) und Datenpunkte, die aus einer Monte-Carlo-Simulation des Verdunstungsverfahrens mit zufallsausgelenkten Messdaten gewonnen wurden. Bodenart: Lehm. Schwarz: akzeptierte Werte; grau: abgelehnte Werte. Tensiometerfehler $\sigma_h = 0.2$ cm, Tensiometerabstand $\Delta z = 3$ cm ($\sigma_{\text{gradH}} = 0.094$). Es ist zu erkennen, dass die Streuung der unsicheren Daten nicht normalverteilt um die wahre Funktion herum erfolgt (Peters und Durner, 2008a).

2.7 Anpassung von analytischen Funktionen

Zur Anpassung von hydraulischen Funktionen an die ermittelten Messdaten wurde das Softwarepaket SHYPFIT 2.0 (Durner und Peters, 2009) mit einer Reihe von Eigenschaften geschaffen, die für ein bestmögliches Fitting-Ergebnis von Belang sind. Die Retentionsfunktion kann aus einer Palette von parametrischen Modellen gewählt werden, die sich von klassischen unimodalen Modellen über bimodale Modelle bis hin zu frei geformten Funktionen erstreckt. Systematische Fehler der Parameterschätzung, welche aus Nichtlinearitäten des vertikalen Wassergehaltsprofils in gemessenen Bodenproben resultieren, werden durch Verwendung einer integrierten Wassergehaltsberechnung in der Objektfunktion, wie im Abschnitt 2.4 dargestellt, eliminiert. Die Leitfähigkeitsfunktion wird gekoppelt mit der Retentionsfunktion an die vorhandenen Daten angepasst, wobei für die simultane Anpassung an beide Datentypen ein innovativer balancierter Gewichtsansatz verwendet wird. Als Modell für die Retentionsfunktion können neben den klassischen Porenbündelmodellen von BURDINE oder MUALEM alternativ auch verbesserte Kapillar-Filmflussmodelle gewählt werden (PETERS und DURNER, 2008B). Diese ergeben im mittleren bis trockenen Feuchtebereich eine wesentlich bessere Übereinstimmung mit Messdaten, als dies mit den typischerweise verwendeten VAN-GENUCHTEN-MUALEM oder BROOKS-COREY-BURDINE-Modellen möglich ist. Die Parameterschätzung erfolgt mit einem globalen Optimierer, der zu einer zuverlässigen globalen Parameterkonvergenz führt und die Angabe von Anfangswerten für die Schätzung überflüssig macht.

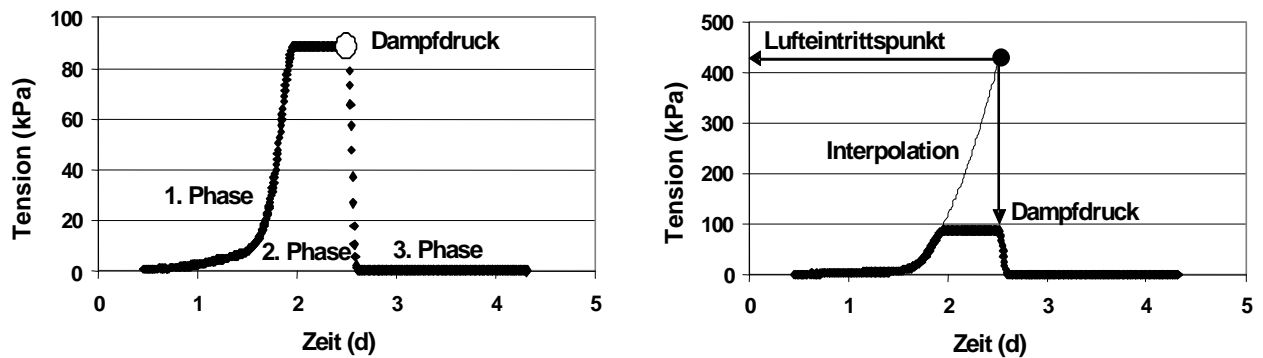


Bild 9: Durch Tensiometermessung angezeigte Tensionsdynamik während der Verdunstung (links) und Interpolation der Daten bis zum Lufttrittspunkt des Tensiometers am Beispiel eines Tonbodens aus Campus Novus (Brasilien, SC). T bezeichnet den gültigen Messbereich des Tensiometers, der durch den Dampfdruck des Wassers im Tensiometerkörper limitiert ist. Die Interpolation wird zwischen diesem Bereich und dem Lufttrittspunkt vorgenommen.

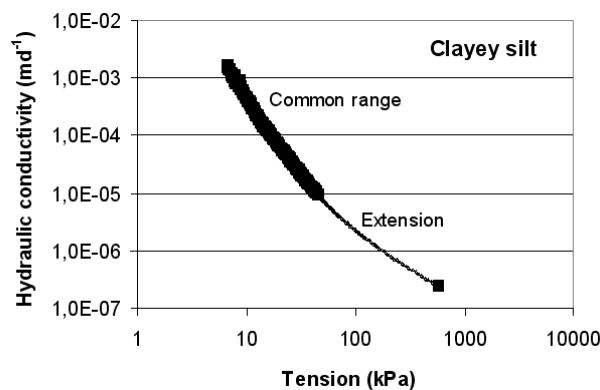


Bild 10: Darstellung der hydraulischen Leitfähigkeitsdaten, die im üblichen Tensiometermessbereich gewonnen wurden, sowie Erweiterung des Messbereichs durch Einbeziehung des Lufttrittspunktes der Tensiometerkeramik als zusätzlichem Messwert.

3. Schlussfolgerungen

Das Verdunstungsverfahren im Design nach SCHINDLER (1980) erlaubt die simultane Messung der hydraulischen Leitfähigkeit und der Wasserretentionsfunktion von Bodenproben mit einer besonders hohen Sensitivität im mittleren Feuchtebereich. Durch die Vielzahl der Messwerte kann das Porensystem präzise beschrieben werden. Mit den genannten Verbesserungen des Auswerteverfahrens nach PETERS und DURNER (2008A) erweist sich die Methodik für homogene Proben als sehr genau. Der Linearisierungsfehler für die Wassergehaltsverteilung, welcher bei Vorhandensein von großen Poren zur Wahl eines „falschen“ Retentionsmodells verleiten und die Leitfähigkeitsvorhersage verfälschen kann, wird durch die integrale Formulierung der Zielfunktion bei der Parameterschätzung nach Gl. (3) vermieden. Die durch die übrigen Linearisierungsannahmen bedingten Fehler sind erstaunlich gering. In Kopplung mit einem robusten Anpassungs-

verfahren für die gekoppelten hydraulischen Funktionen ergibt sich ein Verfahren, welches bei geringem Messaufwand zu sehr präzise bestimmten hydraulischen Funktionen für Bodenproben in Stechzylindern führt.

Zusammenfassend ist das vereinfachte Verdunstungsverfahren ein schnelles, dabei robustes und praxistaugliches Verfahren zur simultanen Bestimmung hydraulischer Parameter von Bodenproben. Das Verfahren findet seine Grenzen in stark skeletthaltigen Böden sowie bei Böden, die zu starker Quellung und Schrumpfung neigen. Da nur die Entwässerung gemessen wird, kann es ferner nicht zur Bestimmung der Hysterese der hydraulischen Funktionen verwendet werden. Das vorgestellte Verfahren wird seit 2008 von der Firma UMS München unter der Produktbezeichnung HYPROP als Hardware+Software-Paket für 250 cm³-Stechzylinder vertrieben, wobei alle genannten Innovationen wie der integrale Fit berücksichtigt sind, und neben der Textausgabe eine grafische Darstellung der ermittelten Daten und der gefitteten Funktionen erfolgt.

4. Literatur

- DURNER, W. (1994): *Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure*, Water Resour. Res. 30, 211-223.
- DURNER W., UND A. PETERS (2009): *SHYPFIT 2.0 – Software zur Anpassung hydraulischer Funktionen an Messdaten*. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, im Druck.
- DURNER, W., UND H. FLÜHLER (2005): Chapter 74: *Soil Hydraulic Properties*, in: Anderson M.G. und J. J. McDonnell, Encyclopedia of Hydrological Sciences, Chapter 74, 1103-1120, John Wiley & Sons, Ltd.
- DURNER, W., UND K. LIPSUS (2005): Chapter 75: *Determining Soil Hydraulic Properties*, in: Anderson M.G. und J. J. McDonnell, Encyclopedia of Hydrological Sciences, Chapter 75, 1121-1144, John Wiley & Sons, Ltd.
- DURNER, W., U. JANSEN, und S.C. IDEN (2008): *Effective hydraulic properties of layered soils at the lysimeter scale determined by inverse modelling*, European Journal of Soil Science, 59, 114-124. doi: 10.1111/j.1365-2389.2007.00972.x.
- HOPMANS, J.W., J. ŠIMUNEK, N. ROMANO, UND W. DURNER (2002): *Simultaneous determination of water transmission und retention properties - Inverse methods*. p 963-1008., In J.H. Dane und G.C. Topp (Eds.): *Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods*. 4th Edition. SSSA Book Series No. 5, American Society of Agronomy und 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 Resour. Res. VOL. 43, W07451, doi:10.1029/2006WR005845.
- IDEN, S.C. UND W. DURNER (2008): *Free-Form estimation of soil hydraulic properties using Wind's method*, European Journal of Soil Science, 59(6), 1228 - 1240, doi:10.1111/j.1365-2389.2008.01068.x
- PETERS, A., UND W. DURNER (2006): *Improved estimation of soil water retention characteristics from hydrostatic column experiments*, Water Resour. Res.,42, W11401, doi:10.1029/2006WR004952.

- PETERS, A. UND W. DURNER (2008A): *Simplified Evaporation Method for Determining Soil Hydraulic Properties*, Journal of Hydrology 356, 147– 162, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.04.016
- PETERS, A. UND W. DURNER (2008B): *A simple model for describing hydraulic conductivity in unsaturated porous media accounting for film und capillary flow*, Water Resour. Res., 44, W11417, doi:101029/2008WR007136.
- PRIESACK, E., UND W. DURNER (2006): *Closed-form expression for the multi-modal unsaturated conductivity function*, Vadose Zone Journal 5: 121-124
- SCHINDLER, U. (1980), *Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben*, Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd., 24, 1-7.
- SCHINDLER, U. UND L. MÜLLER (2006): *Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties*. Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 169, 623–629, doi: 10.1002/jpln.200521895.
- VAN DER PLOEG, M.J., H. P. A. GOOREN, G. BAKKER, C. W. HOOGEN DAM, C. HUISKES, L. K. KOOPAL, H. KRUIDHOF, AND G. H. DE ROOIJ1 (2009): *Polymer tensiometers with ceramic cones: performance in drying soils and comparison with water-filled tensiometers and time domain reflectometry*. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 6, 4349-4377, 2009.
- WATSON, K. K. (1966): *An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials*, Water Resour. Res., 2, 709–715.
- WIND, G.P. (1968): *Capillary conductivity data estimated by a simple method*. In: *Water in the Unsaturated Zone*, Proceedings of Wageningen Symposium, June 1966 Vol.1 (eds P.E. Rijtema & H Wassink), pp.181–191, IASAH, Gentbrugge, Belgium.