

# Messung hydraulischer Kennfunktionen von Böden unter Berücksichtigung von Quellung und Schrumpfung

Uwe Schindler<sup>1\*</sup> und Lothar Müller<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Die erweiterte Verdunstungsmethode (EEM) ermöglicht die simultane Quantifizierung der hydraulischen Kennfunktionen- Wasserretentionskurve und ungesättigte hydraulische Leitfähigkeitsfunktion- von Bodenproben im Bereich zwischen Wassersättigung bis nahe dem permanenten Welkepunkt. Dabei wird jedoch sowohl bei der erweiterten Verdunstungsmethode (EEM) als auch bei den klassischen Methoden (KMM) davon ausgegangen, dass das Porensystem stabil und unveränderlich ist. Für Ton- und Torfböden trifft diese Grundannahme jedoch nicht zu. Im Zyklus von Wasserentzug und Wiederbefeuchtung schrumpfen und quellen diese Böden, wodurch das Bodenvolumen und die Porenstruktur beeinflusst und die hydraulischen Kennfunktionen verändert werden. Nachfolgend werden eine Methode und ein Gerätesystem vorgestellt, die die simultane Bestimmung der hydraulischen Kennfunktionen unter Berücksichtigung von Quellung und Schrumpfung ermöglichen. Basis ist die erweiterte Verdunstungsmethode (EEM) und das zugehörige Messsystem HYPROP. Die Bodenprobe wird dafür in eine flexible Gummimembran eingehüllt. Zusätzlich zu den kontinuierlichen Messungen der Saugspannung und der Probenmasse wird die Umfangsänderung in der Probenmitte während der Verdunstung aufgezeichnet. Diese Vereinfachung der geometrischen Veränderung basiert auf Ergebnissen von Voruntersuchungen, die eine lineare und isotrope Schrumpfung über die Probenhöhe zeigten. Aus den aufgezeichneten Werten der Saugspannung, der Probenmasse und der Umfangsänderung werden die Wasserretentionskurve und die hydraulische Leitfähigkeitsfunktion unter Berücksichtigung der Schrumpfung quantifiziert. Gebräuchliche Datenmodelle können an die Messdaten gefittet werden.

*Schlagwörter:* erweiterte Verdunstungsmethode, HYPROP, Schrumpfung, bodenhydraulische Funktionen, Wasserretentionsfunktion, hydraulische Leitfähigkeitsfunktion

## Einleitung

Gewöhnlich wird bei der Messung der hydraulischen Kennfunktionen - Wasserretentionsfunktion und ungesättigte hydraulische Leitfähigkeitsfunktion - davon ausgegangen, dass der Boden und sein Porensystem unveränderlich sind. Insbesondere für Ton- und Torfböden entspricht das jedoch nicht der Realität. Im Zuge von Entwässerung oder Befeuch-

## Summary

Generally, soils and their pore size system are assumed to be rigid during loss of water on drying. This is different from reality for many soils, especially for soils with high amount of clay or organic matter content. As the result of shrinking the porosity, the pore size distribution and the bulk density of these soils change. Due to lack of practicable methods, the objective of this study was to find a practicable method which allows the simultaneous determination of soil hydraulic properties- water retention curve and the unsaturated hydraulic conductivity function- in consideration of shrinkage. The extended evaporation method (EEM) and the HYPROP device (**HY**draulic **PROP**erty analyzer) were linked with a circumference meter. Soil samples in steel cylinders do not allow observing geometrical sample changes. Therefore the sample was removed from the cylinder and wrapped into a flexible rubber membrane. The recorded circumference change during drying in the middle position of the sample together with the corresponding tensions and water content were used to determine the hydraulic functions in consideration of shrinkage in the range between saturation and close to the permanent wilting point. The methodological assumptions were derived from preliminary investigations. The method was successfully tested on 24 organic and mineral soil samples different in texture and origin. Common soil hydraulic data models could be fitted to the hydraulic as well shrinkage data and can be used for soil water simulations in rigid as well shrinking soils.

*Keywords:* extended evaporation method, HYPROP, shrinkage, soil hydraulic functions, water retention function, hydraulic conductivity function

tung schrumpfen oder quellen diese Böden, wobei sich das Porensystem und die Bodendichte verändern.

Die Bodenfeuchte wird unter Feldbedingungen mit verschiedenen Sensoren und Methoden gemessen. Alle Messungen erfolgen jedoch in der Bodenmatrix. Änderungen der Bodendichte können und werden nicht berücksichtigt. Das führt zu einer Unterschätzung der Bodenwassergehaltsänderung und

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

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



Tabelle 1: Standortkennzeichnung

Standort	Bodentyp (WRB, 2006)	Tiefe cm	Horizont	Ton %	Silt %	Sand %	TRD Mg m <sup>-3</sup>	OBS g kg <sup>-1</sup>
Seelow 3	Fluvisol (eutric, drainic)	40	Go	56	36	8	1,57	4
Seelow 1	Fluvisol (eutric, drainic)	90	Gr	71	28	1	1,05	73
Paulinenaue	Histosol (eutric, drainic)	40	Hn	-	-	-	0,26	870
Mkundi	Vertisol (calcic)	80	B	43	9	48	1,61	6
San Filipe	Andosol (eutric, siltic)	10	A	20	60	20	1,09	28

Lage der Standorte: Deutschland- Seelow und Paulinenaue, Tansania- Mkundi, Chile- San Filipe; TRD- Trockenrohdichte, OBS- organische Bodensubstanz

zu einer Überschätzung des realen Bodenwassergehaltes. In sehr schrumpfs- und quellungsaktiven Böden kann die schrumpfsabhängige Wassergehaltsabnahme größer sein als die Wassergehaltsänderung in der Bodenmatrix.

In der Vergangenheit wurden verschiedenste Methoden und Geräte zur Quantifizierung von Quellung und Schrumpfung entwickelt. Bereits in den 40iger Jahren des 20. Jh. hüllten LAURITZEN und STEWART (1941) die Bodenprobe mit Paraffin ein und bestimmten die Volumenänderung durch Wasserverdrängung nach dem Archimedisches Prinzip. Derzeit werden verschiedenste, sehr aufwendige und teure optische Geräte und Methoden angewendet, um den Schrumpfsverlauf zu quantifizieren (TARIQ und DUMFORD 1993, GARNIER et al. 1997, BRAUDEAU et al. 1999, BOIVIN et al. 2006, SANDERS und GERKE 2007, GREGORY et al. 2010, PENG et al. 2010, STEWARD et al. 2012). Keines dieser Verfahren ermöglicht jedoch die simultane Quantifizierung der bodenhydraulischen Kennfunktionen unter Berücksichtigung von Quellung und Schrumpfung.

## Material und Methode

### Grundlagen und Voruntersuchungen

Grundlage der Untersuchungen waren die erweiterte Verdunstungsmethode (SCHINDLER et al. 2010a und 2010b) und das zugehörige HYPROP Messsystem (UMS GmbH München) mit dem die hydraulischen Kennfunktionen simultan im Bereich zwischen Sättigung und nahe dem permanenten Welkepunkt quantifiziert werden können. Die Messungen erfolgen an 250 cm<sup>3</sup>-Stechzylindern (5 cm Höhe, 8 cm Durchmesser). Die Probe wird dafür zunächst mit Wasser gesättigt. Es werden zwei Tensiometer eingebaut, die Probe wird basal abgedichtet, auf eine Waage gestellt und die Probenoberfläche wird der freien Verdunstung ausgesetzt. Im Zeitintervall werden die Saugspannungen und die Probenmasse gemessen und daraus Datenpunkte der hydraulischen Kennfunktionen berechnet.

Für die Problemanalyse und die Erarbeitung einer Modellvorstellung zur Quantifizierung der Schrumpfung wurden Voruntersuchungen an 24 organischen und mineralischen Bodenproben unterschiedlicher Genese und Körnung durchgeführt (Tabelle 1). Die Standorte Seelow und Paulinenaue sind in Deutschland gelegen, Mkundi in Tansania und San Filipe in Chile. Für die Verdunstungsmessung wurden die Proben aus dem Stechzylinder entfernt und in eine wasser- und luftundurchlässige Gummihülle eingefügt. Während und nach Abschluss des Experimentes wurden die Proben vermessen- Probenhöhe sowie Durchmesser und Umfang

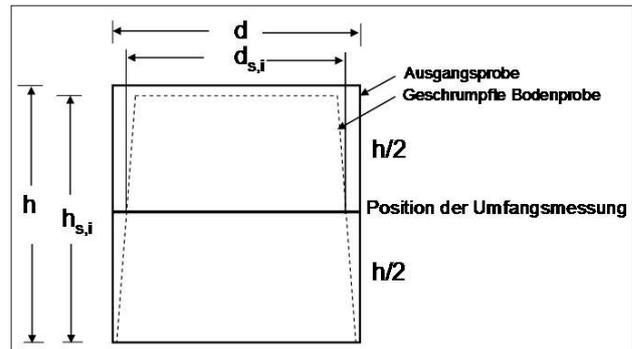


Abbildung 1: Schrumpfungskonzept,  $d$ -Probendurchmesser,  $d_{s,i}$  - Durchmesser der geschrumpften Probe zum Zeitpunkt  $t_p$ ,  $h$ -Probenhöhe,  $h_{s,i}$  - Höhe der geschrumpften Probe zum Zeitpunkt  $t_i$

in Zentimeterabständen von der Probenoberfläche bis zur Probenbasis. Die Ergebnisse zeigen, dass (i) der Probendurchmesser bzw. -umfang von der Probenbasis bis zur Probenoberfläche linear abnimmt und (ii) isotrope Schrumpfsverhältnisse vorherrschen. Isotrope Schrumpfung ist im Fall der verwendeten Messapparatur dann gegeben, wenn das Verhältnis aus vertikaler zu horizontaler Schrumpfung entsprechend der HYPROP-Probengeometrie

$$\frac{h}{d} = \frac{5}{8} = 0,625$$

beträgt. Unter diesen Voraussetzungen ist es für die Quantifizierung der Schrumpfung ausreichend, den Zeitverlauf des Probenumfanges bzw. -durchmessers in der Probenmitte zu messen (Abbildung 1).

### Methode der Schrumpfungsmessung

Für die Messung der Umfangsänderung wurde ein Messgerät, ein sogenanntes Umfangsmeter (Abbildung 2, UMS GmbH München) analog eines Dendrometers entwickelt. Es besteht aus einem dünnen Seil, das in Probenmitte um die Probe gespannt und an beiden Enden mit einem flexiblen Metallbügel verbunden ist. Das Seil und der Metallbügel werden mit einer Zugfeder gespannt. Auf den Metallbügel ist ein Dehnungsmessstreifen aufgeklebt, dessen Stromversorgung durch drei AA Batterien gewährleistet wird. Der Dehnungsmessstreifen ist über einen Bus mit dem Computer verbunden und arbeitet zusammen mit dem HYPROP System. Das Ausgabesignal des Dehnungsmessstreifens in mV wurde auf eine Längenänderung in mm kalibriert und ermöglicht die Messung von Umfangsänderungen mit einer Genauigkeit von 0.01 mm. In vom Benutzer festgelegten Zeitintervallen werden die Saugspannung am



Abbildung 2: HYPROP System gekoppelt mit dem Umfangsmeter

oberen und unteren Tensiometer, die Probenmasse und der Probenumfang gemessen und daraus die hydraulischen Kennfunktionen – nunmehr unter Berücksichtigung der Schrumpfung - quantifiziert.

Die Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit ( $K(\Psi_{\text{mittel}})$ ) erfolgt nach der modifizierten Darcy-Buckingham Gleichung (Gl. 1) für das Zeitintervall  $\Delta t$  zwischen zwei Messungen:

$$K(\Psi_{\text{mittel}}) = \frac{\Delta V}{\alpha A \Delta t_j} \quad (1)$$

Dabei ist  $\Psi_{\text{mittel}}$  die geometrisch gemittelte Saugspannung des oberen und unteren Tensiometers im Zeitintervall  $\Delta t_j = t_{i+1} - t_i$ , mit  $i = 1 \dots n$ ,  $j = 1 \dots n-1$ ,  $\Delta V$  ist das verdunstete Wasservolumen (der Massedifferenz  $\Delta m$  im Zeitintervall gleichgesetzt),  $a$  ist der Fluxfaktor, im Fall eines starren Bodens ist  $a = 2$ ,  $A$  ist die Querschnittsfläche in Probenmitte und  $i_m$  ist der hydraulische Gradient gemittelt im Zeitintervall.

Datenpunkte der Wasserretentionsfunktion ergeben sich aus der geometrisch gemittelten Saugspannung zu den Zeitpunkten  $t_i$  und  $t_{i+1}$  für  $i = 1 \dots n$  und dem zugehörigen volumetrischen Wassergehalt der sich aus  $\Delta V$  bezogen auf das Probenvolumen berechnet.

Das Volumen der Probe kann bei isotroper Schrumpfung ausschließlich aus der Umfangsänderung in Probenmitte zum Zeitpunkt  $t_i$  berechnet werden (Gl. 2, 3 und 4).

$$\Delta V_{s,i} = \frac{\pi}{4} d^2 h - \frac{\pi}{4} d_{s,i}^2 h_{s,i} \quad \text{mit} \quad (2)$$

$$d_{s,i} = \frac{c_{s,i}}{\pi} \quad \text{und} \quad (3)$$

$$h_{s,i} = d_{s,i} \frac{h_{s,i}}{d_{s,i}} \quad (4)$$

$V$  ist das Volumen der geschrumpften Probe zum Zeitpunkt  $t_i$  für  $i=1 \dots n$ ,  $c_{s,i}$ ,  $d_{s,i}$ ,  $h_{s,i}$  sind der Umfang, der Durchmesser und die Höhe der Probe zum Zeitpunkt  $t_i$ . Das Verhältnis

$$\frac{h_{s,i}}{d_{s,i}}$$

ist für isotrope Schrumpfung gleich 0,625. Für nicht anisotrope Bedingungen oder abweichende Probengeometrie muss das Verhältnis zwischen  $h_{s,i}$  und  $d_{s,i}$  angepasst werden in Gl. 4. Diese Änderung sollte jedoch nur vorgenommen werden, wenn Anisotropie eindeutig diagnostiziert wurde.

### Berechnung bodenhydraulischer Daten unter Berücksichtigung von Schrumpfung

Der Gesamtwasserverlust durch Verdunstung ( $\Delta m = \Delta V$ , Gl. 1) teilt sich auf in die Komponenten (i) der Wassergehaltsänderung in der Bodenmatrix ( $\Delta V_m$ ) die mit der Zunahme der Bodendichte korrespondiert und (ii) der Volumenabnahme der Probe durch Schrumpfung ( $\Delta V_s$ ) die dem Wasservolumen entspricht (Gl. 5).

$$\Delta V = \Delta V_{m,i} + \Delta V_{s,i} \quad (5)$$

Für die Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit (Gl. 1) werden der Fluxfaktor  $a_s$  und die Querschnittsfläche  $A_s$  für das Zeitintervall an die veränderte Geometrie der Probe angepasst (Gl. 6, 7, 8).

$$K(\Psi_{\text{mean}}) = \frac{\Delta V}{a_{s,i} A_{s,i} \Delta t i_m} \quad \text{mit} \quad (6)$$

$$a_{s,i} = \frac{2h_{s,i}}{h} \quad \text{und} \quad (7)$$

$$A_{s,i} = \frac{\pi}{4} d_{s,i}^2 \quad (8)$$

### Ergebnisse

Ergebnisse werden exemplarisch für die Tonprobe des Standortes Seelow 1 präsentiert. Den Zeitverlauf der Umfangsänderung zeigt *Abbildung 3*. So wie aus der Literatur bekannt (KUNTZE et al. 1981, TARIQ and DUMFORD 1993, PENG et al. 2010, STEWARD et al. 2012), verläuft

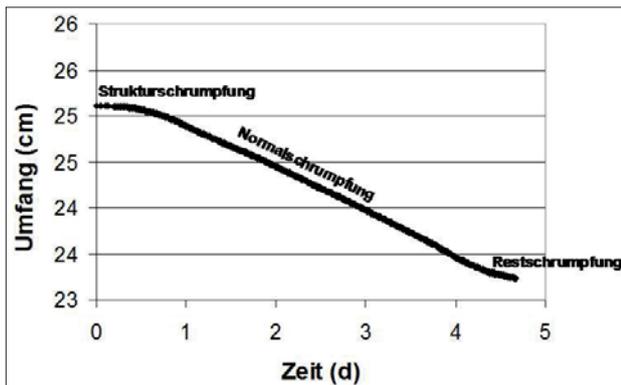


Abbildung 3: Zeitverlauf der Umfangsänderung, Probe Seelow 1

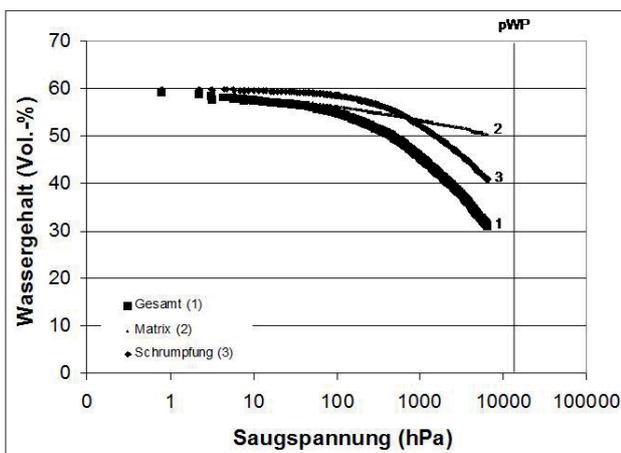


Abbildung 4: Wasserretentionsfunktion mit Schrumpfungskurve, Seelow 1

die Schrumpfung in klar voneinander abgrenzbaren Phasen. Sie beginnt mit der Phase der Strukturschrumpfung, in der die Entwässerung der Makroporen keine Volumenänderung zur Folge hat. Die daran anschließende lineare Phase wird als Normalschrumpfung bezeichnet, in der das Volumen des Wasserverlustes identisch der Änderung des Probenvolumens ist. Daran schließt sich die Phase der Restschrumpfung an, in der die Bodenpartikel schon so eng aneinander liegen, dass die Volumenänderung gegenüber der Wassergehaltsänderung gemindert ist. Der Schrumpfungsverlauf wird beendet durch die Phase der Nullschrumpfung, die im Zuge dieser Verdunstungsmessung nicht erreicht wurde. In dieser Phase erfolgt noch eine geringe Wassergehaltsänderung, das Probenvolumen verringert sich jedoch nicht weiter.

Die nach der oben beschriebenen Methodik errechneten hydraulischen Kennfunktionen sind in *Abbildung 4*- Wasserretention- und in *Abbildung 5*- hydraulische Leitfähigkeit- im Messbereich zwischen 0 und 6500 hPa dargestellt. Die gesamte Wasserretentionsfunktion (1) setzt sich aus zwei Teilkurven zusammen, dem Wassergehaltsverlauf in der Bodenmatrix (2) und der Schrumpfungskurve (3). Im Fall der dargestellten Probe beträgt der Wasserverlust durch Schrumpfung etwa 20 Vol.-%, während sich der Wassergehalt in der Bodenmatrix nur um etwa 10 Vol.-% vermindert. Aufgrund der Schrumpfung hat sich die Trockenrohdichte der Bodenmatrix von  $1,05 \text{ g cm}^{-3}$  im gesättigten Zustand auf

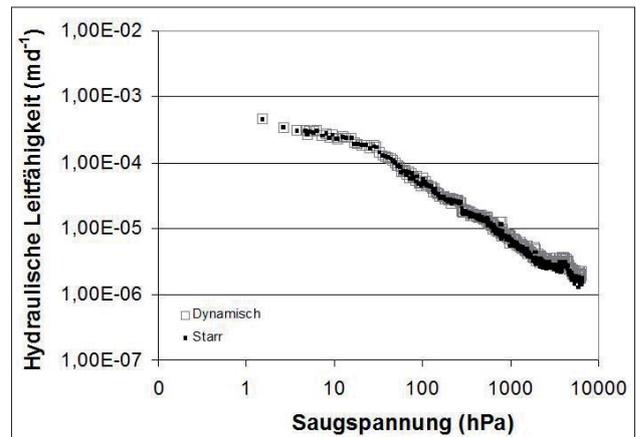


Abbildung 5: Hydraulische Leitfähigkeit mit Schrumpfungskurve, Seelow 1

$1,3 \text{ g cm}^{-3}$  am Ende der Messung erhöht. Der Einfluss der Schrumpfung auf die hydraulische Leitfähigkeit (*Abbildung 5*) ist im Vergleich zur Wasserretentionsfunktion wesentlich geringer und für praktische Belange vernachlässigbar.

Das van Genuchten Model (van GENUCHTEN 1980) oder andere gebräuchliche Datenmodelle lassen sich problemlos an die Daten der einzelnen Kurven fitten.

## Schlussfolgerung

Der Vorteil der erweiterten Verdunstungsmethodik (EEM) und des zugehörigen HYPROP Systems besteht darin, dass (i) beide Funktionen simultan an der selben Probe bis nahe dem permanenten Welkepunkt quantifiziert werden können, (ii) die Schrumpfung berücksichtigt werden kann, (iii) die Messzeit vergleichsweise zu klassischen Verfahren gemindert ist (3- bis max. 10 Tage), (iv) subjektive Fehlermöglichkeiten eingeschränkt sind, (v) die gebräuchlichen Datenmodelle an die Daten gefittet werden können, (vi) die Bodenwassermodellierung auf quellungs- und schrumpfungsaktiven Standorten unter Berücksichtigung der Schrumpfung erfolgen kann – Hysterese ist hierbei zunächst nicht berücksichtigt- und (vii) Bodenfeuchtemessungen im Feld fehlerbereinigt durch Berücksichtigung der Schrumpfungs- oder Dichtefunktion bewertet werden können.

## Danksagung

Wir danken der UMS GmbH München für die Konstruktion und Bereitstellung des Umfangmeters, was wesentlich zum Gelingen der Arbeiten beigetragen hat.

## References

- BOIVIN, P., P. GARNIER and M. VAUCLIN, 2006: Modeling the soil shrinkage and water retention curves with the same equations. Soil Sci. So. Am. J. 70 (4), 1082-1093.
- BRAUDEAU, E., J.M. COSTANTINI, G. BELLIER and H. COLLEUILLE, 1999: New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization. Soil Science Society of America Journal, 63, 525-535.

- FAO: Soil Reference Group of WRB, 2006: FAO, World Soil Resources Reports No 103, Rome, 128 pp.
- GARNIER, P., M. RIEU, P. BOIVIN, M. VAUCLIN and P. BAVEYE, 1997: Determining the hydraulic properties of a swelling soil from a transient evaporation experiment. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74(4): 1113-1118.
- GREGORY, A.S., N.R.A. BIRD, W.R. WHALLEY and G.P. MATTHEWS, 2010: Estimation relative hydraulic conductivity from the water release characteristic of a shrinking clay soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74(4): 1112-1118.
- KUNTZE, H., J. NIEMANN, G. ROESCHMANN, G. SCHWERTFEGER, 1981: *Bodenkunde*. Eugen Ulmer GmbH & Co. ISBN 3-8001-2481-5. 407 pp.
- PENG, X., J. DOERNER and R. HORN, 2010: Dynamics of Soil Structure as a Function of Hydraulic and Mechanical Stresses. Proc. 19th World Congress of Soil Science, Brisbane, 1.-6. August 2010. 21-24.
- SANDER, T. and H.H. GERKE, 2007: Noncontact shrinkage curve determination for soil clods and aggregates by three-dimensional optical scanning. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 1448-1454.
- 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.
- STEWART, R.D., M.R. ABOU NAJM, D. RUPP and J. SELKER, 2012: An image-based method for determining bulk density and the soil shrinkage curve. *SSSAJ* (75), 1217-1221.
- TARIQ, A.U.R. and D.S. DUMFORD, 1993: Soil volumetric shrinkage measurements: a simple method. *Soil Sci.* 155, 325-330.
- UMS GmbH Munich, 2012: HYPROP© - Laboratory evaporation method for the determination of pF-curves and unsaturated conductivity. [http://www.ums-muc.de/en/products/soil\\_laboratory/hyprop.html](http://www.ums-muc.de/en/products/soil_laboratory/hyprop.html).