

Inverse Ermittlung bodenhydraulischer Eigenschaften bei einem Säulenexperiment

G. KAMMERER und P. CEPUDER

Zusammenfassung

Vollautomatische profilierende FDR-Systeme für die Messung des Bodenwasseranteils θ wurden bisher hauptsächlich in der Bewässerungssteuerung eingesetzt. Das gegenständliche Laborexperiment soll zur Klärung beitragen, ob diese - in Kombination mit anderen Bodeninformationen und Pedotransferfunktionen - auch zur Abschätzung der Sickerwasserrate oder der Verdunstung geeignet sind. Hierzu wurde ein lufttrockener sandiger Lehmboden in einer Säule mit 38 cm Durchmesser 50 cm hoch eingebaut, mit jeweils 5 Tensiometern und θ -Sensoren bestückt und in zwei Wochen im März 2006 eine Bewässerungshöhe von 179 mm aufgebracht. Im Weiteren wurde die Säule gegen Verdunstungsverluste abgedeckt. Als untere Randbedingung wurde das Druckpotenzial mit Saugkerzen vorerst auf Atmosphärendruck konstant gehalten und der Unterdruck jeweils nach Erliegen der Zuströmung in Stufen von $1,0 \times 10^4$ Pa erhöht. Die bisherige Auswertung der θ -Messwerte über einen Zeitraum von rund 5 Monaten liefert eine brauchbare Abschätzung der Summenlinie des Sickerwassers, jedoch eine unzureichende Aussage über den stündlichen Fluss.

Abstract

Automatic FDR-Systems measuring volumetric soil water content in access tubes have been mainly used for irrigation control so far. Main task of this lab experiment was to investigate some aspects whether these profiling Systems are suitable for estimation of seepage water rate or evapotranspiration rate.

An air-dry sandy loam soil was filled 50 cm high into a column with 38 cm diameter and equipped with tensiometers and water content sensors in 5 depths. An irrigation water depth of 179 mm was applied on the surface in two weeks in

March 2006. Consecutively the top of the soil column was covered to prevent evaporation losses. The lower boundary condition was controlled with suction cups starting with atmospheric pressure. Negative pressure was increased in steps of $1,0 \times 10^4$ Pa each time after dropping of the outflow respectively. Preliminary analysis of measured θ -values yielded in a feasible estimation of cumulative seepage water for a period of 5 months, but only in an inadequate declaration concerning the hourly flux.

Einleitung und Problemstellung

Die Erfassung des Bodenwasserhaushaltes und insbesondere der Teilkomponenten Tiefensickerung und Verdunstung ist ein zentrales Problem z. B. beim Vergleich unterschiedlicher Bewirtschaftungsweisen, der Untersuchung von künstlichen Bodenprofilaufbauten wie Deponieabdeckschichten oder bei der Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels durch Simulation. Das Lysimeter als klassisches Instrument gestattet zwar unmittelbar eine Messung des Sickerwasseraustrags und der Verdunstung durch Bilanzierung, gewährleistet jedoch selbst mit Wägezellen, einer Nachführung des Matrixpotenzials am unteren Rand an Messwerte im umgebenden Boden und einer Füllung mit einem Bodenmonolith nicht unbedingt die Einhaltung der in der natürlichen Umgebung auftretenden Randbedingungen. Die modernere Alternative - das sogenannte virtuelle Lysimeter (KASTAN-EK, 1995) - besitzt demgegenüber den Vorteil des wesentlich geringeren Eingriffs in die natürlichen Gegebenheiten, erfordert jedoch in seiner Vollausstattung ebenfalls einen erheblichen instrumentellen Aufwand.

Es wurde daher bereits eine Reihe von Versuchen unternommen, auch mit we-

sentlich weniger Aufwand Aussagen z. B. über die Grundwasseranreicherung treffen zu können. So haben z. B. SCHINDLER und MÜLLER (2005) aus der Wasserspannungs- und Wassergehaltsmessung in einer einzigen Tiefe, die notwendigerweise unterhalb der Wasserscheide liegen muss, unter Annahme eines Gradienten von Eins eine recht gute Übereinstimmung mit Lysimeterdaten erzielt.

Zur in-Situ-Messung des Wassergehalts sind Neutronensonden und neuere Verfahren wie Time Domain Reflectometry (TDR) oder Frequency Domain Reflectometry (FDR) einsetzbar. Die entsprechenden Geräte zu allen drei Verfahren sind sowohl als Einzelsensor als auch als profilierendes System im Handel erhältlich. Während bei den Profilgeräten die Neutronensonde oder der TDR-Sensor unter Anwesenheit des Beobachters in einem im Boden verbleibenden Messrohr auf und ab bewegt werden muss, um die Wassergehaltsverteilung über die Tiefe zu erhalten, werden nach dem FDR-Verfahren auch vollautomatische Messsysteme angeboten. Bei letzteren werden mehrere Einzelsensoren in 10-cm-Abständen (oder einem Vielfachen) auf einer Trägerplatte montiert, die in das Messrohr eingeschoben wird und dort über die Dauer des Beobachtungszeitraumes verbleibt. Auf diese Weise erhält man je nach der Anzahl an Einzelsensoren einen mehr oder weniger detaillierten Aufschluss über die Wassergehaltsverteilung im Bodenprofil in kontinuierlichen Zeitabständen. Die für die profilierenden Verfahren notwendigen speziellen Messrohre sind sehr sorgfältig im Boden zu installieren, um einen guten Kontakt zwischen dem umgebenden Boden und dem Rohr sicherzustellen. Der Einbau von Einzelsensoren, die in den meisten Fällen von Baugruben aus seitlich in den Boden vorgetrieben werden, ist jedoch noch aufwändiger.

Autoren: Dr. Gerhard KAMMERER und Dr. Peter CEPUDER, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur, Muthgasse 18, A-1190 WIEN

Profilierende FDR-Messsysteme wurden bisher hauptsächlich in der Bewässerungssteuerung eingesetzt. Das gegenständliche Laborexperiment soll zur Klärung beitragen, ob diese - in Kombination mit anderen Bodeninformationen und Pedotransferfunktionen - auch zur Abschätzung der Grundwasserneubildung oder sogar der Verdunstung geeignet sind, wobei das Hauptaugenmerk in diesem Artikel auf die Auswertung gerichtet ist.

Material und Methode

In ein vertikal auf einer Waage aufgestelltes PVC-Kanalrohr mit dem Innendurchmesser 38,0 cm und 1,00 m Länge wurde in 45 cm Höhe eine Zwischenplatte wasserdicht eingezogen und auf dieser sternförmig 6 Saugkerzen aufgelegt, deren Zu- bzw. Ableitung seitlich aus der Säule geführt wurde. Zentral wurde ein Messrohr der Fa. Sentek, Australien, mit 1,00 m Länge durch ein Loch in der Zwischenplatte geführt. Die Saugkerzen wurden in einen lufttrockenen sandigen Lehmboden aus Groß-Enzersdorf eingebettet, mit dem auch die restliche Bodensäule möglichst homogen gefüllt wurde. Die Korngrößenverteilung dieses Bodens besteht zu 34 % aus Sand, zu 44 % aus Schluff und zu 22 % aus Ton. In natürlicher Lagerung beträgt die Trockendichte etwa $\rho_d = (1,45 \pm 0,05) \text{ g/cm}^3$. In der Bodensäule wurde durch händische Verdichtung ein Wert von $\rho_d = 1,40 \text{ g/cm}^3$ angestrebt. Insgesamt wurde am 3.3.2006 eine lufttrockene Bodenmasse von 78,40 kg mit einem Massenwasseranteil $w = 1,2 \%$ eingebaut und damit ein Volumen von 55,47 m^3 bzw. eine Höhe von 50 cm aufgefüllt. Die Saugkerzen wurden an eine Unterdrucksteuerungsanlage inklusive Vakuumflaschen angeschlossen, an der vorerst der Umgebungsdruck eingestellt wurde. Weiters wurde eine Trägerplatine mit 5 Stück EnviroSCAN-FDR-Sensoren in das Messrohr so tief eingeschoben, dass den einzelnen Sensoren die Messtiefen von 5 cm, 15 cm, 25 cm, 35 cm und 45 cm zugeordnet werden kann.

Am 13.3. um 08:00 wurde auf die Bodenoberfläche ein feinporöser Tropferschlauch aufgelegt und die Säule mit einer Membranpumpe mit Leitungswasser bis am 27.3. 08:00 mit insgesamt 19,95 l



Abbildung 1: Versuchsausrüstung (Bodensäule, Tensiometerschäfte, Trägerplatine für die FDR-Sonde, Aufzeichnungsmodul, Unterdruck-Kessel und einzelne Saugflaschen)

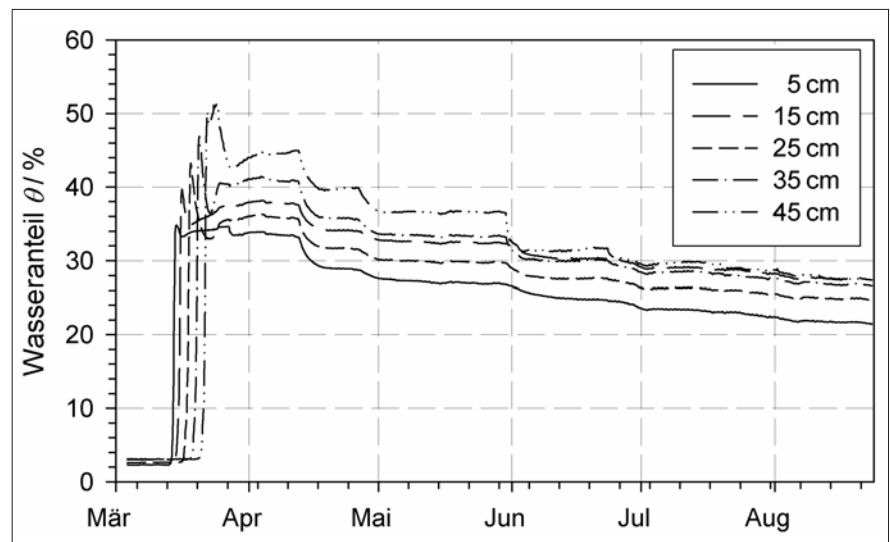


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf des stündlich gemessenen Wasseranteils in 5 Tiefen (Versuchsjahr 2006)

Wasser (Wiener Leitungswasser) beaufschlagt. Die Applikationsrate wurde jedenfalls kleiner als der geschätzte k_s -Wert eingestellt, sodass ein Überstau bzw. das Auftreten eines Porenluft-Überdrucks ausgeschlossen werden konnte (unter dieser Annahme ist bei starren Böden die Gasdruckpotenzialhöhe gleich Null - $h_a = 0 \text{ cm}$ - und die Matrixpotenzialhöhe entspricht der Druck- bzw. Tensiometerpotenzialhöhe: $h_m = h_p$ bzw. $h_m = h_p$). Nachdem ihre Kalibrierung vorher überprüft worden war, wurden am 23.3. fünf Tensiometer Type T6 der Fa. UMS

im Boden eingebaut (zu Beginn des Experiments wären sie trocken gefallen), wobei mit dem Tensiometerbohrer vorgebohrt, jedes Tensiometer eingeschoben und angedrückt wurde. Die Druckaufnehmer in den Keramikspitzen der Tensiometer bzw. die Tensiometerpotenzialwerte lagen in den Tiefen 8 cm, 18 cm, 28 cm, 38 cm und 48 cm. Die gesamte Versuchsausrüstung ist in *Abbildung 1* zu sehen.

Um Verdunstungsverluste weitestgehend zu vermeiden, haben wir die Bodensäule gleich zu Beginn des Experi-

ments mit einer Plastikfolie abgedeckt. Die infolge der Bewässerung ausgebildete Infiltrationsfront erreichte den unteren Rand der Bodensäule etwa am 24.3.2006 (siehe *Abbildungen 2 und 3*). Am 27.3. wurde bemerkt, dass nach dem Übergang in hydrostatische Druckverhältnisse am unteren Rand durch ein Leck etwas Wasser ausgetreten war. Die Bewässerung wurde daraufhin eingestellt. Für den weiteren Versuchsverlauf wird dem oberen Rand wegen der Abdeckung ein Fluss $q_o = 0$ mm/d unterstellt.

Nachdem das Tensiometerpotenzial und der Wassergehalt in sämtlichen Tiefen in eine Stationärphase übergegangen, am unteren Rand (am oberen sowieso) kein Fluss und damit insgesamt keine vertikale Bodenwasserbewegung mehr zu verzeichnen war, wurde zum Zeitpunkt 2006 04 12 T 11:00 ein Unterdruck von $1,0 \times 10^4$ Pa an die Saugkerzen angelegt. Diese nahmen daraufhin wieder für einige Zeit Wasser auf, bis der Fluss erneut zum Erliegen kam und der Unterdruck am 30.5. auf $2,0 \times 10^4$ Pa erhöht wurde. Die weiteren Erhöhungen: 2006 06 23 T 08:00 auf $3,0 \times 10^4$ Pa, 2006 07 19 T 16:00 auf $4,0 \times 10^4$ Pa, 2006 08 11 T 08:30 auf $5,0 \times 10^4$ Pa und schließlich 2006 09 14 T 11:00 auf $6,0 \times 10^4$ Pa.

Auswertung

Der zeitliche Verlauf des stündlich gemessenen Wasseranteils θ (zur Minute 24) und des Tensiometerdrucks (zur vollen Stunde) ist für die jeweiligen 5 Tiefen durch die *Abbildung 2* bzw. durch die *Abbildung 3* dokumentiert. Die Auswertung erfolgte vorerst nur bis zum 23.8.2006; der Versuch ist bis heute nicht abgebrochen.

Der Wassergehaltsverlauf in *Abbildung 2* zeigt in den einzelnen Tiefen einen ziemlich raschen Durchgang der Infiltrationsfront, eine ausgeprägte Spitze und ein deutliches Abfallen. Die Stationärphasen und der Abfall bei den einzelnen Unterdruckerhöhungen am unteren Rand sind ebenfalls gut erkennbar. Die Wasseranteilswerte in der Tiefe 25 cm sind generell kleiner als jene für die Tiefe 15 cm (was entweder den beiden FDR-Einzelsensoren oder einem inhomogenen Bodeneinbau zuzuschreiben ist).

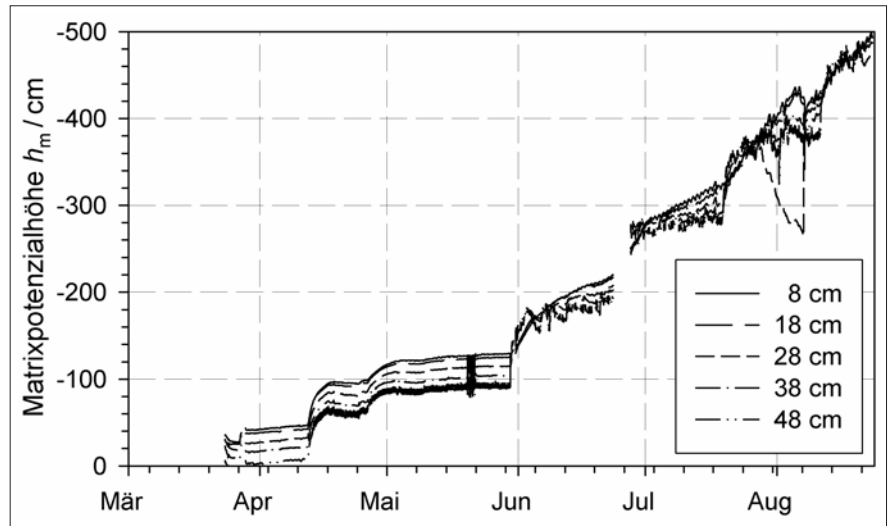


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der stündlich gemessenen Tensiometerpotenzialhöhe in 5 Tiefen (2006)

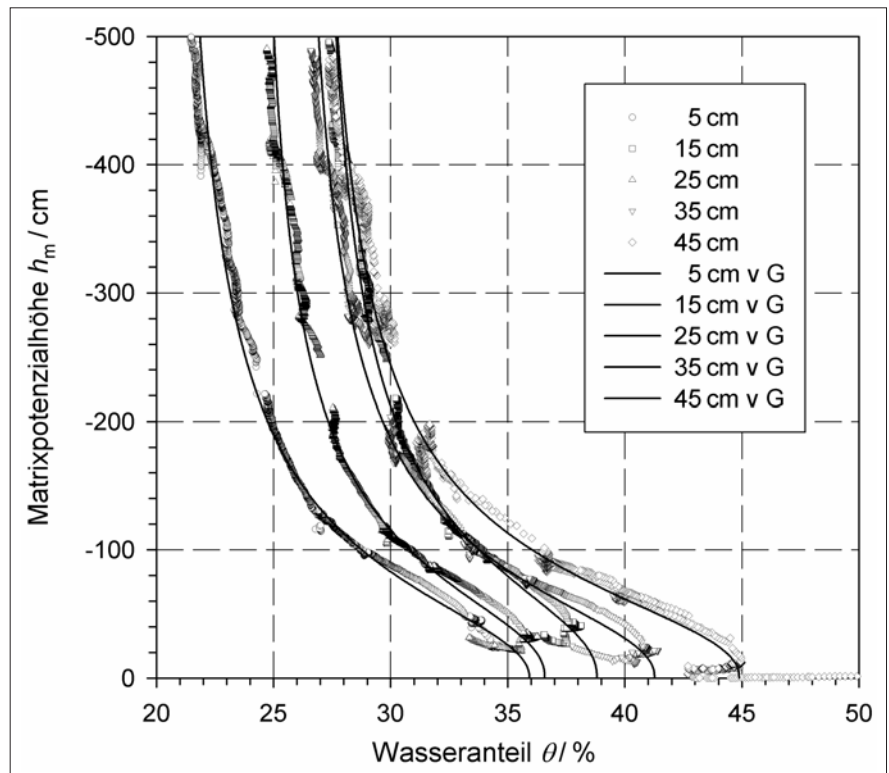


Abbildung 4: Matrixpotenzial-Wasseranteilsbeziehungen für 5 Tiefen aus den simultanen h_m - θ -Messungen und angepasste van-Genuchten-Funktionen

Zu Beginn ist die Tensiometer- oder Druckpotenzialhöhe des untersten Tensiometers (in 48 cm Tiefe) leicht positiv, d. h. es lag kein Matrixpotenzial, sondern ein hydrostatisches Druckpotenzial vor (tatsächlich ist ja zwischen dem 24. und dem 27. März Wasser am unteren Rand ausgetreten). Am Ende der dritten Maiwoche ist eine regelmäßige, vermutlich durch den Datenlogger verursachte Störung in den Messwerten zu

sehen, ebenso ein längerer Totalausfall gegen Ende Juni. Ende Juli ist schließlich das Tensiometer in 28 cm Tiefe trocken gefallen und am 7. August wieder aufgefüllt worden. Das unterste Tensiometer zeigt ein ausgeprägtes Rauschen. Dennoch widerspiegeln sich die aufgetretenen Probleme mit der Steuerung der Unterdruckanlage (Erhöhung auf 20 kPa am 30. Mai) im Verlauf des Tensiometerpotenzials. Betrachtet man die zweite

Stationärphase (mit dem Unterdruck 10 kPa am unteren Rand) eingehender, entsprechen die gemessenen Matrixpotenzialhöhen ziemlich genau den Sollwerten aufgrund des konstanten Gesamtpotenzialverlaufs über die Tiefe.

Die Bestimmung der bodenhydraulischen Eigenschaften erfolgte in einem ersten Ansatz auf der Bildung von h_m - θ -Wertepaaren auf der Basis der in-situ-Messungen. Hierfür wurden die θ -Werte für die Zeitpunkte der h_m -Messungen (volle Stunden) zeitlich linear interpoliert und die h_m -Werte wegen der ein wenig versetzten Messtiefen über die Tiefe linear inter- bzw. extrapoliert. Die erhaltenen simultanen Wertepaare wurden in der unten stehenden *Abbildung 4* für alle Tiefen als Punkte eingetragen (insgesamt 3527 Punkte pro Tiefe), nach absteigenden Matrixpotenzialhöhen geordnet und jeder vierte in die Eingabedatei für das Programm RETC des George E. Brown Salinity Laboratory in Riverside, Kalifornien eingefügt. Dieses Programm ermittelt die Parameter der van-Genuchten-Funktion, dem wohl bekanntesten und am meisten verwendeten mathematischen Modell für die Matrixpotenzial-Wasseranteilsbeziehung:

$$\theta(h_m) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times [1 + (\alpha \times |h_m|)^n]^{-m}$$

Hierin haben der Restwasseranteil θ_r und der Sättigungswasseranteil θ_s (dim $(\theta_r, \theta_s) = L^3L^{-3}$), α (dim $\alpha = L^{-1}$), n und m (dim $(m, n) = 1$) wohl einen physikalischen Hintergrund; sie sind aber nur als angepasste Modellparameter aufzufassen. Der Parameter m wurde mit der häufig getroffenen Bedingung $m = 1 - 1/n$ eingeschränkt. Die für die Parameteroptimierung notwendigen Startwerte können im Programm über Pedotransferfunktionen aus der Textur und eventuell weiteren bekannten Bodeneigenschaften abgeschätzt werden. Weiters bestimmt das Programm auch Funktionsparameter zweier Modellfunktionen für das Wasserleitvermögen, nämlich jener nach BURDINE und nach MUALEM. Mit den für sämtliche Tiefen optimierten Modellparametern θ_r , θ_s , α und n ($m = 1 - 1/n$) wurden die Linienzüge in der *Abbildung 4* erstellt.

Zu dem sich aus den Paaren der Messwerte ergebenden Verlauf ist festzuhalten, dass das Maximum des Wasseranteils nicht bei der größten gemessenen

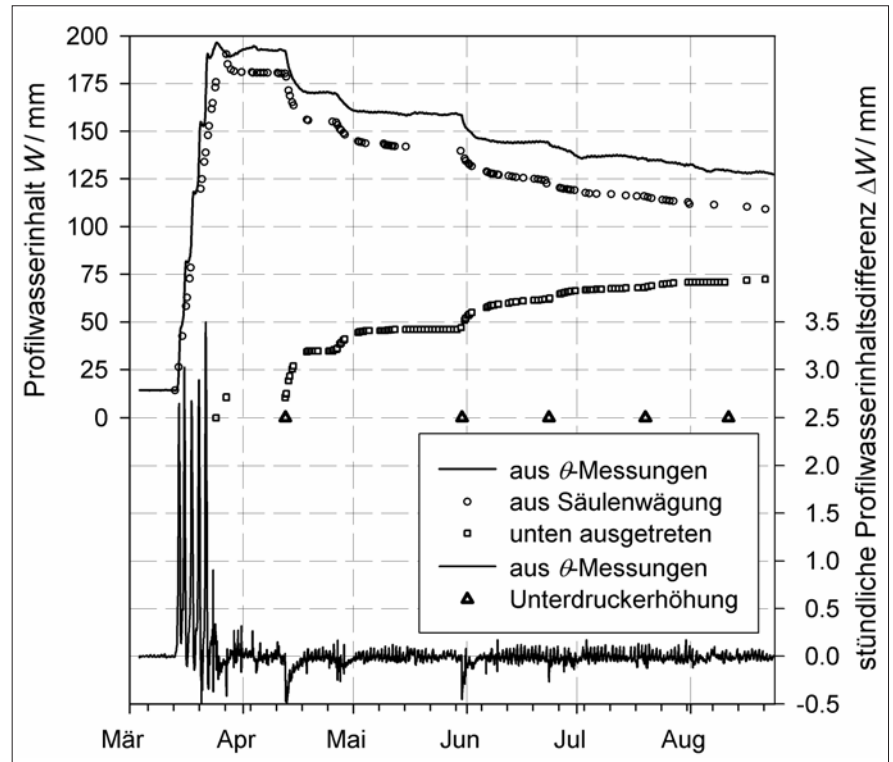


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf des Profilwasserinhalts aus den θ -Messungen sowie aus den Wägungen, Summenlinie des Ausflusses am unteren Rand und stündliche Profilwasserinhaltsdifferenz (aus θ)

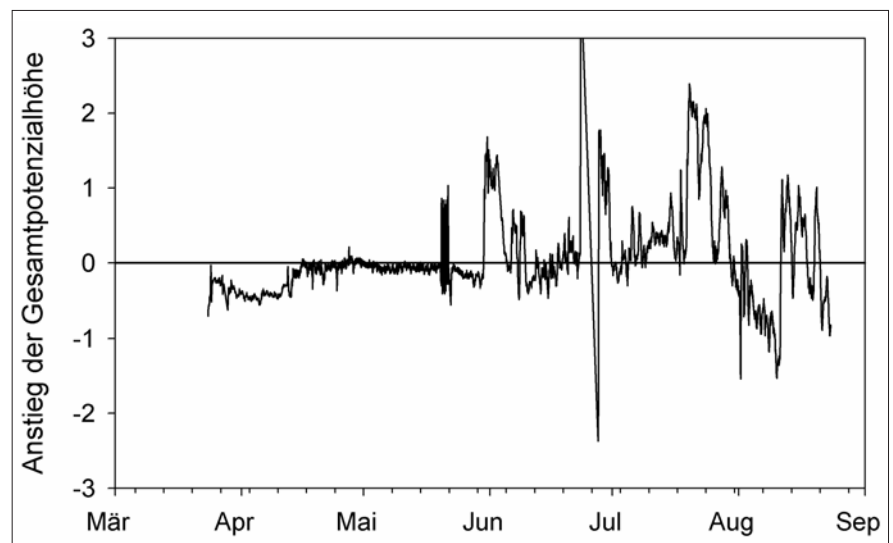


Abbildung 6: Anstieg der Gesamtpotenzialhöhe am unteren Rand mit der Tiefe (Gesamtpotenzialdifferenz der beiden untersten Tensiometer dividiert durch deren Abstand)

Matrixpotenzialhöhe auftritt, sondern einen ausgesprochenen Hochpunkt ausbildet. Durch Vergleich mit der *Abbildung 2* (und der *Abbildung 3*) kann man hierfür die ausgeprägten θ -Spitzen nach dem Durchgang der Infiltrationsfront durch die Messebene verantwortlich machen. Die Gründe für dieses Verhalten bleiben offen. Weiters ist zu bemer-

ken, dass die Retentionskurven trotz des versuchten homogenen Bodeneinbaus doch deutlich gegeneinander verschoben sind ($\Delta\theta \approx 6\%$).

Bei der Optimierung wurden sämtliche Modellparameter mit Ausnahme von m variabel gehalten. Damit ergab sich zwar eine vorzügliche Anpassung, aber ein Restwasseranteil von über 20%. Wäh-

rend die Funktion des Retentionsverhaltens des Bodens im gemessenen Bereich sehr gut wiedergibt, muss vor Extrapolationen über -50 kPa hinaus ausdrücklich gewarnt werden.

Aus den Wasseranteilswerten in den 5 Tiefen wurde der theoretisch aus dem Tiefenintegral über $\theta(z)$ zu berechnende Profilwasserinhalt W durch Summierung der θ -Werte mal zugehörigem Tiefenabschnitt (10 cm), also durch eine Treppenfunktion genähert (eine Interpolation über höherwertige Funktionen führt in den meisten Fällen zu keinem besseren Ergebnis). Nachdem die Bodensäule regelmäßig gewogen wurde, kann der Profilwasserinhalt mit der Gewichtszunahme (durch die Bewässerung) bzw. der Gewichtsabnahme (durch Ausfluss am unteren Rand) kontrolliert werden. Darüber hinaus sind die mittels der Saugkerzen am unteren Rand gewonnenen Bodenwassermengen bekannt. Die Zeitpunkte der Unterdruckerhöhung sind in der *Abbildung 5* durch dreieckige Symbole gekennzeichnet.

Infolge der weitestgehenden Unterbindung des Flusses am oberen Rand muss die Differenz des Profilwasserinhalts ΔW (dividiert durch das Zeitintervall) dem Fluss am unteren Rand entsprechen. Die aus den θ -Messungen ermittelte stündliche Profilwasserinhaltsdifferenz ΔW stellt gewissermaßen die erste Ableitung des Profilwasserinhalts dar und erhielt daher in der *Abbildung 5* eine eigene Achse (rechts).

Der Vergleich der beiden Profilwasserinhaltsverläufe belegt sofort, dass die gemessenen θ -Werte zu hoch sind. Wie bereits von KAMMERER et al. (2005) festgestellt, führen die Parameterwerte

der Standard-Kalibrierfunktion bei diesem Boden offensichtlich zu einem erheblichen Fehler, der mit der Größe von θ zunimmt. Die stärkeren Abweichungen gegen Ende des untersuchten Zeitraums sind allerdings auf die Verdunstungsverluste von insgesamt rund 10 mm zurückzuführen, die bei den Wägungen nicht berücksichtigt wurde. Genau um diesen Betrag ist auch die am unteren Rand gewonnene Wassermenge kleiner als die Gewichtsabnahme der Säule.

Die in der Summenkurve des Profilwasserinhalts kaum wahrnehmbaren Schwankungen der θ -Messungen äußern sich bei den Profilinhaltsdifferenzen in kräftigem Rauschen. Daraus ist abzuleiten, dass die Erfassung der Verteilung des Wasseranteils im Profil mit profilierten Messsystemen jedenfalls brauchbare Summenlinien liefert, die Flüsse jedoch nur annähernd erfasst; die Zeitpunkte der Unterdruckerhöhungen und der dadurch vergrößerten Flüsse sind in der *Abbildung 5* vage erkennbar.

Aus den 5 Tensiometerwerten über die Tiefe - konkreter aus der linearen Verbindung der beiden untersten Tensiometerwerte - läßt sich die Neigung des Gesamtpotenzials am unteren Rand abschätzen, die nach dem Gesetz von DARCY bzw. nach BUCKINGHAM proportional zum Fluss ist. Dabei wirkt sich das Rauschen des Messwertes des untersten Tensiometers besonders verheerend aus. Selbst durch ein gleitendes Mittel über 11 Werte des untersten Tensiometers konnten wilde Schwankungen des Linienzuges in der *Abbildung 6* nicht ausgeglichen werden.

Ähnlich wie die stündliche Profilwasserinhaltsdifferenz zeigt der Verlauf des

Gradienten ein starkes Rauschen, das die Abschätzung des Flusses nahezu unmöglich macht. Abhilfe bringen in der Praxis folgende Maßnahmen: Positionierung der Tensiometer in größerer Tiefe, wo die Dynamik weniger ausgeprägt ist, Positionierung der beiden untersten Tensiometer in größerem vertikalen Abstand und genaue Testung vor dem Feldeinsatz.

Schlussfolgerung

Wenngleich die Auswertung noch nicht abgeschlossen und wesentliche Aussagen zur Arbeitshypothese noch nicht getroffen werden können, zeigt die bisherige Erfahrung nicht nur aus dem gegenständlichen Experiment, dass Rückschlüsse über die Flüsse am oberen (Verdunstung) und unteren Rand (Grundwasseranreicherung) aus Wassergehaltsmessungen profilierender Systeme allein kaum möglich sind, die Summenlinien jedoch nach eingehender Sensorkalibrierung abzuschätzen sein dürften. Weitere Untersuchungen hierzu sind jedenfalls notwendig.

Literatur

- KAMMERER, G., V. ZUPANC, M. PINTAR, M. GLAVAN and P. CEPUDER, 2005: Soil Water Content Monitoring with Capacitance Probes operating in Access-tubes: Laboratory Calibration and Type Comparison. Poster bei der General Assembly der European Geosciences Union in Wien, 25-29 April 2005.
- KASTANEK, F., 1995: Kritische Bemerkungen zur Verwendung von Lysimetern. Bericht über die 5. Gumpensteiner Lysimetertagung, 25-26 April 1995, BAL Gumpenstein, 93-102.
- SCHINDLER, U. und L. MÜLLER, 2005: Evaluierung einer Feldmethode zur Sickerwasserabschätzung aus bodenhydrologischen Messungen. Bericht über die 11. Gumpensteiner Lysimetertagung, 5-6 April 2005, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 203-204.

