

Inverse Modellierung des Wassertransports in Großlysimetern der Forschungsstation Zürich-Reckenholz

Katharina H.E. Meurer¹, Volker Prasuhn², Sascha C. Iden³ und Wolfgang Durner^{3*}

Zusammenfassung

In dieser Studie verwenden wir Daten aus bewachsenen, wägbaren Großlysimetern der Forschungsstation Zürich-Reckenholz, um die Möglichkeit einer Abschätzung bodenhydraulischer Parameter durch inverse Modellierung mit der Richardsgleichung zu untersuchen. Die Lysimeter sind mit Sensoren zur Messung der Bodenfeuchte und des Matrixpotentials in vier Tiefen, sowie mit einer Sickerwassererfassung ausgestattet. Die Berechnung der Flüsse über den oberen Rand (Niederschlag und reale Evapotranspiration) aus der Wasserbilanz des Lysimeters führte zu einer deutlichen Abhängigkeit der ermittelten Flüsse von der zeitlichen Auflösung der Daten. Für die inverse Simulation wurden die Flüsse, die auf einer sechs-stündigen Auflösung basierten, als optimal identifiziert. Die inverse Modellierung lieferte insgesamt eine hervorragende Übereinstimmung mit den Daten der kumulativen Sickerwassermenge und des profilgemittelten Wassergehalts im Lysimeter. Eine Simulation des Wasserflusses und der Wurzelwasseraufnahme im Lysimeter unter Verwendung bodenhydraulischer Funktionen, die aus Texturdaten mit der Pedotransferfunktion Rosetta ermittelt wurden, zeigte eine deutlich verringerte Übereinstimmung zwischen Modell und Messung.

Schlagwörter: Lysimeter, Inverse Simulation, Hydraulische Eigenschaften, Bodenwasserbilanz

Summary

In this study we use data from cultivated weighable lysimeters of the research station Zürich-Reckenholz to examine the possibility of estimating soil hydraulic parameters by inverse modeling. The weighing lysimeters are equipped with sensors for recording soil moisture and matric potential in four depths. At the lower boundary there is a tipping bucket to collect the seepage water. The upper boundary is calculated from the water balance of the lysimeter in a temporal resolution of six hours. Shorter or longer intervals lead, respectively, to over- or underestimation of calculated precipitation or evapotranspiration. Inverse modeling lead to a better agreement with measured cumulative drainage water and profile averaged water content compared to forward simulations using pedotransfer functions.

Keywords: lysimeter, inverse simulation, hydraulic properties, soil water balance

Einleitung

Die Verwendung geeigneter bodenhydraulischer Eigenschaften ist eine Grundvoraussetzung für die Modellierung des Wasserflusses in Böden. Auf der Skala von Großlysimetern kann eine Bestimmung bodenhydraulischer Funktionen nur durch inverse Simulation des Bodenwasserflusses erfolgen. Während die inverse Simulation transienter Wasserflusseexperimente im Labor und unter kontrollierten Randbedingungen inzwischen gut etabliert ist (IDEN et al. 2011), wird die Anwendung der Methodik auf der Plot- und Feldskala durch i) die räumliche Heterogenität der Bodeneigenschaften, ii) die Komplexität der Parametrisierung der Wurzelwasseraufnahme und iii) die fehlerhafte Bestimmung atmosphärischer Randbedingungen, sowie iv) die Unkenntnis der Flüsse aus der durchwurzelten Zone in tiefere Bodenschichten erschwert.

Für die Erfassung des Wasser- und Stofftransports im Boden unter Freilandbedingungen sind Lysimeter weit verbreitet. Wägbare Lysimeter ermöglichen es, Wassergehaltsänderungen innerhalb des betrachteten Systems sowie Flüsse über die Systemgrenzen sehr genau zu bestimmen (MEISSNER et al. 2000, MEISSNER et al. 2007). Für die Bestimmung der tatsächlichen Evapotranspiration haben sich Lysimeter inzwischen zu einem Standardwerkzeug entwickelt (HOWELL et al. 1995, YANG et al. 2000). LOOS et al. (2006) identifizieren die tatsächliche Evapotranspiration als entscheidende Bilanzkomponente der Wasserbilanz des Bodens. Weitere Anwendungsfelder für Großlysimeter sind die Erfassung des Sickerwassers und seiner Zusammensetzung im Hinblick auf Stoffflüsse in Agrarökosystemen. Im Hinblick auf die inverse Simulation des Bodenwasserflusses und der Identifikation bodenhydraulischer Eigenschaften bieten wägbare Lysimeter gegenüber anderen im Feld durch-

¹ Department Bodenphysik, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, D-06120 HALLE/SAALE

² Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART, Reckenholzstr. 191, CH-8046 ZÜRICH

³ Institut für Geoökologie, Technische Universität Braunschweig, Langer Kamp 19c, D-38106 BRAUNSCHWEIG

* Ansprechpartner: Prof. Dr. Wolfgang Durner, w.durner@tu-bs.de



geführten Messkampagnen den herausragenden Vorteil, dass die Wasserbilanz und die Flüsse über Systemgrenzen genau bestimmt werden können. Werden Lysimeter zusätzlich mit Messsensoren zur Erfassung des Bodenwassergehalts und des Wasserpotenzials ausgestattet, ist eine Bestimmung bodenhydraulischer Eigenschaften durch inverse Simulation grundsätzlich möglich (DURNER et al. 2008, SCHELLE et al. 2012). Ziel dieser Untersuchung war die inverse Simulation von Großlysimetern der Forschungsstation Zürich-Reckenholz und der Vergleich der ermittelten bodenhydraulischen Funktionen mit denjenigen, welche sich aus der Anwendung einer Pedotransferfunktion ergeben.

Material und Methoden

Die Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz

Seit dem erfolgreichen Anlaufen der Lysimeteranlage der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon im Jahr 2009 liegt das Hauptziel der Anlage in der Erfassung des Sickerwassers sowie der Untersuchung der Nitratauswaschung. Untersucht werden verschiedene Anbausysteme, Bodenbearbeitungsverfahren, Düngevarianten und Bodentypen (PRASUHN et al. 2009). Die 72 wägbaren Großlysimeter besitzen eine Oberfläche von je 1 m² und eine Tiefe von 1,50 m. Die enthaltenen Böden stammen von drei verschiedenen Ackerstandorten in der Schweiz. Die Lysimeter sind mit Messsensoren für Bodenfeuchte und Matrixpotential in vier Tiefen (10, 30, 60 und 90 cm) sowie einer zeitlich hochaufgelösten Sickerwassererfassung ausgestattet.

Das in dieser Studie untersuchte Lysimeter 1 enthielt einen sandigen Lehm vom Standort Grafenried (57% Sand, 25% Schluff, 18% Ton, Lagerungsdichte 1,53 g cm⁻³), der in dem betrachteten Zeitfenster (17 Monate) zunächst mit Körnermais (*Zea mays*, Mai - Oktober 2009) und anschließend mit Winterweizen (*Triticum L.*, Oktober 2009 - Juli 2010) bestellt wurde. Am unteren Rand des Lysimeters befindet sich eine 15 cm mächtige Sand-Kies-Packung, das Lysimeter ist frei drainend.

Bestimmung von Niederschlag und realer ET

Niederschlag P [mm] und reale Evapotranspiration ET_a [mm] wurden aus den Lysimeterdaten durch Anwendung der Wasserhaushaltsgleichung

$$ET_a = P + I - Q - \Delta S$$

ermittelt. Hierin bezeichnen I [mm] die Bewässerung, Q [mm] den Sickerwasserabfluss und ΔS [mm] die Änderung der gespeicherten Wassermenge. Je nach Vorzeichen der Summe $\Delta S + Q$ ergibt sich für jeden ausreichend kurzen Bilanzzeitraum entweder ein Niederschlag oder eine reale Verdunstung, die als Randbedingung in der numerischen Simulation verwendet werden können. Laut FANK (2008) und MEISSNER et al. (2007) ist die hohe Genauigkeit der Lysimeterwägung von großer Bedeutung, da so der Einfluss von Tau-, Nebel- und Reifniederschlag erfasst werden kann. Die Berechnung von P und ET aus der Wasserbilanz wurde in unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen durchgeführt

und mit den Daten einer nah gelegenen Wetterstation verglichen.

Numerische Simulation des Bodenwasserflusses und der Wurzelwasseraufnahme

Die Wasserdynamik im System Boden-Pflanze-Atmosphäre wird mit der eindimensionalen Richardsgleichung simuliert. Die Wurzelwasseraufnahme wird hierbei über einen tiefen- und potenzialabhängigen Senkenterm realisiert, der über den Feddes-Ansatz (FEDDES et al. 1978) parametrisiert wird. Die Lösung der Richards-Gleichung erfordert zusätzlich eine mathematische Formulierung der Retentionsfunktion $\theta(h)$ [-] sowie der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion $K(h)$ [cm d⁻¹].

Die am häufigsten verwendete Parametrisierung dieser bodenhydraulischen Eigenschaften ist die nach VAN GENUCHTEN (1980):

$$S_e = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_r - \theta_s)} = \frac{1}{[1 + (\alpha h)^n]^{(1-\frac{1}{n})}}$$

und

$$K(S_e) = K_s S_e^{\tau} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^2 \right]$$

mit dem Restwassergehalt θ_r [-], dem Sättigungswassergehalt θ_s [-], den Formparametern α [cm⁻¹], n [-] und τ [-] und der hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens bei vollständiger Wassersättigung K_s .

Für die Simulation der Wurzelwasseraufnahme durch den Feddes-Ansatz wurde ein zeitlich konstantes Verhältnis von Wurzeln zum oberirdischen Trieb der Pflanze von 1:1 angenommen. Der zeitliche Verlauf der Wurzeltiefe wurde aus den zeitlichen Verläufen des Blattflächenindex (LAI) abgeleitet. Hierbei wurde eine maximale Wurzellänge von 50 cm für Mais und 70 cm für Weizen angenommen. Bei Erreichen des Maximalwerts der Wurzellänge wurde dieser auch bei abnehmendem LAI bis zum Erntezeitpunkt als konstant angenommen.

Zur numerischen Lösung der Richards-Gleichung wurde das Softwarepaket HYDRUS-1D (SIMUNEK et al. 1998) verwendet.

Anfangs- und Randbedingungen

Um zu einer repräsentativen Anfangsbedingung in Form einer Tiefenverteilung der Matrixpotentiale im Bodenkörper zu kommen, wurde den numerischen Simulationen eine Vorsimulation im Umfang von 6 Monaten vorgeschaltet. Das bis dahin verzeichnete Sickerwasser wurde am Ende der Vorlaufperiode auf null gesetzt.

Am oberen Rand des Lysimeters wurde eine atmosphärische Randbedingung angelegt, welche in HYDRUS-1D als Neumann- oder Flussrandbedingung (NEUMANN et al. 1974) definiert ist. Die Aufteilung der Evapotranspiration in Evaporation und Transpiration erfolgte über den Blattflächenindex LAI (RITCHIE 1972):

$$E_p = ET_p e^{-k LAI}$$

$$T_p = ET_p (1 - e^{-k LAI})$$

unter Berücksichtigung des bestandsspezifischen dimensionslosen Extinktionskoeffizienten k , für den Werte von 0,46 für Mais und 0,78 für Weizen verwendet wurden.

Der Wasserfluss über den unteren Rand des Lysimeters wurde mit einer Seepage Face-Randbedingung simuliert. Die Flusssdichte q [cm d^{-1}] über den unteren Rand ist hierbei null, solange das Matrixpotential negativ ist. Sonst wird am unteren Rand ein Matrixpotential von Null entsprechend einem atmosphärischen Druck festgelegt.

Vorwärtssimulationen

Für die Bestimmung bodenhydraulischer Kennwerte bei Kenntnis der Bodentextur ist die Verwendung von Pedotransferfunktionen weit verbreitet. Das in HYDRUS-1D implementierte Programm Rosetta Lite (SCHAAP et al. 2001) wurde benutzt, um Parameter der Retentionsfunktion zu schätzen. Als Eingabeparameter dienten die o.a. Texturinformationen.

Als zweiter Ansatz wurden die im Lysimeter gemessenen Wassergehalte und Matrixpotentiale direkt gegenübergestellt. An die um Ausreißer bereinigten Retentionsdaten in den Tiefen 30, 60 und 90 cm wurde mit Hilfe des Programms HYPROP (UMS 2011) das Retentionsmodell nach van Genuchten durch nichtlineare Regression angepasst (PETERS und DURNER 2008). Aus der auf diese Weise bestimmten Retentionskurve wurde anschließend eine Leitfähigkeitsfunktion nach Mualem vorhergesagt. Hierbei wurde die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit aus Rosetta Lite für die Parametrisierung verwendet.

Bestimmung effektiver hydraulischer Eigenschaften durch inverse Simulation

Die Bestimmung effektiver hydraulischer Funktionen des Großlysimeters erfolgte durch inverse Simulation der ermittelten Lysimeterdaten. In der inversen Simulation werden Modellvorhersagen und experimentell ermittelte

Lysimeterdaten durch numerische Minimierung einer Zielfunktion zu einer optimalen Übereinstimmung gebracht. Als Resultat erhält man optimale, für das untersuchte System repräsentative Parameter sowie Information darüber, inwieweit eine Beschreibung der Messdaten durch ein Prozessmodell möglich ist. Die in der Zielfunktion verwendeten Daten waren der lysimeter-gemittelte Wassergehalt, der kumulierte Sickerwasserfluss und die Matrixpotentiale in den Tiefen 10, 30, 60 und 90 cm. Die Daten wurden geeignet gewichtet, um eine Über- oder Unterrepräsentation in der Zielfunktion zu verhindern. Die Bewertung der Güte der erzielten Anpassungen erfolgte mit der Quadratwurzel des mittleren quadratischen Fehlers (Root Mean Square Errors, RMSE) für jeden Datentyp. Die Unsicherheiten der geschätzten Parameter und der bodenhydraulischen Funktionen wurden mit der *First Order Second Moment Methode (FOSM)* quantifiziert (DURNER et al. 2008, IDEN 2008).

Ergebnisse und Diskussion

Obere Randbedingung

Die aus der Wasserbilanz ermittelten Wasserflüsse über den oberen Rand (P und ET) sind in *Abbildung 1* dargestellt. Die kumulativen Werte, berechnet für einen Zeitraum von 6 Monaten, zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der zeitlichen Auflösung der in der Bilanzierung verwendeten Gewichtsdaten der Lysimeter. Hierbei weicht der stündlich berechnete kumulative Niederschlag nur wenig von dem an der Wetterstation in 10-minütlicher Auflösung gemessenen Niederschlag ab. Verglichen damit führt die Verwendung der 5-Minuten-Auflösung zu einer Differenz von 310 mm zum stündlich berechneten und 352 mm zum gemessenen Niederschlag der Wetterstation. Diese Beobachtung verdeutlicht, dass die Gewichtsmessung der Lysimeter Zufallsschwankungen unterworfen ist, die fälschlicherweise als Niederschlag bzw. Verdunstung bilanziert werden. HOWELL et al. (1995) nennen Wind, der auf die Lysimeteroberfläche drückt, als die größte Ursache für Wiegefehler bei Lysimetern.

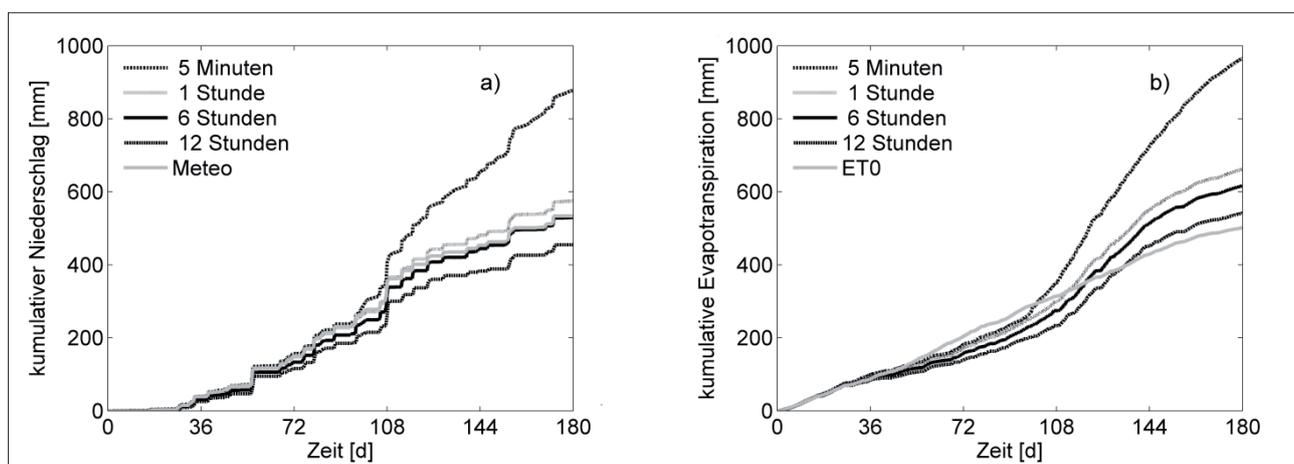


Abbildung 1: Aus Lysimeterdaten ermittelter Niederschlag (a) und Evapotranspiration (b) (jeweils kumuliert) für unterschiedliche zeitliche Auflösung der berechneten Wasserbilanz.

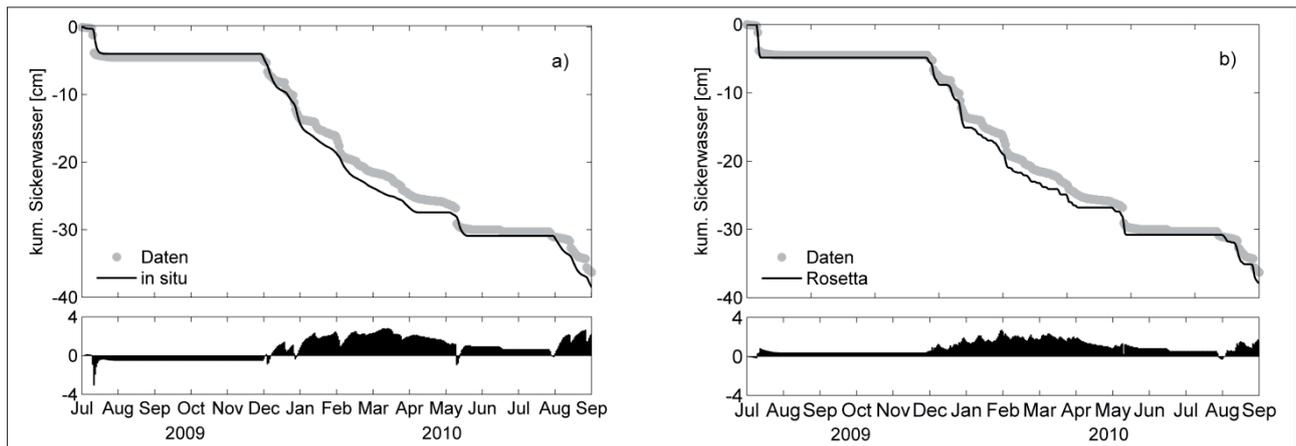


Abbildung 2: Vorhersagen der Sickerwassermenge über die Vorwärtssimulationen anhand der *in situ*-Daten (a) und der Pedotransferfunktion Rosetta Lite (b).

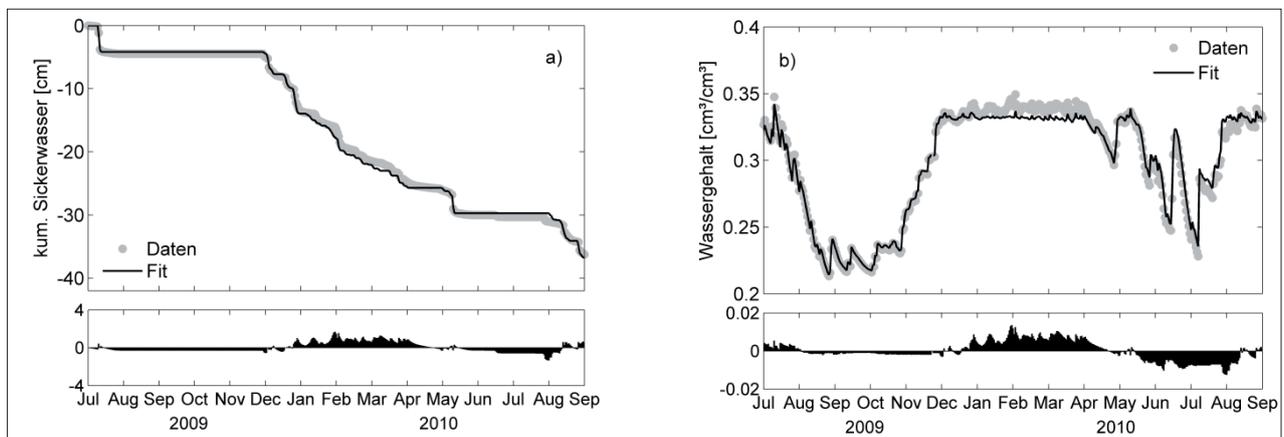


Abbildung 3: Ergebnisse der inversen Simulation: kumulativer Sickerwasserfluss (a) und profilgemittelter Wassergehalt (b).

Die individuelle Bewirtschaftung der Lysimeter in Reckenholz mit Mais und Weizen bietet aufgrund der Inseleffekte eine deutliche Angriffsfläche für Wind. Die Höhe der Kulturpflanzen machen die Großlysimeter anfälliger als beispielsweise Gras-Referenzlysimeter (VAUGHAN und AYARS 2009). Nach NOLZ et al. (2008) sind Wiegefehler durch Windeinfluss für tägliche Daten zu vernachlässigen, nicht jedoch für kürzere Zeitintervalle. Deutliche Unterschiede im Gesamtverlauf zeigen sich auch bei der kumulativen Evapotranspiration: die ET_0 für eine Grasreferenzfläche, berechnet nach ALLEN et al. (1998), unterschätzt die reale Verdunstung, wie sie aus den Lysimeterdaten bestimmt wird (Abbildung 1b, ET_0). Dies wird insbesondere zwischen Tag 100 und 150 deutlich und ist damit zu erklären, dass die Gras-Referenzverdunstung ET_0 geringer ist als die Verdunstung für einen Mais- bzw. Weizenbestand. Für die inverse Simulation wurden die Niederschlags- und Verdunstungsdaten verwendet, die einer Auflösung von 6 Stunden entstammen. In diesem Zeitintervall werden Störungen nicht weiter erfasst, Dynamiken jedoch durchaus abgebildet.

Vorwärtssimulationen

Die Vorwärtssimulationen mit den bodenhydraulischen Eigenschaften aus *in situ*-Daten sowie der Pedotransfer-

funktion sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Dynamik wird in beiden korrekt dargestellt, allerdings kommt es zu deutlichen Über- und Unterschätzungen. Die Bodenwasserdynamik kann durch das Modell nur bedingt korrekt wiedergegeben werden.

Inverse Modellierung

Die Modellanpassung an die kumulative Sickerwassermenge Q und den profilgemittelten Wassergehalt θ zeigt Abbildung 3. Der RMSE für den Wassergehalt liegt mit $0,005 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ unterhalb der Genauigkeit der Lysimeterwaage. Der RMSE des kumulierten Sickerwasserflusses ist mit $0,52 \text{ cm}$ relativ hoch, was angesichts der Verwendung realer Messdaten allerdings akzeptabel ist. Die Simulation trifft das anfangs auslaufende Sickerwasser gut, ebenso wie den darauf folgenden Zeitraum ohne Ausfluss. Die Residuen zeigen, dass der kumulative Ausfluss bis zu diesem Bereich leicht unterschätzt wurde, was ebenfalls in der Anpassung an den Wassergehalt zu erkennen ist. Im Winter ist der Boden sehr feucht, wodurch ein intensiver Fluss über den unteren Rand stattfindet. Diese Dynamik kann durch das Modell in groben Zügen abgebildet werden, jedoch kommt es insgesamt zu einer Überschätzung des Sickerwasserflusses. Damit einher geht eine Unterschätzung des mittleren

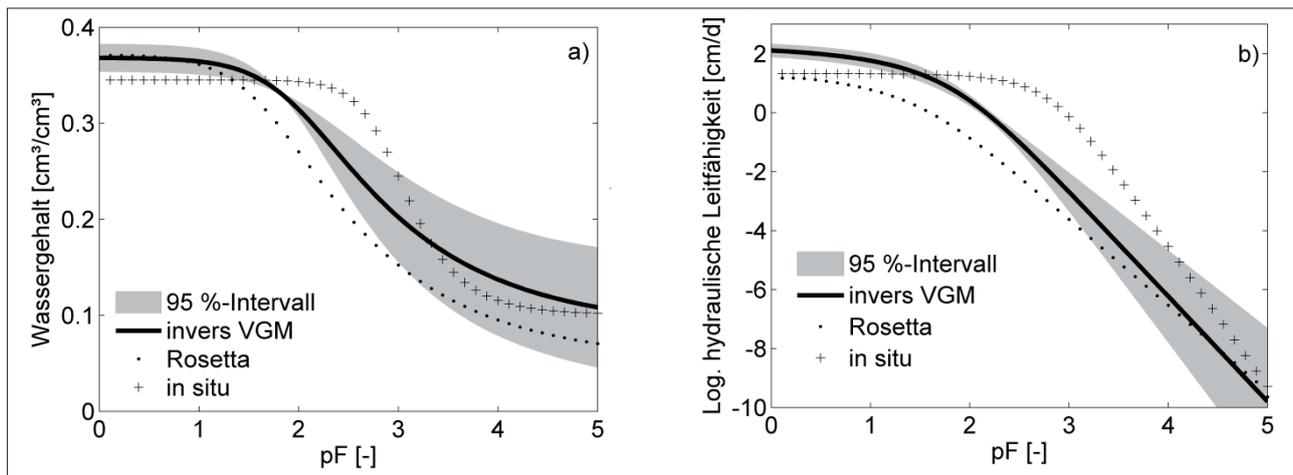


Abbildung 4: Geschätzte Retentions- (a) und Leitfähigkeitsfunktionen (b) für die Vorwärtssimulationen (*in situ* und Rosetta) und die inverse Modellierung mit dem Van Genuchten-Mualem-Modell (VGM). Die grauen Bereiche repräsentieren die 95 %-Konfidenzintervalle.

Wassergehalts. Im Frühjahr zeigen die Daten eine trockenere Phase mit nur teilweisem Austreten von Sickerwasser. Dieser Ausfluss kann durch das Modell nicht wiedergegeben werden. Wir vermuten präferenziellen Fluss als Ursache, der in einer Modellierung mit der Richards-Gleichung nicht wiedergegeben werden kann. Der Verlauf der Residuen zeigt für Q und θ eine gute Übereinstimmung auf, was bedeutet, dass Über- und Unterschätzungen für beide Anpassungen in ähnlicher Größenordnung aufgetreten sind. Laut SCHELLE et al. (2012) stellen starke Über- oder Unterschätzungen ein Problem bezüglich der Reproduzierbarkeit der Wasserbilanz dar; die gemessene aktuelle Evapotranspiration wird in solchen Fällen von der Simulation nicht nachgebildet. Diese Effekte werden subskaligen Prozessen innerhalb des Bodens zugeschrieben, die im Modell nicht berücksichtigt werden. Die gute Übereinstimmung zwischen Modell und Daten sowie die Übereinstimmung der Vorzeichen der Residuen von Q und θ verdeutlichen die Korrektheit der oberen Randbedingung. Besonders wichtig ist die exakte Angabe der Evapotranspiration als treibende Kraft der Wasserbilanz, des Sickerwasserflusses und der Wassergehaltsänderungen. Der Wasserfluss innerhalb des Lysimeters ist vor allem durch den Fluss über den oberen Rand gesteuert (ZURMÜHL 1998).

Retentions- und Leitfähigkeitskurven

Der Vergleich der mit den drei Methoden (aus *in situ*-Daten geschätzt, mittels Pedotransferfunktion geschätzt, durch inverse Modellierung identifiziert) zeigt deutliche Unterschiede hinsichtlich der Retentions- und Leitfähigkeitsfunktion. Wie in *Abbildung 4*, ersichtlich liefern die inverse Modellierung und die Pedotransferfunktion nahezu denselben Sättigungswassergehalt. Bei höheren pF-Werten weichen die Kurven zunehmend voneinander ab. Die aus der Anpassung an *in situ* gemessene Bodenfeuchtedaten ermittelten Retentionskurven zeigen dagegen einen deutlich anderen Verlauf. Wir erklären dies mit einem mangelnden Informationsgehalt der *in situ* Daten, da bei pF-Werten größer 2,7 keine Messungen vorliegen. Die im Lysimeter gemessenen Daten zeigen einen nahezu unveränderten Wassergehalt

Tabelle 1: Durch inverse Modellierung ermittelte van Genuchten-Mualem-Parameter (VGM) bei Einbeziehung von kumulativem Sickerwasser und profilgemitteltem Wassergehalt.

Θ_r [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]	Θ_s [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]	α [cm^{-1}]	n [-]	K_s [cm d^{-1}]	τ [-]
0,09	0,37	0,01	1,36	206	2,41

von der vollständigen Sättigung bis etwa pF 2, was eine Folge der hohen Gehalte an Schluff und Ton im Boden ist. Das weite Konfidenzintervall der inversen Modellierung bei höheren pF-Werten spricht für eine erhebliche Unsicherheit, insbesondere im trockenen Bereich. Die Ursache hierfür ist die Tatsache, dass das Lysimeter unter den gegebenen klimatischen Bedingungen die entsprechenden Feuchtezustände nur äußerst selten bis gar nicht erfährt und die Tensiometer aufgrund des Überschreitens ihrer Messgrenze keine validen Messdaten mehr liefern. Die ermittelten van Genuchten-Mualem-Parameter sind in *Tabelle 1* aufgelistet.

Fazit

Es zeigt sich, dass im Vergleich zu Studien, in denen unbewachsene Lysimeter (z.B. DURNER et al. 2008) oder Lysimeter mit Grasvegetation (SCHELLE 2012) betrachtet wurden, auch bei Einbeziehung schnell aufwachsender Kulturpflanzen eine Nachbildung des kumulativen Sickerwassers und des profilgemittelten Wassergehalts möglich ist. Trotz Vorherrschen eines geschichteten Profils konnten effektive bodenhydraulische Eigenschaften über inverse Modellierung unter Verwendung des van Genuchten-Mualem-Modells ermittelt werden. Eine Grundvoraussetzung dafür ist die Bestimmung der korrekten oberen Randbedingung. Dies wurde durch die wägbaren Lysimeter der Forschungsstation Zürich-Reckenholz realisiert. Wie die Ergebnisse zeigen, ist die Gesamtmenge des Niederschlags und der Evapotranspiration stark von der Wahl des Messintervalls abhängig: Ein kurzes Messintervall führt unweigerlich zu einer Überschätzung, weite Messabschnitte zu Unterschätzungen, die hinsichtlich des Niederschlags sogar unter dem

von der Wetterstation gemessenen Niederschlag liegen. Die von FANK (2008) vorgeschlagene hohe Auflösung (1 Minute) muss also unbedingt mit der Einführung eines Schwellenwertes für signifikante Gewichtsveränderungen des Lysimeters gekoppelt werden (auf die in dieser Arbeit verzichtet wurde). CEPUDER (2002) weist ebenfalls auf die Sinnhaftigkeit einer hohen Auflösung hin, jedoch unter Berücksichtigung der jeweiligen atmosphärischen Bedingungen. Der Einfluss von Wind und Tau, den HOWELL et al. (1995) bzw. MEISSNER et al. (2007) bezüglich wägbarer Lysimeter ansprechen, konnte auch für die Daten aus Zürich-Reckenholz festgestellt werden.

Die Betrachtung des Profils als homogene Bodensäule ist eine Vereinfachung, die im Rahmen dieser Arbeit gute Ergebnisse lieferte. Für genauere Kenntnis über die Variabilität der bodenhydraulischen Eigenschaften innerhalb des Lysimeters sollten die klassifizierten Horizonte einzeln behandelt werden.

Literatur

- ALLEN, R.G., L.S. PEREIRA, D. RAES and M. SMITH, 1998: Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome.
- CEPUDER, P., 2002: Erfassung der Wasserbilanzgrößen mittels Lysimeter. In: Lysimeter – Anforderungen, Erfahrungen, technische Konzepte. Beiträge zur Hydrogeologie, 53: 115-232, Graz.
- DURNER, W., U. JANSEN and S.C. IDEN, 2008: Effective hydraulic properties of layered soils at the lysimeter scale determined by inverse modelling. *European Journal of Soil Science*, 59: 114-124.
- FEDDES, R.A., P.J. KOWALIK and H. ZARANDNY, 1978: Simulation of field water use and crop yield. John Wiley & Sons, New York, NY.
- FANK, J., 2008: Parameter des Wasserkreislaufs an der Forschungsstation Wagna (Auswertung und Ergebnisse).
- HOWELL, T.A., A.D. SCHNEIDER, D.A. DUSEK, T.H. MAREK and J.L. STEINER, 1995: Calibration and scale performance of bushland weighing lysimeters. *American Society of Agricultural Engineers* 38(4): 1019-1024.
- IDEN, S.C., 2008: Inverse Identification of Unsaturated Zone Water Flow and Solute Transport Parameters. Dissertation. Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- IDEN, S.C., H. SCHELLE, J. FANK and W. DURNER, 2011: Inverse Modellierung des Wasserflusses mit Wurzelwasseraufnahme in Großlysimetern. Jahrestagung der DBG – Kom I. Böden verstehen, Böden nutzen, Böden fit machen. <http://www.dbges.de>.
- LOOS, C., S. GAYLER and E. Priesack, 2006: Assessment of water balance simulations for large scale weighing lysimeters. *Journal of Hydrology*, 335: 259-270.
- MEISSNER, R., H. RUPP and M. SCHUBERT, 2000: Novel lysimeter techniques – A basis for improved investigation of water, gas and solute transport in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences* 163: 603-607.
- MEISSNER, R., J. SEEGER, H. RUPP, M. SEYFAHRT and H. BORG, 2007: Measurement of dew, fog and rime with a high-precision gravitation lysimeter. *Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences* 170: 335-344.
- NEUMANN, S.P., R.A. FEDDES and E. BRESLER, 1974: Finite element simulation of flow in saturated-unsaturated soils considering water uptake by plants. Third Annual Report, Project No A10-SWC-77, Hydraulic Engineering Lab., Technion, Haifa, Israel.
- NOLZ, R., G. KOVACS, J. ZSEMBELI and P. CEPUDER, 2008: Water balance of two lysimeter sites: Karcag vs. Groß-Enzersdorf. In: 13. Gumpensteiner Lysimetertagung. Lysimeter – Perspektiven in Forschung und Anwendung, 155-158.
- PETERS, A. and W. DURNER, 2008: Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, 356: 147-162.
- PRASUHN, V., E. SPIESS and M. SEYFAHRT, 2009. Die neue Lysimeteranlage Zürich-Reckenholz. In: 13. Gumpensteiner Lysimetertagung. Hrsg. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, 11-16.
- RITCHIE, J.T., 1972: Model for predicting evaporation from a row with incomplete cover. *Water Resource Research* 8(5): 1204-1213.
- SCHAAP, M.G., F.J. LEIJ and M.Th. van GENUCHTEN, 2001: ROSETTA: A computer-program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 251: 163-176.
- SCHELLE, H., 2012: Identification of soil hydraulic properties on different scales using inverse modeling. Dissertation. Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- SCHELLE, H., S.C. IDEN, J. FANK and W. DURNER, 2012: Inverse modeling of water flow and root water uptake in lysimeters. *Vadose Zone Journal* 11(3), doi:10.2136/vzj2011.0169.
- ŠIMŮNEK, J., M. ŠEJNA, H. SAITO, M. SAKAI and M.Th. van GENUCHTEN, 2008: The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.0, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, pp. 315.
- UMS, 2011: HYPROP Data Evaluation Software User's Manual, V.1.0 (by T. Pertassek, A. Peters & W. Durner), UMS GmbH, München.
- VAN GENUCHTEN, M.Th., 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America* 44: 892-898.
- VAUGHAN, P.J. and J.E. AYARS, 2009: Noise reduction Methods for Weighing Lysimeters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 135, No. 2: 235-240.
- YANG, J., B. LI and S. LUI, 2000: A large weighing lysimeter for evapotranspiration and soil-water-groundwater exchange studies. *Hydrological Processes* 14: 1887-1897.
- ZURMÜHL, T., 1998: Capability of convection-dispersion transport models to predict transient water and solute movement in undisturbed soil columns. *Journal of Hydrology* 30: 101-128.