

Messung der Bodenwasserdynamik unter einem Pflanzenbestand und einem brachen Boden - Ein Direktvergleich

Wolfgang Durner^{1*}, Ines Andrä¹ und Siegfried Schittenhelm²

Zusammenfassung

Zwei Teilflächen eines Agrarstandorts wurden in den Tiefen 12,5 cm und 25 cm identisch mit 5 Typen von Wassergehaltssensoren und 7 Typen von Matrixpotentialsensoren instrumentiert. Eine Teilfläche lag unter einem aufwachsenden Weizenbestand und die andere unter einer Dauerbrache. Zur Minimierung räumlicher Heterogenität wurde die Fläche vor der Einsaat ca. 30 cm tief gepflügt und ca. 20 cm tief mit der Kreiselegge bearbeitet. Beide Flächen wurden schließlich mit einer Walze oberflächlich eingeebnet. Nachdem sich beide Teilflächen zunächst in bodenhydrologischer Hinsicht vergleichbar verhielten, traten im Laufe der 12-wöchigen Messperiode zunehmend vegetationsbedingte Unterschiede in den Vordergrund. Die Tagesgänge der Wasserspannung folgten den Erwärmungs- und Abkühlungszyklen und zeigten ein komplexes Verhalten, welches sich aus einer Überlagerung der Instrumentenreaktion und der Änderung der Bodenwasserspannung aufgrund von Erwärmung sowie der Wurzelwasseraufnahme ergab. Die Variabilität der gemessenen Wasserspannungen blieb unter der Brache gering, stieg für die Teilfläche unter Vegetation aber stark an. Die Wassergehaltsmessungen zeigten in Hinblick auf die Absolutwerte eine Spannweite von $\pm 3\%$, die relativen Änderungen des Wassergehalts wurden von allen Geräten recht präzise abgebildet. Die aus Labormessungen abgeleitete Feldkapazität des Bodensubstrats überschätzt die aus in situ Daten ermittelte nFK fast um den Faktor zwei.

Schlagwörter: Lysimeter, hydraulische Eigenschaften, Tensiometer, TDR, FDR, Sensorvergleich

Summary

Two adjacent plots of a agricultural site were identically instrumented with 5 types of water content sensors and 7 types of matric potential sensors, placed in depths of 12 cm and 25 cm. One plot was under a growing wheat, the other under bare soil. To minimize spatial heterogeneity, the area was plowed and harrowed before sowing. Both areas were finally leveled at the surface with a roller. The two plots showed initially comparable soil water dynamics, but diverged continually more during the 12-week measurement period, caused by the growing vegetation. The diurnal variations of the water tension followed the heating and cooling cycles and showed a complex behavior, which was due to a superposition of the instrumental response and the change of soil water stress due to warming, as well as the root water uptake. The variability of the measured water tensions remained small under bare soil, but rose strongly under vegetation. The water content measurements in terms of the absolute values varied in a range of $\pm 3\%$, the relative changes in water content were, however, quite precisely mapped by all devices. The usable field capacity calculated from laboratory measurements overestimated the in situ determined field value almost by a factor of two.

Keywords: hydraulic properties, tensiometer, TDR, FDR, sensor comparison, root water uptake

Einleitung

Die Auswirkungen von Pflanzen auf die Bodenwasserdynamik zu messen und zu verstehen stellt eine enorme Herausforderung dar, da es schwer ist, den Einfluss der Pflanzen von sonstigen Prozessen des Bodenwasserflusses zu trennen. Insbesondere an Schönwettertagen ergeben sich deutliche Tagesgänge der Wasserspannung und des Wassergehaltes. Ob diese jedoch durch Temperatureffekte auf Messgeräte und die Oberflächenspannung des Wassers, oder durch die Prozesse Evaporation, Transpiration, Redistribution, oder durch thermal induzierte Wasserflüsse hervorgerufen werden, ist experimentell nur schwer erfassbar. Räumliche Heterogenität, Wurzelwachstum, sowie Ausscheidung von

Wurzelexudaten, welche die hydraulischen Funktionen verändern, erschweren eine Analyse zusätzlich.

Ziel dieser Untersuchung war es, durch eine sorgfältige vergleichende Messkampagne die Bodenwasserdynamik unter einem unmittelbar benachbarten brachen und einem vegetationsbedeckten Standort zu erfassen. Besonderes Augenmerk wurde dabei darauf gelegt, identische Bodeneigenschaften und eine möglichst identische Ausgangssituation zu haben, so dass auftretende Unterschiede nicht auf Sekundärfaktoren wie räumliche Variabilität zurückgeführt werden können. Die Studie beinhaltet zwei interessante „Nebeneffekte“. Da insgesamt 6 Typen von Wassergehaltssensoren und 6 Typen von Wasserspannungssensoren

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

² Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Julius Kühn-Institut, BRAUNSCHWEIG

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



Sensor	Hersteller	Messprinzip**	Einheit	Messbereich	T*	
TrimePico64	IMKO	TDR	[%]	0 - 100	✓	
ThetaProbe	Delta-T	FDR	[%]	0 - 100	-	
10HS	Decagon	Capacitance	[%]	0 - 57	-	
5TM	Decagon	Capacitance	[%]	0 - 100	✓	
EC-5	Decagon	Capacitance	[%]	0 - 60	-	

Abbildung 1: Verwendete Wassergehalts-Sensorik. Beachte, dass die Abbildungen nicht maßstabstreu sind, sondern auf gleiche Abbildungsgröße skaliert wurden.

eingebaut wurden, können die Reaktion von Sensoren unterschiedlicher Bauart und Hersteller miteinander verglichen werden. Weiterhin wurden in Laboranalysen die hydraulischen Eigenschaften des Bodensubstrats erfasst und können mit den in-situ erfassten Eigenschaften verglichen werden. In diesem Beitrag werden die Wassergehaltsmessungen diskutiert und die Feld- vs. Labor-Retentionskurven verglichen. Auf die Darstellung der Tensionsmessungen muss aus Platzgründen verzichtet werden.

Material und Methoden

Standort

Der Messstandort befand sich auf dem Gelände des Thünen-Instituts im Westen der Stadt Braunschweig. Auf dem Gelände befinden sich Institute des Thünen-Instituts und des Julius-Kühn-Instituts (JKI), das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, des Friedrich-Löffler-Institut sowie eine Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes. Das durch Landwirtschaft geprägte Gelände wurde 1935 - 1947 für einen Forschungsflughafen mit Rollfeld genutzt (SAUERBECK 2005). Die Versuchsfläche lag im nördlichen Teil des Geländes mit den Koordinaten 52.295206 N und 10.440349 O. Das Gelände ist eben, der Grundwasserspiegel liegt 3 m unter der Geländeoberfläche (SAUERBECK 2005). Der vorliegende Bodentyp ist Braunerde. 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 (Su4) und die des Bv-Horizonts mittel schluffiger Sand (Su3). Generell wird das Bodenmaterial mit zunehmender Tiefe sandiger. Am 10.03.2014 fand eine Bodenbearbeitung mit dem Pflug und dem Packer auf 30 cm Tiefe statt. Kurz vor der Aussaat des Sommerweizens (Sorte: Granus) am 26.03.2014, mit 330 Körnern pro Quadratmeter und einer Reihenweite

von 11,9 cm, wurde das Saatbett mit einem Kreiselgrubber feinkrümelig eingestellt. Mitte April fand eine Walzung statt, so dass eine absolut ebene und präzise definierte Bodenoberfläche vorlag. Am 22.04.2014 sowie am 04.06.2014 wurde der Boden mit jeweils 80 kg ha⁻¹ Stickstoff gedüngt. Für den Pflanzenschutz fand eine Behandlung am 28.04.2014 mit einer Mischung aus den Herbiziden Concert SX (100 g ha⁻¹) und Arelon Top (2 L ha⁻¹) statt. Als Fungizid wurde das Mittel Gladio (0,8 l/ha) und als Insektizid das Mittel Karate Zeon (75 mL ha⁻¹) am 06.06.2014 ausgebracht. Nach Beendigung der Messkampagne wurde das Getreide am 08.08.2014 geerntet. Alle hier beschriebenen Maßnahmen wurden durch das Personal des JKI durchgeführt

Sensorik

Zur Messung von Wassergehalten wurden in einer Messkampagne die Wassergehaltssensoren Trime Pico64 (IMKO), EC5, 10HS, TM5 (Decagon), und ThetaProbe ML2x (Delta-T) verwendet (Abbildung 1). Sie basieren auf den Messprinzipien „Time Domain Reflectometry“ (TDR), „Frequency Domain Reflectometry“ (FDR) und „capacitance method“. Näheres zur Spezifizierung der Sensoren ist den Herstellerangaben zu entnehmen. Wasserspannungen wurden die Tensiometertypen T4, T5 und T8 (UMS GmbH) sowie 4 Typen von Matrixsensoren eingesetzt: MPS-1 und MPS-2 (Decagon); pF-Meter (EcoTech), Tensiomark (bambach GbR), und SIS Smart Irrigation Sensor (UMS). Alle Matrixsensoren beruhen auf dem Prinzip, dass ein keramischer Gleichgewichtskörper mit dem zu messenden Boden in Kontakt gebracht wird, das hydraulische Potential sich durch Wasseraufnahme oder -abgabe kontinuierlich dem umgebenden Boden anpasst, der Wassergehalt im Sensor gemessen wird, und über interne Kalibrierungen das zugehörige Matrixpotential errechnet wird. Die vier Sensortypen werden nachfolgend kurz charakterisiert.

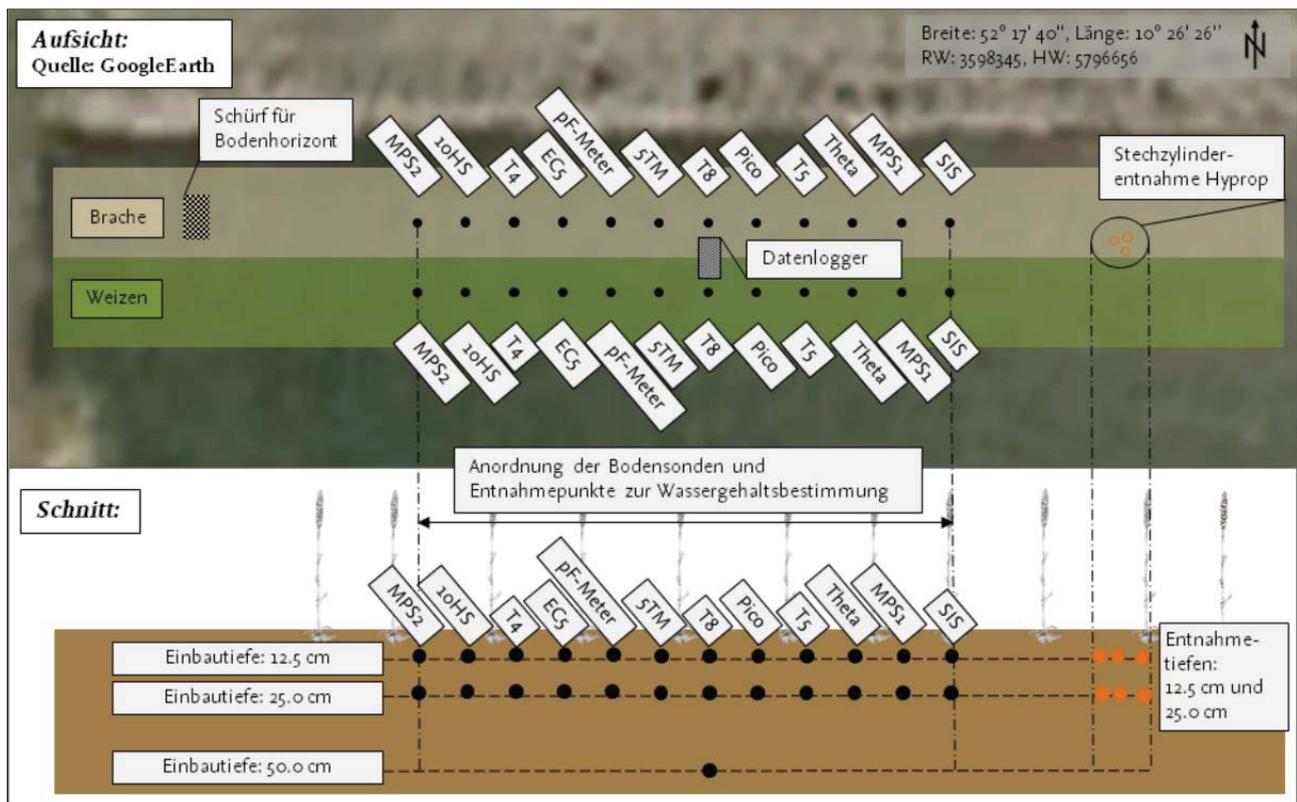


Abbildung 2: Lageplan des Versuchsfeldes und Aufsicht und Schnitt.

Messfeld und Instrumentierung

Das Messfeld bestand aus einer ca. 50 m langen und 20 m breiten Fläche. Auf einer Hälfte der Fläche wurde Sommerweizen eingesät (Abbildung 3c). Die Teilflächen wurden nach der Walzung weder betreten noch befahren. Der Einbau der Messgeräte erfolgte am 24. April 2014 in einem abgegrenzten Plot von 2 m Breite und 6 m Länge, der an der Grenze der beiden Teilflächen lag. Brachfläche und Weizenfläche wurden in spiegelsymmetrischer Anordnung mit den Wassergehalts- und Matrixpotentialsensoren instrumentiert. Die Auslegung der Messgeräteeinrichtung ist in Aufsicht und im Tiefenprofil in *Abbildung 2* dargestellt. Jeder Sensortyp wurde vierfach eingebaut: Jeweils 12,5 und 25 cm unter Geländeoberkante unter Brache (B) sowie unter Weizen (W). Sensoren gleichen Typs wurden jeweils untereinander eingebaut. Vom Tensiometer T8 wurden zusätzliche Sensoren 50 cm unter GOK installiert. Entsprechend ergaben sich insgesamt 12 Datenreihen mit der Spezifikation B12, B25, W12 und W25 sowie je eine Datenreihe für die Bereiche B50 und W50.

Die Messgeräte wurden auf beiden Seiten ca. 50 cm von der Trennlinie zwischen Brache und Weizenfläche entfernt platziert. Der Abstand zwischen den einzelnen Sensoren entlang der Linie betrug 50 cm. Für die Tensiometer T4 und T8 und den Matrixsensor SIS wurden mithilfe einer Führungsschiene und einem Bohrstock im Winkel von 45 Grad zur Oberfläche Löcher vorgebohrt. Diese waren so platziert, dass sich die Mitte der Keramik des hineingeschobenen Sensors in der Zieltiefe unter der Einbaulinie befand. Um die Tensiometerschäfte herum wurde an der

Bodenoberfläche eine Gummischeibe gelegt, um die Löcher vor eindringendem Wasser zu schützen. Bei den T8 wurde um die aus der Bodenoberfläche ragenden Bauteile (Schaft und Befüllröhrchen) eine Isolierung angebracht, um Temperaturschwankungen der Bauteile zu vermindern (Abbildung 3a). Die übrigen Sensoren wurden horizontal eingebaut, indem zunächst auf der Innenseite der Einbaulinie ausreichend tief gegraben wurde und die Sensoren dann in der Zieltiefe horizontal in den Boden geschoben wurden (Abbildung 3b). Bei den Sensoren 5TM und 10HS wurde zuvor mit einer Metallschablone in der Form des Sensors ein passendes Loch vorgestochen. Bei den Sensoren MPS-1 und MPS-2 wurde in der Zieltiefe zunächst ein passendes Loch ausgehöhlt. Um diese Sensoren wurde vor dem Einbau ein Klumpen aus Bodenmaterial geformt und der Sensor mit dem Bodenmaterial horizontal in die „Höhle“ geschoben, und sämtlicher Hohlraum mit Bodenmaterial ausgefüllt. Um „Abschattung“ zu vermeiden, wurden der obere und untere Sensor dieses Typs jeweils leicht gegeneinander versetzt eingebaut. Zum Schluss wurden die Zugangsgräben wieder möglichst auf die vorherige Lagerungsdichte mit Boden verfüllt. Auf der Weizenfläche wurden im wiederverfüllten Bereich die Weizenpflanzen wieder eingesetzt. *Abbildung 3c* zeigt das Messfeld nach dem Einbau.

Datenaufnahme, Probenahme von Stechzylindern

Die Sensoren wurden an einen Datenlogger des Typs DT85 (UMS GmbH, München) und zwei EM50-Logger (Decagon Inc., Pullman, USA) angeschlossen. Der DT85 befand sich

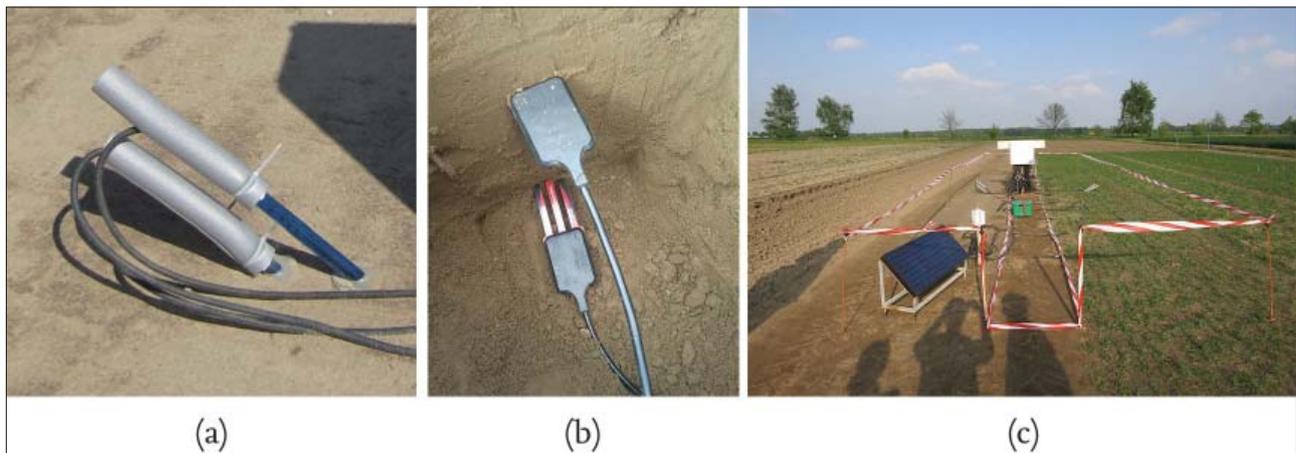


Abbildung 3: Messfeld nach dem Einbau: (a) Tensiometer T8 auf Brachfläche mit Isolierung in grau. (b) Einbau der 5TM-Sensoren. (c) Messfeld nach der Installation der Sensoren und Logger. Die Teilflächen sind mit Absperrband eingegrenzt.

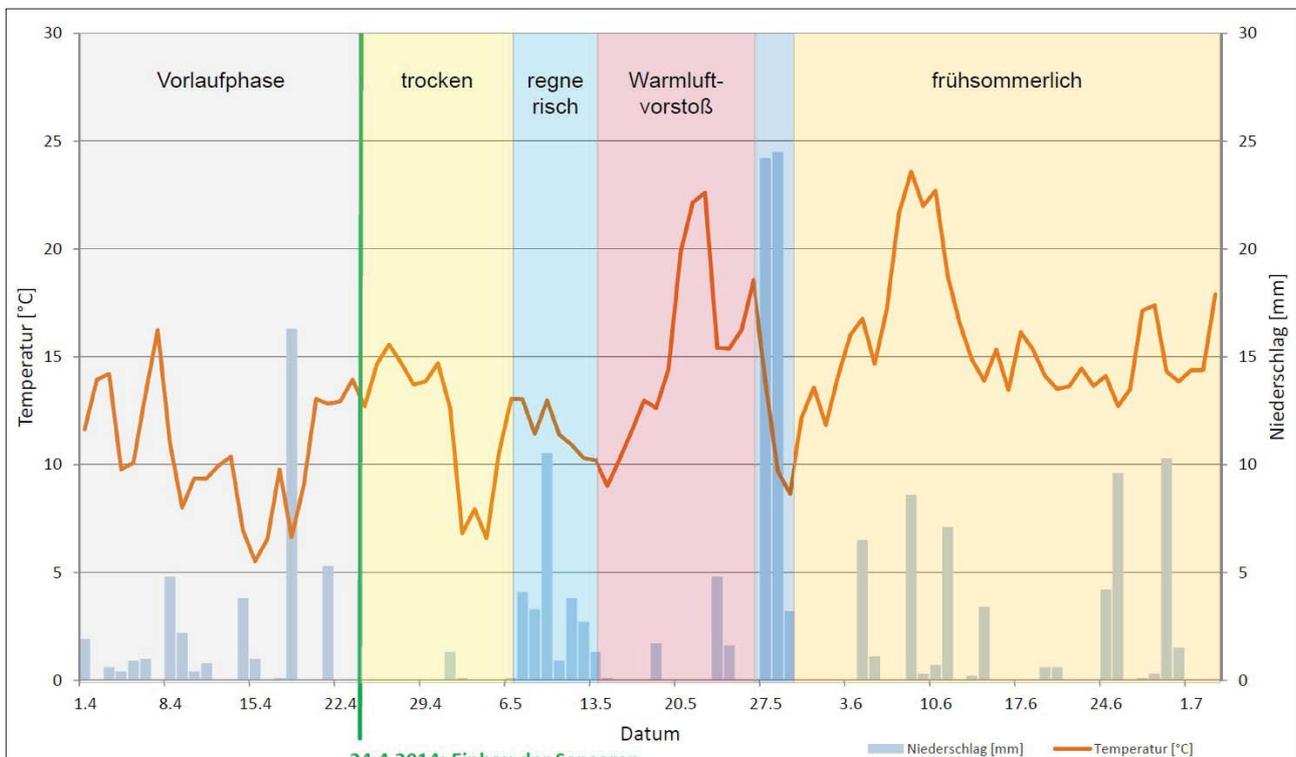


Abbildung 4: Einteilung der Wetterphasen über die Versuchsdauer an Hand der Lufttemperatur und des Niederschlags.

in der Mitte des Messfeldes und war an einer Halterung befestigt. Die Logger wurden wöchentlich ausgelesen. Während der Untersuchungsperiode wurde darauf geachtet, dass die Brachfläche vollständig vegetationsfrei blieb. Die wenigen vereinzelt trotz Herbizideinsatz keimenden Pflanzen wurden von Hand entfernt. Die Höhe des Weizens wurde zu drei Terminen mit einem Zollstock gemessen. Die Messung wurde am 3. Juli 2014 beendet. Beim Ausbau der Sensoren wurden Stechzylinderproben (100 cm³) in unmittelbarer Nähe der Wassergehaltssensoren zur Bestimmung von Referenzwassergehalten genommen. Es wurden die Tiefen 12,5 cm und 25,0 cm jeweils für Brache und Weizen beprobt. An den Stechzylindern wurden der volumetrische Wassergehalt und die Lagerungsdichte bestimmt.

Für die Bestimmung bodenhydraulischer Parameter im Labor wurden weiterhin am Einbautag aus den Untersuchungshorizonten 12,5 cm und 25 cm je drei Stechzylinder (250 cm³) ungestörter Bodenproben entnommen. An diesen Proben wurden die gesättigte Leitfähigkeit sowie die ungesättigten bodenhydraulischen Eigenschaften mit dem KSAT- und dem HYPROP-System der Fa. UMS bestimmt.

Datenverarbeitung, Bildung von Ensemblemeans, und Offsetberechnung

Die Daten aller Sensoren wurden mit einem Messintervall von 30 Minuten über einen Zeitraum vom 23. April 2014 bis 3. Juli 2014 aufgezeichnet. Aus den Rohdaten wurden

zunächst einzelne Nullwerte eliminiert, die auf kurzzeitige Aussetzer des Datenloggers zurückzuführen waren. Im zweiten Schritt wurden durch Sichtung der einzelnen Datenreihen für individuelle Sensoren offensichtliche Ausfälle oder einzelne Ausreißer eliminiert. Im dritten Schritt wurden für alle vier Kompartimente (B12, B25, W12, W25) Ensemble-Mittelwerte der Tensionsreihen und der Wassergehaltsreihen gebildet. Hierzu wurden alle Sensoren simultan gegen die Zeit aufgetragen und geprüft, ob ein einzelner Sensor insgesamt oder über begrenzte Zeiträume so deutlich von der Majorität der Sensoren abweicht, dass seine Berücksichtigung den Mittelwert deutlich verzerren würde. Diese „Ausreißerbereinigung“ wurde nicht mit Hilfe statistischer Ausreißertests durchgeführt. Im finalen Schritt wurde bei den Wassergehalten eine individuelle Offsetkorrektur vorgenommen, in dem alle Sensoren durch eine Linearverschiebung auf den selben Ensemblemittelwert gebracht wurden. Zur weiteren Datenverarbeitung und für Visualisierungen wurden die Werte auf Vierteltageswerte sowie auf Tagesmittelwerte aggregiert.

Ergebnisse und Diskussion

Wetter

Die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) aufgezeichneten Temperaturen in der Atmosphäre lagen im Untersuchungs-

zeitraum 23. April 2014 bis 3. Juli 2014 zwischen 5 °C und maximal 24 °C im Tagesmittel. Insgesamt wurden während der Messkampagne 143 mm Niederschlag gemessen. Davon fielen 36 % (52 mm) während eines dreitägigen Regenereignisses Ende Mai. Die akkumulierte Penman-Verdunstung lag bei 285 mm. Daraus ergibt sich für den Untersuchungszeitraum eine klimatische Wasserbilanz von -142 mm. In der Vorlaufzeit vom 1. April bis zum Einbau am 23. April war nur eine geringe Niederschlagsmenge angefallen. Es lagen somit optimale Einbaubedingungen und saisontypische Anfangsbedingungen für die Messkampagne vor.

Die Messperiode wurde anhand der Temperaturverläufe und Niederschlagsereignisse in fünf Wetterphasen aufgeteilt (*Abbildung 4*). Die Messkampagne begann mit einer trockenen Nordostlage über Mitteleuropa. Die trockene Wetterphase wurde von einer siebentägigen regenreichen Periode mit 27 mm Niederschlag und absinkenden Temperaturen abgelöst. Ein Hochdruckgebiet leitete anschließend einen Warmluftvorstoß ein. In der Zeit vom 14. bis zum 26. Mai stiegen die durchschnittlichen Tagestemperaturen auf bis zu 22,6 °C an. Die Phase Warmluftvorstoß wurde am 26. Mai durch einen Kälterückfall abgelöst. Mit dem Temperaturrückgang ging ein ausgesprochen intensives und ergiebiges Regenereignis einher. Innerhalb von 45 Stunden fielen 52 mm Niederschlag, die Tagestemperaturen fielen ab auf 9 °C, bei vernachlässigbarer ET. In der letzten Phase herrschten durchschnittliche fröhsummerliche Bedingungen

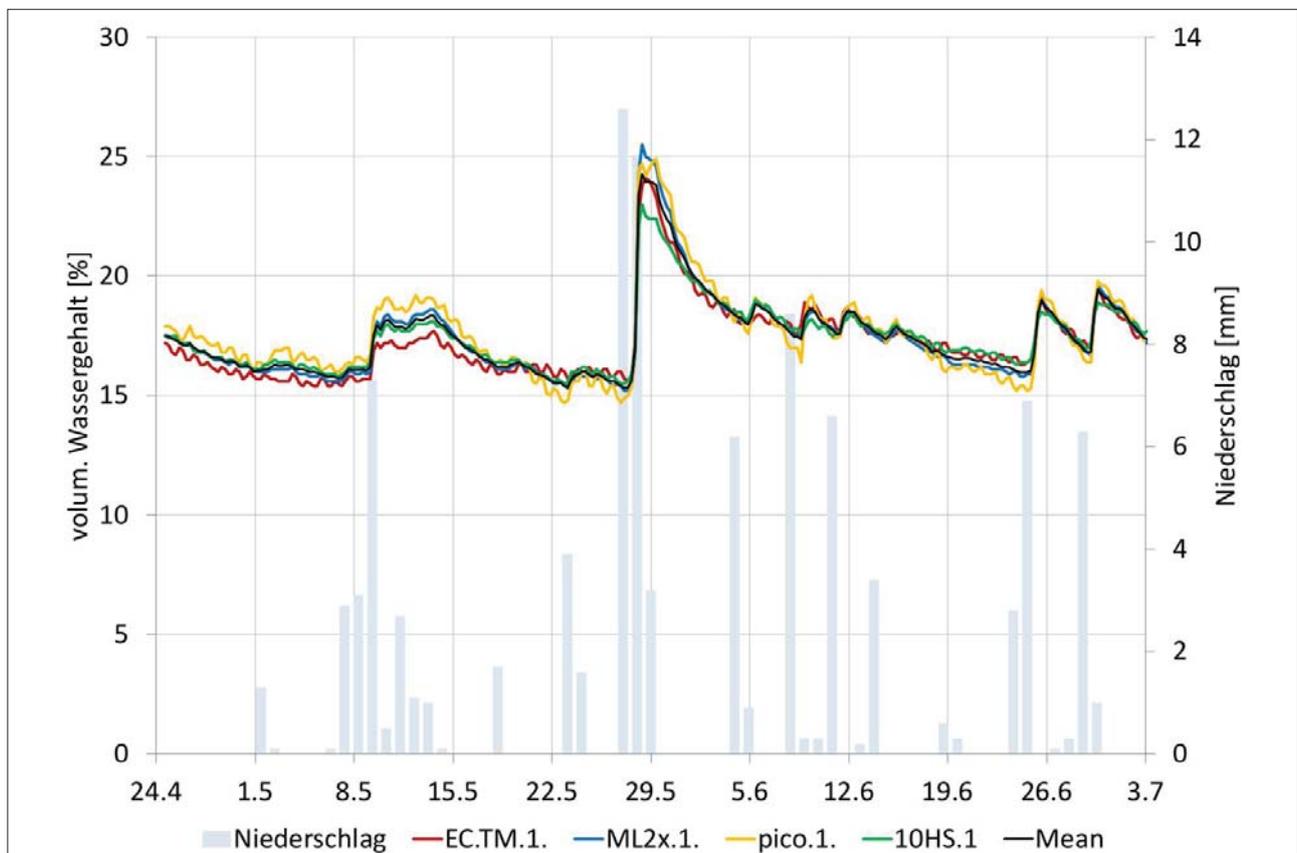


Abbildung 5: Offsetting korrigierte Verläufe der Wassergehaltssensoren unter Weizen in 12,5 cm Tiefe sowie daraus gewonnenes Ensemblemean. Zeitliche Auflösung der gezeigten Daten ist 6 Stunden. Die Werte des Sensors EC5 fehlen an dieser Lokation wegen Sensorausfall.



Abbildung 6: Offsets der Wassergehaltssensoren gegenüber den Ensemblemeans. Positive Abweichung bedeutet, dass der Sensor höhere Werte anzeigt als das Ensemble. Die Farben kennzeichnen die Brache (braun) und Weizen(grün) in den Tiefen 12,5 cm (hell) und 25 cm (dunkel).

Tabelle 1: Vergleich der Wassergehalte der Sensoren mit den benachbart genommenen Stechzylinderproben. EC5 in Brache 12,5 cm und Pico in Brache 25,0 cm waren am 03.07. bereits ausgefallen und konnten daher in dem Vergleich nicht berücksichtigt werden.

Typ	Sensor	$\theta_{v(\text{Stech})}$ [%]	θ_{v^*} [%]	$\theta_{v(\text{Stech})} - \theta_{v^*}$ [%]
Brache 12,5 cm	10HS	19,9 ± 0,8	26,7	-6,8
	ML2X	18,5 ± 0,7	21,7	-3,2
	Pico	18,8 ± 0,8	17,4	1,4
	TM5	19,0 ± 0,8	17,0	2,0
Brache 25,0 cm	10HS	18,6 ± 0,7	26,5	-7,9
	EC5	20,8 ± 0,8	20,6	0,2
	ML2X	19,8 ± 0,8	19,4	0,4
	TM5	19,4 ± 0,8	22,0	-2,6
Weizen 12,5 cm	10HS	11,9 ± 0,5	20,0	-8,1
	EC5	13,3 ± 0,5	13,3	0,0
	ML2X	12,1 ± 0,5	13,3	-1,2
	Pico	12,5 ± 0,5	10,5	2,0
	TM5	12,2 ± 0,5	13,9	-1,7
Weizen 25,0 cm	10HS	10,4 ± 0,4	15,2	-4,8
	EC5	10,7 ± 0,4	9,2	1,5
	ML2X	10,4 ± 0,4	10,8	-0,4
	Pico	12,4 ± 0,5	9,2	3,2
	TM5	8,6 ± 0,3	10,5	-1,9

vor, mit einer Niederschlagssumme von 55 mm und einer Verdunstungssumme von 172 mm. Die daraus resultierende Niederschlagsbilanz von -117 mm repräsentiert qualitativ die Gesamtbilanz der Messperiode.

Wassergehalte – Sensorvergleich

Für die Wassergehaltsmessungen zeigte sich, dass die Sensoren trotz sehr homogener Bodenverhältnisse beträchtliche Unterschiede in Hinblick auf die Absolutwerte anzeigten. Schwankungen der Wassergehalte wurden dagegen von allen Sensoren sehr ähnlich erfasst. Dies wird beispielhaft verdeutlicht in *Abbildung 5*, wo die offsetkorrigierten Verläufe der Sensoren in 12,5 cm unter Brache (B12) gezeigt werden.

In Hinblick auf die individuellen Wassergehaltssensoren fanden wir keine generellen Abweichungstrends gegenüber dem Ensemblemittel, mit einer signifikanten Ausnahme: die 10HS-Sensoren zeigten in allen Fällen gegenüber dem Ensemble höhere Wassergehalte an. Die Offsets sind in *Abbildung 6* dargestellt, sie betragen zwischen 6 und 8 % volumetrischer Wassergehalt. Da alle vier 10HS-Sensoren dieselbe Richtung des Offsets anzeigten, kann lokale Variabilität oder Zufall als Ursache mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Diese Hypothese wird erhärtet durch den Vergleich mit den Wassergehalten am Ende der Messperiode (03.07.14 um 8:30 Uhr) entnommenen Stechzylinderproben (*Tabelle 1*). Die Differenzen zwischen den Stechzylindern und den sensorbestimmten Wassergehalten variieren maximal zwischen -2,6 Vol-% (TM5, Brache 25,0 cm) und +3,2 Vol-% (Pico, Weizen 25,0 cm). Nur die Wassergehaltsunterschiede zwischen den 10HS-Sensoren und Stechzylindern sind sehr groß und systematisch gerichtet (-4,8 Vol-% bis -8,1 Vol-%) und bestätigen damit den Eindruck der Auswertung der Zeitreihen. Im Mittel wiesen die low cost-Sensoren EC5 die geringste und die ML2x-Sensoren die zweitkleinste Differenz zu den Stechzylinderwerten auf. Aufgrund der kleinen Anzahl von nur vier Messungen sind diese Werte allerdings nicht statistisch belastbar.

Wassergehalte – Zeitlicher Verlauf unter Brache und unter Weizen

Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Ensemblemittelwerte für die beiden Einbautiefen und die Seiten B und W. Die Verläufe entsprechen weitgehend den Erwartungen: Die Wassergehalte in 12,5 cm Tiefe sind anfänglich unter Brache und unter Weizen kaum zu unterscheiden, ihre Austrocknung in der ersten Schönwetterperiode erfolgt in vergleichbarem Maße, da die Weizenpflänzchen noch sehr klein sind und nicht bis in die Sensortiefe wurzeln. Auf die erste Regenperiode reagieren beide Seiten ähnlich, wobei der Wassergehaltsanstieg unter Weizen eine Spur stärker ausfällt. Mit zunehmender Vegetationsentwicklung setzt eine systematische Differenzierung ein, der Warmluftvorstoß in der zweiten Maihälfte bewirkt eine wesentlich stärkere Wasserentnahme unter Weizen im Vergleich zur Brache. Die oberen Sensoren zeigen bereits bei kleinen Regenereignissen (z.B. um den 08.05.) eine größere Wassergehaltsänderung, während die unteren Sensoren dieses nicht tun. Am Ende einer Austrocknungsperiode ist der Wassergehalt in 25,0 cm Tiefe deutlich höher als in 12,5 cm Tiefe und unter Brache insgesamt höher als unter Vegetation. Bemerkenswert erscheint insbesondere der sehr geringe Wassergehaltsabfall unter Brache in 25 cm, während der Wassergehalt unter Weizen 25 cm stark abfällt. Auf den Starkregen reagieren beide Bereiche mit schnellen und starken Anstiegen. *Abbildung 8* zeigt diesen Ausschnitt in höherer zeitlicher Auflösung, mit stündlichen Daten. Der Wassergehalt B12 (+ 9 Vol-%) nimmt früher zu als in W12 (+15 Vol-%), was vermutlich auf Interzeption im Weizenbestand (Höhe etwa 55 cm) zurückzuführen ist. Die Wassergehalte in 25 cm Tiefe steigen erst zeitverzögert an. Insgesamt reagieren die Sensoren unter Vegetation stärker sowohl auf Niederschläge als auch auf Austrocknung.

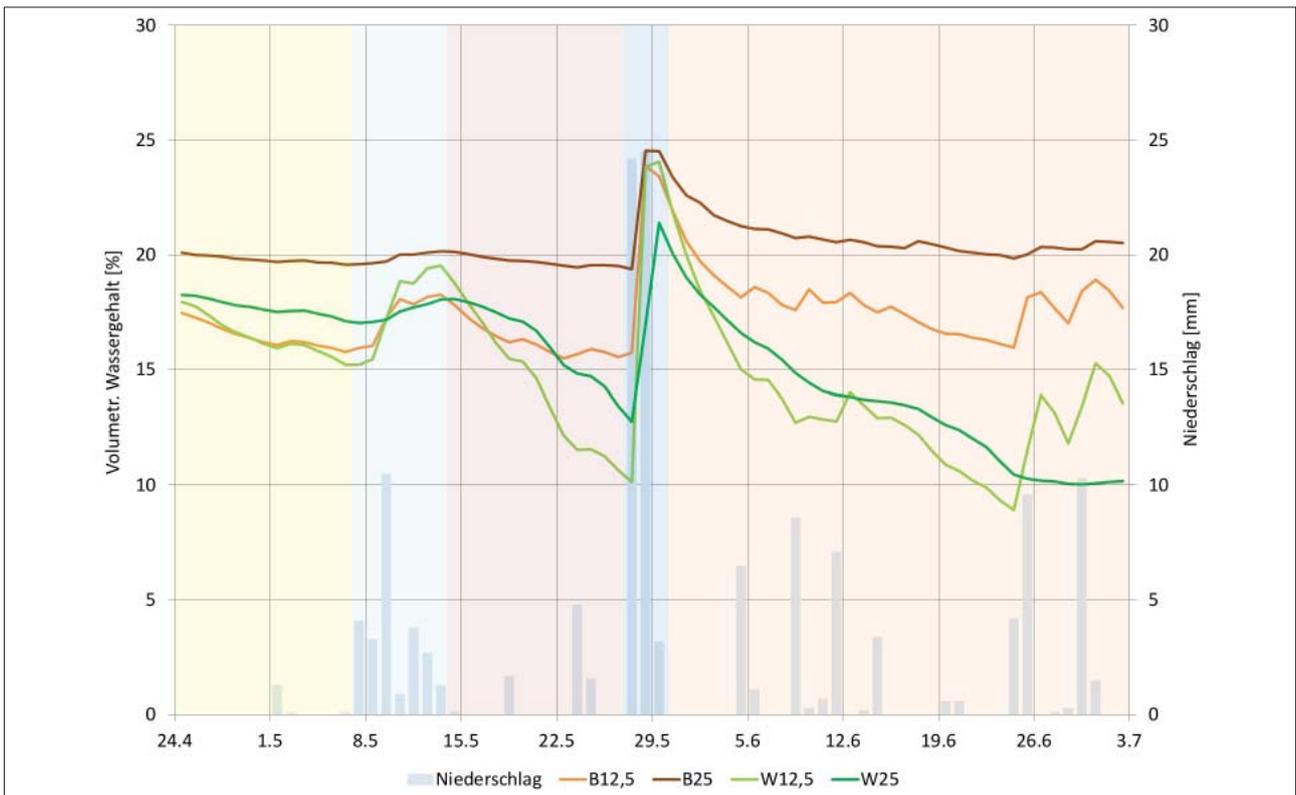


Abbildung 7: Verlauf der mittleren volumetrischen Wassergehalte unter Brache (B) und Weizen (W) in den Tiefen 12,5 cm und 25,0 cm über den gesamten Zeitraum der Messkampagne. Gezeigt sind Tagesmittelwerte des Ensemblemeans. Im Hintergrund markiert sind die verschiedenen Wetterphasen (Abbildung 1).

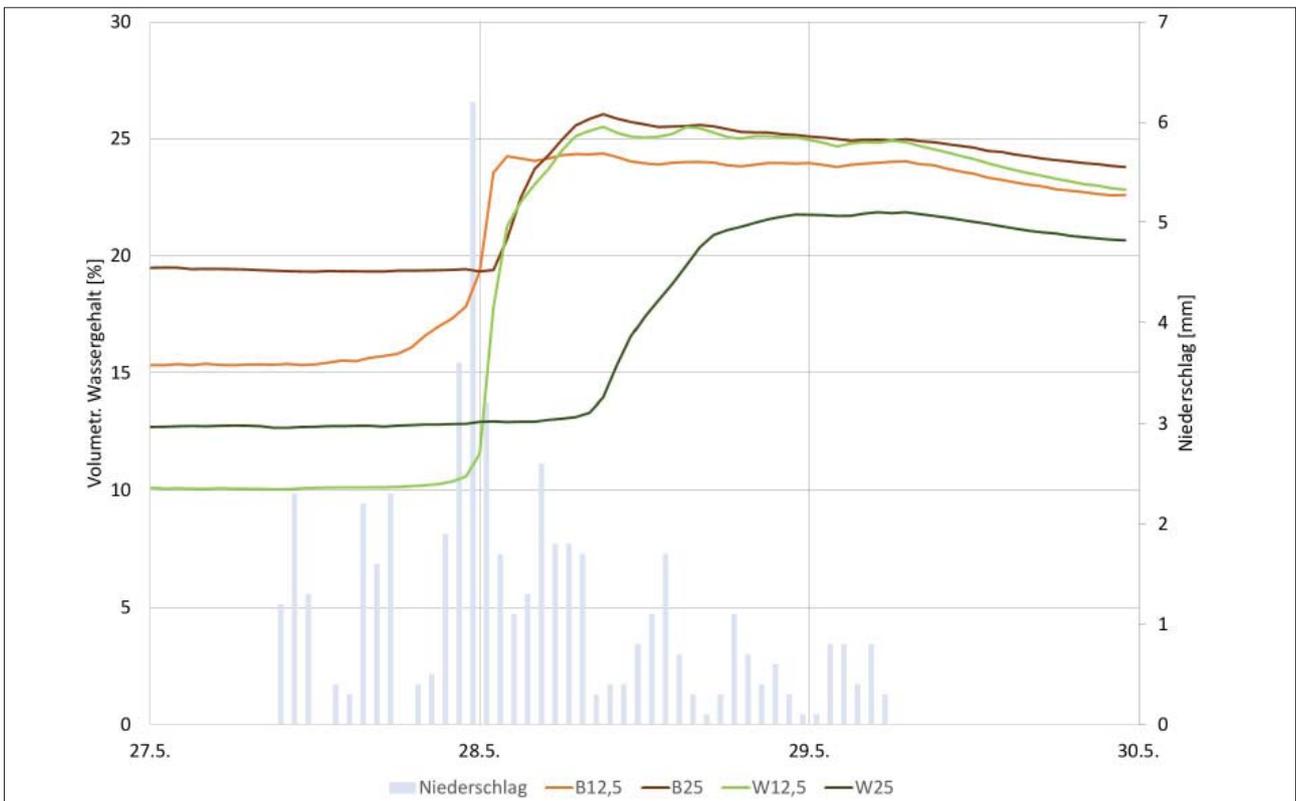


Abbildung 8: Verlauf des mittleren volumetrischen Wassergehalts unter Brache (B) und Weizen (W) in den Tiefen 12,5 cm und 25,0 cm über die Zeit des Starkregenereignisses (27.05.-29.05.).

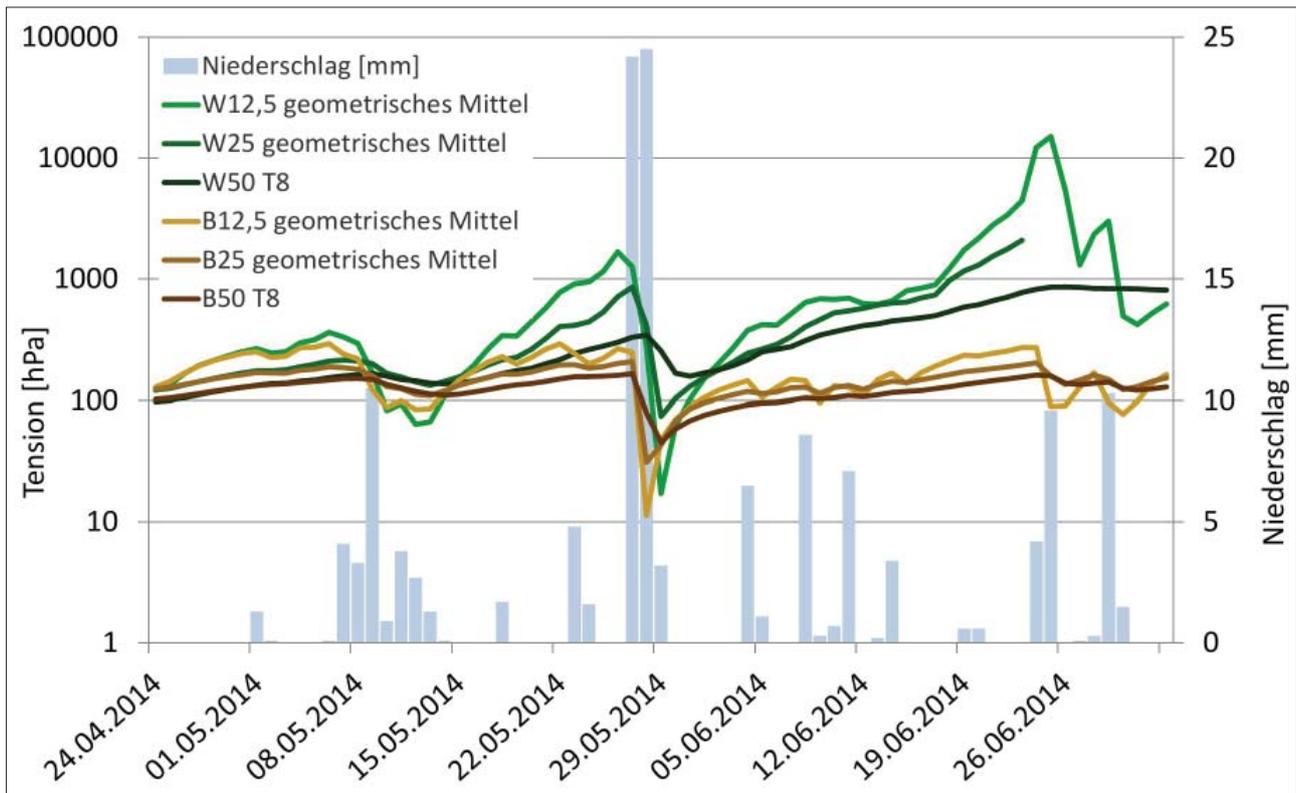


Abbildung 9: Tensionen (ensemblemittelwerte) in 12,5 cm und 25 cm Tiefe sowie die von dem T8 gemessenen Tensionen in 50 cm Tiefe für die Brache und unter Weizen zusammen mit den Niederschlagsereignissen in dem Betrachtungszeitraum 24.04.2014 - 03.07.2014.

Wasserspannungen

Abbildung 9 zeigt die Tagesmittelwerte der Ensemblemeans der Tensionsmessungen. Die Tensionsmessungen reflektieren im Wesentlichen die Wassergehaltsmessungen. Es traten nach einem anfänglich parallelen Verlauf der beiden Varianten zunehmend Unterschiede auf. Die Wasserspannungen erreichten ihre Minimumwerte im Juni, wo in 12 cm unter Weizen Werte bis pF 4.2 auftraten. Dem gegenüber blieb die Austrocknung unter Brache bemerkenswert gering und überstieg zu keiner Zeit pF 2.5.

Auf die sehr interessanten Details und teilweise komplexen Reaktionen der einzelnen Messgeräte kann im Rahmen dieses Beitrages aus Platzgründen leider nicht eingegangen werden. Qualitativ ist festzustellen, dass die Tensionsmessungen weitaus größere Variabilität als Wassergehaltsmessungen und eine größere Empfindlichkeit in Hinblick auf das Auftreten von Ausreißern aufweisen. Hinzu kommt, dass die Streuungen zwischen Parallelmessungen nicht wie bei den Wassergehalten unabhängig vom Messwert sind, sondern mit zunehmender Austrocknung stark zunehmen. Weiterhin ist bei Wasserspannungsmessungen zu berücksichtigen, dass alle verwendeten Sensoren nur in eingeschränkten Wertebereichen valide Signale von sich gaben. Es zeigte sich, dass die validen Messbereiche teilweise drastisch geringer als die in der Bewerbung versprochenen Bereiche ausfielen.

Hydraulische Eigenschaften in situ vs. Labor

Unser experimenteller Ansatz erlaubt einen Vergleich von in situ bestimmten hydraulischen Eigenschaften mit labor-

bestimmten Eigenschaften. Es zeigt sich ein beträchtlicher Unterschied. Die Laborkurven erreichen Wassergehalte von 36 % (12,5 cm) bzw. 40 % (25 cm). Die Werte der Feldmessungen erreichten dagegen zu keiner Zeit – auch nicht nach dem Starkregen – Werte über 25 % (Abbildung 10). Geringere Feldwerte im feuchten Bereich werden nach Lehrbuchwissen qualitativ erwartet. Die Größe des Unterschieds Feld-Labor ist allerdings erheblich. Zur trockenen Seite hin reichen die Feldkurven unter Weizen bis etwa pF 4.2, während sie in der Brache nicht über pF 2.5 hinaus reichen. Dies spiegelt das Austrocknungsverhalten vor Ort wieder. Durchaus dramatisch ist der drastische Unterschied bei der nutzbaren Feldkapazität nFK, die als Wassergehaltsdifferenz zwischen den Werten bei pF 1.8 und pF 4.2 errechnet wird. Die Feldwerte ergeben eine nFK, die um ca. den Faktor 2 geringer ist als die aus Laborproben heraus ermittelte. Die Unterschiede sind nicht auf räumliche Unterschiede, Unsicherheiten der Messungen und räumliche Variabilität zurückzuführen, sondern systematisch bedingt. Die zugrundeliegenden Messungen in dieser Studie sind von höchster belastbarer Güte, wie z.B. durch die Übereinstimmungen der Stechzylindermessungen (Abbildung 11) gezeigt. Über die Prozessursachen für den starken Labor-Feld-Unterschied soll hier nicht spekuliert werden.

Fazit

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Wassergehaltsmessung sich als robust und weitgehend unproblematisch zeigte. Insbesondere können relative Wassergehaltsveränderungen mit allen getesteten Sensoren sehr gut und

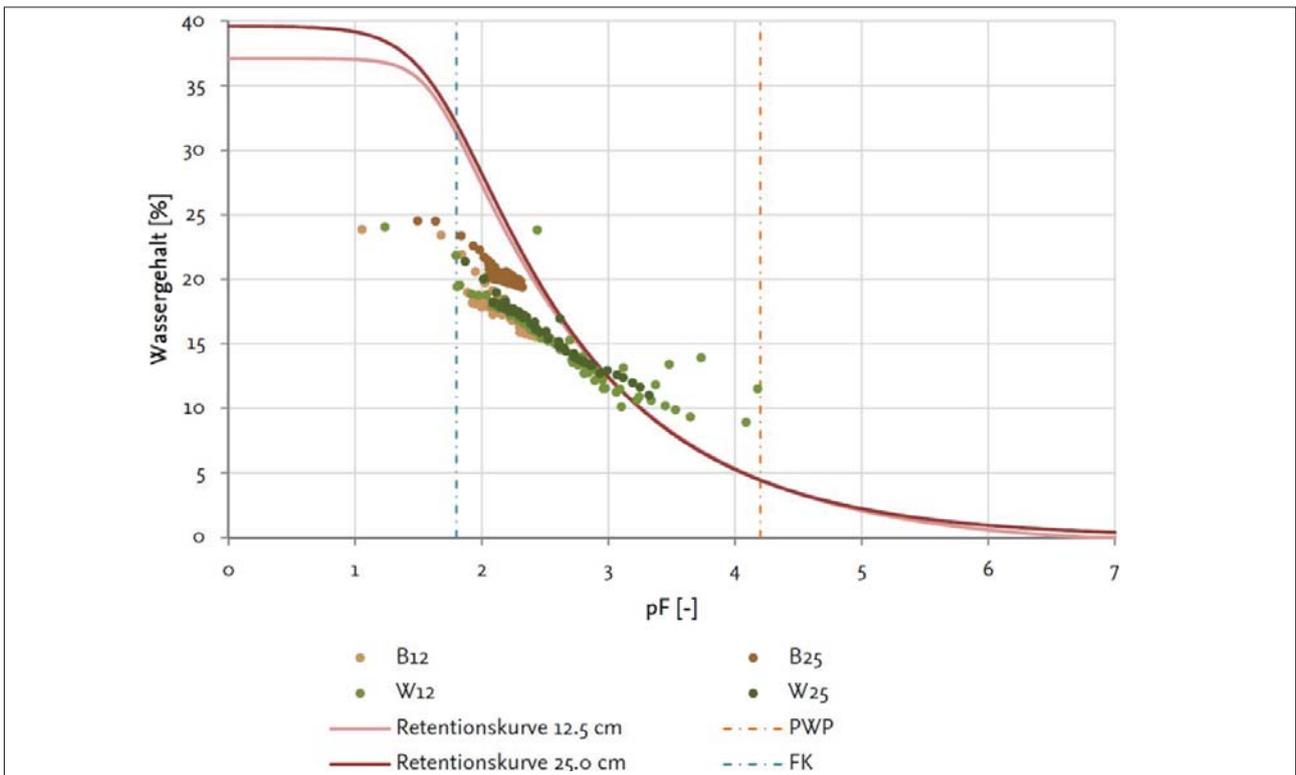


Abbildung 10: Vergleich von in situ und im Labor bestimmten Retentionskurven. Die Punkte zeigen Tagesmittelwerte der Ensemblemeans der Felddaten, die Linien die an Stechzylindern ermittelten Retentionsfunktionen.

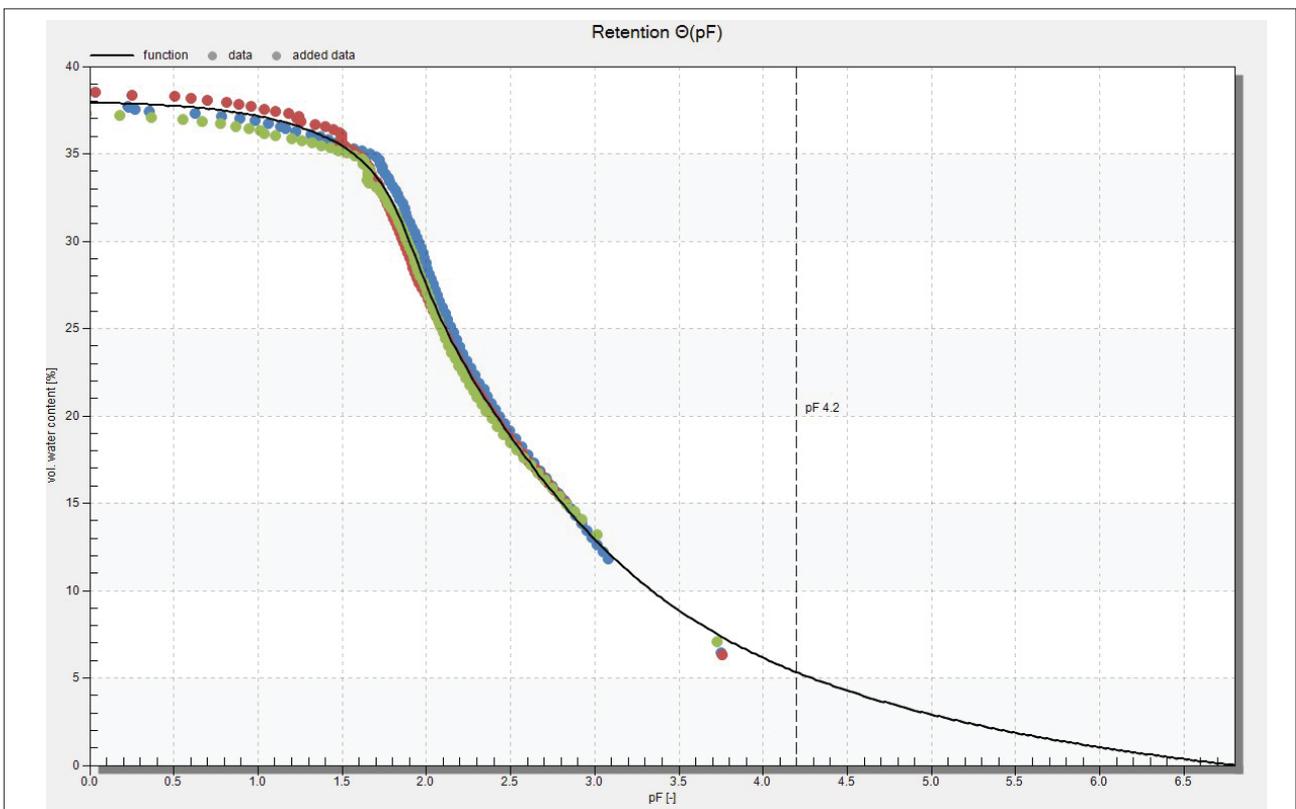


Abbildung 11: Screenshot der HYPROP-Labormessungen der Retentions- und Leitfähigkeitskurven der drei aus 12.5 cm Tiefe entnommenen Proben mit gefitteten hydraulischen Funktionen. Das hier verwendete PDI-Modell (PETERS 2013, IDEN und DURNER 2014) beschreibt die Daten sehr gut.

zuverlässig erfasst werden. Bei der Interpretation einzelner gemessener Werte als Absolutwert ist allerdings Vorsicht geboten: die typischen Abweichungen zum wahren Wert dürften mit einer Variationsbreite von ± 3 % vol. Wassergehalt zutreffend beschrieben sein. Hauptursache dabei ist vermutlich die Problematik eines (nicht erzielbaren) perfekten Einbaus. Warum die 10HS-Sensoren eindeutig zu hohe Wassergehalte anzeigten, ist ungeklärt; der Trend zeige sich in früheren Untersuchungen der Arbeitsgruppe (unveröffentlicht) nicht in der Deutlichkeit. Wasserspannungsmessungen sind bis heute ein kaum vergleichend untersuchtes Feld. Unsere Messungen zeigten, dass im Messbereich bis etwa pF 3 (perfekt befüllte) Tensiometer den indirekten Messsystemen überlegen sind. Auf der anderen Seite fallen Tensiometer aus, wenn der Wasserentzug in einen für Pflanzen interessanten Bereich kommt.

Als besonders interessantes Ergebnis dieser Studie fanden wir drastische Unterschiede zwischen der Bestimmung der nutzbaren Feldkapazität im Labor und im Feld. Die in situ erfasste nFK lag um etwa Faktor zwei niedriger als die übliche Labormessung. Die Abschätzung pflanzennutzbarer Wassermengen dürften deshalb durch Labormessungen stark überschätzt werden.

Dank

Die Arbeiten wurden im Rahmen eines Studentischen Monitoring-Projektes im SS 2014 im Studiengang Geoökologie an der TU Braunschweig durchgeführt. TeilnehmerInnen waren Malena Abmann, Cornelia Bischoff, Lukas Brand, Marius Hobart, Henke Hund, Norman Knabe, Matthias Rauh, Daniela Reineke und Catharina Riggers. Die Studierenden haben einen Großteil der Datenaufbereitungen dieses Beitrags erarbeitet.

Literatur

- SAUERBECK, G., 2005: Standortbeschreibung zur Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft. 71 S. Zugriff auf http://www.soil.tu-bs.de/lehre/Bachelor-Gelaendeuebung/GUE-FAL_Standort_Sauerbeck.pdf.
- IDEN, S.C. and W. DURNER, 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, doi:10.1002/2014WR015937.
- PETERS, A., 2013: Simple consistent models for water retention and hydraulic conductivity in the complete moisture range. *Water Resour. Res.*, 49, 6765–6780, doi:10.1002/wrcr.20548.