

Evaluierung bestehender Messsensoren zur Ermittlung des Matrixpotenzials in Böden



Max-Planck-Institut
für Biogeochemie



DIPLOMARBEIT

Sebastian Gimper

Mat.Nr.: 430545

geboren am 14.04.1982

Mentor: PD Dr. Gerd Gleixner

Hochschulbetreuer: Prof. Dr. Bernd Rudolph

zur Erlangung des Grades eines Diplom-Ingenieurs

FÜR UMWELTTECHNIK

des Fachbereichs SciTec - Präzision - Optik - Materialien - Umwelt
der Fachhochschule Jena, University of Applied Sciences

vorgelegt im März 2010

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung und Problemstellung | 4 |
| 2 | Grundlagen | 7 |
| 2.1 | Bodenwasser | 7 |
| 2.1.1 | Bindungsformen des Bodenwassers | 8 |
| 2.1.2 | Potenzialkonzept | 9 |
| 2.1.3 | pF-WG-Kurve | 10 |
| 2.2 | Verfahren zur Messung der Bodenfeuchte | 12 |
| 2.2.1 | Direkte Messverfahren | 12 |
| 2.2.2 | Indirekte Messverfahren | 12 |
| 2.3 | Sensoren zur Messung der Bodenfeuchte | 16 |
| 2.3.1 | Matrixpotenzialsensoren | 17 |
| 2.3.2 | Volumetrische Wassergehaltssensoren | 19 |
| 2.4 | Prüfverfahren für Bodenfeuchtesensoren | 22 |
| 2.4.1 | Freilandmessung | 22 |
| 2.4.2 | Normschaffende Charakterisierung von Wassergehaltssensoren | 23 |
| 2.4.3 | Laborprüfstände | 23 |
| 2.5 | Pedotransferfunktion | 24 |
| 2.6 | Kriterien zur Beurteilung einer Messung | 25 |
| 3 | Material und Methoden | 27 |
| 3.1 | Feldversuch | 27 |
| 3.1.1 | Standortbeschreibung und Messtechnik | 27 |
| 3.1.2 | Messtechnik | 28 |
| 3.2 | Normschaffende Charakterisierung von Wassergehaltssensoren | 29 |
| 3.3 | Sensorprüfstand | 33 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4 | Ergebnisse und Diskussion | 36 |
| 4.1 | Sensorvergleich im Freiland | 36 |
| 4.1.1 | Matrixpotenzialsensoren | 36 |
| 4.1.2 | Wassergehaltssensoren | 39 |
| 4.1.3 | Schlussfolgerung aus den Sensorvergleichen | 40 |
| 4.1.4 | Eignung des Verfahrens zur Evaluierung | 41 |
| 4.2 | Sensorvergleich bei der normschaffenden Charakterisierung | 41 |
| 4.2.1 | Genauigkeit der Sensoren | 42 |
| 4.2.2 | Schlussfolgerung aus den Sensorvergleichen | 44 |
| 4.2.3 | Eignung des Verfahrens zur Evaluierung | 45 |
| 4.3 | Sensorvergleich im Laborprüfstand | 45 |
| 4.3.1 | Matrixpotenzialsensoren | 46 |
| 4.3.2 | Wassergehaltssensoren | 48 |
| 4.3.3 | Schlussfolgerung aus den Sensorvergleichen | 51 |
| 4.3.4 | Eignung des Verfahrens zur Evaluierung | 51 |
| 4.4 | Beurteilung der Sensoren | 53 |
| 4.5 | Modellierung der pF-WG-Kurve mittels Pedotransferfunktion | 54 |
| 4.5.1 | Wahl der geeigneten Pedotransferfunktion | 54 |
| 4.5.2 | RETC-Programm zur Ermittlung der pF-WG-Kurve | 55 |
| 4.5.3 | Erstellen der pF-WG-Kurven | 56 |
| 4.5.4 | Vergleich der Kurven | 58 |
| 4.5.5 | Schlussfolgerung zur Verwendbarkeit der pF-WG-Kurve | 58 |
| 5 | Schlussbetrachtung und Ausblick | 59 |
| | Zusammenfassung | 61 |
| | Literaturverzeichnis | 62 |
| | Abbildungsverzeichnis | 68 |
| | Tabellenverzeichns | 70 |
| | A Anhang | 71 |
| | Selbstständigkeitserklärung | 76 |

Kapitel 1

Einleitung und Problemstellung

Unsere Umwelt besteht aus dem Luftraum, den Wasserflächen und dem festen Boden. In der Biogeochemie werden diese Bereiche in Abhängigkeit zueinander untersucht. In den letzten Jahren hat vor allem die Pedosphäre (Bodenkunde) an Bedeutung gewonnen, da der Boden aufgrund seiner Komplexität und Heterogenität bisher nicht ausreichend erforscht worden ist. Bodenchemie, Bodenbiologie und Bodenphysik sind eng miteinander verwoben. So ist zum Beispiel die Entnahme von Bodenwasser für bodenchemische Untersuchungen nur mit ausreichendem Wissen über die bodenphysikalischen Eigenschaften möglich.

Kern der vorliegenden Arbeit ist das Ermitteln des Matrixpotenzials, das Bestandteil der Bodenphysik ist. Das Matrixpotenzial umfasst alle Kräfte, mit denen Wasser von der Bodenmatrix festgehalten wird. Am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena wird das Bodenwasser entnommen, um bodenchemische Prozesse zu untersuchen. Hierfür werden Saugplatten verwendet, die durch Anlegen verschiedener Saugdrücke in Abhängigkeit des Matrixpotenzials Bodenwasser entnehmen. Wurzeln saugen ebenso Wasser aus dem Boden. Der angelegte Unterdruck an den Saugplatten ist dem Matrixpotenzial entgegen gerichtet. Bei der Entnahme von Bodenwasser soll die Wasseraufnahme der Wurzeln nicht gestört werden. Bisher wurde der an den Saugplatten anliegende Saugdruck nur je nach Witterung abgeschätzt und eingestellt. Nun soll eine Methode gefunden werden, die es ermöglicht, das Matrixpotenzial auf eine relativ genaue, wartungsfreie und kostengünstige Weise zu ermitteln. Hierfür wurde eine Auswahl an vier Matrixpotenzial- und vier volu-

metrische Wassergehaltssensoren zusammengestellt. Das Matrixpotenzial und der volumetrische Wassergehalt sind Kennwerte der Bodenfeuchte. Der volumetrische Wassergehalt und das Matrixpotenzial sind in der pF-WG-Kurve für jeden Boden eindeutig miteinander verknüpft. Dieser Zusammenhang ist vor allem von der Korngrößenverteilung im Boden abhängig. Über das Wissen dieser Verteilung kann das Matrixpotenzial mittels einer Pedotransferfunktion aus dem volumetrischen Wassergehalt errechnet werden.

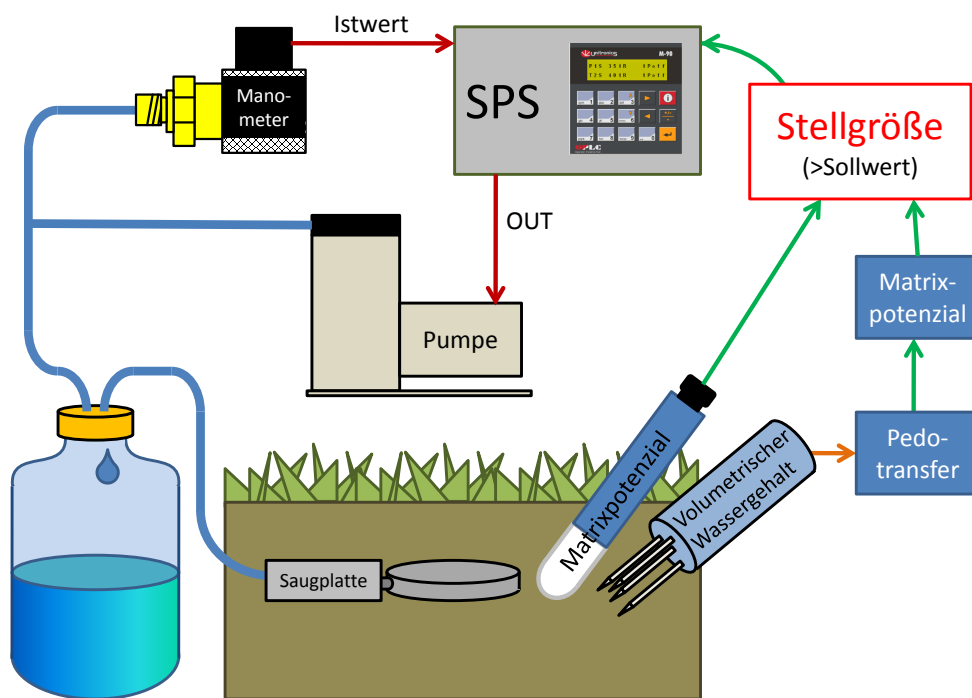


Abbildung 1.1: Prinzip der Pumpensteuerung zur Bodenwasserentnahme

Im Rahmen dieser Arbeit sind verschiedene Verfahren angewandt worden, die die Eigenschaften der Bodenfeuchtesensoren evaluieren sollten: die Freilandmessung, die normschaffende Charakterisierung und die Laborprüfung. Bei der Freilandmessung lag der Schwerpunkt auf dem *In-situ*-Betrieb und im Labor wurde jeder Bodenfeuchtesensor auf seine Genauigkeit hin untersucht. Mittels der präzisen normschaffenden Charakterisierung konnten speziell die volumetrischen Bodenfeuchtesensoren auf ihre Genauigkeit hin überprüft werden. Bei dem eigens entwickelten Labor-

prüfverfahren konnten alle Sensoren noch einmal genauer unter Laborbedingungen untersucht werden.

Weiterhin ist eine geeignete Pedotransferfunktion ermittelt worden, die es ermöglicht, aus der volumetrischen Bodenfeuchte das Matrixpotenzial zu ermitteln. In diesem Zusammenhang wurde eine geeignete Software gewählt, die mit Hilfe dieser Pedotransferfunktion eine pF-WG-Kurve modulieren kann. Anschließend wurden die errechneten pF-WG-Kurven mit den gemessenen Kurven verglichen. Dieser Vergleich ermöglichte es, eine Aussage über die Verwendbarkeit von volumetrischen Wassergehaltsensoren zur Ermittlung des Matrixpotenzials zu treffen.

Zum besseren Verständnis werden in dem Grundlagenteil der Arbeit das Matrixpotenzial im bodenphysikalischen Zusammenhang, die Verfahren zur Messung der Bodenfeuchte, die verwendeten Sensoren, der Begriff Pedotransferfunktion und die Definition des statistischen Begriffs Genauigkeit erläutert. Anschließend werden Material und Methoden vorgestellt und die Ergebnisse diskutiert. In der Schlussbetrachtung wird das Ergebnis dieser Arbeit zusammengefasst. Dabei wird die Entscheidungshilfe für die richtige Wahl des geeigneten Sensor vorgestellt. Abschließend wird ein Ausblick für die Evaluierung von Sensoren und zukünftigen Bodenfeuchtesensoren gegeben.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Bodenwasser

Jeder natürliche Boden wird durch das Verhältnis zwischen fester Bodensubstanz, Bodenwasser und Bodenluft bestimmt. Je nach Witterungsverhältnissen wird durch Versickerung, Evaporation und Transpiration (zusammen Evapotranspiration) der Bodenwassergehalt beeinflusst. Pflanzen haben durch Transpiration über die Blattoberflächen und Verhinderung der Evaporation durch bodenbedeckendes Laub Einfluss auf den Wassergehalt. Das Vermögen des Bodens, Wasser zu speichern oder abzugeben, hängt von der Größe, der Form und der Kontinuität der Bodenporen ab [45].

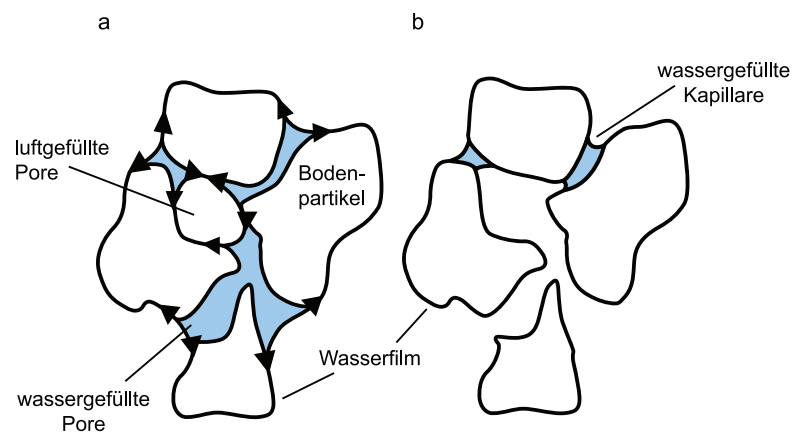


Abbildung 2.1: Verteilung von Wasser im Boden (nach Rowell, 1997)

Wassergesättigt (Erreichen der maximalen Wasserkapazität) ist ein Boden dann, wenn das Wasser den gesamten Porenraum ausfüllt (siehe Abb. 2.1a). Das hierbei entstehende Oberflächenwasser kann nicht mehr einsickern. Ein Teil des Bodenwassers ist gebunden an der Bodenmatrix. Auf dieser sogenannten *Bodenfeuchte* wirken, ausgehend von der festen Phase, Adsorptions- und Kapillarkräfte. Diese Kräfte beeinflussen die Dynamik und Pflanzenverfügbarkeit des Wassers. Aus Gründen der oft starken Heterogenität von Böden hat sich zur genaueren Zusammensetzung der Kräfte das Potenzialkonzept seit *E. BUCKINGHAM (1907)* etabliert [46].

2.1.1 Bindungsformen des Bodenwassers

An der festen Bodenmatrix adsorbiert meist ein dünner Wasserfilm. An Berührungspunkten mit Mineralteilchen bilden sich Menisken (siehe Abb. 2.1b). Ursache der Anlagerung sind elektrostatische Kräfte, van-der-Waals Kräfte und Wasserstoffbrückenbindungen. In Mineralböden mit austauschbaren Ionen stellt Hydratationswasser (zwischen den Molekülen der festen Bodenmatrix gebundenes Wasser) einen erheblichen Bestandteil des Adsorptionswassers dar. Hydratation findet nur statt, solange die Wasserschicht nur wenige Moleküldurchmesser beträgt. Adhäsionswasser ist nicht pflanzenverfügbar. Hinzu kommen osmotische Effekte, die einen Ausgleich zwischen dem Dampfdruck und der Bodenlösung bewirken [25].

Simultan bildet sich das Kapillarwasser aus stärker gekrümmten Menisken aus. Diese Menisken entstehen aus der Erhöhung der Oberflächenspannung, da dadurch ein energieärmerer Zustand erreicht werden kann. Dieses Wasser besitzt demzufolge einen höheren Dampfdruck.

Je höher der Wassergehalt der festen Matrix ist, desto höher ist der Anteil der kapillaren Bindung und umgekehrt. Um eine genauere Beschreibung des Systems zu erreichen, müssten Aussagen über Größe, Richtungen und Ansatzpunkte der wirkenden Kräfte gefunden werden. Im Allgemeinen ist dies jedoch bei heterogenen Böden nicht möglich. Deshalb wird die Arbeitsfähigkeit - das Potenzial - anstelle der Kräfte im System ermittelt [46].

2.1.2 Potenzialkonzept

Da keine gemeinsame Einflussgröße der Teilpotenziale existiert, werden die einzeln wirkenden Kräfte miteinander addiert. Die resultierende Größe, das Gesamtpotenzial, hat im Gleichgewichtszustand mit den Teilpotenzialen den Betrag null und setzt sich wie folgt zusammen:

$$\psi = \psi_z + \psi_m + \psi_g + \psi_\omega + \psi_o \quad (2.1)$$

Das Gravitationspotenzial ψ_z entspricht der Arbeit, die aufgewendet werden muss, um eine bestimmte Menge Wasser von einem Bezugsniveau auf eine bestimmte Höhe zu transportieren. Liegt das Niveau über dem Grundwasserspiegel, besitzt das Wasser potenzielle Energie und somit erhält dieses Potenzial ein positives Vorzeichen [25].

Das Matrixpotenzial ψ_m wird gebildet aus der Adhäsion von Wassermolekülen an der Bodenmatrix und der Kohäsion zwischen den Wassermolekülen [25]. Mit der tensiometrischen Messung kann das Matrixpotenzial ermittelt werden. Da dabei Arbeit verrichtet werden muss, um das Wasser in eine freie Form zu überführen, hat dieses Potenzial ein negatives Vorzeichen [36].

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird, für die verständlichere Darstellung, das negative Vorzeichen nicht berücksichtigt.

Das osmotische Potenzial ψ_g ist von der Menge der gelösten Salze abhängig. Oft hat dieses Potenzial nur einen geringen Anteil am Gesamtpotenzial (außer bei Salzmarschen o.ä.). Es ist jedoch wichtig für die Pflanzenverfügbarkeit des Wassers.

Das Auflastpotenzial ψ_ω wird durch eine von außen auf den Boden wirkende Kraft verursacht. Diese Krafteinwirkung wird von den Wasseranteilen mitgetragen, wenn diese nicht sofort entweichen können.

Das Druckpotenzial ψ_p beschreibt eine Krafteinwirkung durch eine gasförmige oder flüssige Phase auf das Bodenwasser [46].

2.1.3 pF-WG-Kurve

Das Verhältnis zwischen dem volumetrischen Wassergehalt (Erklärung siehe Kap. 2.2.1) und dem Matrixpotenzial ist für jeden bestimmten Ort im Boden, je nach Porengröße und -verteilung, charakteristisch. Dieser Zusammenhang wird in der pF-WG-Kurve dargestellt. Die Verläufe von drei Böden sind in der pF-WG-Kurve in Abbildung 2.2 festgehalten. Um niedrige Matrixpotenzialwerte darstellen zu können, wurde die Ordinate logarithmisch eingeteilt und durch das Präfix *pF* gekennzeichnet. In der Abbildung ist gut zu erkennen, dass die Verläufe der einzelnen Kurven aufgrund unterschiedlicher Körnung und Korngrößenverteilung völlig unterschiedlich beschrieben werden. Bei einem Matrixpotenzial *pF* 0 sind die Poren vollkommen mit Wasser gefüllt, das heißt, sie haben die Wassersättigung bei 43-53 Vol.% erreicht [46]. Bei *pF* 7 ist der Schnittpunkt aller Kurven mit der Ordinate, da dort der wirkende Unterdruck bei vollkommener Trockenheit herrscht.

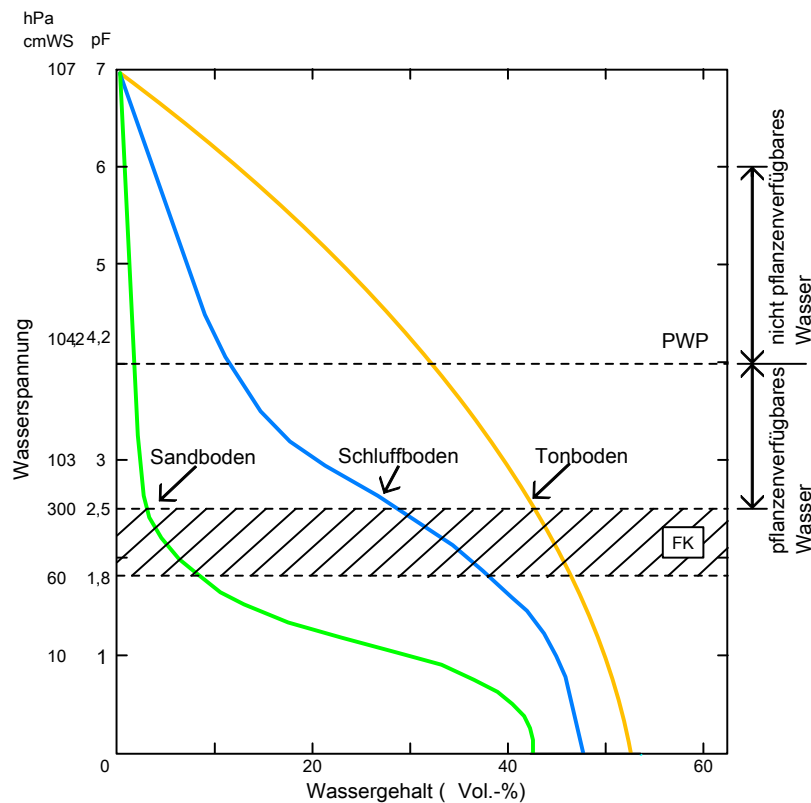


Abbildung 2.2: *pF*-WG-Kurve (Scheffer, 1998)

Die Berechnung der Porengrößenverteilung ist aus der Wasserspannungskurve möglich und umgekehrt (siehe Kap. 2.5); [25].

Aus der Wasserspannungskurve sind noch die, für die Pflanzenverfügbarkeit des Wassers wichtigen, Kennwerte des permanenten Welkepunktes (PWP), der Feldkapazität (FK) und die der nutzbaren Feldkapazität (nFK) bestimmbar (siehe Abb. 2.2). Die Feldkapazität bezeichnet die Menge Wasser, die ein Boden gegen die Schwerkraft halten kann. Dabei ist der Boden jedoch nicht vollständig mit Wasser gesättigt, sondern enthält noch luftgefüllte Poren. Oberhalb des permanenten Welkepunktes vertrocknen Pflanzen irreversibel. Pflanzenverfügbar ist die Wassermenge im Bereich der nutzbaren Feldkapazität.

Die pF-WG-Kurve wird nicht nur von der Korngrößenverteilung und dem Gefüge beeinflusst, sondern ebenso von den Be- und Entwässerungsprozessen. Dabei ergeben sich je nach Prozess unterschiedliche Hysteresisschleifen der Kurven. Die Hysterese wird verursacht durch die gegensätzliche Wirkung bei der Be- und Entwässerung von Porenengpässen, unterschiedliche Luftinklusionen, Veränderung der Benetzbarkeit und durch Schrumpfung bewirkte, nur teilweise reversible, Gefügeänderungen (siehe Abb. 2.3); [46].

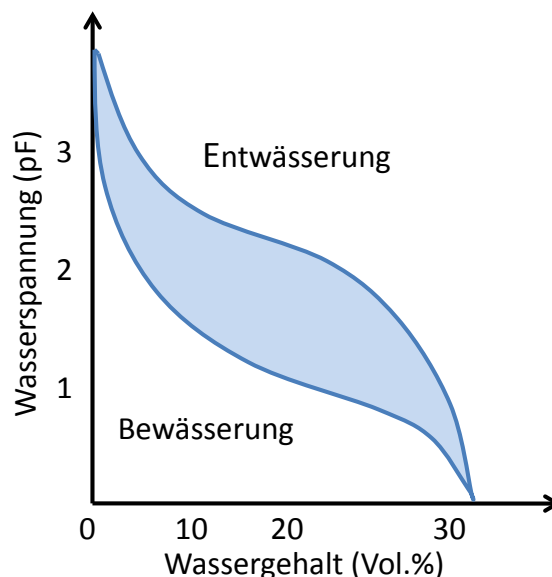


Abbildung 2.3: Hysteresisschleife für einen Sandboden (Scheffer, 1998)

2.2 Verfahren zur Messung der Bodenfeuchte

Zur Bestimmung der Bodenfeuchte gibt es eine Vielzahl von Methoden. Verständnishafter werden in den nächsten zwei Kapiteln nur die grundlegenden Vorgehensweisen beschrieben. Neben den schon zitierten Standardwerken sind beispielsweise aus der englischsprachigen Literatur *Ahlgrimm* [1], *Robertson* [44], *White* [61] und *Dane* [11] zu nennen sowie das Begleitwerk zur BBodSchV *Blume* [5], das die Möglichkeiten der Bodenfeuchtemessung beschreibt.

2.2.1 Direkte Messverfahren

Voraussetzung für eine direkte Methode ist, dass sich Wasser durch Verdunstung, Auswaschung oder durch eine chemische Reaktion aus dem Boden extrahieren lässt. Anschließend kann die Gewichtsänderung der Bodenprobe bestimmt werden [36]. Die Differenz des Bodengewichtes vor und nach der Trocknung ergibt den gravimetrischen Wassergehalt. Dabei ist das gravimetrische Verfahren bzw. das Trocknungsverfahren die wichtigste Methode zur Wassergehaltsbestimmung. Es erfordert die Entnahme einer Bodenprobe. Die Bodentrocknung findet meist bei 105°C und während einer Dauer von 24 Stunden statt, um keine organischen oder mineralischen Bestandteile zu zerstören. Multipliziert man die Lagerungsdichte des Bodens mit dem gravimetrischen Wassergehalt erhält man den volumetrischen Wassergehalt. Dieser Wassergehalt gibt das genaue Verhältnis von Wasser und Boden an [46].

Um die Vielfalt der Methoden zu verdeutlichen, soll an dieser Stelle noch die Calciumcarbidmethode, das Auswaschen mit Alkohol und das Austreiben mit Mikrowellen oder Infrarotstrahlung erwähnt werden.

Abschließend ist zu beachten, dass die *In-situ*-Messung zu bevorzugen ist, da sie kontinuierlich und zerstörungsfrei in Bezug auf die Bodenmatrix funktioniert. Die direkten Messverfahren werden jedoch weiterhin als Vergleichsmessung verwendet [36].

2.2.2 Indirekte Messverfahren

Indirekte Messverfahren erfassen Eigenschaften des Bodens, die in möglichst engem Zusammenhang mit der Bodenfeuchte stehen.

Beim **TDR-** und **FDR-Verfahren** werden die permittiven Eigenschaften (ugs. dielektrischen Eigenschaften) des Mediums bestimmt, das sich zwischen und um die Elektroden der Messsonde befindet. Bei der Frequency-Domain-Reflectometry (FDR) wird nach der Ladezeit des Kondensators die Permittivitätskonstante (ugs. elektrische Dielektrizitätskonstante) des Bodens kapazitiv bestimmt. Die Time-Domain-Reflectometry (TDR) bestimmt hingegen die Laufzeit eines Impulses durch Elektrodenstäbe. Dieser elektromagnetische Impuls ist abhängig von der Dielektrizitätszahl des Mediums, das die Sonde umgibt. Zum Vergleich ist die Geschwindigkeit des Pulses im Vakuum gleich der Lichtgeschwindigkeit. Reinstwasser hat eine Permittivität von $78,38 \text{ As/Vm}$ und Boden zwischen 3 und 5 As/Vm . Durch die Laufzeit oder die Kapazität kann indirekt auf den Wassergehalt der Bodenmatrix geschlossen werden. Um zum Beispiel Kristallisationen aus den im Boden enthaltenen Mineralien zu verhindern, werden Wechselspannungen zur Messung angelegt. Bei der TDR wird mit einer Frequenz von bis zu 2 GHz gearbeitet, bei FDR-Systemen lediglich mit 100 MHz [59].

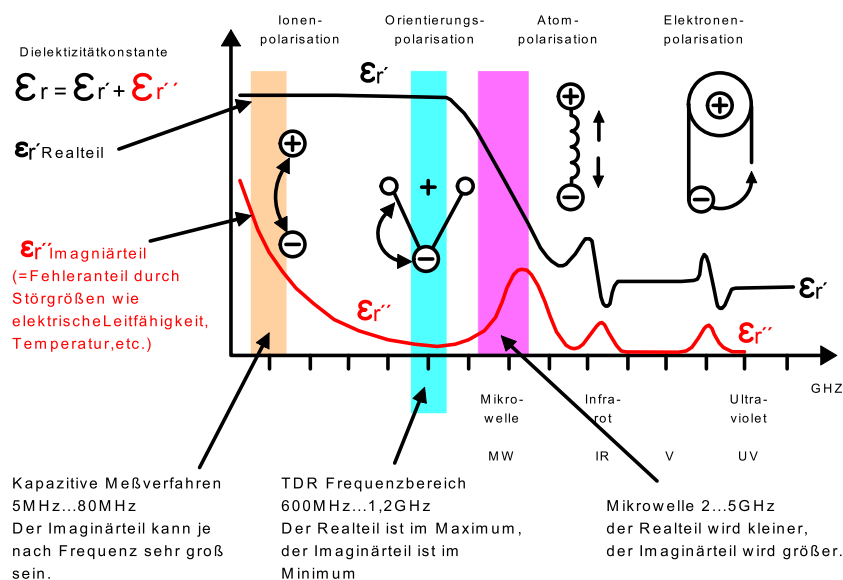


Abbildung 2.4: Frequenzspektren (IMKO GmbH, 2007)

Temperatur- und frequenzabhängige bodenphysikalische Faktoren und elektromagnetische Faktoren haben einen unterschiedlich starken Einfluss auf die FDR- und TDR-Messung. Nachteilig ist die hohe Empfindlichkeit gegenüber der Inhomogenität des Bodens im Messvolumen. Weiterhin wird nur ein relativ kleines Bodenvolumen erfasst. Höchste Sorgfalt beim Einbau ist entscheidend, um einen guten Kontakt zwischen Boden und Elektrodenoberfläche herzustellen. Nur so kann eine genaue Messung durchgeführt werden. Eine bodenspezifische Kalibrierung erhöht die Genauigkeit und reduziert den Einfluss des Bodengefüges.

Temperaturabhängigkeiten der TDR-Messung sind in Nähe der Bodenoberfläche und bei stark tonigen Böden gegeben. Die FDR-Messung reagiert schon empfindlich auf geringe Temperaturveränderungen. Der Einfluss durch den Salzgehalt wird je nach Messverfahren mehr oder weniger kompensiert. Die Messabweichung ist dabei sehr gering.

Das **tensiometrische Verfahren** misst sehr genau das Matrixpotenzial unabhängig von der Heterogenität des Bodens. Bei diesem Verfahren werden Tensiometer verwendet. Über einer wasserdurchlässigen, porösen Keramik (1) steht das Bodenwasser mit dem Wasser im Sensorkörper in Verbindung. Dabei gleicht sich das Potenzial im Sensor dem Potenzial der anliegenden Bodenmatrix an. Über einen Druckaufnehmer, der in Kontakt mit dem inneren Potenzial steht, wird das Messsignal geliefert. Über ein Schaugrohr (2) kann der Füllstand kontrolliert werden. Referenz bildet der atmosphärische Druck, der über eine Membran durch das Verbindungskabel der Sensoreinheit (3) zugeführt wird. Die Druckdifferenz kann je nach Bauart über ein Manometer abgelesen oder elektronisch über einen Druckaufnehmer in Form von einer Spannung (4) abgegriffen werden [59] (siehe Abb. 2.5).

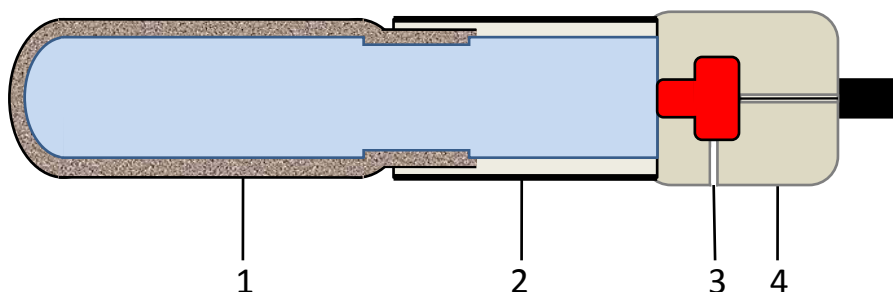


Abbildung 2.5: Aufbau eines elektronischen Tensiometers

Eine weitere indirekte Methode, um das Matrixpotenzial zu bestimmen, ist die **Gipsblockmethode**. Gemessen wird dabei die elektrische Leitfähigkeit zwischen zwei Elektroden als eine Funktion des Wassergehalts des dazwischen befindlichen Materials. Um den Einfluss des schwankenden Salzgehaltes im Boden zu verhindern, wird im Block in der gesättigten Gipslösung gemessen. Der Wassergehalt im Boden ist jedoch nicht derselbe wie im Gipsblock, da im Vergleich zum Gips eine andere kapillare Zusammensetzung im Boden herrscht. Hingegen steht die Lösung im Block und das Bodenwasser bezogen auf das Matrixpotenzial im Gleichgewicht. Der Gipsblock muss bodenspezifisch kalibriert werden [26]. Neuere Generationen an Sensoren der Gipsblockmethode verwenden festgepackte Granulate oder Keramiken, die im Ausgleich mit dem Matrixpotenzial stehen [13].

Das **pF-Meter** ist eine weitere neue Technik zur Matrixpotenzialbestimmung. Auch dieser Sensor ist über einen Tonkörper mit der Bodenmatrix verbunden. Der Tonkörper passt sich ebenso dem Matrixpotenzial an. Der Unterschied zu den herkömmlichen Messverfahren liegt darin, dass die molare Wärmekapazität gemessen wird. Die Wärmekapazität ändert sich linear zum Wassergehalt im Boden. Durch kurze Heizimpulse wird im Tonkörper die Wärmekapazität ermittelt und über eine intern gespeicherte Kalibrierkurve zum anliegenden Matrixpotenzialwert konvertiert [3].

Ground Penetrating Radar (GPR) sendet mittels Ultrabreitband-Verfahren sehr kurze Impulse im Pico- und Nanosekundenbereich in das Erdreich. Eine separate Antenne empfängt das gesendete und reflektierte Signal. Über die Geschwindigkeit und die Schwächung des reflektierten Signals lassen sich über dieselben Analysen wie bei der TDR die Permittivität und die Leitfähigkeit bestimmen und somit auch der Wassergehalt. Mit dem GPR kann der Wassergehalt bis in Tiefen von bis zu 15 *m* gemessen werden [43].

Als ähnliche Verfahren sind noch die **Radarbeugungsmessung**, das **passive Mikrowellenverfahren** und das **elektromagnetische Induktionsverfahren** zu nennen. Das GPR und die erwähnten Verfahren sind ungeeignet für kontinuierliche Messungen, da sie grundlegend schlecht automatisierbar ist. Sie werden vielmehr in der Sondierung eingesetzt [11].

2.3 Sensoren zur Messung der Bodenfeuchte

Wie in der Einleitung schon kurz angesprochen, gibt es eine Vielzahl von Sensoren zur Bodenfeuchtebestimmung. Sie messen entweder den volumetrischen Wassergehalt oder das Matrixpotenzial. Je nach Anwendung kann ein geeigneter Sensor gewählt werden. So muss gemäß der Messgröße, dem Messbereich, der Genauigkeit, dem Ansprechverhalten, der Lebensdauer, der Wartungsintensivität und dem Preis ein geeigneter Sensor gewählt werden. Nicht jeder Sensortyp steht für den „Stand der Technik“ und so kann es sein, dass Sensoren vertrieben werden, die nicht hinreichend auf ihre Brauchbarkeit getestet wurden. Gerade in diesem Sektor der Messtechnik ist es sehr schwierig, die Sensoren auf ihre Eigenschaften zu überprüfen. Aber hierzu Genaueres im Kapitel 2.4.

Grundlegend muss man bedenken, für welchen Zweck man den Sensor verwenden möchte. So wird im Gartenbau ein Sensor mit einem hohen Ansprechverhalten benötigt, um zum Beispiel eine Bewässerungssteuerung schnell schalten zu können. In der Hydrologie werden oft sehr viele Sensoren benötigt, was ein niedriges Energie- und Preisbudget für den einzelnen Sensor zur Folge hat. Für diese Diplomarbeit musste eine Auswahl getroffen werden, die die momentane Vielfalt widerspiegelt. Es sollte möglichst von jedem Messsystem ein Vertreter getestet werden.

Es soll nun in den Kapiteln 2.3.1 und 2.3.2 auf die verwendeten Sensoren und ihre Eigenschaften jeweils kurz eingegangen werden. Die technischen Daten und die Preise wurden in der Tabelle 2.1 zusammengefasst. Bei der Beschreibung werden diese in Preiskategorien von kostengünstig (≤ 200 €) bis kostenintensiv (≥ 700 €) untergliedert.

2.3.1 Matrixpotenzialsensoren

Erster Vertreter der Matrixpotenzialsensoren ist das **Tensiometer TS1** der Firma UMS. Tensiometer trocknen ab einem Druck von -850 hPa aus, das heißt, nach einer selbst kurzen Trockenperiode im Boden muss ein Tensiometer wieder mit Wasser befüllt werden. Das Besondere an diesem Tensiometer ist, dass es sich selbst befüllen kann. Dafür wurde eine Miniaturpumpe verbaut. Ein interner Prozessor erkennt, ob genügend Feuchtigkeit anliegt und steuert so das Befüllen des Sensors mit Bodenwasser. Dies ist ein entscheidender Vorteil in der Verwendbarkeit bei *In-situ*-Langzeitstudien, da die sonst sehr kurzen Wartungsintervalle entfallen. Tensiometer messen generell sehr genau [60]; vgl. Tab. 2.1.



Abbildung 2.6: *TS1*

Wie schon in Kapitel 2.2.2 angesprochen, ist das **pF-Meter** neu auf den Markt. Das hier verwendete pF-Meter der Firma ecotech kann die komplette Bandbreite des Matrixpotenzials (1 hPa - $10.000.000 \text{ hPa}$ bzw. pF 0 - pF 7) messen. Das pF-Meter ist vollkommen wartungsfrei, frostsicher und besitzt kurze Ansprechzeiten (zum Beispiel eine Minute von pF 6 auf pF 0). Weiterhin bietet es die Möglichkeit, zusätzlich noch die Temperatur zu messen und es kann über die SDI12-Schnittstelle [52] digital ausgelesen werden [21]; vgl. Tab. 2.1.



Abbildung 2.7: *pF-Meter*

Beim **SIS** (Smart Irrigation Sensor) der Firma UMS wird die Gipsblockmethode angewandt. Der Sensor stellt eine Verbesserung des Watermark 200SS der Firma Irrometer dar. Der Messsignalwandler mit einem integrierten Mikrocontroller, der direkt an dem Watermarksensor nachgeschaltet ist, wandelt die Ausgangsspannung annähernd linear in das Matrixpotenzial um. Dabei errechnet der Mikrocontroller aus der

parallel gemessenen Temperatur und dem Signal des Watermarksensors direkt das Matrixpotenzial. Der herkömmliche Watermarksensor muss mit Wechselspannung betrieben werden, was mit einem erhöhten Installationsaufwand im Freiland verbunden ist. Auch dieses Problem wurde gelöst und die Umsetzung patentiert. Das SIS bietet eine kostengünstig Alternative zur Tensiometer- oder pF-Metertechnik [58]; vgl. Tab. 2.1.



Abbildung 2.8: *SIS*

Ein weiterer Vertreter der kostengünstigen Gipsblockmethode ist der **MPS-1** (Matrix-Potenzial-Sensor) der Firma Decagon. Die Keramik umschließt eine FDR-Technik, die von der bewährten EC-5-Sonde von Decagon stammt. Auch hier wird das Matrixpotenzial über die Permittivitätskonstante bestimmt. Der Sensor besitzt jedoch eine geringe Auflösung [13]; vgl. Tab. 2.1.



Abbildung 2.9: *MPS-1*

2.3.2 Volumetrische Wassergehaltssensoren

Ebenso von Decagon ist das **10HS**. Dieser Sensor misst mit der FDR-Technik den volumetrischen Wassergehalt. Vorteil dieses Sensors gegenüber herkömmlichen FDR-Sonden ist das große Messvolumen. Dadurch ist die Messung mit dem 10HS unempfindlicher gegenüber Lufteinschlüssen und der Heterogenität des Bodens. Diese Unempfindlichkeit und sein niedriger Preis machen ihn vor allem für die Hydrologie sehr interessant [12]; vgl. Tab. 2.1.



Abbildung 2.10: 10HS

Der FDR-Sensor **ML2x** der Firma Delta-T misst im Gegensatz zum 10HS in einem sehr kleinen aber dafür definierten Volumen. Nämlich 95% des Messvolumens befinden sich innerhalb der Elektroden. Der ML2x-Sensor ist besonders geeignet für homogene Böden. Er misst nach Herstellerangaben mit einer annähernden Präzision von TDR-Sonden, ist dafür aber kostengünstiger [14]; vgl. Tab. 2.1.



Abbildung 2.11: ML2x

Campbell-Scientific produziert ebenfalls einen FDR-Sensor: den **CS616**. Dieser Sensor deckt ein großes Messvolumen durch seine sehr langen Elektroden ab. Dies birgt den Nachteil, dass der Einbau sich verkompliziert, da die Elektroden möglichst parallel zueinander in das Erdreich eingebaut werden müssen. Wie fast alle FDRs ist auch das CS616 kostengünstig [8]; vgl. Tab. 2.1.

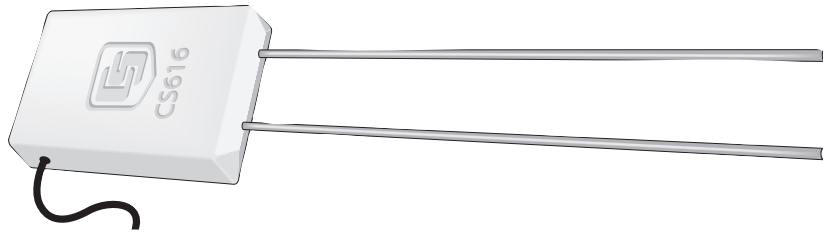


Abbildung 2.12: *CS616*

Die in den Untersuchungen verwendete TDR-Sonde heißt **PICO64** von der Firma IMKO. Der große Vorteil dieser Sonde ist, dass die Auswerteelektronik im Sensorkopf mit integriert ist, anstatt extern, wie es bei der TDR-Technik üblich ist. PICO64 misst sehr genau den volumetrischen Wassergehalt und kann ein sehr großes Messvolumen ($\geq 1250 \text{ ml}$) erfassen. Dadurch ist die TDR-Sonde bestens für skeletthaltige und heterogene Böden geeignet. Zusätzlich misst die Sonde die Temperatur. PICO64 liegt im preislich mittleren Bereich [29]; vgl. Tab. 2.1.



Abbildung 2.13: *PICO64*

| Modell | TS1 | pF-Meter | SIS | MPS1 |
|---------------------------|---------------------|----------------------|-------------------|--------------------|
| Sensorhersteller | UMS GmbH | ecoTech | UMS GmbH | Decagon |
| Messgröße | Matrixpotenzial | Matrixpotenzial | Matrixpotenzial | Matrixpotenzial |
| Typ | Tensiometer | pF-Meter | Gipsblockmethode | Gipsblockmethode |
| Ausgangsspannung | 0...2 V DC | 0...7 V DC | 0...2,5 V DC | 0,5...1 V DC |
| Messbereich | (+1000...-1000 hPa) | pF 0...7 | (-50...-2000 hPa) | (-100...-5000 hPa) |
| Genauigkeit | ±5 hPa | pF ±0,01 | ±2 hPa | ±20...50 hPa |
| Versorgungsspannung Vin | 6...18 V DC | 9...13 V DC | 6...20 V DC | 2...5 V DC |
| Strombedarf/min. Messzeit | 3 mA/10 s | 55 mA/5 s | 2,5 mA/5 s | 25 mA/5 ms |
| digitale Schnittstelle | SDI12 | ja, optional SDI12 | RS485-2 | nein |
| Temperaturmessung | ja | nein | ja über RS485-2 | nein |
| Preis | 700 € | 700 € | 120 € | 120 € |
| Modell | 10HS | CS616 | ML2x | PICO64 |
| Sensorhersteller | Decagon | Campbell | Delta-T | IMKO |
| Messgröße | vol. Wassergehalt | vol. Wassergehalt | vol. Wassergehalt | vol. Wassergehalt |
| Typ | FDR | FDR | FDR | TDR |
| Ausgangsspannung | 0,3...1,25 V DC | +/-0,7 V AC Rechteck | 0...1 V DC | 0...1 V DC |
| Messbereich | 0...57 Vol.% | 0...50 Vol.% | 5...60 Vol.% | 0...100 Vol.% |
| Genauigkeit | ±2...5 Vol.% | ±2,5 Vol.% | ±1 Vol.% | ±1 Vol.% |
| Versorgungsspannung Vin | 3...15 V DC | 5...18 V DC | 5...15 V DC | 7...24 V DC |
| Strombedarf/min. Messzeit | 15 mA/10 ms | 65 mA/5 ms | 20 mA/1 s | 100 mA/3 s |
| digitale Schnittstelle | nein | nein | nein | RS485 und IMP-BUS |
| Temperaturmessung | nein | nein | nein | ja |
| Preis | 120 € | 150 € | 400 € | 450 € |

Tabelle 2.1: Technische Daten der Sensoren

2.4 Prüfverfahren für Bodenfeuchtesensoren

Es wurden verschiedene Methoden entwickelt, um Bodenfeuchtesensoren zu beurteilen. Um repräsentative Vergleiche anzustellen, ist man bestrebt, die Untersuchungen so nah wie möglich den realen Messbedingungen anzupassen. Daher wurden verschiedene Verfahren für das Labor entwickelt. Aber auch für das Freiland gibt es Methoden. In den letzten Jahren sind verstärkt auch Prüfverfahren mit Kalibrierflüssigkeiten hinzugekommen. Diese Messverfahren sollen an dieser Stelle kurz erläutert werden. Die Freilandmessung, die normschaffende Charakterisierung und der Laborprüfstand werden in dieser Arbeit angewendet.

2.4.1 Freilandmessung

Beim **Vergleich im Feldversuch** werden die Sensoren möglichst unter gleichen Bedingungen, wie Tiefe und räumliche Nähe, eingesetzt. Die Messwerte werden, wenn verschiedene Messmethoden wie zum Beispiel FDR- und TDR-Technik angewendet werden, miteinander verglichen. Oder es werden zur Bestimmung des volumetrischen Wassergehalts Bodenproben entnommen. Diese Proben werden dann zum Beispiel im Trockungsverfahren weiter bestimmt (siehe Kap. 2.2.1). Diese Ergebnisse können demzufolge mit den Messungen im Freiland verglichen werden.

Die Sensoren können praxisnah geprüft werden. So kann man beurteilen, wie sich die Sensoren in der Installation, im Betrieb und im Ausbau handhaben lassen. Nachteilig ist, dass einzelne Einflussgrößen, insbesondere die Witterungsbedingungen, sich nicht unterscheiden und nicht beeinflussen lassen. Es kann also passieren, dass in einem niederschlagsreichen Jahr die Messung von trockenen Böden nicht möglich ist und sich somit keine Aussagen über diesen Teil des Messbereiches treffen lassen.

Weiterhin wirkt sich in der Freilandmessung die Heterogenität des gewachsenen Bodens negativ auf die Vergleichbarkeit der Messungen aus. So haben größere Steine, größere Zwischenräume und Evapotranspiration Einfluss auf die Bodenfeuchtemessung [54]. So bilden sich zum Beispiel besonders präferentielle Fließwege des Bodenwassers in Wurmgängen aus [42].

2.4.2 Normschaffende Charakterisierung von elektromagnetischen Wassergehaltssensoren

Bei der **normschaffenden Charakterisierung nach Jones [30] und Blonquist [4]** werden seit 2007 erstmalig Flüssigkeiten verwendet, um Feuchtesensoren zu untersuchen, die bekannte Eigenschaften hinsichtlich ihrer Permittivität, elektrische Leitfähigkeit und Temperatur haben. Dadurch wird erreicht, dass die Sensoren in einem annähernd homogenen Medium getestet werden. Mit den Flüssigkeiten können verschiedene Wassergehalte simuliert werden. Das Verfahren ist ungeeignet für Matrixpotenzialsensoren.

2.4.3 Laborprüfstände

Um freilandähnliche Bedingungen zu schaffen, wurden das **Überdruck- und Unterdruckkammerverfahren**, sowie das **Verfahren zum Entfeuchtung durch Verdunstung eines Bodenvolumens** entwickelt.

Beim **Unterdruckverfahren nach Topp [57]** wird ein Rohr mit Boden gleichmäßig befüllt und der Feuchtesensor wird währenddessen mit eingebaut. Am oberen Ende des Rohres kann über Büretten eine definierte Menge Wasser dem System zugeführt werden und über eine, am unteren Ende angebrachte, Keramik wieder abgeführt werden. Mit diesem Verfahren können jedoch keine Sensoren zur Matrixpotenzialbestimmung geprüft werden.

Das **Überdruckverfahren nach Yoder [62]** arbeitet ähnlich. Es wird ebenfalls eine Säule mit Erdboden befüllt und während des Packens werden die Sensoren mit eingebettet. Der Boden wird anschließend wassergesättigt und wieder entfeuchtet durch Anlegen eines regelbaren Luftdruckes an einem Ende der Säule. Auch für dieses Verfahren ist der Einsatz von Matrixpotenzialsensoren ungeeignet.

Nach dem **Verfahren zum Entfeuchten durch Verdunstung eines Bodenvolumens von Hartge [25]** wird ein Tensiometer als Referenzsensor in eine Stechzylinderprobe eingesetzt. Der Gewichtsverlust der Probe kann nur eingeschränkt als Referenzgröße genutzt werden, da sich ein Evaporationsgradient ausbildet. Mit der Methode nach Durner [19] wird diese Problematik behoben, indem zwei Tensiometer in unterschiedlichen Tiefen in die Stechzylinderprobe eingesetzt werden. Darüber kann der Matrixpotenzialgradient in den volumetrischen Wassergehaltsgradienten transferiert werden.

Weitere ähnliche Verfahren zur Prüfung von Bodenfeuchtesensoren im Labor sind die Verfahren nach *Plagge & Renger [41]*, *Cary [9]* und *Plagge & Malicki [40]*.

Ein **spezielles Verfahren zur Überprüfung und Kalibrierung** von TDR- und FDR-Sensoren ist von der Firma IMKO entwickelt worden. Dabei werden Behälter jeweils mit Glasperlen der Korngrößenverteilung von 0,05-5 mm [55] mit Flüssigkeiten unterschiedlicher Leitfähigkeit gesättigt. So kann ein bodenähnliches Gefüge simuliert werden. Die Sensoren können dann in das Gefüge eingebaut und gemessen werden [28].

2.5 Pedotransferfunktion

Eine **Pedotransferfunktion** ist eine prädiktive Funktion, die aus einfach erfassbaren, kostengünstig messbaren, oder überhaupt erfassbaren Eigenschaften des Bodens andere Eigenschaften ermittelt. Pedotransferfunktionen verwenden hauptsächlich regressive Analysemethoden und Datenbanken, um schwer zu messende Eigenschaften zu berechnen. Häufiges Ziel ist, die pF-WG-Kurve oder die Permeabilität zu schätzen. Oft verwendete Pedotransferfunktionen sind *van Genuchten*, *Brooks & Corey* und *Kosugi* [38]. Bei der erhältlichen Software zur Ermittlung hydraulischer Eigenschaften kann man ohne großen Aufwand viele Pedotransferfunktionen nutzen. Zu nennen sind *Rosetta* [2], *Soilpar* [18] und *RETC* [23].

2.6 Kriterien zur Beurteilung einer Messung

Beim Messen mit Bodenfeuchtesensoren muss man wie bei jeder Messung beachten, dass der gemessene Wert immer mit einer Messabweichung behaftet ist. Zur Beurteilung der **Genauigkeit** einer Messgröße stehen die Kriterien Präzision und Richtigkeit zur Verfügung. Diese können aber nicht zu einem statisch definierten Genauigkeitsmaß zusammengefasst werden [48].

Die Messabweichung ist die Abweichung vom gemessenen Wert zum wahren Wert der Messgröße. Eine exakte Messung ist grundsätzlich nicht möglich. Durch verschiedenste Einflussgrößen wird der wahre Messwert nicht korrekt erfasst. Das Messergebnis wird immer aus Messwert und Messabweichung gebildet [15].

Um einen Bezug zum gemessenen Wert zu ermöglichen, wird der richtige Wert x_r , der zum Beispiel durch eine direkte Methode oder eine berechnete Kalibrierflüssigkeit bestimmt wird, ermittelt. Die Differenz aus gemessenem Wert und richtigem Wert ist die absolute Abweichung F [49]:

$$F = \Delta x = x - x_r \quad (2.2)$$

Die relative Abweichung f ist der Wert aus dem Quotienten der absoluten Abweichung und dem richtigen Wert. Sie bildet die prozentuale Abweichung vom richtigen Wert [49]:

$$f = \frac{F}{x_r} = \frac{x - x_r}{x_r} \quad (2.3)$$

Die empirische Standardabweichung S ist ein Maß für die mittlere Abweichung der Einzelwerte einer Messreihe vom Mittelwert \bar{x} . Für eine Messreihe mit normalverteilten Messwerten ($n > 100$) entspricht die empirische Standardabweichung der Standardabweichung σ des mathematischen Modells [49]:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (2.4)$$

$$S = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.5)$$

Die **Präzision** eines Messgerätes steht für die Wiederholgenauigkeit der Messung. Um die Präzision zu quantifizieren, wird eine Messung unter gleichen Bedingungen mit demselben Messgerät mehrmals wiederholt. Anschließend wird nach den einzelnen Ergebnisreihen nach normierten Algorithmen die Fehler- und Ausgleichsrechnung reduziert. Die Präzision macht keine Aussagen über die Abweichung zum wahren Wert, sondern beschreibt die Stabilität des Messgerätes [17]. Das Maß für die Präzision ist die Standardabweichung σ .

Die **Richtigkeit** hingegen ist das Ausmaß der Übereinstimmung des Messergebnisses mit dem wahren Wert der Messgröße [16]. Die Richtigkeit wird beeinflusst von der systematischen Messabweichung. Diese kann durch Änderung von Messanordnung und -auswertung oder Anbringung von Korrekturen ständig oder teilweise eliminiert werden [48].

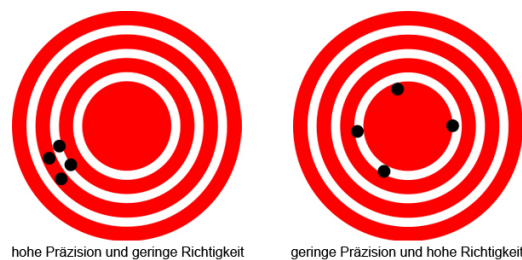


Abbildung 2.14: *Präzision und Richtigkeit (CR1000 user manual, 2009)*

Kapitel 3

Material und Methoden

3.1 Feldversuch

Im Herbst 2009 sind verschiedene Sensoren im Freiland untersucht worden. Es sollte vor allem die Rückbefeuchtungsphase gemessen werden, da in diesem Zeitraum die größten Änderungen der Bodenfeuchte zu erwarten waren. Die Sensoren sind unter Praxisbedingungen getestet worden und die Messwerte können Aufschluss über die Eignung der Sensoren liefern (siehe Kap. 2.4.1).

3.1.1 Standortbeschreibung und Messtechnik

Der Feldversuch wurde auf der Fläche des Biodiversitätsexperimentes durchgeführt. Die Versuchsfläche befindet sich auf der Saaleaue (Höhenlage 130 *m* ü. NN) im nördlichen Teil Jenas (Jena-Löbstedt, Thüringen)(siehe Abb. 3.1). Der mittlere jährliche Niederschlag beträgt um die 587 *mm* [32]. Der Bodentyp wurde bestimmt als Eutric Fluvisol [22]. Der dortige lehmige Fluvial ist größtenteils steinfrei und zwei Meter tief [50].

Im Rahmen der hydrologischen Untersuchungen des *Helmholtz Zentrums für Umweltforschung in Leipzig* (kurz *UFZ*) werden mit Hilfe von FDR-Sonden und Tensiometern auf der ganzen Fläche und in verschiedenen Tiefen der volumetrische Wassergehalt und das Matrixpotenzial bestimmt. Es wird kontinuierlich gemessen und die Messungen können zu Vergleichen genutzt werden. Die verwendeten Senso-

ren sind in direkter Nähe der bestehenden Messtechnik im Plot B1 A02 eingesetzt worden.



Abbildung 3.1: *Biodiversitätsversuchsfläche auf der Saaleau bei Jena (05/2003)*
(Photo: J. Baade)

3.1.2 Messtechnik

Verbaut wurden PICO64-, SIS-, MPS1-, 10HS- und pF-Meter-Bodenfeuchtesensoren. Aus Platzmangel musste die Auswahl dabei auf fünf Sensoren beschränkt werden. Da das *UFZ* in derselben Höhe das ML2x FDR und das TS8 Tensiometer verwendet, war der Einbau eines weiteren ML2x und TS1 Tensiometers nicht nötig. Das TS1 funktioniert mit der gleichen Sensortechnik wie das TS8 (nach Angaben von Dipl. Ing. Thomas Keller der Firma *UMS*). Der einzige bauliche Unterschied ist die Selbstbefüllungseinheit des TS1. Somit konnten die Messwerte des TS8 problemlos für die Untersuchung des TS1 verwendet werden.

Das Aufzeichnen der Daten, die Steuerung und die Stromverteilung fanden über den Datenlogger CR1000 der Firma Campbell Scientific statt. Eigens dafür wurde ein Programm geschrieben, das exemplarisch im Anhang A zu finden ist. Die Stromversorgung wurde über einen Bleiakкумуляtor mit 12 V und 90 Ah gewährleistet. Das Auslesen der Daten erfolgte periodisch mittels Notebook. Wie schon erwähnt konnten die Sensoren beim Einbau (siehe Kap. 3.1.1) in direkter Nähe zur bereits bestehenden Bodenfeuchtemesstechnik installiert werden. In der vorhandenen Grube wurden in eine Leimholzwand, die als Schutz für das Bodenprofil angebracht wurde,

Löcher in der Größe des jeweilig zu installierenden Sensors und in einem Abstand von 20 cm zur Oberfläche gebohrt. Anschließend wurde, möglichst in der Negativform des Sensors, Boden entfernt. Danach konnten die Sensoren in den Boden eingeschlämmt werden, so dass ein bestmöglicher Kontakt zur Bodenmatrix gewährleistet werden konnte. Die Matrixpotenzialsensoren wurden vorher zur Sättigung in destilliertes Wasser gelegt. Das pF-Meter wurde in einem Winkel von 15° in Bezug zur Horizontalen eingebaut, damit die Entlüftungskanüle arbeiten konnte [21]. Der Sensorkopf des pF-Meters befand sich ebenfalls in einer Tiefe von 20 cm.



Abbildung 3.2: *Einbau der Messtechnik auf der Biodiversitätsversuchsfläche (09/2009) (Photo: S.Gimper)*

3.2 Normschaffende Charakterisierung von elektromagnetischen Wassergehaltssensoren

Diese Charakterisierung soll dazu dienen, Sensoren zu überprüfen, die die Permittivität messen. Denn der volumetrische Wassergehalt im Boden beeinflusst stark die Permittivität des Bodens (siehe Kap. 2.2.2).

Bei dieser Methode werden Flüssigkeiten in verschiedenen Verdünnungen verwendet, um verschiedene Permittivitäten zu erhalten. Mit diesen Flüssigkeiten können verschiedene volumetrische Wassergehalte simuliert werden (siehe Kap. 2.4.2).

Die Wassergehaltssensoren reagieren empfindlich auf die elektrische Leitfähigkeit, die dielektrische Relaxation und die Temperatur. Deshalb ist es wichtig, Flüssigkeiten wie Dioxan und 2-Isopropoxyethanol ($i-C_3E_1$) zu verwenden, deren permittiven

Eigenschaften hinreichend bekannt sind [30]. Diese Flüssigkeiten besitzen eine sehr geringe Permittivität und lassen sich gut mit Wasser mischen. So hat $i\text{-}C_3E_1$ eine Permittivität $\epsilon_{iC_3E_1} = 10,75 \text{ As/Vm}$. Dioxan, ein starkes organisches Lösungsmittel, besitzt eine noch geringere Permittivität $\epsilon_{Di} = 2,2 \text{ As/Vm}$. Reinstwasser ϵ_{H_2O} mit $78,38 \text{ As/Vm}$ hingegen besitzt eine sehr hohe Permittivität [31]. Dadurch ist es möglich, annähernd den kompletten Messbereich der Sensoren mit verschiedenen Mischungsverhältnissen von Dioxan oder $i\text{-}C_3E_1$ mit Wasser zu realisieren.

Nachteil von Dioxan ist, dass es sehr leicht flüchtig ist, krebserregend und einen niedrigen Flammpunkt von 11°C besitzt. Vorsichtiger Umgang mit Dioxan ist daher geboten [7].

Der Vorteil ist jedoch, dass die Sensoren in kurzer Zeit in einem homogenen System unter gleichen Bedingungen wie Dichte, Temperatur und frei von störenden Luftein-schlüssen gemessen werden können. Dadurch lassen sich die Werte anschließend sehr gut miteinander vergleichen [30].

Die Permittivität des Gemisches von Dioxan und Wasser kann grundlegend mit dem *permittiven Mischungsmodell* berechnet werden [56]:

$$\epsilon(\phi_{Di}) = [\phi_{Di}\epsilon_{Di}^\beta + (1 - \phi_{Di})\epsilon_{H_2O}^\beta]^{1/\beta} \quad (3.1)$$

Der optimierte Parameter $\beta = 0,813$ beschreibt die Hauptabweichung vom linearen Mischungsmodell. ϕ_{Di} ist der volumetrische Anteil von Dioxan nach dem Mischen [51]:

$$\phi_{Di} = \frac{V_{Di}}{V_{Di} + V_{H_2O}} \quad (3.2)$$

Die Ergebnisse in [51] zeigen in der Kurvenanpassung systematische Abweichungen. Diese wurden in einem Polynom festgehalten, um die halbempirische Annäherung zu verbessern [6]:

$$\Delta\epsilon(\phi_{Di}) = k_0 + k_1\phi_{Di} + k_2\phi_{Di}^2 + k_3\phi_{Di}^3 + k_4\phi_{Di}^4 \quad (3.3)$$

Die optimierten Annäherungsparameter betragen $k_0 = 0,258959$, $k_1 = 4.8317$, $k_2 = 0,17616$, $k_3 = -51.1773$ und $k_4 = 39,2371$. Diese Optimierung kann mit einbezogen

werden [51]:

$$\epsilon^*(\phi_{Di}) = \epsilon(\phi_{Di}) + \Delta\epsilon(\phi_{Di}) \quad (3.4)$$

Dadurch kann die Standardabweichung signifikant verringert werden [6].

Eine Funktion zur Permittivitätsbestimmung des Gemisches aus $i\text{-}C_3E_1$ und Wasser wurde experimentell nachgewiesen und ist mit einer Standardabweichung von 1,262 gut geeignet [31]:

$$\epsilon_s = -5,1426\phi_{iC_3E_1}^2 - 64,493\phi_{iC_3E_1} + 80,465 \quad (3.5)$$

$\phi_{iC_3E_1}$ ist der volumetrische Anteil von $i\text{-}C_3E_1$ nach dem Mischen:

$$\phi_{iC_3E_1} = \frac{V_{iC_3E_1}}{V_{iC_3E_1} + V_{H_2O}} \quad (3.6)$$

Die zu den Permittivitäten äquivalenten Wassergehalte werden nach *Topp [1980]* [57] berechnet:

$$\Theta_v = -5,3 \times 10^{-2} + \epsilon \times 2,92 \times 10^{-2} - \epsilon^2 \times 5,5 \times 10^{-4} + \epsilon^3 \times 4,3 \times 10^{-6} \quad (3.7)$$

Die berechneten Permittivitäten der Flüssigkeitsstandards und die resultierenden Anzeigewerte der Sensoren werden in folgender Tabelle beschrieben:

| Medium | Volumenanteil | | | Permittivität | Wassergehalt |
|-------------------|---------------|-------------------|--------|---------------|--------------|
| | Dioxan | $i\text{-}C_3E_1$ | Wasser | | |
| Dioxan | 11,3% | 0,9 | 0,1 | 6,41 | 0,1127 |
| Dioxan | 23,3% | 0,8 | 0,2 | 12,40 | 0,2327 |
| Dioxan | 34,2% | 0,7 | 0,3 | 19,69 | 0,3416 |
| Dioxan | 42,6% | 0,6 | 0,4 | 27,76 | 0,4257 |
| $i\text{-}C_3E_1$ | 20,3% | 1 | 0 | 10,83 | 0,2042 |
| $i\text{-}C_3E_1$ | 30,2% | 0,92 | 0,08 | 16,78 | 0,3024 |
| $i\text{-}C_3E_1$ | 40,6% | 0,8 | 0,2 | 25,58 | 0,4060 |
| $i\text{-}C_3E_1$ | 51,8% | 0,58 | 0,42 | 41,33 | 0,5179 |
| Aqua Dest. | 100% | 0 | 1 | 78,38 | 1 |

Tabelle 3.1: Berechnete Permittivitäten der Flüssigkeitsstandards und der äquivalente Wassergehalte nach *Topp [1980]* [57]

Beim experimentellen Aufbau wurden Gefäße mit vier Liter Fassungsvermögen und speziellen Abmaßen mit den Flüssigkeitsstandards befüllt. Dabei gab der Bodenfeuchtesensor PICO64 die Dimensionierung vor, da er das größte Messvolumen von 1250 ml besitzt [29]. Bei den Gefäßmaßen wurde mit einer doppelten Sicherheit gerechnet, damit die Gefäßwände und die angrenzende Umgebungsluft keinen Einfluss auf die Messung haben. Die Temperatur der Flüssigkeiten wurden bei $22,4^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ konstant gehalten, damit diese ebenfalls keinen Einfluss auf die Messung hat. Geprüft wurden CS616, ML2x, PICO64 und drei 10HS. Die Sensoren wurden komplett und mittig in die Flüssigkeitsstandards eingetaucht. Dabei wurden die Sensoren vom Campbell Scientific CR1000 Datenlogger ausgelesen, gesteuert und mit Strom versorgt. Es wurden im Abstand von drei Sekunden Messwerte aufgenommen und über eine halbe Minute gemittelt. Dieser Datenalgorithmus wurde in einem Intervall von zehn Minuten gespeichert.



Abbildung 3.3: *Labora Aufbau normstiftende Charakterisierung (07/2009)*
(Photo: S.Gimper)

3.3 Sensorprüfstand

Unter-, Überdruckverfahren und das Verfahren zur Entfeuchtung durch Verdunstung eines Bodenvolumens (siehe Kap. 2.4) neigen dazu, einen Wassergehalts- bzw. Matrixpotenzialgradienten auszubilden. Deshalb wurde mit Beratung von Dr. Wessel-Bothe (Bodenkundler der Firma ecotech) eine eigene Methode entwickelt. Dabei wurde in Behältern mit einem Fassungsvermögen von ca. 15 Liter verschiedene Bodenfeuchten eingestellt und gemessen.

Dabei wurde ein Waldboden verwendet, der bereits für Untersuchungen am *Max-Planck-Institut für Biogeochemie* verwendet wurde und dessen Korngrößenverteilung bekannt ist. Bei diesem Prüfstand ist man ebenfalls bestrebt, so ähnlich wie möglich die Messbedingungen im Feld zu simulieren, um die Sensoren praxisnah untersuchen zu können. Die Sensoren sollten in einem Boden getestet werden dessen Korngrößenverteilung, Dichte, Temperatur und Wassergehalt bekannt sind, da diese Bedingungen die Messungen der einzelnen Sensoren beeinflussen und deshalb gleich und reproduzierbar sein müssen.

Die Korngrößenverteilung (siehe Tab. 3.2) wurde mit Hilfe der Laserdefraktometrie bestimmt [35]. Anschließend wurden alle Bestandteile größer als vier Millimeter vom Boden durch Sieben entfernt. Danach wurde der Boden für etwa 48 Stunden luftgetrocknet und eine volumetrische Wassergehaltsbestimmung nach *Hartge* [26] durchgeführt. Mit der bestimmten Feuchte konnte nun die Menge an Wasser errechnet werden, die dem Boden zugegeben werden muss, um einen bestimmten Wassergehalt einstellen zu können. Dazu kann man die Verhältnisgleichung nach *Hartge* [26] nutzen:

$$W_{gw} = \frac{Bd_n - Bd_{tr}}{Bd_{tr}} \quad (3.8)$$

Dabei ist W_{gw} der gravimetrische Wassergehalt. Bd_n und Bd_{tr} sind die Gewichte des nassen und des trockenen Bodens. Multipliziert man den gravimetrischen Wassergehalt mit der Lagerungsdichte des Bodens erhält man den volumetrischen Wassergehalt.

| Korngröße [μm] | Bodenart | Anteil [%] | Summe Anteil Bodenart [%] |
|-----------------------------|----------|------------|---------------------------|
| >632 | Sand | 4,07 | 50,34 |
| 200-630 | | 33,60 | |
| 63-200 | | 11,18 | |
| 100-200 | | 0,08 | |
| 63-100 | | 1,41 | |
| 20-63 | Schluff | 18,17 | 54,81 |
| 10-20 | | 9,98 | |
| 6,3-10 | | 5,01 | |
| 3,2-6,3 | | 6,75 | |
| 2,3-6,3 | | 3,90 | |
| 1-2 | Ton | 3,72 | 5,85 |
| 0,63-1 | | 1,46 | |
| 0,63-0,64 | | 0,64 | |
| 0,2-0,32 | | 0,02 | |
| 0,1-0,2 | | 0,00 | |
| <0,1 | | 0,00 | |

Tabelle 3.2: Korngrößenverteilung des Waldbodens

Die berechnete Menge Wasser wurde in den Boden mit einem Betonrührer eingerührt. Somit konnte eine homogene Verteilung des Wassers im Boden gewährleistet werden. Dabei wurden unterschiedliche Feuchten in unterschiedlichen Gefäßen über den Messbereich der Sensoren eingestellt. Die zu messenden Sensoren wurden mit bestmöglichem Bodenkontakt und komplett in den Boden eingebaut. Dabei wurden auch hier die Sensoren vom Datenlogger CR1000 ausgelesen, gesteuert und mit Strom versorgt.

Die Matrixpotenzialsensoren wurden gemeinsam jeweils so lang gemessen, bis nach Einstellen aller Potenziale vom Boden zum Sensorkopf 24 Stunden vergangen waren. Die Sensoren konnten gleich nach dem Einbau gemessen werden, da ein Ausgleichen eines Potenzials entfällt. Die Temperatur wurde ebenfalls mit gespeichert. Es wurden die Versuche bei $22,4^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ durchgeführt. Bei einer so geringen Standardabweichung ist der Einfluss der Temperatur auf die Messergebnisse also vernachlässigbar klein.

Parallel zu den Messungen wurde die volumetrische Bodenfeuchte mit dem Trocknungsverfahren (siehe Kap. 2.2.1) bestimmt, um ein unabhängiges Verfahren zum Vergleich der sensorischen Ermittlung zu ermöglichen.



Abbildung 3.4: *Laboraufbau Sensorprüfstand (08/2009)*
(Photo: S.Gimper)

Kapitel 4

Ergebnisse und Diskussion

4.1 Sensorvergleich im Freiland

Die Messungen auf der Biodiversitätsversuchsfläche wurden in dem Zeitraum vom 14. September bis 23. November 2009 durchgeführt. Anhand der Messungen (siehe Abb. 4.1) kann man erkennen, dass die Rückbefeuchtung des Bodens sehr gut messtechnisch erfasst werden konnte. In diesem Zeitraum fielen 140,3 *mm* Regen. Das ist etwa ein Viertel der Jahresmenge (siehe Kap. 3.1.1). Gemessen wurde der Niederschlag mit dem Ombrometer der Firma *Thies* bei der Wetterstation *Saaleaue* in einer geschätzten Entfernung von 100 *m* [33].

In den folgenden zwei Kapiteln wird auf das Verhalten der einzelnen Sensoren im Freilandbetrieb eingegangen. Alle Aussagen über die Sensoren können anhand der Kurven in Abbildung 4.1 nachvollzogen werden.

4.1.1 Matrixpotenzialsensoren

Bei der Erfassung des Matrixpotenzials kann das T8 Tensiometer als Referenz betrachtet werden, da es im Vergleich der unterschiedlichen Herstellerangaben die höchste Genauigkeit besitzt. Wie man auch an dem Kurvenverlauf sehen kann, wurde das T8 am 14. Oktober 2009 wieder befüllt. Am 17. Oktober 2009 und am 2., 4., 9. und 17. November 2009 fielen in einem kurzen Zeitraum größere Regenmengen (jeweils >10 *mm*). Diese Regenpeaks lassen sich deutlich in den Messwerten des T8

durch Abfallen des Drucks erkennen. Daraus lässt sich schließen, dass das T8 kurze Reaktionszeiten besitzt. Im Gegensatz dazu lieferten das MPS1 und das SIS keine

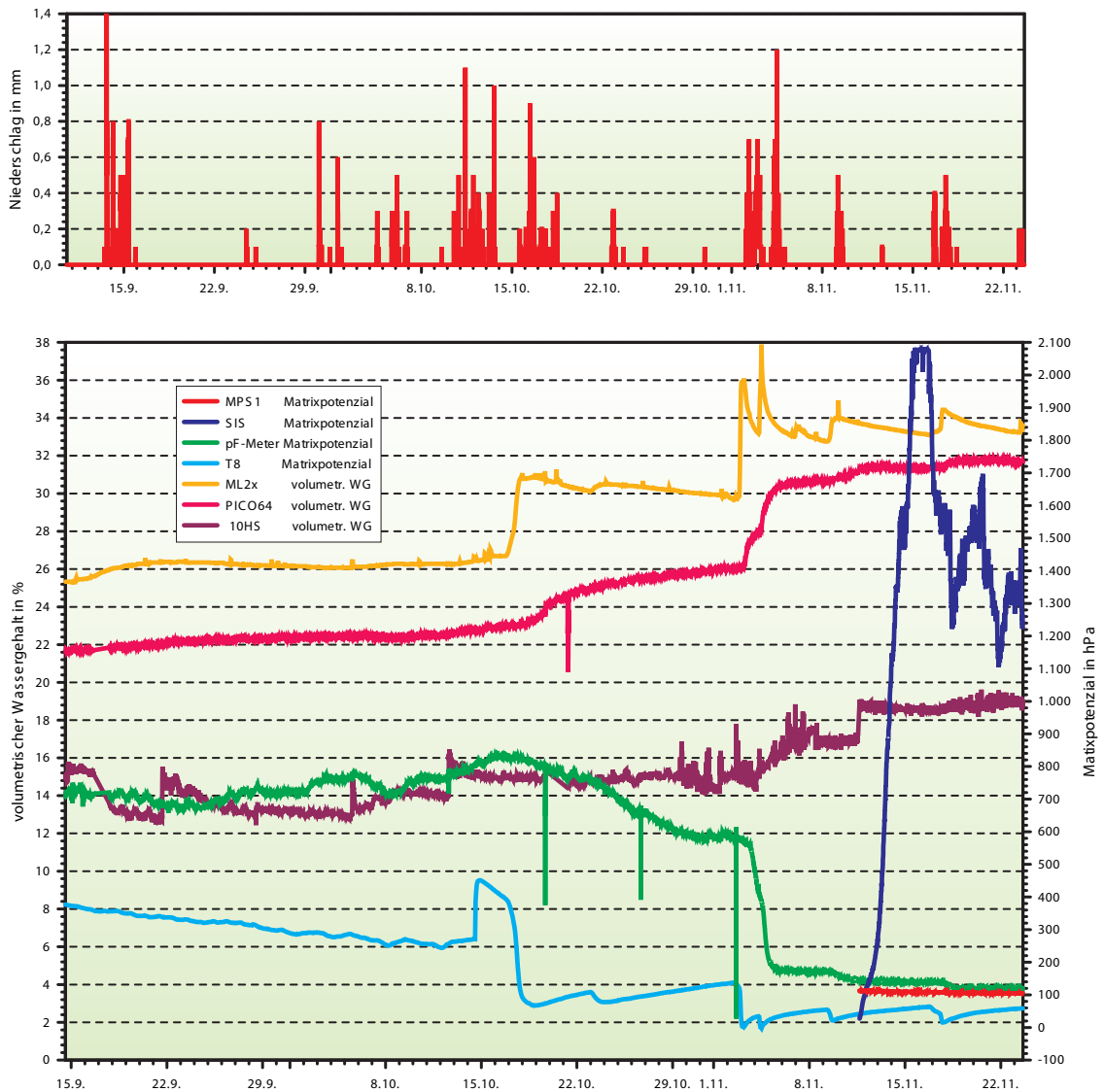


Abbildung 4.1: Verlauf Freilandmessung Bodenfeuchte und Niederschlag

korrekten Messwerte. Das MPS1 zeigte lediglich ein Rauschen am Messausgang. Der SIS erfasste Werte an der oberen Grenze des Messbereiches. Eine intensive Fehlersuche während der laufenden Messung erbrachte keine Befunde. Nach dem Einschicken untersuchte die Firma *UMS* beide Sensoren. Sie stellte fest, dass der MPS1 tatsäch-

lich defekt war. Vermutlich war eine Überspannung die Ursache des Schadens. Der SIS war nach der Prüfung jedoch funktionstüchtig. Ein neuer MPS1 und der geprüfte SIS wurden am 11. November 2009 wieder verbaut. In der restlichen Zeit der Messung erfasste das MPS1 Werte, die im Bereich zwischen den Messungen des pF-Meter und des T8 lagen. Dies macht deutlich, dass das MPS1 tatsächlich in den Genauigkeitsgrenzen ($\pm 50 \text{ hPa}$) richtig misst.

Das SIS hingegen zeigte starke Schwankungen, die bis an die obere Grenze des Messbereiches reichten. Die einzige Erklärung, die auch den vorherigen Verlauf begründen kann ist, dass das SIS keinen ausreichenden Kontakt zur Bodenmatrix hatte. Beim späteren Ausbau des Sensors konnte man aber den eingeschlammten Boden in den Sensoröffnungen und somit den gegebenen Kontakt zur Bodenmatrix erkennen. Bei den späteren Messungen im Laborprüfstand wurden ebenfalls nur zeitweilig korrekte Werte von SIS angezeigt. Das SIS hatte entgegen der Aussage der Überprüfung der Firma *UMS* tatsächlich einen Defekt.

Die Werte des pF-Meters konnten über den gesamten Messzeitraum erfasst werden. Das pF-Meter hatte deutlich schlechtere Reaktionszeiten als das T8. Im Vergleich zum T8 wurden durchgängig höhere Drücke gemessen. Dies kann durch die Heterogenität des Bodens und mit der Varianz des Matrixpotenzials unter Sensoren begründet werden. Da aber der Hersteller mit sehr kurzen Reaktionszeiten wirbt [21] und schon Vergleichsmessungen mit dem T8 veröffentlicht hat [20], lässt das die Vermutung zu, dass das pF-Meter eventuell ebenfalls mit nicht ausreichendem Kontakt zur Bodenmatrix eingebaut wurde. Dies würde die schlechte Reaktionszeit und die Druckdifferenz zum T8 erklären. Jedoch konnte beim Ausbau des Sensors eine gute Befeuchtung der Tonkeramik festgestellt werden.

Bis auf das pF-Meter konnten alle Sensoren problemlos aus dem Boden ausgebaut werden. Beim Ausbau des pF-Meters zerbrach die Tonkeramik. Der Sensor schlug mit leichter Kraft an eine Kante der Holzkonstruktion der Grube. Dies verursachte erhebliche Reparaturkosten. Die Firma *UMS* bietet im Vergleich für ihre produzierten Tensiometer eine lebenslange Garantie auf die Sinterkeramikkerzen an [59].

4.1.2 Wassergehaltssensoren

Das ML2x-FDR und das PICO64-TDR haben nach Herstellerangaben dieselbe Genauigkeit von $\pm 1 \text{ Vol.}\%$. Jedoch unterscheiden sich die Messwerte. Das ML2x und das PICO64 haben einen ähnlichen Kurvenverlauf mit einem Versatz von $1 \text{ Vol.}\%$ bis $2 \text{ Vol.}\%$ volumetrischen Wassergehalt.

Das ML2x reagiert mit deutlich erkennbaren Peaks auf die Regenereignisse. Das entspricht einem sehr guten Reaktionsvermögen.

Das PICO64 reagiert auf die Ereignisse gedämpft und erfasst ein zylindrisches Volumen von circa 1250 ml . Dies ermöglicht es, über ein größeres Bodenvolumen den volumetrischen Wassergehalt zu mitteln. Die TDR erfasst den Wassergehalt sowohl in tieferen als auch in höher gelegenen Schichten. Das Wasser braucht eine gewisse Zeit, um in tiefere Schichten zu gelangen und wird zusätzlich durch die verschiedenen Adhäsions- und Kohäsionskräfte in oberen Schichten gehalten (siehe Kap. 2.1.1). Diesen Zusammenhang kann man deutlich in der Abbildung 4.2 sehen. Die verwendeten Daten sind ebenfalls von den in Plot A1 B02 verbauten ML2x-Sonden. Die FDRs werden in verschiedenen Tiefen ($10, 20, 40, 70$ und 100 cm) vom *UFZ* betrieben. Die Graphen der FDR-Sonden in höher gelegenen Schichten zeigen höhere Bodenfeuchten und steilere Spitzen als die in tiefer gelegenen Schichten. Ebenso ist die Reaktion auf Regenereignisse zeitlich versetzt. Das Regenwasser befeuchtet die tiefer gelegenen Schichten erst später. Diese Eigenschaften des Bodens begründen durchaus das Verhalten der TDR.

Das 10HS zeigt wiederum keine deutlichen Anstiege bei Regenereignissen und misst mit einem deutlichen Versatz zum ML2x und PICO64. Die Genauigkeit mit $\pm 3\%$ nach Herstellerangabe kann auch den Versatz zwischen circa $10 \text{ Vol.}\%$ und $14 \text{ Vol.}\%$ nicht ausgleichen. Eine bodenspezifische Kalibrierung und der damit verbundene Offset können die Genauigkeit der 10HS stark erhöhen. Dennoch ist auch hier zu erwähnen, dass die Heterogenität des Bodens durchaus einen Einfluss auf die Messung gehabt haben kann.

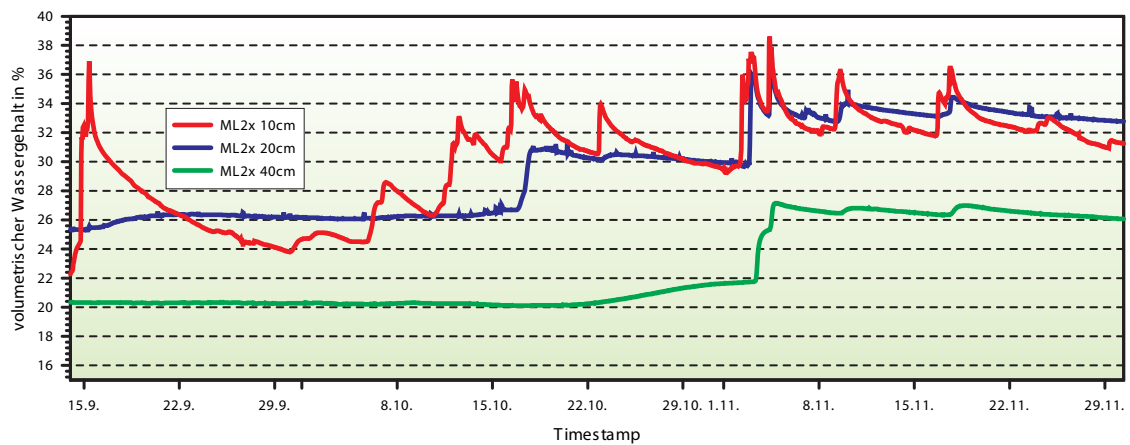


Abbildung 4.2: Verlauf der Freilandmessung der ML2X-FDRs in verschiedenen Tiefen im Plot A1 B02

4.1.3 Schlussfolgerung aus den Sensorvergleichen

Vor allem durch unterschiedliche Messvolumina haben die volumetrischen Wassergehaltssensoren verschiedene Verläufe aufgezeigt. Deshalb müssen die Sensoren entsprechend ihres Einsatzbereiches gewählt werden. Für das 10HS ist eine bodenspezifische Kalibrierung zu empfehlen.

Bei der direkten Matrixpotenzialmessung hat das T8 stellvertretend für das TS1, im Vergleich zum pF-Meter deutlich gezeigt, dass es mit einer hohen Präzision schnell auf Veränderung reagiert. Das MPS1 kann aufgrund der kurzen Messzeit nicht ausreichend bewertet werden.

Bis auf das SIS konnten alle verwendeten Sensoren auf ihr Verhalten während der Freilandmessung untersucht werden. Die Verwendbarkeit im *In-situ*-Betrieb konnte für die übrigen Sensoren bestätigt werden.

4.1.4 Eignung des Verfahrens zur Evaluierung

Der Vergleich der Matrixpotenzialsensoren und der Wassergehaltssensoren hat wichtige Eigenschaften wie Messbereich, Genauigkeit und Reaktionsgeschwindigkeit der Sensoren offen gelegt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Messungen *In situ* durchgeführt wurden und undefinierte Einflussgrößen auf die Messungen wirkten (siehe Kap. 2.4.1). Da es nicht gleichzeitig zwei Messungen an einem Ort geben kann und immer eine gewisse Heterogenität im Boden existiert, ist ein vollkommener Vergleich im Freiland unmöglich. Außerdem konnten in dem angegebenen Zeitraum die Messbereichsgrenzen der Sensoren durch komplette Befeuchtung und Austrocknung des Bodens nicht beurteilt werden.

Weiterhin hat sich für die Bewertung der Sensoren gezeigt, dass es wichtig ist, die Handhabung der Sensoren im Feld genauer zu prüfen. Denn oft werden die Eigenheiten nicht ausreichend in der Einbauanleitung beschrieben und es kann häufig zu Komplikationen kommen. Beides kann aufgrund eines schlechten Kontaktes zur Bodenmatrix passieren. So ist es vor allem von Nachteil, wenn die Sensoren in einer trockenen Periode eingebaut werden, denn dann ist das Bodengefüge sehr porös und eine Anbindung nur schwer möglich.

4.2 Sensorvergleich bei der normisierenden Charakterisierung von Wassergehaltssensoren

Bei den Messungen wurde pro Sensor und Standardflüssigkeit eine Messreihe von 140 Einzelwerten aufgenommen. Diese Menge an Messwerten ermöglichte es, die Standardabweichung zu ermitteln, da eine Messreihe von mindestens 100 Einzelwerten nötig ist (siehe Kap. 2.6).

In der Tabelle 4.1 werden der Mittelwert \bar{x} , die Standardabweichung σ , die absolute Abweichung F und die relative Abweichung für die jeweilige Messreihe angezeigt. Die Berechnungen erfolgten nach den Formeln in Kapitel 2.6.

| | | 1st 10HS | | | | 2nd 10HS | | | |
|-------------------------------------|-------|-------------------|--------------|--------------|---------|-------------------|--------------|--------------|---------|
| | | \bar{x} [Vol.%] | σ [%] | F [Vol.%] | f [%] | \bar{x} [Vol.%] | σ [%] | F [Vol.%] | f [%] |
| Dioxan | 11,3% | 9,991 | 0,567 | -1,309 | -1,309 | 12,499 | 0,088 | 1,199 | 0,120 |
| Dioxan | 23,3% | 23,150 | 0,604 | -0,150 | -0,007 | 24,155 | 0,085 | 0,855 | 0,043 |
| Dioxan | 34,2% | 30,551 | 0,551 | -3,649 | -0,122 | 34,587 | 0,146 | 0,387 | 0,013 |
| Dioxan | 42,6% | 33,805 | 0,704 | -8,795 | -0,220 | 36,705 | 0,071 | -5,895 | -0,147 |
| <i>i-C₃E₁</i> | 20,3% | 22,736 | 0,316 | 2,436 | 0,117 | 27,626 | 0,023 | 7,326 | 0,352 |
| <i>i-C₃E₁</i> | 30,2% | 29,583 | 0,042 | -0,617 | -0,020 | 27,178 | 0,062 | -3,021 | -0,100 |
| <i>i-C₃E₁</i> | 40,6% | 43,150 | 0,346 | 2,550 | 0,063 | 41,918 | 0,027 | 1,318 | 0,032 |
| <i>i-C₃E₁</i> | 51,8% | 46,998 | 0,039 | -4,804 | -0,093 | 46,412 | 0,007 | -5,388 | -0,104 |
| | | 3rd 10HS | | | | ML2x | | | |
| | | \bar{x} [Vol.%] | σ [%] | F [Vol. %] | f [%] | \bar{x} [Vol.%] | σ [%] | F [Vol. %] | f [%] |
| Dioxan | 11,3% | 13,185 | 0,065 | 1,885 | 0,189 | 10,281 | 0,001 | -1,019 | -0,102 |
| Dioxan | 23,3% | 25,659 | 0,055 | 2,359 | 0,118 | 22,980 | 0,003 | -0,320 | -0,016 |
| Dioxan | 34,2% | 35,012 | 0,060 | 0,812 | 0,027 | 35,680 | 0,000 | 1,480 | 0,049 |
| Dioxan | 42,6% | 39,285 | 0,110 | -3,315 | -0,083 | 40,461 | 0,012 | -2,139 | -0,053 |
| <i>i-C₃E₁</i> | 20,3% | 26,967 | 0,004 | 6,667 | 0,321 | 24,928 | 0,018 | 4,628 | 0,228 |
| <i>i-C₃E₁</i> | 30,2% | 31,649 | 0,016 | 1,450 | 0,048 | 31,358 | 0,000 | 1,146 | 0,038 |
| <i>i-C₃E₁</i> | 40,6% | 38,660 | 0,062 | -1,940 | -0,048 | 52,061 | 0,000 | 0,115 | 0,282 |
| <i>i-C₃E₁</i> | 51,8% | 47,512 | 0,022 | -4,288 | -0,083 | 57,267 | 0,000 | 5,467 | 0,106 |
| | | CS616 | | | | PICO64 | | | |
| | | \bar{x} [Vol.%] | σ [%] | F [Vol. %] | f [%] | \bar{x} [Vol.%] | σ [%] | F [Vol. %] | f [%] |
| Dioxan | 11,3% | 6,360 | 0,000 | -4,940 | -0,494 | 7,355 | 0,000 | -3,945 | -0,395 |
| Dioxan | 23,3% | 15,672 | 0,029 | -7,628 | -0,381 | 19,421 | 0,000 | -3,879 | -0,194 |
| Dioxan | 34,2% | 24,596 | 0,000 | -9,604 | -0,320 | 34,151 | 0,056 | 0,049 | -0,002 |
| Dioxan | 42,6% | 30,343 | 0,056 | -12,257 | -0,306 | 36,944 | 0,006 | -5,656 | -0,141 |
| <i>i-C₃E₁</i> | 20,3% | 13,912 | 0,000 | -6,388 | -0,307 | 21,115 | 0,054 | 0,815 | 0,027 |
| <i>i-C₃E₁</i> | 30,2% | 26,687 | 0,008 | -3,513 | -0,116 | 30,411 | 0,068 | 10,111 | 0,007 |
| <i>i-C₃E₁</i> | 40,6% | 42,442 | 0,004 | 1,842 | 0,045 | 47,293 | 0,067 | 6,693 | 0,165 |
| <i>i-C₃E₁</i> | 51,8% | 50,037 | 0,005 | -1,763 | -0,034 | 57,030 | 0,016 | 5,230 | 0,101 |

Tabelle 4.1: Ergebnisse der normisierende Charakterisierung

4.2.1 Genauigkeit der Sensoren

In der Abbildung 4.3 werden die Standardabweichung σ und die Linearität der Sensoren dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber wurde ein Diagramm mit den drei 10HS-Sensoren und ein Diagramm mit den ML2x, CS616, PICO64 und einem 10HS erstellt. Die Standardabweichung wird als Fehlerbalken und die Linearität als Linie im Diagramm eingezeichnet. Um die Linearität darstellen zu können, wurde eine lineare Regression durchgeführt.

Die Standardabweichung als Maß der Präzision (siehe Kap. 2.6) ist bei allen Sensoren sehr gering. Das heißt, dass alle Sensoren innerhalb der Genauigkeitsgrenzen des Herstellers liegen (siehe Tab.2.1).

Die absolute Abweichung der Sensoren, die in der Abbildung 4.4 dargestellt wird, ist ein Maß für die Richtigkeit (siehe Kap. 2.6) einer Messung. Die eingezeichneten

Grenzl意思 sind die Genauigkeitsbereiche, die der Hersteller angibt. Auch hier wurden der Übersichtlichkeit halber die Sensoren in zwei Diagramme aufgeteilt. Etwa durchschnittlich die Hälfte der Messwerte pro Sensor liegt außerhalb der Genauigkeitsgrenzen. Für keinen der Sensoren kann dieses Ergebnis befriedigend sein. Gerade der Faktor der Richtigkeit ist jedoch stark von systematischen Abweichungen abhängig. So existiert keine direkte Referenz für die Messungen, wodurch die Genauigkeit der Standardflüssigkeiten angezweifelt werden kann.

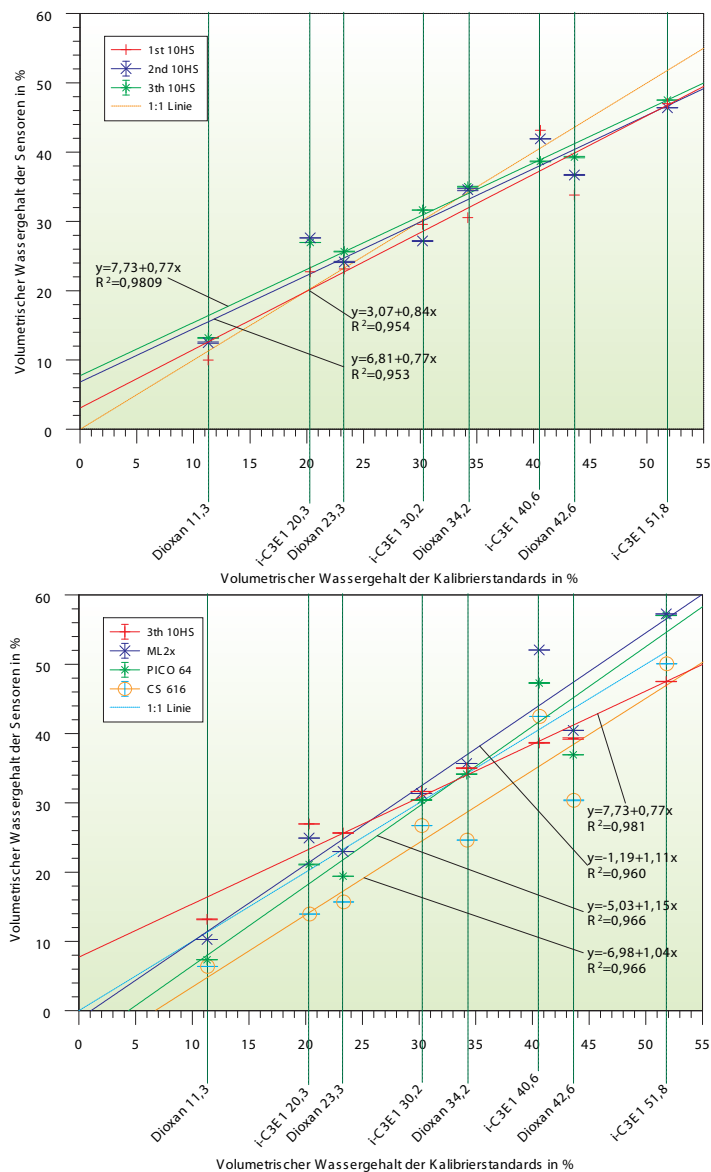


Abbildung 4.3: Standardabweichung und Linearität der Sensoren

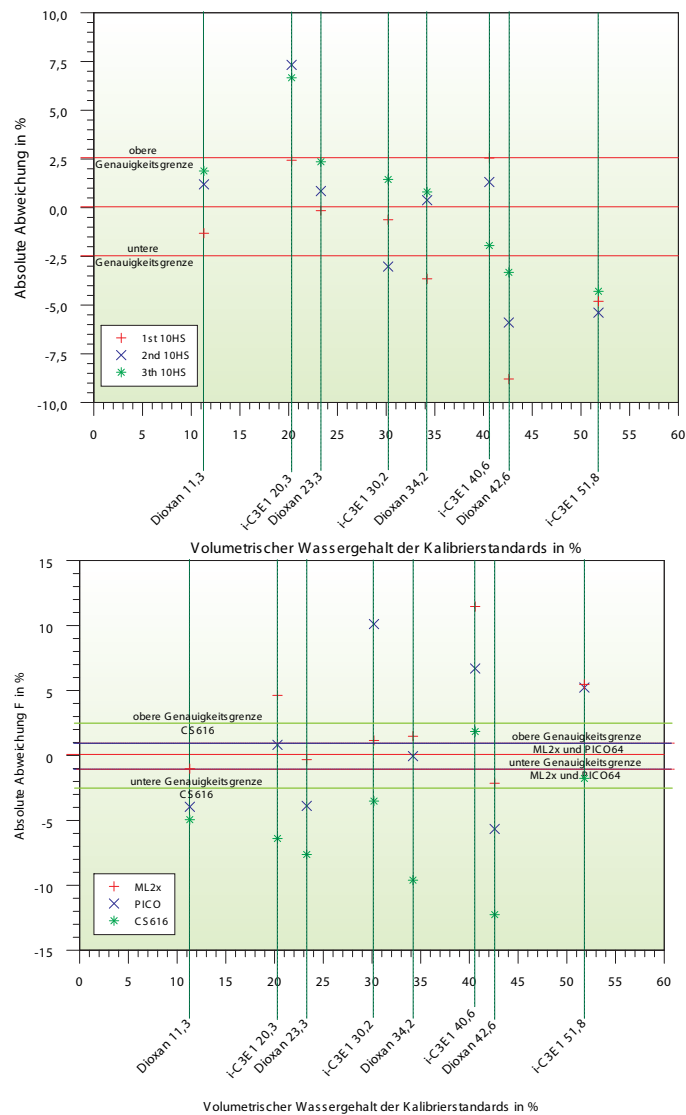


Abbildung 4.4: Absolute Abweichung der Sensoren

4.2.2 Schlussfolgerung aus den Sensorvergleichen

Alle Sensoren messen sehr präzise. Die teilweise starken absoluten Abweichungen und die damit verbundene geringe Richtigkeit können mit der Ermittlung des Versatzes aus Kalibrierkurve behoben werden. Dies ist aber nur möglich, wenn nachgewiesen ist, ob die systematische Abweichung tatsächlich bei den Sensoren liegt. Mit dem berechneten Offset und der hohen Präzision können grundlegend, in Bezug auf die Genauigkeit in dieser Untersuchung, alle volumetrischen Wassergehaltssensoren empfohlen werden.

4.2.3 Eignung des Verfahrens zur Evaluierung

Die normschaffende Charakterisierung ermöglicht es, die Sensoren sehr präzise zu testen. Die Homogenität der Flüssigkeiten spiegelt sich in den Messwerten wider. Es ist jedoch notwendig, die Standardflüssigkeiten mit einer Referenzmessung zu bestimmen, da sich allein beim Mischen der Flüssigkeiten ein systematischer Fehler von $4000 \text{ ml} \pm 30 \text{ ml}$ ergibt. So kann zum Beispiel mit einem Netzwerkanalysegerät Hewlett-Packard Modell 8720A mit einem SONDENSATZ für Permittivität Agilent 85070E [24] über das *Cole-Cole-Modell* (Gleichung (9) in [30]) die Permittivität der Flüssigkeiten bestimmt werden. Im Rahmen dieser Arbeit war leider der zeitliche und finanzielle Aufwand nicht gerechtfertigt (Nach Einschätzung von Prof. Rolf H. Jansen am Institut für theoretische Elektrotechnik der *RWTH Aachen*).

Mit der normschaffenden Charakterisierung können dann ebenfalls produktionsbedingte Varianzen gemessen und mit der ANOVA (analysis of variance) ermittelt werden. Hierzu sind aber wenigstens zehn gleiche Sensoren nötig, um eine solche Analyse durchzuführen [24].

4.3 Sensorvergleich im Laborprüfstand

Die im Laborprüfstand durchgeführten Messungen wurden in dem Zeitraum vom 4. August bis 7. September 2009 und vom 26. November bis 14. Dezember 2009 durchgeführt. Die Messwerte sind in der Tabelle 4.2 festgehalten. Dabei werden die Mittelwerte \bar{x} und die Standardabweichungen σ für jeden Sensor und jede Messung angezeigt.

In der ersten Versuchsreihe ist festgestellt worden, dass das TS1 keine korrekten Werte anzeigt. Dies zeigte sich durch eine Messwertabweichung von circa 1000 hPa . Nach der Reparatur konnte es in der zweiten Messreihe eingesetzt werden. Während der ersten Messreihe erlitt das SIS einen Defekt, der erst bei der Auswertung festgestellt wurde. Das pF-Meter konnte bei der zweiten Messreihe nach der Beschädigung im Freilandversuch nicht mehr verwendet werden (siehe Kap.4.1.1). Die zweite Messreihe diente vor allem der Aufnahme der Daten des TS1 und konnte die Anzahl der Messung der volumetrischen Bodenfeuchtesensoren erhöhen. Die Feuchten von 15,21, 27,10, 38,46, 58,57 und 60,67 *Vol.%* wurden in der ersten Messreihe

| Nr. | 1st 10HS | | 2nd 10HS | | 3th 10HS | | ML2x | |
|-----|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
| | \bar{x}_Θ [%] | σ [%] | \bar{x}_Θ [%] | σ [%] | \bar{x}_Θ [%] | σ [%] | \bar{x}_Θ [%] | σ [%] |
| 1. | 6,941 | 0,356 | 6,044 | 0,419 | 6,587 | 0,489 | 12,531 | 0,010 |
| 2. | 8,256 | 0,541 | 7,338 | 0,041 | 8,438 | 0,702 | 16,512 | 0,046 |
| 3. | 14,751 | 0,014 | 11,636 | 0,043 | 12,506 | 0,055 | 18,896 | 0,026 |
| 4. | 25,211 | 0,673 | 30,700 | 0,825 | 30,700 | 0,256 | 32,781 | 0,081 |
| 5. | 24,840 | 1,371 | 28,253 | 0,148 | 28,985 | 0,166 | 33,101 | 0,065 |
| 6. | 25,253 | 0,763 | 25,381 | 0,189 | 23,609 | 0,729 | 34,573 | 0,140 |
| 7. | 25,518 | 0,637 | 26,341 | 0,531 | 26,794 | 0,769 | 35,441 | 0,066 |
| 8. | 31,247 | 1,095 | 30,884 | 0,277 | 35,230 | 0,071 | 43,022 | 0,044 |
| 9. | 32,271 | 0,698 | 32,338 | 0,357 | 30,524 | 1,368 | 42,719 | 0,045 |

| Nr. | CS616 | | PICO64 | | MPS1 | | SIS | |
|-----|--------------------|--------------|--------------------|--------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| | \bar{x}_ψ [%] | σ [%] | \bar{x}_ψ [%] | σ [%] | \bar{x}_ψ [hPa] | σ [hPa] | \bar{x}_ψ [hPa] | σ [hPa] |
| 1. | 12,009 | 0,013 | 10,674 | 0,047 | 443,543 | 6,001 | - | - |
| 2. | 13,802 | 0,018 | 13,217 | 0,071 | 474,308 | 2,376 | - | - |
| 3. | 19,120 | 0,026 | 20,555 | 0,123 | 268,548 | 0,540 | - | - |
| 4. | 42,123 | 0,123 | 36,304 | 0,092 | 88,512 | 0,024 | 51,359 | 23,504 |
| 5. | 37,926 | 0,053 | 30,622 | 0,064 | 99,792 | 0,090 | - | - |
| 6. | 40,294 | 0,068 | 35,580 | 0,117 | 87,944 | 0,008 | - | - |
| 7. | 43,407 | 0,036 | 37,933 | 0,073 | 97,392 | 2,493 | 36,087 | 3,048 |
| 8. | 49,746 | 0,075 | 42,393 | 0,124 | 95,197 | 0,145 | 9,153 | 0,002 |
| 9. | 50,391 | 0,081 | 41,065 | 0,194 | 94,860 | 0,028 | - | - |

| Nr. | TS1 | | pF-Meter | | 1st VWC | | 2nd VWC | |
|-----|----------------------|----------------|----------------------|----------------|--------------|--|--------------|--|
| | \bar{x}_ψ [hPa] | σ [hPa] | \bar{x}_ψ [hPa] | σ [hPa] | Θ [%] | | Θ [%] | |
| 1. | - | - | 1619,572 | 20,748 | 15,131 | | 15,287 | |
| 2. | 653,496 | 14,907 | - | - | 19,534 | | 19,333 | |
| 3. | 363,752 | 1,074 | - | - | 22,506 | | 22,296 | |
| 4. | - | - | - | - | 28,768 | | 25,439 | |
| 5. | 59,524 | 0,312 | - | - | 31,586 | | 31,948 | |
| 6. | 59,399 | 0,227 | - | - | 34,474 | | 35,459 | |
| 7. | - | - | 99,041 | 0,565 | 39,131 | | 37,795 | |
| 8. | - | - | 1,058 | 0,000 | 59,518 | | 57,629 | |
| 9. | - | - | 1,058 | 0,000 | 72,303 | | 60,673 | |

Tabelle 4.2: Ergebnisse des Prüfstandversuches

und die Feuchten von 19,43, 22,40, 31,77 und 35,97 Vol.% wurden in der zweiten Messreihe hergestellt. Die fehlenden Messwerte in der Tabelle 4.2 resultieren aus den eben beschriebenen Defekten der Sensoren. Ebenfalls in der Tabelle 4.2 werden die volumetrischen Wassergehalte aus dem Trocknungsverfahren aufgeführt.

4.3.1 Matrixpotenzialsensoren

In der Abbildung 4.5 werden alle Messwerte der Matrixpotenzialsensoren mit Standardabweichungsbalken dargestellt. Zusätzlich ist die, durch die vier-parametrische Pedotransferfunktion nach *van Genuchten* (siehe Kap. 4.5.1) ermittelte, pF-WG-Kurve ebenfalls mit eingefügt. Diese Kurve wurde durch das RETC-Programm (siehe Kap. 4.5.2) mit der Korngrößenverteilung des Waldbodens (siehe Tab. 3.2) und

einer gemessenen Bodendichte von $1,012 \text{ g/cm}^3$, ermittelt. In diesem Diagramm wird die y-Achse nicht logarithmisch dargestellt, damit die Standardabweichung angezeigt werden kann. Es wird nur der Bereich der pF-WG-Kurve dargestellt, in dem Messwerte vorliegen. Die gemessenen Matrixpotenziale wurden ins Verhältnis zum volumetrischen Wassergehalt des PICO64 gesetzt, da es neben dem ML2x die höchste Genauigkeit aber zusätzlich das größere Messvolumen besitzt (siehe Tab. 2.1).

An der Verteilung der Messwerte im Bezug zur pF-WG-Kurve kann man abschätzen, dass die Sensoren zumindest sinnvolle Werte messen. Hierbei muss beachtet werden, dass die pF-WG-Kurve nach *van Genuchten* eine gemittelte Kurve ist, die die Hysterese außer Betracht lässt (siehe Kap. 2.1.3). Durch die unterschiedlichen Zeitpunkte der Schäden an den Sensoren kann kein Referenzsensor ermittelt werden. Das MPS1, an dem durchgängig gemessen wurde, ist seitens der Herstellerangaben zu ungenau, um es als Referenzsensor zu nutzen. Die Richtigkeit der Messung kann durch das Fehlen einer Referenzmessung nicht beurteilt werden.

Tendenziell geht aus den gemessenen Werten hervor, dass alle Matrixpotenzialsensoren bei höheren Drücken auch höheren Standardabweichungen unterliegen. Dieses Verhalten kann durch den im stetigen Prozess befindlichen Potenzialausgleich im Boden und zwischen Sensor und Boden begründet werden. Das Kapillarwasser verlagert sich permanent bei höheren Drücken in der Bodenmatrix (siehe Kap. 2.1.1). Dieser Effekt wird mitunter durch das Eindringen von Luft und der damit verbundenen Transpiration hervorgerufen (siehe Kap. 2.1). Hingegen wird bei niedrigeren Drücken in der Nähe der Sättigung der Porenraum fast ausschließlich durch Wasser gefüllt. Berücksichtigt man dieses Verhalten und die geringe Anzahl der Messwerte bei den meisten Sensoren, kann man dennoch die Präzision grob abschätzen. Obwohl das MPS1 relativ ungenau ist, besitzt es eine recht hohe Präzision (maximal 6 hPa) im Rahmen der Herstellerangaben. Die Präzision des TS1 liegt bei drei von vier Messung deutlich unter den Herstellerangaben. Bei der Messung in der Nähe der Messbereichsgrenze hat das TS1 jedoch eine Standardabweichung σ von circa 15 hPa . Dies kann mit dem oben genannten Potenzialausgleich zusammenhängen.

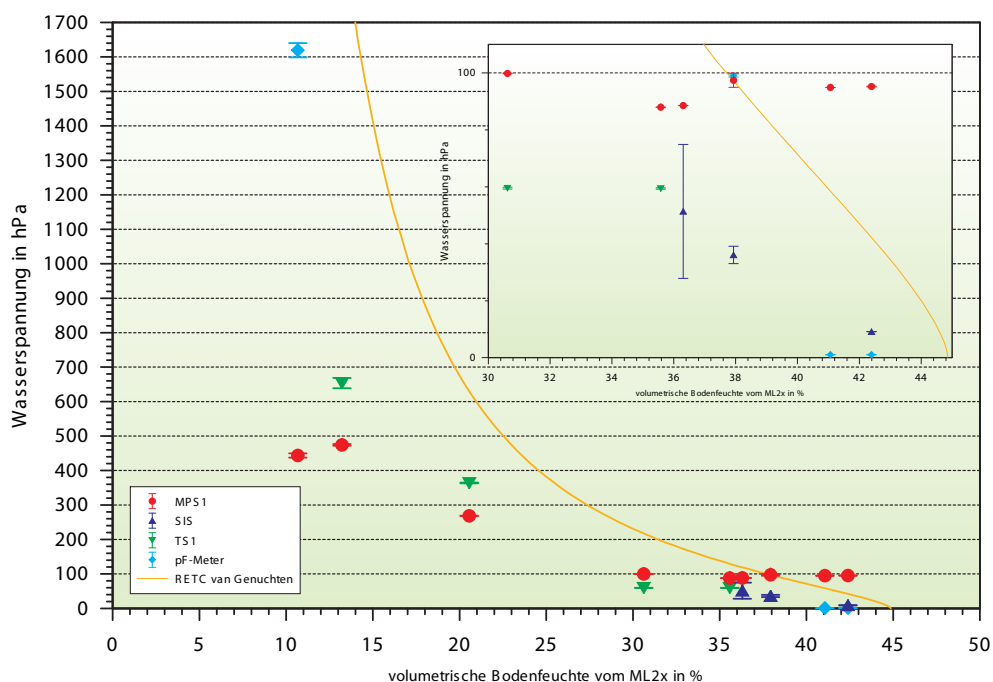


Abbildung 4.5: *Standardabweichung und Bezug der Sensoren zur konstruierten pF-WG-Kurve nach van Genuchten im Sensorprüfstand*

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich beim pF-Meter. Mit Ausnahme der zu hohen Standardabweichung von $20,7 \text{ hPa}$ beim gemessenen Matrixpotenzial ψ bei 1619 hPa wurden sehr hohe Präzisionen ermittelt. Bei dieser Schätzung lagen die Standardabweichungen σ der SIS bei zwei von drei Messungen außerhalb der Angaben des Herstellers.

4.3.2 Wassergehaltssensoren

Wie schon im Kapitel 4.2.1 in den Diagrammen abgebildet, wurde nun für die gemessenen volumetrischen Wassergehaltssensoren die Standardabweichung σ und die Linearität in dem Diagramm 4.6 dargestellt. Die Standardabweichung wurde als Fehlerbalken und die Linearität als Linie in diesem Diagramm eingefügt. In das Diagramm wurden alle verwendeten Sensoren eingezeichnet, im Gegensatz zum eben genannten Kapitel.

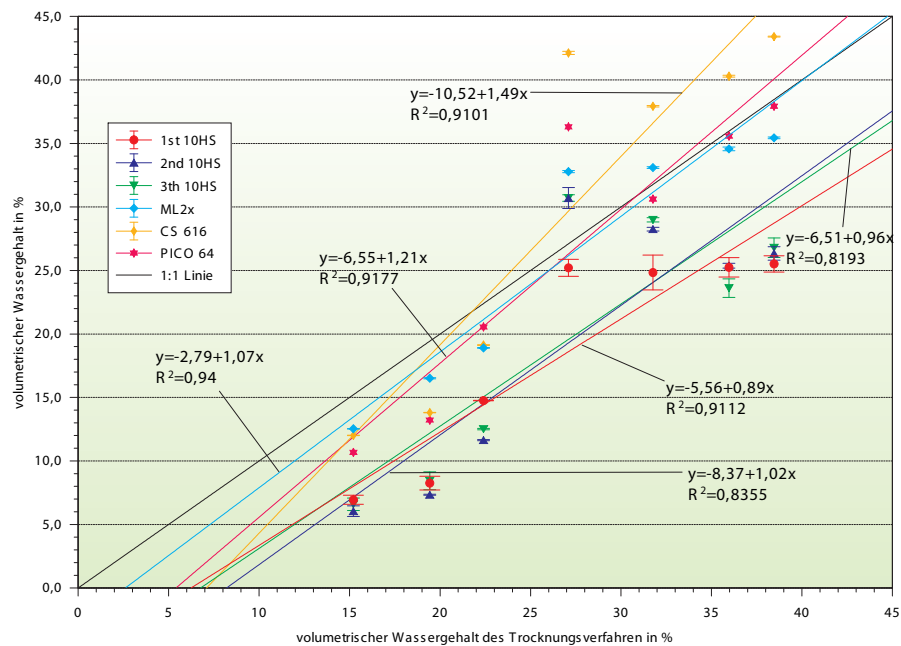


Abbildung 4.6: Standardabweichung und Linearität der Sensoren im Sensorprüfstand

Die absolute Abweichung der Sensoren wird in der Abbildung 4.7 vorgestellt. Beide Eigenschaften der Sensoren wurden auf den Mittelwert des zweifach bestimmten Trocknungsverfahren bezogen. Dieses eignete sich wegen der unabhängigen und direkten Bestimmungsmethode sich bestens als Referenz. Jedoch wurde deutlich, dass im Vergleich zu den indirekten Messverfahren bei höheren Bodenfeuchten sehr viel höhere Wassergehalte ermittelt worden sind. Das lag an der Sättigung des Bodens. Dadurch wurde bei der Probenentnahme, durch Entstehen einer Senke und dem Nachsickern von Wasser aus dem umgebenden Boden, mehr Wasser entnommen als im restliche Boden vorhanden ist. Somit wurde anschließend ein höherer Wassergehalt bestimmt. Aus diesem Grund wurden die Messreihen aus diesem Bereich im Vergleich nicht berücksichtigt. Sie können jedoch in der Tabelle 4.2 nachgelesen werden.

Weiterhin sollte der Mittelwert aus 28,768 und 25,439 Vol. % der Trocknungsmethode kritisch betrachtet werden, da sich dieser im Bezug zu den Messungen der Sensoren als „Ausreißer“ darstellt.

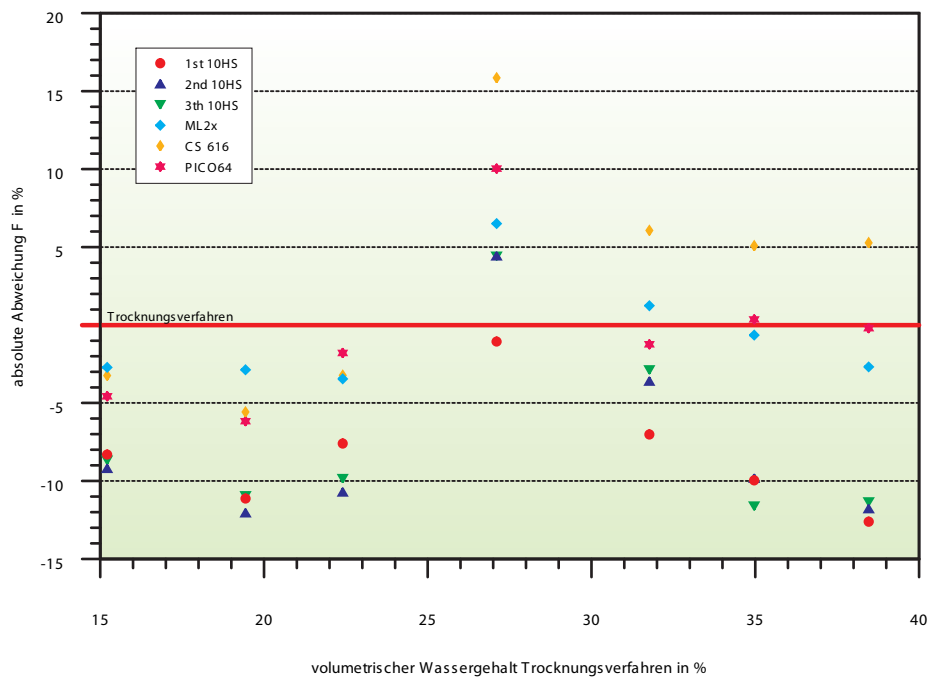


Abbildung 4.7: Absolute Abweichung der volumetrischen Wassergehaltssensoren im Bezug zum Trocknungsverfahren

Die Standardabweichung als Maß der Präzision (siehe Kap. 2.6) ist bei allen Sensoren sehr gering. Das heißt, dass alle Sensoren innerhalb der Genauigkeitsgrenzen der Hersteller liegen (siehe Tab. 2.1).

Bei der Untersuchung der Linearität kam es zu recht unterschiedlichen Ergebnissen. Der ML2x und die 10HS-Sensoren besitzen die beste Linearität. Der PICO64- und besonders der CS616-Sensor neigen zu einem steileren Anstieg. Die 10HS-Sensoren haben im Schnitt einen flacheren Anstieg.

Die absolute Abweichung der Sensoren, die in der Abbildung 4.7 dargestellt wird, ist ein Maß für die Richtigkeit einer Messung (siehe Kap. 2.6).

Anhand der Messwerte entsprechen der ML2x mit einer durchschnittlichen absoluten Abweichung von $-0,66 \text{ Vol. } \%$ und das PICO64 von $-0,51 \text{ Vol. } \%$ den Herstellerangaben. Das CS616 hat im Bereich von 0 bis 25 Vol.% eine geringe absolute Abweichung von circa $-4 \text{ Vol. } \%$ und in den höheren Bereichen von circa $8 \text{ Vol. } \%$. Die 10HS-Sensoren haben im Schnitt eine absolute Abweichung von $-7,5 \text{ Vol. } \%$.

4.3.3 Schlussfolgerung aus den Sensorvergleichen

Wie schon aus dem Vergleich im Kapitel 4.2.2 hervorgeht, können alle volumetrischen Wassergehaltssensoren durch die hohe Präzision und die gute Richtigkeit empfohlen werden. Die 10HS-Sensoren zeigten einen Versatz, der durch eine bodenspezifische Kalibrierung unter Laborbedingungen behoben werden kann. Das PICO64 und das ML2x hatten die größten Übereinstimmungen mit der 1:1 Linie. Das CS616 hatte gute Übereinstimmungen mit der 1:1 Linie bei geringem Wassergehalt. Allerdings neigte der Sensor bei höherem Wassergehalt zum Driften und zeigte höhere Werte an. Bei den Matrixpotenzialsensoren konnten tendenziell Werte in der Nähe der konstruierten pF-WG-Kurve ermittelt werden. Es konnten Schätzungen zur Präzision der Sensoren durchgeführt werden, die eine Beurteilung der Sensoren erlaubt.

4.3.4 Eignung des Verfahrens zur Evaluierung

Durch die Messung der volumetrischen Wassergehaltssensoren konnten bestimmte Eigenschaften, wie schon bei der *normschaffenden Charakterisierung von Wassergehaltssensoren* aufgezeigt, bestätigt werden. Auch hier konnten diese Sensoren sehr gut auf ihre Präzision getestet werden. Bei Wassergehalten von unter 40 Vol.% in tonigen oder schluffigen Böden kann das Trocknungsverfahren als Referenz eingesetzt werden. Bei Sandböden ist das Trocknungsverfahren ungeeignet, da schon ab 10 Vol.% Wassergehalt die Sättigung von Wasser im Boden stattfindet. Bei Sättigung kann Bodenwasser, wie schon in Kapitel 4.3.2 beschrieben, bei der Entnahme in die Bodenprobe zusätzlich einsinkern. Der Vergleich mit dem Trocknungsverfahren kann den Verwendung von Referenzsensoren ersparen. Der Einfluss der Heterogenität des Bodens auf die Messungen des volumetrischen Wassergehaltes kann durch die beschriebenen Maßnahmen auf ein Minimum reduziert werden. Dies wird durch die gute Übereinstimmung der Werte der baugleichen 10HS-Sensoren deutlich. Für die Überprüfung von volumetrischen Wassergehaltssensoren ist das Verfahren bestens geeignet.

Die Auswertung der Matrixpotenzialsensoren gestaltete sich dagegen schwieriger. Unabhängig vom Verfahren waren nur ungenügend Messwerte zur ausführlichen Auswertung vorhanden. Das Fehlen einer Referenz mit hoher Genauigkeit erschwerte

die Analyse. Eine konstruierte pF-WG-Kurve auf Grundlage der *van Genuchten*-Pedotransferfunktion deckte nicht die Hysterese ab und war somit als Referenz zur Beurteilung der Matrixpotenzialsensoren eher ungeeignet. Um die Beurteilungsfähigkeit des Verfahrens zu verbessern, kann man zum Beispiel die Verdunstungsmethode von *Wind/Schindler* [47] nutzen, um über die Auswertungsmethode von *Durner/Peters* [39] eine hochpräzise pF-WG-Kurve zu ermitteln. Mit diesem Verfahren könnten Matrixpotenzialsensoren sehr genau überprüft werden, indem sie parallel zu diesem Verfahren gemessen werden. Das Entwickeln eines Verfahrens zur Umsetzung und der finanzielle sowie zeitliche Aufwand, hätten jedoch den Rahmen dieser Arbeit gesprengt. Das Laborprüfverfahren ist grundlegend eine gute erste Prüfung für den *In-situ*-Betrieb von Bodenfeuchtsensoren im Labor.

4.4 Beurteilung der Sensoren

Die unterschiedlichen Bodenfeuchtesensoren sollen nun anhand der Ergebnisse der drei Untersuchungsverfahren in der Tabelle 4.3 beurteilt werden. Diese Beurteilung ist nicht endgültig, da zur Absicherung die Versuche mit mehreren Wiederholungen durchgeführt werden müssten. Die Ergebnisse liefern aber weitreichende und umfassende Erkenntnisse über die Eigenschaften der Sensoren. Die folgende Zusammenfassung der Ergebnisse entspricht einem vorläufigen Prüfbericht.

| Modell Sensorhersteller | TS1 UMS GmbH | pF-Meter ecoTech | SIS UMS GmbH | MPS1 Decagon |
|--|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Präzision | ++ | + | 0 | 0 |
| Richtigkeit | k.A. | k.A. | k.A. | k.A. |
| Reaktionsgeschwindigkeit | ++ | 0 | k.A. | k.A. |
| Messbereich | - | ++ | + | + |
| Handhabung und Wartung | - | - | 0 | + |
| Stromverbrauch | 0 | - | 0 | ++ |
| Störung des Bodens | - | + | + | ++ |

| Modell Sensorhersteller | 10HS Decagon | CS616 Campbell | ML2x Delta-T | PICO64 IMKO |
|--|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Präzision | + | + | + | + |
| Richtigkeit | - | 0 | + | ++ |
| Reaktionsgeschwindigkeit | + | + | ++ | + |
| Messbereich | + | + | + | ++ |
| Handhabung und Wartung | + | 0 | + | + |
| Stromverbrauch | ++ | + | 0 | - |
| Störung des Bodens | ++ | 0 | 0 | - |

Tabelle 4.3: *Beurteilung der Sensoren*

(++ sehr positiv; + positiv; 0 mittel; - negativ;
k.A. keine Aussage)

4.5 Modellierung der pF-WG-Kurve mittels Pedotransferfunktion

Mit Pedotransferfunktionen können die pF-WG-Kurve und die Permeabilität eines bestimmten Bodens ermittelt werden. Dabei sind die Korngrößenverteilung und die Lagerungsdichte des Bodens die Basisinformationen für den Transfer. Zusätzlich können zur Erhöhung der Genauigkeit noch die spezifischen volumetrischen Wassergehalte beim permanenten Welkepunkt und bei der Sättigung mit in die Berechnung einfließen (siehe Kap. 2.5).

In den folgenden Unterkapiteln wird eine geeignete Pedotransferfunktion für die Böden bestimmt, die in den Versuchen verwendet wurden. Danach wird eine Software zur Umsetzung gewählt und erläutert. Anschließend werden die Kurven generiert und verglichen. Zum Abschluss wird eine Aussage zur Verwendbarkeit für die Ermittlung des Matrixpotenzials getroffen.

4.5.1 Wahl der geeigneten Pedotransferfunktion

Bei der Wahl der geeigneten Pedotransferfunktion wurde darauf geachtet, eine etablierte und möglichst genaue Funktion zu verwenden. So ist die Pedotransferfunktion von *van Genuchten (1980)* mit vier Parametern für alle Böden am besten geeignet - mit Ausnahme der grobkörnigen und rein sandigen Böden [10]:

$$\Theta = \Theta_r + (\Theta_s - \Theta_r) \left[\frac{1}{1 + (\alpha |\Psi_m|)^n} \right]^{1-1/n} \quad (4.1)$$

Dabei sind Θ_s und Θ_r der volumetrische Wassergehalt bei Sättigung und Restfeuchtigkeit. Die Restfeuchtigkeit entspricht dem permanenten Welkepunkt (siehe Kap. 2.1.3). Die Parameter α und n stehen in Relation zu Φ_m^{-1} und beeinflussen die Kurvenform und den Wendepunkt. Diese Parameter hängen von der Korngrößenverteilung ab [10].

4.5.2 RETC-Programm zur Ermittlung der pF-WG-Kurve

Wie schon in Kapitel 2.5 kurz erwähnt, gibt es eine Vielzahl frei erhältlicher Programme zur Ermittlung der pF-WG-Kurve und der hydraulischen Leitfähigkeitskurve. *RETC* ist dabei ein vielfach zitiertes Programm, was die wichtigsten Eigenschaften der benötigten Software vereint.

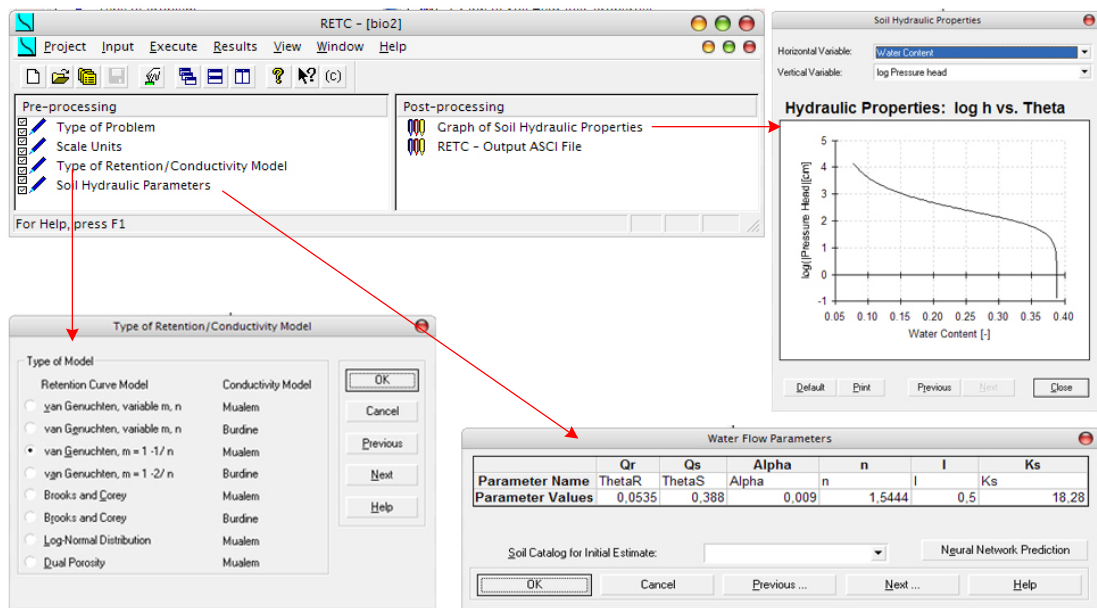


Abbildung 4.8: Benutzeroberfläche RETC

Es kann zwischen den Standardmodellen *van Genuchten (1980)*, *Brooks and Corey (1964)*, *Kosugi (1994)* und *Durner (1994)* gewählt werden. Ebenfalls kann die pF-WG-Kurve aus gemessenen Werten ermittelt werden. Oder man kann die Parametermodelle mit Hilfe der gemessenen Werte anpassen. Beim Menüpunkt *Type of Problem* kann zwischen dem gewünschten Ziel der Modellierung gewählt werden. So wird in dieser Untersuchung eine nicht gefittete Kurve gewünscht. Beim Menüpunkt *Type of Retention/Conductivity Model* wird zwischen den verschiedenen Pedotransferfunktionen gewählt. Dabei ist es uninteressant, in welcher Kombination die pF-WG-Pedotransferfunktionen (*Type of Retention Model*) zu den Pedotransferfunktionen zur Ermittlung der Permeabilität (*Type of Conductivity Model*) stehen, da diese nicht weiter genutzt werden und keinen Einfluss haben. Im Punkt *Soil Hydraulic*

Parameter können die Korngrößenverteilung, die Lagerungsdichte und optional die Parameter der *van Genuchten*-Pedotransferfunktion je nach Möglichkeit eingetragen oder zur Modellierung freigegeben werden. Danach kann die Modellierung via Execute-Befehl durchgeführt werden. Im Ergebnis können durch Variation der x- und y-Achse die verschiedenen Typen der pF-WG-Kurven erstellt oder die einzelnen Parameterpunkte in einer ASCII-Tabelle abgerufen werden (siehe Abb. 4.8).

4.5.3 Erstellen der pF-WG-Kurven

Für die Modellierung der pF-WG-Kurve des Plots B1 A02 auf der Biodiversitätsversuchsfläche wurden die Korngrößenverteilung aus [37] (siehe Tab. 4.4) und die Lagerungsdichte von $1,4 \text{ g/cm}^3$ aus [34] entnommen.

| <i>Korngröße</i> [μm] | <i>Bodenart</i> | <i>Anteil</i> [%] |
|------------------------------------|-----------------|-------------------|
| >632-63 | Sand | 41,5 |
| 63-6,3 | Schluff | 42,8 |
| 6,3-0,1< | Ton | 15,7 |

Tabelle 4.4: *Korngrößenverteilung im Plot B1 A02 in 20 cm Tiefe*

Diese Daten wurden dann in der *RETC*-Software in die *Soil Hydraulic Parameter* eingegeben und mit der vier-parametrischen *van Genuchten*-Pedotransferfunktion wurde die zugehörige pF-WG-Kurve berechnet. Diese Kurve wurde zusammen mit den Messwerten des T8-Tensiometers im Verhältnis zum ML2x-Wassergehaltssensor in die Abbildung 4.9 eingetragen.

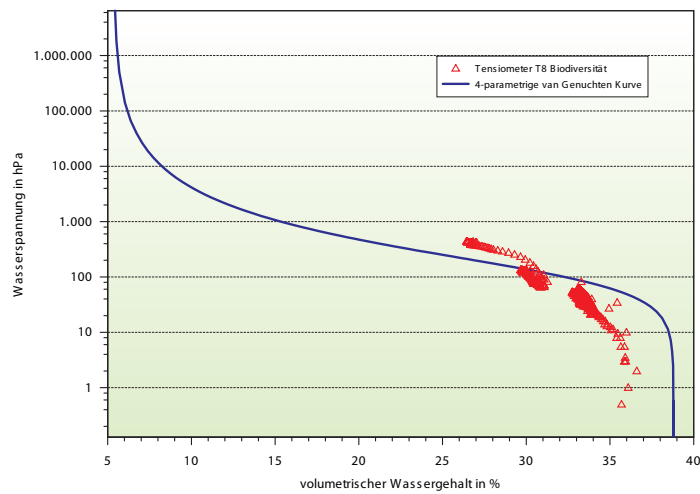


Abbildung 4.9: Vergleich der pF -WG-Kurve nach van Genuchten mit den Messwerten von der Biodiversitätsversuchsfläche

Ebenfalls wurde die Korngrößenverteilung aus der Tabelle 3.2 für die Ermittlung der pF -WG-Kurve des Waldbodens aus der Laborprüfstandsuntersuchung verwendet. Aus derselben Abfolge, wie oben beschrieben, wurde dann die Kurve in Abbildung 4.10 für den Waldboden generiert.

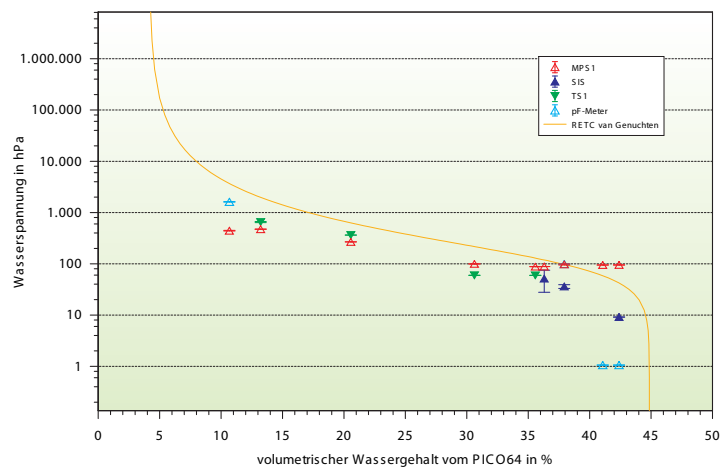


Abbildung 4.10: Vergleich der pF -WG-Kurve nach van Genuchten mit den Messwerten aus dem Laborprüfstand

4.5.4 Vergleich der Kurven

Wie in den Abbildungen 4.9 und 4.10 zu sehen ist, liegen die Messwerte in der Nähe der konstruierten pF-WG-Kurve. Die Kurve in Abbildung 4.9 wird im Vergleich zu den gemessenen Werten gestreckt. Die Kurve zeigt beim Matrixpotenzial unter $pF \geq 2$ etwa $pF \approx 0,1$ mehr an als beim gemessenen Wert. Ab etwa $pF \approx 2$ zeigt die Kurve etwa $pF \approx 0,1$ mehr an als beim gemessenen Wert. Diese Abweichung kann zum einen mit der Hysterisis (siehe Kap. 2.1.3) in der pF-WG-Kurve begründet werden und zum anderen mit der Heterogenität des Bodens und der damit verbundenen Abweichung der Messwerte. In der Abbildung 4.10 folgen die wenigen Messwerte dem Kurvenverlauf mit einem Offset von $pF \approx -0,2$ Matrixpotenzial. Um hierfür eine deutlich genauere Aussage treffen zu können, sind jedoch mehr Messwerte von einem genauen Messgerät wie dem Tensiometer vonnöten. Dies würde das Verhalten aus der Abbildung 4.9 begründen, da im Laborprüfverfahren keine Be- oder Entfeuchtung stattgefunden hat und somit auch keine Hysterisis.

4.5.5 Schlussfolgerung zur Verwendbarkeit der pF-WG-Kurve

Der Vergleich der gemessenen Werte mit der konstruierten pF-WG-Kurve hat gezeigt, dass mit einfach ermittelbaren Informationen wie der Korngrößenverteilung recht genaue Kurven modelliert werden können. Wenn das Matrixpotenzial aus der volumetrischen Bodenfeuchte einer solchen pF-WG-Kurve abgeschätzt werden soll, kann dieses Verfahren je nach Stärke der Hysterisis grobe bis sehr genaue Werte liefern. In dieser Untersuchung konnte eine Genauigkeit des Verfahrens auf $pF \pm 0,2$ ermittelt werden.

Um weiter die Genauigkeit des Verfahren zu erhöhen, können schon bereits genannte Zusatzinformationen wie der volumetrische Wassergehalt bei Sättigung und der permanente Welkepunkt mit in die Berechnung einfließen.

Kapitel 5

Schlussbetrachtung und Ausblick

Bei der Evaluierung der Messsensoren zur Ermittlung des Matrixpotenzials sind die Matrixpotenzialsensoren TS1, pF-Meter, SIS, MPS1 und die volumetrischen Wassergehaltssensoren PICO64, ML2x, CS616, 10HS auf ihre Eigenschaften hin erfolgreich überprüft worden. Dabei wurden die Verfahren zur Überprüfung im Freiland, die normschaffende Charakterisierung für elektromagnetische Wassergehaltssensoren und das Laborprüfverfahren angewendet. Diese Verfahren verdeutlichten jeweils die speziellen Eigenschaften der Sensoren. Auch zukünftig wird die Überprüfung im Freiland Grundvoraussetzung für die Evaluierung der Sensoren bleiben, da stets die Eignung im *In-situ*-Betrieb getestet werden muss.

Die normschaffende Charakterisierung zeichnet sich durch Homogenität des Messmediums aus und lässt so hochpräzise Aussagen über die Genauigkeit von elektromagnetischen Wassergehaltssensoren zu. Mit dieser Methode kann für alle volumetrischen Wassergehaltssensoren eine sehr hohe Präzision nachgewiesen werden. Für die Untersuchung der Richtigkeit der Messung muss eine Referenzmessung an den Kalibrierstandards durchgeführt werden. Um eine Etablierung dieses Verfahrens zu forcieren, ist es wünschenswert, wenn die Kalibrierstandards industriell mit einer hohen Genauigkeit im Mischungsverhältnis zur Verfügung gestellt werden.

Bei den eigens entwickelten Laborprüfverfahren konnten alle Bodenfeuchtesensoren getestet werden. Der Versuch, aus einem heterogenen Messmedium ein relativ homogenes zu schaffen, scheint gelungen. Dieses Verfahren überprüft die Sensoren nah an

den realen Messbedingungen. Die hohe Präzision der volumetrischen Wassergehaltssensoren konnte auch in diesem Verfahren bestätigt werden. Bei der Überprüfung der Matrixpotenzialsensoren hingegen konnte durch Häufung der Defekte der Sensoren keine umfassende Aussage zur Genauigkeit getroffen werden. Das Laborprüfverfahren kann jedoch nach der Methode von *Wind/Schindler* verbessert werden. Generell ist dieses Verfahren im Gegensatz zur normschaffenden Charakterisierung mit einem größeren experimentellen und zeitlichen Aufwand verbunden.

Im weiteren Verlauf wurde die *van Genuchten*-Pedotransferfunktion zur Ermittlung der modellierten pF-WG-Kurve im Programm *RETC* angewandt und mit den Messungen aus den Freiland- und Laborverfahren verglichen. Diese pF-WG-Kurve ermöglicht es, mit einer abgeschätzten Genauigkeit $pF \pm 0,2$ aus dem gemessenen volumetrischen Wassergehalt das Matrixpotenzial zu bestimmen. Das daraus ermittelte Matrixpotenzial eignet sich durchaus für eine Pumpensteuerung zur Bodenwasserentnahme oder auch für eine Bewässerungssteuerung. Somit können in diesem Zusammenhang volumetrische Wassergehaltssensoren zur Bestimmung des Matrixpotenzials verwendet werden.

Sowohl die Matrixpotenzial- als auch die volumetrischen Wassergehaltssensoren sind für die Ermittlung des Matrixpotenzials als Stellgröße für eine Pumpensteuerung geeignet. Bei der Wahl des passenden Sensors kann nun zwischen Genauigkeit, Lebensdauer, Wartungsintensität und dem Preis abgewogen werden. Hierbei kann die Tabelle 4.3 zur *Beurteilung der Sensoren* sowie die Zusammenfassung der *technischen Daten* in Tabelle 2.1 als eine sinnvolle Entscheidungshilfe dienen.

Auch in naher Zukunft bleibt das Evaluieren von Bodenfeuchtemesstechnik ein aktuelles Thema, da noch kein umfassendes Verfahren zur präzisen Bestimmung der Genauigkeit der Sensoren entwickelt wurde. Außerdem werden weiterhin neue Bodenfeuchtesensoren entwickelt und etablierte Messverfahren noch verbessert. So wird beispielweise die großflächige Wassergehaltsbestimmung, wie Spatial-Time-Domain-Reflectometry [27] und das COSMOS-System [53], in den Mittelpunkt der Untersuchungen rücken.

ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Diplomarbeit sind vier Matrixpotenzialsensoren und vier volumetrische Wassergehaltssensoren auf ihren Eigenschaften hin untersucht worden. Bei den Evaluierungen wurden verschiedene Untersuchungsverfahren eruiert und angewandt. So wurden die Sensoren im Freiland untersucht, es wurde eine normschaffende Charakterisierung für elektromagnetische Wassergehaltssensoren genutzt und die Sensoren wurden in einem eigens entwickelten Laborprüfstand getestet.

Basis für die Untersuchungen bildet der Grundlagenteil, in dem zum besseren Verständnis die hydraulischen Bodeneigenschaften, die Messmethoden zur Bodenfeuchtebestimmung, die verwendeten Sensoren und die Verfahren zur Überprüfung genauer beschrieben werden. Weiterhin werden die Begriffe Genauigkeit und Pedotransferfunktion erklärt.

Im *Material- und Methodenteil* werden der Versuchsaufbau und die wissenschaftlichen Hintergründe der drei Prüfverfahren beschrieben. Im Kapitel *Ergebnisse und Diskussion* werden die Ergebnisse der Prüfverfahren vorgestellt und diskutiert.

Dabei ist festgestellt worden, dass die volumetrischen Wassergehaltssensoren mit einer hohen Präzision messen. Die Richtigkeit dieser Sensoren konnte jedoch nicht eindeutig bestimmt werden. Den Matrixpotenzialsensoren wurde eine grundlegende Richtigkeit der Messergebnisse nachgewiesen. Anschließend wurde eine Pedotransferfunktion ermittelt, die mit der höchsten Genauigkeit aus der Korngrößenverteilung und Lagerungsdichte des jeweiligen Bodens eine pF-WG-Kurve modelliert. Dabei wurde aus einer Auswahl an Programmen das RETC-Programm gewählt. Der Vergleich aus den konstruierten pF-WG-Kurven und den Messwerten aus der Freiland- und Labormessung ergab eine gute Genauigkeit. Dies bestätigt die Annahme, dass es im Rahmen der Bereitstellung des Matrixpotenzials zur Pumpensteuerung zur Bodenwasserentnahme möglich ist, volumetrische Wassergehaltssensoren zu verwenden. Abschließend wird im Kapitel *Schlussbetrachtung und Ausblick* die Arbeit resümiert und ein Ausblick in die weitere Entwicklung der Evaluierung von Bodenfeuchtesensoren gegeben.

Anzahl der Seiten der Arbeit.: [76], der Abb.: [29], der Tab.: [7], der Lit.: [62]

Literaturverzeichnis

- [1] AHLGRIMM, H.: *Different Principles of Moisture Measuring*. Landbauforschung Völkenrode, 27(2):97–104, 1977.
- [2] AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS: *Rosetta, Software*. www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8953, 1999.
- [3] BAMBACH, GBR: *Tensiomark*. <http://www.tensiomark.info>, 2008.
- [4] BLONQUIST, J.: *Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors: Part 2. Evaluation of seven sensing systems*. Vadose zone journal, 4(4):1059–1069, 2005.
- [5] BLUME, HANS-PETER: *Handbuch der Bodenuntersuchung: Terminologie, Verfahrensvorschriften und Datenblätter ; physikalische, chemische, biologische Untersuchungsverfahren ; gesetzliche Regelwerke*. Beuth, Berlin, 2000.
- [6] BOGENA, H., R.; HUISMAN J. A.: *Characterization of ECH2O capacitance sensors for measuring soil water content: unpublished Technical Report*. FZ-Jülich, Jülich, 2007.
- [7] BOGENA, H., R.; HUISMAN J. A.; OBERDÖRSTER C.; VERECKEN V.: *Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications*. Journal of Hydrology, 344(1-2):32 – 42, 2007.
- [8] CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.: *CS616 & CS625: Water Content Reflectrometer: Issued: 7.8.06 manual*, 2006.
- [9] CARY, W., J.; GEE W. G.; SIMMONS S. C.: *Using an Electro-Optical Switch to Measure Soil Water Suction*. Soil Sci Soc Am J, 55(6):1798–1800, 1991.

- [10] CORNELIS, WIM, M.; KHLOSI, MUHAMMED; HARTMANN, ROGER; VAN MEIRVENNE, MARC; DE VOS, BRUNO: *Comparison of Unimodal Analytical Expressions for the Soil-Water Retention Curve*. Soil Sci Soc Am J, 69:1902–1911, 2005.
- [11] DANE, JACOB, H.: *Physical methods*, Band 5 der Reihe *Soil Science Society of America Book Series*. Soil Science Society of America, Madison, Wis., 2002.
- [12] DECAGON DEVICES, INC.: *10HS soil moisture sensor: Operator's Manual Version 1.0*, 2008.
- [13] DECAGON DEVICES, INC.: *Dielectric Water Potential Sensor: Operator's Manual: Version 3.0*, 2009.
- [14] DELTA-T: *ThetaProbe SOIL MOISTURE SENSOR: Type ML2x User Manual: ML2x-UM-1.21*, 1999.
- [15] DIN, DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 1319-3, Mai 1996. Grundlagen der Meßtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit*. Beuth, Berlin, 1996.
- [16] DIN, DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*. Beuth, Berlin, 1. Auflage, 1996.
- [17] DIN, DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Qualitätsmanagement und Statistik: Begriffe*, Band 223 der Reihe *DIN-Taschenbuch*. Beuth, Berlin, 3. Aufl.: Stand April 2001. Auflage, 2001.
- [18] DONATELLI, MARCELLO; ACUTIS, MARCO: *Soilpar, Software*. www.sipeaa.it/ASP/ASP2/SOILPAR.asp, 2002.
- [19] DURNER, W.: *Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties*. Journal of hydrology, 356(1-2):147–162, 2008.
- [20] ECOTECH, GMBH: *pF-Meter*. www.ecotech-bonn.de/de/produkte/bodenkunde/pf-meter.html, 2009.
- [21] ECOTECH, GMBH: *pF-Meter: Bedienungsanleitung*, 2009.

- [22] FAO-UNESCO: *Soil map of the world. Revised legend with corrections and update.* [www.lib.berkeley.edu/EART/UCONLY/fao/Europe & W. of Urals](http://www.lib.berkeley.edu/EART/UCONLY/fao/Europe%20&%20W.of%20Urals), 1997.
- [23] GENUCHTEN, TH.; LEIJ, F. J.; YATES M. VAN: *RETC, Software.* www.epa.gov/ada/csmos/models/retc.html, 1991.
- [24] GERL, N.; ROSENBAUM, U.; BOGENA, H., R.; HUISMAN J., A.: *Test calibration of ECH2O 10HS by using standard liquids: unpublished technical report.* FZ-Jülich, Jülich, 2009.
- [25] HARTGE, HEINRICH, K.; HORN RAINER: *Einführung in die Bodenphysik: 19 Tabellen.* Enke, Stuttgart, 3. überarb. Auflage Auflage, 1999.
- [26] HARTGE, HEINRICH, K.; HORN RAINER: *Die physikalische Untersuchung von Böden: [Praxis, Messmethoden, Auswertung].* Schweizerbart, Stuttgart, 4., vollst. überarb Auflage, 2009.
- [27] HÜBNER, CHRISTOF; SCHLAEGER, STEFAN; KUPFER, KLAUS: *Ortsauflösende Feuchtemessung mit Time-Domain-Reflektometrie.* tm - Technisches Messen, 74:316–326, 2007.
- [28] IMKO, GMBH: *Comparison of TRIME-TDR (time domain) and capacitive (frequency domain) moisture measuring systems.* www.sowacs.com/feature/IMKO/TDRFDRCompare.htm, 2001.
- [29] IMKO, GMBH: *TRIME-PICO 64/32: User Manual*, 2008.
- [30] JONES, S.: *Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors: Part 1. Methodology.* Vadose zone journal, 4(4):1048–1058, 2005.
- [31] KAATZE, U.: *Dielectric relaxation spectrometry of mixtures of water with isopropoxy- and isobutoxyethanol. Comparison to unbranched poly(ethylene glycol) monoalkyl ethers.* The Journal of physical chemistry, 100(6):2360–2366, 1996.
- [32] KLUGE, GERHARD; MÜLLER-WESTERMEIER, GERHARD; CAPPEL A: *Das Klima ausgewählter Orte der Bundesrepublik Deutschland: Jena*, Band 213 der

- Reihe *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*. Dt. Wetterdienst, Offenbach am Main, 2000.
- [33] KOLLE, OLAF: *Wetterdaten*. www.bgc-jena.mpg.de/wetter, 2009.
- [34] KREUTZIGER, YVONNE: *Rückkopplungseffekte verschieden diverser Grünland-ökosysteme auf die Komponenten des Bodenwasserhaushalt an einem Auestandort der Saale: Dissertation*. FSU-Jena, Jena, 2006.
- [35] KUHLMANN, IRIS: *Texturanalyse Waldboden: unveröffentlichte Untersuchung*. Max Planck Institut für Biogeochemie, Jena, 2002.
- [36] LÜHR, KORD, H.: *Entwicklung eines Prüfverfahrens für Bodenfeuchtesensoren: Dissertation*. Grauer, Beuren, 2000.
- [37] ORTLEPP, SABINE: *Holozäne fluviale Dynamik im mittleren Saaletal. Sedimentologische Untersuchungen in der Unterraue: Diplomarbeit*. FSU-Jena, Jena, 2004.
- [38] PACHEPSKY, Y.: *Development of pedotransfer functions in soil hydrology*, Band 30 der Reihe *Developments in soil science*. Elsevier, Amsterdam, 2004.
- [39] PETERS, A.; DURNER, W.: *A simple model for describing hydraulic conductivity in unsaturated porous media accounting for film and capillary flow*. *Journal of Hydrology*, 359:147–162, 2008.
- [40] PLAGGE, R.; MALICKI, M. A.: *Application of Time-Domain-Reflectometry (TDR) soil-moisture miniprobe for determination of unsaturated soil-water characteristics from undisturbed soil cores*. *Irrigation science*, 13(2):65–72, 1992.
- [41] PLAGGE, RUDOLF; RENGER, MANFRED; RÖTH CHRISTIAN H.: *A new laboratory method to quickly determine the unsaturated hydraulic conductivity of undisturbed soil cores within a wide range of textures*. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 153(1):39–45, 1990.
- [42] PLATE, ERICH, J.; ZEHE ERWIN: *Hydrologie und Stoffdynamik kleiner Einzugsgebiete: Prozesse und Modelle ; mit 90 Tabellen*. Schweizerbart, Stuttgart, 2008.

- [43] RASCHICK, A.: *Untersuchung von Böden mit hochauflösendem Georadar und Geoelektrik im Modelltrog: Diplomarbeit*. Technische Universität Berlin, Berlin, 2005.
- [44] ROBERTSON, PHILIP, G.: *Standard soil methods for long-term ecological research*, Band 2 der Reihe *Long-term ecological research network series*. Oxford Univ. Press, New York, NY, 1999.
- [45] ROWELL, DAVID, L.: *Bodenkunde: Untersuchungsmethoden und ihre Anwendung ; mit 103 Tabellen*. Springer, Berlin, 1997.
- [46] SCHEFFER, FRITZ; SCHACHTSCHABEL, PAUL: *Lehrbuch der Bodenkunde: 100 Tabellen*. Enke, Stuttgart, 14., neu bearb. und erw. Auflage, 1998.
- [47] SCHINDLER, U.: *Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben*. Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd., 24:1–7, 1980.
- [48] SCHMIDT, HUBERT: *Warum GUM? - Kritische Anmerkungen zur Normdefinition der 'Messunsicherheit' und zu verzerrten 'Elementarfehlermodellen'*. ZfV, 128(5):303 – 312, 2003.
- [49] SCHMUSCH, WOLFGANG: *Elektronische Meßtechnik: Prinzipien, Verfahren, Schaltungen*, Band 6 der Reihe *Vogel-Fachbuch*. Vogel, Würzburg, 6., durchges. Aufl. Auflage, 2005.
- [50] SCHUMACHER, J.: *The role of biodiversity for element cycling and trophic interactions: an experimental approach in a grassland community*. Basic and applied ecology, 5(2):107–121, 2004.
- [51] SCHWANK, M.: *Characterization of EnviroSMARTTM Capacitance Sensors for Measuring Soil Water Content: published Technical Report*. e-collection.ethbib.ethz.ch/eserv/eth:28311/eth-28311-01.pdf, 2006.
- [52] SENTEK PTY LTD: *EnviroSMARTTM and EasyAGTM SDI-12 Probe Interface Manual Version 3.4*, 2003.

- [53] SERRA, YOLANDE : *AS Horizons*. Atmospheric Sciences Section of AGU Newsletter, 3:3–4, 2009.
- [54] SEYFRIED, M., S.: *Field Calibration and Monitoring of Soil-Water Content with Fiberglass Electrical-Resistance Sensors*. Soil Science Society of America Journal, 57(6):1432–1436, 1993.
- [55] SIGMUND LINDNER GMBH: *SiLibeads: Glass Beads TYP S*. www.sigmund-lindner.com, 2009.
- [56] SIHVOLA, ARI: *Electromagnetic mixing formulas and applications*, Band 47 der Reihe *IEE electromagnetic waves series*. Institution of Electrical Engineers, London, 2008.
- [57] TOPP, C., G.; DAVIS L. J.; ANNAN P. A.: *Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines*. Water Resour. Res., 16, 1980.
- [58] UMS, GMBH: *Bedienungsanleitung SIS*, 2004.
- [59] UMS, GMBH: *UMS Katalog Version 2.0*. www.ums-muc.de, 2006.
- [60] UMS, GMBH: *Bedienungsanleitung Tensiometer TS1*, 2008.
- [61] WHITE, EDWIN, R.: *Principles and practice of soil science: The soil as a natural resource*. Blackwell, Malden, Mass., 4. ed. Auflage, 2006.
- [62] YODER, E., R.: *Soil Water Sensor Performance*. Applied Engineering in Agriculture, 1998(Nr. 14(2)):121–133, 1998.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Prinzip der Pumpensteuerung zur Bodenwasserentnahme | 5 |
| 2.1 | Verteilung von Wasser im Boden (nach Rowell, 1997) | 7 |
| 2.2 | pF-WG-Kurve (Scheffer, 1998) | 10 |
| 2.3 | Hysteresisschleife für einen Sandboden (Scheffer, 1998) | 11 |
| 2.4 | Frequenzspektren (IMKO GmbH, 2007) www.imko.de/DE/images/stories/Frequenzspektren.jpg, 15.12.08 . . . | 13 |
| 2.5 | Tensiometer Schaubild upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/Tensiometer.png, 01.10.2009 | 14 |
| 2.6 | Tensiometer (UMSGmbH, 2008) | 17 |
| 2.7 | pF-Meter (ecoTech, 2009) Photo: Sebastian Gimper, 07.05.2009 | 17 |
| 2.8 | SIS (UMS GmbH, 2004) | 18 |
| 2.9 | MPS1 (Decagon, 2009) | 18 |
| 2.10 | 10HS (Decagon, 2008) | 19 |
| 2.11 | ML2x (Delta-T, 1999) | 19 |
| 2.12 | CS616 (Campbell Scientific Ltd., 2006) | 20 |
| 2.13 | PICO64 (IMKO Micromodultechnik GmbH, 2009) | 20 |
| 2.14 | Präzision und Genauigkeit | 26 |
| 3.1 | Biodiversitätversuchsfläche auf der Saaleaue bei Jena (05/2003) (Photo: J. Baade) | 28 |
| 3.2 | Einbau der Messtechnik auf der Biodiversitätversuchsfläche | 29 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.3 | Laboraufbau normschaffende Charakterisierung (07/2009) (Photo: S.Gimper) | 32 |
| 3.4 | Laboraufbau Sensorprüfstand (08/2009) (Photo: S.Gimper) | 35 |
| 4.1 | Verlauf Freilandmessung Bodenfeuchte und Niederschlag | 37 |
| 4.2 | Verlauf der Freilandmessung der ML2X-FDRs in verschiedenen Tiefen im Plot A1 B02 | 40 |
| 4.3 | Standardabweichung und Linearität der Sensoren | 43 |
| 4.4 | Absolute Abweichung der Sensoren | 44 |
| 4.5 | Standardabweichung und Bezug der Sensoren zur konstruierten pF- WG-Kurve nach <i>van Genuchten</i> im Sensorprüfstand | 48 |
| 4.6 | Standardabweichung und Linearität der Sensoren im Sensorprüfstand | 49 |
| 4.7 | Absolute Abweichung der volumetrischen Wassergehaltssensoren im Bezug zum Trocknungsverfahren | 50 |
| 4.8 | Benutzeroberfläche RETC | 55 |
| 4.9 | Vergleich der pF-WG-Kurve nach <i>van Genuchten</i> mit den Messwerten von der Biodiversitätsversuchsfläche | 57 |
| 4.10 | Vergleich der pF-WG-Kurve nach <i>van Genuchten</i> mit den Messwerten aus dem Laborprüfstand | 57 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Technische Daten der Sensoren | 21 |
| 3.1 | Berechnete Permittivitäten der Flüssigkeitsstandards und der äquivalente Wassergehalte nach <i>Topp [1980]</i> [57] | 31 |
| 3.2 | Korngrößenverteilung des Waldbodens | 34 |
| 4.1 | Ergebnisse der normstiftende Charakterisierung | 42 |
| 4.2 | Ergebnisse des Prüfstandversuches | 46 |
| 4.3 | Beurteilung der Sensoren (++ sehr positiv; + positiv; 0 mittel; - negativ; k.A. keine Aussage) | 53 |
| 4.4 | Korngrößenverteilung im Plot B1 A02 in 20 cm Tiefe | 56 |

A CRBASIC-PROGRAMM BODENFEUCHTESENSOREN

'CR1000 Series Datalogger

'Author: Sebastian Gimper

'Date: 09.09.2009

,

'program to read one 10HS, one PICO 65, one MPS-1, one SIS and one pF-Meter

'this program is made for Versuch17

,

,

'wiring soil moisture sensors:

,

'Decagon 10HS sensor

'white 12V

'red SE 1

'bare GND

,

'IMKO PICO 64

'pink shield GND 'grey 0..1V = -40..+70DEG C soil temperature Diff 2 H

'violet AGND Diff 2 L

'white 0..1V = 0..100% vol. water content Diff 3 H

'blue COM (IMP-Bus)

'green R/t (IMP-BUS)

'black GND G

'red +Vs SW12

,

'you have to connect a cable from 4 L to 5 L

,

'TRIME-PICO64 needs 100mA@12V/DC during 2..3sec of measuring (600mA @ sw12 are allowed)

,

,

'wiring matric potential sensors:

```
,  
'MPS-1 Dielectric Water Potential Sensor  
'Red SE 2  
'Bare GND  
'White EX 2  
,  
'SIS  
'brown 12V  
'white Diff 4 H  
'blue GND  
'black Diff 4 L  
,  
'pF-Meter  
'grey GND  
'brown 12V  
'white- SE 9  
,  
,  
,  
'++++++++  
,  
'Declare Variables  
Public BattV  
Public tenHSmV '10HS  
Public TenHS '10HS  
Public sm2 'PICO  
Public Temp 'PICO  
Public MPS1 'MPS-1  
Public SIS 'SIS  
Public pF 'pF-Meter  
,  
'++++++++  
'Define aliases
```

```

Alias sm2 = SMPICO
Alias Temp = TPICO
,
,
'+++++'+
'Define units
,
Units BattV=Volts
Units TenHS = % '10HS
Units SMPICO = % 'PICO
Units TPICO = Deg_c 'PICO
Units MPS1=kPa 'MPS-1
Units SIS=hPa 'SIS
Units pF=hPa 'pF-Meter
'+++++'+
'Define Data Tables
DataTable (Battery,1,-1)
DataInterval (0,1,min,10)
Minimum (1,battV,FP2,0,False)
EndTable
DataTable(Versuch17,True,-1)
DataInterval(0,10,Min,10)
Average (1,TenHS, IEEE4,False) '10HS
Average (1,SMPICO, IEEE4,False) 'PICO
Average (1,TPICO, FP2, False) 'PICO
Average (1,MPS1, IEEE4,False) 'MPS-1
Average (1,SIS, IEEE4,False) 'SIS
Average (1,pF, IEEE4,False) 'pF-Meter
EndTable
'+++++'+
'Main Program
BeginProg
Scan(5,Sec,1,0)

```

```

'Default Datalogger Battery Voltage measurement BattV
Battery(BattV)
'10HS
VoltSe (tenHSmV,1,mV2500,1,1,0,_50Hz,1.0,0)
TenHS = (5.84e-7 * tenHSmV2 -2.01e-4 * tenHSmV - 5.82e-2)*100
'PICO 64
SW12 (1)
Delay (0,3000,mSec)
VoltDiff (sm2,1,mV2500,2,1,0,_50Hz,1.0,0)
VoltDiff (Temp,1,mV2500,3,1,0,_50Hz,1.0,0)
SW12 (0)
SMPICO = sm2 / 10
TPICO = Temp * 0.11 - 40
'MPS-1 Dielectric Water Potential Sensor measurement WP_kPa:
BrHalf(MPS1,1,mV2500,2,2,1,2500,False,10000,_50Hz,2500,0)
MPS1=-EXP(4.80e-5*MPS12-8.46e-2*MPS1+39.45)
'SIS
VoltDiff (SIS,1,mV2500,4,1,0,_50Hz,1.0,0)
'pF-Meter
VoltSe (pF,1,mV5000,9,1,0,_50Hz,1.2,0)
CallTable(Battery)
CallTable(Versuch17)
NextScan
EndProg

```

DANKSAGUNG

Ich danke Dr. Gerd Gleixner und Olaf Kolle für die Bereitstellung des Themas und der Mittel.

Besonderer Dank geht hierbei nochmals an Olaf Kolle für die intensive Unterstützung und die Möglichkeit, die Infrastruktur der Freiland-Serviceabteilung des Max-Planck-Institutes für Biogeochemie für die Messungen zu nutzen.

Prof. Dr. Bernd Rudolph danke ich für die kurzfristige Übernahme der Betreuung seitens der Fachhochschule Jena.

Weiterhin Dank an

Prof. Dr. Sabine Attinger für die Bereitstellung des Freilandmessortes und der Messdaten zum Vergleich. In diesem Zusammenhang danke ich ebenfalls Gudrun Schuhmann.

Dr. Heye Bogena für die Unterstützung mit technischen Berichten.

Dr. Stefan Wessel-Bothe für die Hilfe beim Entwickeln des Laborprüfverfahrens.

Thomas Keller für die unkomplizierte und hilfreiche Beratung und für die kostenlose Bereitstellung von Sensoren.

Martin Hertel, Karl Kübler, Kerstin Hippler und Agnes Fastnacht für die Ausstattung mit Gerätschaften und für die vielen guten Hinweisen und Anregungen.

Stephan Baum und Hendrik Zöphel für die moralische Unterstützung und der Ablenkung in den Pausen.

Norma Franke für das gründliche Korrekturlesen, aber vor allem für ihre Motivation.

Bärbel Gimper für die finanzielle Unterstützung und den Glauben an mich.

SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbst verfasst habe und das diese kein bereits veröffentlichtes, sowie Material aus anderen Diplomarbeiten zur Erlangung eines akademischen Grades enthält, ausgenommen der im Text auf Literatur verwiesenen Stellen.

Jena, 22. März 2010

.....