

# Messung bodenhydraulischer Kennfunktionen von Böden im Labor im Zyklus Austrocknung und Wiederbefeuchtung

Uwe Schindler<sup>1\*</sup>, Georg von Unold<sup>2</sup> und Lothar Müller<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Das erweiterte Verdunstungsverfahren und das zugehörige Messsystem HYPROP ermöglichen die simultane Bestimmung der Desorptionskurven der Wasserretention und der hydraulischen Leitfähigkeit im Bereich zwischen Sättigung und permanentem Welkepunkt. Wir prüften mit dieser Methode mögliche Hystereseffekte. Durch Wasserzugabe über die Probenoberfläche wurde ein Niederschlagsereignis simuliert. Aus den Messwerten konnten die Sorptionskurven der hydraulischen Kennfunktionen im gesamten Messbereich ermittelt werden. Zusätzlicher technischer Aufwand war nicht erforderlich. Präsentiert werden Messergebnisse von Proben aus Sand, lehmigen Sand und Vulkanasche. Dabei zeigte sich, dass Hysterese der Wasserretentionsfunktion ausschließlich im Saugspannungsbereich zwischen Sättigung und etwa 100 hPa auftritt. Die hydraulische Leitfähigkeit wird für Saugspannungen größer als 100 hPa nicht durch Hysterese beeinflusst. Für geringere Saugspannungen kann keine Aussage getroffen werden.

## Einleitung

Gewöhnlich werden hydraulische Kennfunktionen von Böden- Wasserretentionsfunktion und ungesättigte hydraulische Leitfähigkeitsfunktion- aus Entwässerungsversuchen im Labor abgeleitet. Misst man allerdings den Wassergehalt und die Saugspannung über längere Zeit im Gelände, ist diese Beziehung nicht eindeutig. Bereits HAINS (1930) erkannte, dass sich die Beziehung zwischen Wassergehalt und Saugspannung, auch bezeichnet als Wasserspannung-Wasserretentions- oder pF Kurve, im Zyklus von Austrocknung und Wiederbefeuchtung unterscheiden. Bei gleicher Saugspannung ist der Wassergehalt bei Wiederbefeuchtung geringer als dies im Entwässerungsverlauf gemessen wurde. Man spricht dabei von Hysterese. Die Kenntnis der daraus resultierenden unterschiedlichen hydraulischen Kennfunktionen sind bedeutsam für den Bodenwasser- und Stofftransport (LUCKNER et al. 1989, SIMUNEK 1999, KUTILEK und NIELSEN 1994, ABBASI et al. 2012, LIKOS et al. 2014). Grund von Hysterese in der Beziehung Saugspannung/Bodenwassergehalt sind der sogenannte „Flaschenhalseffekt“, Luftpfehlüsse, Benetzungswiderstände und Unterschiede des Kontaktwinkels zwischen Wasser- und Festphase bei Austrocknung und Wiederbefeuchtung (LUCKNER et al. 1989, KUTILEK und NIELSEN 1994, KOSUGI et al. 2002).

In den letzten Jahrzehnten wurden eine Vielzahl von Methoden und Geräten im Labor (ILNICKI 1982, VIAENE et al. 1994, EBRAHIMI-BIRANG et al. 2007, MALAYA und SCREEDEEP 2010, QI et al. 2011, ABASSI et al. 2012) und Feld (ROAYER und VACHAUD 1975, WATSON et al. 1975, SIMUNEK et al. 1999) entwickelt und getestet. Darauf aufbauend wurden verschiedene Modelle zur Abschätzung der Hysterese erarbeitet (KALUARACHCHI und PARKER 1987, RUSSO et al. 1989, PARKERS et al. 1989, VIAENE et al. 1994, VEREEKEN 1995, SIMUNEK et al. 1999, PHAM et al. 2005, JAVADI und ELKASSAS 2010).

SIMUNEK (1999) zeigte eine Feldmethode, bei der über ein Kegelpermeameter Wasser in den Boden infiltriert wurde. Die Infiltration wurde so lange fortgeführt, bis sich eine konstante Saugspannung im Boden einstellte. Anschließend wurde der Fluss gestoppt, und der Boden entwässerte. Aus den Saugspannungs-/ Bodenwassergehaltswerten wurde die Wasserretentionsfunktion mit Hysterese berechnet. ABBASI et al. (2012) untersuchten den Hystereseprozess an Bodenmonolithen in Labor. ILNICKI (1982) nutzte eine hängende Wassersäule an einer keramischen Platte zur Ent- und Bewässerung der Probe. Eine interessante Methodik stellen QI et al. (2011) vor. Sie modifizierten das Schrumpfungsmessgerät von BOIVIN et al. (2004). Die Entwässerung erfolgte durch Verdunstung von der Probenoberfläche, die Wiederbefeuchtung wurde über eine keramische Platte an der Probenbasis realisiert. Für die Bestimmung des Bodenwassergehaltes stand die Probe auf einer Waage. Die Saugspannung wurde mit einem eingebauten Tensiometer erfasst. EBRAHIMI-BIRANG et al. (2007) verwenden das „Dew-Point Meter“ WP4 zur Messung von Hysterese bei sehr hohen Saugspannungen. Im Institut für Agrophysik in Polen, Lublin wird ein modifizierter Drucktopf verwendet.

Die Messung von Entwässerungs- und Befeuchtungszyklen im Boden ist mit den bekannten Verfahren und Geräten häufig sehr aufwendig, was die gerätetechnischen Voraussetzungen und den Zeitbedarf betrifft. Hinzu kommt, dass die Ergebnisse fast ausschließlich auf die Wasserretentionskurve beschränkt sind und der Messbereich meistens nur einen Ausschnitt der Kurve abbildet. Nachfolgend soll eine einfache Vorgehensweise gezeigt werden, die es ermöglicht, die hydraulischen Kennfunktionen- Wasserretentionskurve und hydraulische Leitfähigkeitsfunktion- im Zyklus von Ent- und Bewässerung im Messbereich zwischen Sättigung und permanenten Welkepunkt zu quantifizieren.

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

<sup>2</sup> UMS GmbH München, Gmunder Str. 37, D-81379 MÜNCHEN

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



## Material und Methode

### Bodenmaterial

Die Untersuchungen erfolgten an Bodenproben unterschiedlicher Textur und Genese (*Tabelle 1*). Insgesamt wurden mehr als 20 Proben analysiert. Darunter waren neben den beispielhaft in *Tabelle 1* aufgeführten Proben auch Tonproben aus dem Oderbruch und Proben aus organischem Bodenmaterial.

### Erweitertes Verdunstungsverfahren (EEM)

Basierend auf dem vereinfachten Verdunstungsverfahren (SCHINDLER 1980) wurde das erweiterte Verdunstungsverfahren (EEM- Extended Evaporation Method) entwickelt (SCHINDLER et al. 2010a, SCHINDLER et al. 2010b). Es erlaubt die simultane Bestimmung der Wasserretentionskurve und der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion von Bodenproben im Bereich zwischen Sättigung und permanentem Welkepunkt. Das Verfahren wurde mehrfach hinsichtlich seiner vereinfachenden Annahmen getestet und als geeignet bewertet (WENDROTH 1990, WENDROTH et al. 1993, PETERS und DURNER 2008). Durch die Firma UMS München wurde in gemeinsamer Arbeit mit einer Entwicklergruppe das zugehörige Messgerät HYPROP (HYdraulic PROProperty analyzer) entwickelt und seit 2008 erfolgreich in die bodenhydrologische Gemeinschaft eingeführt.

### Verfahrensprinzip

Eine Bodenprobe (250 cm<sup>3</sup>), gestört oder ungestört, wird wassergesättigt. Die Probe wird mit dem HYPROP-Messkopf (*Abbildung 1*) verbunden, auf dem zwei unterschiedlich lange (1,25 cm und 3,75 cm) Tensiometer montiert sind. Der Abstand der Tensiometer von 2,5 cm entspricht der Hälfte der Probenhöhe. Die Probe wird mit dem Messkopf verspannt und so basal abgedichtet. Der Messkopf wird mit aufgesetzter Probe auf eine Waage gestellt, die Probenoberfläche der freien Verdunstung ausgesetzt und im Zeitintervall werden die Saugspannungen und die Probenmasse on-line mit einem Computer erfasst. Die Messung ist beendet, wenn Luft in die Tensiometer eindringt und die angezeigte Saugspannung am unteren Tensiometer auf 0 zurückgeht. Die Probe wird vom Messkopf getrennt und die Restfeuchte durch Trocknung bei 105°C gemessen. Die Saugspannungs- und Probenmassewerte bilden die Grundlage für die Berechnung der hydraulischen Kennfunktionen. Die Messkurven sind mit einer Vielzahl von Messwerten belegt. 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.

Das HYPROP System kann darüber hinaus für die Quantifizierung des Schrumpfungsverhaltens von Bodenproben genutzt werden (SCHINDLER et al. 2011). Der Vergleich der Messergebnisse aus HYPROP mit denen klassischer Verfahren (Sandbox, Drucktopf, Multi-step Outflowme-

*Tabelle 1: Bodenmaterial.*

Standort	Bodentyp	Tiefe cm	Horizont	Ton %	Schluff %	Sand %	TRD Mg m <sup>-3</sup>	OBS g kg <sup>-1</sup>
Müncheberg	Cambic Abeluvisol	90	C	0	3	97	1,63	0
Hasenholz	Haplic Luvisol	40	A1	9	44	47	1,63	3
Pelchuquin	Andosol	20	Ap	35	59	6	0,67	230

TDR- Trockenrohddichte, OBS- organische Bodensubstanz



*Abbildung 1: HYPROP System.*

thode) zeigte eine gute Übereinstimmung sowohl bei der Wasserretentionskurve (SCHINDLER et al. 2012, SCHELLE et al. 2013) als auch bei der hydraulischen Leitfähigkeit (SCHELLE et al. 2010).

### Messung hydraulischer Kennfunktionen bei Wiederbefeuchtung

Die gesättigte Bodenprobe wird mit dem HYPROP System verbunden und die Messung wie oben beschrieben gestartet. Während des Verdunstungsprozesses werden Saugspannung und Probenmasse on-line gemessen. Zu einem Zeitpunkt  $t$  wird der Verdunstungsprozess unterbrochen, indem die Probenoberfläche mit freiem Wasser befeuchtet wird. Damit wird ein Niederschlagsereignis, wie es unter natürlichen Bedingungen häufig vorkommt, simuliert. Die Wasserzugabe erfolgt vorzugsweise mit einer Spritze und ggf. einem Verteiler. Es ist darauf zu achten, dass eine möglichst gleichmäßige Befeuchtung der Probenoberfläche erfolgt. Die zuzugebende Wassermenge wird vom Nutzer bestimmt. Aufgrund der Masseänderung der Probe im Verdunstungsverlauf und den zugehörigen Saugspannungen, die auf dem Bildschirm des Computers angezeigt werden, kann der Nutzer den gewünschten Zielpunkt in Abhängigkeit von der zugegebenen Wassermenge in etwa abschätzen. Im Folgeverlauf sinken die Saugspannung des oberen und anschließend des unteren Tensiometers. Der Wiederbefeuchtungsprozess ist abgeschlossen, wenn beide Saugspannungen etwa gleiche Werte aufweisen und die abwärts gerichtete Wasserbewegung in eine aufwärts gerichtete umschlägt, d.h. das obere Tensiometer wieder höhere Werte als das untere aufweist. Der Wassergehalt und die mittlere Saugspannung in der Probe zu diesem Zeitpunkt ergeben den ersten Messwert der Wiederbefeuchtungskurve. Anschließend können eine zweite, dritte oder weitere Befeuchtungen erfolgen, mit jeweils möglicher anschließender Fortführung des Verdunstungsversuches. Nach Abschluss der letzten Befeuchtung kann der Verdunstungsversuch fortgesetzt und ggf. mit Ausfall der Tensiometer beendet werden. Aus den so gewonnenen Messwerten können Wiederbefeuchtungskurven und die daran anschließenden Entwässerungskurven der Wasserretention und der hydraulischen Leitfähigkeit berechnet werden.

### Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 2 zeigt den Zeitverlauf der Saugspannungen im zweimaligen Wiederbefeuchtungszyklus für die Müncheberger Sandprobe. Die erste Unterbrechung des Verdunstungsverlaufes durch Befeuchtung der Probenoberfläche erfolgte bei einer Saugspannung am oberen Tensiometer von etwa 500 hPa. Zuerst sinkt die Saugspannung am oberen Tensiometer. Durch die jetzt sehr großen abwärts gerichteten hydraulischen Gradienten wird nach einer gewissen Zeit das untere Tensiometer und letztendlich die gesamte Probe wiederbefeuchtet. Nachdem sich ein Gleichgewicht zwischen den beiden Tensiometern (das obere und untere Tensiometer zeigen etwa gleiche Werte an) eingestellt hat, wurde wiederholt Wasser zugegeben. Die Befeuchtung wurde nachfolgend noch vier Mal wiederholt, bis in der Probe durch piezometrischer Druck Sättigung angezeigt wurde.

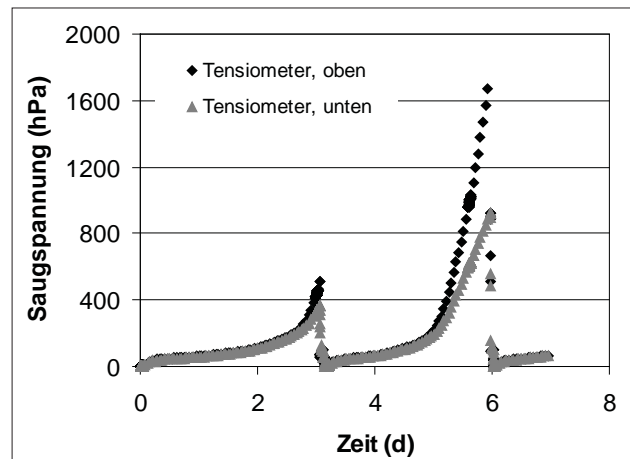


Abbildung 2: Zeitverlauf der Saugspannung am oberen und unteren Tensiometer bei Verdunstung und Wiederbefeuchtung, Sandprobe vom Standort Müncheberg.

Nachfolgend wurde der Verdunstungsprozess fortgesetzt und bei einer Saugspannung am oberen Tensiometer von etwa 1700 hPa wieder durch Befeuchtung der Probenoberfläche unterbrochen. Nach viermaliger Wasserzugabe, wobei bei jeder Wasserzugabe jeweils bis zur GleichEinstellung gewartet wurde, zeigten die Saugspannungen in der Probe Sättigung an.

Die Dynamik der Wasserretentionskurve und der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion ist in *Abbildung 3* dargestellt. Bei der Wasserretention bleibt die Befeuchtungskurve zunächst auf der Entwässerungskurve. Erst bei einer Saugspannung von etwa 100 hPa driftet sie von der Entwässerungskurve ab, so dass die Wassergehalte bei gleicher Saugspannung geringer bleiben. Der Wassergehaltsunterschied beträgt zwischen Ent- und Bewässerungskurve etwa 4 Vol.-%. Würde man die Probe ständig weiter befeuchten, so würde sich der Wassergehalt dem Anfangswassergehalt der Entwässerungskurve anpassen. Das ist in *Abbildung 3* zwar nicht gezeigt, konnte aber experimentell so bestätigt werden. Bei der hydraulischen Leitfähigkeit konnten im dargestellten Messbereich keine Unterschiede nachgewiesen werden. Hier muss allerdings angemerkt werden, dass aufgrund nicht ausreichender Präzision der Tensiometer, hydraulische Leitfähigkeitswerte in Sandproben auch erst ab etwa 100 hPa berechnet werden konnten.

Das Ergebnis, dass sich die Wasserretentionskurven von Ent- und Bewässerung nur im Bereich zwischen Sättigung und etwa 100 hPa unterscheiden, wurde auch so für alle anderen Proben bestätigt. *Abbildung 4* zeigt beispielhaft die Ergebnisse für den lehmigen Sand aus Hasenholz und die Probe aus Vulkanasche aus Pelchuquin, Chile.

Während gewöhnlich davon ausgegangen wird, dass Hysterisis im gesamten Wassergehaltsbereich von Sättigung bis in den trockenen Bereich auftritt (LUCKNER, et al. 1989, SIMUNEK et al. 1999, EBRAHIMI-BIRANG 2012) zeigen die in dieser Studie erlangten Ergebnisse ein anderes Bild. Bei den hier vorgenommenen Untersuchungen trat Hysterisis nur im Bereich zwischen Sättigung und etwa 100 hPa auf. Diese Aussage wird gestützt von ILNICKI (1982), der Hysterisis in organischen Böden nur bis 60

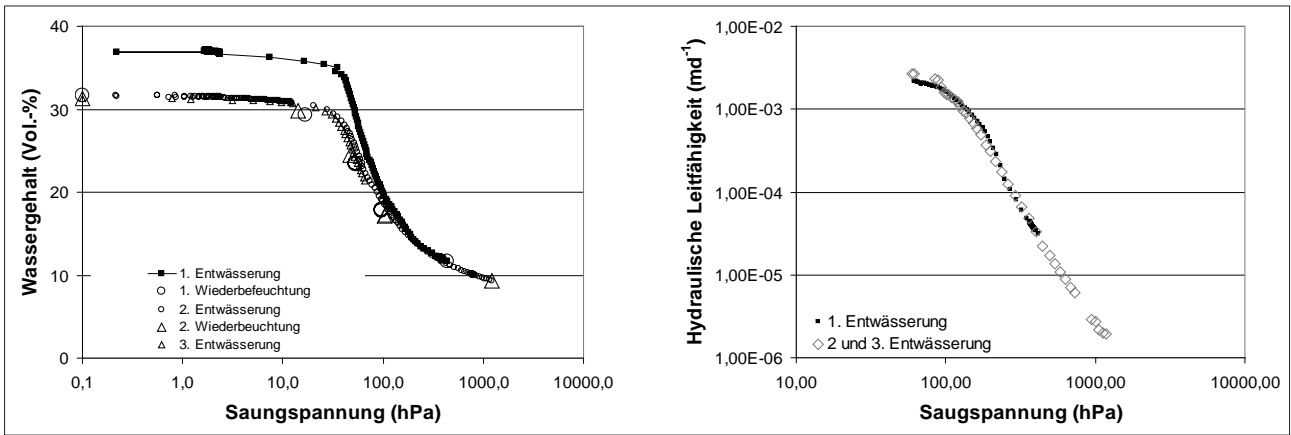


Abbildung 3: Wasserretentionskurve, links und hydraulische Leitfähigkeit, rechts im Zyklus von Austrocknung und Wiederbefeuchtung, Sandprobe, Müncheberg.

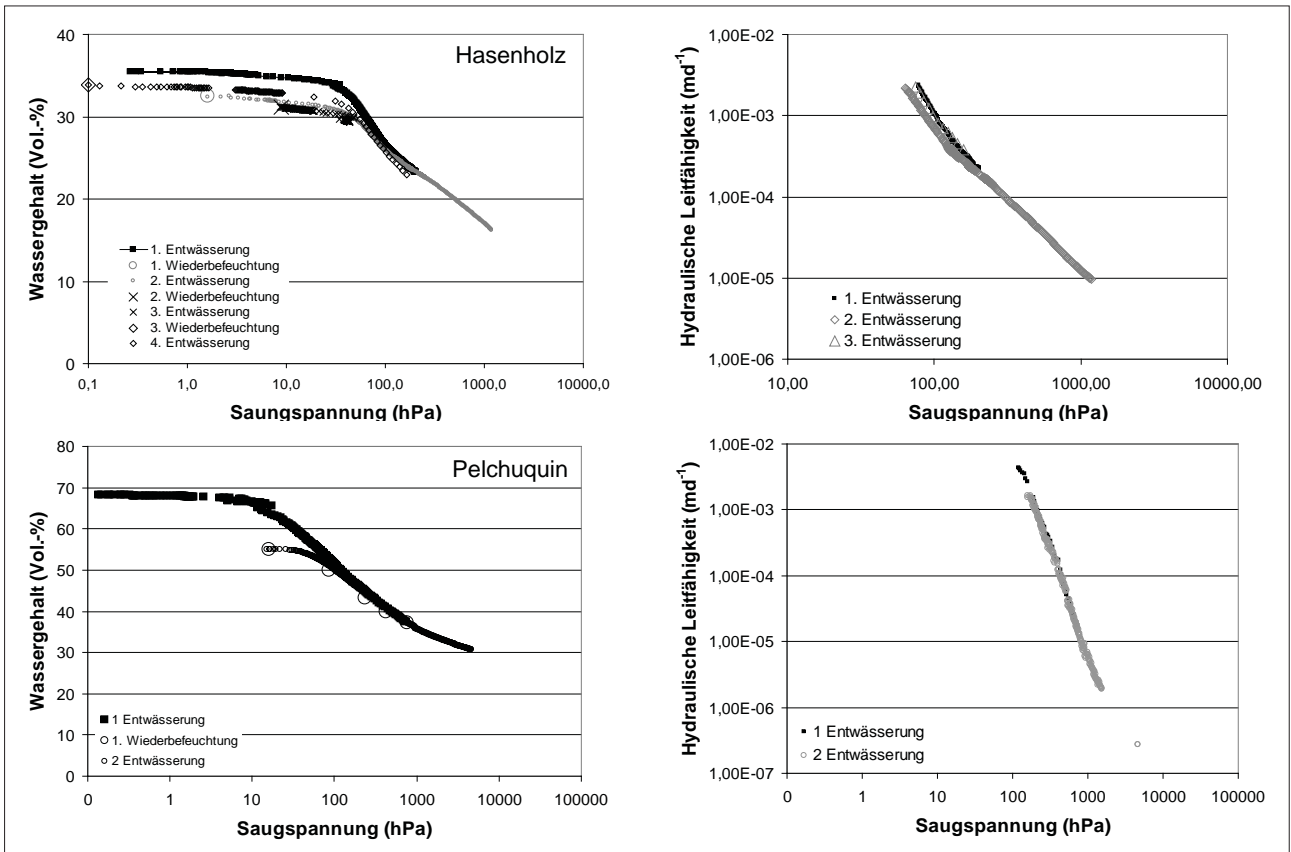


Abbildung 4: Wasserretentionskurve, links und hydraulische Leitfähigkeit, rechts im Zyklus von Austrocknung und Wiederbefeuchtung, rechts der Proben vom Standort Hasenholz und Pelchuquin, Chile.

hPa nachweisen konnte. Auch MAQSOUND et al. (2010) und MALAYA und SCREEDEED (2010) zeigen in ihren Ergebnissen, dass Hysterese der Wasserretentionsfunktion hauptsächlich im Bereich unter 100 hPa abläuft. Worauf diese Unstimmigkeit zurückzuführen ist, sollte in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

### Schlussfolgerungen

Das erweiterte Verdunstungsverfahren (EEM) ermöglicht die simultane Messung der Wasserretentionskurve und der

hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion im Bereich zwischen Sättigung und permanenten Welkepunkt aus dem Entwässerungsprozess. Durch Wasserzugabe über die Probenoberfläche wird ein Niederschlagsereignis simuliert. Aus den Messwerten können darüber hinaus die Bewässerungskurven der hydraulischen Kennfunktionen im gesamten Messbereich abgeleitet werden. Diese Messerweiterung ermöglicht eine effektive Quantifizierung von Hysterese und ist mit dem HYPROP System ohne zusätzlichen technischen Aufwand möglich. In weitergehenden Arbeiten sollte jedoch geklärt

werden, warum Hysterese bei diesen Untersuchungen nur im Saugspannungsbereich zwischen Sättigung und etwa 100 hPa auftritt und nicht wie gewöhnlich angenommen, ein Phänomen im gesamten Wassergehaltsbereich ist.

## Literatur

- ABBASI, F., M. JAVAUX, M. VANCLOOSTER and J. FEYEN, 2012: Estimating hysteresis in the soil water retention curve from monolith experiments. *Geoderma*, 189-190, 480-490.
- EBRAHIMI-BIRANG, E., D.G. FREDLUND and L. SAMARASEKERA, 2007: Hysteresis of the soil water characteristic curve in the high suction rang. *Proc. OttawaGeo Conf.* 1061-1068.
- HAINES, W.B., 1930: Studies in the physical properties of soil: V. The hysteresis effect in capillary properties, and the modes of moisture associated therewith. *Journal of Agricultural Science*, 20, 97-116.
- ILNICKI, P. 1982: Hysterese der Wasserspannungskurve in organogenen Böden. *Z. Pflanzenernährung und Bodenk.* 145, 363-374.
- KALUARACHCHI, J.J. and J.C. PARKER, 1987: Effects of hysteresis with air entrapment on water flow in the unsaturated zone. *Water Resources Research* 23, 1967-1976.
- KOSUGI, K., J.W. HOPMANS and J.H. DANE, 2002: Parametric models. In: Dane, J.H. and Topp, G.C. 2002: *Methods of soil physics. Part 4: Physical Methods*, 739-755.
- KUTILEK, M. and D.R. NIELSEN, 1994: *Soil hydrology. GeoEcology textbook.* Catena Verlag. ISBN 3-923381-26-3, 370 S.
- LIKOS, W., N. LU and J. GODT, 2014: Hysteresis and Uncertainty in Soil Water-Retention Curve Parameters." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 140(4), 04013050.
- LUCKNER, L., M.T. van GENUCHTEN and D.R. NIELSEN, 1989: A consistent set of parametric models for the two-phase flow of immiscible fluids in the subsurface, *Water Resour. Res.*, 25(10), 2187-2193.
- MALAYA, C. and S. SCREEDEEP, 2010. A study on Wetting-soil water characteristic curve of a sand soil. *Proc. Indian Geotechnical Conference*, December 16–18, 2010IGS Mumbai Chapter & IIT Bombay.
- MAQSUD, A., B. BUSSIÈRE and M. MAMERT MBONIMPA, 2004: Hysteresis effects on the water retention curve : A comparison between laboratory results and predictive models. *57<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conference*, 24.-26.10.2004, Quebec, Canada.
- PETERS, A. and W. DURNER, 2008: Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties *J. Hydrol.* 356, 147-162, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.04.016.
- PARKES, M.E., D.B. NAYSMITH, M.A. McDOWALL, 1989: Accounting for slow drainage and hysteresis in irrigation scheduling. *Irrigation Science* 10 (2), 127-140.
- QI, G., J.Ch. MICHEL, P. BOIVIN and S. CHARPENTIER, 2011: A laboratory device for continual measurement of water retention and shrink/swell properties during drying/wetting cycles. *HortScience* 46(9):1298-1302.
- ROYER, J.M. and G. VACHAUD, 1975: Field determination of hysteresis in soil–water characteristic. *Soil Science Society of America Journal* 39, 221-223.
- RUSSO, D., W.A. JURY and G.L. BUTTERS, 1989: Numerical analysis of solute transport during transient irrigation: 1. The effect of hysteresis and profile heterogeneity. *Water Resources Research* 25, 2109-2118.
- 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. doi:10.2136/vzj2010.0050.
- SCHELLE, H., L. HEISE, K. JAENICKE and W. DURNER, 2013: Water retention characteristics of soils over the whole moisture range: a comparison of laboratory methods. *European Journal of Soil Science*, December 2013, 64, 814–821. doi: 10.1111/ejss.12108.
- SCHINDLER, U., 1980: Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk.* Berlin 24, 1, 1-7.
- 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 (4): 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. Plant Nutr. Soil Sci.* 173 (4): 563-572.
- SCHINDLER, U., L. MÜLLER, M. da VEIGA, Y. ZHANG, S.L. SCHLINDWEIN and C. HU, 2012: Comparison of water-retention functions obtained from the extended evaporation method and the standard methods sand/kaolin boxes and pressure plate extractor. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174, 4, 527-534.
- SCHINDLER, U., L. MÜLLER und J. DÖRNER, 2013: Neue Methode zur Quantifizierung bodenhydraulischer Kennfunktionen unter Berücksichtigung von Schrumpfung und Quellung. In: *Böden - Lebensgrundlage und Verantwortung: Jahrestagung der DBG*, 7. - 12. September 2013, Rostock. Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, Oldenburg.
- ŠIMŮNEK, J., R. KODESOVA, M. GRIBB and M.Th. van GENUCHTEN, 1999: Estimating hysteresis in the soil water retention function from cone permeameter experiments. *Water Resources Research* 35, 1329-1345.
- VERECKEN, H., J. DIELS and P. VIAENE, 1995: The effect of soil heterogeneity hysteresis on solute transport: a numerical experiment. *Ecological Modelling* 77, 273-288.
- VIAENE, P., H. VERECKEN, J. DIELS and J. FEYEN, 1994: A statistical analysis of six hysteresis models for the moisture retention characteristic. *Soil Science* 157 (6), 345-355.
- WATSON, K.K., R.J. REGINATO and R.D. JACKSON, 1975: Soil water hysteresis in a field soil. *Soil Science Society of America Journal* 39, 242-246.
- WENDROTH, O., 1990: Koeffizienten des Wasser- und Gastransportes zur Ableitung von Kenngrößen des Bodengefüges. *Diss. Georg-August-Universität zu Göttingen, Fachbereich Agrarwissenschaften*, 173 S.
- WENDROTH, O., W. EHLERS, J.W. HOPMANS, H. KLAGE, J. HALBERTSMA and J.H.M. WOESTEN, 1993: Reevaluation of the evaporation method for determining hydraulic functions in unsaturated soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 1436-1443.