

Tagungsbeitrag zu:  
Jahrestagung der DBG  
Kom. IV / V166  
Titel der Tagung: Horizonte des Bodens  
Veranstalter: DBG, September 2017,  
Göttingen  
Berichte der DBG (nicht begutachtete online  
Publikation), <http://www.dbges.de>

## **Bodenhydrologische Untersuchungen in verschiedenen Skalen für eine nachhaltige Landwirtschaft**

Uwe Schindler<sup>1,2\*,6</sup>, Lothar Müller<sup>1,6</sup>, Frank Eulenstein<sup>1,2,6</sup>, Georg von Unold<sup>3</sup>, Wolfgang Durner<sup>4</sup>, Johann Fank<sup>5</sup>, Askha K. Sheudshen<sup>2,6</sup>, Konstantin Pachikin<sup>2,7</sup>, Olga Rukhovich<sup>2,8</sup>, Sergey Lukin<sup>2,9</sup>, Vladimir Romanenkov<sup>2,8</sup>, Victor G. Sychev<sup>2,8</sup>, Abdulla Saparov<sup>2,7</sup>

1) Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), Eberswalder Str. 84, 15374 Muencheberg, Germany,

2) Mitscherlich Academy for Soil Fertility, Prof.-Mitscherlich-Allee 1, 14641 Paulinenaue, Germany

3) UMS GmbH, Gmunder Str. 37, 81379 Munich, Germany

4) Braunschweig Technical University, Institute of Geocology, Langer Kamp 19c, 38106 Braunschweig, Germany.

5) Joanneum Research, Elisabethstraße 18/II, 8010 Graz, Austria.

6) Kuban State Agricultural University, 13 Kalinin Str. 350044 Krasnodar, Russia

7) Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry named after U.U. Usmanov, Al Faraby Ave 75b, 050060 Almaty, Kazakhstan

8) Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry, Pryanishnikova St. 31a, 127550 Moscow, Russia

9) Institute for Organic Fertilization and Peat (VNIIOU), 601390 Vyatkino 492.2, Sudogotskiy, Rayon, Vladimir Oblast, Russia

\*Korrespondenz: [schindler@mitak.org](mailto:schindler@mitak.org)

### **Zusammenfassung**

Eine umfassende Analyse von interaktiven Prozessen zwischen Boden, Wasser, Pflanze, Tiere und Atmosphäre für eine nachhaltige Landwirtschaft erfordert Kenntnisse von hydrologischen Parametern und Prozessen in unterschiedlichen Skalen. Methoden und Ergebnisse aus bodenhydrologischen Studien in Nordostdeutschland werden vorgestellt. Die Untersuchungen erfolgten

im Labor, Lysimeter, Feld und Einzugsgebiet.

Die Messung bodenhydraulischer Kennfunktionen- Wasserretentionsfunktion, ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit- wurde mit der Erweiterten Verdunstungsmethode (EEM) und dem HYPROP Messgerät durchgeführt. Der Messbereich ist zwischen Wassersättigung und nahe dem permanenten Welkepunkt. Die Messzeit beträgt je nach Boden und Verdunstungsbedingungen zwischen 2 bis 10 Tagen. Die zusätzliche Quantifizierung von Schrumpfung und Hysterisis sind möglich (Schindler et al., 2015a, Schindler et al., 2015b).

Eine Feldmethode zur Quantifizierung der Tiefsickerung und des Stoffaustrages unter natürlichen Boden- und Bewirtschaftungsbedingungen wurde entwickelt (Schindler und Müller, 1998), die Eignung im Vergleich mit Lysimeterergebnissen nachgewiesen (Schindler et al., 2016) und auf mehr als 40 bodenhydrologischen Feldmessplätzen in Nordostdeutschland angewendet. Die Hypothese wurde bestätigt, dass Ackerland die Hauptquelle für Grundwasserneubildung in Nordostdeutschland ist. Unter Wald war die Sickerwasserbildung deutlich reduziert und tendierte bei Niederschlägen unter 550 mm/a gegen Null. Für die Erhaltung von Feuchtgebieten und die Absicherung der Grundwasserneubildung in Regionen mit negativer klimatischer Wasserbilanz sollte dieser Fakt bei geplanten Landnutzungsänderungen und Aufforstungsmaßnahmen berücksichtigt werden. EEM und HYPROP und die vorgestellte bodenhydrologische Feldmethode, als „virtuelles Lysimeter“ bezeichnet, haben das Potential zur Verbesserung bodenhydrologischer Studien in Europa und anderen Regionen der Welt.

### **Schlüsselwörter:**

Wasserretentionsfunktion, ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit, Erweitertes Verdunstungsverfahren, HYPROP, bodenhydrologische Messungen.

### **Einleitung**

Die Analyse interaktiver Prozesse zwischen Boden, Wasser, Tier, Pflanze und Atmosphäre erfordert Kenntnisse von hydrologischen Prozessen in unterschiedlichen Skalen.

### Labor- Lysimeter- Feld- Einzugsgebiet

Im **Labor** werden bodenhydrologische Kennwerte an ungestörten (Stechzylindern) oder gestörten Bodenproben gemessen. Diese Kennwerte sind Basisinformationen für Simulationsmodelle zum Bodenwasser- und Stoffhaushalt und Grundlage für die Erarbeitung von Pedotransferfunktionen. Die Wasserretentionsfunktion (pF Kurve) und die hydraulische Leitfähigkeitsfunktion (K-Funktion) sind die wesentlichen bodenhydraulischen Kennfunktionen.

Mit **Lysimetern** können komplexe bodenhydrologische Wirkmechanismen unter definierten Boden- und Randbedingungen analysiert werden. Sie bieten die einzige Möglichkeit Sickerwasserabfluss zu messen. Lysimeter sind darüber hinaus ein wichtiges Instrument zur Entwicklung und Validierung von Simulationsmodellen im System Boden/Wasser/Pflanze/Atmosphäre.

Bodenhydrologische Messungen unter **Feldbedingungen** (virtuelle Lysimeter, Kastanek, 1995) ist ein alternativer, kostengünstiger und zu Lysimetern flexiblerer Weg zur Analyse des Wasser- und Stoffhaushaltes von Bewirtschaftungssystemen unter natürlichen Boden- und Bewirtschaftungsbedingungen.

Die Quantifizierung von Bodenwasser- und Stoffhaushalt in **Einzugsgebieten** und Landschaften macht die Nutzung von Simulationsmodellen notwendig. Die Interpretation von Simulationsergebnissen erfordert Prozesskenntnisse aus kleineren Skalen.

## Methoden und Ergebnisse

### Labor

Die Messung der Wasserretentionskurve (pF Kurve) und der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion (K-Funktion) mit den Standardverfahren (pF: Sandbox, Sand/Kaolinbox, Drucktopf, K: Multi-Step-Outflow-Methode) ist zeitaufwendig, die Ergebnisse sind fehlerbehaftet, die Messgeräte für die pF Bestimmung veraltet und teuer.

Das Verdunstungsverfahren (Wind, 1966, Schindler, 1980) ermöglicht die simultane Messung der pF Kurve und der K-Funktion im Labor. 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. Die Handhabung ist einfach, die Messzeit gegenüber den Standardverfahren verkürzt und beträgt in Abhängigkeit von Boden und Verdunstungsrate zwischen 2 und 10 Tage.

Nachfolgende Neuerungen ermöglichen:

- i) eine Kostenreduzierung durch Minderung der Anforderungen an die Wägegenauigkeit bei Einhaltung der Messgüte (Schindler et al., 2006) und
- ii) eine Erweiterung des Messbereiches bis nahe dem permanenten Welkepunkt durch den Einsatz von Siedeverzugtensiometern (Schindler et al., 2010a) und die Nutzung des Lufteintrittspunktes der Tensiometerkeramik (Schindler et al., 2010b).

Zur Messung der hydraulischen Kennfunktionen wurde das HYPROP (HYdraulic PROProperty analyser) entwickelt (UMS, 2012). Die Datenerfassung und -auswertung erfolgt online im automatischen oder Mehrprobenmodus. Ein Messbeispiel zeigt Abb. 1. Die Kennfunktionen können zusätzlich unter Berücksichtigung von Hysterese und Schrumpfung quantifiziert werden.

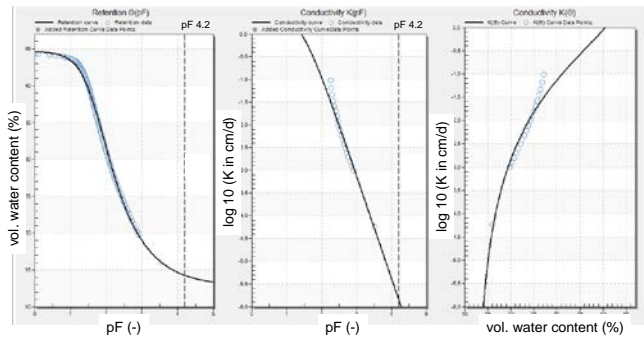


Abb. 1: Messpunkte und Fit der pF-Kurve (links) und der K-Funktion (mitte und rechts), schluffiger Lehm, Linfen China, (HYPROP fit software, UMS, 2012).

**Lysimeter:**

Lysimeter dienen der Prozessanalyse und bilden die Grundlage für die Entwicklung von Simulationsmodellen. Moderne Lysimeter sind wägbar, unterdruckgesteuert, ermöglichen die automatische Datenerfassung und Entnahme von Wasserproben, sind zusätzlich mit Messinstrumenten ausgestattet, sie sind eingebettet in die Bewirtschaftungseinheit und ermöglichen eine Fernübertragung der Messdaten. Das ermöglicht eine annähernd naturgetreue Erfassung von Prozessen im System Boden/Wasser/Pflanze/Atmosphäre (Hannes u.a., 2015).

**Bodenhydrologische Feldmessungen**

Lysimeter sind teuer und unflexibel. Bodenhydrologische Feldmessungen, auch als virtuelle Lysimeter bezeichnet (Kastanek 1995), bilden eine alternative, kostengünstigere und flexiblere Möglichkeit zur Quantifizierung des Bodenwasser- und Stoffhaushaltes unter natürlichen Boden- und Bewirtschaftungsbedingungen (Schindler und Müller, 1998). Es ist aber nicht zielführend, ein Profil von der Bodenoberfläche bis in größere Tiefen mit einer Vielzahl von Sensoren auszustatten. Das vorgeschlagene und geprüfte Konzept geht davon aus, dass auf grundwasserfernen Standorten unterhalb der hydraulischen Scheide (Renger, 1970) alle Flüsse abwärts gerichtet sind. Bodenwassergehalts- und Saugspannungsmessungen in diesem Bereich erlauben die Quantifizierung von Tiefsickerung und Stoffaustrag (Schindler und Müller, 1998).

**Prinzip:** Saugspannung und Wassergehalt werden kontinuierlich unterhalb der hydraulischen Scheide gemessen. Auf Ackerstandorten gewöhnlich in 3 m auf Waldstandorten in 5 m Tiefe. Der bodenhydrologische Messplatz ist so eingerichtet, dass er durch landwirtschaftliche Technik überfahren werden kann und die Messungen unter natürlichen Boden- und Bewirtschaftungsbedingungen erfolgen. Aus den Saugspannungen und Wassergehaltswerten wird eine Feld-pF Kurve konstruiert, gefittet und daraus eine relative K-Funktion berechnet. Die relative K-Funktion wird an der Wasserbilanz in einer frostfreien Winterperiode kalibriert. Aus den Wassergehaltswerten (Tagesintervalle) und der kalibrierten K-Funktion wird die Tiefsickerung berechnet. Durch Wasserprobenahme mit Saugkerzen lässt sich der Stoffaustrag quantifizieren. Es sind keine weiteren Boden-kennwerte, Wetterinformationen und Angaben zur Bewirtschaftung erforderlich.

Die Methode wurde im Vergleich mit langjährigen Lysimeterergebnissen verglichen und als geeignet bewertet (Abb. 2).

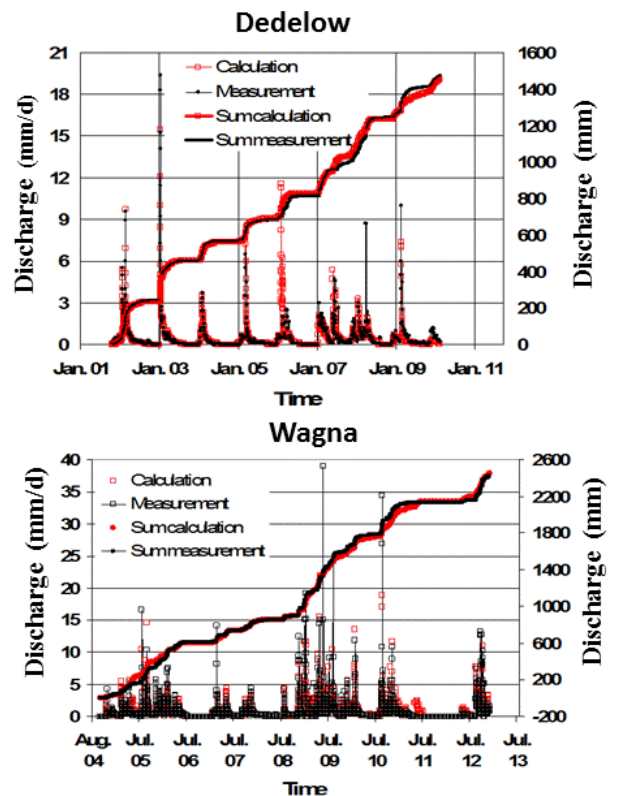


Abb. 2: Vergleich von Sickerwasserraten gemessen im Lysimeter und Berechnungen nach dem virtuellen Lysimeterkonzept, Lysimeter Dedelow, Uckermark, Deutschland, Lysimeter Wagna, Steiermark, Österreich.

Auf mehr als 40 bodenhydrologischen Messplätzen in Nordostdeutschland wurden in den Jahren 1994 bis 2012

Untersuchungen zum Einfluss der Landnutzung und Landbewirtschaftung auf Tiefensickerung und Stoffaustrag durchgeführt (Schindler et al., 2010c). Als Ergebnis zeigte sich, dass Ackerland mit durchschnittlich  $119 \text{ mma}^{-1}$  die Hauptquelle für Tiefensickerung und Grundwasserneubildung war. Unter Wald war die Grundwasserneubildung stark gemindert und erreicht im Durchschnitt weniger als die Hälfte ( $52 \text{ mm a}^{-1}$ ). Auf Standorten mit Niederschlägen von  $550 \text{ mma}^{-1}$  und weniger geht die Grundwasserneubildung unter Nadel aber auch unter Laubwald gegen 0.

### **Simulation von Bodenwasser und Stoffhaushalt**

Simulationsergebnisse des Wasser- und Stoffhaushaltes mit den Modellen MIKE SHE (Reefsgard et al., 1995) und ABIMO (Glugla und Fürtig, 1997) bestätigten die Ergebnisse aus den bodenhydrologischen Messungen (Schindler et al., 1999, Schindler et al., 2004).

### **Schlussfolgerungen**

- 1) Umfassende bodenhydrologische Studien erfordern Kenntnisse zu interaktiven Prozessen und Kennwerten in verschiedenen Skalen.
- 2) Das Erweiterte Verdunstungsverfahren (EEM) mit HYPROP als Messgerät ermöglicht eine simultane, präzise und effektive Messung der Wasserretentionskurve und der hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion in 2 bis 10 Tagen. Zusätzlich ist die Messung von Hysterese und Schrumpfung möglich.
- 3) Bodenhydrologische Messungen, sogenannte virtuelle Lysimeter, bieten eine effektive Möglichkeit zur Quantifizierung von Bodenwasser- und Stoffhaushalt unter natürlichen Boden- und Bewirtschaftungsbedingungen. Die Methode wurde im Vergleich mit Lysimetermessungen geprüft.
- 4) Beide Methoden haben das Potential zur Verbesserung bodenhydrologischer Analysen weltweit.
- 5) Ackerland ist die Hauptquelle für Grundwasserneubildung in Nordostdeutschland. Unter Wald wird die

Grundwasserneubildung um mehr als die Hälfte gemindert und geht bei jährlichen Niederschlägen von  $550 \text{ mm}$  und weniger gegen 0. Dieser Umstand sollte bei Landnutzungsplanungen berücksichtigt werden.

### **Literatur**

- Glugla, G., Fürtig, G., (1997): Berechnung langjähriger Mittelwerte des Wasserhaushalts für den Lockergesteinsbereich. Dokumentation zur Anwendung des Rechenprogramms ABIMO. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Außenstelle Berlin, Februar 1997, pp. 19.
- Hannes, M.; Wollschläger, U.; Schrader, F.; Durner, W.; Gebler, S.; Pütz, T.; Fank, J.; von Unold, G.; Vogel, H.-J. (2015): A comprehensive filtering scheme for high-resolution estimation of the water balance components from high-precision lysimeters. *Hydrology & Earth System Sciences*. 2015, Vol. 19 Issue 8, p3405-3418.
- Kastanek, F. (1995): Kritische Bemerkungen zur Verwendung von Lysimetern. Proc. 5. Gumpensteiner Lysimetertagung „Stofftransport und Stoffbilanz in der ungesättigten Zone“.: BAL Gumpenstein 25.-26. April 1995. 93-102.
- Refsgaard, J.C, B. Storm und V. P. Singh, (1995): MIKE SHE. In: *Computer-models-of-watershed-hydrology*. Water Resources Publications. Colorado (USA). 809-846.
- Renger, M., Giesel, W., Strebel, O., Lorch, S. (1970): Erste Ergebnisse zur quantitativen Erfassung der Wasserhaushaltskomponenten in der ungesättigten Zone. Z. Schindler U (1980) Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd, Berlin* 24, 1, 1–7, 1980.
- Schindler, U. und Müller, L., 1998. Calculating deep seepage from water content and tension measurements in the vadose zone at sandy and loamy soils in north-east Germany. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 43. 233-243.
- Schindler, U., J. Steidl, F. Eulenstein, L. Müller and M. Wegehenkel (1999): Estimating and testing a database of soil hydraulic properties for the simulation of the water transport in a pleistocene landscape. In: *Proceedings of the international workshop „Characterization and measurement of the hydraulic properties of unsaturated porous media“*, Riverside, California, October, 1997. Ed: M. Th. Van Genuchten. Part 2. 1343-1350.

- Schindler U., Thiere, J., Steidl, J. und L. Müller (2004): Bodenhydrologische Kennwerte heterogener Flächeneinheiten- Methodik der Ableitung und Anwendungsbeispiel für Nordostdeutschland. Fachbeitrag des Landesumweltamtes. H.87. Bodenschutz 2. Landesumweltamt Brandenburg. Potsdam. pp. 55.
- Schindler, U., Müller, L. (2006) Simplifying the evaporation method for quantifying soil hydraulic properties. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 5, 623-629.
- Schindler U, Durner W, von Unold G, Müller L (2010a) Evaporation Method for Measuring Unsaturated Hydraulic Properties of Soils: Extending the Range. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74 (4): 1071–1083.
- Schindler, U., Durner, W., Unold, G. v., Müller, L., Wieland, R., (2010b). The evaporation method: extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173, 4, 563-572.
- Schindler, U., Müller, L., Dannowski, R., Barkusky, D., Francis, G. (2010c) Long-term measurements to quantify the impact of arable management practices on deep seepage and nitrate leaching. In: Long-term ecological research: between theory and application. Springer Science+Business Media B.V, Dordrecht, pp. 243-252.
- Schindler, U., Doerner, J., Müller, L. (2015a) Simplified method for quantifying the hydraulic properties of shrinking soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178, 1, 136-145.
- Schindler, U., Unold, G. v., Müller, L. (2015) Laboratory measurement of soil hydraulic functions in a cycle of drying and rewetting. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 5, 4, 281-286.
- Schindler, U., Unold, G. v., Durner, W., Müller, L., 2015. Recent progress in measuring soil hydraulic properties. In: Yingthawornsuk, T. (ed) *International Conferences on Computer Science and Information Systems, Mechatronics and Production Processes, Environment and Civil Engineering*, April 24-25, 2015, Pattaya, Thailand. pp. 47-52.
- Schindler, U., Müller, L., Unold, G. v., Durner, W., Fank, J. (2016) Emerging measurement methods for soil hydrological studies. In: Müller, L., Sheudshen, A. K., Eulenstein, F. (eds), *Novel methods for monitoring and managing land and water resources in Siberia*. Springer International Publishing, Cham, pp. 345-363.
- UMS GmbH Munich, HYPROP© (2012): Laboratory evaporation method for the determination of pF-curves and unsaturated conductivity, Online: [http://www.ums-muc.de/en/products/soil\\_laboratory.html](http://www.ums-muc.de/en/products/soil_laboratory.html),
- 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.