

Tagungsbeitrag zu: Jahrestagung der
DBG – Kom. I
Titel der Tagung: Böden – eine endliche
Ressource
Veranstalter: DBG, September
2009, Bonn
Berichte der DBG (nicht begutachtete
online Publikation)
<http://www.dbges.de>

Erweiterte Multistep-Ausfluss-Methode zur präzisen Bestimmung bodenhydrau- lischer Eigenschaften nahe Wassersättigung

Sascha C. Iden und Wolfgang Durner

Zusammenfassung

Die Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit aus Multistep-Ausfluss-Experimenten ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Wir stellen ein neues experimentelles Design vor, welches eine gesättigte Perkolation mit einem ungesättigten Multistep-Ausfluss-Experiment kombiniert. Diese sogenannte erweiterte Multistep-Ausfluss-Methode (**Extended Multistep Outflow**, kurz XMSO) wird durch Studien an synthetischen und realen Messdaten auf ihre Eignung geprüft, die hydraulische Leitfähigkeit eines Bodens im gesättigten Zustand und nahe Wassersättigung präzise zu bestimmen. Die Ergebnisse der inversen Simulation mit der Methode der frei geformten hydraulischen Funktionen zeigen eindeutig, dass die XMSO-Methode bestens geeignet ist, die bodenhydraulischen Eigenschaften nahe Wassersättigung aus einem einzigen Experiment präzise und schnell zu bestimmen.

Schlüsselwörter

Hydraulische Funktionen, Multistep-Outflow-Experiment, Ungesättigte Leitfähigkeit, inverse Modellierung

Einleitung

Die inverse Modellierung von transienten Ausflussexperimenten ist eine etablierte Methode zur schnellen Bestimmung der bodenhydraulischen Eigenschaften. Ein Nachteil der Methode ist die relativ geringe Sensitivität gegenüber der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens. Da diese Bodeneigenschaft aus ungesättigten Ausflussexperimenten nur ungenau zu bestimmen ist, wird in der Regel empfohlen, die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit durch ein separat durchgeführtes Perkolationsexperiment zu ermitteln. Dies hat jedoch den Nachteil, dass (i) ein zusätzliches Experiment durchgeführt werden muss und (ii) Daten von zwei unterschiedlichen Experimenten kombiniert werden müssen, was das Risiko der Inkonsistenz birgt (z.B. Schaap und Leij, 2000). Ziel dieses Beitrags ist es, ein neuartiges experimentelles Design vorzustellen, welches es erlaubt, die bodenhydraulischen Eigenschaften nahe Wassersättigung, insbesondere den K_s -Wert schnell und präzise aus einem Experiment zu bestimmen.

Material und Methoden

XMSO-Design

Das neu entwickelte Konzept des Extended Multistep Outflow Experiments (XMSO) kombiniert eine gesättigte Perkolation mit einem sich zeitlich anschließenden Multistep-Outflow-Experiment (MSO). Hierzu wird eine im Feld ungestört entnommene oder im Labor gepackte Bodensäule durch Anlegen eines Überdrucks am unteren Rand initial mit Wasser überstaut. Die Überstauhöhe beträgt zwischen 2 und 4 cm Wassersäule. Durch Absenken des Drucks am unteren Rand auf atmosphärisches Niveau kommt es zunächst zu einer gesättigten Perkolation, die einem Versuch zur Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit durch fallenden Überstau entspricht. Nach Beendigung des Überstaus wird das Experiment in ein MSO-Experiment überführt, d.h. der Druck am unteren Rand wird schrittweise reduziert. Der Zeitpunkt des Endes des oberflächlichen Überstaus ist hierbei präzise aus der Tensiometermes-

sung zu bestimmen. Einen Überblick vermittelt Abb.1.

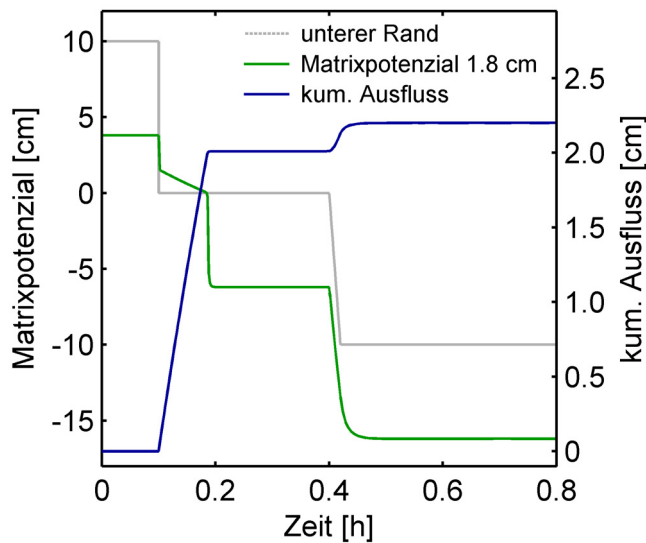


Abb.1: Beispielhafte Darstellung der unteren Randbedingung und der resultierenden zeitlichen Verläufe des Matrixpotenzials in 1.8 cm Tiefe und des kumulativen Ausflusses aus einer 8 cm langen Bodensäule.

Inverse Modellierung

Die bodenhydraulischen Funktionen wurden durch inverse Modellierung bestimmt. Die Richardsgleichung wurde für die Anfangs- und Randbedingungen der XMSO Experimente durch das Programm Hydrus-1D (Simunek et al., 2005) numerisch gelöst. Für die Parameterschätzung wurden globale Optimierer aus der Klasse der evolutionären Algorithmen wie SCE-UA und CMA-ES verwendet. Die hydraulischen Funktionen wurden mit der Methode der freigeformten Funktionen (Free-Form-Methode; Bitterlich et al., 2004; Iden und Durner, 2007) parametrisiert. Dies hat den Vorteil, dass Parametrisierungsfehler vermieden werden und die Unsicherheiten der Funktionen in verschiedenen Potenzialbereichen unabhängig quantifiziert werden. Der Free-Form-Algorithmus wurde dahingehend erweitert, dass die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit nun invers bestimmt werden kann. Die Verwendung der frei geformten Funktionen ist für den Bereich nahe Wassersättigung besonders empfehlenswert, da sie die hydraulische Leitfähigkeitsfunktion unabhängig von der Retentionsfunktion parametrisiert und die Anwendung von Porenbündelmodellen hier

häufig zu einer fehlerhaften Beschreibung der hydraulischen Leitfähigkeit führt (Schaap und van Genuchten, 2005).

Studien an synthetischen Daten

Um die Eignung des XMSO-Designs zu prüfen, wurden zunächst Studien an synthetischen Daten durchgeführt. Hierzu wurde die Richardsgleichung numerisch gelöst und die so gewonnenen Systemvariablen mit unabhängig normalverteilten Messfehlern ausgelenkt. In diesem Beitrag diskutieren wir die Bodenarten Sand, Schluff und Ton, die jeweils mit dem van Genuchten-Mualem-Ansatz parametrisiert wurden. Für Schluff und Ton wurde zusätzlich ein Lufttrittspunkt von -1 cm eingeführt, da die Werte von n kleiner als 1.3 waren (Vogel und Cislérova, 2001). Einen Überblick über die verwendeten Parameter vermittelt Tab.1. Die inverse Modellierung wurden mit der Methode der frei geformten Funktionen durchgeführt.

	Sand	Schluff	Ton
θ_s [-]	0.380	0.473	0.5169
θ_r [-]	0.049	0.058	0.1045
α [cm ⁻¹]	0.035	0.0058	0.0199
n [-]	3.000	1.675	1.1845
K_s [cm d ⁻¹]	500.0	30.0	18.0
τ [-]	0.5	0.5	0.5

Tab. 1: Parameter des van Genuchten-Mualem-Modells für die Studien an synthetischen Daten.

Studie an Realdaten

Es wurde eine ungestört im Feld entnommene Bodensäule aus dem A₁-Horizont eines Luvisols in Braunschweig-Völkenrode untersucht. Der Boden besteht aus 64% Sand, 30% Schluff und 6% Ton und die Säulenlänge betrug 7.2 cm. Am unteren Rand wurde eine durchlässige poröse Platte der Dicke 0.8 cm mit ausreichender Durchlässigkeit verwendet. Die inverse Modellierung wurde mit der Free-Form-Methode durchgeführt, zum Vergleich wurden auch die Parameter des van Genuchten-Mualem-Modells invers bestimmt.

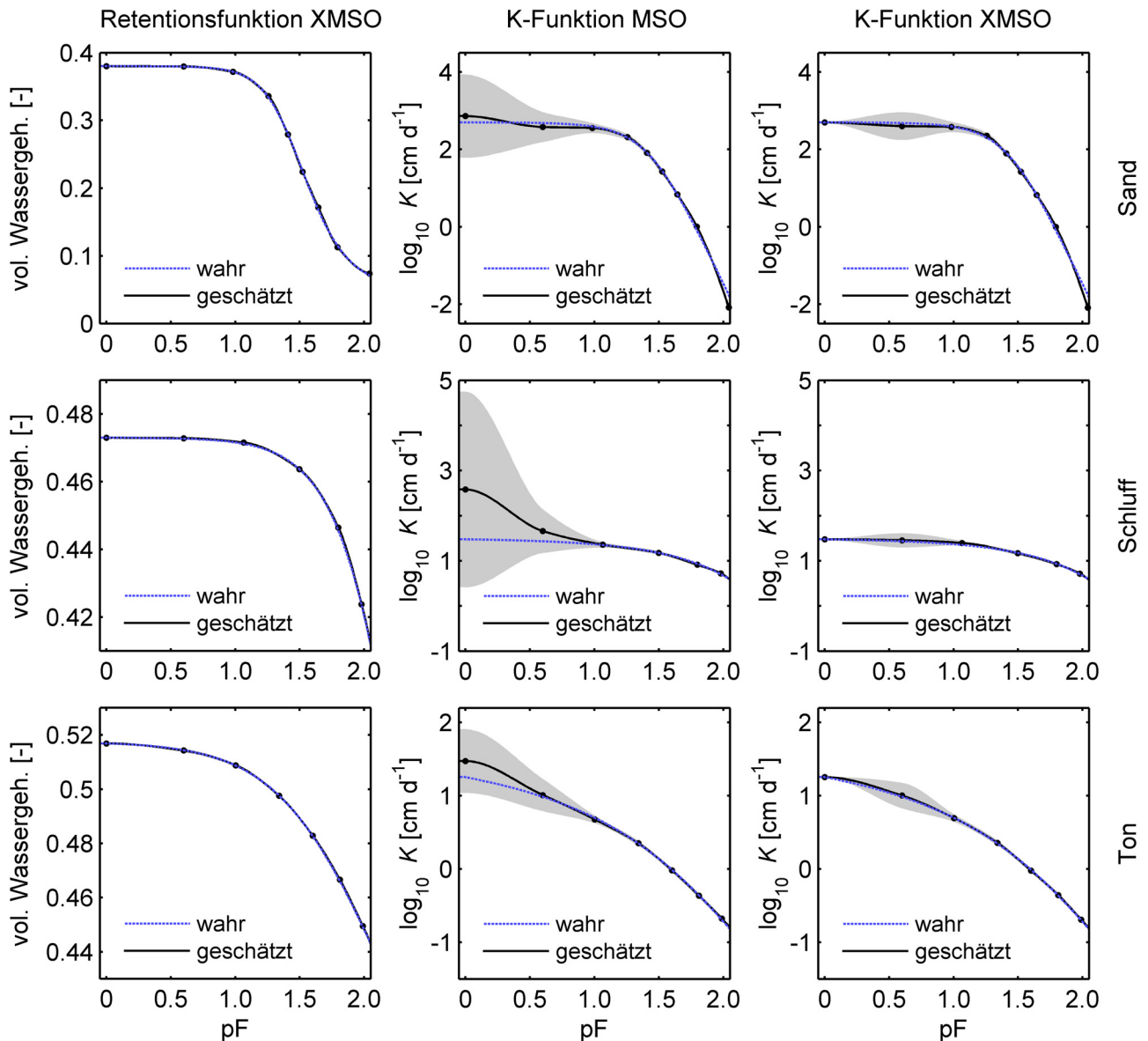


Abb. 2: Ergebnisse der Studien mit synthetischen Daten für Sand (oben), Schluff (Mitte) und Ton (unten) jeweils parametrisiert nach van Genuchten-Mualem. Die jeweils linke Abb. zeigt die wahre Retentionskurve sowie die aus dem XMSO durch inverse Simulation bestimmte Funktion (auf die Darstellung der entsprechenden Funktion, die aus dem MSO bestimmt wird, wird hier verzichtet, sie ist faktisch identisch). In der Mitte und rechts sind die wahren und invers bestimmten Leitfähigkeitsfunktionen für MSO und XMSO dargestellt. Die grau schattierten Bereiche sind die 95%-Konfidenzintervalle (diese sind auch in den Abb. in der linken Spalte dargestellt, werden dort aber kaum sichtbar!). Die Verbesserung durch das XMSO-Design kommt deutlich zum Ausdruck.

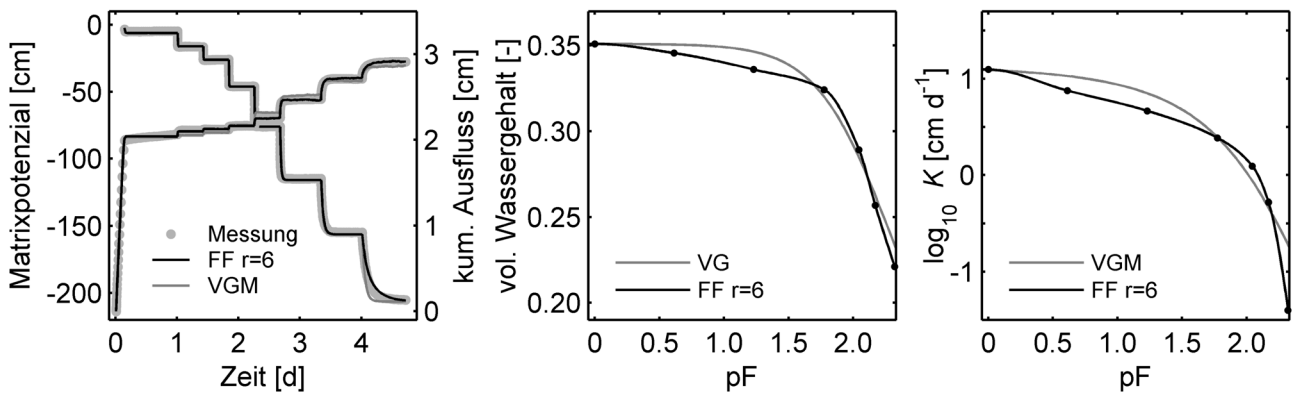


Abb. 3: Ergebnisse der Labormessungen und der inversen Simulation mit der Free-Form-Methode mit 6 Knoten (FF, 13 Parameter geschätzt) für den A₁-Horizont des Luvisol. Die Ergebnisse mit der van Genuchten-Mualem-Parametrisierung (5 Parameter geschätzt) sind zum Vergleich dargestellt.

Ergebnisse

Abbildung 2 fasst die Ergebnisse der Studien an synthetischen Daten zusammen. Die verbesserte Identifizierbarkeit der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit kommt in den deutlich verringerten Unsicherheitsintervallen zum Ausdruck. Abbildung 3 veranschaulicht die Ergebnisse der inversen Modellierung der Realdaten (A₁-Horizont, Luvisol). Neben der besseren Beschreibung der Messdaten durch die Free-Form-Methode wird deutlich, dass die invers bestimmten K_s -Werte für beide Parametrisierungen übereinstimmen. Dies ist ein Vorteil der XMSO-Methode und wäre bei Auswertung eines MSO-Experiments nicht notwendigerweise der Fall.

Fazit und Ausblick

Das neu entwickelte Versuchsdesign des XMSO hat seine Eignung in Bezug auf die präzise Bestimmung der bodenhydraulischen Eigenschaften nahe Wassersättigung, insbesondere die Ermittlung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit aus einem einzigen Experiment eindeutig belegt. Dem Verfahren sollte gegenüber dem MSO-Design der Vorzug gegeben werden.

Literatur

Bitterlich, S., Durner, W., Iden, S.C. and Knabner, P. (2004): Inverse estimation of the unsaturated soil hydraulic properties from column

outflow experiments using free-form parameterizations. *Vadose Zone Journal*, 3: 971-981.

Iden, S. C. und W. Durner (2007): Free-form estimation of the unsaturated soil hydraulic properties by inverse modeling using global optimization, *Water Resour. Res.*, 43, W07451.

Schaap, M.G. and van Genuchten, M.Th. (2005): A modified mualem-van genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation. *Vadose Zone Journal*, 5: 27-34.

Schaap, M.G. and Leij, F.J. (2000): Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten Model. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 843-851.

Simunek, L., Huang, K., Sejna, M. and Genuchten, M.T.v. (2005): The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Version 4.x. IGWMC-TPS-70, Int. Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.

Vogel, T., Genuchten, M.T.v. and Cislérova, M. (2001): Effect of the shape of the soil hydraulic Functions near saturation on variably-saturated flow predictions. *Advances in Water Resources*, 24: 133-144.