



Test und Evaluierung von neuartigen Matrixpotenzialsensoren

Diplomarbeit

Betreuer:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Willibald Loiskandl

Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Reinhard Nolz

Universität für Bodenkultur, Wien (BOKU)

Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU)

Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft (IHLW)

eingereicht von

Andreas Hartner

Wien, Juni 2013

Vorwort

Diese Diplomarbeit wurde am Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft des Departments für Wasser, Atmosphäre und Umwelt an der Universität für Bodenkultur Wien erarbeitet.

Mein Dank gilt:

Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Willibald Loiskandl

Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Nolz

Friedrich Forster

Karl Haigner

Mag^a. Cornelia Lee

Mag^a. Karin Hlawinka

Mag^a. Verena Hlawinka

Adcon Telemetry GmbH, Klosterneuburg

Gewidmet soll diese Arbeit meinen Eltern werden, welche mich geduldig unterstützt haben.

Kurzfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein neuartiger Sensor zur Messung des Matrixpotenzials mit der Bezeichnung MPS-2 auf seine Präzision und Genauigkeit hin untersucht. Die Messung des Matrixpotenzials erfolgt indirekt mittels FDR-Technik und wird digital per SDI-12-Protokoll ausgegeben.

Bei den Versuchen wurden 29 Sensoren im Druckplattenapparat verschiedenen Druckstufen ausgesetzt und die Messwerte aufgezeichnet, wobei 12 Sensoren permanent per Telemetrie ausgelesen, und die übrigen manuell mit einem Handauslesegerät abgefragt wurden.

Es stellte sich heraus, dass es im Vergleich zum Vorgängermodell MPS-1 keine messbare Verbesserung gibt. Auf Grund der unzureichenden Genauigkeit der Herstellerkalibrierung ist es nicht ratsam den Sensor ohne Benutzerkalibrierung im Feld einzusetzen, da die ausgegebenen Werte vom tatsächlichen Matrixpotenzial mit teilweise großen Abweichungen behaftet sind.

Auf Grund der Temperaturabhängigkeit des gemessenen Matrixpotenzials ist ab einem Matrixpotenzial von -60 kPa und größeren Temperaturschwankungen eine zusätzliche Temperaturkompensation anzuraten ist.

Abstract

An innovative sensor called MPS-2 which measures the matric potential was tested to determine its precision and accuracy. The measurement of the matric potential is accomplished indirectly by using the FDR-Technology. For the transmission of the data the SDI-12 protocol is used.

29 sensors were tested in pressure plate apparatus at different pressure levels over the course of several experiments. The data of 12 sensors was permanently logged by a telemetry system. The remaining sensors were manually scanned by means of a sensor read-out and storage system.

The results showed no measureable improvement in comparison to the MPS-1. Without additional calibration it is not advisable to use the sensor. The reason is the insufficient accuracy of the sensor when using the calibration of the manufacturer. As a result of an inadequate level of the compensation of temperature influence on the matric potential, or a complete lack thereof, it is recommended to use an additional temperature compensation for matric potentials larger than -60 kPa at high fluctuations in temperature.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	6
2. Frage und Problemstellung.....	7
3. Theoretische Grundlagen	8
3.1 Wasser im Boden	8
3.2 Potenzialtheorie (Scheffer/Schachtschabel, 2005)	9
3.3 Matrixpotenzial ψ_m	9
3.4 Wassergehaltsabhängige Bodenkennwerte	10
3.5 Massenwassergehalt w	11
3.6 Wasseranteil $n_1(\theta)$	12
3.7 Dielektrizitätszahl oder Permittivität.....	13
3.8 Evapotranspiration.....	14
4. Material und Methoden	15
4.1 Telemetrie-System.....	15
4.2 Verwendete Sensoren	18
4.3 Druckplattenapparat	22
4.4 Bodenanalyse/Korngrößenanalyse.....	25
4.5 Verhalten des Matrixpotenzials bei unterschiedlichen Temperaturen.....	31
4.6 Temperaturmessung, Messgenauigkeit.....	34
4.7 Wie präzise und akkurat ist die Hersteller-Kalibrierung	34
4.8 Unterschiede im Vergleich mit MPS-1	36
4.9 Wasserbewegung in oberflächennahen Bodenschichten (Evaporation).....	36
5. Ergebnisse und Diskussion	37
5.1 Matrixpotenzial bei verschiedenen Temperaturen	37
5.2 Temperaturmessung Genauigkeit	42
5.3 Genauigkeit und Präzision	43
5.3.1 Ergebnisse Genauigkeit.....	47
5.3.2 Ergebnisse Präzision	50
5.4 Unterschiede im Vergleich mit MPS-1 Sensoren.....	52
5.5 Wasserbewegung in oberflächennahen Bodenschichten (Evaporation).....	54
6. Schlussfolgerung/Zusammenfassung.....	55
7. Quellenverzeichnis	56
8. Abbildungsverzeichnis	60
9. Tabellenverzeichnis.....	61
10. Anhang	62

1. Einleitung

Sensoren zur Messung des Matrixpotenzials finden eine breite Anwendung, wie die Steuerung von Bewässerungssystemen (Shock et al., 1998) oder Erfassung von Bodenwasserbewegungen (Bachmaier, 2010) durch Versickerung oder Evapotranspiration.

Die gängigsten Methoden zur Bestimmung des Matrixpotenzials sind als direkte Methode das Tensiometer (Take/Bolton, 2003) und als indirekte Methode der WATERMARK® Sensor (Thomson et al., 1996). Für Bewässerungssteuerung ist das Tensiometer wegen seines begrenzten Messbereichs von 0 kPa bis ca. -80 kPa maximal für Gemüse eine Option. Der Watermark-Sensor hingegen deckt einen relativ weiten Bereich ab, und zwar von -10 bis -200 kPa. Letzterer wird auch wegen seiner einfachen Handhabung und der geringen Anschaffungskosten sehr gerne für Bewässerungssteuerungen verwendet (Shock et al., 1998). Bei der so genannten Defizitbewässerung, mit der die Qualität des Ertrages verbessert werden kann, wird mit Matrixpotenzialen kleiner -200 kPa gearbeitet. Hier stößt der Watermark-Sensor an seine Grenzen (Nolz et al., 2012).

Als gute Alternative zu den beiden genannten Sensoren bietet die Firma Decagon Devices Inc. die MPS (Matric Potential Sensor) Reihe an, welche das Matrixpotenzial auf indirektem Wege bestimmt und einen Bereich bis -500 kPa abdeckt. Das erste Modell, der MPS-1, ist ein analoger Sensor, der ausschließlich das Matrixpotenzial messen kann. Die Weiterentwicklung, der MPS-2, ein digitaler Sensor, welcher über eine serielle Schnittstelle (SDI-12) kommuniziert, kann nun auch die Temperatur bestimmen.

In dieser Diplomarbeit wurde dieser MPS-2 auf seine Gebrauchstauglichkeit hin untersucht, sprich Genauigkeit und Präzision der Herstellerkalibrierung. In Anlehnung an die Versuche von Nolz et al. (2012) und Malazian et al. (2011) wurde auch noch eine Gegenüberstellung mit dem MPS-1 durchgeführt, um die Unterschiede bzw. Verbesserungen oder Verschlechterungen aufzuzeigen.

2. Frage und Problemstellung

Im Zuge dieser Diplomarbeit sind folgende Fragen zu klären:

1. Wie ist der Temperatureinfluss auf MPS-2 Sensoren im gesättigten und trockenen Zustand?
2. Wie genau messen die MPS-2 die Temperatur?
3. Wie präzise und akkurat (genau) ist die Hersteller-Kalibrierung?
4. In welchem Messbereich sind die Sensorwerte zuverlässig?
5. Welche Unterschiede können im Vergleich mit MPS-1 festgestellt werden?
6. Sind MPS-1/2 zur Messung der Wasserbewegung in oberflächennahen Bodenschichten (Evaporation) geeignet?

3. Theoretische Grundlagen

3.1 Wasser im Boden

Laut Scheffer/Schachtschabel (2005) wird als Bodenwasser jenes Wasser bezeichnet, das bei einer Ofentrocknung bei 105°C bis zur Massenkonstanz entfernt werden kann. Dies bildet auch gleichzeitig die Grundlage, um den Wassergehalt zu bestimmen. Jenes Wasser, das jedoch in der Bodenmatrix verbleibt, wird als Konstitutions- bzw. Kristallwasser bezeichnet und zählt nicht mehr zum Bodenwasser.

Grundsätzlich wird das Bodenwasser in Grundwasser und in die vadose Zone unterteilt (Kammerer/Loiskandl, 2008). Das Grundwasser ist laut Definition jenes Wasser, das die Hohlräume des Bodens zusammenhängend ausfüllt und unter gleichem oder größerem Druck steht als die Atmosphäre. Die vadose Zone setzt sich wiederum aus dem geschlossenen und dem offenen Kapillarsaum zusammen, wobei der geschlossene Kapillarsaum direkt am Grundwasser angrenzt und der offene, der mit zunehmendem Abstand zum Grundwasser immer mehr luftgefüllte Poren aufweist, bis zur Geländeoberkante reicht.

Die Kräfte, die das Wasser entgegen der Schwerkraft im Kapillarsaum halten, sind Adhäsion, Osmose und Kapillarität. Je höher der Wassergehalt des Bodens ist, umso mehr überwiegen die Kapillarkräfte auf Kosten der Adhäsion (Scheffer/Schachtschabel, 2005).

3.2 Potenzialtheorie (Scheffer/Schachtschabel, 2005)

Jede Wasserbewegung im Boden, wie Versickerung, kapillarer Aufstieg u. dgl., wird durch so genannte Potenzialunterschiede hervorgerufen. Eine Bewegung des Bodenwassers erfolgt immer vom höheren zum niedrigeren Potenzial, bis das Gesamtpotenzial ψ an allen Stellen den gleichen Wert aufweist.

Gesamtpotenzial ψ_t :

Das Gesamtpotenzial ist die Summe aller Teilpotenziale und setzt sich aus folgenden Termen zusammen:

$$\psi_t = \psi_g + \psi_p + \psi_o \quad \text{Formel 1}$$

wobei:

ψ_g Gravitationspotenzial

ψ_p Tensiometer- oder Druckpotenzial

ψ_o osmotisches Potenzial

Das Tensiometer- oder Druckpotenzial setzt sich wiederum aus dem Gasdruckpotenzial ψ_g und dem Matrixpotenzial ψ_m zusammen. Bei starren Böden ohne Auflast und Gasdruck entspricht das Tensiometer- oder Druckpotenzial dem Matrixpotenzial.

Da für diese Diplomarbeit das Matrixpotenzial ψ_m von Bedeutung ist, wird nur dieses beschrieben.

3.3 Matrixpotenzial ψ_m

Das Matrixpotenzial ψ_m umfasst alle Kräfte, die die Bodenmatrix auf das Bodenwasser ausübt. Je geringer der Wassergehalt eines Bodens ist, umso stärker wird das Wasser durch die matrixbedingten Kräfte gehalten, das heißt, dass es immer schwerer wird, dem Boden das Wasser zu entziehen. Definitionsgemäß ist das Matrixpotenzial dem Gravitationspotenzial entgegengesetzt, weswegen es ein negatives Vorzeichen besitzt. Mit sinkendem Wassergehalt wird somit das Matrixpotenzial negativer (Scheffer/Schachtschabel, 2005). In dieser Diplomarbeit wird das Matrixpotenzial ausschließlich in kPa (Kilopascal) mit negativem Vorzeichen

angegeben. Um sich unter diesem Wert etwas vorstellen zu können, ist es hilfreich, zu erwähnen, dass 1 kPa ca. einer Wassersäule von 10 cm entspricht, bzw. 100 kPa ca. 10 m (1 bar).

Die gängigsten Methoden, um das Matrixpotenzial zu bestimmen, sind das Tensiometer, und der Watermark-Sensor, wobei das Tensiometer bis ca. -80 kPa und der Watermark-Sensor bis ca. -200 kPa (Hersteller: Irrrometer) messen können. Die in den Versuchen eingesetzten MPS-2 Sensoren bestimmen das Matrixpotenzial zwar nur auf indirektem Wege, können jedoch laut Hersteller bis -500 kPa eingesetzt werden.

3.4 Wassergehaltsabhängige Bodenkennwerte

Die Begriffe Feldkapazität (FK) und permanenter Welkepunkt (PWP) sind Charakteristika für die Beurteilung des Wasserhaushalts eines Bodens. Beide Werte sind Wassergehalte einzelner Bodenschichten oder -horizonte. Die Differenz der FK und des PWP wird als nutzbare Feldkapazität (nFK) bezeichnet und liefert die Grundlage zur Berechnung des pflanzenverfügbaren Bodenwassers.

Als **Feldkapazität FK** wird jener Wassergehalt eines Bodens bezeichnet, der 2 bis 3 Tage nach Vollsättigung entgegen der Schwerkraft zurückgehalten wird. In der Literatur wird die FK mit einer Wasserspannung von 100 bis 300 cm (Kammerer/Loiskandl, 2008) angegeben.

Der **permanente Welkepunkt PWP** ist jener Wassergehalt, bei dem die Pflanze irreversible Schäden erleidet, da sie nicht mehr in der Lage ist, dem Boden Wasser zu entziehen. Für den PWP findet man in der Literatur sehr oft eine Wasserspannung von 15.000 cm (Kammerer/Loiskandl, 2008; Scheffer/Schachtschabel, 2005).

Ist die Kornverteilung eines Bodens bekannt, so können die Feldkapazität, der permanente Welkepunkt und die nutzbare Feldkapazität mit empirischen Formeln, sogenannten Pedotransferfunktionen, abgeschätzt werden.

3.5 Massenwassergehalt w

Die Definition des Massenwassergehalts eines Bodens erfolgt laut ÖNORM L 1062 und wird als folgendes Verhältnis festgelegt:

$$w = \frac{m_l}{m_s} \quad \text{Formel 2}$$

wobei:

m_l Wassermasse der Probe [g]

m_s Feststoffmasse der Probe [g]

Im Gegensatz zum Wasseranteil (3. Wasseranteil) beziehen sich alle Terme der Gleichung nur auf die Masse.

Um die erforderlichen Massen zu bestimmen, wird die Probe direkt nach Probenahme abgewogen und anschließend bei ca. 105°C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die Masse, die die Probe nach der Trocknung hat, ist die Feststoffmasse m_s . Die Massendifferenz zwischen m_s und der ursprünglichen Masse ist die Wassermasse m_l , welche durch den Trocknungsvorgang verdunstet wurde.

3.6 Wasseranteil $n_l(\theta)$

Der Wasseranteil eines Bodens wird laut ÖNORM L 1062 als folgendes Verhältnis definiert:

$$n_l = \frac{V_l}{V} \quad \text{Formel 3}$$

wobei:

V_l Volumen des Bodenwassers [cm³]

V Gesamtvolumen [cm³]

Die Bestimmung des Gesamtvolumens erfolgt üblicherweise durch einen Stechzylinder mit definiertem Volumen (z.B. 200 cm³). Das Volumen des Bodenwassers wird indirekt über die Gewichtsänderung m_l bei der Trocknung (3.5 Massenwassergehalt) ermittelt. Da eine Dichte des Wassers von $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$ angenommen wird, kann mit folgender Beziehung:

$$V_l = \frac{m_l}{\rho_w} \quad \text{Formel 4}$$

das Volumen des Bodenwassers berechnet werden.

3.7 Dielektrizitätszahl oder Permittivität

Die Dielektrizitätszahl oder Permittivität ϵ_r ist eine dimensionslose Zahl, die beschreibt, um wie viel ein magnetisches Feld zwischen zwei aufgeladenen parallelen Kondensatorplatten abgeschwächt wird, wenn sich ein Dielektrikum (z.B. Wasser) dazwischen befindet (Prochotta, 2009). Bezogen wird diese Abschwächung auf einen materiefreien Raum zwischen diesen Platten.

$$\epsilon_r = \frac{E}{E - E_p} \quad \text{Formel 5}$$

wobei:

E ...elektrische Feldstärke des materiefreien Kondensators [V/m]

E_p ...elektrische Gegenfeldstärke des Dielektrikums [V/m]

Als Dielektrikum wird Materie bezeichnet, welche eine isolierende Eigenschaft besitzt und dessen Ladungsträger nicht frei beweglich sind. Ein Dielektrikum kann fest, flüssig oder gasförmig sein (Dillbahner et al., 2012).

Wird nun Wasser in ein magnetisches Feld E niedriger Frequenz gegeben, so richten sich die Dipole in eine Richtung aus und erzeugen dadurch das Gegenfeld E_p . Dieser Vorgang wird auch als Orientierungspolarisation (Abbildung 1) bezeichnet.

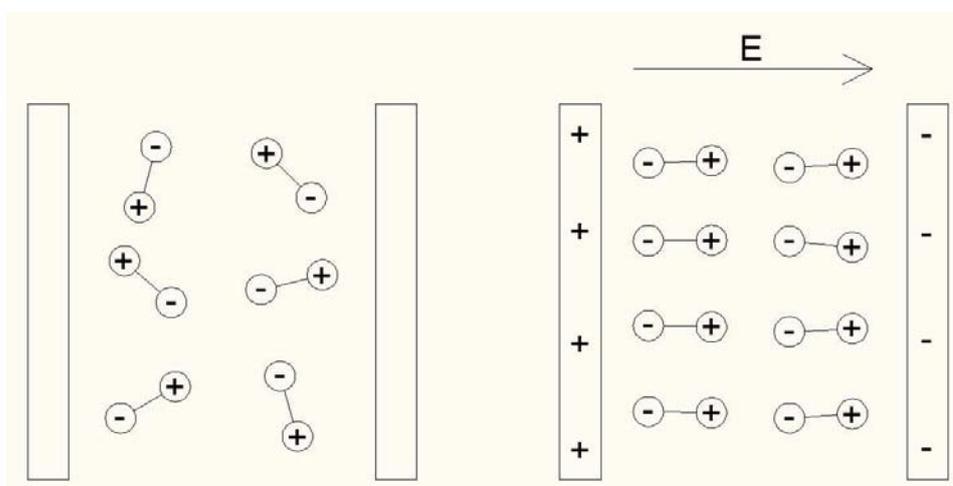


Abbildung 1: Orientierungspolarisation, links: ohne E-Feld, rechts: mit E-Feld (Prochotta, 2009)

In einem Wechselfeld folgen die Dipole dem sich ständig ändernden Magnetfeld. Für die Orientierungspolarisation bei Wasser gilt eine obere Grenze von ca. 100 MHz. Diese Grenze entsteht dadurch, dass die Moleküle eine Masse und dadurch auch eine Trägheit besitzen und sich bei der Ausrichtung gegenseitig behindern (Reibung). Je kleiner und runder Moleküle sind, desto kleiner ist deren Dipolmoment und desto schneller können diese schwingen. In höheren Frequenzbereichen folgen die ionische und zuletzt die elektronische Polarisierung. Zur Orientierungspolarisation ist hier noch zu erwähnen, dass diese stark temperaturabhängig ist. Dies resultiert aus der thermischen Eigenbewegung der Moleküle, die einer exakten Ausrichtung entgegenwirkt (Prochotta, 2009).

Grundsätzlich ist die Permittivitätszahl ϵ_r von dielektrischen Materialien, von der Temperatur und von der Frequenz einer an die Platten eines Kondensators angelegten Wechselspannung abhängig.

3.8 Evapotranspiration

Unter dem Begriff Evaporation versteht man die Wasserverdunstung von einer leblosen Substanz wie z.B. vegetationslosem Boden.

Neben der Evaporation gibt es auch noch die Verdunstung von belebten Oberflächen wie z.B. Pflanzen, welche als Transpiration bezeichnet wird.

Beide Terme werden oft zur so genannten Evapotranspiration zusammengefasst, da sie gemeinsam auftreten und schwierig zu unterscheiden sind.

4. Material und Methoden

Bei den Versuchen wurden 12 MPS-2 in 2 Drucktöpfe mit Kabeldurchführung eingebaut, um sie permanent per Telemetrie auszulesen. Die restlichen 17 Sensoren wurden mittels Handauslesegerät ProCheck abgefragt. Dazu wurden sie in Standard-Drucktöpfe eingebaut und anschließend einer Druckstufe so lange ausgesetzt, bis sich die Wassermasse im Messzylinder nicht mehr veränderte. Sobald dieser Zustand eingetreten war, wurden die Drucktöpfe geöffnet und die einzelnen Sensoren mit dem Handauslesegerät ProCheck auf Temperatur und Matrixpotenzial abgefragt. Eine Auflistung aller Sensoren und Bezeichnungen befindet sich im Anhang.

Der Boden, der bei den Versuchen verwendet wurde stammte aus Groß Enzersdorf.

4.1 Telemetrie-System

Die Möglichkeit, Sensordaten auszulesen und zu speichern, kann entweder durch einen Datalogger vor Ort oder ein Telemetriesystem, welches die Daten auf einem Server speichert, realisiert werden. Der wohl wichtigste Vorteil eines Telemetriesystems besteht darin, die Sensordaten über große Distanzen permanent und kabellos übertragen zu können. Im Gegensatz dazu muss bei einem Datalogger ein Speichermedium ausgetauscht und ausgelesen werden, was einen gewissen Aufwand darstellt. Meist wird eine Speicherkarte erst dann getauscht, wenn die Kapazität annähernd erschöpft ist, was oft mehrere Monate dauern kann. Etwaige Sensorfehler oder -ausfälle können somit nicht jederzeit erkannt und behoben werden.

Der Einsatzbereich von Telemetrie ist sehr vielfältig und erstreckt sich von landwirtschaftlichen Anwendungen (Nolz et al., 2010) über klinische Einsatzbereiche, wie die Übertragung von EKG- oder Blutdruckdaten (Hilbel et al., 2008), bis hin zur Überwachung von Belastungen, Beschleunigungen, etc. im Fahrzeug- oder Flugzeugbau (Telemetry-world.com), um nur einige zu nennen.

Im Zuge dieser Diplomarbeit war es von großer Bedeutung, Sensordaten permanent auszulesen und aufzuzeichnen, um die Temperaturabhängigkeit des Matrixpotenzials zu erfassen oder andere Verhaltensweisen des MPS-2 zu erkennen

und für zukünftige Projekte zu berücksichtigen. Dies wurde mit einem 15-Minuten-Messintervall mittels Telemetrie des Herstellers Adcon Telemetry GmbH, Klosterneuburg (www.adcon.com) realisiert. Ein einmaliges Auslesen der Daten am Ende einer Versuchsperiode, sprich, wenn sich die Flüssigkeitsmenge im Auffangbehälter des Druckplattenapparates nicht mehr verändert, wäre dafür nicht ausreichend gewesen.

Aufbau und Funktionsweise eines Telemetriesystems:

Das während der Versuche verwendete Telemetriesystem der Firma Adcon bestand aus folgenden Komponenten:

1. Remote Terminal Unit (RTU) AddIT-A723: Die RTU AddIT-A723 wurde zur direkten Datenerfassung und deren Weiterleitung verwendet. Die Daten dieser RTU werden nicht nach jeder Messung versendet, sondern im internen Speicher (64kB) zwischengespeichert und gesammelt übertragen. Die Übertragung geschieht mit einer Frequenz von 432 bis 470 MHz bei einer Sendeleistung von 10 mW welche eine Distanz, abhängig von der Topografie, von ca. 1 km zu überwinden vermag. Um den Strombedarf zu decken, wurde ein Solarpaneel angeschlossen.

Die AddIT-723 verfügt über digitale Ein- und Ausgänge und analoge Eingänge, wobei digital bis zu 40 SDI-12 Sensoren und analog 6 Sensoren ausgelesen werden können.

2. Langstreckeneinheit AddWave-A733: Da sich zum Zeitpunkt der Messungen die nächstgelegene Basisstation bei Adcon in Klosterneuburg befand, die AddIT-A723 jedoch keine ausreichende Leistung hat, um diese Distanz zu überwinden, musste ein Signalverstärker zwischengeschaltet werden. Mit einer Sendeleistung von 500 mW ist es möglich, bis zu 100 km zu überbrücken. Die AddWave-A733 wurde am Dach der Universität für Bodenkultur Wien positioniert und ebenfalls mit einem Solarpaneel betrieben.
3. Basisstation: Die Basisstation (Telemetry Gateway) empfängt per Funkmodem alle Daten und überträgt diese über ein Netzwerk an einen Server, wo sie permanent gespeichert und abgerufen werden können.

4. Server zur Datenspeicherung: Keine besonderen Spezifikationen.
5. Software und Account: Den Zugriff auf die Daten erhält man per addVANTAGE Professional, einer webbasierenden Visualisierungsplattform, die nur mit einem gültigen Account nutzbar ist.

Die nachfolgende Abbildung 2 stellt den beschriebenen Aufbau schematisch dar:

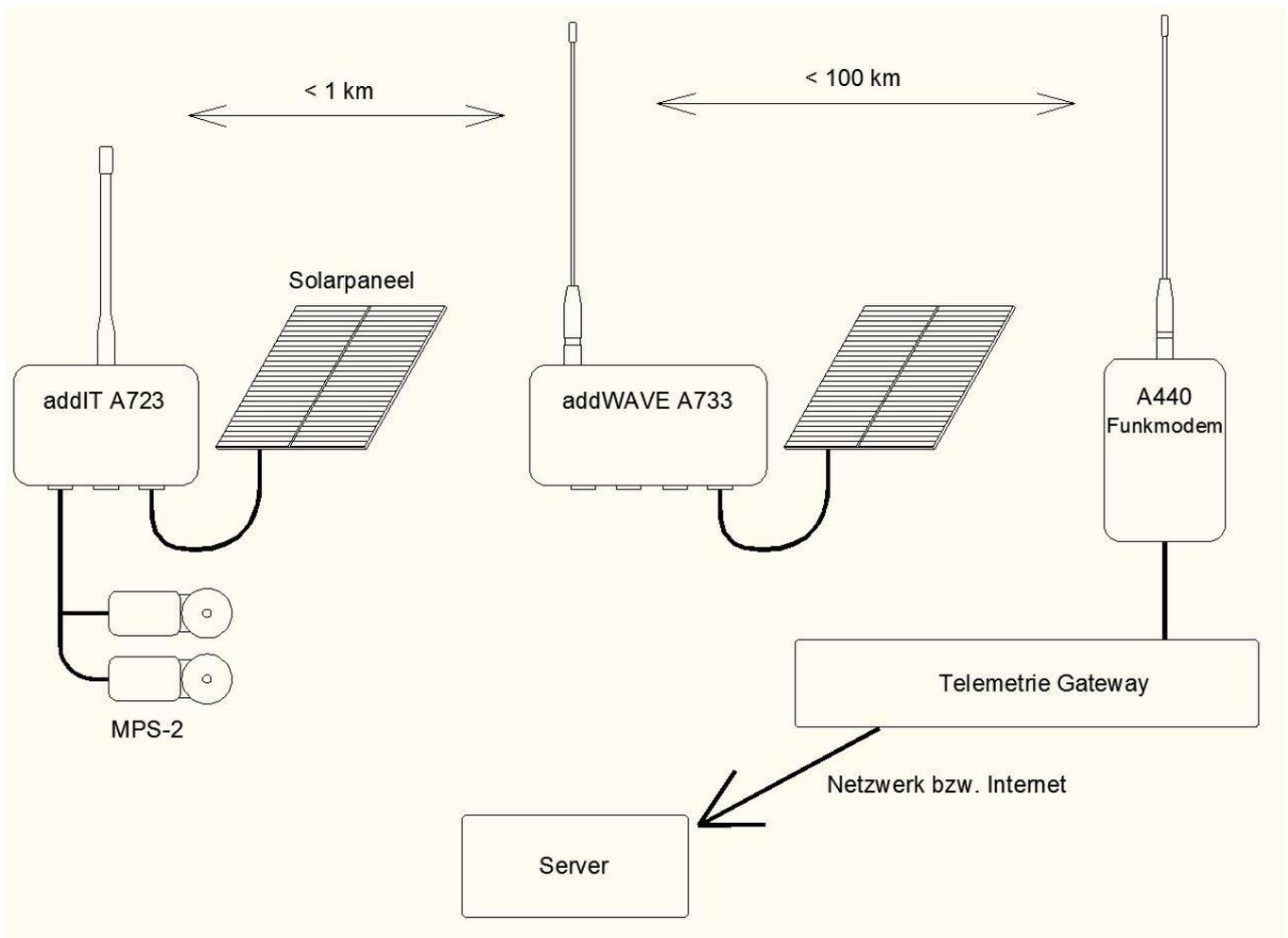


Abbildung 2: Schema Telemetrie

4.2 Verwendete Sensoren

Sensortyp MPS-2 (Matric Potential Sensor):

Bei diesem Sensor handelt es sich um eine Einheit, die das Matrixpotenzial des umgebenden Bodens indirekt ermittelt. Der Sensor besteht, wie anhand der Abbildung 3 gezeigt wird, aus einer in Vinyl vergossenen Elektronik, einer Leiterplatte mit Sensorelement und zwei Keramikscheiben, die durch gelochte Edelstahlscheiben in Position gehalten und vor äußeren Einflüssen geschützt werden.

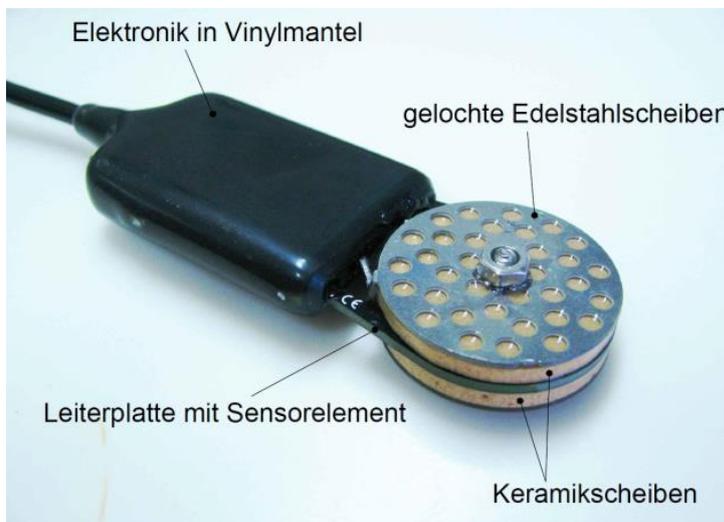


Abbildung 3: Beschreibung MPS-2

Die Keramikscheiben, welche eine gewisse Porengrößenverteilung aufweisen, stehen mit dem Boden in unmittelbarem Kontakt bzw. im hydraulischen Gleichgewicht. Je nach Wassergehalt des Bodens ändert sich auch der Wassergehalt der Scheiben, da bei Wasserentzug, durch z.B. Evaporation, der Boden den Keramikscheiben das Wasser ebenfalls entzieht. Die großen, leicht zu entwässernden Poren geben zuerst das Wasser ab, da die Bindungskräfte hier am geringsten sind.

Das Sensorelement an sich bestimmt die Dielektrizität bzw. den Wassergehalt der Keramikscheiben. Verfahren zur Bestimmung der Dielektrizitätszahl werden als FDR (Frequency Domain Reflectometry) oder TDR (Time Domain Reflectometry) bezeichnet (Loiskandl/Strauss-Siebert, 2011).

Die TDR-Methode bestimmt die Laufzeit und Abschwächung einer elektromagnetischen Welle, welche von der Dielektrizitätszahl des Mediums

beeinflusst wird. Im Gegensatz dazu wird die Dielektrizitätszahl bei der FDR auf kapazitivem Weg bestimmt. Das bedeutet, dass der Sensor wie ein Kondensator funktioniert, der mit einer bestimmten Frequenz angeregt wird. Gleichzeitig wird die Resonanzfrequenz des Dielektrikums gemessen (Hanson/Peters, 2000), welche stark von dessen Dielektrizität abhängig ist. Beim MPS-2 geschieht dies bei einer Frequenz von 70MHz und einer Dauer von 250ms. Die relative Dielektrizitätskonstante von Luft ist ca. 1, die von Keramik ca. 5 und die von Wasser ca. 80 (Kammerer, 2012). Da diese drei Punkte bekannt sind, und der Hersteller das Verhältnis bzw. die Funktion zwischen Wassergehalt/Dielektrizitätszahl und Matrixpotenzial der Keramik kennt, kann aus dem Ergebnis der Messung das Matrixpotenzial des Bodens berechnet werden. Dies geschieht im Sensor selbst.

Unterschiede MPS-1 zu MPS-2:

Das erste Modell, der MPS-1, liefert ein analoges Ausgangssignal und unterscheidet sich rein vom Äußeren nur durch eine andere Hülle. Das Messprinzip und die Abmessungen bzw. das Aussehen der Keramikscheiben haben sich nicht verändert. Ab 2011 wurde der MPS-2 angeboten, der abgesehen von einer verbesserten Genauigkeit (Tabelle 1), zu einem Sensor mit digitaler Ausgabe des Matrixpotenzials und der Temperatur weiterentwickelt wurde. Dies birgt einen großen Vorteil, da sich gewisse bodenphysikalische Parameter wie die Permittivität mit der Temperatur verändern und somit das Ergebnis einer FDR-Messung beeinträchtigen können. Abgesehen davon bedeutet dies, dass die Ermittlung der Bodentemperatur nicht mehr zusätzlich erfolgen muss, was das Messsystem vereinfacht.

Hier ist noch anzumerken, dass in der Manual-Version 1 des MPS-1 noch eine Genauigkeit von $\pm 20\%$ angegeben wurde, welche in der Version 3 auf $\pm 40\%$ korrigiert wurde.

	MPS-1	MPS-2
Matrixpotenzial	-10 bis -500 kPa	-5 bis -500 kPa
Auflösung	1 bis 4 kPa	0,1 kPa
Genauigkeit	±40 % no user calibration	±25 % bei -5 bis -100 kPa
Temperatur	-	-40 bis +50°C
Auflösung	-	0,1°C
Genauigkeit	-	±1°C

Tabelle 1: Herstellerangaben MPS-1 (Version 3) und MPS-2 (Version 1)

Der MPS-2 übermittelt die gemessenen Daten im ASCII Format über das SDI-12 Protokoll. SDI-12 bedeutet "Serial Data Interface at 1200 Baud" und beschreibt die Art der Kommunikation, die es ermöglicht, mehrere Sensoren über eine einzige serielle Datenleitung anzusprechen und auszulesen (SDI-12 Support Group, 2013).

Wie Abbildung 4 zeigt, besteht ein SDI-12 Interface aus einer Datenleitung, der Stromversorgung VCC und der Erdung GND. Für die Stromversorgung werden von der SDI-12 Support Group 12 Volt angegeben, mit denen z.B. 10 Sensoren mit je 60 m Kabellänge versorgt werden können.

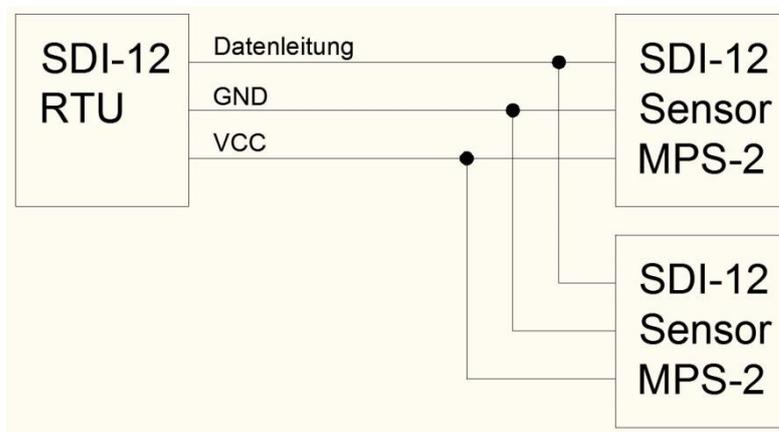


Abbildung 4: Aufbau SDI-12

Bei der Datenleitung handelt es sich um eine *bidirectional, three-state data transfer line*. Das bedeutet, dass SDI-12 jeden Sensor einzeln „ansprechen“ und „abfragen“ kann, und dass die Kommunikation drei Zustände kennt (Tabelle 2).

Condition	Binary state	Voltage range
marking	1	-0.5 to 1.0 volts
spacing	0	3.5 to 5.5 volts
transition	undefined	1.0 to 3.5 volts

Tabelle 2: Logische Zustände und Spannungsbereiche (SDI-12 Support Group, 2013)

Bevor die Sensoren in den Boden eingebaut und mit einer RTU verbunden werden, muss jeder Sensor mit einer eigenen Adresse versehen werden. Standardmäßig besitzen alle Sensor die Adresse 0. Bei den Versuchen wurde die Adresse mit dem vom Hersteller gelieferten Handauslesegerät namens ProCheck geändert. Die vergebenen Adressen sind auf Seite 62: Verwendete Sensoren angeführt.

Ablauf einer Messung:

Grundsätzlich befinden sich alle Sensoren, solange sie nicht angesprochen werden, in einem so genannten „low-power Standby Modus“ um den Stromverbrauch so gering wie möglich zu halten. Soll nun eine Messung durchgeführt werden, so sendet die RTU für mindestens 12 Millisekunden ein break, per Definition ein spacing (siehe Tabelle 2), also den binären Zustand 0. Dadurch werden alle Sensoren, die an der Datenleitung hängen in einen aktiven Zustand versetzt. Nun kann die RTU jedem beliebigen Sensor den Befehl zur Messung schicken, worauf der Sensor binnen 15 ms antwortet. Dieser gibt bekannt, welche Zeit er für die Messung benötigt, und wie viele Daten er senden wird. Vor den Versuchen wurde dem Hersteller der RTU mitgeteilt, welche RTU mit welchen Sensoradressen verbunden ist, damit die RTU die einzelnen Sensoren ansprechen kann. Sobald die Messung durchgeführt wurde, schickt der Sensor eine Anfrage, um die Daten zu senden. Bekommt er die Bestätigung, so werden die Daten übermittelt.

4.3 Druckplattenapparat

Der Druckplattenapparat ist eine Standardmethode, eingeführt von Richards und Fireman (1943) und Richards (1948), um die Retentionsfunktion einer Bodenprobe bei bekanntem Matrixpotenzial zu ermitteln (Cresswell et al. 2008).

Um die Funktionsweise verständlicher zu machen, soll Abbildung 5 behilflich sein, welche einen Schnitt durch einen Druckplattenapparat zeigt.

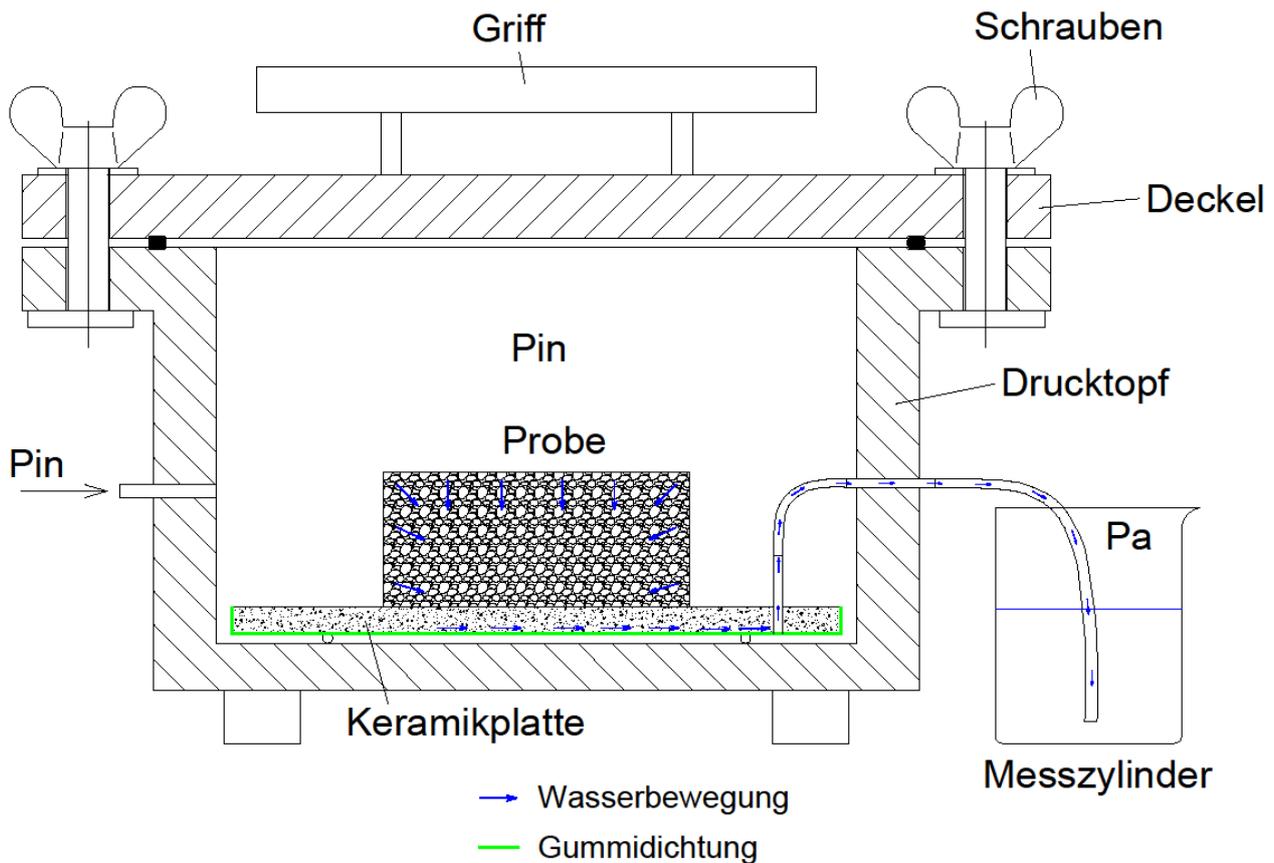


Abbildung 5: Schema Druckplattenapparat

Der Druckplattenapparat besteht aus folgenden Hauptbestandteilen:

1. dem Deckel und Drucktopf, welche aus massivem Stahl gefertigt sind und durch Flügelmutterschrauben miteinander verbunden werden
2. einer Dichtung, die den notwendigen Abschluss gegen den Atmosphärendruck gewährleistet
3. der porösen Keramikplatte, welche am Rand und an der Unterseite durch eine Gummimembran umhüllt ist, und für den Wassertransport aus der Probe in den Messzylinder verantwortlich ist

Anmerkung:

Da in Druckplattenapparaten Drücke bis 20 bar herrschen können ergeben sich diese teilweise übertrieben wirkenden Wandstärken bzw. Verschraubungen. Hier ist anzumerken, dass bei 20 bar und einem Drucktopfdurchmesser von ca. 40 cm eine Kraft von 246 kN auf den Deckel wirkt, was in etwa 25,1 Tonnen entspricht. Darum ist vor allem beim Öffnen sehr darauf zu achten, dass der gesamte Überdruck abgelassen wurde!

Funktionsweise:

Zu Beginn eines Versuchsdurchlaufes wird eine mit Wasser gesättigte Bodenprobe auf eine ebenfalls gesättigte Keramikplatte gestellt und darauf geachtet, dass ein guter Kontakt zwischen den beiden herrscht. Über einen dünnen Silikonschlauch wird die Verbindung zwischen Keramikplatte und Drucktopfdurchführung hergestellt, welche über einen weiteren Silikonschlauch in ein Messgefäß mündet.

Nach Verschließen und Verschrauben des Drucktopfes kann mit dem eigentlichen Versuch begonnen werden. Über Druckminderer und Manometer wird nun ein gewünschter Druck (P_{in}) im Drucktopf angelegt und über einen gewissen Zeitraum konstant gehalten. Je nach Druckstufe kann dies einige Wochen dauern.

Der als P_a bezeichnete Außendruck bzw. Umgebungsdruck liegt, durch die Gummiabdichtung (grün), an der Unterseite der Keramikscheibe an, welche das einzige Hindernis eines Druckausgleiches darstellt. Der Grund dafür liegt darin, dass die Keramikscheibe sehr feine Poren aufweist. Sind diese kleinen Poren mit Wasser gefüllt, also wie bereits erwähnt gesättigt, so wirken auf die Wassermoleküle Kräfte, z.B.: Oberflächenspannung, die verhindern, dass das Wasser durch Luft verdrängt wird, selbst wenn der Druck P_{in} ein Vielfaches des Außendrucks beträgt.

Durch den Druckunterschied zwischen P_{in} und P_a wird das Wasser der Bodenprobe aus der Probe, durch die Keramikscheibe, und schließlich aus dem Druckplattenapparat gedrückt und in einem Gefäß gesammelt. Das Sammeln des Wassers dient der Kontrolle, welche darüber Aufschluss gibt, wann der Versuch abgeschlossen ist. Dazu ist häufiges Abwiegen notwendig, um den Zeitpunkt zu bestimmen, ab dem keine Massendifferenz mehr auftritt. Ist dieser erreicht, weiß man, dass P_{in} gleich dem Matrixpotenzial in der Probe ist. Der Verlauf des Matrixpotenzials wurde kontinuierlich gemessen und geloggt, und somit konnte der

bekannte P_{in} mit dem gemessenen Wert verglichen werden, was die Genauigkeit der Sensoren darstellt.

Abbildung 6 zeigt einen Druckplattenapparat im offenen und geschlossenen Zustand:

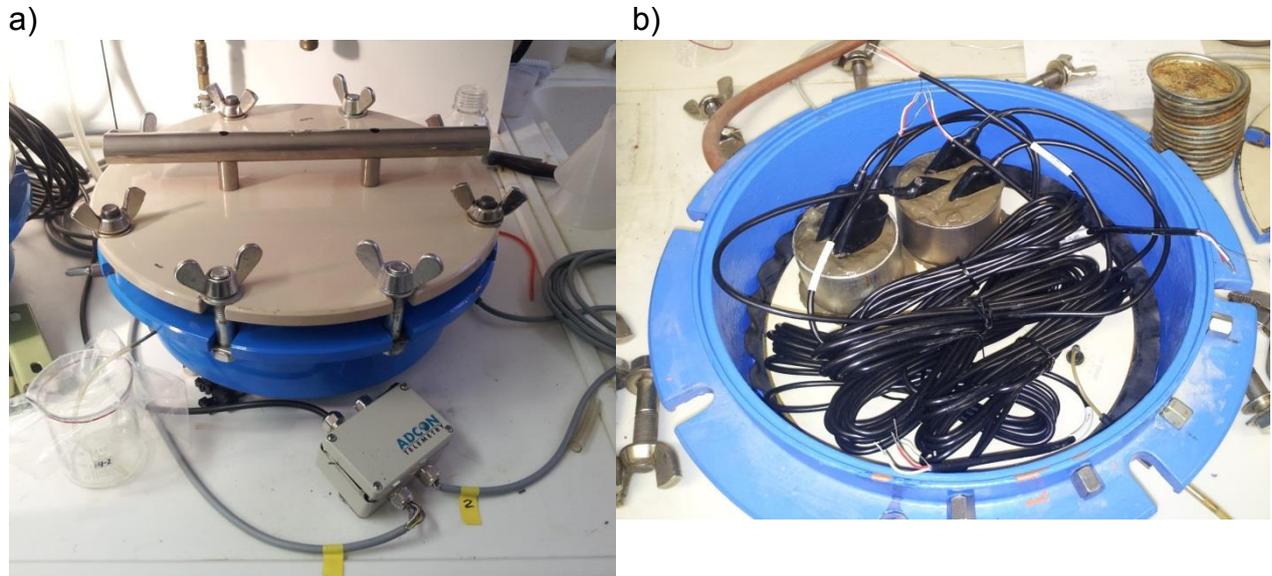


Abbildung 6: Druckplattenapparat a) geschlossen und b) offen

Probleme bei Versuchen mit Druckplattenapparaten:

Obwohl es sich um ein sehr simples Prinzip handelt, ist die Handhabung alles andere als einfach. Ein großes Problem stellt die Kontaktfläche bzw. Verbindung zwischen Probe und Keramikplatte dar. Vor allem bei niedrigen Matrixpotenzialen ist diese sehr fehleranfällig (Bittelli/Flury, 2009). Nichtsdestotrotz ist der Druckplattenapparat, vor allem bei niedrigen Matrixpotenzialen, eine brauchbare Methode (Klute, 1986).

4.4 Bodenanalyse/Korngrößenanalyse

Bei einer Korngrößenanalyse wird mittels verschiedenen Verfahren festgestellt, welche Korngrößenverteilung ein Boden aufweist. Die Korngrößenverteilung ist eine Summenlinie, welche die Massenanteile der vorliegenden Primärteilchen grafisch darstellt (Loiskandl/Strauss-Siebert, 2011).

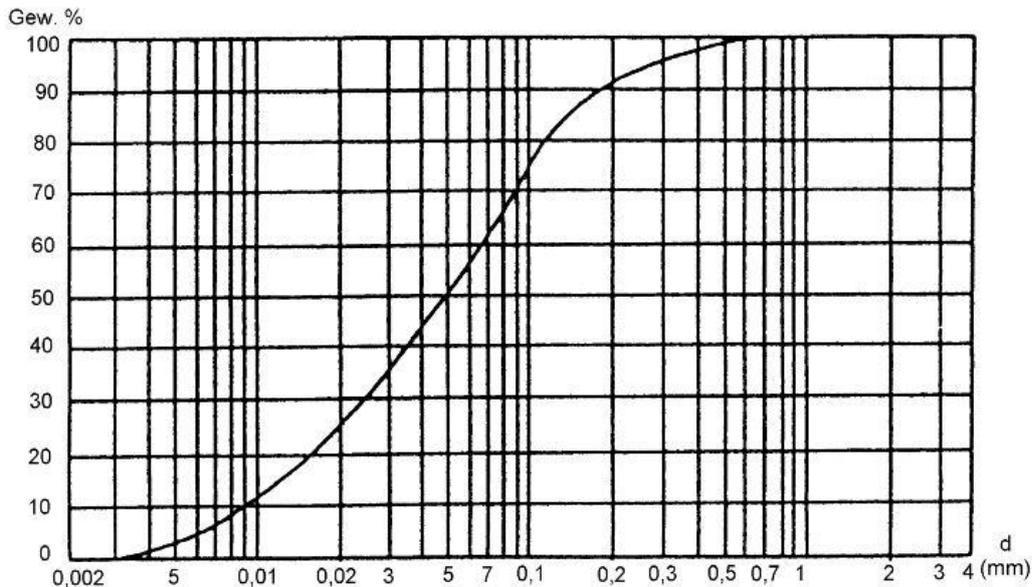


Abbildung 7: Korngrößenverteilung (beispielhaft)
(Loiskandl/Strauss-Siebert, 2011)

Dabei erfolgt eine Unterteilung in Grobboden (>2 mm) und Feinboden (<2 mm Siebdurchgang). Da für die Analyse des Bodens wegen eines sehr geringen Grobbodenanteils <10 % nur der Feinboden von Bedeutung war, zeigt Tabelle 3 nur die Unterteilung des Feinbodens:

Bezeichnung	Kurzzeichen	Bereich des Äquivalentdurchmessers
Sand	S	$2 \text{ mm} > d \geq 0,063 \text{ mm}$
Grobsand	gS	$2 \text{ mm} > d \geq 0,63 \text{ mm}$
Mittelsand	mS	$0,63 \text{ mm} > d \geq 0,2 \text{ mm}$
Feinsand	fS	$0,2 \text{ mm} > d \geq 0,063 \text{ mm}$
Schluff	U	$0,063 \text{ mm} > d \geq 0,002 \text{ mm}$
Grobschluff	gU	$0,063 \text{ mm} > d \geq 0,02 \text{ mm}$
Mittelschluff	mU	$0,02 \text{ mm} > d \geq 0,0063 \text{ mm}$
Feinschluff	fU	$0,0063 \text{ mm} > d \geq 0,002 \text{ mm}$
Ton	T	$0,002 \text{ mm} > d$

Tabelle 3: Korngrößenklassen des Feinbodens laut ÖNORM L1050 (1994)

Verfahren zur Ermittlung der Korngrößenverteilung des Feinbodens werden z.B. als Feinsiebung/Nasssiebung und Pipettierverfahren nach Kubiena bezeichnet, wobei die Feinsiebung zur Bestimmung des Sandanteils die Korngrößen 2,0 1,0 0,63 0,20 0,125 und 0,063 mm und das Pipettierverfahren zur Bestimmung des Ton- und Schluffanteils die Korngrößen 0,063 0,020 0,0063 und 0,002 mm umfasst (Cepuder et al., 2012).

Da die Korngrößenanalyse bis auf einen Durchmesser von 2 µm durchgeführt wird, es jedoch kein Sieb gibt, das diese Maschenweite aufweist, wird beim Pipettierverfahren auf indirektem Weg mittels Absetzgeschwindigkeit der Massenanteil je Korndurchmesser ermittelt. Das Verfahren beruht darauf, dass sich Bodenpartikel in Wasser bei einer bestimmten Temperatur abhängig von ihrem Durchmesser unterschiedlich schnell absetzen:

$$v = \frac{d^2 \cdot (\rho_s - \rho_l) \cdot g}{18 \cdot \eta} \quad \text{Formel 6}$$

wobei:

- v Absetzgeschwindigkeit [cm/s]
- d Äquivalenter Korndurchmesser [cm]
- g Erdbeschleunigung [cm/s²], für Österreich 980,665 cm/s²
- ρ_s mittlere Feststoffdichte [g/cm³], üblicherweise wird 2,65 g/cm³ verwendet
- ρ_l Dichte der Flüssigkeit [g/cm³], wird konstant mit 1,0 g/cm³ angenommen
- η dynamische Viskosität der Suspension [g·s⁻¹·cm⁻¹], temperaturabhängig

Über die einfache Weg/Zeit/Geschwindigkeits-Beziehung kann nun für jeden Durchmesser bei bekannter Weglänge die Zeit berechnet werden:

$$t = \frac{h}{v} \quad \text{Formel 7}$$

wobei:

v ... Absetzgeschwindigkeit [cm/s]

h ... Weg, den ein Teilchen zurücklegt [cm], es werden 10 cm verwendet

t ... Zeit [s]

Da die Durchmesser für die Bestimmung des Ton- und Schluffanteils und der Weg bekannt sind, ergeben sich folgende Absetzzeiten:

Durchmesser [mm]	Zeit
0,063	27 s
0,02	4 min 32 s
0,0063	50 min 19 s
0,002	3 h 46 min 25 s

Tabelle 4: Absetzgeschwindigkeiten

Wird nun aus einer Probe in einer Tiefe von 10 cm nach 27 Sekunden eine bekannte Flüssigkeitsmenge (20 ml) entnommen und die Masse des Feststoffes bestimmt, kennt man den Massenanteil des Durchmessers von 0,063 mm.

Versuchsdurchführung:

Zu Beginn wurden ca. 600 g des Bodens in einem Mörser zerkleinert, in eine Schale gegeben und anschließend im Trockenschrank bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Um ein möglichst genaues Ergebnis der Versuche zu erhalten, wurden alle Versuche 4 mal wiederholt. Der nächste Schritt umfasste ein Einwiegen von 4 Proben mit je 20 g, wobei eine sehr hohe Genauigkeit der Waage von 0,0001 g erforderlich war. Nachdem dies geschehen war, wurde jede Probe in eine Flasche gegeben und mit 50 ml Dispergierung und 200 ml entionisiertem Wasser aufgefüllt. Die Dispergierung und das entionisierte Wasser sorgen dafür, dass die kleinsten Bodenteilchen nicht miteinander verklumpen, was das Ergebnis verfälschen würde.

Um eine möglichst gute Verteilung von Flüssigkeit und Bodenpartikeln in der Flasche zu erreichen, musste jede Probe für einige Stunden in einen Rüttler/Schüttler.

Kubiena:

Der Inhalt jeder Flasche wurde in einen Messzylinder gegeben und bis zur 1 l Markierung aufgefüllt. Anschließend wurden 16 Abdampfschalen abgewogen (Genauigkeit: 0,0001 g) und gemeinsam mit den 4 Messzylindern in einer Vorrichtung positioniert, um diese automatisiert zu beproben. Die Probennahme erfolgte anschließend, wie bereits beschrieben, zu bestimmten Zeiten in vorgegebenen Tiefen.

Der letzte Schritt beinhaltete das Trocknen der Proben und Abwägen der Abdampfschalen.



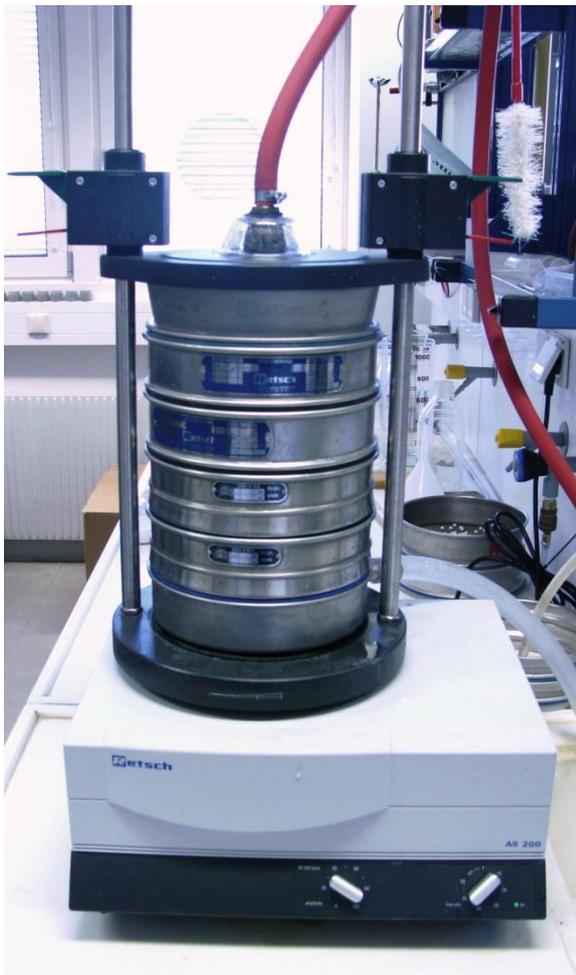
Abbildung 8: vollautomatische Probennahme

Da der Apparat (Abbildung 8) zur Zeit der Messung auf 8 Proben eingestellt war und eine Umstellung aufwändig gewesen wäre, wurden neben den vier Messzylindern noch vier weitere, mit Wasser gefüllte positioniert. Dasselbe galt für die Abdampfschalen.

Nasssiebung:

Der Inhalt jedes Messzylinders aus dem Kubienaversuch wurde in einen Siebturm, der sich auf einem Rüttelgerät (Abbildung 9 a) befindet, geleert und gründlich ausgewaschen. Anschließend wurden die Siebe 15 Minuten lang mit Wasser und unter Rütteln gespült. Der Inhalt jedes Siebes musste nun gründlich in eine abgewogene Abdampfschale (Abbildung 9 b) gegeben werden. Wie beim Kubienaversuch war der letzte Schritt ein Trocknen und erneutes Abwägen.

a)



b)



Abbildung 9: a) Siebturm und b) Siebrückstand

Ergebnis der Analyse:

Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt die ausgewertete Korngrößenverteilung der 4 Durchgänge. Dabei bewegt sich der Tonanteil in einem Bereich von 22 % bis 23 %. Ein Tonanteil von 30 % und mehr wäre für die Versuche nicht geeignet, da der Ton beim Entwässern schrumpft und so Risse in der Bodenprobe entstehen würden, die durch das Freilegen eines Sensors die Messungen verfälschen könnten.

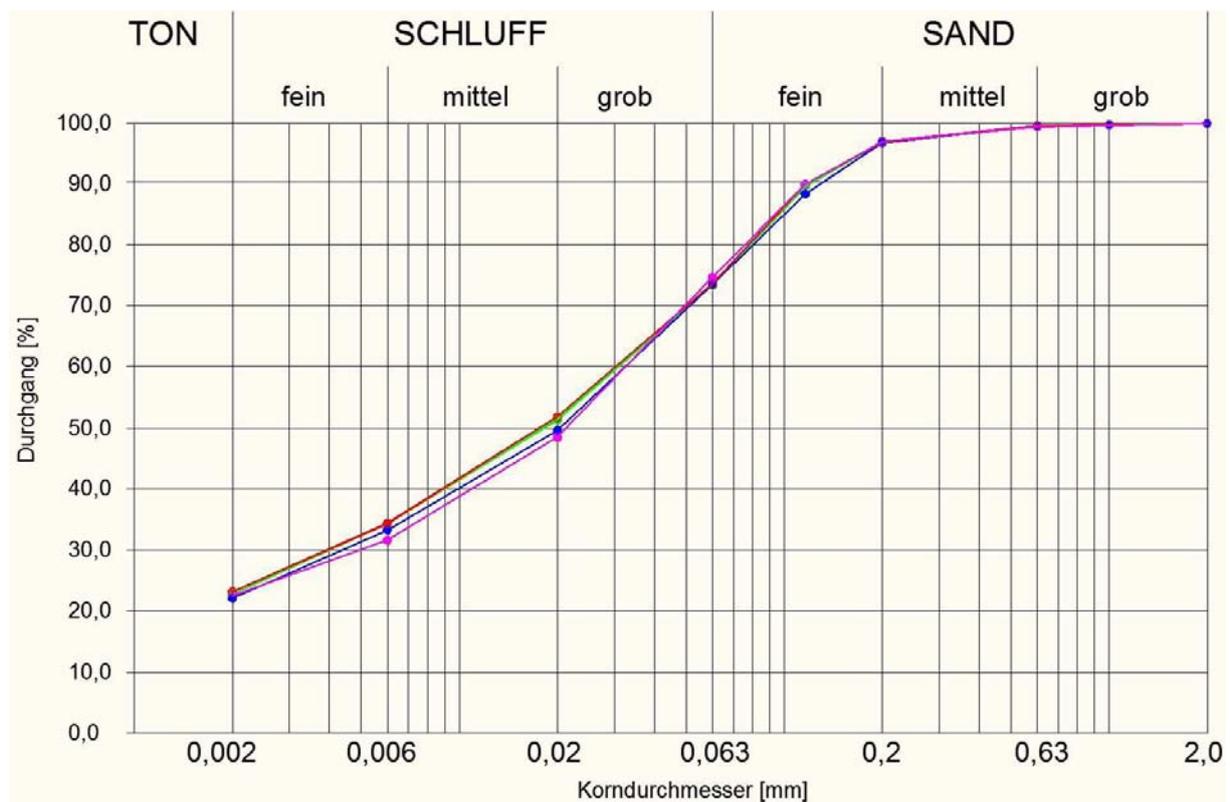


Abbildung 10: Korngrößenverteilung Boden Groß-Enzersdorf

4.5 Verhalten des Matrixpotenzials bei unterschiedlichen Temperaturen

Wie in den Grundlagen/Sensorbeschreibung bereits erklärt wurde, ist das Ergebnis einer FDR-Messung stark vom Wassergehalt bzw. dessen Dielektrizitätszahl abhängig. Da die Dielektrizitätszahl jedoch mit sinkender Temperatur steigt (Chena et al., 2012), ist es wichtig zu wissen, inwieweit dies vom Hersteller berücksichtigt wurde.

Versuchsdurchführung:

Um genaue Ergebnisse zu erhalten, war es notwendig, die Verdunstung von den Keramikscheiben während der Versuche so weit wie möglich zu unterbinden. Zu Beginn der Messungen wurde ein beliebiges Matrixpotenzial z.B.: -60 kPa bei Raumtemperatur (20°C) eingestellt und der Sensor anschließend in eine eng anliegende Kunststoffhülle gegeben und verschlossen (Abbildung 11).



Abbildung 11: Sensor in Kunststoffhülle

Dabei war darauf zu achten, dass sich in der Hülle so wenig Luft wie möglich befand, da sich sonst, abhängig von der Luftfeuchtigkeit, das Matrixpotenzial ändern hätte können. Um eine relativ rasche Änderung der Temperatur zu erreichen, wurde dies mit einem Wasserbad realisiert und zwar bei den Temperaturen 5°C (Kühlschranktemperatur), 20°C (Raumtemperatur) und 30°C . Die 30°C wurden aus der Tatsache heraus in die Versuche miteinbezogen, da laut Messungen die Bodentemperatur in einer Tiefe von 5 cm im Sommer 30°C erreichen kann.

Als der Sensor mit eingestelltem Matrixpotenzial jedoch in das Wasserbad gegeben wurde, konnte beobachtet werden, dass sich das Matrixpotenzial augenblicklich änderte, was darauf zurückzuführen ist, dass sich der FDR-Messbereich des Sensors nicht nur auf die Keramikscheiben beschränkt. Ein kleiner Bereich außerhalb des gesamten Sensors wird ebenfalls erfasst. Hierzu zählt auch die in

Vinyl eingegossene Elektronik. Berührt man diese Vinylhülle, verändert sich das Matrixpotenzial ebenfalls sofort, bei höheren Matrixpotenzialen sogar gravierend. Um dieses Verhalten zu kompensieren, wurde die Kunststoffhülle durch eine Gummihülle, die den Sensor sehr gut abdichtete, ausgetauscht und der Sensor in eine schaumgummiähnliche, ca. 4 mm starke, Abdeckung gegeben und zusätzlich noch in einer Kunststoffhülle verschlossen (Abbildung 12). Somit wurde der Messbereich bei bekanntem Matrixpotenzial definiert und konnte sich durch angrenzendes Wasser nicht mehr verändern.



Abbildung 12: Gummihülle, Schaumstoffmantel, Kunststoffhülle

Der Sensor verblieb so lange in den Wasserbädern, bis sich seine Temperatur nicht mehr veränderte. Dies war wichtig, da sich der Temperaturfühler in der Vinylhülle und nicht im Bereich der Metallscheiben befindet. Zusätzlich wurde die Wassertemperatur mit einem Temperatursensor LM35CZ kontrolliert.

Folgende Matrixpotenziale wurden untersucht:

1. -5,7 kPa (Vollsättigung)
2. -60 kPa
3. -115 kPa
4. -240 kPa
5. -320 kPa Messbereich
6. -1750 kPa

Anmerkungen:

Um eine Vollsättigung zu erreichen, wurden die Sensoren für wenige Minuten in ein Wasserbad gelegt. Hier ist zu erwähnen, dass die MPS-2 eine schnelle Reaktionszeit von wenigen Sekunden aufzeigten. So änderte sich der Messwert von ca. -100.000 kPa auf -6 kPa binnen 10 Sekunden. Problematisch ist jedoch, dass die Sensoren bei Vollsättigung immer ein Matrixpotenzial ausgeben, das sich um -6 kPa bewegt. Dies stellt einen Kritikpunkt dar, da der Sensor bei nicht vorhandenem Matrixpotenzial immer einen Wert ausgibt. Hier wäre es besser gewesen, keinen, oder einen sehr unrealistischen Wert anzuzeigen. Um die anderen Matrixpotenziale einzustellen, wurde der Sensor der Umgebungsluft bei 20°C so lange ausgesetzt, bis sich der gewünschte Wert einstellte.

Der Maximalwert von -1750 kPa liegt zwar außerhalb des Messbereichs, befindet sich aber in etwa im Bereich des permanenten Welkepunktes, weswegen dieser noch in die Versuche aufgenommen wurde.

Da es sich bei den Versuchen um eine 3-Punktmessung handelte, der Verlauf bzw. die Funktion, die das Verhalten des Sensors beschreibt, jedoch von Interesse war, wurde im Anschluss bei ca. -96 kPa ein Durchlauf gestartet, der sich aus 25 Messungen zusammensetzte.

Bei der Versuchsdurchführung wurde der Sensor in ein Wasserbad mit ca. 33°C gegeben, welches anschließend in den Kühlschrank gestellt wurde. Somit konnte eine gleichmäßige Abkühlung des Wasserbades und des Sensors erreicht werden.

4.6 Temperaturmessung, Messgenauigkeit

Diese Fragestellung soll darüber Auskunft geben, in wie weit die Herstellerangaben in Bezug auf die Genauigkeit der Temperaturmessung stimmen. Dazu wurden 30 Sensoren (S.63) in ein mit einem geeichten Thermometer überwacht Wasserbad gegeben, gewartet bis sich die Sensoren auf die Temperatur eingestellt hatten und anschließend gemessen. Um eine Abkühlung bzw. Aufwärmung des Wasserbades während der Messung zu vermeiden, wurde die Temperatur an die Raumtemperatur so weit wie möglich angenähert. Bei dem Versuch betrug die Wassertemperatur, sowie die Umgebungstemperatur 23,0°C.

4.7 Wie präzise und akkurat ist die Hersteller-Kalibrierung

Bevor diese Fragestellung beantwortet wird, sollte hier kurz der Unterschied zwischen Präzision und Genauigkeit (engl. accuracy) erläutert werden. Zur Vereinfachung Abbildung 13 verwendet:

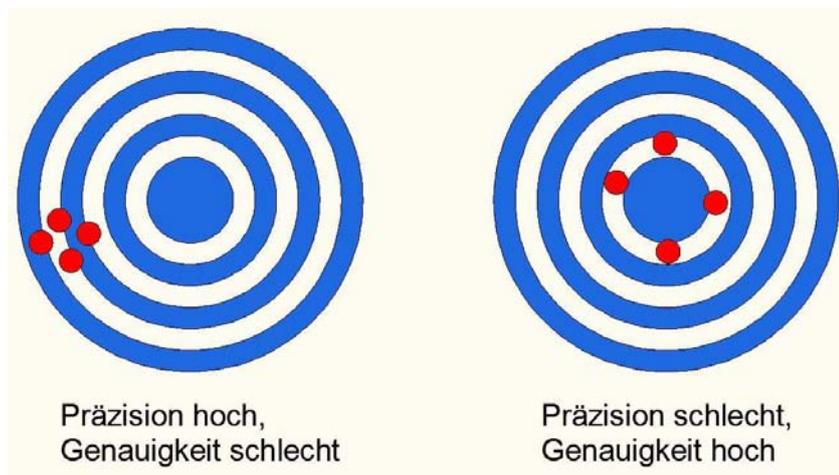


Abbildung 13: Präzision vs. Genauigkeit (Hydraprobe manual)

Präzision bedeutet, inwieweit die einzelnen Messergebnisse voneinander abweichen, unabhängig davon, ob die gemessenen Werte dem IST-Wert entsprechen.

Genauigkeit wiederum betrachtet die Abweichung vom IST-Wert und vernachlässigt die Unterschiede zwischen den Messergebnissen.

Da die beiden Terme erläutert wurden, kann nun zur ursprünglichen Fragestellung zurückgekehrt werden. Um diese zu beantworten, mussten alle MPS-2 im Druckplattenapparat, bei unterschiedlichen Drücken untersucht werden.

Hier wird noch kurz die vom Hersteller angegebene Genauigkeit von $\pm 25\%$ bei einem Matrixpotenzial von -5 bis -100 kPa wiederholt bzw. vermerkt.

Da zur Zeit der Messung 2 Drucktöpfe mit Kabeldurchführung zur Verfügung standen, konnten nur 12 Sensoren permanent per Telemetrie ausgelesen werden. Die Messwerte der restlichen 17 Sensoren wurden manuell erfasst.

Hierzu mussten die Drucktöpfe nach jeder abgeschlossenen Druckstufe geöffnet und die Daten jedes Sensors mit einem Handauslesegerät (ProCheck) abgefragt werden. Da es sich im Gegensatz zu dem Telemetrie-System nur um eine Momentaufnahme handelte, wurde versucht einen Mittelwert mit ungefähren Schwankungsbereichen zu erfassen. Nach abgeschlossenem Auslesen aller Sensoren und Wiederverschließen der Drucktöpfe wurde die nächste Druckstufe eingestellt und die Prozedur von Neuem gestartet. Hier sollte angemerkt werden, dass die Druckplatten einige Male getauscht werden mussten, da der Wasserfilm in den Platten abriss und somit die Funktionsfähigkeit nicht mehr gegeben war. Dieser Fehler zeigt sich in einem mehr oder weniger starken Luftaustritt aus dem Silikonschlauch, der Luftblasen im Sammelgefäß verursacht. Tritt nur sehr wenig Luft aus, kann man den Versuch unter Umständen fortführen. Ab einer gewissen Luftmenge führt dies jedoch zu einem Austrocknen der Probe und somit zu fehlerhaften Ergebnissen.

Um bei den Versuchen einen breiten Bereich des Matrixpotenzials in einem überschaubaren zeitlichen Rahmen abzudecken, war es erforderlich, die Drucktöpfe in Gruppen aufzuteilen. So wurden die 2 Drucktöpfe mit der Adcon-Telemetrie den Druckstufen -50 , -100 , -200 und -300 kPa und die manuellen Drucktöpfe den Stufen -50 , -100 , -300 , -500 und -600 kPa unterzogen.

Um die Präzision zu bestimmen und genauere Daten zu erhalten, wurden die Versuche zwei Mal durchgeführt. Dazu musste der Druckplattenapparat geöffnet und der Boden, in dem sich die Sensoren befanden, mit Wasser gesättigt werden. Nach dem Verschließen konnte wieder von vorne begonnen werden.

4.8 Unterschiede im Vergleich mit MPS-1

Um die beiden Sensortypen zu vergleichen, wurden die Arbeiten von Malazian et al. (2011) und Nolz et al. (2012) herangezogen. Diese befassten sich intensiv mit dem MPS-1 und liefern eine sehr gute Vergleichsbasis. Ziel dieser Untersuchung war es die Sensoren bezüglich ihrer Präzision, Genauigkeit und des Temperaturverhaltens einander gegenüberzustellen.

4.9 Wasserbewegung in oberflächennahen Bodenschichten (Evaporation)

Dieser letzte Punkt der Fragestellungen soll klären, ob die Matrixpotenzialsensoren MPS-1 und MPS-2 geeignet sind, um Bodenwasserbewegungen in oberflächennahen Schichten zu erfassen. Bei „oberflächennah“ wird von einigen cm bis wenige dm gesprochen. Grundlage für den MPS-1 bilden auch, wie im Punkt 4.8, die Arbeiten von Malazian et al. (2011) und Nolz et al. (2012).

5. Ergebnisse und Diskussion

5.1 Matrixpotenzial bei verschiedenen Temperaturen

Während der Versuche konnte, wie in Abbildung 14 gezeigt wird, ein Tagesgang des Matrixpotenzials, ausgelöst durch Temperaturschwankungen beobachtet werden. Abbildung 14 zeigt einen Abschnitt (Sensor 6199-xx-134) von ca. 8 Tagen, wobei der untere Graph den Temperaturverlauf und der obere den Verlauf des Matrixpotenzials darstellt. Es ist deutlich erkennbar, dass ein Minimum der Temperatur ein Maximum des Matrixpotenzials verursacht und umgekehrt. Da eine Änderung der Temperatur um lediglich 2°C eine Änderung des Matrixpotenzials von über 50 kPa hervorrief, war es von großem Interesse, das Verhalten bei größeren Temperaturdifferenzen zu untersuchen.

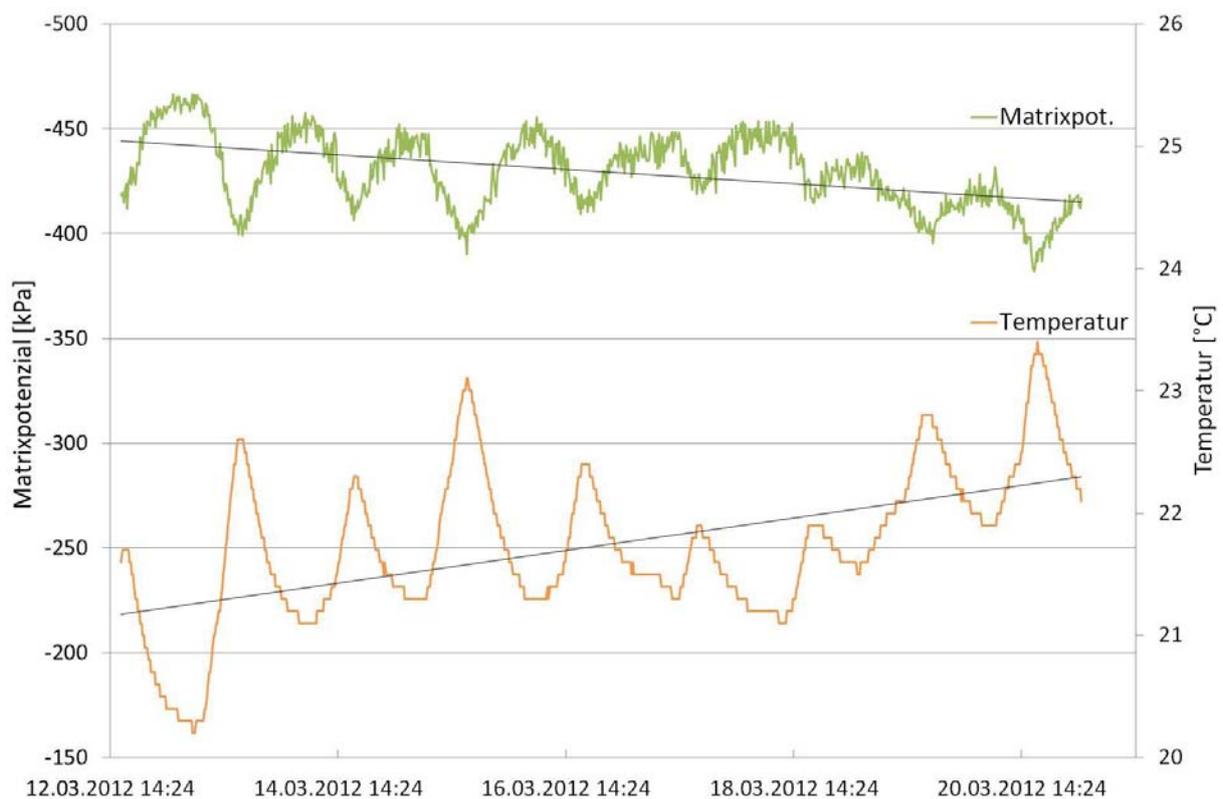


Abbildung 14: Tagesgang Matrixpotenzial/Temperatur

Anmerkung: Gleichgewicht bei 3 bar nach 5 Tagen, Drucktopf 2, 1. Durchlauf

Des Weiteren war auch deutlich zu erkennen, dass die Schwankungen bei höheren Matrixpotenzialen viel stärker ausfielen als bei niedrigen.

Die nachfolgende Tabelle 5 zeigt die gemessenen Werte und die berechneten Abweichungen von den Werten bei 20°C. Hier ist gut zu erkennen, dass die Dielektrizitätszahl mit steigender Temperatur abnimmt und dieses Verhalten scheinbar nicht oder nur ungenügend vom Hersteller berücksichtigt wurde, was den Sensor zur Messung von Wasserbewegungen in bodennahen Schichten in Frage stellt, da der Tagesgang der Temperatur des Bodens in den ersten 5 bis 10 cm üblicherweise stark schwankt. Dieses Problem muss dem Anschein nach vom Anwender selbst behoben oder berücksichtigt werden. Die markierten Matrixpotenziale bei 20°C gelten als Referenzwerte.

		Temperatur [°C]			
		5	20	30	
Matrixpotenzial [kPa]		-5,7	-5,7	-5,6	
		-62,1	-59	-57,8	
		-166	-115	-101	
		-350	-240	-155	
		-700	-320	-195	
		-100000	-1750	-930	
			Referenz		
		Temperatur [°C]			Messbereich
		5	20	30	
		0,0 %	-5,7 kPa	1,8 %	
		-5,3 %	-59 kPa	2,0 %	
		-44,3 %	-115 kPa	12,2 %	
		-45,8 %	-240 kPa	35,4 %	
		-118,8 %	-320 kPa	39,1 %	
		-5614,3 %	-1750 kPa	46,9 %	

Tabelle 5: links: gemessene Abweichungen in kPa; rechts: Abweichungen in %

Die Abweichungen bei niedrigen Matrixpotenzialen bis -59 kPa fallen gering aus und könnten auch vernachlässigt werden, wobei dies ab -115 kPa nicht mehr so einfach ist, da es sich hier bereits um -44 % bzw. +12 % handelt. Sehr interessant war die letzte Messung, da bei einem Matrixpotenzial von -1750 kPa, welches im Boden durchaus erreicht werden kann, der Sensor bei 5°C den Maximalwert von -100.000 kPa anzeigte.

Die nachfolgende Abbildung 15 zeigt den Verlauf der 25 Messungen, der im Temperaturbereich zwischen 5°C und 30°C nicht linear ist, sondern sehr gut durch ein Polynom 2. Ordnung angenähert werden konnte.

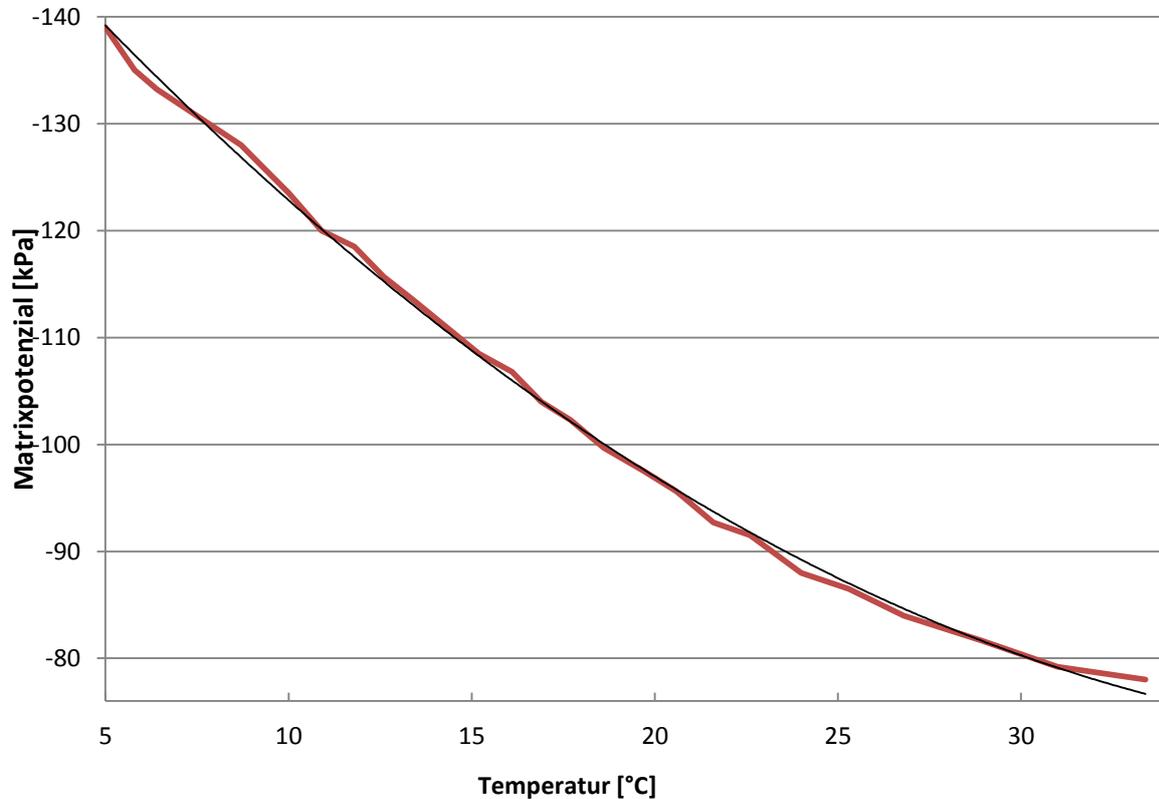


Abbildung 11: Detailmessung (-96 kPa bei 20°C Referenztemperatur)

Das Problem, das einer Funktion, welche diesen Fehler behebt, im Wege steht, ist, dass sich für jedes Matrixpotenzial ein eigenes Polynom ergibt, welches zwar in einer Kurvenschar dargestellt werden könnte, jedoch nicht in eine einzelne Funktion umgerechnet werden kann (Abbildung 16).

Abbildung 16 zeigt 4 Durchläufe mit verschiedenen Matrixpotenzialen, alle bei 20°C eingestellt. Wird nun zufällig ein Matrixpotenzial von -300 kPa bei einer Temperatur von 14°C gemessen, so können diese Werte der -240 kPa Kurve zugeordnet werden. Über die Funktion der Trendlinie, die eingeblendet ist, kann das Matrixpotenzial bei 20°C berechnet werden, was einem Wert von -240 kPa entspricht.

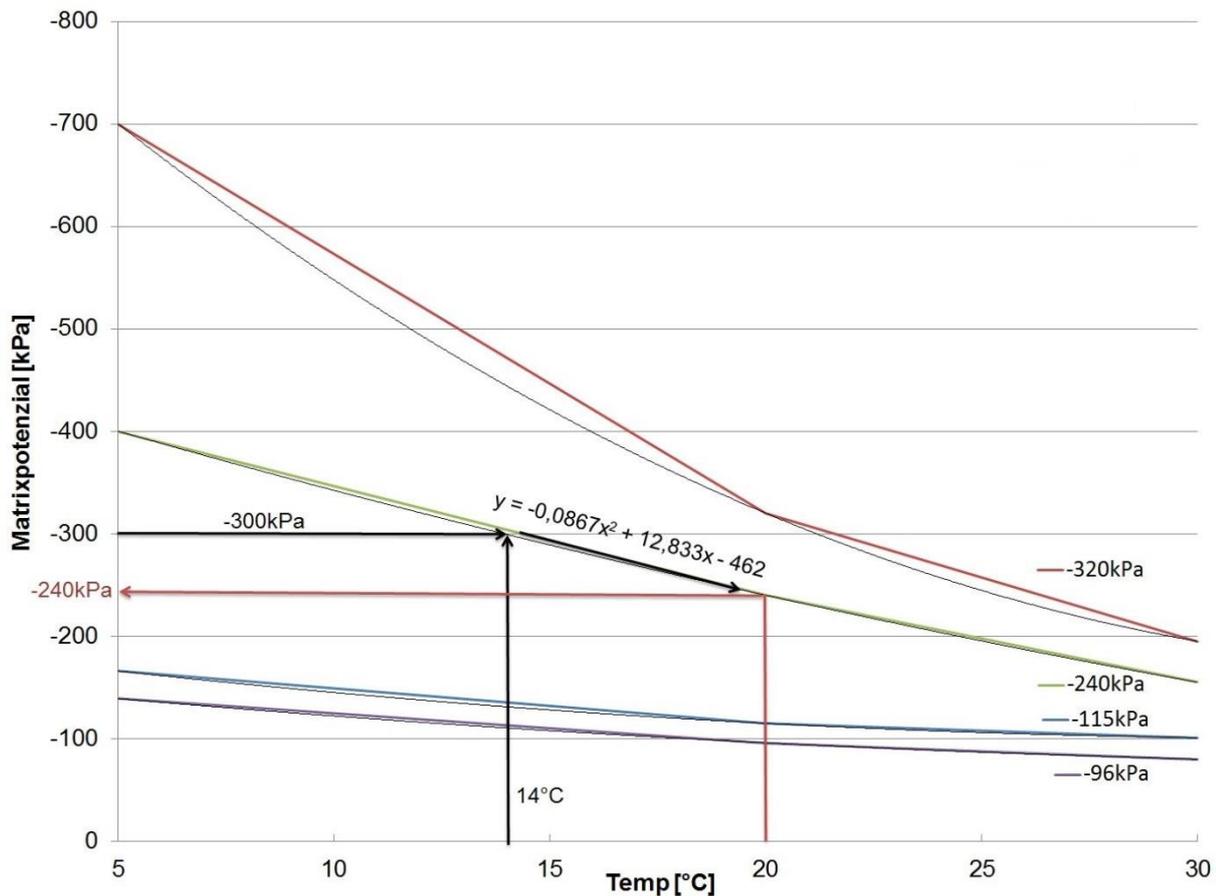


Abbildung 12: Temperaturkompensation

Um eine Temperaturkompensation zu realisieren wäre es möglich mit multipler Regression zu arbeiten, was jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit war. Was jedoch sehr wohl mit dieser Arbeit geklärt werden soll, ist, wie sich der MPS-1 im Vergleich zum MPS-2 verändert hat. Dazu wurde die nachfolgende Abbildung 17 erstellt, welche alle Kalibrierfunktionen der Sensoren der 2 Adcon-Drucktöpfe zeigt. Hierfür war es notwendig, alle Sensorwerte beim Erreichen der jeweiligen Druckstufe bei genau 20°C auszufiltern.

Die Abbildung 17 zeigt die Werte aller 12 Sensoren, gemessen bei 20°C bei den Matrixpotenzialen 0, -50, -100, -200 und -300 kPa. Gegenübergestellt werden diese Werte den eingestellten Drücken im Druckplattenapparat, quasi ein IST/SOLL Vergleich. Somit kann jedem Sensorwert der reale zugeordnet werden, was als Kalibrierung bezeichnet wird.

Hier ist noch anzumerken, dass die schwarze Linie den Idealfall einer Messung darstellt.

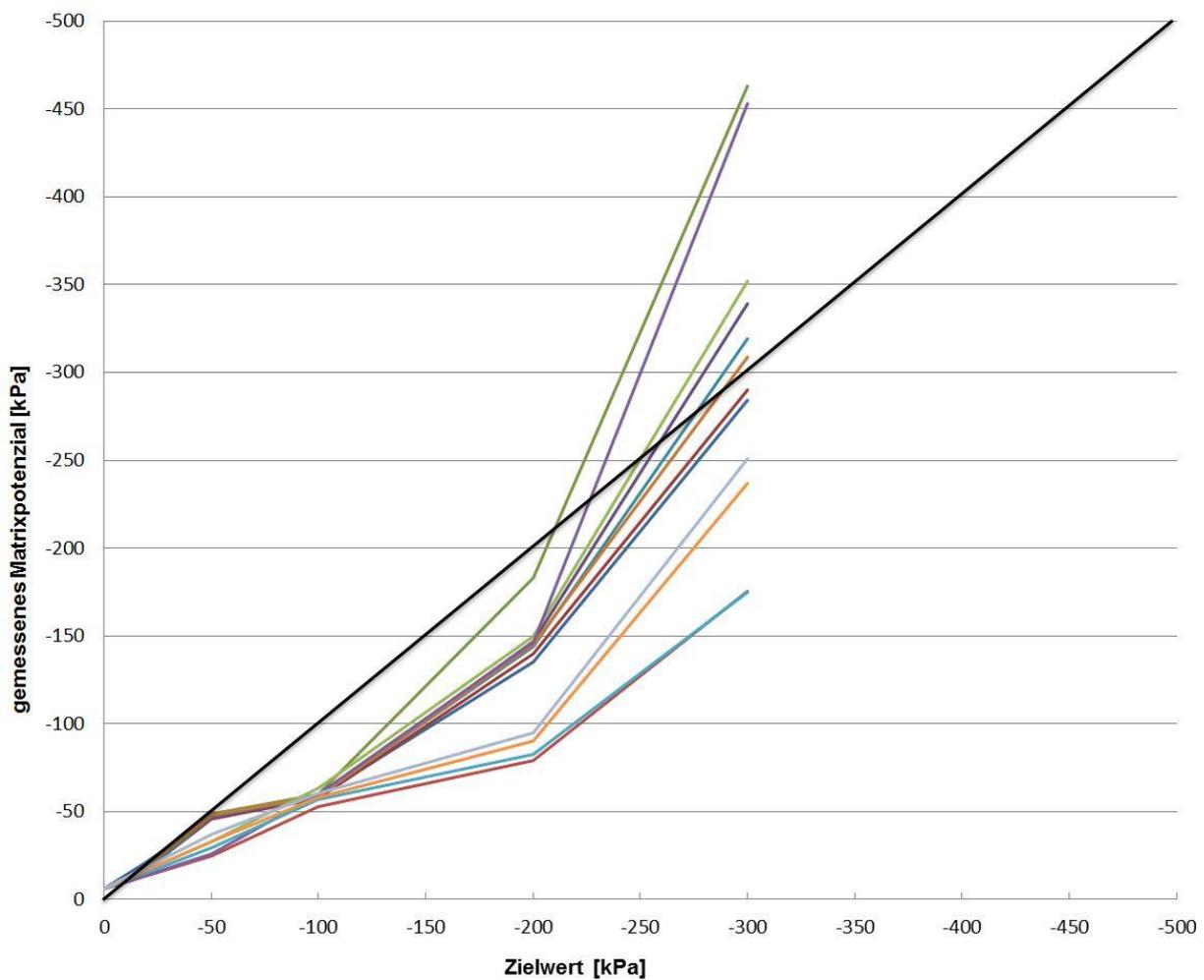


Abbildung 13: Kalibrierfunktionen

5.2 Temperaturmessung Genauigkeit

Grundsätzlich konnte man bereits bei der Messung bemerken, dass keiner der Sensoren einen Wert von 23,0°C (Referenztemperatur = Raumtemperatur) anzeigte. Wie Abbildung 18 zeigt, gaben alle Sensoren größere Werte aus. Die höchste gemessene Temperatur war 23,6°C und die niedrigste 23,2°C. Daraus ergibt sich ein Mittelwert aller 30 Sensoren von 23,36°C.

Laut Hersteller liegt die Messgenauigkeit bei $\pm 1^\circ\text{C}$, was durch den Versuch bestätigt werden kann, da eine maximale Abweichung von $+0,6^\circ\text{C}$ festgestellt wurde.

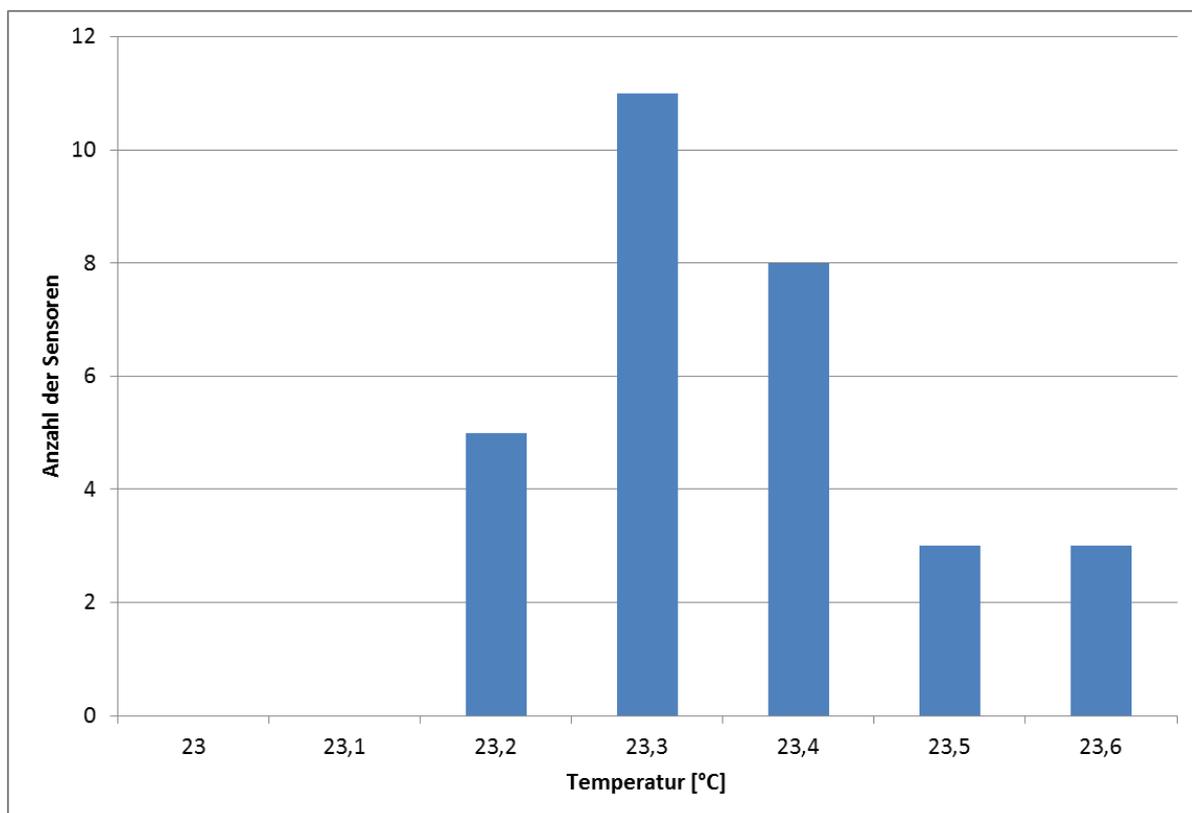


Abbildung 14: Häufigkeitsverteilung Temperaturmessung MPS-2; 30 Sensoren

5.3 Genauigkeit und Präzision

Die nachfolgende Abbildung 19 lässt sehr gut erkennen, dass die Sensoren bis zu einem Matrixpotenzial von -100 kPa sehr ähnliche Werte liefern, diese jedoch mit teilweise großen Abweichungen zum eingestellten Matrixpotenzial behaftet sind. Ab -200 kPa beginnen sich die einzelnen Sensoren in ihren Messergebnissen voneinander zu entfernen. Hier sind Abweichungen von ca. 50 kPa untereinander zu verzeichnen. Wie zu erwarten, setzt sich diese Streuung mit steigendem Matrixpotenzial fort und nimmt zu. So weisen die Sensorwerte bei -300 kPa Unterschiede von $>200\text{ kPa}$ auf.

Weiters ist noch anzumerken, dass die Messergebnisse bei Drücken bis inklusive 200 kPa immer deutlich kleiner waren. Erst ab 300 kPa beginnen die Sensoren auch höhere Werte als eingestellt anzuzeigen.

Abbildung 19 zeigt einen Durchlauf bis 3 bar . Der mit dem * markierte Bereich soll zeigen, dass es nicht immer einfach ist, zu bestimmen, ob sich das System bereits im Gleichgewicht befindet, und die nächste Druckstufe eingestellt werden kann. Da hier keine großen Änderungen zu erwarten waren, wurde der Druck erhöht.

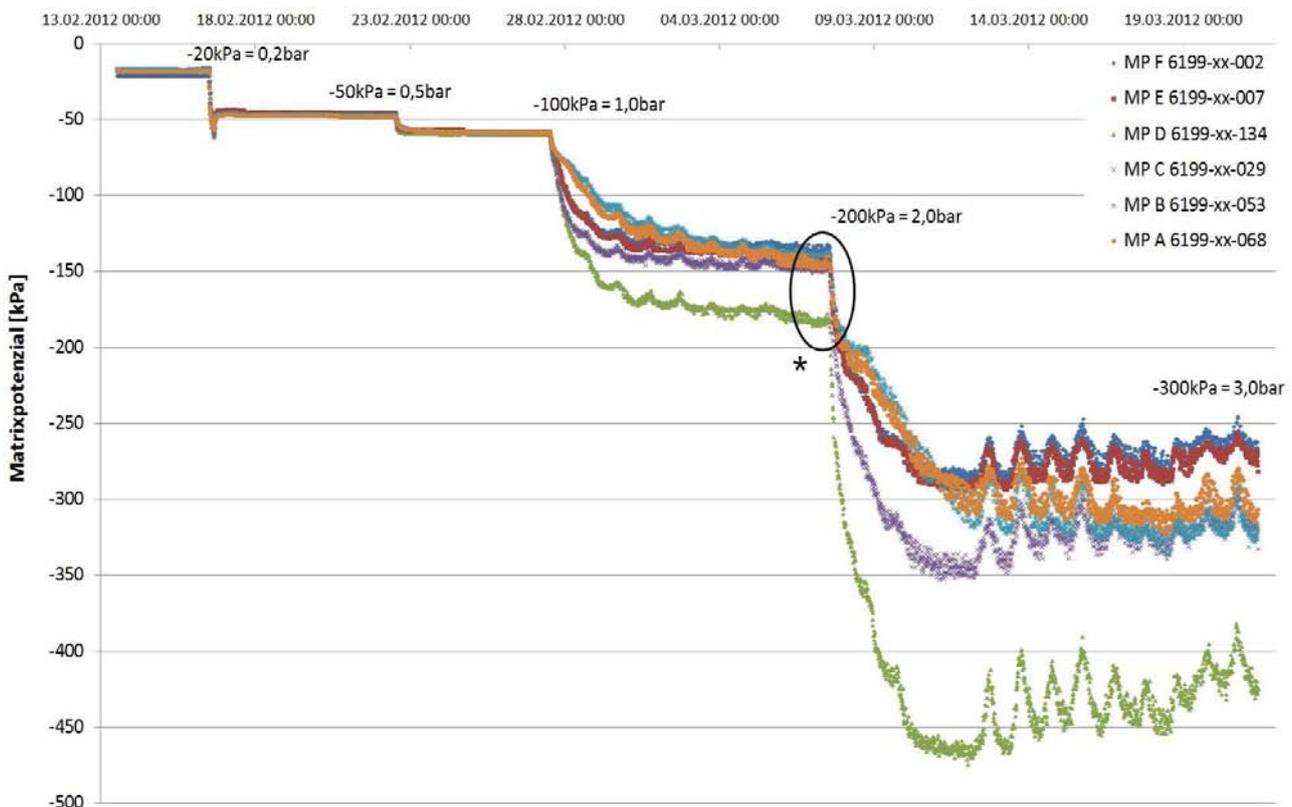


Abbildung 15: 1. Durchlauf Drucktopf 2

Im Gegensatz zu dem ersten Verlauf sieht man im Bereich von 2 bar (Abbildung 20) einige Schwankungen. Solche entstehen durch Ungenauigkeiten beim Einstellen des Druckes am Druckreduzierventil. Wird eine neue Druckstufe eingestellt, so braucht das System Druckplattenapparat eine gewisse Zeit, um sich „einzupendeln“. Das heißt, dass der Druck langsam erhöht wird, bis sich das Manometer dem gewünschten Druck nähert. Selbst wenn man das Druckreduzierventil nicht mehr berührt, steigt der Druck im Drucktopf noch leicht an/nach. Dieser Vorgang kann oft mehrere Stunden dauern und es kommt dadurch auch vor, dass sich ein eingestellter Druck ohne Ursache über ein Wochenende verändert.

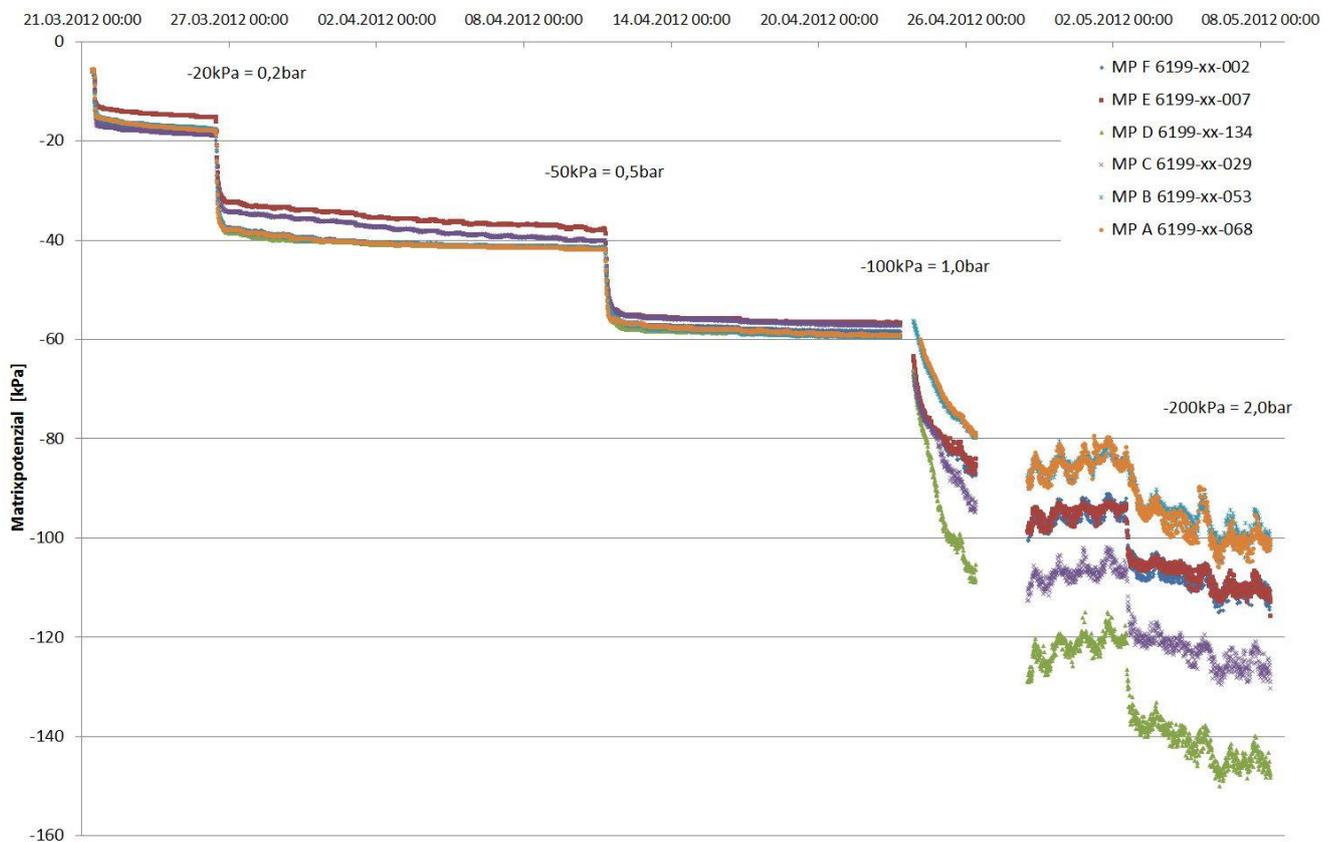


Abbildung 16: 2. Durchlauf Drucktopf 2

Abbildung 21 zeigt dasselbe Streuungs-Verhalten im nächsten Drucktopf. Ab 2 bar beginnen die Sensoren deutlich zu streuen. Somit kann ein Fehler im Einbau der Sensoren im Drucktopf 2, welcher für dieses Streuungsverhalten verantwortlich sein könnte ausgeschlossen werden. Durch Entwässerung entstehen im Boden mehr oder weniger stark ausgeprägte Risse, die die Keramikscheibe des MPS-2 freilegen, und das Verhalten des Sensors beeinflussen können. Abbildung 22 veranschaulicht diesen Prozess. Besteht ein schlechter Kontakt zwischen Sensor und Boden, so dauert es länger, um das Wasser aus dem Sensor zu drücken, da die Kontaktfläche kleiner ist. Würde ein Sensor keinen Kontakt zum Boden haben, dann könnte auch kein Wasser aus diesem entfernt werden, und der Wert des Matrixpotenzials würde sich nicht verändern.

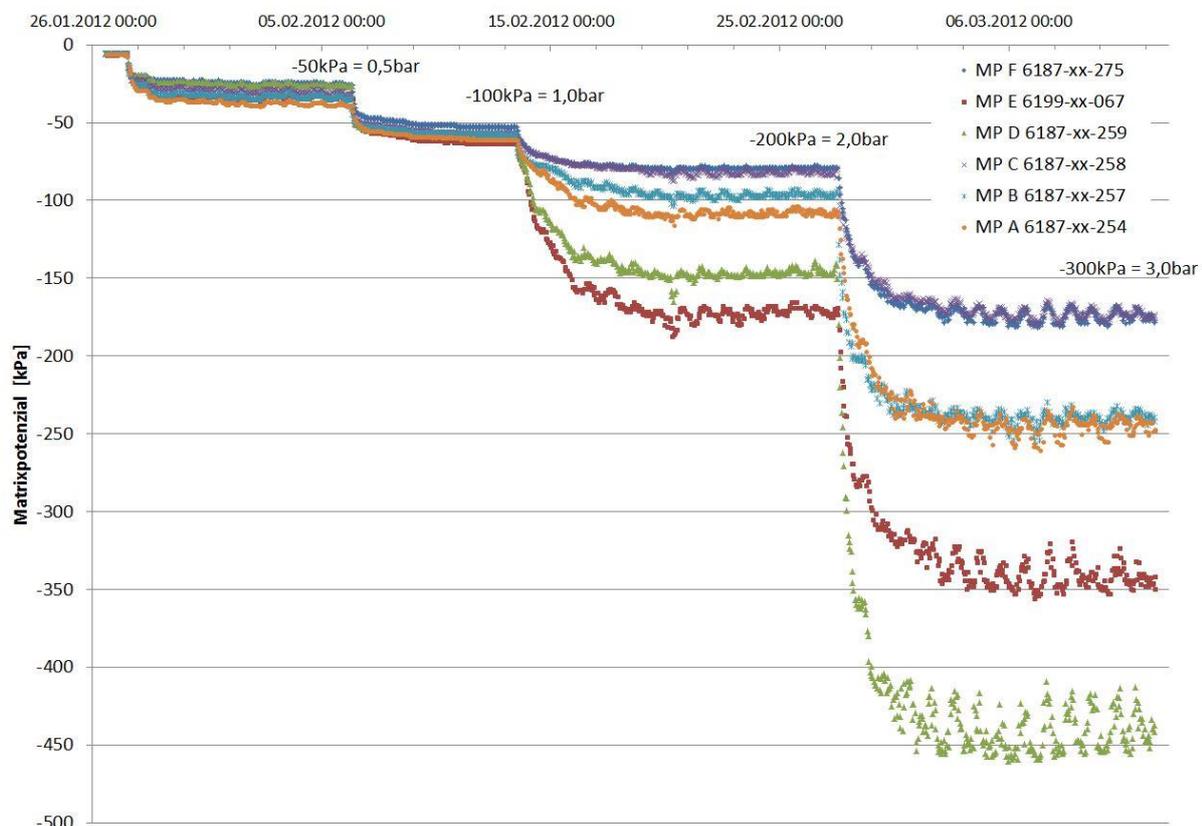


Abbildung 17: 1. Durchlauf Drucktopf 1

In Abbildung 22 ist deutlich der Unterschied zwischen nassem (links) und trockenem (rechts) Boden erkennbar. In der Mitte des trockenen Bodens bildete sich ein deutlich erkennbarer Riss.



Abbildung 18: Schrumpfrisse durch Entwässerung

Abbildung 23 zeigt, dass MP E und MP D selbst nach erneutem Befeuchten und Neustart des Versuches bei 2 und 3 bar wieder die höchsten Matrixpotenziale ausgaben.

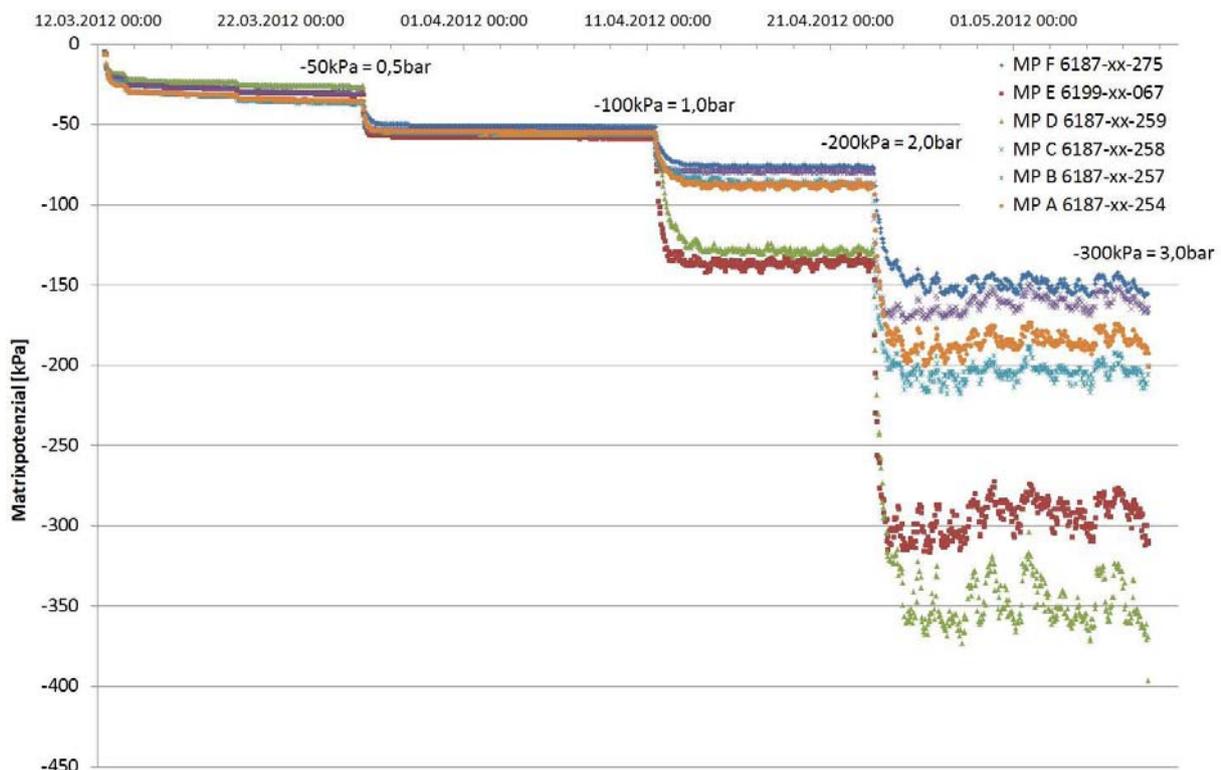


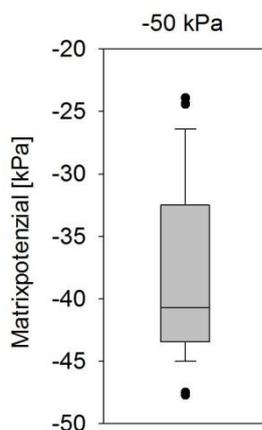
Abbildung 19: 2.Druchlauf Drucktopf 1

In allen Versuchen war zu erkennen, dass die Matrixpotenziale bei den zweiten Durchläufen geringer ausfielen als die Werte der ersten Durchläufe. Eine Begründung dafür kann in der Hysteresis durch erneutes Befeuchten der trockenen Bodenprobe gefunden werden.

5.3.1 Ergebnisse Genauigkeit

Besonderes Augenmerk wurde auf den Bereich bis -100 kPa gelegt, da hierfür Herstellerangaben bekannt sind. Bei der Auswertung handelt es sich um einen Vergleich des IST/SOLL Wertes, sprich gemessener zu eingestelltem Wert.

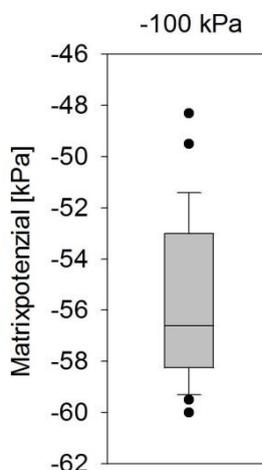
Folgende Abbildungen zeigen die Auswertung aller durchgeführten Druckstufen:



Bei diesem Durchlauf wurden alle 29 Sensoren getestet. Der berechnete Mittelwert lag bei -38 kPa, wobei die maximalen und minimalen Werte -48 kPa und -24 kPa erreichten.

Alle Ergebnisse waren kleiner als das eingestellte Matrixpotenzial.

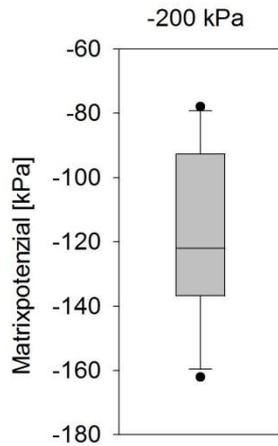
Abbildung 20: Sensorwerte bei Gleichgewichtsdruck von -50 kPa



Auch hier waren, wie bei den -50 kPa, alle Messergebnisse kleiner als die eingestellte Druckstufe. Der Mittelwert wich mit -56 kPa sehr stark von den -100 kPa ab.

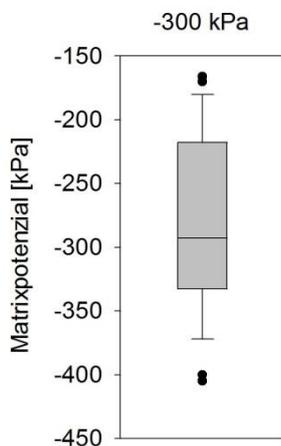
Die Maxima und Minima der 29 Sensoren betragen -60 kPa und -51 kPa.

Abbildung 21: Sensorwerte bei Gleichgewichtsdruck von -100 kPa



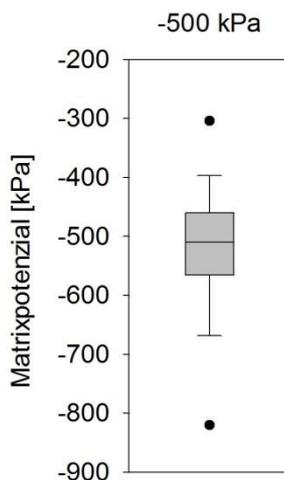
Die Versuche mit -200 kPa waren die letzten, deren Abweichungen nur kleiner als der eingestellte Wert waren. Hier wurden 12 Sensoren getestet, wobei der Mittelwert -119 kPa betrug und sich die Messungen in einem Bereich von -162 kPa bis -78 kPa bewegten.

Abbildung 22: Sensorwerte bei Gleichgewichtsdruck von -200 kPa



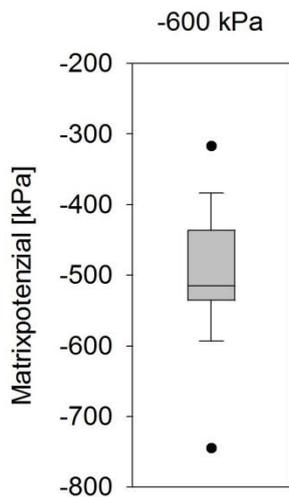
Die hier verwendeten 29 Sensoren lieferten einen Mittelwert von ca. -280 kPa, was in Anbetracht der vorangegangenen Messungen überraschend war. Die Streuung war jedoch mit 240 kPa erheblich größer.

Abbildung 23: Sensorwerte bei Gleichgewichtsdruck von -300 kPa



Selber Effekt wie bei der -300 kPa Messung. Der Mittelwert der 17 Sensoren betrug ca. -522 kPa, die Streuung war aber wieder sehr hoch mit ca. 400 kPa. Die sehr breite Streuung wurde jedoch nur durch einen Ausreißer verursacht.

Abbildung 24: Sensorwerte bei Gleichgewichtsdruck von -500 kPa



Bei diesem letzten Durchgang gab es wieder einen Ausreißer, und zwar jenen Sensor, der auch für die große Streuung bei den -500 kPa Versuchen verantwortlich war. Womöglich war ein Fehler im Boden dafür ausschlaggebend.

Der Mittelwert der 17 Sensoren lag bei -497 kPa, also niedriger als bei -500 kPa. Die Streuung betrug ca. 428 kPa.

Abbildung 25: Sensorwerte bei Gleichgewichtsdruck von -600 kPa

Auf Grund der Größenordnung der einzelnen Messergebnisse wurde eine gesplittete Darstellung verwendet, da bei ein und derselben Ordinate der Schwankungsbereich von -50 kPa und -100 kPa bei der -600 kPa Darstellung nicht erkennbar wäre.

Die Abbildung 30 zeigt die prozentuellen Abweichungen der Messwerte von den Zielwerten.

Wie bereits beschrieben waren die Sensorwerte bis inkl. -200 kPa deutlich geringer als eingestellt.

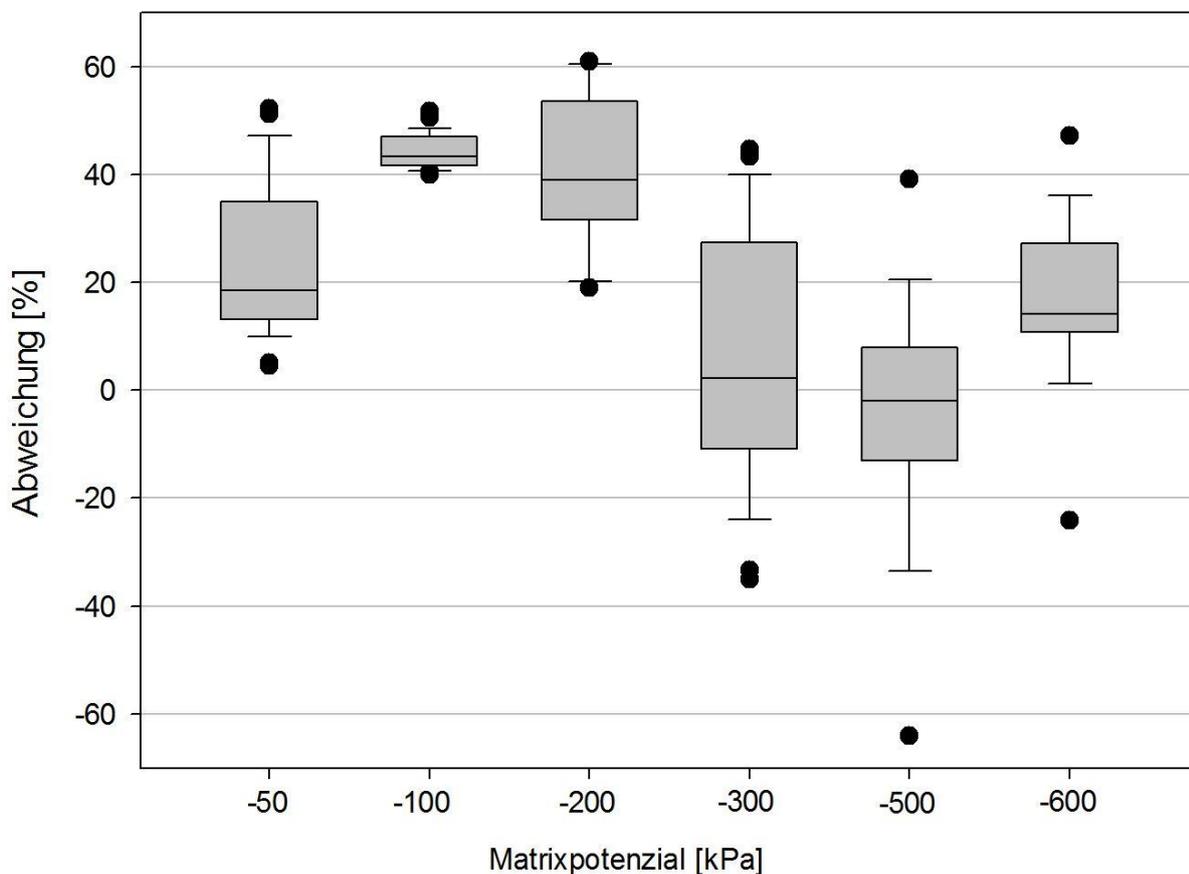


Abbildung 26: Abweichungen vom Zielwert

Hier ist nochmals zu erwähnen, dass der Hersteller bis -100 kPa eine Genauigkeit von $\pm 25\%$ angibt. Bei den getesteten -50 kPa hätten 17 von 29 Sensoren diese Genauigkeit eingehalten. Weniger gut fällt das Ergebnis für -100 kPa aus. Hier hat keiner der 29 Sensoren die $\pm 25\%$ eingehalten. Die beste Abweichung war 40% . Der Vollständigkeit halber werden hier noch die übrigen mittleren Abweichungen angeführt:

-200 kPa Mittelwert 41%
 -300 kPa Mittelwert 19%
 -500 kPa Mittelwert 15%
 -600 kPa Mittelwert 20%

5.3.2 Ergebnisse Präzision

Abbildung 31 zeigt die Matrixpotenzialverläufe des Sensors 6187-xx-254 von 2 Durchgängen. Gut zu erkennen ist, dass bei höheren Druckstufen die Abweichungen größer wurden.

Hier ist noch anzumerken, dass bei dieser Untersuchung der Betrag der Druckstufe nicht relevant ist, lediglich die Abweichungen untereinander.

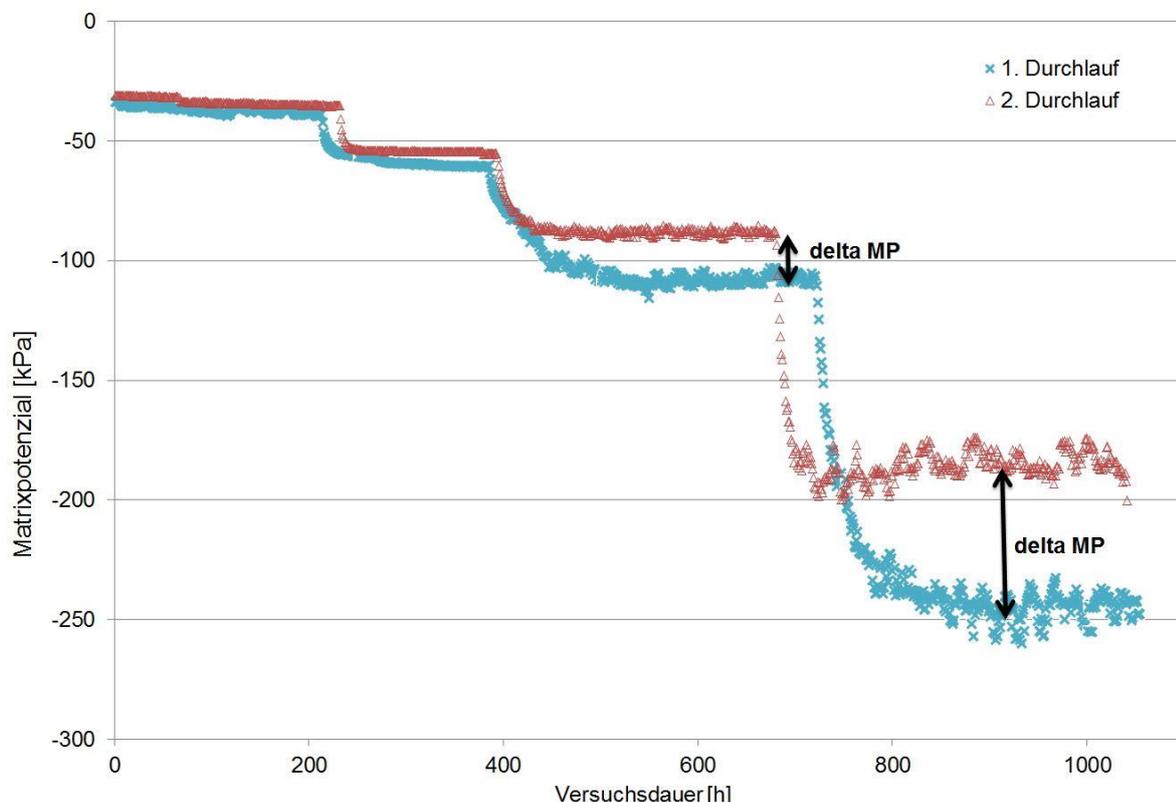


Abbildung 27: Vergleich 1. und 2. Durchlauf
50

In Tabelle 6 wurden alle doppelt vorhandenen Durchläufe ausgewertet und in %-Abweichung dargestellt. Die Sensoren 6199-xx (Drucktopf 2) lieferten bei der -200 kPa Druckstufe im zweiten Durchgang jedoch sehr unzuverlässige Werte, wie man sehr gut in Abbildung 20 erkennen kann. Dadurch ergibt sich eine hohe mittlere Abweichung von 16,2 %. Der Mittelwert des 1. Drucktopfes wäre mit 9,9 % deutlich kleiner.

		Druckstufe			
		-50 kPa	-100 kPa	-200 kPa	-300 kPa
Drucktopf 1	Sensor ID				
	6187-xx-275	3,4	2,5	2,9	10,1
	6199-xx-067	10,9	7,6	16,4	7,4
	6187-xx-259	2,2	6,3	11,2	13,4
	6187-xx-258	2,8	4,6	2	3,8
	6187-xx-257	1,9	4	8,8	13,4
Drucktopf 2	6187-xx-254	9,1	8,6	18,2	22
	6199-xx-068	13,5	1,2	31,3	
	6199-xx-053	13,5	1,4	30,5	
	6199-xx-029	14,9	1,6	14,7	
	6199-xx-134	13,8	1,2	20,2	
	6199-xx-007	17,6	1,9	21,2	
	6199-xx-002	13	0	17,5	
		9,7	3,4	16,2	11,7
		mittlere Abweichung			

Tabelle 6: mittlere Abweichungen in % bezogen auf SOLL-Wert

Als Resümee ist zu sagen, dass die bei den durchgeführten Versuchen erreichte Genauigkeit des Herstellers bei Weitem nicht eingehalten wurde bzw. die Herstellerkalibrierung nicht ausreichend war. Hier muss jeder Sensor, bevor er im Feld eingesetzt wird, mit dem entsprechenden Boden im Drucktopf kalibriert werden. Welchen Einfluss jedoch die Hysterese auf die Messergebnisse hat, müsste in separaten Versuchen ermittelt werden.

Das Ergebnis der Präzision fällt im Gegensatz zur Genauigkeit positiv aus. Bis zur Druckstufe -300 kPa kann man mit einer mittleren Abweichung von ca. $\pm 12\%$ rechnen.

5.4 Unterschiede im Vergleich mit MPS-1 Sensoren

Zuvor sei gesagt, dass sich MPS-1 und MPS-2 rein von der Elektronik zur Messung des Matrixpotenzials nicht unterscheiden. Demnach war bei der Auswertung davon auszugehen, dass das Verhalten der vom Hersteller kalibrierten Sensoren ähnlich sein würde.

Die Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse der MPS-1 Messungen von Malazian et al. (2011) links und die aktuellen Ergebnisse der MPS-2 rechts.

Beide Grafiken veranschaulichen, dass grundsätzlich von einem zu gering ausgegebenen Matrixpotenzial ausgegangen werden kann. Die Streuungen sind auch als ähnlich zu erachten. So betragen die Abweichungen bei beiden Versuchen bei z.B. -300 kPa ca. 300 kPa.

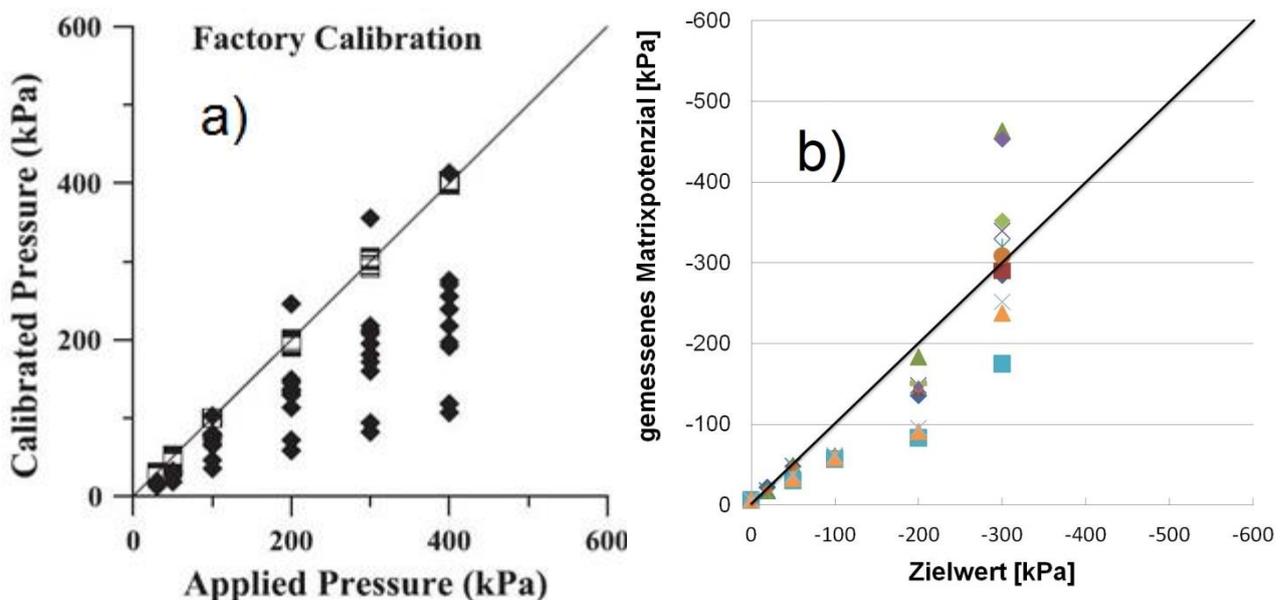


Abbildung 28: Vergleich a) MPS-1 (Malazian et al., 2011) b) MPS-2

Beim Temperaturverhalten ist ein Vergleich nicht so einfach, da Malazian et al. (2011) die Temperaturabhängigkeit bei einem Matrixpotenzial von -25 kPa durchführten. Es wird zwar eine sehr geringe Temperaturabhängigkeit beschrieben, aber bei genauerer Betrachtung ist ein Trend zu erkennen, wie Abbildung 33 zeigt.

Bei einer Temperaturdifferenz von ca. 25°C wurde eine Sensor-Outputdifferenz von ca. 7 mV gemessen. Bei vorhergehenden Versuchen lag der Sensor-Output in einem Bereich von ca. 600 mV bis ca. 900 mV bei einem Matrixpotenzial von 0 bis -400 kPa, das heißt, einer Range von 300 mV bei 400 kPa. Somit wären 7 mV ca. 2,3 %, also ca. 0,6 kPa. Dasselbe Verhalten legt der MPS-2 ebenfalls an den Tag, wie Tabelle 5 zu entnehmen ist.

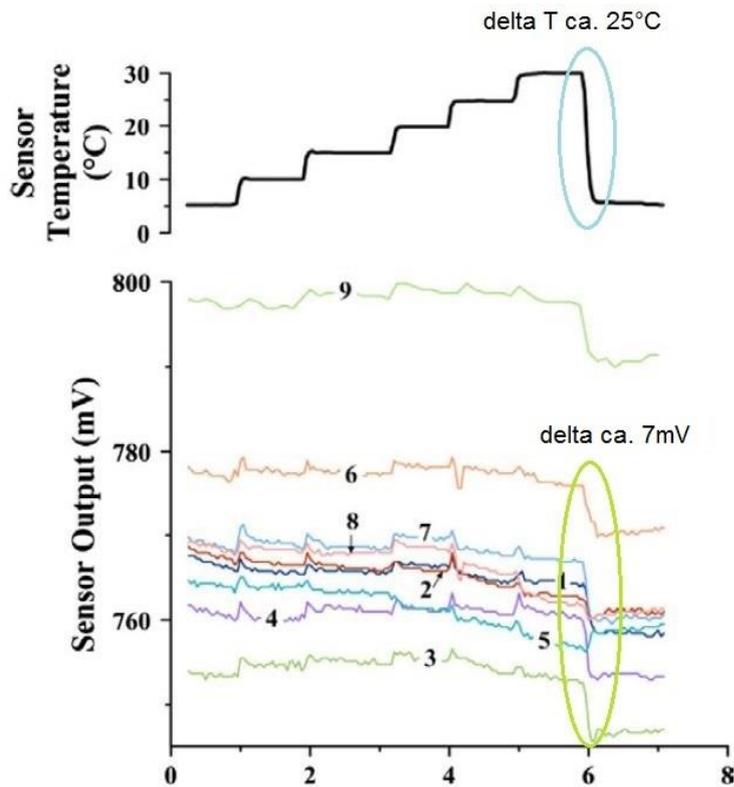


Abbildung 29: Temperaturverhalten MPS-1 (Malazian et al., 2011)

Es ist also davon auszugehen, dass die Temperaturkompensation bei beiden Modellen ein großes Problem darstellt und noch nicht, oder nicht ausreichend, vom Hersteller berücksichtigt wurde.

5.5 Wasserbewegung in oberflächennahen Bodenschichten (Evaporation)

Wie im vorhergehenden Absatz beschrieben wurde, reagieren MPS-2 und sehr wahrscheinlich auch MPS-1 sehr empfindlich auf Temperaturschwankungen. Diesbezüglich kann hier nur eine Empfehlung abgegeben werden, die wie folgt aussieht:

Bis zu einem Matrixpotenzial von -60 kPa kann der MPS-2 ohne zusätzliche Temperaturkompensation zur Erfassung von Wasserbewegungen in oberflächennahen Schichten verwendet werden. Beim MPS-1 ist ein ähnliches Verhalten zu erwarten, kann aber mit den vorliegenden Daten nicht untermauert werden. Hier müssten zusätzliche Untersuchungen durchgeführt werden. Bei allen höheren Matrixpotenzialen und großen Temperaturschwankungen sollte eine Kompensation auf jeden Fall in Betracht gezogen werden.

6. Schlussfolgerung/Zusammenfassung

Die Versuche haben gezeigt, dass im Vergleich zum Vorgängermodell des MPS-2 keine messbare Verbesserung stattgefunden hat. Der einzige Unterschied dürfte in der Weiterentwicklung zu einem digitalen Sensor mit Temperaturmessung liegen.

Bezüglich Genauigkeit war das Ergebnis ernüchternd, da die vom Hersteller angegebenen $\pm 25\%$ bei -100 kPa von keinem der 29 Sensoren eingehalten wurden. Die beste Abweichung war hier 40% . Bei den getesteten -50 kPa wiesen lediglich 17 Sensoren die angegebene Genauigkeit auf. Hier ist auch noch anzuführen, dass alle gemessenen Matrixpotenziale bei Drücken bis -200 kPa immer kleiner waren. Erst bei höheren Drücken gaben die Sensoren auch größere Werte aus.

Anders als bei der Genauigkeit fiel das Ergebnis der Präzision deutlich besser aus. So betrug die Abweichung bei -50 kPa im Mittel $9,7\%$, und bei -100 kPa nur $3,4\%$.

Die Genauigkeit der Temperaturmessung ergab eine mittlere Abweichung von $+0,36^\circ\text{C}$ und ein Maximum von $+0,6^\circ\text{C}$. Somit wurden Herstellerangaben von $\pm 1^\circ\text{C}$ eingehalten, wobei noch anzumerken ist, dass alle Messergebnisse größer als die tatsächliche Temperatur waren.

Der während der Versuche aufgetretene Verdacht einer Temperaturabhängigkeit des Matrixpotenzials konnte durch weiterführende Untersuchungen bestätigt werden. Hier liegt die Differenz des Matrixpotenzials zwischen 5°C und 30°C bei -115 kPa (20°C Referenztemperatur) bei 66% . Bis zu einem Matrixpotenzial von -60 kPa kann ohne Temperaturkompensation gearbeitet werden, darüber ist diese sehr empfehlenswert, vor allem bei großen Temperaturschwankungen.

Abschließend ist zu sagen, dass der MPS-2 auf Grund seines weiten Messbereiches und der digitalen Kommunikation ein praktischer Sensor ist, der jedoch mit der Herstellerkalibrierung keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert. Hier wird der Anwender um eine selbstständige Kalibrierung und Temperaturkompensation nicht herumkommen.

7. Quellenverzeichnis

Literatur:

Bachmaier J. 2010: Correlation between volumetric Water Content and Water Movement in a Soil Column Experiment.

Baumer O. 1989: Predicting Unsaturated Hydraulic Parameters. In van Genuchten M., Th. and F.J. Leij. Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of unsaturated Soils. Proceedings of the international workshop on indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils.

Bittelli M., Flury M. 2009: Errors in Water Retention Curves determined with Pressure Plates.

Cepuder P., Kammerer G., Nolz R., Strohmeier S. 2012: Applied Soil Physics; Physical and Selected Chemical Methods of Soil Analysis.

Chena W., Shenb P., Shuia Z. 2012: Determination of water content in fresh concrete mix based on relative dielectric constant measurement.

Cresswell H. W., Green T. W., McKenzie J. 2008: The Adequacy of Pressure Plate Apparatus for Determining Soil Water Retention.

Decagon Devices, Inc 2011: MPS-2 Dielectric Water Potential Sensor, Operator's Manual Version 1.

Dillbahner M., Engelmann S., Jonuleit K., Stracke J., Weyer A., Wingerath B., 2012: Untersuchung von Wasser als Dielektrikum im Kondensator.

Hanson B., Peters D. 2000: Soil type affects accuracy of dielectric moisture sensors.

Hilbel T., Helms T., Mikus G., Katus H., Zugck C. 2008: Telemetry in the clinical setting.

Kammerer G., 2012: Bodenphysik Vertiefung Skriptum.

Klute, A. 1986: Water retention: laboratory methods. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 1. , second ed. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 635–662.

Loiskandl W., Strauss-Siebert A. 2011: Bodenphysik Skriptum

Loiskandl W., Kammerer G. 2008: Bodenphysik Vertiefung Skriptum.

Lukanu G., Savage M. 2006: Calibration of a frequency-domain reflectometer for determining soil-water content in a clay loam soil.

Malazian A., Hartsough P., Kamaï T., Campbell G., Cobos D., Hopmans J. 2011: Evaluation of MPS-1 soil water potential sensor.

Nolz R. 2007: Unterflurtropfbewässerung bei Wein im Seewinkel – Optimierung der Wasser- und Nährstoffversorgung durch neue Bewässerungs- und Monitoringsysteme.

Nolz R., Himmelbauer M., Cepuder P., Loiskandl W. 2010: Remote monitoring of a novel irrigation system in a vineyard.

Nolz R., Kammerer G., Cepuder P. 2012: Calibrating soil water potential sensors integrated into a wireless monitoring network.

ÖNORM L1050 (1994): Boden als Pflanzenstandort - Begriffe und Untersuchungsverfahren.

Prochotta J. 2009: Frequenzgang der komplexen Permittivität.

Scheffer F., Schachtschabel P. 2005: Lehrbuch der Bodenkunde.

SDI-12 Support Group (Technical Committee) 2013: SDI-12 A Serial-Digital Interface Standard for Microprocessor-Based Sensors.

Seyfried M., Grant L., Du E., Humes K. 2005: Dielectric Loss and Calibration of the Hydra Probe Soil Water Sensor.

Shock C., Barnum M., Seddigh M. 1998: Calibration of Watermark Soil Moisture Sensors for Irrigation Management.

Stevens Water Monitoring System, Inc. 2007: The Hydra Probe Soil Sensor User Manual.

Take W., Bolton M. 2003: Tensiometer saturation and the reliable measurement of soil suction.

Thomson S., Younos T., Wood K. 1996: Evaluation of calibration equations and application Methods for the Watermark Granular Matrix Soil Moisture sensor.

Wolf M. 2012: Bewässerungssteuerung von Weinreben.

Internetquellen:

www.Irrrometer.com

www.Decagon.com

www.Stevenswater.com

www.Adcon.com

www.telemetry-world.com

Datenblatt Temperatursensor LM35CZ von Texas Instruments:

<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>

MPS-1 Manual Version 1:

<http://www.ictinternational.com.au/brochures/decagon/mps1-manual.pdf>

MPS-1 Manual Version 3:

<http://www.decagon.com/assets/Manuals/MPS-1v3.pdf>

MPS-2 Manual Version 1:

<http://www.decagon.com/assets/Uploads/MPS-2-Manual.pdf>

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Orientierungspolarisation, links: ohne E-Feld, rechts: mit E-Feld	13
Abbildung 2: Schema Telemetrie	17
Abbildung 3: Beschreibung MPS-2.....	18
Abbildung 4: Aufbau SDI-12	20
Abbildung 5: Schema Druckplattenapparat.....	22
Abbildung 6: Druckplattenapparat a) geschlossen und b) offen	24
Abbildung 7: Korngrößenverteilung (beispielhaft)	25
Abbildung 8: vollautomatische Probennahme.....	28
Abbildung 9: a) Siebturm und b) Siebrückstand	29
Abbildung 10: Korngrößenverteilung Boden Groß-Enzersdorf	30
Abbildung 15: Detailmessung (–96 kPa bei 20°C Referenztemperatur)	39
Abbildung 16: Temperaturkompensation.....	40
Abbildung 17: Kalibrierfunktionen	41
Abbildung 18: Häufigkeitsverteilung Temperaturmessung MPS-2; 30 Sensoren.....	42
Abbildung 19: 1. Durchlauf Drucktopf 2	43
Abbildung 20: 2. Durchlauf Drucktopf 2	44
Abbildung 21: 1. Durchlauf Drucktopf 1	45
Abbildung 22: Schrumpfrisse durch Entwässerung	46
Abbildung 23: 2. Durchlauf Drucktopf 1	46
Abbildung 24: Sensorwerte bei Gleichgewichtsdruck von –50 kPa	47
Abbildung 25: Sensorwerte bei Gleichgewichtsdruck von –100 kPa.....	47
Abbildung 26: Sensorwerte bei Gleichgewichtsdruck von –200 kPa.....	48
Abbildung 27: Sensorwerte bei Gleichgewichtsdruck von –300 kPa.....	48
Abbildung 28: Sensorwerte bei Gleichgewichtsdruck von –500 kPa.....	48
Abbildung 29: Sensorwerte bei Gleichgewichtsdruck von –600 kPa.....	49
Abbildung 30: Abweichungen vom Zielwert	49
Abbildung 31: Vergleich 1. und 2. Durchlauf.....	50
Abbildung 32: Vergleich a) MPS-1 (Malazian et al., 2011) b) MPS-2	52
Abbildung 33: Temperaturverhalten MPS-1 (Malazian et al., 2011).....	53
Abbildung 34: Verfärbung; links: Versuchsende, rechts: Versuchsbeginn.....	63

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Herstellerangaben MPS-1 (Version 3) und MPS-2 (Version 1).....	20
Tabelle 2: Logische Zustände und Spannungsbereiche	21
Tabelle 3: Korngrößenklassen des Feinbodens laut ÖNORM L1050 (1994).....	25
Tabelle 4: Absetzgeschwindigkeiten.....	27
Tabelle 5: links: gemessene Abweichungen in kPa; rechts: Abweichungen in %.....	38
Tabelle 6: mittlere Abweichungen in % bezogen auf SOLL-Wert	51

Verfärbung der Sensoren:

Die nachfolgende Abbildung 34 veranschaulicht die Veränderung der Farbe der Vinylhülle und zwar von Versuchsbeginn (schwarz) zu Versuchsende (weiß).

Dieses Verhalten wurde laut Hersteller bei der neuen Version des MPS-2 behoben.



Abbildung 30: Verfärbung; links: Versuchsende, rechts: Versuchsbeginn