

Feldstudie zur Bodenfeuchtesensorik

Wolfgang Durner^{1*}, Kai Germer¹, Conrad Jackisch², Ines Andrä¹, Katrin Schulz¹,
Marcus Schiedung¹, Jaqueline Haller-Jans¹, Jonas Schneider¹, Julia Jaquemotte¹, Philipp Helmer¹,
Leander Lotz¹, Thomas Gräff³, Andreas Bauer³, Irene Hahn³, Martin Sanda⁴, Monika Kumpan⁵,
Johann Dorner⁵, Gerrit de Rooij⁶, Stephan Wessel-Bothe⁷, Lorenz Kottmann⁸ und
Siegfried Schittenhelm⁸

Zusammenfassung

Die Messung der Bodenfeuchte und des Matrixpotenzials als zentrale bodenhydrologische Zustandsvariablen kann mit einer Vielzahl von Messgeräten und Technologien erfolgen. Ein Konsortium von 8 Institutionen hat eine Vergleichsstudie auf einer speziell homogenisierten Testfläche eines schluffigen Sandes durchgeführt. Die Experimentalfläche von ca. 60 m² war natürlichen meteorologischen Bedingungen ausgesetzt und wurde von Vegetation freigehalten. 57 Sensoren von 15 verschiedenen Systemen zur Messung der Bodenfeuchte und 50 Sensoren von 14 verschiedenen Systemen zur Messung des Matrixpotenzials wurden in einer gitterförmigen Anordnung in 0,2 m Tiefe installiert. Die meisten Sensoren erfassten zusätzlich die Temperatur. Die Ergebnisse der Studie zeigten: (1) Die meisten Wassergehaltssensoren ergaben plausible Daten, jedoch bestanden erhebliche Abweichungen in Hinblick auf die gemessenen Absolutwerte. (2) Bei Matrixpotenzialsensoren konnte die schnelle Reaktion auf Niederschlagsereignisse nur von Tensiometern aufgezeichnet werden. Alle indirekten Verfahren reagierten langsamer, (3) ein Vergleich der im Freiland beobachteten Relation zwischen Bodenwassergehalt und Matrixpotenzial mit Labormessungen an ungestörten Stechzylinderproben zeigte systematische Abweichungen. Mit den Ergebnissen aus der Vergleichsstudie wollen wir zu einer kritischen Diskussion der intrinsischen Annahmen bodenhydrologischer Messungen und zur Entwicklung alternativer Techniken zur Beobachtung der Zustände und Prozesse im Boden beitragen.

Schlagwörter: Tensiometrie, Wasserspannungsmessung, Sensorik, Retentionskurve, Hydraulische Eigenschaften

Summary

The measurement of soil moisture and matric potential as fundamental state variables of soil hydrological systems is generally assumed to be a safe issue. A large number of systems and technologies with many untested assumptions about their capacity and reliability exists. A consortium of 8 institutions carried out a comparative study on a specially homogenized test area of a sandy clay. A plot of approximately 60 m² was exposed to natural meteorological conditions and was kept free from vegetation. 57 water content sensors from 15 different systems and 50 matric potential sensors from 14 different systems were installed in a depth of 0.2 m and logged in 30 minute intervals over a period of some. Most sensors also measured the temperature. The results of the study showed: (1) Most soil moisture sensors gave plausible data, but considerable differences were observed for water content sensors with regard to the measured absolute values. (2) The rapid response of the matric potential to precipitation events could only be recorded by tensiometers. All indirect sensors reacted more slowly. (3) A comparison of the in situ-observed relationship between soil water content and matric potential with laboratory measurements on undisturbed cylinder samples showed systematic deviations. With the results of the comparative study we want to contribute to a critical discussion of the intrinsic assumptions of soil hydrological measurements and the development of alternative techniques for the observation of soil conditions and processes.

Keywords: Tensiometry, measurement of soil water tension, sensor technology, retention curve, soil hydraulic properties

¹ Technische Universität Braunschweig, Langer Kamp 19c, D-38106 BRAUNSCHWEIG

² Karlsruher Institut für Technologie

³ Universität Potsdam

⁴ TU Prag

⁵ BAW Petzenkirchen

⁶ Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ Halle

⁷ ecoTech Umwelt-Meßsysteme GmbH Bonn

⁸ Julius-Kühn-Institut Braunschweig mit freundlicher Unterstützung durch das Thünen Institut Braunschweig und den Deutschen Wetterdienst

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



Einleitung

Bodenfeuchtedaten werden in der Landwirtschaft, in der Forstwirtschaft, im Gartenbau, in der Hydrologie, Ökologie und Meteorologie gebraucht. Nach Artiola et al. (2004) gilt: „*Environmental monitoring is the observation and study of the environment. In scientific terms, we wish to collect data from which we can derive knowledge.*“ Im wissenschaftlichen Kontext fungieren Monitoringprogramme somit als Hilfestellung zum besseren Verständnis von langfristigen Änderungen und Entwicklungen innerhalb von Umweltkompartimenten (Acevedo 2016). Insbesondere vor dem Hintergrund knapper werdender Wasserressourcen in ariden und semiariden Gegenden, ausgelöst durch Klimawandel und nicht nachhaltiger Grundwasserbewirtschaftung, kann Monitoring der vadosen Bodenzone von großem Nutzen sein. Voraussetzung hierfür sind Sensoren, welche zuverlässig und genau arbeiten und zudem auch anwenderfreundlich und möglichst kostengünstig sind.

Die derzeit am Markt erhältlichen Sensoren weisen unterschiedliche Charakteristika hinsichtlich Bauform, Messprinzip, Messbereich, Größe des erfassten Volumens sowie vorgesehener Standzeit auf, bewegen sich aber auch in unterschiedlichen Preiskategorien. In einem Consortium verschiedener Institute und in Kooperation mit einer Lehrveranstaltung der TU Braunschweig wurden von uns verschiedene auf dem Markt etablierte Sensortypen für Wassergehalt und Matrixpotenzial in einem Feldversuch verglichen. Insgesamt waren sieben Forschungseinrichtungen sowie ein Sensorhersteller an der Studie beteiligt: Technische Universität Braunschweig, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (BAW) Petzenkirchen, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Technische Universität Prag, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ) Halle-Leipzig, Universität Potsdam, Julius-Kühn-Institut Braunschweig (JKI) sowie ecoTech Umwelt-Meßsysteme GmbH Bonn.

Neben technischen Gesichtspunkten in Hinblick auf Robustheit und Zuverlässigkeit sollten vor allem untersucht werden, ob sich die Messwerte der verschiedenen Sen-



Abbildung 1: Gewalztes Versuchsfeld mit Spurrillen, die bei der Bearbeitung des Feldes durch einen Traktor verursacht wurden.

sortypen in identischen Messbereichen bewegen und wie groß deren Streuung ist. Zudem war von Interesse, ob die Matrixpotenzialsensoren deutliche Unterschiede hinsichtlich ihrer Ansprechcharakteristik bei rapiden Zunahmen und Abnahmen der Wasserspannung aufweisen. Die Studie ergänzt vorangegangene Studien (Rosenkranz et al. 2013; Durner et al. 2015), in denen auch ein Literaturüberblick zur Thematik zu finden ist.

Für den Vergleich wurden insgesamt 107 Sensoren unter Idealbedingungen installiert und natürlichen meteorologischen Bedingungen ausgesetzt. In diesem Beitrag betrachten wir einen Ausschnitt der erhobenen Daten von Mai bis August 2016 für ausgewählte Sensoren. Die in-situ erfassten Charakteristika vergleichen wir zudem mit im Labor bestimmten hydraulischen Eigenschaften ungestörter Proben des Substrats am Standort.

Material und Methoden

Untersuchungsgebiet

Die Versuchsfläche lag im nördlichen Teil des Geländes der ehemaligen Forschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) im Westen der Stadt Braunschweig mit den Koordinaten 52,17° N und 10,26° E. Das Gelände ist eben. Der Grundwasserspiegel liegt ca. 5 m unter der Geländeoberfläche. Der vorliegende Bodentyp ist Braunerde (Sauerbeck 2005). Von 0 bis 30 cm liegt ein Ap-Horizont vor, darunter liegt ein mächtiger verbraunter Horizont (Bv). Die Bodenart des Ap-Horizonts ist stark schluffiger Sand (Su). Generell wird das Bodenmaterial mit zunehmender Tiefe sandiger, und ist vereinzelt mit Bändern feinkörnigeren Substrats durchzogen.

Das Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde des Julius-Kühn-Instituts (JKI) stellte ein Versuchsfeld zur Verfügung. Dieses wurde im Vorfeld der Messungen von Mitarbeitern des JKI gepflügt, geeeggt, gewalzt und mit Roundup gesprüht, sodass eine vegetationsfreie, homogenisierte, ebene und klar definierte Oberfläche entstand. Spurrillen und Verdichtungen durch den Traktor waren unvermeidbar und wurden aus dem Raster der Messungen ausgespart (*Abbildung 1* und *2*).

Sensoren

Auf einer Fläche von 12 m x 5 m wurden 15 Typen von Wassergehalts-Sensoren und 14 Typen von Matrixpotenzialsensoren in jeweils 4 Wiederholungen in einer Tiefe von 0,2 m eingebracht. Einen Überblick über die unterschiedlichen Sensoren die in diesem Bericht behandelt wurden gibt *Tabelle 1*. Nähere Angaben zum Funktionsprinzip der Sensoren finden sich in den Manuals (Liste am Ende dieses Artikels). Eine schematische Karte des Rasters der unterschiedlichen Sensoren ist in *Abbildung 2* gezeigt. Die MPS- und TensioMark-Sensoren wurden mit Bodenmaterial verkittet in vorgebohrten Höhlen eingebracht bzw. eingeschlämmt, alle anderen Sensoren wurden über passgenaue Bohrungen (Tensiometer und Decagon-Sensoren) oder ohne Vorbohrung (TDR, Theta-Probe) in das Bodenmaterial eingeführt. Die Tensiometer T4 und T8 wurden in einem 45° Winkel von der Oberfläche her eingebaut (*Abbildung 3*), alle anderen horizontal von kleinen Zugangsgräben aus,

Tabelle 1: Auflistung und Eigenschaften der eingesetzten Sensoren (Auswahl).

Sensor	Hersteller	Messprinzip**	Sensordlänge/ Messvolumen	Messbereich	T*	
Trase TDR	TRASE	TDR	20 cm ≈ 1000 cm ³	0 – 100 %		
Trime Pico64	IMKO	TDR	16 cm ≈ 1250 cm ³	0 – 100 %	*	
ML2x ThetaProbe	Delta-T	FDR	6 cm ≈ 75 cm ³	0 – 50 %	*	
10HS	Decagon	cap	10 cm ≈ 1300 cm ³	0 – 57 %		
5TM	Decagon	cap	5 cm ≈ 715 cm ³	0 – 100 %	*	
EC-5	Decagon	cap	5 cm ≈ 250 cm ³	0 – 100 %		
T4	UMS	direkt	6 cm	0...850 hPa		
T5	UMS	direkt	0.6 cm	0...>1000 hPa		
T8	UMS	direkt	6 cm	0...850 hPa	*	
SIS	UMS	EPM (ER)	6 cm	0 - 2000 hPa	*	
MPS-1	Decagon	EPM (cap)	4.5 cm	100 - 5000 hPa	*	
MPS-2	Decagon	EPM (cap)	4.5 cm	50 - 5000 hPa	*	
MPS-6	Decagon	EPM (cap)	4.5 cm	90 - 10 ⁶ hPa	*	
pF-Meter	ecoTech	EPM (WD)	4 cm	10 ⁰ - 10 ⁷ hPa	*	

* Temperaturmessung integriert. ** TDR = time domain reflectometrie. FDR = frequency domain reflectometry, cap = kapazitive Messung, EPM = Equivalentes poröses Medium, ER = elektrische Widerstandsmessung, WD = Wärme Dissipation.

vimetrischen Wassergehalts genommen. Zusätzlich wurden zum Messbeginn und Ende Juli im Bereich weniger Meter neben dem Sensorfeld Stechzylinder in 0,2 m Tiefe entnommen und im Labor mit der HYPROP-Methode (UMS) hydraulisch vermessen, um die Wasserretentionseigenschaften zu ermitteln.

Ergebnisse und Diskussion

Wassergehaltsmessungen

Alle Wassergehaltssensoren zeigten einen grundsätzlich ähnlichen Verlauf, welcher der Witterung folgte (*Abbildung 5 Mitte*). Auch wenn die Sensoren prinzipiell plausible Werte liefern, sind die Unterschiede der Messungen aber deutlich und betragen bis zu 10 %. Manche Systeme weichen davon noch weiter ab. Zum Teil kam es auch zu Ausfällen oder Sprüngen in den Messwerten.

Tensionen

Das Feld der Tensionsmessungen zeigt Unterschiede zwischen den Sensorentypen hinsichtlich Absolutwerten und Dynamik (*Abbildung 5 unten*). Auch wenn der Verlauf auch hier bei den meisten Sensoren der Witterung folgt und in sich plausible Daten liefert, ist die Reaktion der Sensoren auf Niederschlagsereignisse und den Tagesgang sehr verschieden. Da ein „wahres“ mittleres Tensionssignal nicht unabhängig ermittelt werden kann, wurde nach Elimination von offensichtlichen Ausreißern aus allen Sensoren der Median als „Ensemblemittelwert“ gebildet. Es zeigte sich,

dass die Tensiometermessungen am engsten am Ensemble-Mittelwert lagen. Das T4 liefert hier besonders gute Werte. Auch das eigentlich für den Laboreinsatz konzipierte, sehr kleine T5 liefert ausgezeichnete Ergebnisse, ist allerdings mechanisch sehr fragil. Einige Systeme scheinen insgesamt für die Anwendung nicht geeignet zu sein, da weder Messbereich noch Dynamik plausibel sind. Aufgrund des feuchten Sommers wurde eine starke Austrocknung über pF 3 hinaus, bei der die indirekten Sensorsysteme ihre Stärken ausspielen, leider nicht erreicht. Eine Ende August installierte Überdachung erfolgte etwas zu spät.

Ansprechverhalten

Bei Detailbetrachtung der Reaktionen im Zusammenhang mit infiltrierenden Wasserfronten zeigt sich „Eigenheiten“ im Ansprechverhalten der jeweiligen Sensoren, die hier aus Platzgründen nur exemplarisch angesprochen werden können. In *Abbildung 6* sind ausgewählte Wassergehalts- und Matrixpotenzialsensoren dargestellt. Von allen Sensoren reagieren die Tensiometer des Typs T4 und T8 als erstes auf Infiltration. Erst ca. ein bis zwei Stunden später ist bei den Wassergehaltssensoren eine Reaktion hin zu höherer Feuchte zu registrieren. Hier zeigen sich deutliche Unterschiede in der gemessenen Bodenfeuchteänderung. Während manche Sensoren eine Änderung volumetrischen Wassergehalts von bis zu 5% Änderung anzeigen, bleiben manche Systeme deutlich unter 3%. Insgesamt sind die Reaktionen der indirekten Messungen der Saugspannung verzögert und gedämpft gegenüber den Tensiometern. Da die T4 und T8 bis an die Oberfläche reichen, kann allerdings

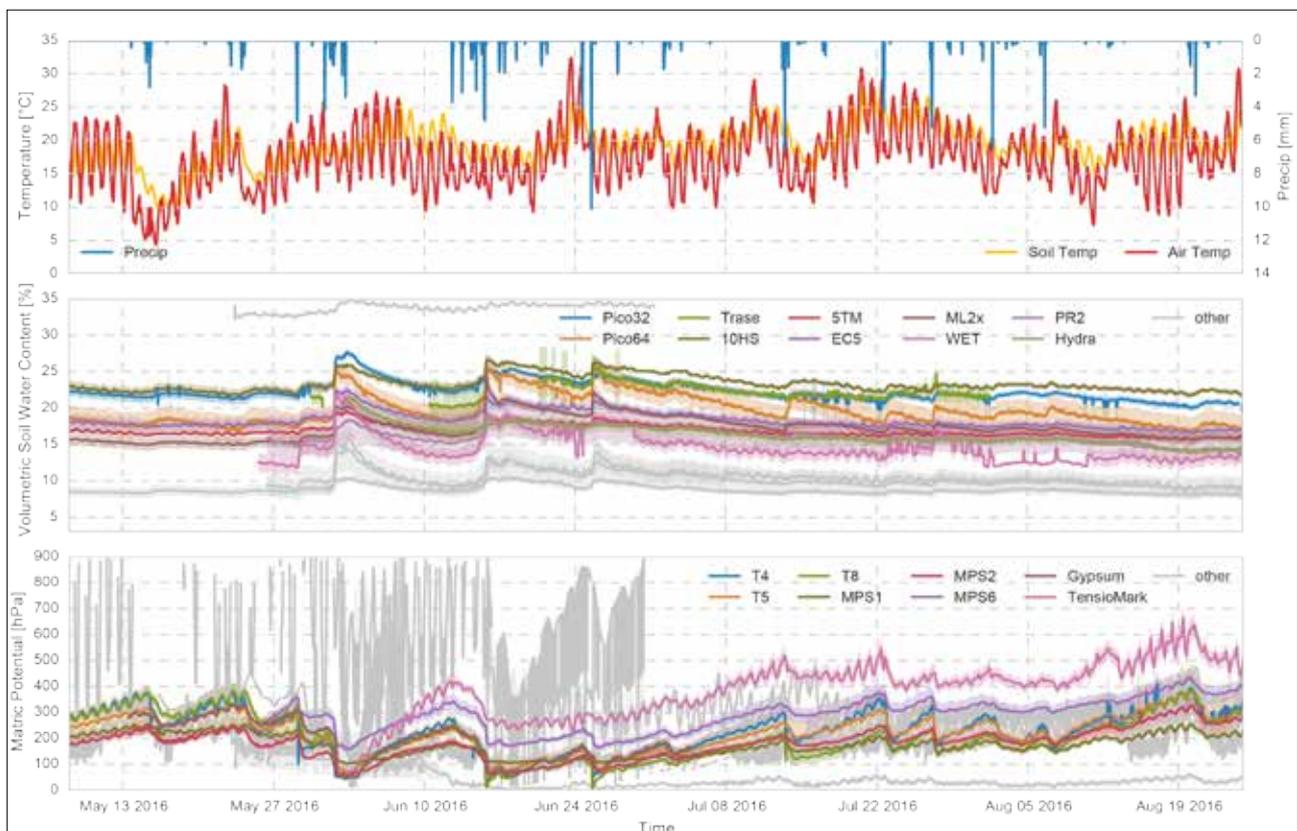


Abbildung 5: Oben: Meteorologische Bedingungen an DWD Station 662 Braunschweig. Mitte: Gemessene Bodenfeuchte der Sensorentypen. Unten: Gemessenes Matrixpotenzial der Sensorentypen.

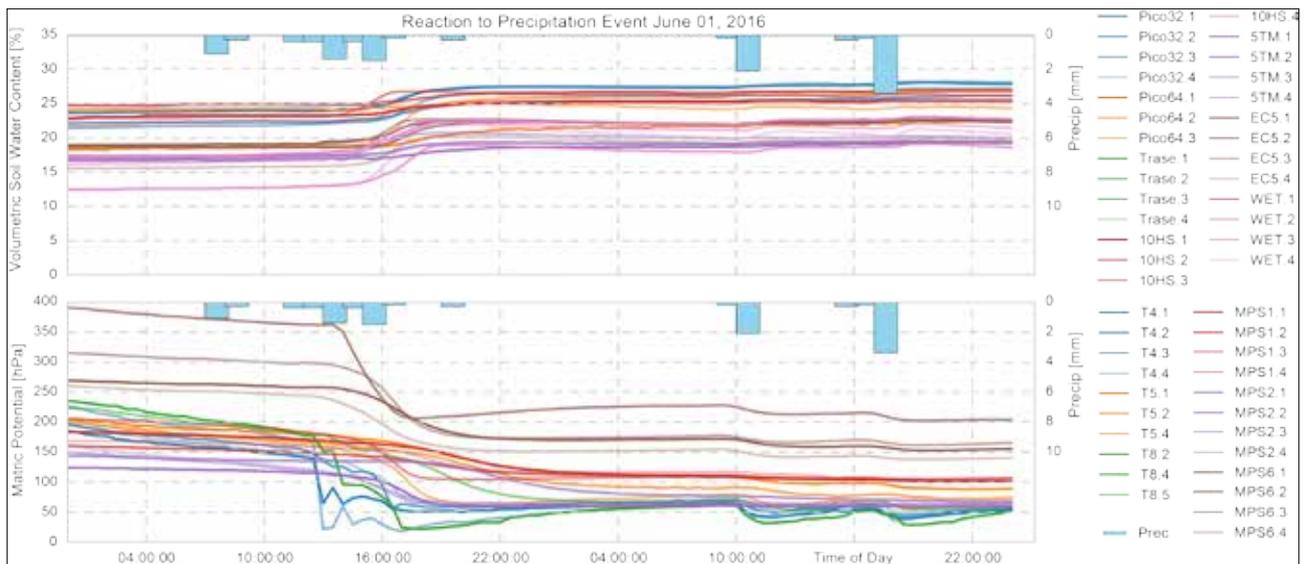


Abbildung 6: Bodenwassergehalt (oben) und Matrixpotenzial (unten) in Reaktion auf ein Regenereignis am 01. Juni 2016.

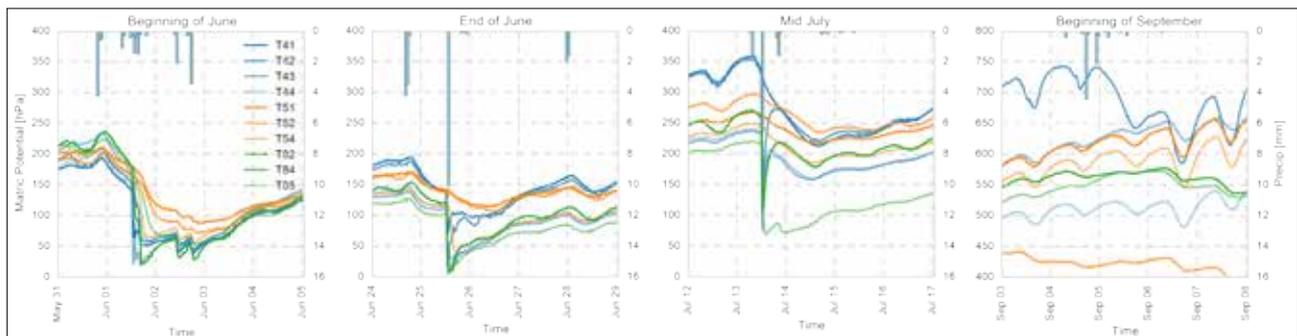


Abbildung 7: Tensiometerreaktion auf Regenereignisse zu verschiedenen Zeitpunkten.

eine präferenzielle Infiltration entlang der Schäfte nicht ausgeschlossen werden. Daher ist dieser Vergleich am besten zum T5 zu ziehen.

Homogenität

Die Bemühungen um Homogenität konnten nicht verhindern, dass vor allem im Grobporenbereich eine Rest-Heterogenität bestand, wie an den Labormessungen sehr schön zu erkennen ist (Abbildung 8). Gravierender ist jedoch, dass sich nach einem Starkregen mit Infiltrationsüberschuss Mitte Juni Umverteilungsstrukturen an der Oberfläche bildeten. Dadurch ausgelöst kam es lokal zu Algenbildung und Verkrustung. Entsprechend entwickelte sich eine kleinräumige Heterogenität der oberen Randbedingung, die im weiteren Verlauf der Studie auch in den Messungen deutlich wurde (Abbildung 7). Ab September wurde dieser Effekt noch durch lateralen Wassereinfluss vom Rand der Überdachung verstärkt.

In-situ Retentionskurve

Die an den Stechzylinderproben ermittelten bodenhydraulischen Eigenschaften sind in Abbildung 8 dargestellt. Eine in situ Retentionskurve wurde demgegenüber aus den Ensemblemittelwerten der Wassergehalte und Wasserspannungen ermittelt. Den Vergleich dieser beiden Retentionskurven zeigt Abbildung 9. Die in-situ Wassergehalte lagen zwischen

15 und 25 Vol-%. Die höchsten Tensionen betragen ca. 350 hPa, d.h. der Boden trocknete in 20 cm Tiefe in diesem Sommer niemals wesentlich unter die Feldkapazität ab. Am meisten bemerkenswert erscheint, dass die Wasserkapazität (=Steigung der Retentionskurve) im Feld deutlich niedriger ist, als aus Labormessungen abgeschätzt würde.

Schlussfolgerung

Bodenfeuchte und Matrixpotenzial gelten als zentrale Zustandsvariablen von bodenhydrologischen Systemen, deren Messbarkeit nicht in Frage steht. Eine Vielzahl von Systemen und Technologien und ebenso viele ungeprüfte Annahmen über deren Kapazität und Zuverlässigkeit existieren dafür. Die Ergebnisse der Studie legen nahe, den Stand der hydrologischen Zustandsbeobachtung, das Problem der Heterogenität und die Übertragbarkeit von Laboranalysen der Bodenwasserretention in die Natur zu hinterfragen: (1) Die meisten Sensoren ergaben plausible Daten der Bodenfeuchtemessung und bestätigt damit frühere Studien. Jedoch zeigten sich bei Wassergehaltssensoren erhebliche Abweichungen in Hinblick auf die gemessenen Absolutwerte, die sich als Streuung beim selben Gerätetyp (Abbildung 6) und als systematische Abweichung zwischen den Typen (Abbildung 5) zeigte. Die von den Systemen mögliche Präzision der Absolutwerte kann demnach im Mittel nur mit entsprechender Kalibrierung (in-situ), und

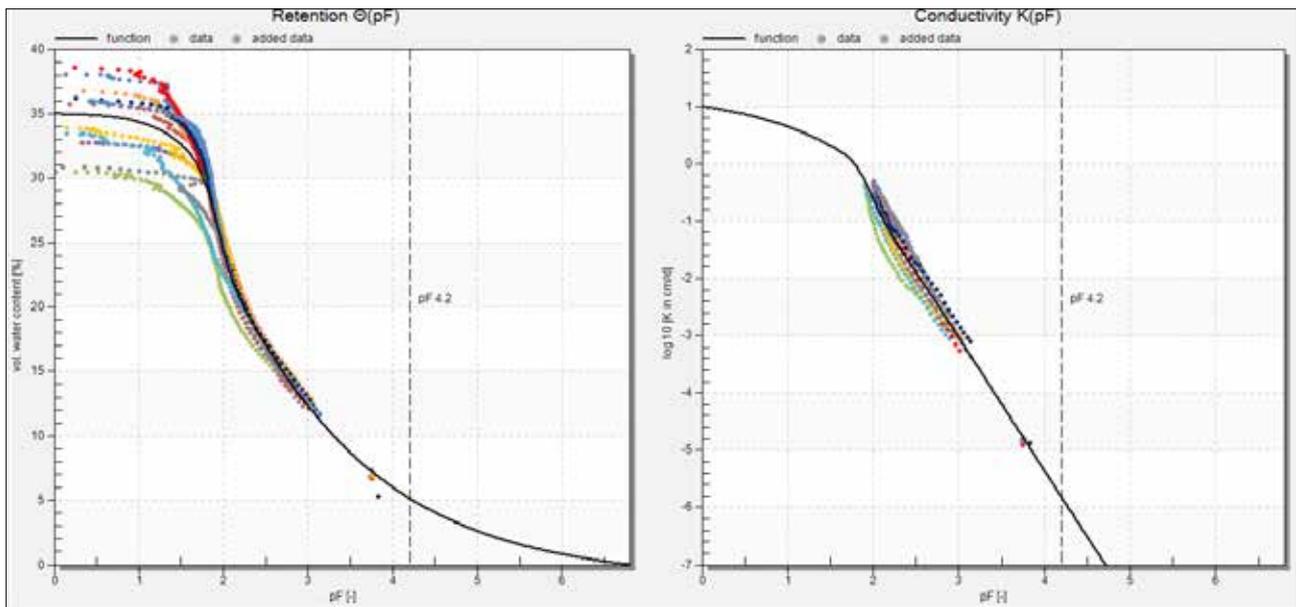


Abbildung 8: HYPROP-Labormessungen der Retentions- und Leitfähigkeitskurven in 0,2 m Tiefe ermittelt an 11 am Sensorfeld entnommenen Bodenproben mit gefitteten hydraulischen Funktionen mit dem hier verwendeten PDI-bimodal van Genuchten Modell (Peters 2013, Iden und Durner 2014).

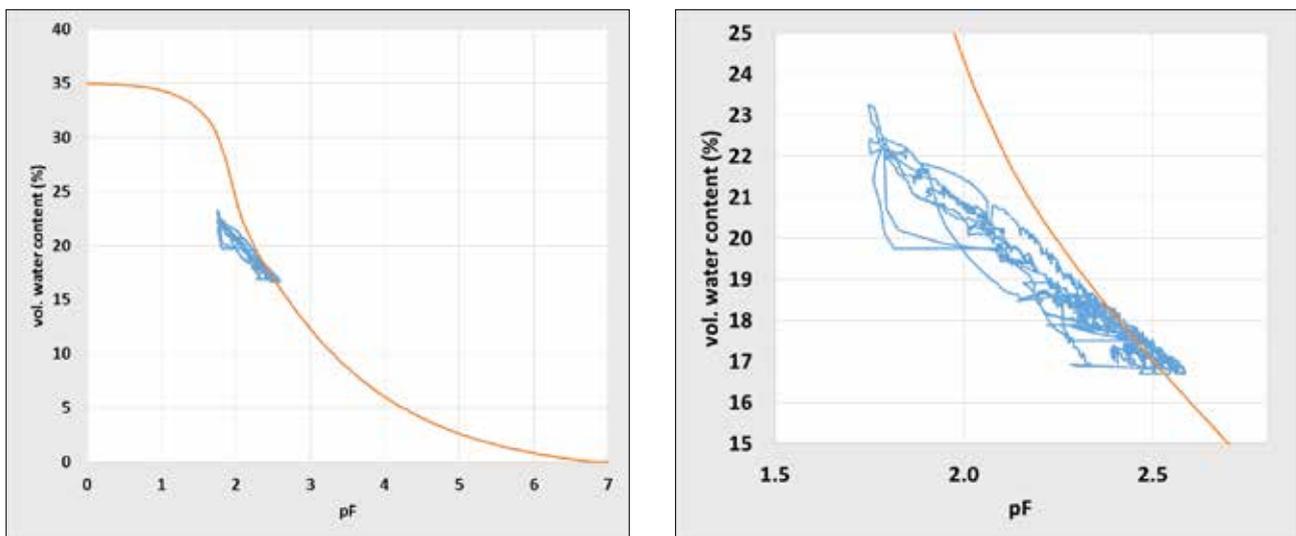


Abbildung 9: Gegenüberstellung von in-situ Wertepaaren aus Wassergehalt und Saugspannung im Feld und der auf Basis der Labormessungen gefitteten hydraulischen Funktion der Retentionskurve aus Abbildung 8.

bei einem Einzelsensor gar nicht erreicht werden. Da Unterschiede zwischen Sensoren auch in Hinblick auf gemessenen Feuchteänderungen gefunden wurden, macht dies die Interpretation hinsichtlich beobachteter Prozesse schwer. Bei den Matrixpotenzialen wurden sehr schnelle Reaktionen auf Niederschlagsereignisse nur von Tensiometern aufgezeichnet. Alle indirekten Verfahren reagierten gedämpft, was unter stark dynamischen Verhältnissen die Beobachtung der Zustandsdynamik des Bodenwassers verfälschen könnte. (2) Eine größere Homogenität als in unserem Experiment ist unter Freilandbedingungen kaum realisierbar. Trotzdem konnte die Homogenitätsannahme nur für eine initiale Periode von wenigen Wochen aufrecht gehalten werden. Ein Starkregenereignis mit Infiltrationsüberschuss führte zur Bildung von Bodenkrusten und oberflächlichen Umverteilungsnetzwerken, und damit zu kleinskaliger Heterogenität

der oberen Randbedingung. Wenn dies die Realität auf unserer homogenisierten Testfläche von 60 m² ist, welche Aussagekraft haben dann einzelne Punktbeobachtungen für den Zustand ganzer Einzugsgebiete? (3) Ein Vergleich der im Freiland beobachteten Relation zwischen Bodenwassergehalt und Matrixpotenzial mit Labormessungen an ungestörten Stechzylinderproben zeigte systematische Abweichungen. Dies wirft Fragen hinsichtlich der generellen Praxis zur Parameterisierung der Retentionsbeziehung in hydrologischen Modellen auf.

Danksagung

Wir bedanken uns bei allen Beteiligten des Consortium. Großer Dank für die Unterstützung an das Julius-Kühn-Institut, besonders Dr. Schittenhelm, für die fortwäh-

rende Unterstützung der Arbeiten. Die Sensoren der TU Braunschweig wurden von den Fa. UMS AG, München und DECAGON, Pullman, günstig bzw. unentgeltlich zur Verfügung gestellt.

Weiterführendes Material

Die Studierenden im Masterstudiengang Umweltwissenschaften der TU Braunschweig haben einen Seminarbericht mit einer Vielzahl von detaillierten Betrachtungen über diese Monitoring-Kampagne angefertigt (Haller-Jans et al. 2016), der vom Erstautor auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden kann.

Manuale

Decagon Devices, Inc. 2008. MPS-2 Dielectric Water Potential Sensor. Operator's Manual, 27 Seiten.

Decagon Devices, Inc. 2015. MPS-2 & MPS-6 Dielectric Water Potential Sensor. Operator's Manual, 30 Seiten.

Decagon Devices, Inc., 2008. 10HS, Soil Moisture Sensor, Operator's Manual, Version 1.0. 19 Seiten.

Decagon Devices, Inc., 2008. MPS-1, Dielectric Water Potential Sensor, Operator's Manual, 24 Seiten.

Decagon Devices, Inc., 2010. 5TM, Water Content and Temperature Sensors, Operator's Manual, Version 0. 26 Seiten.

ecoTech pF-Meter: https://www.ecotech-bonn.de/en/produkte/meterologie/sensoren/bodenfeuchte/pf_meter/

Imko Mikromodultechnik GmbH, 2011. Manual for T-rime-Pico 64/32. 46 Seiten.

Soilmoisture Equipment Corp., 2000. TRASE SYSTEM I - For Soil Moisture Measurement - Version 2000. 119 Seiten.

UMS GmbH München, 2004. ThetaProbe, Soil Moisture Sensor, Type ML2x, User Manual ML2x-UM-1.21. 22 Seiten.

UMS GmbH München, 2006. User Manual, SIS Smart Irrigation Sensor. 15 Seiten.

UMS GmbH München, 2009. Bedienungsanleitung T5/T4x, Pressure Transducer Tensiometer. 48 Seiten.

UMS GmbH München, 2009. Bedienungsanleitung T8, Langzeitmonitoring-Tensiometer. 56 Seiten.

UMS GmbH München, 2009. Operator's Manual, EC-5, EC-10, 20, Water Content Sensor. 23 Seiten.

UMS GmbH München, 2012. Bedienungsanleitung T4/T4e, Druckaufnehmer-Tensiometer. 45 Seiten.

Literatur

Acevedo M.F. (2016) Real-Time Environmental Monitoring: Sensors and Systems. Boca Raton, FL, USA, CRC Press.

Artiola J., Pepper I.L., Brusseau M.L. (2004) Environmental monitoring and characterization. Academic Press.

Durner W., Andrä I., Schittenhelm S. (2015) Messung der Bodenwasserndynamik unter einem Pflanzenbestand und einem brachen Boden – Ein Direktvergleich. In: Bericht über die 16. Lysimetertagung, 21.-22.4.2015, HBFLA Raumberg-Gumpenstein, 85-94.

Haller-Jans J., Helmer P., Jaquemotte J., Lotz L., Schiedung M., Schneider J., Schulz K. (2016) Monitoring des Wasser- und Stoffhaushaltes in der vadosen Zone. Seminararbeit, Institut für Geoökologie, TU Braunschweig, 141 Seiten.

Iden S.C., Durner W. (2014) Comment to "Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range" by A. Peters., Water Resour. Res., 50, 7530-7534.

Peters A. (2013) Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range, Water Resour. Res., 49, 6765-6780

Rosenkranz H., Durner W., He W., Knoblauch C., Meurer K.H.E. (2013) Ringversuch zum Praxisvergleich von 13 Sensor-Typen zur Wassergehalts- und Wasserspannungsbestimmung in Böden. In: Bericht über die 15. Lysimetertagung, 15.-17.4.2013, HBFLA Raumberg-Gumpenstein, 93-102.

Sauerbeck G. (2005) Standortbeschreibung zur Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft. 71 S. URL literatur.vti.bund.de/digbib_extern/bitv/zi038380.pdf.