

W10 Optimierung von Meßmethoden zur hydraulischen Charakterisierung von Böden

W10 Optimization of methods to measure the hydraulic properties of soils

Bernd Schultze and Wolfgang Durner, Dept. of Hydrology, University of Bayreuth

Summary

To understand transport of water and solutes in the soil-plant-atmosphere system, the hydraulic properties of soils, namely the relationship between capillary pressure and water content (retention function) and between the hydraulic conductivity and water content (conductivity function) must be known. The standard methods for measuring these properties are time-demanding and limited to rather small soil samples. Therefore, the inverse modeling of transient outflow/inflow experiments has recently become an attractive alternative method to determine simultaneously the retention curve and conductivity curve parameters of a soil.

This project aimed at maximizing the efficiency of the inverse modeling methodology in order to get a unique and stable parameter identification, while making the experiment as fast and simple as possible. Developments involved both measurement hardware and software. A fully automated computer-controlled apparatus with a user-friendly interface was developed to perform transient water flow experiments with arbitrary prescribed boundary conditions. To overcome limitations with respect to moisture range and sensitivity, the device was designed to perform experiments in three phases which cover the whole range of moisture content: 1. Application of continuous water flux from the top to identify the conductivity properties near saturation, 2. Transient flow experiments in the intermediate matric potential range, 3. Evaporation experiments in the lower matric potential range.

The results of sensitivity analyses and the evaluation of experiments show that inverse simulation of outflow and inflow experiments on large undisturbed soil samples is a suitable method to determine hydraulic properties. Both the *Multistep* method (stepwise change of a water or air pressure at one boundary of the soil column) and the so-called *Continuous* method (smooth continuous change of the water pressure) allow to identify simultaneously the parameters of the retention function and the conductivity in a stable and unique manner. Contrary to that, the historically used *Onestep* method is rather unsuitable.

The design of the experiments allows further to investigate hysteresis of the hydraulic functions, kinetic imbalances („dynamic effects“), and requirements concerning the flexibility of the shape of the retention function. Our experiments showed that none of the current hysteresis models is fully capable of describing our observations, the deviations between measurements and the current models being most pronounced near saturation. Close to saturation we find "dynamic effects" which invalidate the usual assumption of water flow according to Richards' equation. Based on additional simulations with a two-phase flow model, we show that a valid description of water and air movement can only be achieved by treating the flow process as a two-phase flow. Further work is required to judge on the consequences of our findings for water and solute transport simulations in the field.

1. Einleitung

1.1 Problemstellung und Stand der Forschung

Der ungesättigte Wasserfluß in den oberflächennahen Bodenschichten spielt eine entscheidende Rolle im Wasserkreislauf. Seine Kenntnis ist eine essentielle Voraussetzung für die Bewertung des Verhaltens gelöster Stoffe im Boden. Der Wasserfluß im Boden wird im allgemeinen durch die numerische Lösung der Richards-Gleichung berechnet. Die Lösung dieser partiellen Differentialgleichung erfordert die Vorgabe von Funktionen für die spezifische Wasserkapazität und hydraulische Leitfähigkeit. Als Voraussetzung für die Wasserhaushaltssimulationen für das Freiland müssen (i) die gewählte Transportgleichung zutreffen (ii) geeignete Funktionen für die hydraulischen Beziehungen gewählt werden, und (iii) die Parameter dieser Funktionen repräsentativ für das untersuchte System erfaßt werden. Die hier vorgeschlagene Methodik dient primär der Parameterbestimmung. Gleichzeitig können jedoch für die untersuchten Bodenproben auch die Annahmen (ii) und (i) geprüft werden.

Während in den chemisch-analytischen Wissenschaften über lange Zeiten hinweg eine kontinuierliche Weiterentwicklung von Meßmethoden stattfand, ist für den Bereich der Bodenphysik festzustellen, daß im Gefolge der stürmischen Entwicklung der Rechner-technologie über einige Dekaden hinweg fast ausschließlich die mathematischen Modelltheorien und die numerischen Verfahren zur Lösung der Modellgleichungen fortentwickelt wurden. Die Meßtechnik und Meßtheorie zur Bestimmung hydraulischer Eigenschaften dagegen blieben bis in die 80er Jahre mehr oder weniger auf dem Niveau der frühen 50er Jahre stehen. Unsere Unfähigkeit, die den Modellen zugrundeliegenden Parameter für Feldsituationen in befriedigendem Maße zu erheben, ist somit zu einem Schlüsselproblem in der Erforschung von Prozessen des Wasser- und Stofftransports geworden (van Genuchten und Leij, 1992).

In der Vergangenheit wurde vielfach versucht, aufgrund von Messungen an kleinen Laborproben die effektiven hydraulischen Eigenschaften von Feldeböden abzuleiten. Dieser Ansatz muß für die Mehrzahl der natürlich vorkommenden Böden als gescheitert angesehen werden (Nielsen et al., 1986). Insbesondere wurde erkannt, daß die Messung von hydraulischen Parametern an Bodenproben der üblichen Größe (100 cm^3) mit den gängigen Standardverfahren ungeeignet zur Bestimmung von Feldeigenschaften sind (Herrmann et al., 1992, Rehding, 1993, Jaesche, 1994). Das Versagen wird oft darauf zurückgeführt, daß das repräsentative Elementarvolumen (REV) des Porensystems in strukturierten Böden größer als die Bodenprobe ist. Es gibt ferner Hinweise, daß der Meßvorgang selbst starke Strukturveränderungen an kleinen Proben hervorruft (Bhend, 1993). Nicht zuletzt wird über die Rolle von dynamischen Ungleichgewichten beim Wasserfluß spekuliert, die durch Standardmeßverfahren, die auf Gleichgewichtsexperimenten beruhen, nicht erfaßt werden können (Kneale, 1985).

Feldmessungen andererseits sind mit den heute verfügbaren Methoden sehr aufwendig und stören den Standort. Sie können somit nur in Ausnahmefällen vorgenommen werden. Es stellt sich deshalb die Frage, nach welcher Strategie bei der Parametererfassung vorgegangen werden soll. Um einer Beantwortung dieser Frage näherzukommen, ist die Entwicklung von Meßverfahren an größeren ungestörten Bodenproben von hoher

Dringlichkeit. Dies wurde seit Mitte der 80er Jahren erkannt, und führte zu einem neuen Schub bei der Weiterentwicklung von Meßverfahren für hydraulische Bodenparameter, der bis in die Gegenwart anhält (van Dam et al., 1990, Warrick, 1993). Die neuen Entwicklungen sind einerseits gekennzeichnet durch den Versuch, Erkenntnisse aus anderen Wissenschaftsfeldern zu übertragen und deren apparative Methoden hinsichtlich ihrer Eignung für Böden zu untersuchen (Georadar, Time Domain Reflektometry (TDR), Kapazitätsmessungen, Computer Aided Tomomography (CAT), und – in jüngster Vergangenheit – Neutron Magnetic Resonance (NMR)). Auf der anderen Seite erfahren im Prinzip "klassische" Meßverfahren eine Renaissance, da instationäre Experimente nun in hoher zeitlicher Auflösung und Meßgenauigkeit aufgezeichnet werden können (Plagge et al., 1990, Scheibke et al., 1991, Wendroth et al., 1993) und mit Hilfe leistungsfähiger Rechner anschließend durch inverse numerische Simulationsverfahren ausgewertet werden können (Kool et al., 1987, Eching und Hopmans, 1993).

1.2 Eigene Vorarbeiten

Der in diesem Projekt verfolgte Weg schließt an die zweite Richtung an, und ist die konsequente Weiterführung einer mehrjährigen Entwicklung. Zunächst wurde im Rahmen einer Dissertation (Durner, 1991) eine Sensitivitäts- und Fehleranalyse der bisherigen Methoden zur Schätzung der hydraulischen Leitfähigkeit vorgenommen. Diese Methoden sind von Bedeutung, da sie häufig in Parameteroptimierungsverfahren Verwendung finden und so zu Folgefehlern führen können. Es zeigte sich, daß die üblichen verwendeten Funktionsklassen die wahren hydraulischen Eigenschaften ungestörter strukturierter Böden stark vereinfachen. Diese Vereinfachungen können in hydraulischen Simulationen zu großen Fehlern führen. Insbesondere gilt dies im Bereich nahe Sättigung, der für den Stofftransport von entscheidender Bedeutung ist. Bei Vorgabe flexiblerer Funktionsklassen wären sehr viel genauere Beschreibungen möglich. Die Parameter der flexibleren Funktionsklassen können jedoch mit den üblichen Meßmethoden nicht genügend genau bestimmt werden.

Als Konsequenz schlug Durner (1991, S. 155ff) ein Konzept vor, bei dem die Parameteroptimierung für größere Bodenproben durch eine Kombination von stationären (nahe Sättigung) und instationären Experimenten (im Austrocknungsbereich) vorgenommen wird. Im Rahmen einer Diplomarbeit (Scheibke, 1990) wurde ein Prototyp einer Meßanlage gebaut, die für den instationären Teil der Methodik geeignet ist. Wichtige theoretische Aspekte des Auswertungsverfahrens wurden in anschließenden Arbeiten näher untersucht. Zum einen stellte sich die Frage, inwieweit sich die unvermeidlichen Streuungen der Meßsignale auf die Bestimmungsverfahren auswirken (Scheibke, 1997). Zum anderen wurde mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen untersucht, wie Experimentabläufe beschaffen sein müssen, damit die unbekannt Parameter durch Verfahren der inversen Simulation optimal bestimmt werden können (Zurmühl, 1994).

Auf Basis dieser Vorarbeiten konnte nun die Zusammenfügung all dieser Erkenntnisse in einem optimierten Meßverfahren erfolgen, bei dem an ungestörten großen Bodenproben rechnergesteuerte Aus-, Durch- und Rückflußexperimente mit räumlich und zeitlich hochaufgelöster Erfassung von Wassergehalt und Potential durchgeführt werden. Dies bedeutet, daß gegenüber der Prototyp-Anlage (Scheibke 1990) sowohl Hardware als auch Softwarekomponenten erweitert werden mußten.

1.3 Hypothesen und Methoden

1.3.1 Hypothesen

1. Die Porenstruktur im Bereich nahe Sättigung ist für den schnellen Stofftransport und somit die mikroskopische Heterogenität der Bodenlösung verantwortlich. Die in der Regel verwendeten vereinfachenden Modelle der hydraulischen Funktionen können diesen Bereich nicht adäquat beschreiben (Vogel und Cislerova, 1988, Durner, 1994). Mit einer hochentwickelten Meßmethodik können wesentlich flexiblere hydraulische Funktionen bestimmt werden, deren Verwendung zu einer wesentlich besseren Simulation des Fließverhaltens in strukturierten Böden führen.

2. Hydraulische Eigenschaften von Bodenproben der Standardgröße 100 cm³ entsprechen nicht den in situ Eigenschaften der Böden, auch wenn die Proben "ungestört" genommen werden. Ob dies auch für wesentlich größere Proben gilt ist unklar, und muß durch den Vergleich mit Ergebnissen aus in situ Messungen untersucht werden. Auch ist unklar, ob es einfache Kriterien für eine „genügende“ Probengröße gibt. Diese Frage ist von größter Bedeutung in Hinblick auf die zukünftige Optimierung von Meßstrategien, wenn es darum geht, die Eigenschaften ganzer Standorte zu charakterisieren. Sollte sich zeigen, daß auch für größere Proben (Größenordnung 1 bis 10 Liter) keine Übertragbarkeit erreicht werden kann, so müssen künftige Messungen grundsätzlich in situ vorgenommen werden.

3. Unter natürlichen Verhältnissen treten in Böden hydraulische Ungleichgewichts Phänomene auf, deren quantitative Erfassung und Bewertung eine wichtige Rolle für das Verständnis des Stofftransports in Böden spielen. Wichtige Punkte hierzu sind:

- Hysterese der Wasserspannungs- und Leitfähigkeitsfunktion.

Die Bedeutung der Hysterese für den Wassertransport ist bereits seit langem bekannt und unumstritten (z.B. Beese und van der Ploeg, 1976). Dennoch wird Hysterese aus Mangel an Meßdaten in Feldsituationen praktisch nie berücksichtigt. Die in diesem Projekt angestrebte Methodik wird die Hysterese der hydraulischen Eigenschaften standardmäßig erfassen.

- Dynamische Fließungleichgewichte

Es gibt eine Vielzahl von Hinweisen darauf, daß bei Infiltrationen sowohl unter Feld- wie Laborbedingungen sogenannte dynamische Ungleichgewichte auftreten. Diese Ungleichgewichte führen zu unerwarteten Ergebnissen beim Wasser- und Stofftransport, die mit den gegenwärtig angewandten Methoden der Beschreibung des Wasserflusses nicht vereinbar sind (Hopmans et al., 1992, Stonestrom und Akstin, 1994), für die schnelle Verlagerung von Stoffen jedoch eine wichtige Rolle spielen. Die Beschreibung dieser Effekte mit der Richards-Gleichung ist möglich, wenn eine variable Retentionsfunktion benutzt wird, die von der hydraulischen Vorgeschichte und der Dynamik der Transportvorgänge abhängt (Nieber, 1996). Zum Verständnis der Wasserbewegung ist es notwendig, diese Fließungleichgewichte unter Laborbedingungen zu quantifizieren und damit verbundene Hypothesen zu testen.

1.3.2 Methoden zur Überprüfung der Hypothesen

Der in diesem Projekt verfolgte Weg baut auf den oben genannten eigenen Vorarbeiten auf und berücksichtigt Erkenntnisse aus der Zusammenarbeit mit Instituten in Wageningen (Staring Centre, J. Halbertsma), Stuttgart (Bodenphysik, T. Zurmühl), Prag (Techn. Uni, M.

Cislerova und T. Vogel) und Bayreuth (Bodenphysik, O. Ippisch). Es werden rechnergesteuerte Fließexperimente (Ausfluß, Durchfluß und Rückfluß) an ungestörten Bodenproben von 10 cm Durchmesser und variabler Länge durchgeführt. Aufgrund der Größe der Bodenproben kann die Parameterbestimmung für den stärker ungesättigten Bereich nicht als Gleichgewichtsexperiment erfolgen, sondern erfordert die Auswertung von nichtstationären Fließsituationen.

Der Grundaufbau der Anlage ergibt sich aus der Prototyp-Anlage von Scheibke (1990). Die Apparatur wird jedoch mehrfach modifiziert und ergänzt. Am oberen Säulenkopf wird die Anlage durch eine Beregnungsanlage erweitert. Dies erlaubt, nahe Sättigung stationäre Durchflußexperimente durchzuführen, die für die Bestimmung der Retentionscharakteristik in diesem Bereich notwendig sind. Die Steuerung der Anlage wird erweitert, so daß kontinuierliche Veränderungen der Druckrandbedingungen und die Steuerung der Beregnungsrate möglich sind. Eine weitere Veränderung gegenüber der Grundanlage besteht in der Ausrüstung der Bodensäule in mehreren Tiefen mit TDR-Antennen zur Messung des Wassergehalts. Dadurch wird eine genaue Prozeßkontrolle ermöglicht. Zur Untersuchung des trockenen Bereiches des Bodens soll ein Evaporationsexperiment angeschlossen werden, dazu wird die Säule auf eine Wägezelle aufgebracht und mit einem Ventilator versehen. Weiterhin können unterschiedliche Auswerteverfahren angewandt und miteinander verglichen werden.

Die eigentliche Parameterbestimmung erfolgt durch inverse numerische Simulation. Hierzu wird das hydraulische Experiment anfänglich mit Schätzwerten für die hydraulischen Parameter simuliert. Durch gezielte Veränderung der Parameter wird versucht, zu einer optimalen Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung zu kommen, wobei Flußdaten, Wassergehalte und Tensionen in die Optimierung eingehen. Ist eine befriedigende Übereinstimmung nicht erzielbar, so ist dies ein Hinweis darauf, daß das gewählte Transportmodell oder die hydraulischen Funktionen nicht in der Lage sind, die reale Situation zu beschreiben. Der Umkehrschluß ist leider nicht zwingend.

Es werden verschiedene Optimierungsstrategien zum Einsatz kommen und in Hinblick auf ihre Robustheit (Problem der Eindeutigkeit der Optimierungslösung) und Genauigkeit miteinander verglichen werden. Die Randbedingungen für die Experimente werden nach einer numerischen Voranalyse in einer Weise gesteuert, die auf eine maximale Parametersensitivität abzielt.

Wesentliches Ziel der Arbeit ist die methodische Entwicklung von Labormessmethoden zur hydraulischen Charakterisierung von Böden. Es werden deshalb keine Reihenuntersuchungen an Bitök-Standorten durchgeführt, sondern es erfolgt eine kontinuierliche Weiterführung der Untersuchungen an Referenzproben mit einem bekannten relativ stabilem Porensystem. An einer der Proben wird ferner eine vergleichende Parameterbestimmung an kleinen Stechzylindern nach Standardmethoden vorgenommen.

1.4 Stellung innerhalb des Programms von BITÖK

Von der Entwicklung des vorgesehenen Meßsystems profitieren mittelbar alle Projekte im Bitök Programm, die auf eine zutreffende Charakterisierung der hydraulischen Prozesse im Boden angewiesen sind (S8 [Beitrag redoxchemischer Prozesse zur Neutralisierung atmosphärischer Säureeinträge in kleinen Einzugsgebieten des Frankenwaldes], N2

[Transportverhalten von gelöstem organischem Stickstoff (DON) in Waldböden], N8 [Mikroskalige Variabilität der Bodenlösungschemie, W7 [Wasserbewegung im Buchenwald: Einfluß des Untergrundes], W8 [Wasser- und Nährstoffhaushalt der gesättigten und ungesättigten Zone im Boden von Waldbeständen]). Das Projekt kann einen wichtigen Beitrag zur Frage liefern, wie Mittel am kostengünstigsten eingesetzt werden, wenn es um die hydraulische Charakterisierung von Experimentalstandorten geht.

Sollte die angestrebte Methodik wie erwartet erfolgreich sein, so ist die Vervielfachung der optimierten Meßapparatur (Hard und Software, Experimentelles Design) anzustreben, um standardmäßig hydraulische Eigenschaften in stark verbesserter Qualität bestimmen zu können.

2. Technische Realisierung (Aufbau der Anlage)

2.1 Hardware

2.1.1 Beschreibung der Anlage

Der Grundaufbau der neuen Anlage (Abb. 1) orientiert sich an der von Scheibke und Durner (1991) erstmals konzipierten Meßanlage. Sie besteht im wesentlichen aus drei funktionellen Gruppen: 1) der Regel- und Meßelektronik (PC, Multiplexer und Analog/Digital-Karte, Digital/Analog-Karte), 2) der Unterdruckanlage (Vorlagegefäße, Magnetventile, Vakuumpumpe) und 3) der Bodensäule und je nach Meßanordnung mit Bürette, Sprinkler mit Pumpe oder Wägezelle und Ventilator.

Zur Regelung, Messung und Registrierung der anfallenden Meßdaten dient ein handelsüblicher Personalcomputer (86486DX66). Die von den Meßwertaufnehmer abgegebenen Analogsignale (Druckaufnehmer: 0-100 mV, TDR: 0-1 V) werden zunächst auf zwei Multiplexer (Fa. Computer Boards, Mod. CIO-EXP32/16) mit je 16 Kanälen (bipolar) geführt. Hier können die Analogsignale zum erstenmal verstärkt werden. Von den Multiplexer gelangen die Signale zum ersten Kanal der Analog/Digitalkarte (Fa. Computer Boards, Mod. CIO-DAS08-PGA 12 Bit Auflösung), hier ist eine weitere Verstärkung des Signals möglich. Der maximale Meßbereich der Karte beträgt ± 10 V. Die zur Steuerung der Magnetventile vom Rechner abgegebenen Digitalsignale werden mittels einer Digital/Analogkarte (Fa. Computer Boards, Mod. CIO-DIO24) in ein 0.4 bzw. 3 V Ausgangssignal umgewandelt und veranlassen die Ventile zum Öffnen oder Schließen. Der Elektronikteil der Anlage wurde komplett von der Firma EMC GmbH, Bayreuth geliefert.

Der am unteren Rand notwendige Unterdruck für die Fließexperimente wird durch eine Unterdruckanlage bereitgestellt. Mit einer Vakuumpumpe (Fa. Vaccubrand, Mod. MZ 2C/1.7) wird ein Vorlagebehälter auf ein grobes Vakuum evakuiert. Mit diesem Vakuum wird nun der Unterdruck in einer zweiten Vorlage die mit der Bürette verbunden ist eingestellt. Dies geschieht durch zwei Magnetventile, die durch den PC gesteuert werden. Ein Ventil ist mit der Grobvakuumvorlage verbunden, das andere mit der Umgebungsluft. Durch wechselndes Öffnen und Schließen der beiden Ventile wird der benötigte Unterdruck am unteren Rand eingestellt.

Mit der neuen Anlage können nun grundsätzlich Fließexperimente in drei aufeinanderfolgenden Phasen an ein und derselben Bodensäule durchgeführt werden:

- Anwendung eines kontinuierlichen Wasserflusses am oberen Rand mit hohen Raten um eine stationäre Infiltration in nasse Böden zu simulieren. Nur mit dieser Flußrandbedingung läßt sich die Leitfähigkeit nahe Sättigung ($0 \text{ cm} > \psi > -10\text{cm}$) mit ausreichender Genauigkeit bestimmen
- Im mittleren Matrixpotentialbereich ($-10 \text{ cm} > \psi > -500\text{cm}$) werden Aus/Rückflußexperimente durchgeführt.
- In der letzten Phase läßt man die Säule durch Evaporation austrocknen. Damit lassen sich in der Bodensäule Potentialbereiche ($-500 \text{ cm} > \psi > -100000 \text{ cm}$) erreichen, die sonst nur mit höchstem technischem Aufwand realisiert werden können.

Die Anordnung der Bodensäule für die drei verschiedenen Phasen sind in den Abbildungen 2 bis 4 dargestellt.

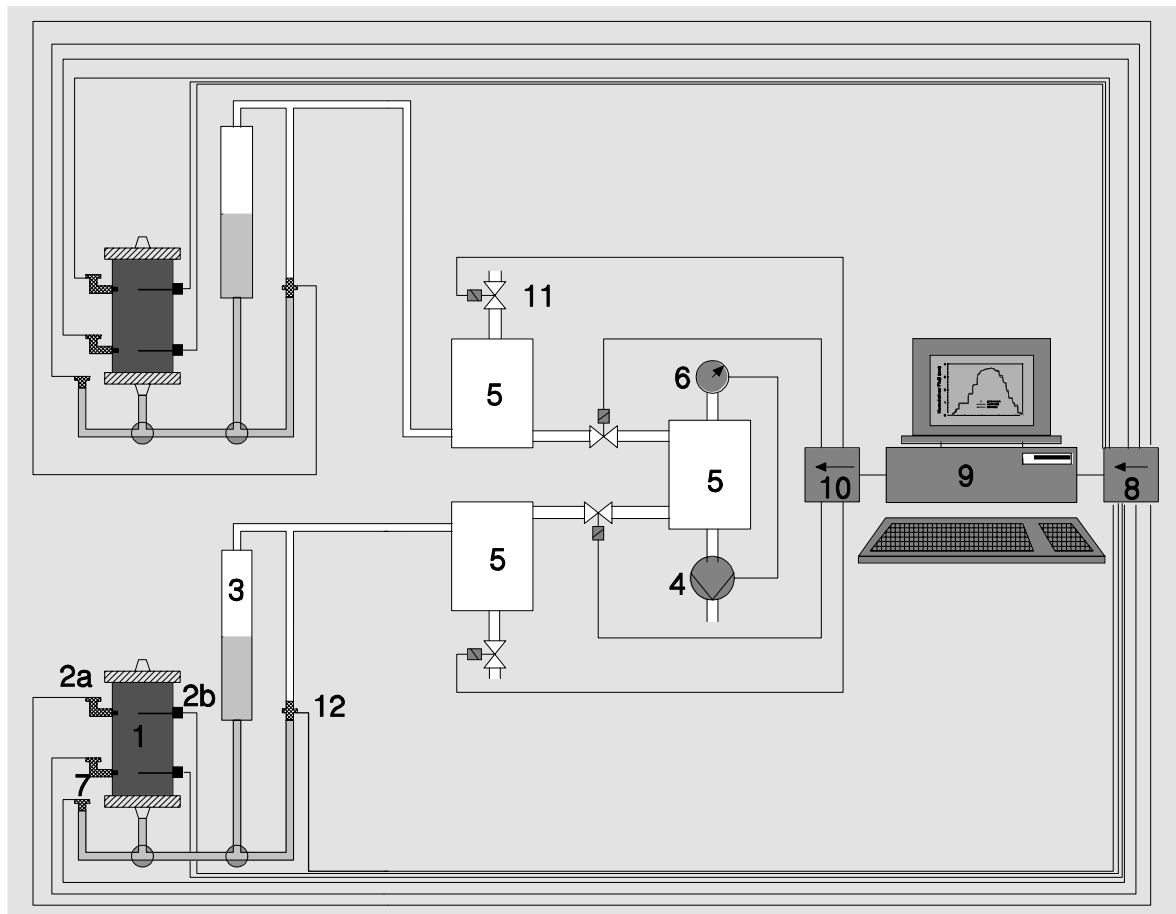


Abb. 1: Aufbau der Versuchsanlage zur Bestimmung der hydraulischen Kenngrößen von Bodensäulen. 1: Bodensäule, 2a: Mikro-Tensiometer mit Druckaufnehmer, 2b: TDR, 3: Bürette, 4: Vakuumpumpe, 5: Vorratsbehälter, 6: Manometer, 7: Druckaufnehmer, 8: Multiplexer und Analog/Digital-Converter, 9: Computer, 10: Digital/Analog-Converter, 11: Magnetventil, 12: Differenzdruckaufnehmer.

Fig. 1: Testing system to determine the hydraulic functions of soil cores. 1: Soil core, 2a: Micro-Tensiometer with pressure transducer, 2b: TDR, 3: Burette, 4: Vacuum pump, 5: Storage bin, 6: Manometer, 7: Pressure transducer, 8: Multiplexer and Analog/Digital-Converter, 9: Computer, 10: Digital/Analog-Converter, 11: Magnetic valve, 12: Difference pressure transducer

Die erste Phase zur Bestimmung der bodenhydraulischen Parameter wird benutzt um die hydraulische Leitfähigkeit $K(\theta)$ nahe Sättigung bei etwa Einheitsgradient zu identifizieren. Die technische Durchführung erfolgt durch zwei Hauptteile (Abb. 2): einer elektronischen Dosierpumpe und einem Tropfen-Sprinkler. Bei der Pumpe handelt es sich um eine Kolbenmembranpumpe Model LPB2M2-PTC1-366 der Firma Pulsatron. Die Hublänge und die Hubfrequenz können manuell eingestellt werden. Die Hubfrequenz kann alternativ durch ein externes Eingangssignal (4-20 mA DC) vom PC geregelt werden. Der Tropfen-Sprinkler wird während der Messung auf den Kopf der Bodensäule installiert. Im Sprinkler befinden sich 10 – 40 Spritzennadeln um das Wasser gleichmäßig über der Oberfläche der Bodensäule zu verteilen. Der Sprinkler ist ein Eigenbau der mechanischen Werkstatt der Universität Bayreuth.

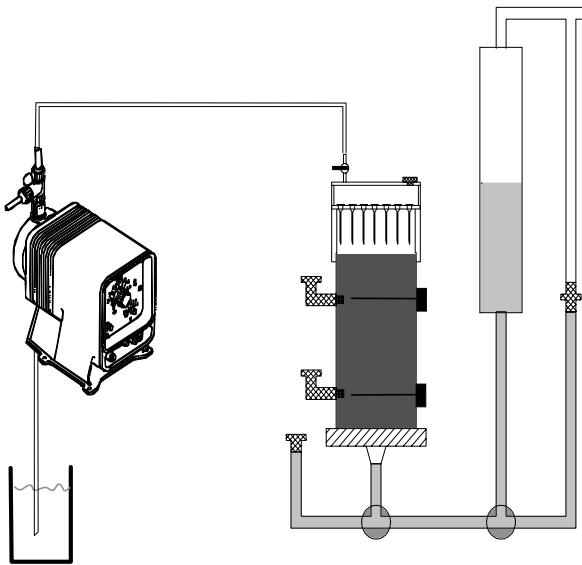


Abb. 2: Anordnung der Bodensäule zur Messung der hydraulischen Leitfähigkeit $K(\theta)$ nahe Sättigung
Fig. 2: Arrangement of the soil core for the measurement of the hydraulic $K(\theta)$ conductivity near saturation

Die Messungen in der zweiten Phase entsprechen der Anordnung des ursprünglichen Setups der Anlage (Abb. 3). Eine detaillierte Beschreibung gibt Scheibke (1990). Zusätzlich kann nun der Wassergehalt in den Bodensäulen in zwei Tiefen mit Time Domain Reflectary (TDR) - Sensoren gemessen werden. Wir setzen dazu einen TRIME-MUX6 mit optionalen Analogausgängen und P2-Antennen der Firma IMKO, Ettlingen ein. Der Meßzyklus für einen Kanal beträgt 80 Sekunden, derzeit sind vier Antennen von maximal sechs am Multiplexer angeschlossen. Nach Angaben von IMKO beträgt die absolute Genauigkeit ± 2 Vol-% und die relative Genauigkeit ± 0.5 Vol-%. Kritischer Faktor für die Genauigkeit der Wassergehaltsmessung mit TDR ist der Kontakt der zwei beschichteten Stahlstäbe (80 mm Länge, 3.5 mm Durchmesser, 20 mm Abstand) mit dem Boden (Rothe et.al 1997). Für den Einbau der TDR-Antennen wurde daher ein spezieller Einbauapparat (Abb. 4) hergestellt, mit dem die Antennen verdrehungsfrei und gleitend in den Boden geschoben werden können.

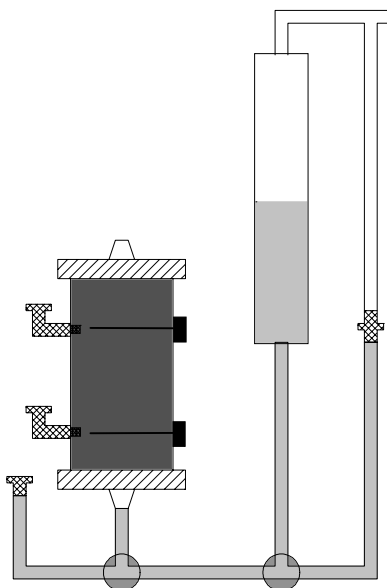


Abb. 3: Anordnung der Bodensäule zur Durchführung instationärer Aus/Rückfluß-Experimente
Fig. 3: Arrangement of the soil core to perform out/backflow experiments

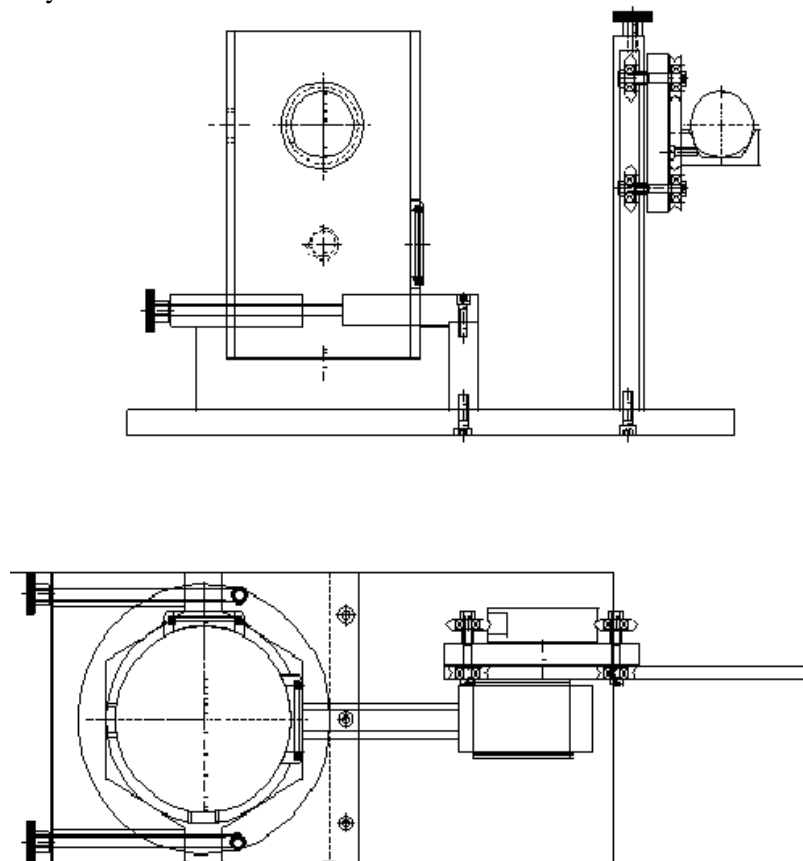


Abb. 4: Vorrichtung zum Installieren der TDR

Fig. 4: Device for the installation of the TDR

Nach dem instationären Fließexperiment kann als dritte Meßphase ein Evaporationsexperiment angeschlossen werden. Während der Evaporation des Wasser durch den oberen Rand der Säule wird das Matrixpotential im Boden unter den Meßbereich ($\psi < 850$ cm) der Tensiometer fallen. Damit verlieren wir Information über das Wasserpotential. Die durch die TDR-Antennen gemessenen Wassergehalte können allerdings in der inversen Bestimmung benutzt werden um die Fließdynamik zu identifizieren. Zur Parameterbestimmung wird zusätzlich eine exakte Massenbilanz während der Evaporationsphase benötigt. Dies wird erreicht indem die Bodensäule auf eine Wägezelle mit einem effektiven Meßbereich von 5 kg (Serie 1000, Modell 1010, UMS GmbH, München) aufgebracht wird. Auf den Kopf der Säule kann ein Ventilator installiert werden, mit dem die Evaporation, falls gewünscht, beschleunigt werden kann (Abb. 5). Mit der Gewichtsabnahme und den Wassergehaltsmessungen kann mit der Methode nach Wind und dem Programm METRONIA (Halbertsma 1995) die $K(\theta)$ -Funktion des Trocknungsastes bestimmt werden. Derzeit ist es möglich zwei Bodensäulen simultan zu untersuchen. Die Elektronik-Hardware der Anlage ist für die parallele Messung von vier Bodensäulen konstruiert. Es ist daher möglich die Anlage in Zukunft zu erweitern. Bei der Anschaffung von zwei zusätzlichen Multiplexen, einem TRIME-MUX6 mit P2-Antennen kann die Anlage auf insgesamt acht parallel zu untersuchende Säulen erweitert werden.

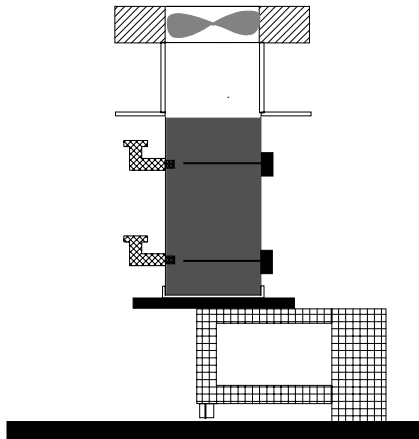


Abb. 5: Anordnung der Bodensäule zur Durchführung von Evaporations-Experimenten

Fig. 5: Arrangement of the soil core to perform evaporation experiments

2.1.2 Entnahme der Bodenproben

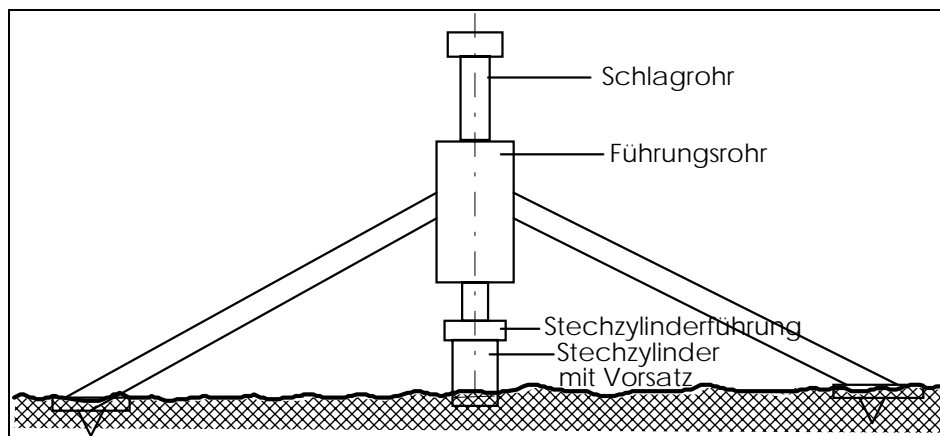


Abb. 6: Einschlaggerät zur Probenahme von Bodensäulen

Fig. 6: Equipment for the collection of soil cores

Die Bodensäulen wurden möglichst ungestört entnommen. Hierzu wurde ein Einschlaggerät (Abb. 6) verwendet, welches speziell für größere Stechzylinder (Durchmesser: 9.4 cm, Höhe: 7-14 cm) entwickelt wurde (Scheibke 1990). Es besteht aus einem Dreibeinergestell mit einem Führungsrohr für das Schlagrohr, in welches die Führung für den Stechzylinder gesteckt wird. Das Gestell wurde senkrecht über der Probenahmestelle errichtet. Am unteren Ende des Stechzylinders wurde ein Vorsatz angebracht, der am unteren Rand angeschärft war. Stechzylinder und Vorsatz wurden dann über die Führung und das Schlagrohr mit einem Hammer in den Boden getrieben. Danach wurde der Stechzylinder ausgegraben, der untere Vorsatz entfernt und der Zylinder in die Versuchsanordnung eingebaut.

2.1.2 Einbau der Bodenproben

Die verwendeten Stechzylinder zur Aufnahme der Bodensäulen bestehen aus Plexiglas und haben eine Höhe von 15.7 cm und einen Durchmesser von 9.0 cm. Damit ergibt sich ein Bodenvolumen von 1000 cm^3 . Die Zylinder werden zwischen einem Säulenfuß und einem Säulenkopf eingespannt (siehe Abb. 4). In den Säulenfuß wird vorher eine poröse Platte

eingbracht. Diese dient als Halt für den Boden und zur Luftabdichtung. Je nach Bodenart können Platten mit unterschiedlichen Porositäten eingesetzt werden. Es handelt sich dabei um Glassinterplatten der Porosität P3, P4 oder P5 der Firma Robu. Ihr Lufteintrittspunkte liegen nach Herstellerangabe bei einem Potential von $\psi \approx -70, -150, \text{ bzw. } -450 \text{ cm}$ und die gesättigten Leitfähigkeiten betragen ca. 200, 50, 2.5 cm d^{-1} . Die gesättigten Leitfähigkeiten der verwendeten Platten werden vor den Messungen bestimmt.

In einem Abstand von 4.5 und 10.2 cm von der Bodenoberkante werden seitlich TDR zur Messung des Wassergehaltes mit einer speziellen Einschiebapparatur (Abb. 4) und Mikro-Tensiometer zur Messung des Potentials eingebaut. Die Tensiometer haben einen Durchmesser von 6 mm und werden seitlich 15 mm tief in den Boden eingebracht.

2.2 Software

Die Meßdatenerfassung, Steuerung und Online-Darstellung der Meßdaten erfolgt mit der Meßsoftware Testpoint 2.0 für Windows 3.1 der Fa. Capital Equipment Corporation (CEC). Bei dem Softwarepaket Testpoint handelt es sich um ein Entwicklungsumgebung (Abb. 7) unter Windows mit der es schnell und einfach möglich ist Anwendungen im Bereich der Meßdatenerfassung zu erstellen. Testpoint unterstützt GPIB-488.2, RS-232, RS-485, sowie Datenerfassungskarten verschiedener Hersteller. Testpoint beinhaltet Funktionen, um Hardware anzusteuern, benutzerfreundliche Oberflächen zugenerieren, Daten zu verarbeiten, aufzubereiten und darzustellen, Meßprotokolle zu erstellen, sowie Daten und Informationen mit anderen Windows Programmen auszutauschen. Die Meßsoftware verfügt über eine moderne objektorientierte Windows-Oberfläche sowie einen außerordentlichen Leistungs und Funktionsumfang (Capital Equipment Corporation 1994). Die Darstellung erfolgt mit sogenannten „Panels“ und Ereignisse werden mit „Pushbuttons“ aktiviert. Es besteht die Möglichkeit von kompletten Testpoint Anwendungen Runtime-Versionen anzufertigen, die ohne weitere Lizenzgebühren an andere Anwender weiter gegeben werden können.



*Abb. 7: Testpoint-Entwicklungsumgebung
Fig. 7: Testpoint-Development-Environment*

Mit Testpoint wurde für die Anlage eine Anwendung entwickelt mit der die Steuerung,

Darstellung und Erfassung der Daten erfolgt. Ihre Funktionen werden im folgenden beschrieben.

Nach Aufruf der Anwendung aus dem Windows Programm-Manager wird zunächst das Start-Panel (Abb. 8) geöffnet, bei dem einige Eingaben erwartet werden. Nachdem die geforderten Eingaben abgearbeitet sind, wird nach Anklicken des Pushbutton „Weiter nach Eingabe“ das Steuer-Panel (Abb. 9) geöffnet mit dem die Messung gestartet werden kann. Nach Anklicken des Pushbutton „Messung starten“ wird die Regelung aktiviert und das Abspeichern der Daten im gewünschten Zyklus gestartet. Auf diesem Panel wird der Startzeitpunkt der Messung, sowie die zuletzt abgespeicherten Meßdaten mit ihrem Speicherzeitpunkt sowie die Ist- und Sollwerte am unteren Rand angezeigt. Zur Online-Visualisierung der Meßdaten kann zwischen zwei Optionen gewählt werden. Bei Anklicken des Pushbutton „Bildschirm“ erscheint ein Panel (Abb. 10) auf dem die aktuellen Meßwerte im 10 s Zyklus angezeigt werden. Wird der Pushbutton „Grafiken“ angeklickt erscheint ein Panel (Abb. 11) mit sogenannten Strip Charts (Linienstreifen) auf dem die verschiedenen Meßwerte in sich ständig erneuernden, bewegenden graphischen Diagrammen dargestellt werden.



Abb. 8: Start-Panel Fig. 8: Start-Panel

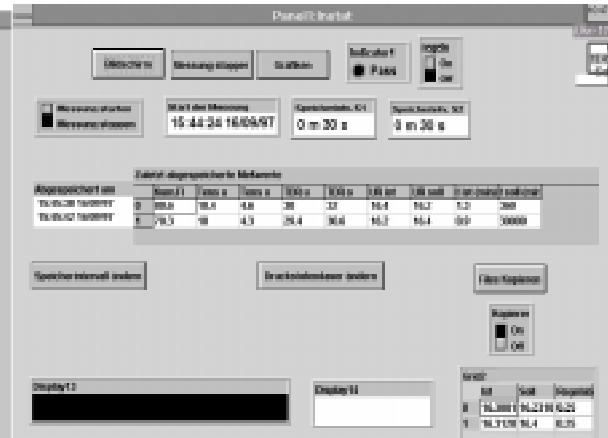


Abb. 9: Steuer-Panel Fig. 9: Control-Panel

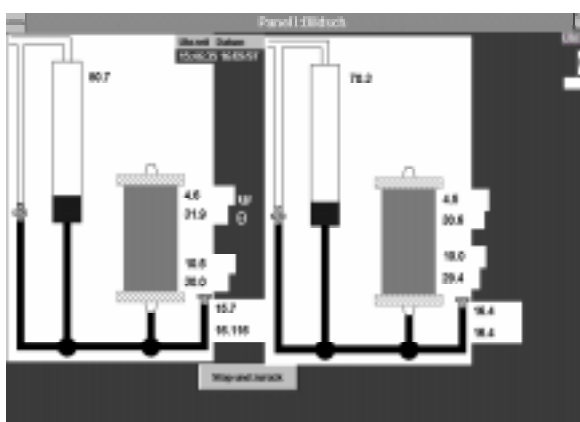


Abb. 10: Anlage-Panel Fig. 10: Plant-Panel

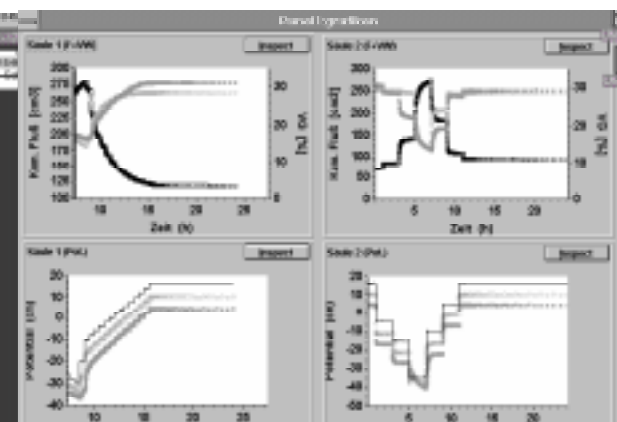


Abb. 11: Graphik-Panel Fig. 11: Graphic-Panel

3. Experimenteller Teil

3.1 Typen von Experimenten

Die inverse Modellierung instationärer Ausfluß/Rückfluß-Experimente ist eine Methodik, die erlaubt, die hydraulischen Eigenschaften von ungestörten Bodenproben auf eine schnelle, genaue und effiziente Weise zu bestimmen (Kool et al., 1987, van Dam et al., 1994). Sie erfreut sich deshalb zunehmender Beliebtheit (Durner et al., 1996). Unsere Untersuchungen der jüngsten Vergangenheit zielten zunächst darauf ab, eine optimale Gestaltung der Randbedingungen in Hinblick auf eine möglichst eindeutige und umfassende Parameterbestimmung zu erreichen (Durner et al., 1996; Schultze et al., 1995; Schultze und Durner, 1996). Weiterer Schwerpunkt der Experimente lag in der Untersuchung der Hysterese hydraulischer Funktionen von Böden mittels inverser Simulation instationärer Ausfluß/Rückfluß-Experimente. Da sich bei den Untersuchungen zur Hysterese der Retentionskurve klare Hinweise auf kinetische Ungleichgewichte zwischen Tensionen und Wassergehalten ergaben, dienten die folgenden Experimente der Untersuchung dieser Phänomene. Bei der Durchführung von Multistep-Experimenten ergab sich stets, daß im Feuchtebereich nahe des Lufteintrittspunktes die Gleichgewichtseinstellung für die Tensionen sehr schnell erfolgte, während die Ausflußmessungen (und damit die Wassergehalte) eine Drift aufwiesen, die sich über Zeiträume von 24 Stunden und länger hinzog (Schultze et al., 1996).

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, daß im Rahmen dieses Berichtes die Ergebnisse der Untersuchungen nur beschränkt wieder gegeben werden können. Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Schultze et al.: „Determination of soil hydraulic properties by inverse simulation of outflow and inflow experiments: Analysis of the Onestep, Multistep and Smooth method“ (in Vorbereitung) und in der Dissertation von Schultze (Fertigstellung 1998).

3.2 Material und Methoden

3.2.1 Beschreibung der verwendeten Böden

Für die Untersuchungen wurden zwei Böden verwendet, die schon in der Vergangenheit Gegenstand unterschiedlicher Untersuchungen waren. Ihre Eigenschaften sind daher schon eingehend untersucht und bekannt. Die beiden verwendeten Böden wurden von einem Wald- und einem Ackerstandort entnommen. Sie unterscheiden sich in ihrer Textur und Struktur, sowie in ihrem organischen Kohlenstoffgehalt.

- Waldstandort nördlich von Forchheim (Topographische Karte 1:50000, Blatt L 6232, Forchheim (R 44²⁹, H 55¹⁴)):
Bodentyp: podsoliierte Braunerde
Bodenart: Sand
Horizont: Bvs
Bewuchs: Kiefern
Probenahme: Oktober 1994, Tiefe: 25-40 cm

- Ackerstandort südlich von Bayreuth (Topographische Karte 1:50000, Blatt L 6134, Bayreuth (R 44⁷⁰, H 55³¹)):
 - Bodentyp: pseudovergleyte Braunerde
 - Bodenart: lehmiger Sand
 - Horizont: Ap (10-25 cm)
 - Bewuchs: Brache, überwiegend geruchslose Kamille, stark durchwurzelt
 - Probenahme: Dezember 1994, Tiefe: 10-25 cm

Tab. 1: Eigenschaften der verwendeten Bodenproben (Rehding (1993) und Deschauer (1994)).

Tab. 1: Properties of the used soil samples (Rehding (1993) und Deschauer (1994)).

	pH (CaCl ₂)	org. C (%)	KAK (meq/kg)	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)
Forchheim	4.4	0.3	10-15	95	1	4
Bayreuth	4.3-4.9	0.9-1.1	22-34	73-79	14-18	3-5

3.2.2 Bestimmung der hydraulischen Parameter

3.2.2.1 Mathematisches Modell

Grundlage für die Beschreibung des instationären Wassertransportes in porösen Medien ist die nach Richards (1931) bezeichnete Gleichung:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi_h}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} - K(\theta) \right)$$

$$\Rightarrow C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} - K(\psi) \right)$$

mit: θ = volumetrischer Wassergehalt (-)
 $K(\theta)$ = hydraulische Leitfähigkeit (LT⁻¹)
 ∇ = Gradient-Operator
 ψ_h = hydraulisches Potential (L), $\psi_h = \psi - z$
 ψ = Matrixpotential (L)
 z = Raumdimension (Tiefe) (L).
 $C(\psi) = \partial \theta / \partial \psi = \text{Wasserkapazität (L}^{-1}\text{)}$

Für die Lösung der nicht-linearen partiellen Differentialgleichung werden funktionale Zusammenhänge zwischen der hydraulischen Leitfähigkeit und dem Wassergehalt sowie zwischen Matrixpotential und Wassergehalt benötigt.

Ein weitverbreitetes Modell zur Beschreibung der Beziehung zwischen Wassergehalt und Matrixpotential ist die Funktion nach van Genuchten (1980), die von einer unimodalen Porengrößenverteilung im Boden ausgeht.

$$\Theta(\psi) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \frac{1}{\left(1 + (\alpha|\psi|^n)\right)^m} & \text{für } \psi < 0 \\ 1 & \text{für } \psi \geq 0 \end{cases}$$

mit: Θ = effektiver Sättigungsgrad des Bodens (-); $0 \leq \Theta \leq 1$
 θ_r = Restwassergehalt (-)
 θ_s = Sättigungswassergehalt (-)
 α = empirischer Parameter (L^{-1})
 n und m = empirische Parameter (-).

Ein Modell zur Beschreibung mehrmodaler Porensysteme wurde von Durner (1991, 1994) vorgestellt:

$$\Theta(\psi) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \sum_{i=1}^k w_i \frac{1}{\left(1 + (\alpha_i|\psi|^{n_i})^{m_i}\right)} & \text{für } \psi < 0 \\ 1 & \text{für } \psi \geq 0 \end{cases}$$

mit k = Modalität der Porengrößenverteilung
 w_i = Wichtungsfaktoren der k Teilkurven mit $0 < w_i < 1$ und $\sum w_i = 1$.

Zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Leitfähigkeit und Wassergehalt wird das Modell von Mualem (1976) verwendet:

$$K_r = \frac{K}{K_{sat}} = \Theta^\tau \left[\frac{\int_0^\theta \frac{1}{\psi} d\theta}{\int_0^{\theta_s} \frac{1}{\psi} d\theta} \right]^2$$

mit K = absolute Leitfähigkeit (LT^{-1})
 K_{sat} = Leitfähigkeit bei Wassersättigung (LT^{-1})
 K_r = relative Leitfähigkeit (-)
 τ = Tortuosität (-) (von Mualem in seiner Originalarbeit (1976) als 0.5 gesetzt).

Verknüpft man obige Gleichung mit der van Genuchten-Funktion und legt den Parameter m durch die Nebenbedingung $m = 1 - 1/n$ fest, so ergeben sich folgende geschlossene Beziehungen zwischen K und θ bzw. ψ .

$$K_r(\psi) = \frac{\left\{ 1 - (\alpha|\psi|)^{n-1} \left[1 + (\alpha|\psi|^n)^{-m} \right] \right\}^2}{\left[1 + (\alpha|\psi|^n)^m \right]^{m\tau}}$$

$$K_r(\Theta) = \Theta^\tau \left[1 - \left(1 - \Theta^{1/m} \right)^m \right]^2$$

3.2.2.2 Inverse Modellierung

Die Parameter der oben angegebenen van Genuchten-Funktion für die Retentionscharakteristik und die Mualem/van Genuchten Gleichung für die Leitfähigkeitsfunktion werden durch inverse Modellierung von instationären

Fließexperimenten bestimmt. Hierbei werden die von einem Modell unter vorgegebenen Randbedingungen berechneten Verhaltensgrößen (kumulativer Fluß, Wassergehalt, Matrixpotential usw.) mit den Meßwerten verglichen. Die Modellparameter werden dabei in der Regel ausgehend von vorgegebenen Startwerten durch ein numerisches Verfahren iterativ so lange verbessert, bis die Summe der Abweichungen zwischen Modellrechnung und Messung minimal ist. Es handelt sich hier um ein inverses Problem. Die Modellparameter sind die abhängigen Variablen, die als Funktion eines gemessenen, unabhängigen Systemzustandes bestimmt werden. Bei einem direkten Problem hingegen wird ein Modellzustand als Funktion von unabhängigen Modellparametern berechnet.

Bei der iterativen Bestimmung der Parameter wächst mit steigender Anzahl der Parameter die Gefahr, in ein lokales Minimum zu gelangen. Die Überprüfung, ob ein globales Minimum vorliegt, erfolgt wie bei Eching (1993) und Zurmühl (1994) heuristisch. Dabei wird die Optimierung mit mehreren unterschiedlichen Parameterkombinationen der Startwerte durchgeführt. Ergibt dies gleiche oder sehr ähnliche Werte, so nimmt man an, das globale Minimum gefunden zu haben.

3.2.3 Experimente zur Untersuchung der Eindeutigkeit der optimierten Parameter

Wir untersuchten drei Typen von instationären Fließexperimenten (*Onestep*, *Multistep*, *Smooth*) in Hinblick auf ihre Eignung zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften von großen ungestörten Bodensäulen (Schultze et al., 1995). Die Methoden unterscheiden sich in der Art wie der Druckgradient am unteren Rand angelegt wird, der den Fluß des Wassers aus bzw. in die Säule induziert. Die Anwendung einer großen Druckstufe wird als *Onestep* bezeichnet, die Anwendung von mehreren kleineren Stufen als *Multistep* und die Anwendung eines gleitenden, kontinuierlich Gradienten als *Smooth*. Eine nähere Beschreibung der Verfahren gibt z.B. Durner et al. (1996). Die drei Methoden wurden hinsichtlich Eindeutigkeit, Identifizierbarkeit und Stabilität der geschätzten Parameter der hydraulischen Funktionen miteinander verglichen. Die Untersuchungen wurden mit den beiden oben angegebenen Böden durchgeführt.

Tab. 2: Konfiguration der verschiedenen Optimierungsvarianten

Tab. 2: Configuration of the different optimization variants

Variante	Parameter	Objektfunktion	Anzahl der Simulationen
1	$\alpha, n, \theta_r, K_s, \tau$	Q, ψ	81
2	$\alpha, n, \theta_r, K_s, \tau$	Q	81
3	α, n, θ_r	Q, ψ	27
4	α, n, θ_r	Q	27

Zur Überprüfung der Eindeutigkeit der Parameter wurden für jede Methode (*Onestep*, *Multistep*, *Smooth*) vier Optimierungsvarianten untersucht. Die Varianten unterscheiden sich einmal in der Anzahl der zu optimierenden Parameter (fünf oder drei) und der Option, ob bei der Optimierung neben dem kumulativen Fluß Q auch die Tensionen ψ mit in die

Berechnungen (Objektfunktion) eingehen. Tabelle 2 zeigt für die einzelnen Varianten welche Parameter optimiert und welche Größen in die Objektfunktion eingehen. Die Startwerte für α , n , K_s und τ wurden in einem weiten Bereich variiert. Dabei wurden als Ausgangswerte für α , n , K_s und τ die von Carsel und Parrish (1988) für verschiedene Bodenarten veröffentlichte Daten verwendet (Tab.3, grau unterlegt). Diese wurden dann um Faktoren (α : 5, n : 3, K_s : 10, τ : ± 1) nach oben und unten variiert. Tabelle 3 zeigt die Startwerte der einzelnen Parameter die in den Optimierungen benutzt wurden. Stehen zwei Zahlen in einer Reihe so gehört die erste zur Optimierung von fünf Parameter, die zweite zu der von drei Parametern. Dabei wurde jeweils jeder Startwert eines Parameters mit den drei eines anderen kombiniert. Man kommt somit auf zweimal 81 Optimierungsläufen bei fünf und zweimal 27 Läufen bei drei zu optimierenden Parametern.

Bei den Varianten mit drei Parameter wurde K_s , auf den gemessenen Wert und τ auf den Originalwert 0.5 festgesetzt. Die gemessene K_s -Werte stimmen dabei zufällig mit den von Carsel und Parrish (1988) angegebenen Werten überein. θ_s wurde bei allen Optimierungen auf den gemessenen Wert festgesetzt, eine gleichzeitige Optimierung von θ_r und θ_s ist nicht sinnvoll.

Tab. 3: Startwerte der Parameter für die Optimierungsläufe

Tab. 3: Start values of the parameters for the optimization

	α (cm^{-1})	n	θ_r	θ_s	K_s (cmh^{-1})	τ
Bayreuth	0.015	1.3	0.05 / 0.0	0.298	0.4 / 4	-0.5 / 0.5
	0.075	1.9	0.05 / 0.05	0.298	4 / 4	0.5 / 0.5
	0.350	3.7	0.05 / 0.1	0.298	40 / 4	1.5 / 0.5
Forchheim	0.029	1.6	0.05 / 0.0	0.324	3 / 30	-0.5 / 0.5
	0.145	2.7	0.05 / 0.05	0.324	30 / 30	0.5 / 0.5
	0.725	6.1	0.05 / 0.1	0.324	300 / 30	1.5 / 0.5

3.2.4 Experimente zur Untersuchung der Hysterese der hydraulischen Funktionen

Parameter hysteretischer Modelle wurden nach unseren Kenntnissen bisher ausschließlich durch klassische Gleichgewichts-Meßtechnik bestimmt. In diesem Projekt haben wir versucht Hystereseigenschaften durch inverse Simulation abzuschätzen. Hierzu wurden mit der Versuchsanlage große ungestörte Bodensäulen (1000 cm^3) von Sättigung ausgehend zunächst bis zu einem niedrigen Potential entwässert, dann wieder aufgesättigt und anschließend wiederholt Hystereseschleifen durchfahren. Die Änderung des Druckes am unteren Rand erfolgt dabei in mehreren kleinen Schritten (*Multistep-Verfahren*). Die Simulation der Experimente erfolgte zum einen mit dem numerischen Modell auf Basis der Richardsgleichung unter Verwendung des van Genuchten/Mualem-Modells für die hydraulischen Eigenschaften (Zurmühl, 1994). Des weiteren wurden die Scanning-Loops mit dem Modell nach Scott et al. (1983) bestimmt.

Der Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Wasserflüssen, Wassergehalten und Potentialen in zwei unterschiedlichen Tiefen erlaubt es, die Eignung der Hysteresemodelle zu vergleichen und generelle Rückschlüsse zur Validität der Hysteresemansätze zu ziehen.

3.2.5 Experimente zur Untersuchung von dynamischen Effekten

Die Experimente bestehen aus Ausfluß- und Rückflußexperimenten mit einer kontinuierlichen Verschiebung des anliegenden Gradienten (Durner et al., 1996), die an ungestörten Bodensäulen (1000 cm^3) durchgeführt wurden. Der in der Untersuchung verwendete Boden entstammt dem Waldstandort bei Forchheim. Um zu prüfen, ob der Zugang der Luftphase die Ergebnisse beeinflusst, wurden die Versuche vergleichend mit geschlossenen (Luftzugang nur von oben) sowie mit perforierten (Luftzugang auch von der Seite) Säulenwandungen durchgeführt.

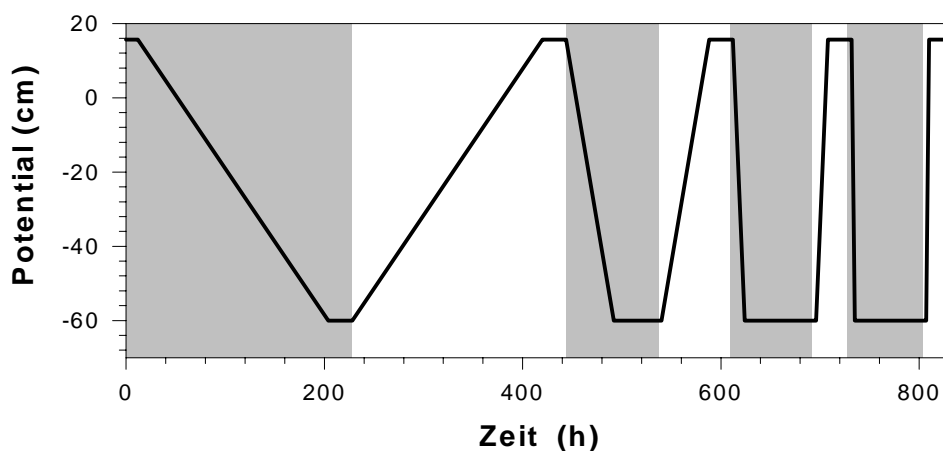


Abb. 12: Untere Randbedingungen des Smooth Aus- und Rückflußexperimentes. Die Ausfluß- und Redistributionsphasen sind grau unterlegt. Es werden vier Phasen durchfahren, wobei die Geschwindigkeit der Potentialänderung jeweils vervierfacht wird. Um zu Beginn jedes Zyklus einen vergleichbaren Ausgangszustand zu haben, werden die Redistributionsphasen entsprechend verlängert.

Abb. 12: Lower boundary conditions of the Smooth out-and inflow experiment. The phases of the outflow and redistribution are grey highlighted. Four phases are passed through whereas the velocity of the potential is quadrupled. To get comparable starting conditions at the beginning of every cycle, the phase of redistribution is extended.

Die Randbedingungen für das Experiment sind in Abbildung 12 dargestellt. Ausgangspunkt ist die bis zum oberen Rand gesättigte Bodensäule, bei der am unteren Rand entsprechend der Säulenlänge ein hydrostatischer Wasserdruck von $\psi = +15.7 \text{ cm}$ anliegt. In jedem Zyklus wird der Druck linear von $\psi = +15.7 \text{ cm}$ bis $\psi = -60 \text{ cm}$ abgesenkt, verbleibt dort für eine Redistributionsphase von mindestens 24 Stunden, und wird dann wieder bis zur völligen Sättigung hochgefahren, worauf sich eine erneute Redistributionsphase anschließt. Dieser Zyklus wird das erste mal innerhalb von 432 Stunden durchfahren. Das Experiment wird im Anschluß an diesen ersten Zyklus dreimal mit einer jeweils auf ein Viertel verkürzten Zeitskala wiederholt, so daß sich die Geschwindigkeit des Wechsels der Randbedingungen insgesamt bis zum vierten Zyklus um den Faktor 64 beschleunigt. Die Randbedingungen werden durch Computersteuerung vorgegeben und kontrolliert; während des gesamten Experimentes werden der Ausfluß aus und der Rückfluß in die Bodensäule, sowie Tensionen und Wassergehalte (TDR) in zwei Tiefen kontinuierlich registriert.

Die Auswertung des Experiments erfolgt durch inverse Simulation der Fließvorgänge unter Vorgabe der Richardsgleichung und der Verwendung von hydraulischen Funktionen nach dem van Genuchten/Mualem - Modell. Durch getrennte Optimierung der Parameter für jeden Zyklus wird untersucht, ab welcher Zeitskala und in welchem Ausmaß eine Verschiebung der hydraulischen Eigenschaften eintritt.

In einer weiteren Versuchsreihe wurden analoge Experimente mit Multistep durchgeführt. Die Randbedingungen für dieses Experiment sind in Abbildung 13 dargestellt. Die Auswertung der Experimente erfolgt wie oben beschrieben.

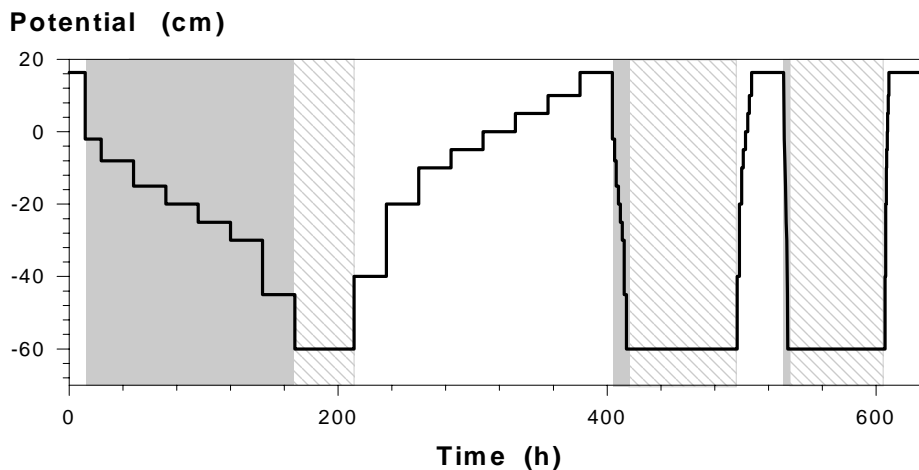


Abb. 13: Untere Randbedingungen des Multistep Aus- und Rückflußexperimentes. Die Ausfluß- und Redistributionsphasen sind grau unterlegt. Es werden drei Phasen durchfahren.

Abb. 13: Lower boundary conditions of the Multistep out-and inflow experiment. The phases of the outflow and redistribution are grey highlighted. Three phases are passed through

3.2.6 Simulationen mit Zwei-Phasen-Modell

Um den Einfluß der Gasphase auf den instationären Wasserfluß im ungesättigten Boden zu untersuchen wurde die Luftleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Wassergehalt an 100 cm³ Stechzylinder mit einem Luftpermeameter nach Knoch und Hanus bestimmt. Mit diesen Daten und den aus den inversen Simulationen gewonnen Parameter haben wir einen Teil unserer Experimente mit einem Zweiphasenmodell simuliert (Ippisch, 1996).

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Eindeutigkeit der optimierten Parameter

Die Überprüfung der Parametereindeutigkeit der vier Optimierungsvarianten (Tab. 2) wurde, wie bereits gesagt, durchgeführt, indem die Startwerte der hydraulischen Parameter variiert wurden. Zur Beurteilung der Ergebnisse können die empirischen Verteilungsfunktionen der einzelnen Parameter aus den jeweils 81 (5 Parameter) bzw. 27 (3 Parameter) Läufen aufgetragen werden. Abbildung 14 zeigt dies beispielhaft für Optimierungsvariante 1 (Forchheimer Sand, 5 Parameter, mit Tensionen). Abbildung 15 zeigt, wie die hydraulischen Funktionen aussehen, die sich aus den 12 Varianten (drei Methoden, vier Varianten) ergeben.

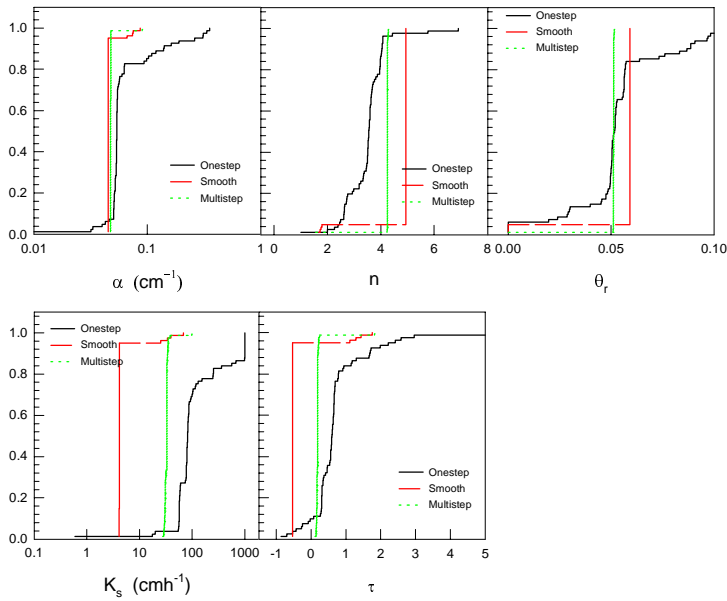


Abb. 14: Kumulative Häufigkeit der einzelnen Parameter für die verschiedenen Verfahren, Optimierung mit Tensionen (Forchheimer Sand)
Fig. 14: Cumulative frequency of the parameters for the different procedures, Simulation with tensions (Forchheim sand)

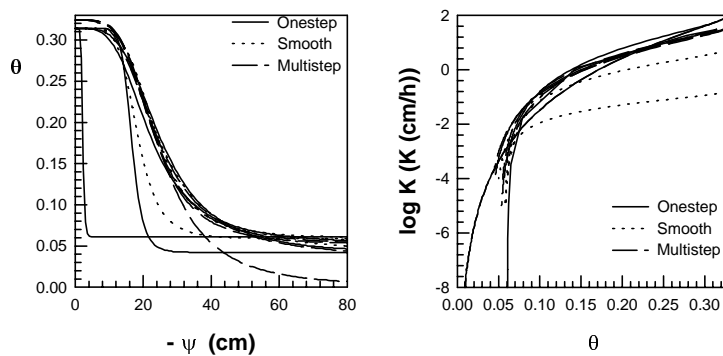


Abb. 15: Hydraulische Funktionen der jeweils besten Anpassung für die verschiedenen Verfahren (Forchheimer Sand)
Fig. 15: Hydraulic functions of the best matching for the different procedures (Forchheim sand)

Für den Forchheimer Boden lassen sich folgende Aussagen treffen. Bei der gleichzeitigen Optimierung von fünf Parameter mit und ohne Tensionen werden beim Onestep-Verfahren bei unterschiedlichen Startwerten unterschiedliche Parameter erhalten. Bei Multistep und Smooth erhält man gleiche Parameterwerte, wenn die Tensiometerwerte mit in die Optimierung eingehen. Werden die Tensionen nicht mit berücksichtigt ergeben sich ebenfalls deutlich unterschiedliche Parameterwerte. Werden nur drei Parameter optimiert ergibt sich ein anderes Ergebnis. Nur beim Onestep-Verfahren ohne Tensionen ergeben verschiedene Startwerte unterschiedliche Parameterwerte, bei den anderen Varianten werden hingegen in den überwiegenden Fällen die gleichen Parameterwerte erhalten.

Für den Bayreuther Boden erhält man zum Teil etwas andere Ergebnisse. Für die Optimierungsvarianten eins und zwei werden beim Onestep-Verfahren wieder die schlechtesten Ergebnisse erzielt. Bei den beiden anderen Verfahren ergeben sich bei den Optimierungen mit Tensionen wieder die besten Ergebnisse. Bei der Optimierung von nur drei Parametern zeigt sich nun ein gänzlich anderes Bild. Für alle drei Verfahren liefern die Optimierungen ohne Tensionen die eindeutigsten Parameterwerte. Es muß an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, das sowohl die unterschiedlichen Verfahren, als auch die unterschiedlichen Optimierungsvarianten auch bei eindeutigen Parameterwerten jeweils bei beiden Böden unterschiedliche Werte liefern.

3.3.2 Hysterese der hydraulischen Funktionen

Abbildung 16 zeigt die Verläufe der gemessenen und simulierten Aus- und Rückflüsse (oben) und der Potentiale der beiden Tensiometer (unten) eines Aus/Rückflußexperimentes des Forchheimer Bodens. Im linken Teil der Abbildung wurde die inverse Simulation des Ausflusses und des Rückflusses getrennt durchgeführt, im rechten erfolgte die Simulation von Aus- und Rückfluß gekoppelt mit dem Hysterese-Modell von Kool und Parker (1987). In der Zielfunktion für den Minimierungsalgorithmus gingen in beiden Fällen in gleicher Wichtung die Abweichungsquadrate von simulierten und gemessenen Tensionen und Ausflüssen ein (siehe Zurmühl, 1994).

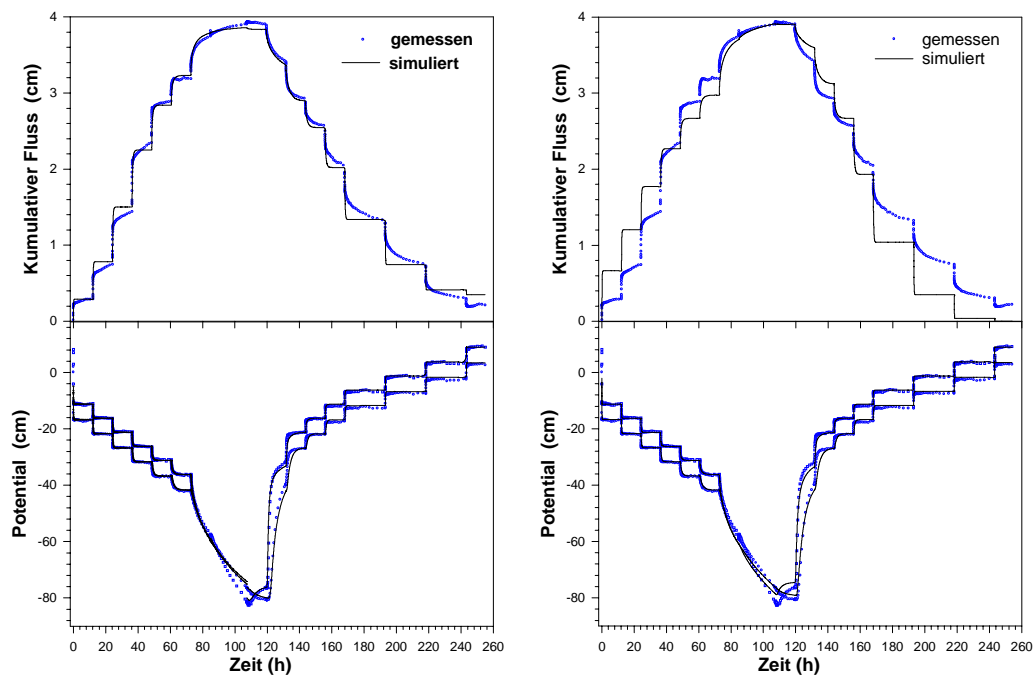


Abb. 16: Gemessene und simulierte Verläufe für Aus- und Rückfluß (oben) und Potentiale (unten). Dargestellt sind die Messungen der Hauptentwässerungs- und Hauptbewässerungskurve. (Forchheimer Sand) Links: getrennte Simulation von Aus- und Rückfluß; Rechts: Simulation mit Hysterese-Modell nach Kool und Parker (1987).

Fig. 16: Measured and simulated progressions for the out- and backflow (top) and potentials (bottom). The measurements of the main drainage and main imbibition curve are plotted. (Forchheim sand) Left: Separate Simulation of out- and backflow; Right: Simulation with the hysteresis-model of Kool und Parker (1987).

Es ist erkennbar, daß die Potentialverläufe in beiden Simulationen ähnlich gut nachvollzogen werden. Der Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Ausflüssen macht jedoch deutlich, daß bei der getrennten Parameteroptimierung (Abb. 16, links oben) die Ausflußplateaus gut getroffen werden, während die gemeinsame Optimierung beider Äste mit dem Modell von Kool und Parker (1987) (Abb. 16, rechts oben) eine sehr schlechte Übereinstimmung ergibt. Weiterhin ist erkennbar, daß Aus- und Rückflußraten nach jedem Druckschritt nur langsam abklingen, während die Tensiometer sehr schnell im Gleichgewicht sind. Dieses Phänomen hängt nicht mit der Hysterese der pF-WG-Kurve zusammen, sondern drückt einen dynamischen Fließprozeß aus, dessen Beschreibung mit dem Modell der Richardsgleichung und einer statischen pF-WG-Charakteristik nicht möglich ist.

Abbildung 17 zeigt die hydraulischen Funktionen für die getrennte Simulation von Aus- und Rückfluß. Auf der linken Seite ist ein Ausschnitt der $\theta(\psi)$ -Charakteristiken mit den main-loops und drei scanning-loops dargestellt (gestrichelte Linien), die sich durch individuelle inverse Simulation der jeweiligen Experimentabschnitte ergeben. Zum Vergleich sind zusätzlich die scanning-loops eingezeichnet, die durch das Modell von Scott et al. (1983) vorhergesagt werden (gepunktete Linien). Es ist erkennbar, daß die Abweichungen zwischen den Kurven nahe des Lufteintrittspunktes am ausgeprägtesten sind. Die rechte Seite zeigt die $K(\theta)$ -Funktionen für die main-loops. Da die separate Optimierung der Hauptentwässerungs- und Hauptbewässerungskurven verschiedene Parameter n des van Genuchten Modells ergaben, zeigen die damit assoziierten $K(\theta)$ -Funktionen eine ausgeprägte Hysterese. Dies steht im Gegensatz zu der Grundannahme des Kool und Parker Hysterese Modells.

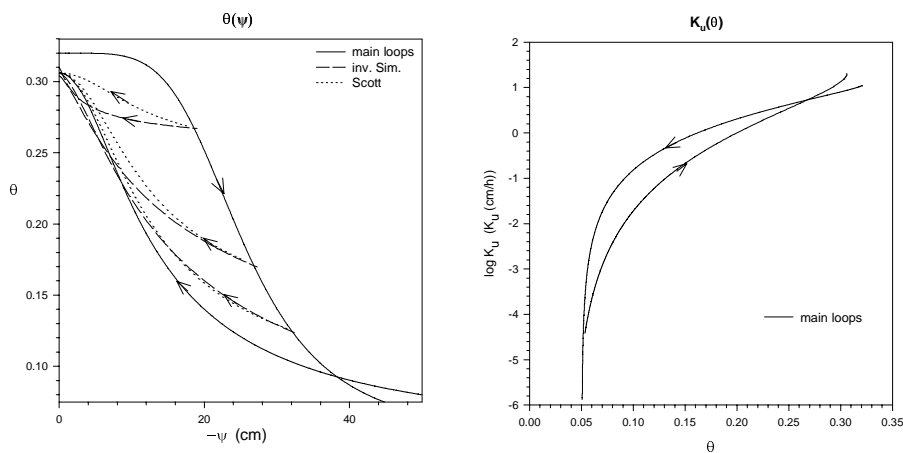


Abb. 17: Hydraulische Funktionen der getrennten Simulation von Aus- und Rückfluß.

(Forchheimer Sand) Links: $\theta(\psi)$ -Charakteristik mit main-loops und scanning-loops; Rechts: $K(\theta)$ -Charakteristik der main-loops.

Abb. 17: Hydraulic functions of the separate Simulation of out- and backflow. (Forchheim sand) Left: $\theta(\psi)$ -Charakteristic with main-loops and scanning-loops; Rechts: $K(\theta)$ -Charakteristic of the main-loops.

3.3.3 Dynamische Effekte

Unsere Messungen ergaben für die geschlossenen sowie die perforierten Säulen, daß die auf stark unterschiedlichen Zeitskalen induzierten Fließprozesse nur zu sehr kleinen Verschiebungen der invers bestimmten hydraulischen Funktionen führten (Abb. 18). Die Auswertung der Fließexperimente ergibt trotz der Geschwindigkeitsänderung um Faktor 64 keine wesentlich verschiedenen Retentionskurven (Abb. 18). Die optimierten K-Kurven unterscheiden sich leicht. Nahe Sättigung liegen die Kurven der schnellen Experimente näher am (stationär gemessenen) gesättigten Wert, dies ergibt sich durch die geringe Sensitivität der inversen Bestimmung bei kleinen Gradienten.

Die Auswertung der im Versuch simultan gemessenen Tensiometerpotentiale und Wassergehalte in der Bodensäule ergab jedoch signifikante Unterschiede zwischen geschlossenen und offenen Säulen (Abb. 19). Bei den geschlossenen Säulen führten die schnelleren Drainagexperimente bei gleichem Tensiometerpotential ψ zu höheren Wassergehalten θ , während bei den perforierten Säulen kein Unterschied nachzuweisen war.

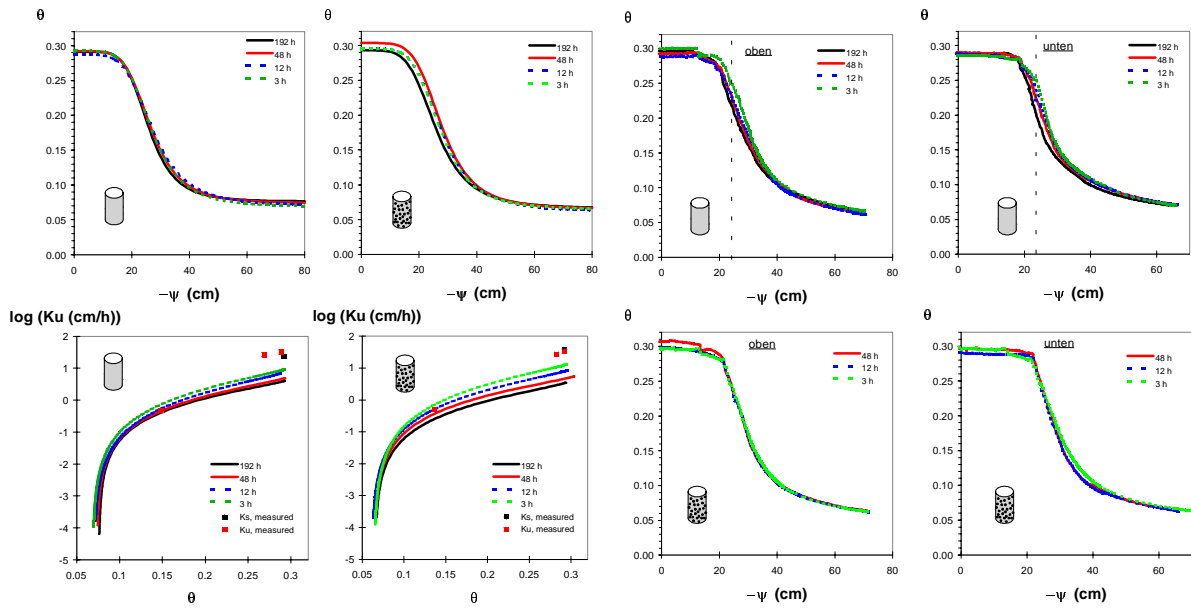


Abb. 18: Hydraulische Funktionen (oben: pFWG, unten: K) über inverse Simulation. Links: geschlossene Wandung, Rechts: perforierte Wandung (Forchheimer Sand)

Fig. 18: Hydraulic functions (top: pFWG, bottom: K) by inverse simulation. Left: closed core, Right: perforated core (Forchheim sand)

Abb. 19: Retentionskurven in zwei Tiefen aus der direkten Messung von θ und ψ . Oben: geschlossene Wandung, Unten: perforierte Wandung (Forchheimer Sand)

Fig. 19: Retention curves in two depths from the direct measurement of θ and ψ . Top: closed core, Bottom: perforated core (Forchheim sand)

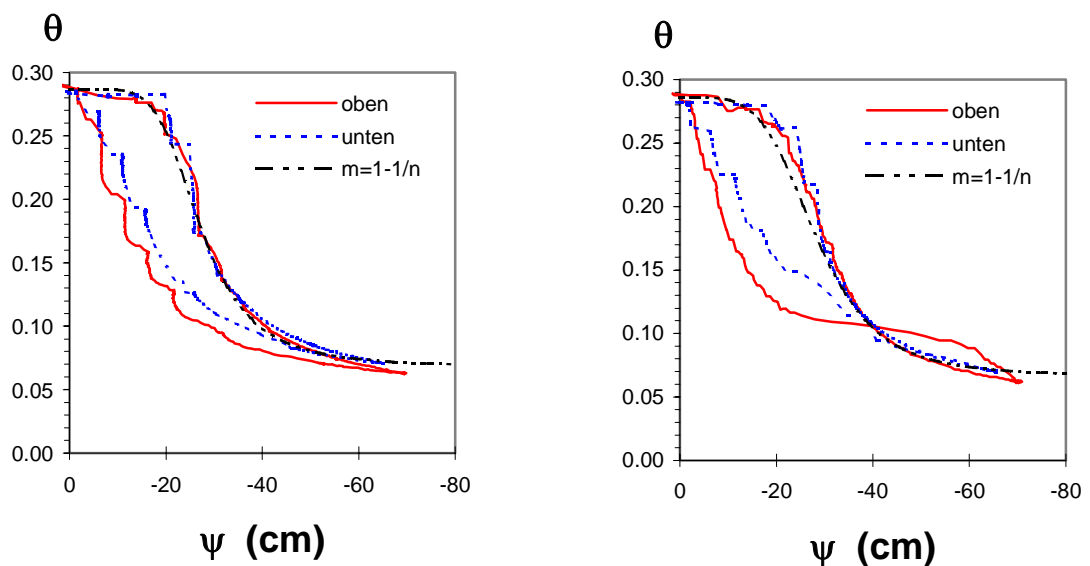


Abb. 20: Retentionskurven aus der direkten Messung von θ und ψ von zwei Multistep-Experimenten, Links: langsames Experiment, Rechts: schnelles Experiment (Forchheimer Sand)

Fig. 20: Retention curves from the direct measurement of θ und ψ from two Multistep-experiments, Left: slow experiment, right: fast experiment (Forchheim sand)

Abbildung 20 zeigt die simultan gemessenen Tensiometerpotentiale und Wassergehalte von zwei mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführten Multistep-Experimenten. Hier spiegelt sich die bei den Flußdaten und Tensiometerdaten gemachten Beobachtung wieder, bei nahezu konstantem Tensiometerpotential ändert sich der Wassergehalt. Beim schnellen

Experiment ist zu beobachten, daß die Bewässerungskurve die Entwässerungskurve schneidet.

3.3.4 Zwei-Phasen-Modell

Abbildung 21 zeigt die an vier 100 cm³ Stechzylinder gemessene Luftpermeabilität in Abhängigkeit von der Wassersättigung. Der Punkt (emergence point) an dem die Proben für die Luft leitfähig werden, liegt etwa zwischen 70 und 90 % Sättigung. Dury (1996) berichtet, das der emergence point bei Sand bei Entwässerung bei ca. 50 % und bei Bewässerung bei ca. 64 bis 74 % liegt. Die gemessenen Werte sind dabei abhängig von der Probengröße.

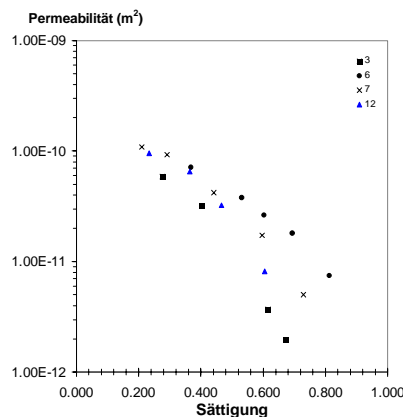


Abb. 21: Luftleitfähigkeit des Forchheimer Bodens (vier 100 cm³ Stechzylinderproben)
Fig. 21: Air-Permeability of the Forchheim soil (four 100 cm³ soil samples)

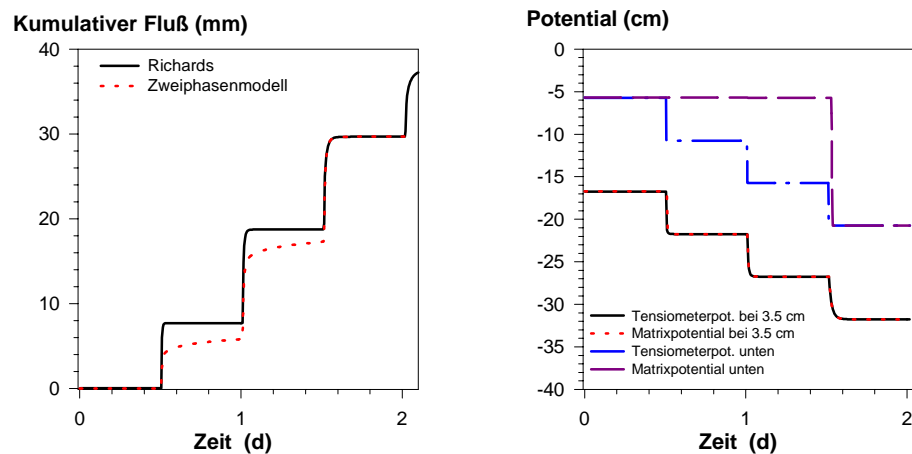


Abb. 22: Simulation eines Multistep-Ausflußexperimentes mit Richards- und Zweiphasen-Modell, Links: Kumulativer Fluß, Rechts: Tensiometer- und Matrixpotential in zwei Tiefen

Fig. 22: Simulation of a Multistep-outflow-experiment with Richards- und Twophase-Model, Left: Cumulative Flow, Right: Tensiometer- und Matricpotential in two depths

Mit den gemessenen Luftleitfähigkeiten und den durch inverse Simulation gewonnen Parametern für das Richardsmodell wurden instationäre Entwässerungs- und Bewässerungsexperimente mit Berücksichtigung der Luftphase (Zweiphasen-Modell) und ohne Berücksichtigung der Luftphase (Richards) simuliert. Die Ergebnisse des Entwässerungsversuches zeigt Abb. 22. Deutlich sieht man im Bereich hoher Sättigung den Unterschied zwischen dem Richards- und dem Zweiphasen-Modell. Während das

Richardsmodell entsprechend dem konstanten Matrixpotential, welches hier auch dem Tensiometerpotential entspricht, keinen Fluß mehr simuliert, findet beim Zweiphasen-Modell weiterhin ein Ausfluß statt. Das rechte Diagramm der Abbildung 22 zeigt den Unterschied zwischen Tensiometerpotential und Matrixpotential am unteren Rand der Säule. Das gleiche Ergebnis ergibt sich für das Bewässerungsexperiment in Abb. 23. Das rechte Diagramm zeigt das Tiefenprofil des Tensiometer- und Matrixpotentials nach 4.6 Tagen. Somit gibt das Zweiphasen-Modell qualitativ die Beobachtungen der Fließexperimente wieder.

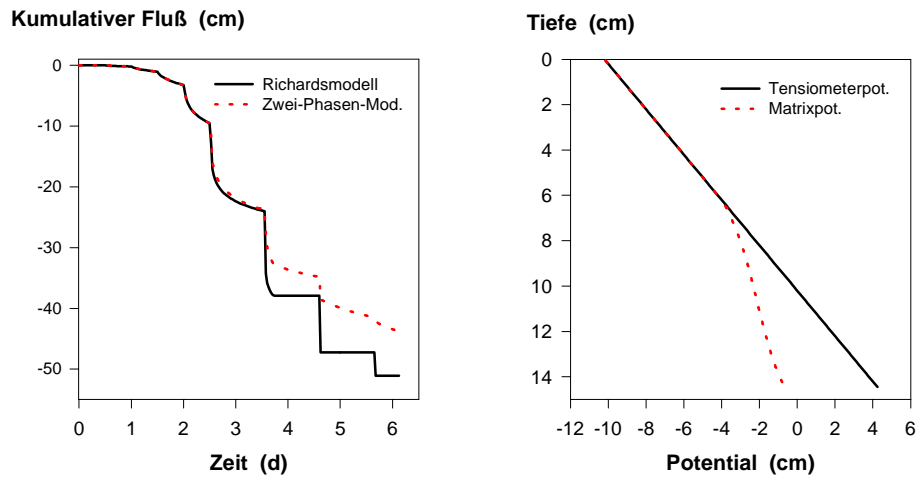


Abb. 23: Simulation eines Multistep-Rückflußexperimentes mit Richards- und Zweiphasen-Modell, Links: Kumulativer Fluß, Rechts: Tiefenprofil des Tensiometer- und Matrixpotentials nach 4.6 Tagen

Fig. 23: Simulation of a Multistep-backflow-experiment with Richards- und Twophase-Model, Left: Cumulative Flow, Right: Depth profile of the Tensiometer- und Matricpotential after 4.6 days

4. Diskussion/Schlußfolgerungen

Ein Apparat für die Messung von hydraulischen Funktionen von Böden wurde weiter entwickelt um einen größeren Feuchtebereich des Bodens abzudecken. Das Meßgerät und die inverse Auswertungstechnik stellen den momentanen internationalen state-of-the-art in der Meßtechnik dar.

Es wurde gezeigt, daß die inverse Simulation von Aus- und Rückfluß-Experimenten an großen ungestörten Bodenproben eine geeignete Methode zur Bestimmung von hydraulischen Eigenschaften ist. Im Vergleich dreier Experimenttypen – *Onestep*, *Multistep*, *Smooth* – ergab sich, daß die *Onestep*-Methode ungeeignet ist. *Multistep* und *Smooth* liefern hingegen nahezu ähnliche Ergebnisse und sind daher beide geeignet.

Die Hysterese hydraulischer Funktionen kann mit der entwickelten Anlage bestimmt werden. Es zeigt sich jedoch, daß die derzeit verfügbaren theoretischen Modelle zur Beschreibung von Hysterese nicht ausreichen, die Messungen valide wiederzugeben. Die Abweichungen zwischen den unseren Messungen und den verfügbaren Modellen sind nahe des gesättigten Bereichs am meisten ausgeprägt. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, daß nahe Sättigung die Wasser- und Luftbewegung nur als Mehrphasenfluß gültig beschrieben werden kann. Streng genommen muß jeder instationäre Wasserfluß in ungesättigten Böden als Zweiphasenfluß gesehen werden, da jede Wassergehaltsänderung durch das Nach- oder Wegströmen von Luft kompensiert werden muß. In der Regel wird jedoch davon ausgegangen, daß der Fließwiderstand im porösen Medium für die Gasphase vernachlässigbar klein ist, der Druck der Gasphase somit im gesamten Medium stets gleich dem Atmosphärendruck ist. Nahe Wassersättigung ist jedoch die Luftleitfähigkeit in einem porösen Medium so niedrig, daß von dieser Grundannahme nicht mehr ausgegangen werden kann.

Unsere spezifischen Untersuchungen zu den dynamischen Effekten ergaben für geschlossene sowie für perforierte Bodensäulen, daß die auf stark unterschiedlichen Zeitskalen induzierten Fließprozesse kaum zu Verschiebungen der invers bestimmten hydraulischen Funktionen führten. Die Auswertung der im Versuch simultan gemessenen Tensiometerpotentiale und Wassergehalte in der Bodensäule ergab jedoch signifikante Unterschiede zwischen geschlossenen und offenen Säulen. Bei den geschlossenen Säulen führten die schnelleren Drainagexperimente bei gleichem Tensiometerpotential zu höheren Wassergehalten, während bei den perforierten Säulen kein Unterschied nachzuweisen war. Zur Überprüfung der Zweiphasenfluß-Hypothese haben wir unsere Experimente mit einem Zweiphasenmodell simuliert (Ippisch, 1996). Im Gegensatz zur Simulation mit der Richards-Gleichung wurden unsere Beobachtungen mit diesem Modellansatz gut wiedergegeben. Die Ausgangshypothese – daß Zweiphasenfluß sich bei der Beschreibung mit dem vereinfachten Prozeßmodell in Form „dynamischer Effekte“ der hydraulischen Funktionen äußert – wurde somit bestätigt. In welchem Ausmaß dies Konsequenzen für Meßauswertungen und Wassertransportsimulationen in Freilandmaßstab nach sich zieht, muß in weiteren Arbeiten geprüft werden.

5. Literatur

- Beese F. und van der Ploeg R.R. (1976) Influence of hysteresis on moisture flow in an undisturbed soilmonolith. *Soil Sci. Soc Am. J.*, **40**, 480-483.
- Bhend T. (1993) Variabilität der Wasserleitfähigkeit und Berechnung deren Funktion aus Daten der Desorptionskurve. Diplomarbeit, Institut für Terrestrische Ökologie, ETH Zürich (unveröffentlicht).
- Capital Equipment Corporation (1994) Testpoint, techniques references (englisch), Testpoint, Benutzerhandbuch (deutsch).
- Carsel R.F. und R.S. Parrish (1988) Developing joint distribution of soil water retention characteristics. *WaterResour. Res.*, **24**, 755-769.
- Deschauer H. (1994) Bioabfallkompost als Dünger im Wald - Untersuchungen zu den Auswirkungen auf den Elementumsatz. Die Schwermetalldynamik und das Verhalten polycyclischer aromatischer Kohlenstoffe in einem humus- und nährstoffarmen Kiefernbestand. Dissertation am Lehrstuhl Bodenkunde Universität Bayreuth, 170pp.
- Dumer W. (1991) Vorhersage der hydraulischen Leitfähigkeit strukturierter Böden. *Bayreuther Bodenkundliche Berichte*, **20**, 1-180.
- Durner W. (1994) Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *WaterResour. Res.*, **30**, 211-223.
- Durner W., Schultze B. und Zurmühl T. (1996): Transient flow experiments for the determination of soil hydraulic properties - An evaluation of different boundary conditions. In: Durner W., Halbertsma J., Cislerova, M. (Hrsg.), European Workshop on Advanced Methods to Determine Hydraulic Properties of Soils, Thurnau, June 10-12, 1996, Department of Hydrology, University of Bayreuth, 85-88.
- Eching S.O. und Hopmans J.W. (1993) Optimization of hydraulic functions from transient outflow and soil water pressure data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57**, 1167-1175.
- Halbertsma J. (1995) Metronia V3.0 User's Manual, Winand Starring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, Technical Document 25.
- Herrmann R., Durner W., Rehding C., und Zurmühl T. (1992) Vergleichende Untersuchungen zur Mobilität von Umweltchemikalien aus seuchenhygienisch unbedenklichen Klärschlämmen in unterschiedlich genutzten Ökosystemen. F+ E 10701016/03, Umweltbundesamt, Berlin.
- Hopmans J.W., Vogel T., und Koblik P.D. (1992) X-ray tomography of soil water distribution in One-Step outflow experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **56**, 355-362.
- Ippisch O. (1996): Modellentwicklung zum gekoppelten Transport von Wasser, Wärme und Gasen in Abraum aus dem Braunkohletagebau. Diplomarbeit, Abt. Bodenphysik, Universität Bayreuth, unveröffentlicht.
- Kneale W.R. (1985) Observations of the behaviour of large cores of soil during drainage, and the calculation of hydraulic conductivity. *J. Soil Sci.*, **36**, 163-171.
- Kool J.B., Parker J.C. und van Genuchten M.T. (1987) Parameter estimation for unsaturated flow and transport models. A review. *J. Hydrol.*, **91**, 255-294.
- Kool J.B., J.C. Parker (1987): Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, **23**, 105-114.
- Mualem Y. (1984): A modified dependent-domain theory of hysteresis. *Soil Sci.*, **137**, 283-291.

- Nieber J.L. (1996) Modelling finger development and persistence in soils. *Geoderma*, **70**, 207-229.
- Nielsen D.R., M.Th. van Genuchten und J.W. Biggar (1986): Water flow and solute transport process in the unsaturated zone. *Water Resour. Res.*, **22**, 89-108.
- Plagge R., Renger M. und Roth C.H. (1990) A new laboratory method to quickly determine the unsaturated hydraulic conductivity of undisturbed soil cores within a wide range of textures. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, **153**, 39-45.
- Rehding C. (1993) Erfassung des bevorzugten Wasser- und Stofftransportes im Boden unter Freilandbedingungen. Dissertation, Fakultät Biologie, Chemie und Geowissenschaften, 1993.
- Rothe A., Weis W., Kreutzer K., Matthies D., Hess U., und Ansorge B. (1997) Changes in soil structure caused by installation of time domain reflectometry probes and their influence on the measurement of soil moisture. *Water Resour. Res.*, **33**, 1585-1593.
- Scheibke R. (1990) Entwicklung einer hochauflösenden Datenerfassung zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften ungestörter Bodensäulen. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Bayreuth.
- Scheibke R., Zurmühl T. und Durner W. (1991) Hochauflösende Datenerfassung zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften ungestörter Bodensäulen. *Mitt. Deutsche Bodenkundl. Gesellsch.*, **66**, 217-220.
- Scheibke R., (1997) Fehleranalyse für Meßverfahren zur Bestimmung der hydraulischen Parameter von ungesättigten Böden, Dissertation,
- Schultze B., Durner W. (1996): Onestep, multistep and continuous transient flow experiments for the determination of soil hydraulic properties. Bitök Forschungsbericht 1995, *Bayreuther Forum Ökologie*, **28**, 194-197.
- Schultze B., Zurmühl T. und Durner W. (1995): Ein Vergleich von Onestep-, Multistep- und Kontinuierlichen Gradientenverfahren zur Bestimmung hydraulischer Funktionen von Bodensäulen. *Mitt. Deutsche Bodenkundl. Gesellsch.*, **76**, 157-160.
- Schultze B., Zurmühl T. und Durner W. (1996): Untersuchung der Hysterese hydraulischer Funktionen von Böden mittels inverser Simulation. *Mitt. Deutsche Bodenkundl. Gesellsch.*, **80**, 319-322.
- Scott PS GJ Farquhar und N Kouwen 1983 Hysteretic effects on net infiltration In *Advances in infiltration ASAE StJosephMIPub.*, **11-83**, 163-170
- Stonestrom D.A. und Akstin K.C. (1994) Nonmonotonic matric pressure histories during constant flux infiltration into homogeneous soil profiles. *Water Resour. Res.*, **30**, 81-92.
- van Dam J.C., Stricker J.N.M. und Droogers P. (1990) From one-step to multi-step: Determination of soil hydraulic functions by outflow experiments. Dept. of Hydrol., Soil Physics, and Hydraul. Rep., Wageningen Agricultural Univ., Wageningen, The Netherlands.
- van Genuchten MT (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils *Soil Sci. Am. J.*, **44**, 892-898
- van Genuchten M.T., Leil F.J. (1992) On estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. In: van Genuchten M.T., Leij F.J. und Lund L.J. (Hrsg.) *Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. Proceedings of the International Workshop, University of Riverside, Riverside, California, USA.*
- van Dam J.C., Stricker J.N.M. und Droogers P. (1994) Inverse method to determine soil hydraulic functions from multi-step outflow experiments. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **58**, 647-652.

- Vogel T. und Cislérova M. (1988) On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the soil moisture retention curve. *Transp. Porous Media*, **3**, 1-15.
- Warrick A.W. (1993) Inverse estimations of soil hydraulic properties with scaling: One-dimensional infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57**, 631-636.
- Wendroth O., Ehlers W., Hopmans J.W., Kage H., Halberisma J. und J.H.M Wösten (1993) Reevaluation of the evaporation method for determining hydraulic functions in unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57**, 1436-1443.
- Zurmühl T. (1994): Möglichkeiten und Grenzen der inversen Modellierung zur Bestimmung hydraulischer Kenngrößen von Bodensäulen. *Mitt. Deutsche Bodenkundl. Gesellsch.*, **72**, 139-142.
- Zurmühl T. (1996): Evaluation of different boundary conditions for independent determination of hydraulic parameters using outflow methods. In DuChateau P. and J. Gottlieb, *Parameter Identification and Inverse Problems in Hydrology, Geology and Ecology*, Water Science and Technology Library, Vol. **23**, Kluwer, Dordrecht, 162-184.
- Zurmühl T. (1994): Validierung konvektiv-dispersiver Modelle zur Berechnung des instationären Stofftransportes in ungestörten Bodensäulen. *Bayreuther Bodenkundliche Berichte*, **36**, 1-204.