

Tagungsbeitrag zu: Jahrestagung der  
DBG – Kom. I  
Titel der Tagung: Böden verstehen  
Böden nutzen Bö-  
den fit machen  
Veranstalter: DBG, September  
2011, Berlin  
Berichte der DBG (nicht begutachtete  
online Publikation)  
<http://www.dbges.de>

### **Virtuelle Böden - Inverse Modellierung zur Identifikation effektiver eindimensi- onaler Fließprozesse und Eigenschaften**

Henrike Schelle, Sascha C. Iden  
und Wolfgang Durner

#### **Zusammenfassung**

Die Wasserdynamik im Boden wird durch die räumliche Heterogenität der bodenhydraulischen Eigenschaften bestimmt. Da diese im Feld nicht detailliert gemessen werden kann, wurden im Rahmen des Projektverbunds INVEST komplexe virtuelle Realitäten entworfen, in denen die ungesättigte Wasserdynamik unter verschiedenen Randbedingungen simuliert wird. Daraus gewonnene Messwerte von Wassergehalt und Wasserspannung wurden verwendet, um die Messvariabilität, die in einem heterogenen Boden auftreten kann, nachzubilden. In unserer Arbeit wollten wir prüfen, inwieweit die mittlere Wasserdynamik auf der Feldskala durch eine eindimensionale Simulation beschrieben werden kann, und wie stark die invers bestimmten bodenhydraulischen Eigenschaften variieren. Wir fanden eine große Variabilität der Messdaten, die an verschiedenen Punkten in der Horizontalen gemessen wurden. Daraus folgte eine hohe Variabilität der invers geschätzten hydraulischen Eigenschaften. Diese kann in der Realität zu einer stark von der Lage der Messpunkte abhängigen Einschätzung des Wasserhaushalts führen.

---

Institut für Geoökologie  
Technische Universität Braunschweig  
Langer Kamp 19c, 38106 Braunschweig  
[h.schelle@tu-bs.de](mailto:h.schelle@tu-bs.de)

#### **Schlüsselwörter**

Heterogenität, effektive hydraulische Eigenschaften, inverse Modellierung

#### **Einleitung**

Die Simulation von Wasser- und Stofftransport in der ungesättigten Bodenzone erfordert die Kenntnis geeigneter bodenhydraulischer Eigenschaften. Diese können aus Messungen im Freiland unter atmosphärischen Randbedingungen durch inverse Modellierung bestimmt werden. Unklar ist jedoch, ob die lokale Variabilität von gemessenen Wassergehalten und Tensionen in einem zweidimensionalen heterogenen Profil überhaupt die Ermittlung effektiver Eigenschaften zulässt, und wie stark diese in Abhängigkeit von der horizontalen Lage der Messpunkte variiert. Von Interesse ist weiterhin, wie sich die Variabilität der aus verschiedenen Messdaten geschätzten effektiven hydraulischen Eigenschaften auf Kenngrößen des Wasserhaushalts des betreffenden Bodens auswirkt.

#### **Material und Methoden**

Im Rahmen des Projektverbunds INVEST (Inverse Modelling of Terrestrial Systems) wurde ein 500 x 500 cm großes 2D-Profil generiert, das definierte Heterogenitäten auf verschiedenen Skalen aufweist (Abb. 1). Das Profil besteht aus einem 150 cm mächtigen Oberbodenhorizont aus Schluff. Davon bilden die oberen 30 cm einen Pflughorizont, unter dem eine verdichtete Pflugsohle liegt. An der Bodenoberfläche befindet sich eine lockere Schicht (8 cm), die das Saatbett repräsentieren soll. Der Unterbodenhorizont (150 – 500 cm Tiefe) besteht aus einer Sandmatrix, die mit unregelmäßig verteilten Lehmlinsen durchsetzt ist.

Der Oberboden ist zusätzlich mit kleinräumigen Strukturen ausgestattet. Diese sind durch ein stationäres Zufallsfeld Miller-Miller-skaliertes hydraulischer Eigenschaften gekennzeichnet. Parameter und genauere Informationen zu den Heterogenitäten und Strukturen sind in Schlüter et al. (Virtual soils - Assessment of the effects of soil structure on the hydraulic behavior of cultivated soils, in Vorbereitung) be-

schrieben. An diesem Profil wurde ein Infiltrationsszenario mit einer konstanten Zuflussrate von  $4,8 \text{ cm d}^{-1}$  über 10 Tage und einer anschließenden zweitägigen Redistributionsphase gerechnet. Als Anfangsbedingung diente eine hydrostatische Druckverteilung mit dem Grundwasserspiegel (Druckhöhe  $h = 0 \text{ cm}$ ) am unteren Rand. Dieser stellte gleichzeitig die untere Randbedingung dar. Aus diesem Szenario wurden Messdaten, wie sie in einem typischen Feldversuch gemessen werden könnten, herausgelesen.

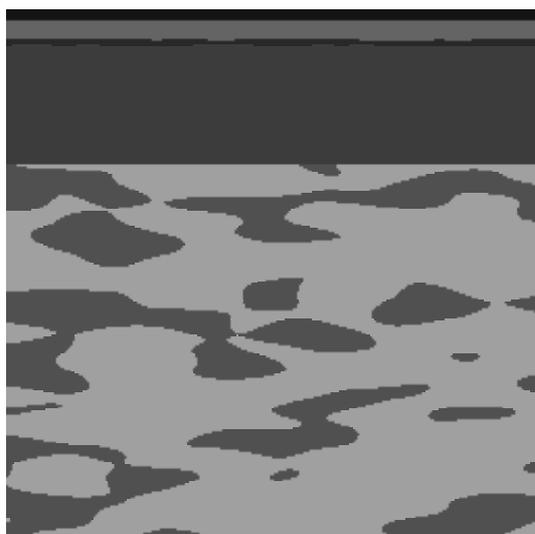


Abb. 1: Heterogenes 2D-Profil für die Generierung virtueller Messdaten.

Als Messungen wurden Zeitreihen der Wassergehalte und Matrixpotenziale in den Tiefen 20, 80, 160 und 200 cm gewählt. Dabei wurde zum einen jeweils eine reine Punktmessung durchgeführt, d.h. es wurde der Messwert an genau einem Knotenpunkt ausgelesen, zum anderen wurde berücksichtigt, dass ein typischer Sensor (TDR oder Tensiometer) immer einen Raumausschnitt erfasst. Dieser wurde auf eine realistische Größe von  $6 \times 6 \text{ cm}$  festgesetzt. Die Messwerte aller Knotenpunkte in diesem Bereich wurden jeweils arithmetisch gemittelt. Weiterhin wurden in jeder Messtiefe jeweils die Messwerte der Statusvariablen an allen Knotenpunkten zu jedem Zeitpunkt gemittelt und so Zeitreihen der gemittelten Matrixpotenziale und Wassergehalte gewonnen, die als weitere „Messreihe“ verwendet wurden.

Um effektive bodenhydraulische Eigenschaften zu bestimmen, wurden ein-dimensionale inverse Modellierungen des Systems unter der Annahme lateraler Homogenität durchgeführt. Dabei wurde angenommen, dass das Profil aus zwei Schichten besteht (Oberboden: 0 – 150 cm Tiefe, und Unterboden: 150 – 500 cm Tiefe).

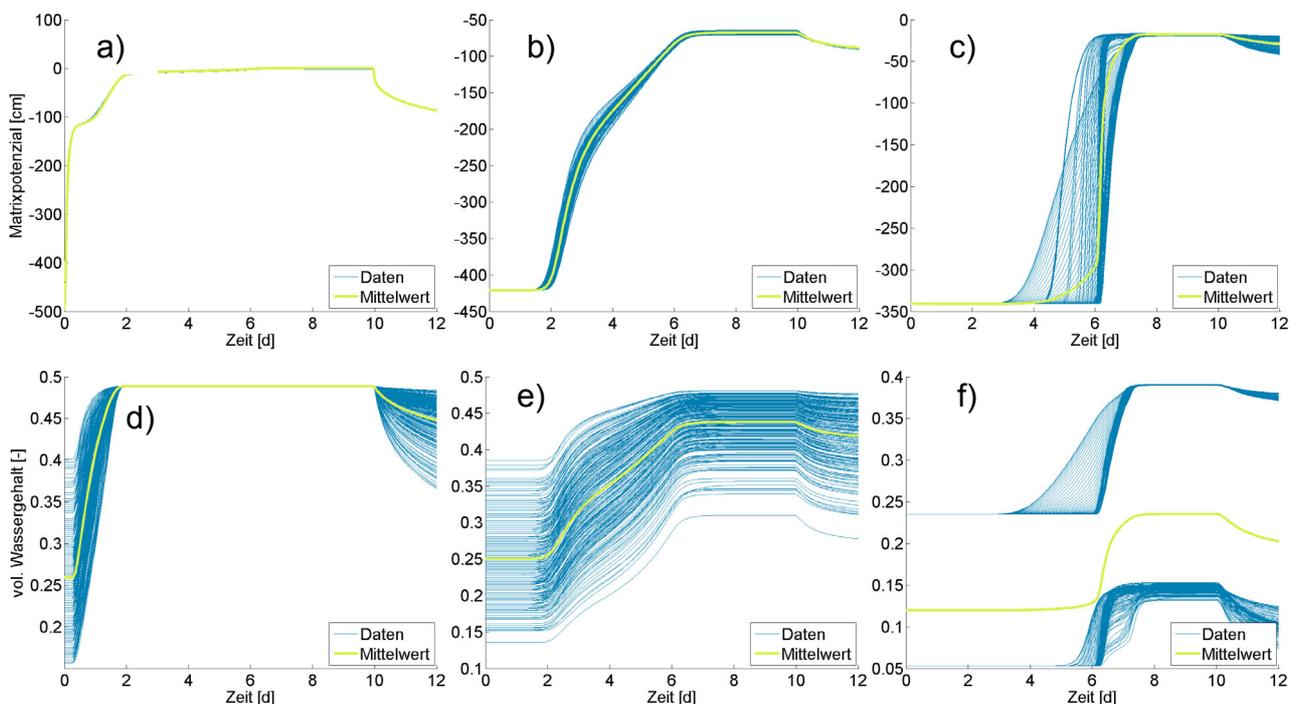


Abb. 2: Matrixpotenzial- (oben) und Wassergehaltsverläufe (unten) in den Tiefen 20 (links), 80 (Mitte) und 160 cm (rechts) an den 250 Einzelmesspunkten (Knotenpunkte der Vorwärtssimulation) und über die gesamte Profilbreite gemittelte Verläufe.

In die zu minimierende Zielfunktion (gewichtete Summe der quadrierten Fehler, WSSE) wurden stündliche Messdaten der Wassergehalte und Matrixpotenziale in den vier Messtiefen aufgenommen. Die Messdaten wurden mit einem normalverteilten Fehler versehen, um die Ungenauigkeit der in der Realität eingesetzten Messgeräte zu berücksichtigen. Die Standardabweichung des Fehlers betrug  $0.005 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  für die Wassergehalte und 2 cm für die Matrixpotenziale. Die effektiven hydraulischen Eigenschaften der beiden Schichten wurden mit dem van Genuchten-Mualem Modell parametrisiert. Dabei wurden für jede Schicht alle 6 Parameter, also insgesamt 12 Parameter gleichzeitig geschätzt.

## Ergebnisse

Im Oberboden bricht die Infiltrationsfront sehr gleichmäßig durch (Abb. 2a, b). Das ist an der sehr geringen Variabilität der Matrixpotenzialverläufe, die an den 250 Messpunkten in 20 cm Tiefe (Abb. 2a) und 80 cm Tiefe (Abb. 2b) gemessen wurden, erkennbar. Die Wassergehaltsverläufe im Oberbodenhorizont reflektieren die Variabilität der Miller-Miller-skalierten hydraulischen Eigenschaften (Abb. 2d, e). In 160 cm Tiefe spiegeln sich die zwei Materialien Sand und Lehm, aus denen der Unterbodenhorizont aufgebaut ist, in der Zweiteilung der Durchbruchfront wider, sowohl bei den Matrixpotenzial- als auch bei den Wassergehaltsverläufen (Abb. 2c, f). Die Variabilität der Wassergehalte ist insgesamt wesentlich größer als die der Matrixpotenziale. Unter Berücksichtigung des Messbereichs des Sensors wird durch Mittelung der Statusvariablen über mehrere Knotenpunkte die Variabilität der Messsignale reduziert (nicht dargestellt).

Aus dem 2D-Szenario gemessene Matrixpotenziale und Wassergehalte können durch eine eindimensionale, effektive Beschreibung unter der Annahme eines Zweischicht-Profiles relativ gut, jedoch mit systematischen Abweichungen, beschrieben werden. Die daraus abgeleiteten van-Genuchten-Mualem-Funktionen sind ein-

deutig bestimmt, hängen jedoch stark von der zufälligen Position der Messpunkte im Bodenprofil ab (Abb. 3).

Die Variabilität der vorhergesagten Matrixpotenzial- und Wassergehaltsverläufe ist im Oberbodenhorizont wesentlich geringer als im Unterbodenhorizont. Das wird direkt in den geschätzten hydraulischen Eigenschaften wiedergegeben. Die Retentions- und Leitfähigkeitskurven des Oberbodens variieren wesentlich weniger als diejenigen des Unterbodens. Die Variabilität der hydraulischen Eigenschaften ist noch wesentlich größer, wenn sie nur aus Wassergehaltsdaten geschätzt werden (nicht gezeigt).

Die Auswirkungen der Variabilität der aus verschiedenen Messdaten geschätzten effektiven hydraulischen Eigenschaften auf Kenngrößen des Wasserhaushalts sind momentan unklar. Zumindest für die unmittelbar ableitbare nutzbare Feldkapazität lässt sich allerdings sagen, dass die ermittelten Werte insbesondere für den Unterboden äußerst variabel ausfallen.

## Fazit und Ausblick

Die zufällige Lage der Messpunkte in einem heterogenen Boden kann zu einer erheblichen Variabilität gemessener Wasserspannungen und Wassergehalte führen. Dies beeinflusst stark die geschätzten hydraulischen Eigenschaften. Ohne eine verlässliche Vorstellung über die Struktur und das Ausmaß der Heterogenität des betrachteten Bodens besteht die Gefahr, dass der Wasserhaushalt eines Bodens sehr fehlerhaft eingeschätzt wird. Eine mehrfache parallele Instrumentierung in den Zieltiefen hilft, diese Gefahr zu mindern.

## Dank

Diese Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des Projektverbunds INVEST (virtuelles Institut der Helmholtz-Gemeinschaft) gefördert.

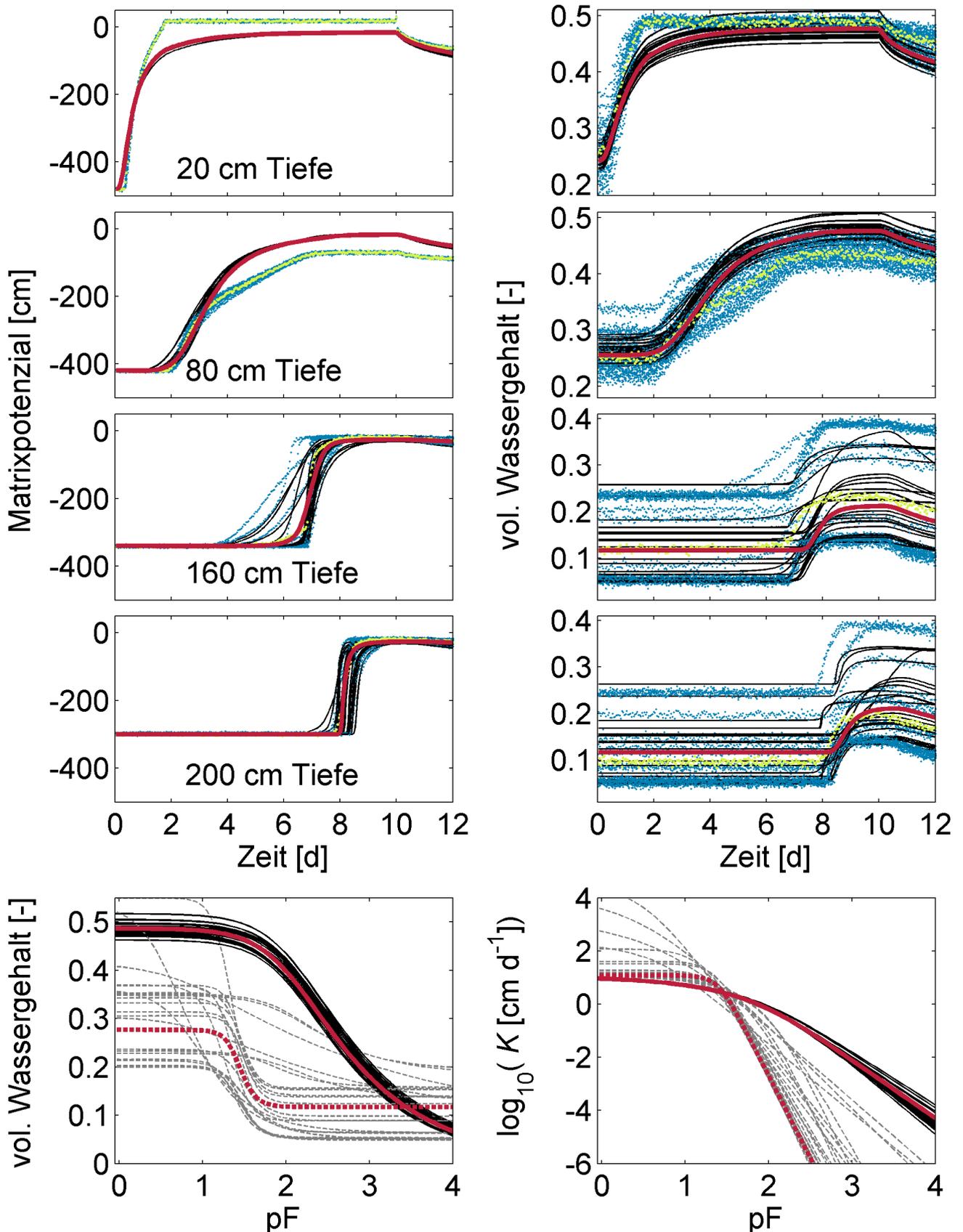


Abb. 3: Matrixpotenzial- (links) und Wassergehaltsverläufe (rechts) in den vier Messtiefen an je 25 Clustermesspunkten (Messungen: blau, Vorhersagen: schwarz) sowie jeweils über die gesamte Profilbreite gemittelte Verläufe (Messungen: grün, Vorhersagen: rot). Unten: Aus den jeweiligen Matrixpotenzial- und Wassergehaltsverläufen invers bestimmte bodenhydraulische Eigenschaften (schwarz durchgezogen: Oberboden; grau gestrichelt: Unterboden; rot: aus den gemittelten Verläufen geschätzte Eigenschaften).