

Ringversuch zum Praxisvergleich von 13 Sensor-Typen zur Wassergehalts- und Wasserspannungsbestimmung in Böden

Hella Rosenkranz^{1*}, Wolfgang Durner¹, Wenkui He¹, Christoph Knoblauch²
und Katharina H.E. Meurer³

Zusammenfassung

Die Messung der Bodenfeuchte und Saugspannung ist in unterschiedlichen Forschungsbereichen wie der Hydrologie, Landwirtschaft, Forstwirtschaft oder dem Hoch- und Tiefbau von Bedeutung. Um die Genauigkeit, Zuverlässigkeit und das Ansprechverhalten verschiedener Sensoren unter Praxisbedingungen zu überprüfen, führten wir eine vergleichende Studie mit sechs Sensor-Typen zur Messung der Bodenfeuchte (Decagon 5TM, EC-5, 10HS, Delta-T ThetaProbe, IMKO TrimePico, TRASE TDR) sowie sieben Typen von Saugspannungs-Sensoren (UMS Tensiometer T4, T5, T8, Decagon MPS-1 und MPS-2, UMS SIS) in einem Feldversuch unter natürlichen Wetterbedingungen durch. Unser Ziel war, die Messwerte in Bezug auf Bias, Varianz und Zuverlässigkeit zu charakterisieren. Darüber hinaus waren wir daran interessiert zu sehen, ob eine horizontale oder vertikale Einbauorientierung einen Einfluss auf die Messwerte besitzt. Die Ergebnisse zeigten, dass die meisten der Bodenwassergehalts-Sensoren vergleichbare Ergebnisse erbrachten, und die Problematik weniger im Sensor als in der Einbaumethodik und der natürlichen Variabilität von Böden liegt. Die Orientierung der Sensoren zeigte keine Auswirkung auf die Ergebnisse. Für die Saugspannungs-Sensoren fanden wir signifikante Abweichungen zwischen Sensor-Typen in Hinblick auf Range, Ansprechverhalten und Zuverlässigkeit. Da der Sensorvergleich neben der unvermeidbaren Problematik der räumlichen Variabilität unter dem Problem einer unterschiedlichen Abschattung der Einbaustellen litt, sollte er in einem in Hinblick auf diesen Faktor homogenen Umfeld wiederholt werden.

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

Summary

Field measurements of soil water content and tension is crucial for different areas of research as hydrology, agriculture, forestry, and civil engineering. We conducted a comparative study with six sensor types for measuring the soil water content (Decagon 5TM, Decagon EC-5, DELTA-T ThetaProbe, IMKO TrimePico, Decagon 10HS, TRASE TDR) and seven sensor types for measuring the soil water tension (UMS Tensiometer T4, T5, T8, Decagon MPS-1 and MPS-2, UMS SIS) to verify their accuracy, reliability, and response characteristics in a loamy soil under natural conditions. Our objective was the characterization of the data with regard to bias, variance and reliability as well as the differences due to horizontal and vertical application of the sensors. For the soil water content sensors, we found similar characteristics for most of the sensor types. The orientation of the sensors had no influence. Contrary to that, the soil water tension sensors showed significant deviations between the sensor types in terms of range, responsiveness and reliability. Since the sensor comparison suffered besides the inevitable problem of spatial variability from the problem of a different shading of the sensor's locations, it should be repeated in an environment where this factor is homogeneous.

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

Einleitung

Die Messung der Bodenfeuchte und Saugspannung im ungestörten Boden ist ein wichtiger Aspekt in diversen Forschungsbereichen, wie z.B. Hydrologie, Landwirtschaft, Forstwirtschaft sowie Hoch- und Tiefbau. Der Einsatz von Sensoren hierfür bietet eine kostengünstige Möglichkeit zur Beobachtung des Bodens über eine lange Zeit. Von Interesse sind hierbei gleichermaßen Messtechniken zur Bestimmung

des Bodenwassergehalts und des Bodenwasserpotentials. Die Entwicklung neuer Wassergehaltssensorik auf Basis von TDR (time domain reflectometrie) und FDR (frequency domain reflectometrie) und kapazitiven Messungen, sowie die Entwicklung von Wasserspannungsmesstechnik auf Basis von direkten Messungen des Wasserdrucks (Tensiometer) oder indirekten Messungen, bei denen aus der Wassersättigung eines porösen Körpers im Kontakt mit dem Boden aus dessen Wassergehalt auf die Wasseerspannung geschlossen

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

² Hochschule Rhein-Waal, KLEVE

³ Department Bodenphysik, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, D-06120 HALLE/SAALE

* Ansprechpartner: Hella Rosenkranz, h.rosenkranz@tu-bs.de



wird, hält bis heute an. Die am Markt erhältlichen Sensoren unterscheiden sich in Hinblick auf die Bauform, die Größe des erfassten Volumens, die vorgesehene Standzeit, aber auch in Hinblick auf den Preis. Das Ziel unserer Studie war die vergleichende Charakterisierung einer Anzahl von etablierten Sensoren in Bezug auf Bias, Varianz und Zuverlässigkeit anhand eines Feldversuchs, d.h., unter natürlichen meteorologischen Bedingungen und Variabilität des Untergrunds. Als Nebenaspekt wurde der Einfluss einer horizontalen oder vertikalen Einbauorientierung auf die Messwerte untersucht.

Literaturüberblick

Die Studie ergänzt Untersuchungen, die in der Vergangenheit vorwiegend im Labor vorgenommen wurden. NORIKANE et al. (2005) unternahmen Laboruntersuchungen an verbackenen tonigen Medien, die als Substrat für Pflanzen bei Weltraumfahrten vorgesehen sind, mit der Ech2O-Sonde, einem Vorläufer der hier verwendeten Decagon-Sonden. Sie fanden, dass die Messungen im Vergleich zu gravimetrischen Referenzmessungen gut übereinstimmten, beklagten aber den begrenzten Feuchtebereich der Sonden. KINZLI et al. (2012) untersuchten im Labor und im Feld den EC-20 Sensor von Decagon an sechs Bodentypen. Sie fanden durchschnittliche Fehler bei der Bestimmung des absoluten Wassergehalts von 4.3 % im Feld und 1.2 % im Labor, nach jeweils spezifischer Kalibrierung. Die Benutzung der Werkskalibrierung ergab einen Fehler im Feld von 4.9 %. Die Autoren schlussfolgerten, dass der EC-20 ein verlässlicher, kostengünstiger und genauer Wassergehaltssensor ist, und dass eine spezifische Labor-Kalibrierung für die Nutzung verwendet werden sollte. MITTELBACH et al. (2012) unternahmen eine Feldstudie, in der vier Sensoren, darunter der Decagon 10HS auf ihre Genauigkeit untersucht wurden. In ihrer Studie betonten sie die Problematik, Laborkalibrierungen als Referenz für Feldmessungen zu nehmen, und entschieden sich ihrerseits, Messungen mit dem teuren TDR-basierten TRIME-IT/-EZ (IMKO GmbH, Germany) als Referenz für den Sensorvergleich zu definieren. Sie fanden oberflächennah Abweichungen bis zu 30 % Wassergehalt, und schlossen daraus, dass unter den Untersuchungsbedingungen keiner der kostengünstigen Sensoren eine Genauigkeit erbrachte, die den Spezifikationen der Hersteller entsprachen. Sie erklärten die Ableitung von bodenspezifischen Kalibrierfunktionen als unverzichtbar für eine verlässliche Nutzung der kostengünstigen Sensoren. Ebenfalls in einer Feldstudie verglichen VENTURA et al. (2010) die Decagon-Sonden Ech2O und EC-5 mit einer Campbell TDR-Sonde. Destruktiv ermittelte gravimetrische Wassergehaltsmessungen wurden als Referenzmessung verwendet. Sie fanden, dass nach einer Kalibrierung im Feld alle getesteten Geräte für unterschiedliche Böden akzeptable Messungen ergaben, mit Fehlern für die kapazitiven Sensoren von 2.5 und 3.6 %, und für das TDR-System von 1.6%. VARBLE und CHÁVEZ (2011) untersuchten die Charakteristik von einem Wasserspannungs- und zwei Wassergehaltssensoren, darunter dem Decagon 5-TE, in einer Labor- und Felduntersuchung an Böden verschiedener Textur in Colorado. Sie fanden, dass die Verwendung von Werkskalibrierungen in keinem Fall zur angegebenen

Genauigkeit führte, und dass Salz in der Bodenlösung die Fehler vergrößerte. Sie schrieben „*Furthermore, the performance evaluation tests confirmed that each individual sensor needed a unique calibration equation for every soil type and location in the field*“ und empfahlen eine zwei-Punkt Rekalibrierung im Feld sowie eine zusätzliche Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit. Alternative Wassergehaltssensoren wurden von FENG et al. (2011) und KÖNIGER et al. (2010) untersucht.

Untersuchungen zur Genauigkeit und Verlässlichkeit von Wasserspannungsmessungen sind vergleichsweise selten. Kenntnisse über Tests von Tensiometer liegen uns überhaupt nicht vor. MALAZIAN et al. (2011) testeten den Decagon-Sensor MPS-1 im Labor. Sie fanden eine hohe spezifische Sensitivität der Sensoren zum Wasserspannungssignal, allerdings auch eine erhebliche Sensor-zu-Sensor-Variabilität, und empfahlen deshalb eine sensorspezifische 1-Punkt-Kalibrierung. Als spezifisches Thema wurde die Temperaturempfindlichkeit untersucht, die als vorhanden, aber als uneinheitlich charakterisiert wurde. Anhand von tensiometrischen Referenzmessungen im Feld wurde die Ungenauigkeit von MPS-1-Messungen auf weniger als 10 kPa (or 0.1 bar) im Bereich von 100 bis 600 hPa geschätzt. NOLZ et al. (2013) untersuchten ebenfalls den Decagon MPS-1-Sensor in einer Feldstudie, in der Wasserspannungen im Bereich 100 bis 6000 hPa ausgewertet wurden. Sie fanden, dass aufgrund einer enormen Sensor-zu-Sensor-Variabilität die Werkskalibrierung „nutzlos“ wäre, und eine sensor-spezifische Kalibrierung unerlässlich war. Als vom Aufwand her gangbare Methodik empfahlen sie ebenfalls eine Ein-Punkt-Kalibrierung.

Material und Methoden

Untersuchungsgebiet

Die Studie wurde vom 01.09. bis 31.10.2011 auf dem Gelände einer ökologischen Gärtnerei in Wolfenbüttel im Südosten von Niedersachsen, Deutschland, durchgeführt. Die Untersuchungsfläche wurde im Süden in ca. 10 Meter Entfernung von einer Hecke und im Osten in ca. 20 Meter Entfernung von Bäumen eingesäumt, so dass die Fläche besonders im zweiten Monat zum Teil beschattet wurde. Der Boden des Untersuchungsgebiets ist ein schluffiger Lehm. Er wurde im Sommer des Untersuchungsjahres bis in eine Tiefe von ca. 25 cm mit einer Motorfräse umgebrochen, und lag bis zum Einbau der Messgeräte ca. 2 Monate brach. In dieser Zeit stellt sich eine durch Disteln dominierte schütterere Vegetation ein, welche im Rahmen der Einbauarbeiten der Sensoren manuell entfernt wurde.

Sensoren

Insgesamt 6 Typen von Wassergehalts-Sensoren (Decagon 5TM, Decagon EC-5, DELTA-T ThetaProbe, IMKO TrimePico, Decagon 10HS, TRASE TDR) und 7 Typen von Wasserpotential-Sensoren unterschiedlichen Typs (UMS Tensiometer T4, T5 sowie zwei Typen T8, Decagon MPS-1- und MPS-2, UMS SIS) wurden in jeweils 4 Wiederholungen in einer Tiefe von 20 cm in einer kreisförmigen Anordnung von 5 m Durchmesser platziert. Einen Über-

Tabelle 1: Die Eigenschaften der eingesetzten Sensoren.

Sensor	Hersteller	Messprinzip**	Einheit	Messbereich	T*	
Trase TDR	TRASE	TDR	[%]	0 - 100	-	
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	-	
T4	UMS GmbH	DA	[hPa]	<0 - 750	-	
T5***	UMS GmbH	DA	[hPa]	<0 - 1000	-	
T8	UMS GmbH	DA	[hPa]	<0 - 850	✓	
SIS	UMS GmbH	EPM mit ER	[hPa]	50 - 2000	✓	
MPS-1	Decagon	EPM mit Cap	[hPa]	100 - 5000	-	
MPS-2	Decagon	EPM mit Cap	[hPa]	50 - 5000	✓	

* Temperaturmessung integriert

** TDR = time domain reflectometrie. FDR = frequency domain reflectometry, DA = Elektronischer Druckaufnehmer, EPM mit ER = Equivalent porous medium mit elektrischer Widerstandsmessung. EPM mit Cap = Equivalent porous medium mit kapazitiver Messung.

***Laborgerät; nicht für Freiland Einsatz konzipiert.

blick über die unterschiedlichen Sensoren gibt *Tabelle 1*. Das Funktionsprinzip der Sensoren ist in den jeweiligen Manuals dokumentiert (siehe Abschnitt „Manuals“). Die genaue Anordnung der einzelnen Sensoren kann *Abbildung 1* entnommen werden. Der Sensorring wurde in vier Sektoren (Nord, Ost, Süd, West) mit jeweils der gleichen Sensoranordnung unterteilt. Die MPS und SIS-Sensoren wurden mit Bodenmaterial verklebt und in vorgebohrten

Höhlen eingebracht, alle andern Sensoren befanden sich in passgenauen Bohrungen (Tensiometer und Decagon-Sensoren) oder ohne Vorbohrung (TDR, ThetaProbe) in direktem Kontakt mit dem Bodenmaterial. In den Nord- und Südsektoren wurden die Sensoren horizontal, in den Ost- und Westsektoren vertikal eingebaut. Die Datalogger sowie die weitere technische Ausrüstung wurden in einem Zelt in der Mitte des Kreises aufbewahrt. Im Verlauf der

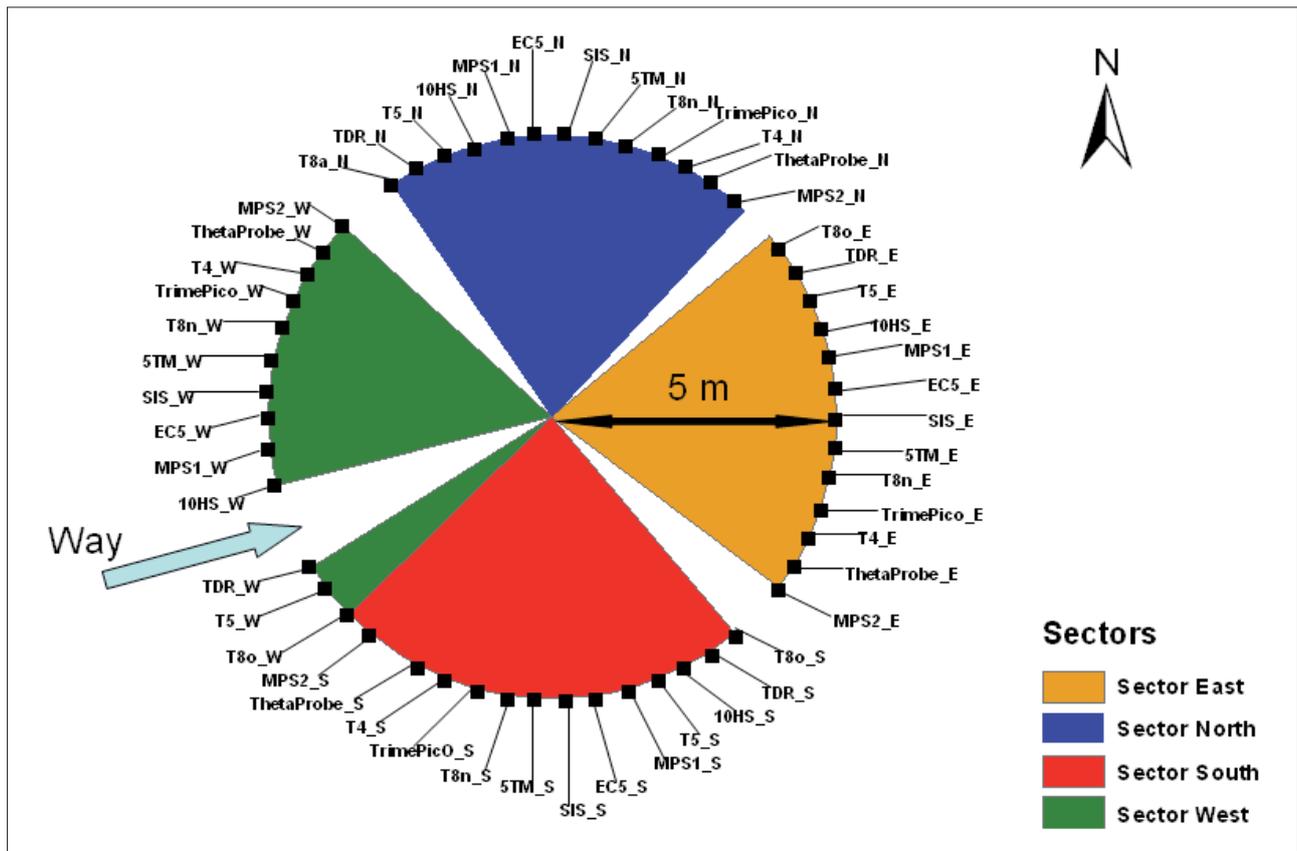


Abbildung 1: Die kreisförmige Anordnung der unterschiedlichen Sensoren und deren Einteilung in die unterschiedlichen Sektoren (Nord, Ost, Süd, West) für die Betrachtung der Messergebnisse.

Untersuchung wurde der tägliche Sonnenstand flacher und es trat dadurch eine Abschattung sowohl durch Bäume als auch durch das Zelt in der Mitte des Sensorrings auf.

Nach Messende wurde neben jedem Sensor eine Probe mit einem Stechzylinder von 100 cm³ Volumen zur Bestimmung des gravimetrischen Wassergehalts genommen. Außerdem wurden alle Sensoren nach Messende in Wasser gestellt zur Messung der Werte bei Wassersättigung. Zur Auswertung wurde für jeden Sektor und zu jedem Messzeitpunkt der Median aller Sensoren für den Bodenwassergehalt bzw. das Wasserpotential berechnet. Dieser Median wurde als bestmögliche Approximation an den unbekanntem „wahren“ mittleren Wert interpretiert.

Wassergehaltssensoren

Die Wassergehaltsmessungen basieren auf der Bestimmung der elektrischen Permittivität. Aufgrund der Unterschiedlichkeit der Permittivität (Dielektrizitätskonstante) von Boden und Luft ist diese ein sensibles Maß für den Bodenwassergehalt. Die TDR-Geräte TRASE und das IMKO-Gerät TRIME Pico 64 beruhen auf Laufzeitmessungen einer elektromagnetischen Welle entlang eines Wellenleiters. Dieser ist beim TRASE 20 cm lang, beim Trime Pico64 ca. 16 cm. Die ThetaProbe von Delta-T Devices Ltd. beruht auf dem FDR-Prinzip, wobei aus der Frequenzveränderung eines Schwingkreises die Kapazität und daraus die Permittivität abgeleitet wird.

Wasserpotentialsensoren

Die T4, T5 und T8 Tensiometer der UMS GmbH messen die Tension im Boden, in dem eine mit Wasser gefüllte Keramik mit dem Bodenwasser ins Gleichgewicht gebracht wird und die Druckübertragung ins wassergefüllte Geräteinnere erfolgt, wo der Innendruck über einen elektronischen Druckaufnehmer registriert wird. Das T5 Tensiometer ist ein Miniatursensor, der normalerweise im Laborbetrieb eingesetzt wird. Von dem T8 Tensiometer wurde eine ältere Serie (T8 alt; Beschaffung 2002) und eine neuere Serie (T8 neu; Beschaffung 2010) verwendet. Der SIS-Sensor der UMS GmbH sowie die beiden MPS-1 und MPS-2-Sensoren von Decagon Devices, Inc. sind Matrixsensoren. Sie bestehen aus einem definierten porösen Medium, in dem sich im Kontakt mit dem Boden ein Wassergehalt einstellt, aus dem über eine gerätespezifische Kalibrierung auf die Wasserspannung rückgeschlossen wird. Der Wassergehalt wird im SIS über die Messung der elektrischen Leitfähigkeit, in den MPS über die Permittivität gemessen. Als Vorteile der Matrixsensoren gelten der wartungsfreie Betrieb und ein Messbereich, der zu höheren Tensionen hin den der Tensiometer übertrifft. Nachteilig ist, dass sich der Porenraum des Sensors je nach Wasserspannung füllen und leeren muss, was je nach Bodenwasserleitfähigkeit und kapillarer Anbindung zeitverzögert und mit Hysterese fehlerhaft stattfindet.

Der Hauptteil der Sensoren wurde Anfang September 2011 eingebaut. Die Installation der horizontal eingebauten Gerä-

te erfolgte von einer kreisförmig angelegten flachen Grube aus nach außen. Die Grube wurde nach Einbau wiederverfüllt. Die neueren T8 Tensiometer im südlichen Sektor wurden erst am 08.09.2011 und die MPS-2 Sensoren erst am 28.09.2011 installiert. Um Variabilität im hydraulischen In-situ-Zustand in der Messtiefe 20 cm aufgrund von Wurzelwasseraufnahme zu minimieren, wurde die Bodenoberfläche oberhalb der Geräte manuell von Unkraut (Disteln!) freigehalten, was jedoch aufgrund der Wartungsintervalle niemals 100%ig gelang. Die Datenaufnahme erfolgte in 30-minütigen Intervallen über einen DT85-Logger, für die DECAGON-Geräte über EM50-Logger, die Daten des TRASE-Gerätes wurden über einen Multiplexer erfasst. Für die Berechnung von Wassergehalten und Wasserspannungen wurden keinerlei bodenspezifische Kalibrierungen vorgenommen, sondern mit den Werkseinstellungen gearbeitet. Nach dem 09.10.2011 sind die MPS-2 Sensoren ausgefallen.

Die übrigen Wassergehaltssensoren im Test beruhen auf dem capacitance Prinzip, bei dem die Zeit bis zur Aufladung eines Sensors mit einer definierten Spannung als Maß für die Permittivität benutzt wird. Der EC-5-Sensor von Decagon Devices, Inc. gilt als temperaturtolerante Low-Cost-Sonde, der ThetaProbe-Sensor gilt als tolerant gegenüber hohen Salzgehalten, der 10HS Sensor erfasst mit ein größeres Bodenvolumen. Nähere Spezifikationen zu den Sensoren sind den Datenblättern der Hersteller zu entnehmen.

Ergebnisse und Diskussion

Wassergehaltsmessungen – Vergleich der Sensoren untereinander

Alle Wassergehaltssensoren zeigten einen grundsätzlich ähnlichen Verlauf, welcher der Witterung folgte. In *Abbildung 2* sind die Mediane der Wassergehalte in jedem Sektor sowie der Niederschlag zu sehen. Die Messwerte für die einzelnen Wassergehaltssensoren in den Sektoren sind in *Abbildung 3* dargestellt. Deutlich ist die schnelle Reaktion auf die Niederschläge um den 10. Tag und den 40. Tag zu erkennen, sowie die Austrocknung zwischen diesen Niederschlägen. Dieser Verlauf wurde grundsätzlich von allen Sensoren abgebildet. Während die Dynamik also von allen Messgeräten vergleichbar erfasst wurde, unterschieden sich die einzelnen Sensoren in der Höhe des absolut gemessenen Wassergehalts. Außerdem reagierte der TDR-Sensor im nördlichen und östlichen Sektor etwas schneller als die übrigen Sensoren auf die Niederschläge. Die Sensoren ThetaProbe, TrimePico sowie TDR lagen signifikant oberhalb des Gesamtmittels (Median aller Sensoren) und die Sensoren 5TM sowie EC5 darunter (*Tabelle 2*). Im östlichen Sektor lagen die Messwerte der Sensoren deutlich näher zusammen als in den anderen Sektoren. Im nördlichen Sektor waren die gemessenen Wassergehalte meist höher als in den anderen Sektoren, was sehr gut anhand des Vergleichs der Mediane in *Abbildung 2* zu erkennen ist, wohingegen die Wassergehalte im westlichen Sektor eher niedriger waren. Insgesamt waren die Mediane jedoch dicht beieinander. Somit kann festgestellt werden, dass der Boden einigermaßen homogen war. Der Unterschied zwischen den Sensoren ist möglicherweise durch die wegen der Abschattung geänderte Wasserdy-

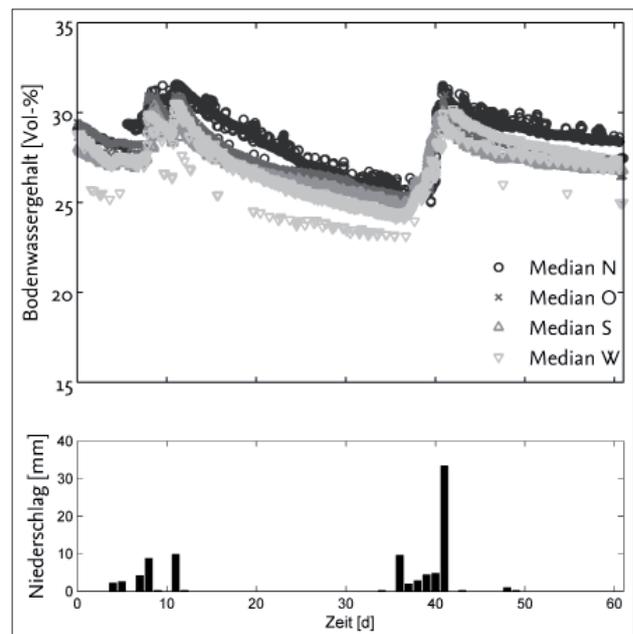


Abbildung 2: Ein Vergleich der Mediane des gemessenen Bodenwassergehalts in den verschiedenen Sektoren untereinander und mit dem Niederschlag.

Tabelle 2: Die mittlere absolute Abweichung (MAD) und die quadrierte mittlere Abweichung vom Median (RMSE) für alle verwendeten Sensoren während der Messperiode. Werte in Prozent volumetrischer Wassergehalt.

Sensor	MAD	RMSE
10HS	-2,14	1,57
5TM	-2,58	1,24
EC-5	-1,42	2,07
ThetaProbe	2,43	1,15
TDR	2,49	1,57
TrimePico64	3,15	1,23

namik erklärbar. So warfen die Bäume und das Zelt in der Sensorringmitte hauptsächlich im nördlichen Sektor Schatten. Der östliche Sektor wurde auch durch Bäume beeinflusst. Der südliche Sektor wurde hingegen durch eine Hecke beeinflusst. Nur der westliche Sektor wurde weder durch Bäume oder Hecken noch das Zelt beeinträchtigt. Weitere Unterschiede zwischen den einzelnen Sensoren könnten auch auf Wurzeln zurückgeführt werden. Da das Untersuchungsgebiet in einer ökologischen Gärtnerei lag, wurden Pflanzen lediglich mechanisch bekämpft. Dieses führte jedoch zu noch vorhandenen Wurzelrückständen im Boden, die weiterhin die Sensoren beeinträchtigen können. Die unterschiedliche Einbauorientierung führte nicht zu Differenzen in den Messergebnissen. Es können also alle Wassergehaltssensoren sowohl horizontal als auch vertikal eingebaut werden.

Bei Einzelbetrachtungen der Sensoren ist auffällig, dass die TRASE TDR-Werte häufig zwischen zwei Werten sprangen. Dies führt im Westsektor dazu, dass auch der Median vereinzelt springt (*Abbildung 2*). Die Gründe hierfür sind momentan unklar, und werden entweder im Auswertungs-

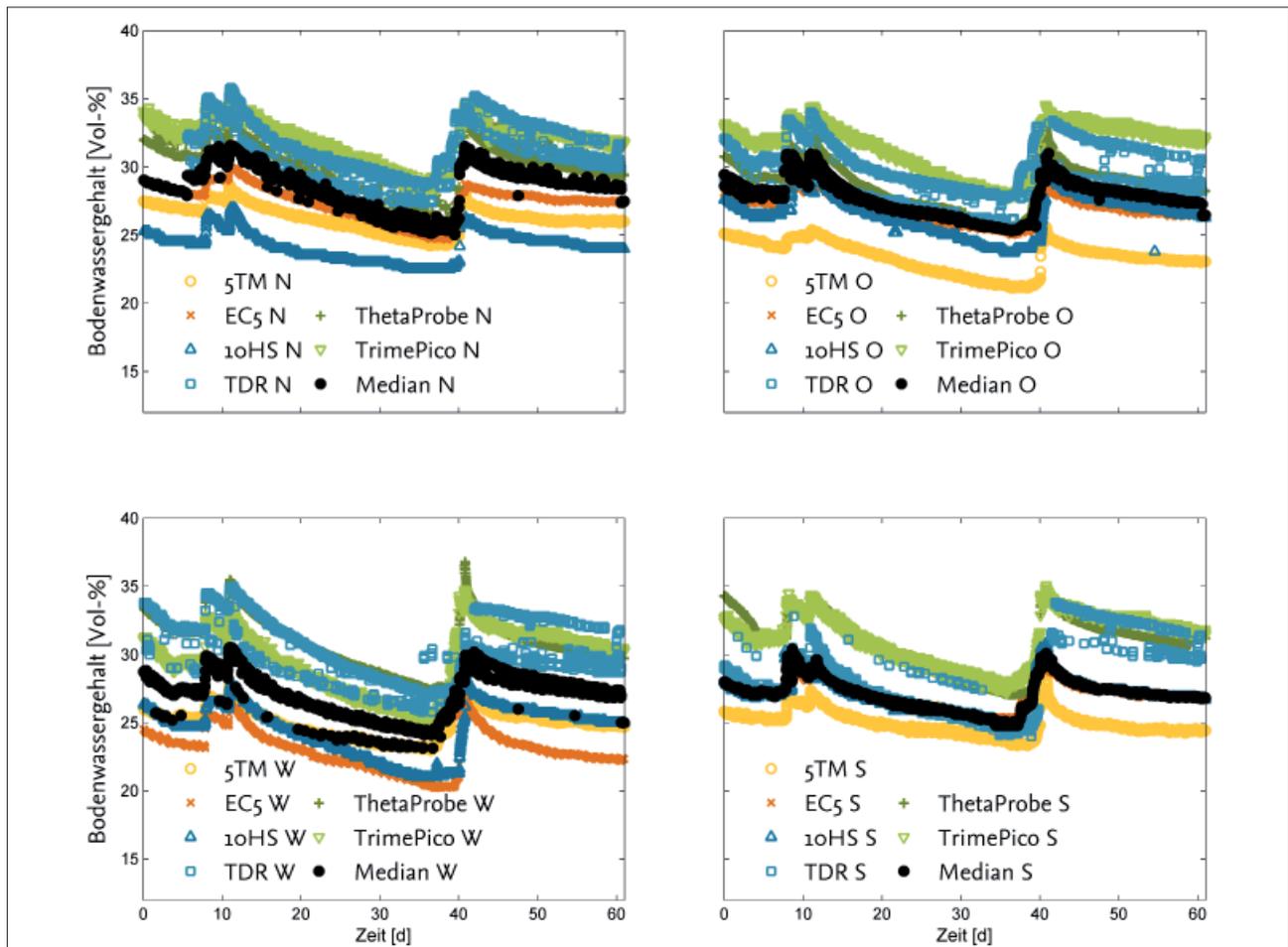


Abbildung 3: Die von den einzelnen Sensoren in den Sektoren gemessenen Bodenwasserhalte sowie der jeweilige Median des Sektors.

algorithmus oder in einem Fehler in der Datenerfassung vermutet.

Wassergehaltsmessungen – Vergleich der Sensoren mit Stechzylinder-Wassergehalten

Tabelle 3 zeigt das Resultat des a posteriori-Vergleichs zwischen Messungen der Sensoren und daneben genommenen Stechzylindern. Es ist auffällig, dass die kapazitiven Sonden im Mittel um weniger als 1,5 % Wassergehalt von der Referenzmessung abweichen, während die TRASE-TDR-Messungen eine mittlere Überschätzung von 1,7%, die ThetaProbe um 2,8%, und das Trime Pico sogar um 5 % anzeigen. Dass die letztgenannten Abweichungen signifikant sind, wird in *Abbildung 4* verdeutlicht. Die während der Feldmessung im Sensorvergleich ermittelte Überschätzung der Wassergehalte durch die TDR-Systeme wird somit durch die a posteriori Messung bestätigt.

Tensionen

Auch für die Tensionen wurde der Median des gesamten Ensembles als beste Approximation an den wahren mittleren Wert berechnet. Die Berechnung war allerdings wesentlich problematischer als für die Wassergehalte, weil unterhalb

von 100 hPa die Sensoren MPS1-1 und MPS-2 eindeutig invalide Werte anzeigten, gegen Ende der Messperiode deshalb viele Messwerte außerhalb des Messbereichs lagen und nicht verwendet werden konnten. Auf der anderen Seite traten während der stärksten Austrocknungsphase einzelne Tensionen über 650 hPa aus, eine Grenze, ab der Tensiometerwerten zunehmend nicht mehr zu trauen ist. Die SIS-Sensoren wurden überhaupt nicht in der Mittelwertbildung berücksichtigt.

Die Mediane der gemessenen Tensionen sind somit primär durch die Tensionenwerte der Tensiometer geprägt. Sie zeigen in den einzelnen Sektoren sowie im Vergleich mit dem gefallen Niederschlag (*Abbildung 5*) allesamt eine präzise Reaktion auf die Witterung. In drei der Sektoren verliefen die Mediane einigermaßen ähnlich. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Sektoren sind wie bei der Wassergehaltsmessung vermutlich durch die wegen Abschattung unterschiedliche Wasserdynamik erklärbar. Im östlichen Sektor zeigte sich während der Austrocknungsperiode vom 13. bis 33. Tag ein geringerer Wasserspannungsanstieg als für die anderen Sektoren. Dieser Sektor sollte deshalb im Direktvergleich ausgeschlossen werden.

Der Vergleich der einzelnen Messreihen zeigt deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Sensortypen (*Abbildung*

Tabelle 3: Die Gegenüberstellung des letzten Messwertes der Wassergehaltssensoren im Feld und der im Labor gemessene Wassergehalt an einer neben dem Sensor genommenen Probe. Alle gezeigten Werte sind absolute volumetrischer Wassergehalte in %.

Sensor	Sektor	Feld	Labor	Differenz	Mittel Feld	Mittel Lab	Differenz	Streuung
10HS	Nord	24.0	27.3	-3.3	25.5	26.7	-1.2	1.6
10HS	Ost	26.3	-	-				
10HS	Süd	26.7	27.6	-0.9				
10HS	West	25.0	25.2	-0.2				
5TM	Nord	26.0	25.5	0.5	24.5	24.9	-0.4	2.4
5TM	Ost	23.0	26.3	-3.3				
5TM	Süd	24.4	25.6	-1.2				
5TM	West	24.7	22.2	2.4				
EC-5	Nord	27.5	28.2	-0.8	25.8	25.7	0.1	2.6
EC-5	Ost	26.5	23.7	2.8				
EC-5	Süd	26.9	25.5	1.4				
EC-5	West	22.3	25.4	-3.1				
TDR	Nord	29.9	26.4	3.5	29.2	27.5	1.7	1.7
TDR	Ost	28.2	28.4	-0.2				
TDR	Süd	29.7	26.9	2.8				
TDR	West	29.0	28.5	0.5				
ThetaProbe	Nord	29.4	29.6	-0.2	29.6	26.8	2.8	2.3
ThetaProbe	Ost	28.3	26.0	2.2				
ThetaProbe	Süd	31.2	26.8	4.4				
ThetaProbe	West	29.7	24.9	4.8				
TrimePico64	Nord	31.8	27.4	4.3	31.4	26.3	5.0	1.7
TrimePico64	Ost	32.0	25.1	6.9				
TrimePico64	Süd	31.4	25.5	6.0				
TrimePico64	West	30.2	27.2	3.0				
Mittelwerte		27.7	26.3	1.4	27.7	26.3	1.3	2.1

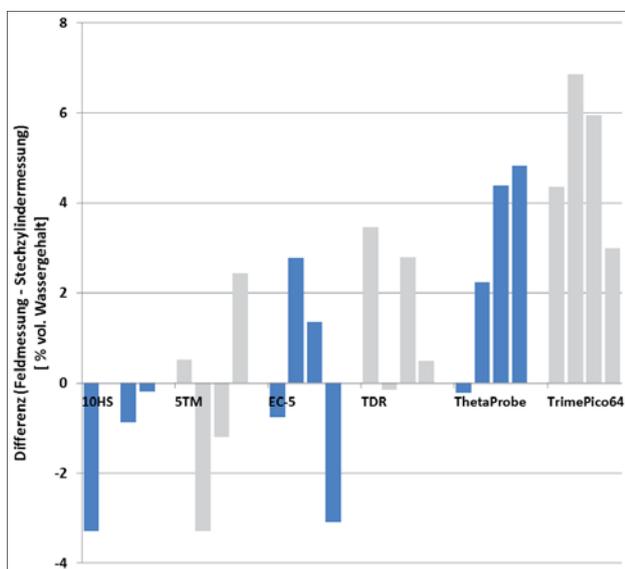


Abbildung 4: Vergleich der am Ende der Messperiode in situ gemessenen Bodenwassergehalte mit daneben entnommenen Stechzylindern-Wassergehalten. Es wurde nach den Sensortypen sortiert. Die vier Balken je Sensor entsprechen den Sektoren Nord-Ost-Süd-West.

6). Eindeutig abweichend vom mittleren Ensemblewert waren die Messwerte aller SIS-Sensoren, die nicht nur stets deutlich unter denen der anderen Sensoren lagen, sondern auch deutlich verzögert auf Austrocknung ansprachen.

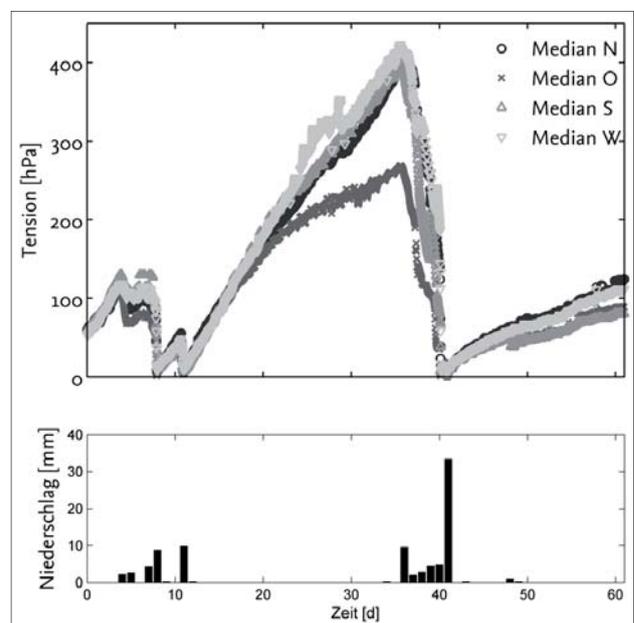


Abbildung 5: Ein Vergleich der Mediane der gemessenen Tensionen in den verschiedenen Sektoren untereinander und mit dem Niederschlag.

Aufgrund eines Fehlers beim Loggen der Daten sind die Messwerte für die SIS-Sensoren im südlichen und westlichen Sektor identisch. Bei den MPS-1 und MPS-2 Sensoren fallen die deutlichen Unterschiede von Sensor zu Sensor

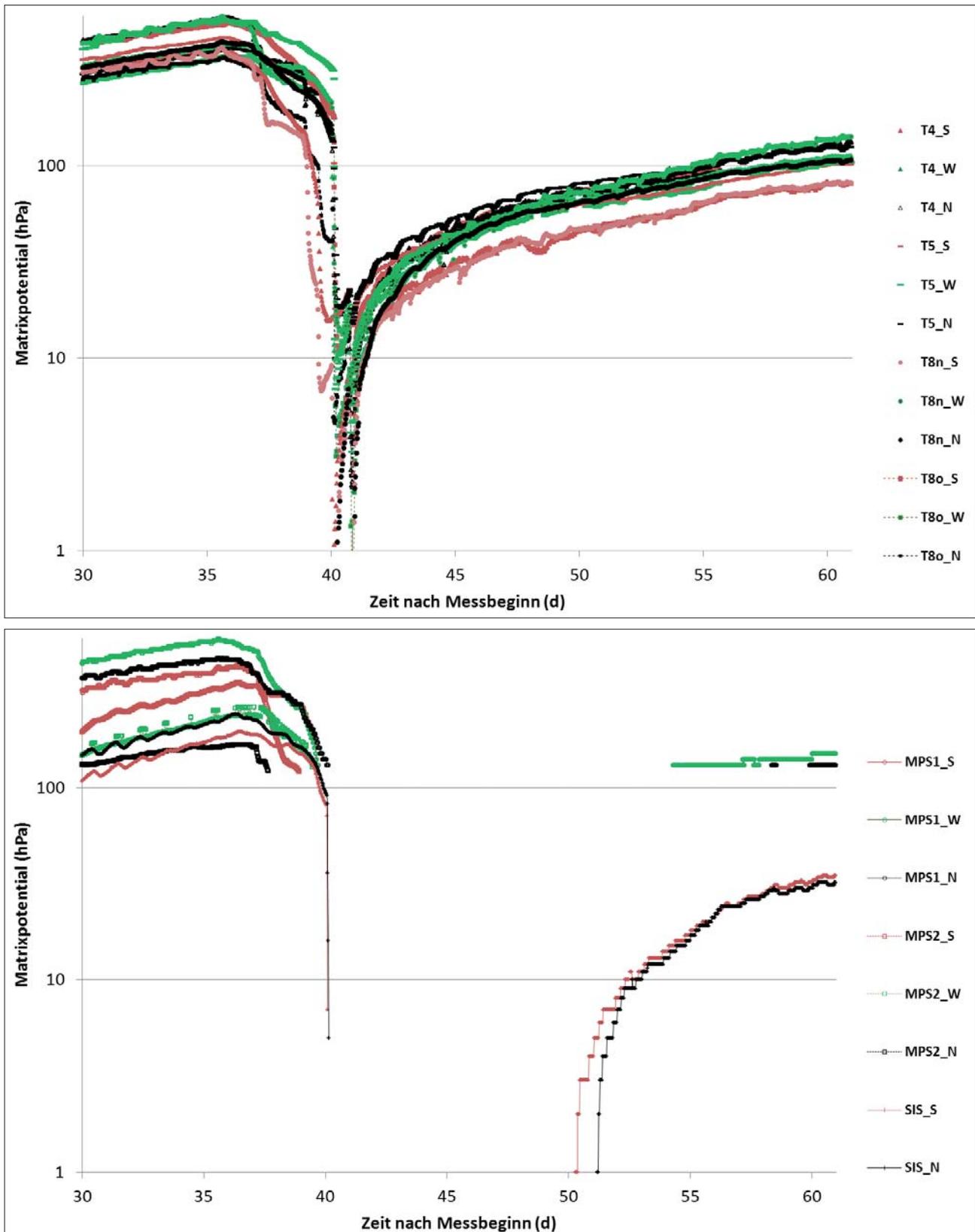


Abbildung 6: Im Oktober gemessene Bodenwasserspannungen mit Tensimetern (oben) und MPS sowie SIS-Sensoren in den drei Sektoren Nord, West und Süd. Man beachte die Log-Skalierung, die einer Auftragung auf der y-Achse von pF 1 bis pF 2,8 entspricht. Sensoren im Südsektor sind rot, im Nordsektor schwarz und im Westsektor grün. Es zeigen sich keine systematische Unterschiede.

Tabelle 4: Die mittlere Abweichung (MAD) und der Betrag der mittleren Abweichung |MAD| vom Median für alle verwendeten Wasserspannungssensoren. Alle Werte in hPa.

Sensor	MAD	MAD
T4	6	13
T5	13	13
T8n	2	11
T8o	0	3
MPS-1	39	40
SIS	-122	122

auf, MPS-1 und MPS-2-Werte im selben Sektor lagen zum Teil deutlich auseinander. Die Tensiometer reagierten am sensitivsten auf auch geringe Änderungen in den atmosphärischen Bedingungen. Sie zeigten ferner deutliche tägliche Schwankungen an, die wir als evaporationsbedingten Anstieg der Tension zur Tagesmitte interpretieren. Artefakte aufgrund eines Temperatureinflusses sind allerdings nicht auszuschließen. Insgesamt lagen die Messwerte der Tensiometer ohne große systematische Abweichungen in einem Band, welches ca. Faktor 2 (etwa 0.3 pF-Einheiten) des Messwertes einnahm und vermutlich die natürliche Variabilität des Messsignals widerspiegelt (*Abbildung 7*). Die T8 Tensiometer lagen für die horizontale Einbauweise näher am Median als für die vertikale Einbauweise. Die Werte der T5-Tensiometer wichen von denen der größeren Feldgeräte in keiner Weise ab.

Tabelle 4 zeigt die mittleren Abweichungen der einzelnen Sensoren vom Gesamtmedian, welche auf Basis der Werte der Sektoren N, W und S errechnet wurden. Es ist erkennbar, dass alle Tensiometer, darunter auch die eigentlich für den Laboreinsatz konzipierten und mit einer sehr kleinen Messspitze ausgestatteten T5 mit systematischen Abweichungen unter 15 hPa sowie mit einer Streuungsbandweite von im Mittel unter 15 hPa recht eng am „wahren“ Signal liegen. Das MPS-1 dagegen liegt systematisch im Mittel um 40 hPa über den Tensiometern, während die SIS eine mittlere Unterschätzung um 120 hPa ergeben. Bei den beiden MPS-Typen waren die Abweichungen interessanterweise in verschiedene Richtungen: Das MPS-1 zeigte höhere Spannungen an, die hier nicht statistisch ausgewerteten MPS-2 Signale dagegen niedrigere.

In-situ Retentionskurve

Der Zusammenhang von den gemessenen Wassergehalten zu den gemessenen Tensionen im Untersuchungszeitraum wird in *Abbildung 7* visualisiert. Hierfür wurde jeweils der Median aus den einzelnen Medianen für die Sektoren berechnet. Somit ist diese Retentionskurve ein Charakteristikum für das gesamte Untersuchungsgebiet. Der höchste Wassergehalt lag bei 30,9 Vol.-%. Die höchste Tension betrug 401,8 hPa. In diesem Tensionsbereich sind die großen Poren im Boden entleert, die mittleren Poren jedoch noch wassergefüllt. Der Boden trocknete niemals wesentlich unter die Feldkapazität ab. Dass die gemessenen Tensionen trotz längerer Austrocknungsphasen von über 20 Tagen nicht höher waren, weist zum einen auf einen Boden mit hohem Wasserhaltevermögen hin, und ist zum anderen der späten

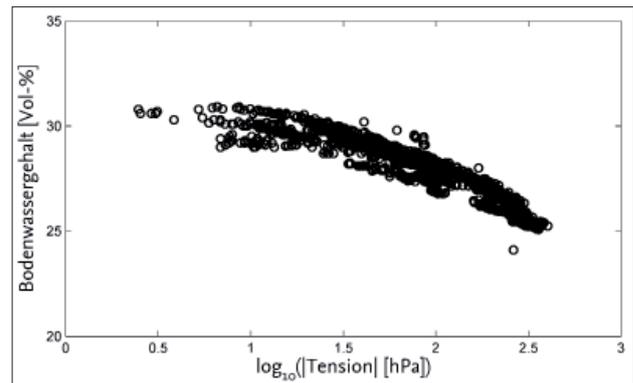


Abbildung 7: Die Beziehung zwischen dem Bodenwassergehalt und der Tension in dem Untersuchungsgebiet über die gesamte Messperiode.

Jahreszeit und der fehlenden Vegetation geschuldet, welche die Austrocknung nur langsam erfolgen ließen.

Schlussfolgerung

Grundsätzlich fanden wir für die Bodenwassergehalts-Sensoren, dass alle verwendeten Sensoren ähnliche Eigenschaften besaßen, mit nur geringen Abweichungen. Alle Sensoren reagierten nach Niederschlägen oder in Trockenzeiten mit hoher Präzision und stellten den gleichen relativen Verlauf dar. Die Orientierung der Sensoren (vertikal vs. horizontal) ergab keine systematische Auswirkung auf die Ergebnisse. Wir fanden keinen signifikanten Unterschied zwischen sogenannten low-cost Sensoren und teuren Systemen. Unsere Studie bestätigt damit die Aussage von VENTURA et al. (2010), dass alle Sensoren auch ohne bodenspezifische Kalibrierung akzeptable Resultate ergeben. Die Einschätzung von WALKER et al. (2004), nach der TDR-Systeme allein verlässliche Daten ergeben, wurde nicht bestätigt. Im Gegenteil zeigten das das gemultiplexte System TRASE TDR und die Trime Pico nicht nur die größten durchschnittlichen Abweichungen sowohl vom Ensemblewert als auch dem Vergleich mit den Stechzylinderwerten, sondern auch am häufigsten Ausreißer oder problematische Messwerte. Möglicherweise hat dies mit einer suboptimalen Konfiguration unserer Datenerfassung zu tun. Es sind aber Zweifel an der Schlussfolgerung von MITTELBACH et al. (2012) angebracht, welche die Trime TDRs als Referenz definierten, und im Vergleich dazu die Güte alternativer Sensoren beurteilten. Für die Saugspannungs-Sensoren fanden wir signifikante Abweichungen zwischen Sensor-Typen, was zeigt, dass hier noch Potential für weitere Entwicklungen besteht. Alle Sensoren reagierten zwar auf Niederschläge und Trockenzeiten. Die SIS-Sensoren taten dies jedoch mit einer erheblichen Verzögerung, die vermutlich durch eine Re-Kalibrierung nicht aufgefangen werden kann. Die MPS-2 Sensoren konnten noch nicht richtig beurteilt werden, da ihr Einbau so spät im Jahr erfolgte, dass der Boden nicht mehr so stark austrocknete, dass der Messbereich erreicht wurde, wo sie ihre Stärken ausspielen. Für das MPS-2 konnte der Anspruch, dass die Sensoren bereits ab 50 hPa verlässliche Daten zeigen, nicht bestätigt werden.

Unsere Studie ist nicht umfassend. Es wurde nicht versucht, feldspezifische Kalibrierungen vorzunehmen. Die im Feld erzielten Ergebnisse müssten durch ergänzende Laboruntersuchungen erklärt und weiter spezifiziert werden. Außerdem wurden im Lauf der Untersuchungen Schwächen des experimentellen Designs deutlich. Das Untersuchungsgebiet war in Teilen durch Abschattung durch Bäume und durch Abschattung aus einem Zelt in der Mitte des Sensor-Rings betroffen. Später im Jahr, als der maximale Sonnenstand flacher war, beeinflusste dies die Wasserdynamik in verschiedenen Sektoren der kreisförmigen Anordnung, was einen direkten 1:1-Vergleich der Sensoren in den verschiedenen Sektoren ausschließt. Ein Sensorenvergleich im Freiland unter natürlichen Bedingungen ist nicht ohne Tücken, und absolut klare Aussagen zu den einzelnen Sensoren sind aufgrund unseres Vergleichs bisher nur schwer zu treffen. Es erscheint ratsam, eine Wiederholung des Freilandexperimentes unter Vermeidung der Schwachstellen der ersten Durchführung erfolgen. Insbesondere die Aspekte Vegetation und Beschattung, sowie eine frühere Installation im Jahr sollten hierbei beachtet werden.

Danksagung

Wir bedanken uns bei Beate Pieper, dass wir ihre Gärtnerei für unsere Messungen nutzen konnten, und bei Ines Andrä und Detlef Duncker für die technische Unterstützung. Besonders danken wir der UMS GmbH sowie Decagon Devices Inc. für die Bereitstellung eines großen Teils der Sensoren.

Manuals

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

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

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

Decagon Devices, Inc. 2008. MPS-2 Dielectric Water Potential Sensor. Operator's Manual, 27 Seiten. http://www.ums-muc.de/fileadmin/produkt_downloads/FD+TDR/MPS-2_Manual.pdf.

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

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

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

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

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

Literatur

FENG, L., Y. WANG, W. YANG and Q. SHI, 2011: Comparison of Standing Wave Ratio, Time Domain Reflectometry and gravimetric method for soil moisture measurements. *Sensor Letters* 9 (3) , pp. 1140-1143.

KINZLI, K., N. MANANA and R. OAD, 2012: Comparison of Laboratory and Field Calibration of a Soil-Moisture Capacitance Probe for Various Soils, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 138 (4), pp. 310-321.

KÖNIGER, F., G. SCHMITT, R. SCHUHMAN and C. KOTTMEIER, 2010: 'Free Line Sensing', a new method for soil moisture measurements using high-voltage power lines, *Near Surface Geophysics* 8 (2), pp. 151-161.

MALAZIAN, A., P. HARTSOUGH, T. KAMAI, G.S. CAMPBELL, D.R. COBOS and J.W. HOPMANS, 2011: Evaluation of MPS-1 soil water potential sensor. *Journal of Hydrology* 402, 126-134

MITTELBACH, H., I. LEHNER and S.I. SENEVIRATNE, 2012: Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland, *Journal of Hydrology* 430-431, pp. 39-49.

NOLZ, R., G. KAMMERER and P. CEPUDER, 2013: Calibrating soil water potential sensors integrated into a wireless monitoring Network. *Agricultural Water Management* 116, 12-20.

NORIKANE, J.H., J.J. PRENGER, D.T. ROUZAN-WHELDON and H.G. LEVINE, 2005: A comparison of soil moisture sensors for space flight applications, *Applied Engineering in Agriculture* 21, 211-216.

TOPP, G.C., J.L. DAVIS and A.P. ANNAN, 1980: Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 16, 574-81.

VARBLE, J.L. and J.L. CHÁVEZ, 2011: Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. *Agricultural Water Management* 101, 93-106.

VENTURA, F., F. OSVALDO, P. STEFANO and R.P. PAOLA, 2010: Soil moisture measurements: Comparison of instrumentation performances. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136 (2), pp. 81-89.

WALKER, J.P., G.R. WILLGOOSE and J.D. KALMA, 2004: In situ measurement of soil moisture: A comparison of techniques. *Journal of Hydrology*, 293 (1-4), pp. 85-99.