

Prozessanalyse der Verdunstung als Grundlage zur verbesserten Messung hydraulischer Kennfunktionen von Böden

Uwe Schindler^{1*}, Wolfgang Durner², Georg von Unold³ und Lothar Müller¹

Zusammenfassung

Das Verdunstungsverfahren ermöglicht die simultane Messung der Wasserretentionskurve und der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion. Der Einsatz des Verfahrens war limitiert durch den eingeschränkten Messbereich zwischen 0 und 500 hPa. Aufgrund hoher Anforderungen an die Wägegenauigkeit benötigte bislang jede Probe ihre eigene Waage. Das führte zu gesteigerten Geräte- und Verfahrenskosten. Durch die Anwendung von Verdunstungsfunktionen für die Quantifizierung des Fluxes kann die Präzision der Wägegenauigkeit deutlich gemindert werden, und die Kosten werden gesenkt. Die Verwendung von Sieverzugtensiometern und die Nutzung des Luft Eintrittspunktes der Tensiometerkeramik ermöglicht die Messerweiterung bis nahe dem permanenten Welkepunkt. Diese technischen Neuerungen und eine umfassende Software zur Datenerfassung und Datenverarbeitung sind Bestandteil des Messsystems HYPROP.

Summary

The evaporation method allows the simultaneous measurement of the water retention curve and hydraulic conductivity function. The use of the method was restricted by the limited measurement range between 0 and 500 hPa. Due to high requirements on the weighing accuracy, each sample needed its own balance. This led to high costs for the equipment and measurements. Applying evaporation functions for quantifying fluxes reduces costs while remaining the accuracy of the measurement results. The application of cavitation tensiometers and the use of the air entry value of the tensiometers ceramic cup allow extending the measurement range close to the wilting point. These technical innovations combined with a special software for data collection and data processing are part of the measurement system HYPROP.

Einleitung

Kenntnisse zu hydraulischen Kennfunktionen von Böden sind Voraussetzung für die Bearbeitung ökologischer und ökonomischer Fragestellungen terrestrischer Ökosysteme. Das betrifft sowohl die Eigenschaft, Wasser zu speichern als auch den Transport von Wasser und den darin gelösten Stoffen durch den Boden.

Die Messung der Wasserretentionsfunktion erfolgt in vielen Laboreinrichtungen in der Kombination von drei Geräten. Mit der Sandbox (CRESSWELL et al. 2008) werden die Wasserspeichereigenschaften bis etwa 100 hPa gemessen. Die Kaolinbox erweitert den Messbereich bis 500 hPa. Für den hohen Druckbereich bis zum permanenten Welkepunkt kommt gewöhnlich der Drucktopf zum Einsatz. Neben der sehr langen Messzeit zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes und den hohen Kosten für die Geräteausrüstung wirken insbesondere beim Drucktopf die Druckstabilisierung und die Verwendung sehr kleiner und noch dazu gestörter Bodenproben limitierend (DANE and HOPMANS 2002). Für die Messung der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion ist die Multistep-Outflow Methode gebräuchlich. Durch

die Verwendung von Tensiometern ist der Messbereich bis maximal 500 hPa begrenzt.

Das Verdunstungsverfahren (WIND 1966, BECHER 1970, SCHINDLER 1980, PLAGGE 1991, WENDROTH et al. 1993) ermöglicht die simultane Messung beider Kennfunktionen. Der Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass die hydraulischen Funktionen aus einem natürlichen Prozess, der Verdunstung, abgeleitet werden. Die Messkurven werden durch eine Vielzahl von Wertepaaren im gesamten Messbereich in hoher Güte beschrieben, und die Handhabung ist sehr einfach. Begrenzend wirken der eingeschränkte Messbereich (maximal 500 hPa) und die kostenintensive Forderung, dass aufgrund hoher Anforderung an die Wägegenauigkeit die Probe während der Messung auf der Waage verbleiben muss.

Die nachfolgend vorgestellten Neuerungen ermöglichen

- eine Kostenreduzierung durch Minderung der Anforderungen an die Wägegenauigkeit bei Einhaltung der Messgüte (SCHINDLER et al. 2006) und
- eine Erweiterung des Messbereiches bis nahe dem permanenten Welkepunkt (SCHINDLER et al. 2010a, SCHINDLER et al. 2010b).

¹ Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF), Institut für Landschaftswasserhaushalt, Eberswalder Str. 84, D-15374 MÜNCHENBERG

² Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik, TU Braunschweig, Langer Kamp 19c, D-38106 BRAUNSCHWEIG

³ UMS GmbH, Gmunderstr. 37, D-81379 MÜNCHEN

* Ansprechpartner: Dr. Uwe Schindler, uschindler@zalf.de

Tabelle 1: Basisdaten für Verdunstungsuntersuchungen

Texturgruppe	Kürzel	n	v mm d ⁻¹	p cm ³ cm ⁻³	ρ_b g cm ⁻³
Ton und lehmig schluffiger Ton	Tt, Tl, Tu2, Tu3, Tu4	8	3.90 (1.9-5.8)	0.51 (0.32-0.8)	1.36 (0.62-1.69)
Sandig, schluffig toniger Lehm	Ls2, Ls3, Ls4, Lts, Lu, Lt2, Lt3	26	2.60 (0.6-4.3)	0.45 (0.32-0.6)	1.53 (1.3-1.86)
Lehmiger und toniger Sand	Sl2, Sl3, Sl4, St2, St3	23	3.20 (1.9-5.7)	0.35 (0.31-0.41)	1.74 (1.62-1.88)
Toniger Schluff	Ut2, Ut3, Ut4, Uls	8	3.30 (0.8-5.7)	0.47 (0.36-0.56)	1.38 (1.17-1.5)
Schluffiger Sand	Su2, Su3, Su4	11	2.32 (1.7-3.8)	0.40 (0.31-0.57)	1.62 (1.16-1.81)
Sand	Ss	18	2.50 (0.6-4.6)	0.40 (0.32-0.52)	1.56 (1.26-1.71)
Torf und Mudde	Hn, F	10	2.90 (1.5-4.2)	0.82 (0.68-0.93)	0.39 (0.09-0.74)

(-) Spannweite, v- Verdunstungsrate, p- Porosität, ρ_b - Trockenrohddichte

Material und Methode

Verdunstungsverfahren nach Schindler (1980)

Kurzbeschreibung: Eine ungestörte Bodenprobe (250cm³) wird wassergesättigt. Die Probe wird mit einem Messkopf verbunden auf dem zwei Tensiometer montiert sind. Die Probe wird mit dem Messkopf verspannt und so basal abgedichtet. Der Messkopf wird mit aufgesetzter Probe auf eine Waage gestellt, und im Zeitintervall werden die Saugspannungen und die Probenmasse online mit einem Computer erfasst. Die Messung ist beendet, wenn Luft in die Tensiometer eindringt und die angezeigte Saugspannung auf 0 zurückgeht. Die Probe wird vom Messkopf entfernt und die Restfeuchte durch Trocknung bei 105°C gemessen. Die Saugspannungs- und Massewerte bilden die Grundlage für die Berechnung der Wasserretentions- und der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion. Aus Bodentrockenmasse und Volumen der Probe wird die Trockenrohddichte berechnet. Die Messzeit ist abhängig von der Verdunstungsrate und der zu verdunstenden Wassermenge und beträgt zwischen 3 und 10 Tagen.

PETERS und DURNER (2008) haben dieses Verfahren hinsichtlich ihrer vereinfachenden Grundannahmen geprüft und als für geeignet bewertet.

Reduzierung der Wägegenauigkeit

Aus einer Datenbank mit über 1500 mineralischen und organischen Bodenproben wurden 104 Proben unterschiedlicher Textur, Trockenrohddichte und organischer Substanz ausgewählt (Tabelle 1) und der Verlauf der Masseabnahme während der Verdunstungsmessung analysiert (SCHINDLER et al. 2006). Die Laborräume waren nicht klimatisiert.

Erweiterung des Messbereiches durch Anwendung von Siedeverzugtensioometern

Der Messbereich eines wassergefüllten Tensioometers endet gewöhnlich bei etwa 700 hPa.

Der Messbereich kann aber erweitert werden, wenn der Siedepunkt des Wassers verzögert wird (SCHINDLER et al. 2010a).

Das kann erreicht werden wenn:

- keine freie Luft im Tensiometerwasser vorhanden ist
- keine Verunreinigungen vorhanden sind die den Siedepunkt beeinflussen
- alle Bauteile des Tensioometers hydrophil und poliert sind, so dass sich keine Luft anlagern kann.

Die verwendeten Tensiometer der Firma UMS wurden genau für diesen Zweck konstruiert.

- Die Oberflächenrauigkeit des Tensioometerschaftes ist minimiert und undurchlässig für Luft.
- Die Tensiometerzelle ist klein. Der Luftdurchtrittspunkt liegt bei etwa 8000 hPa.
- Das Wasservolumen der Tensiometerzelle ist minimiert- 0.33 cm³ bzw. 0.15 cm³.
- Die Reaktionszeit beträgt zwischen 5 und 10 Sekunden.

Erweiterung des Messbereiches durch Nutzung des Lufteintrittspunktes der Tensiometerkeramik

Die Saugspannungsdynamik erfolgt in drei voneinander abgrenzbaren Phasen (Abbildung 1).

1. Phase: Messung repräsentativer Saugspannungen
2. Phase: Erreichen des Siedepunktes. Die Saugspannung sinkt abrupt auf Dampfdruck
3. Phase: Die Saugspannung im Boden wird so groß, dass die größte durchgehende Pore der Tensiometerkeramik entwässert wird. Luft dringt in das Tensiometerinnere ein und der Druck geht auf 0 zurück.

Idee: Da der Lufteintritt in das Tensiometerinnere zeitlich fixiert werden kann, ist es möglich, bei Kenntnis des Lufteintrittspunktes der Tensiometerkeramik zwischen den repräsentativen Saugspannungsmesswerten (Phase 1) und

dem Lufteintrittspunkt der Tensiometerkeramik zu interpolieren und so den Messbereich bis nahe an den Welkepunkt zu erweitern (SCHINDLER et al. 2010b).

Ergebnis

Masseänderung während der Verdunstung und Wägegenauigkeit

- Die Masseabnahme erfolgt kontinuierlich und lässt sich mit hoher Präzision durch eine quadratische Funktion beschreiben (0-500 hPa). Für einen erweiterten Messbereich können auch Polynome höherer Ordnung Verwendung finden. Um den Masseverlauf zu beschreiben sind nur noch wenige Messungen (Minimum 4) erforderlich (Abbildung 2).
- Die auf der Basis von Verdunstungsfunktionen quantifizierten hydraulischen Kennfunktionen sind hinsichtlich Güte und Präzision nicht gemindert.

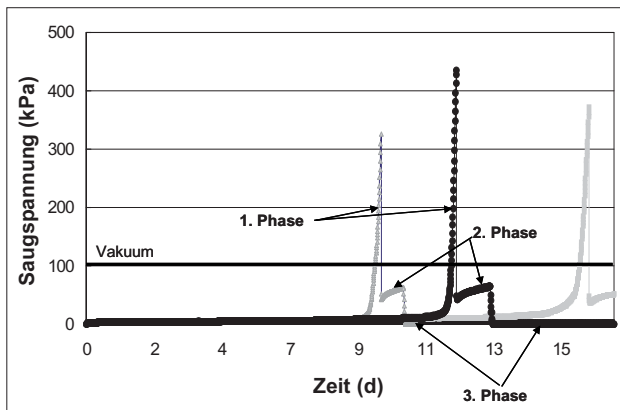


Abbildung 1: Phasen der Saugspannungsdynamik während der Verdunstungsmessung

- Daraus resultiert eine erhebliche Kosteneinsparung. Die Anforderungen an die Wägegenauigkeit sind deutlich geringer (max 0.1 g). Es können preiswertere Waagen verwendet werden, und eine Vielzahl von Proben kann gleichzeitig mit nur einer Waage bemessen werden.

Erweiterung des Messbereiches

Durch Einsatz von Siedeverzugtensiometern und durch Saugspannungsinterpolation (Abbildung 3) zwischen den repräsentativen Saugspannungsmesswerten (Phase 1) und dem Lufteintritt in das Tensiometerinnere (Phase 3) kann der Messbereich bis nahe dem Welkepunkt erweitert werden.

Die Interpolation zwischen Saugspannungsmesswerten und Lufteintrittspunkt kann mit einem Polynom erfolgen. Der Lufteintritt am oberen Tensiometer bestimmt das Messende. Zu diesem Zeitpunkt (t_{end}) entspricht die Saugspannung im Boden am oberen Tensiometer dem Druck am Lufteintrittspunkt der Tensiometerkeramik. Befindet sich das untere Tensiometer zu diesem Zeitpunkt bereits in Phase 2, so wird die zugehörige Saugspannung am unteren Tensiometer aus der Zeit/Saugspannungsinterpolationsfunktion berechnet. Die mittlere Saugspannung ergibt sich als arithmetisches oder im Fall der Messerweiterung besser als geometrisches Mittel der Saugspannung am oberen und unteren Tensiometer. Diese Prozedur ermöglicht eine Messerweiterung bis etwa 6500 hPa (pF 3,8).

Abbildung 4 zeigt die hydraulische Leitfähigkeitsfunktion (links) und die Wasserretentionsfunktion (rechts) in der:

- bisherigen Ausdehnung
- die mögliche Erweiterung durch den Einsatz von Siedeverzugtensiometern und
- die Erweiterung durch die Nutzung des Lufteintrittspunktes der Tensiometerkeramik bis nahe dem permanenten Welkepunkt.

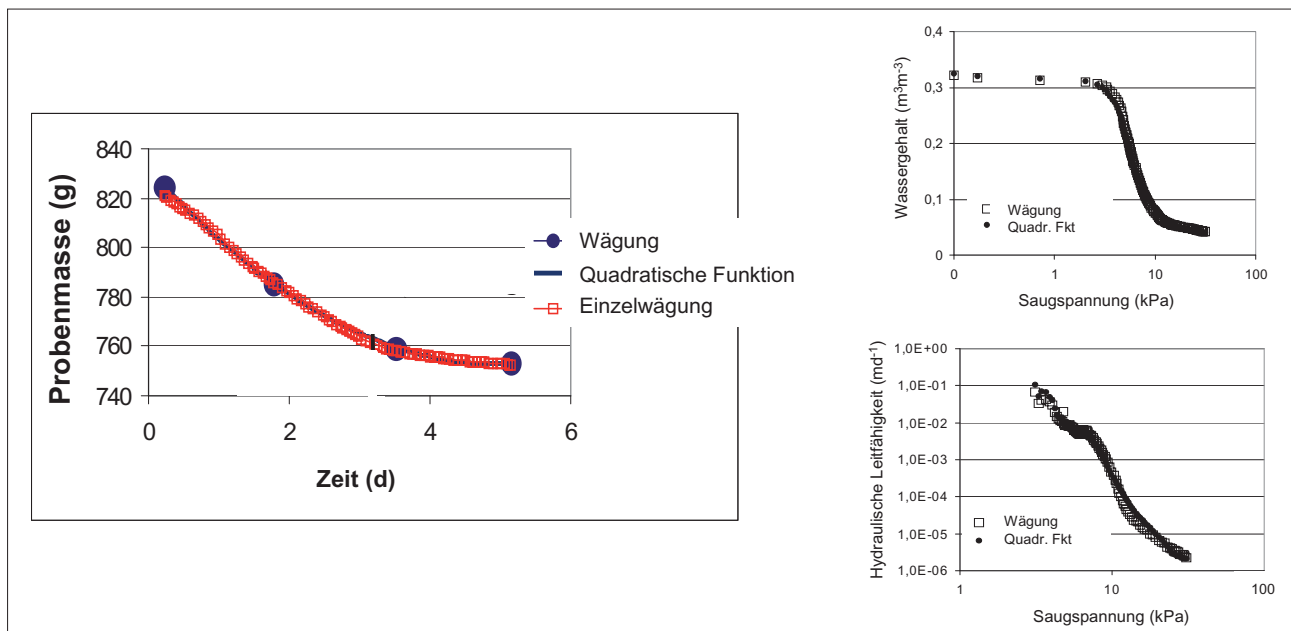


Abbildung 2: Verwendung einer quadratischen Funktion für die Beschreibung der Masseabnahme der Probe während der Verdunstung, Hydraulische Leitfähigkeit (links), und Wasserretentionsfunktion (rechts)

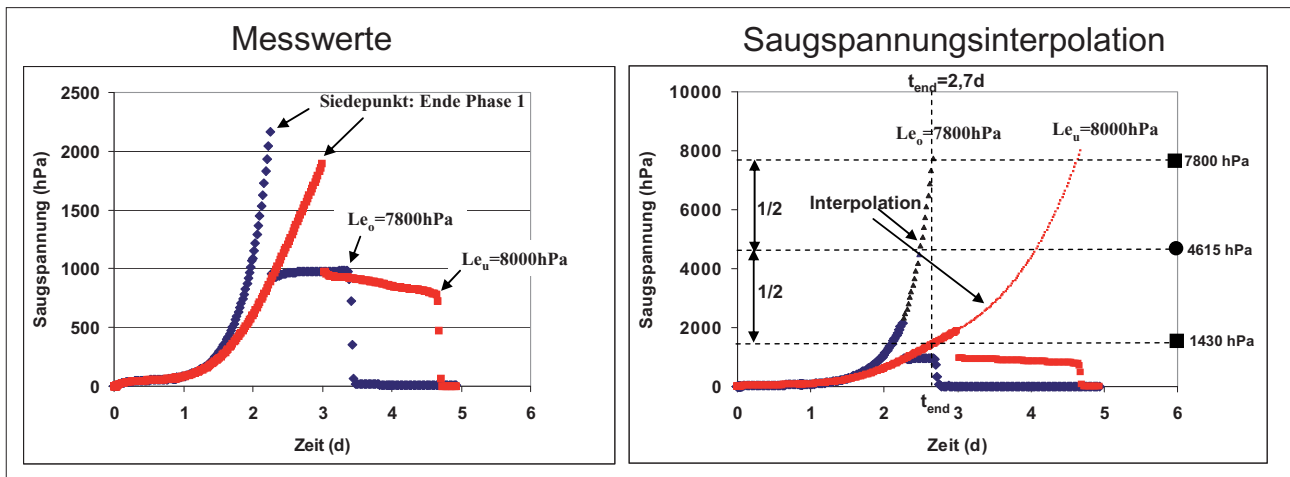


Abbildung 3: Prinzip der Saugspannungsinterpolation zwischen gemessenen Saugspannungen und Lufteintrittspunkt der Tensiometerkeramik

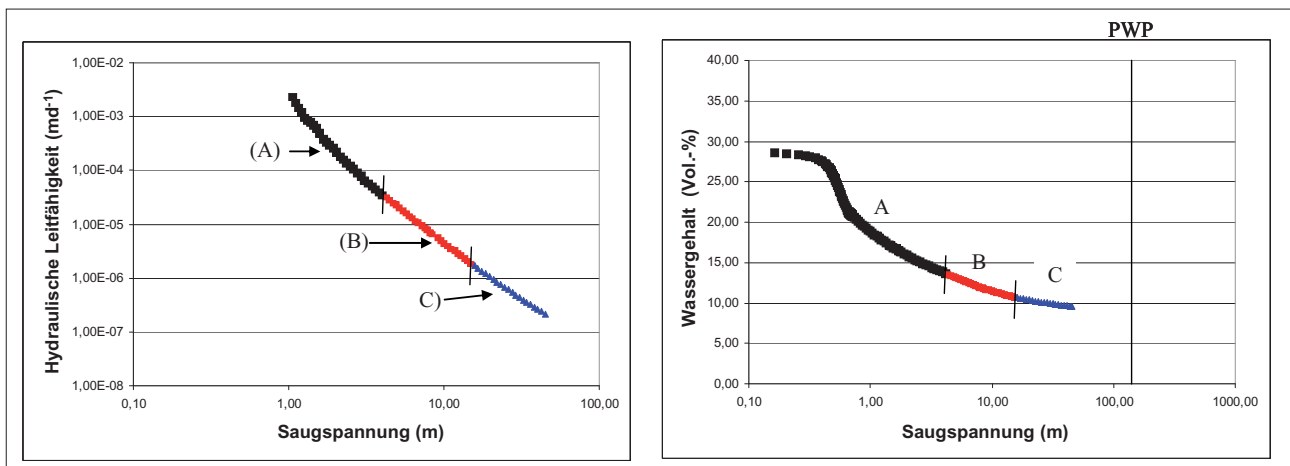


Abbildung 4: Hydraulische Leitfähigkeitsfunktion (links) und Wasserretentionskurve (rechts) mit erweitertem Messbereich

Schlussfolgerungen

Das Verdunstungsverfahren ermöglicht die simultane Messung der hydraulischen Leitfähigkeits- und der Wasserretentionsfunktion. Durch Rücktrocknung am Ende der Messung kann zusätzlich noch die Trockenrohddichte des Bodens gemessen werden. Die Messzeit beträgt 3 bis 10 Tage. Durch die Anwendung von Verdunstungsfunktionen ist die parallele Messung einer Vielzahl von Proben in gleichbleibend hoher Qualität möglich, auch wenn nur eine Waage zur Verfügung steht. Die Anwendung von Siedeverzugtensiometern erlaubt Saugspannungsmessungen bis maximal 4350 hPa und damit eine Erweiterung des Messbereiches für die hydraulischen Kennfunktionen bis maximal 2930 hPa. Die Nutzung des Lufteintrittspunktes der Tensiometerkeramik ermöglicht eine Erweiterung der hydraulischen Funktionen bis nahe dem permanenten Welkepunkt. Ein von SCHELLE et al. (2010) durchgeführter Vergleich von hydraulischen Leitfähigkeitswerten, gemessen mit dem HYPROP System und der Multistep-Outflow Methode, zeigte eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Diese Neuerungen und ein umfassendes Softwarepaket zur Datenerfassung und Datenverarbeitung sind im Messsystem HYPROP der Firma UMS GmbH verwirklicht.

Weitergehende Arbeiten:

- Für die umfassende Nutzung von hydraulischen Kennfunktionen die mit dem Verdunstungsverfahren gemessen werden, ist ein Vergleich zu Ergebnissen der bislang gebräuchlichen Verfahren für die Bestimmung der Wasserretentionsfunktion (Sandbox, Kaolinbox, Drucktopf) erforderlich.
- Der Einfluss von Schrumpfung und Quellung infolge Austrocknung und Wiederbefeuchtung ist zukünftig stärker zu berücksichtigen.

Literatur

- BECHER, H.H., 1970: Ein Verfahren zur Messung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit. Z. Pflanzenenernaehr. Bodenkd. 128:1-12.
- CRESWELL, H.P., T.W. GREEN and N.J. MCKENZIE, 2008: The adequacy of pressure plate apparatus for determining soil water retention. Soil Sci. Soc. Am. J. 55(72):41-49.
- DANE, J.H. and J.W. HOPMANS, 2002: Pressure plate extractor. 688-690. In: J.H. DANE and G.C. TOPP (ed.) Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- PETERS, A. and W. DURNER, 2008: Simplified Evaporation Method for Determining Soil Hydraulic Properties. Journal of Hydrology 356, 147-162, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.04.016.

- PLAGGE, R., 1991: Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit im Boden. Ph.D. Thesis. Technical University Berlin, Institute of Ecology, Department Soil Science. 152 pp.
- SCHELLE, H., S.C. IDEN, A. PETERS and W. DURNER, 2010: Analysis of the agreement of soil hydraulic properties obtained from multistep-outflow and evaporation methods. *Vadose Zone J.* 9. 1-11. doi:10.2136/vzj2010.0050.
- SCHINDLER, U., 1980: Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd., Berlin* 24: 1-7.
- SCHINDLER, U. and L. MÜLLER, 2006: Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties. *J. of Plant Nutrition and Soil Science*, 169: 623-629.
- SCHINDLER, U., W. DURNER, G. von UNOLD and L. MUELLER, 2010a: Evaporation method for measuring unsaturated hydraulic properties of soils: Extending the Range. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74:1071-1083.
- SCHINDLER, U., W. DURNER, G. von UNOLD, L. MUELLER and R. WIELAND, 2010b: The evaporation method – Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup. *J. of Plant Nutrition and Soil Science* 173, 563-572. doi: 10.1002/jpln.200900201.
- WENDROTH, O., W. EHLERS, J.W. HOPMANS, H. KAGE, J. HALBERTSMA and J.H.M. WÖSTEN, 1993: Reevaluation of the evaporation method for determining hydraulic functions in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1436-1443.
- WIND, G.P., 1968: Capillary conductivity data estimated by a simple method. In: *Proc. UNESCO/IASH Symp. Water in the unsaturated zone.* Wageningen, The Netherlands. 181-191.