

Mai 2018

# Messung des Eindringwiderstands und des Bodenwasserzustandes

## Methodenvergleich verschiedener Geräte und Verfahren



NABO

nationale bodenbeobachtung  
observatoire national des sols  
osservatorio nazionale dei suoli  
swiss soil monitoring network

# Impressum

<b>Herausgeber</b>	Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Agroscope, Zürich-Reckenholz
<b>Autoren</b>	Peter Schwab, Maria Dietrich, Andreas Gubler
<b>Leitung Vergleichsprüfung</b>	Peter Schwab, Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Agroscope Email <a href="mailto:peter.schwab@agroscope.admin.ch">peter.schwab@agroscope.admin.ch</a> Telefon 058 468 74 57 Web <a href="http://www.nabo.admin.ch">www.nabo.admin.ch</a>
<b>Mitwirkende</b>	Maria Dietrich <sup>1)</sup> , Julia Franzen <sup>1)</sup> , Florian Moors (Zivildienstleistender) <sup>1)</sup> , Peter Schwab <sup>1)</sup> , Ramon Zimmermann <sup>1)</sup> Andres Ribí <sup>2)</sup> , Markus Steger <sup>2)</sup> Luzius Matile <sup>3)</sup> Stephan Häusler <sup>4)</sup> , Renato Hauser <sup>4)</sup> , Bianca Lienert <sup>4)</sup>  <sup>1)</sup> Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Agroscope <sup>2)</sup> Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich <sup>3)</sup> ZHAW Wädenswil <sup>4)</sup> Terre AG
<b>Titelbild</b>	NABO, Vergleichsmessung in Fläche R109_F1 am 22.8.2017
<b>Bezug</b>	Dieses Dokument nur als PDF-Download Siehe: <a href="http://www.nabo.admin.ch">www.nabo.admin.ch</a> ->

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	5
1 Einleitung.....	6
2 Methoden.....	7
2.1 Eindringwiderstand .....	7
2.1.1 PANDA-Sonde .....	7
2.1.2 Penetrologger .....	8
2.2 Begleit-Parameter Bodenwasser .....	8
2.2.1 Wassergehalt .....	8
2.2.2 Saugspannung.....	9
2.3 Untersuchungsstandorte.....	10
2.4 Mess- und Probenahme-Design .....	11
2.5 Versuchsanordnungen.....	12
2.5.1 Wiederholbarkeit der Messungen mit demselben Gerät durch dieselbe Person (A1) .....	12
2.5.2 Wiederholbarkeit der Messungen mit demselben Gerät durch unterschiedliche Personen .	12
2.5.3 Vergleichbarkeit unterschiedlicher Geräte des Typs PANDA2 (A3) .....	12
2.5.4 Vergleichbarkeit PANDA-Sonde vs. Penetrologger (A4).....	13
2.5.5 Bodenwasser: Präzision der Methoden und deren Eignung als erklärende Variable (B1-B3)	13
2.6 Berechnungen und Statistik .....	14
3 Ergebnisse und Diskussion Eindringwiderstand .....	15
3.1 Wiederholbarkeit der Messungen mit demselben Gerät durch dieselbe Person (A1) .....	15
3.2 Wiederholbarkeit der Messungen mit demselben Gerät durch unterschiedliche Personen (A2)..	16
3.3 Vergleichbarkeit unterschiedlicher Geräte des Typs PANDA2 (A3) .....	18
3.4 Vergleichbarkeit PANDA-Sonde vs. Penetrologger (A4).....	20
3.5 Eignung für die Praxis (A5).....	22
4 Ergebnisse und Diskussion Bodenwasser .....	23
4.1 Präzision der Methoden (B1).....	23
4.2 Praxistauglichkeit der Methoden (B2).....	24
4.3 Aussagekraft der Begleitparameter (B3) .....	25
5 Ausblick: Standardisierung von Messungen des Eindringwiderstands bei unterschiedlichen Wassergehalten .....	26
6 Schlussfolgerungen.....	27
6.1 Messung des Eindringwiderstands.....	27
6.2 Erfassung des Bodenwasserzustandes .....	27
7 Abbildungsverzeichnis .....	28
8 Tabellenverzeichnis .....	30
9 Literaturverzeichnis .....	31
10 Anhang.....	32

10.1	Versuchsplan R115 (Test Methodenvergleich, Einfluss Person) .....	32
10.2	Versuchsplan R109 F2 (Methodenvergleichsprüfung ) .....	33
10.3	Versuchsplan R109 F1 (Einfluss Person und Einfluss Bodenwasser) .....	34
10.4	Einzelgrafiken; Messwiederholungen Methodenvergleich PANDA-Sonde vs. Penetrologger.....	35
10.4.1	Wiederholte Messungen PANDA-Sonde (4 cm <sup>2</sup> , 90°).....	35
10.4.2	Wiederholte Erhebungen Penetrologger (1 cm <sup>2</sup> , 60° und 3.3 cm <sup>2</sup> , 60°).....	36
10.5	Einzelgrafiken; Wiederholbarkeit bei Messung durch unterschiedliche Personen.....	37

---

## Zusammenfassung

In der Schweiz messen mehrere Institutionen den Eindringwiderstand des Bodens zur Lokalisierung und Beurteilung von Verdichtungen. Dazu werden verschiedene Penetrometer verwendet, hauptsächlich jedoch die PANDA-Sonde. Eine Untergruppe der Arbeitsgruppe Vollzug Bodenphysik (VBPhy) untersuchte 2016 in methodischen Abklärungen die Wiederholbarkeit sowie die Vergleichbarkeit verschiedener Methoden. Zur Messung des Eindringwiderstands wurden die PANDA-Sonde (PANDA2) von Sol Solution sowie der Penetrologger von Eijkelkamp geprüft. Der Bodenwasserzustand — eine wichtige Information zur Beurteilung des Eindringwiderstands — wurde anhand von Volumenproben sowie Tensiometern erfasst.

Mit einem geeigneten Mess-Design ist die Erhebung des Eindringwiderstands sehr gut reproduzierbar. Dies gilt sowohl für die PANDA-Sonde als auch den Penetrologger. Beim gewählten Mess-Design besteht jede Erhebung aus 20 Einzelsondierungen. Die Messstellen werden innerhalb der Versuchsfläche von 10 m x 10 m gemäss einem lateinischen Quadrat variiert. Für wiederholte Erhebungen am selben Tag, durchgeführt durch dieselbe Person mit derselben Sonde, lagen der Variationskoeffizienten (CV) des Eindringwiderstands unter 5 %. Wurde stets dasselbe Gerät verwendet, aber durch unterschiedliche Personen bedient, verdoppelte sich der CV. Dies bedeutet, dass die Streuung zwischen den wiederholten Erhebungen sich vergrösserte. Die zeitgleiche Erhebung mit drei Geräten des Typs PANDA2 zeigte: Bei einem Gerät erreichten die Messwerte generell nur rund 36 % der übrigen zwei. Die gute Übereinstimmung der Verlaufskurven des Eindringwiderstands über die Tiefe liess den Schluss zu, dass es sich um eine systematische Abweichung durch unterschiedliche Kalibrationen der Geräte handelt. Damit für den Vollzug die Vergleichbarkeit von Eindringwiderstandsmessungen gewährleistet ist, muss eine einheitliche Kalibration vom Hersteller garantiert und diese inskünftig überprüft werden.

Die Ergebnisse der PANDA-Sonde waren mit jenen des Penetrologgers, sowohl absolut als auch relativ, nur schlecht vergleichbar. Die Messwerte des Penetrologgers erreichten mit der grossen 3.3 cm<sup>2</sup>-Sondenspitze im Mittel 70 %, mit der kleinen 1 cm<sup>2</sup>-Spitze 85 % im Vergleich zur PANDA-Sonde. Zudem stimmten die Verlaufskurven über die Tiefe schlecht überein. Dabei fiel vor allem auf: Kompaktere Schichten sind in den Verlaufskurven der PANDA-Sonde deutlicher erkennbar, die Messwerte stiegen stärker an als beim Penetrologger. Wir gelangten deshalb zum Schluss: Trotz des höheren Zeitbedarfs, erachten wir die PANDA-Sonde als besser geeignet. Einerseits wegen der sensitiveren Erfassung verdichteter Zonen, andererseits weil sie in schwierigen Böden (z. B. steinige Böden) besser einsetzbar ist.

Die Messung der Begleitparameter gravimetrischer und volumetrischer Wassergehalt aus Bohrkernen hat den grossen Vorteil, dass die Werte präzise, zuverlässig und lückenlos über den gesamten Tiefenbereich der Penetrometer-Messung bestimmt werden können. Allerdings zeigte sich, dass die Saugspannung meist eine bessere Korrelation mit dem Eindringwiderstand aufweist. Dies bedeutet, dass die Saugspannung prinzipiell besser geeignet ist, Schwankungen des Eindringwiderstandes zu erklären. Die beschränkte Anzahl Messungen über die Tiefe, die schlechtere Präzision der Messungen und die häufigen Messlücken sind bei der Saugspannungsmessung jedoch eher problematisch. Grundsätzlich scheinen Tensiometer nur bei längeren, kontinuierlichen Untersuchungen sinnvoll. Für Einzelmessungen dürfte die Entnahme von Bohrkernen geeigneter sein.

---

# 1 Einleitung

In den vergangenen Jahren kamen diverse Messinstrumente auf den Markt, mit denen Verdichtungen im Boden festgestellt werden können. Verschiedene Penetrometer haben wegen ihrer schnellen und über die Tiefe hochauflösenden Datenerfassung eine gewisse Bedeutung erlangt. Damit können verdichtete Zonen leicht und preisgünstig lokalisiert werden. Die PANDA-Sonde von Sol Solution, zum Teil auch der Penetrologger von Eijkelkamp, werden in der Schweiz von verschiedenen kantonalen Fachstellen für Bodenschutz (FaBo) und von Forschungsgruppen an der ZHAW und bei Agroscope eingesetzt.

Eine Untergruppe der Arbeitsgruppe „Vollzug Bodenphysik“ (VBPhy) befasst sich mit der Anwendung von Penetrometern zur Messung und Beurteilung von Bodenverdichtungen im Feld. Fragen zur Durchführung von Feldmessungen, zur Datenauswertung und zur Interpretation von Messergebnissen mit der PANDA-Sonde stehen dabei im Vordergrund. Mit einem standardisierten Vorgehen kann die Vergleichbarkeit der Ergebnisse und der Austausch von Erkenntnissen verbessert werden. Dies führt zu mehr Interpretations-Sicherheit. Die Frage der Vergleichbarkeit von Messungen mit verschiedenen Geräten als auch von Messungen durch verschiedene Anwender wies einen prioritären Abklärungsbedarf auf. Zu diesem Zweck wurden 2016 am Standort Reckenholz (Agroscope) in Zürich-Affoltern verschiedene Vergleichsmessungen durchgeführt.

Das Bodenwasser beeinflusst nachweislich den Eindringwiderstand (Dexter et al, 2007; Schwab, 2010) und muss daher als Korrektur- bzw. Interpretationsvariable gleichzeitig erfasst werden. Häufig wird dazu mit Tensiometern in ausgewählten Bodentiefen die Saugspannung gemessen. Die NABO entnimmt dagegen volumetrische Proben aus profilumfassenden Bohrkernen. Daraus bestimmt sie schichtweise (pro 5 cm) die Begleitparameter gravimetrischer und volumetrischer Wassergehalt sowie Raumgewicht und Lagerungsdichte (Schwab et al. 2016). Mit dieser Methode können die Begleitparameter lückenlos über den gesamten Tiefenbereich erfasst werden. Neben den Fragen zur Messung des Eindringwiderstands wurden daher auch Methoden zur Messung des Bodenwassers untersucht.

Fragestellungen Eindringwiderstand:

- A1. Wie gut ist die Wiederholbarkeit der Messungen mit demselben Gerät durch dieselbe Person unter identischen Bedingungen?
- A2. Wie gut ist die Wiederholbarkeit mit demselben Gerät durch unterschiedliche Personen unter identischen Bedingungen?
- A3. Wie gut vergleichbar sind Messungen unterschiedlicher Geräte des Typs PANDA2?
- A4. Wie gut vergleichbar sind Messungen der PANDA-Sonde und des Penetrologgers?
- A5. Wie gut eignen sich die beiden Gerätetypen in der Praxis?

Fragestellungen Bodenwasser:

- B1. Wie präzise können Wassergehalt bzw. Saugspannung mit den jeweiligen Methoden bestimmt werden?
- B2. Wie gut eignen sich die verschiedenen Methoden in der Praxis (Praktikabilität, Fehleranfälligkeit und Aufwand)?
- B3. Wie gut korrelieren (zeitliche) Veränderungen der Begleitparameter mit Veränderungen des Eindringwiderstands (Eignung als Korrektur-Variable)?

## 2 Methoden

### 2.1 Eindringwiderstand

#### 2.1.1 PANDA-Sonde



Für die Messung mit der PANDA-Sonde (PANDA2 von Sol Solution) kamen bei allen Messungen Spitzen mit 4 cm<sup>2</sup> Querschnittsfläche und 90° Konuswinkel zum Einsatz. Mit diesem Sondenspitzen-Querschnitt ist die Mantelreibung des Gestänges sehr gering.

Bei der Messung werden vom Gerät die eingebrachte Energie und die Eindringtiefe gemessen. Für die Anwendung der „Holländischen Rammformel“ (Formel 1) für die Berechnung der Spitzenwiderstände wird angenommen, dass die Mantelreibung zwischen Bohrgestänge und Boden sehr gering ist, die gesamte Energie auf die Sondenspitze übertragen wird und der Boden während der Sondierung ideal-plastische Eigenschaften aufweist.

Für Abklärungen zur Methode siehe Fachberichte der Fachstelle Bodenschutz, Kanton Zürich (1997, 1998, 1999)

Abbildung 1: Messung Eindringwiderstand mit der PANDA-Sonde von Sol Solution.

$$q_n = E \frac{M}{A e^{(M+P)}} \quad (1)$$

- $q_n$  dynamischer Spitzenwiderstand [MPa]
- $E$  gesamte in das System eingebrachte Energie [kJ]
- $M$  Fallmasse Hammer [kN]
- $A$  Konusoberfläche der Sondenspitze [m<sup>2</sup>]
- $e$  plastische Eindringtiefe pro Schlag [m]
- $P$  Gesamtmasse von Amboss, Sondiergestänge und -spitze [kN].

Daraus ergibt sich der dynamische Eindringwiderstand für jeden Hammerschlag der PANDA-Sonde (PANDA2) gemäss Formel 2.

$$q_{d(z)} = \frac{E}{Ae} \frac{m_H}{m_H + m_{G,S}} \quad (2)$$

- $q_{d(z)}$  dynamischer Eindringwiderstand des Bodens in der Tiefe  $z$  [MPa]
- $m_H$  Masse des Hammers [kg]
- $E$  Die Schlagenergie ( $E = m \cdot g \cdot h$ ), gemessen mit Sensor im Amboss.
- $m_{G,S}$  Masse von Amboss, Sondiergestänge und -spitze [kg]
- $A$  Konusoberfläche der Sondenspitze [m<sup>2</sup>]
- $e$  Eindringtiefe pro Hammerschlag [m]

Um eine möglichst gute Auflösung über die Tiefe zu erhalten, werden pro Hammerschlag Eindringtiefen von weniger als 2 cm angestrebt. Nach dem Herunterladen der Messdaten vom Datenlogger auf

den PC werden mit einem R-Skript für jede Einzelmessung die gewichteten Mittelwerte pro 5 cm-Schicht berechnet.

## 2.1.2 Penetrologger



Für die Messungen mittels Penetrologger von Eijkelkamp wurden bei den ersten Messungen in den Flächen R115 und R109 F1 eine Sondenspitze mit einer Fläche von 3.3 cm<sup>2</sup> verwendet. Bei der Methodenvergleichsprüfung in der Fläche R109 F2 wurde zusätzlich eine Spitze mit 1 cm<sup>2</sup> Fläche eingesetzt. Beide Sondenspitzen haben einen Konuswinkel von 60°.

Der Penetrologger misst mit einem Sensor die auf den Boden angewandte Kraft und mit einem Ultraschall-Tiefenmesssystem die Eindringtiefe. Der Eindringwiderstand wird von der Geschwindigkeit des Eindringens und den Konuseigenschaften beeinflusst. Aus diesem Grund sollte die Sonde mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit in den Boden gedrückt werden, was besonders bei Schichtwechseln sehr schwierig ist. Für die Kontrolle der Eindringgeschwindigkeit ist auf dem Display ein Prüfmechanismus sichtbar. Steine waren für das Eindringen mit dem Penetrologger ein grösseres Hindernis als für die PANDA-Sonde.

Abbildung 2: Messung Eindringwiderstand mit dem Penetrologger von Eijkelkamp.

Der Eindringwiderstand wird vom Datenlogger gemäss Formel 3 pro 1 cm-Eindringtiefe berechnet. Um die gleiche Auflösung über die Tiefe wie bei der PANDA-Sonde zu erhalten, wurden die Messwerte der Einzelmessungen nach dem Export der Daten auf den PC für 5 cm-Bodenschichten gemittelt.

$$q = \frac{F}{A} \quad (3)$$

q	Eindringwiderstand [MPa]
F	Kraft [N]
A	Konusoberfläche [mm <sup>2</sup> ]

## 2.2 Begleit-Parameter Bodenwasser

### 2.2.1 Wassergehalt

Für die Bestimmung des Wassergehalts wurden bei jeder Erhebung mit einer HUMAX-Schlagsonde vier Bohrkern mit einem Durchmesser von 5 cm bis in eine Tiefe von ca. 70 cm entnommen (beschrieben in Schwab et al, 2016). Die gefüllten Hülsen wurden jeweils in einen Plastiksack gepackt und in einer Kühlbox gelagert, um Wasserverlust zu vermeiden. Unter Berücksichtigung der Stauung wurden die Bohrkern anschliessend in 5 cm-Schichten unterteilt (Abbildung 3). Aus diesen Schichtproben wurden durch Trocknung während 48 h bei 105 °C die Gehalte an Bodenwasser und Festsubstanz bestimmt.



Abbildung 3: Bestimmung des gravimetrischen Wassergehaltes 0 bis 75 cm.

**Links:** Entnahme von Bohrkernen mit der Humax-Schlagsonde.

**Mitte:** 4 Bohrkern 0 bis 75 cm Tiefe (in je 3 Plastikhülsen),

**Rechts:** 5 cm-Schichtproben aus Bohrkernen zur Trocknung.

So wurde über den gesamten Tiefenbereich der Wassergehalt und weitere physikalische Parameter bestimmt (Schwab et al, 2016). Da die Proben wenig bis kein Skelett enthielten, wurde angenommen, dass die Masse der Feinerde der Gesamttrockenmasse entspricht. Somit konnte der gravimetrische Wassergehalt der Probe ( $WG_{GP}$ ) dem gravimetrischen Wassergehalt der Feinerde ( $WG_{FE}$ , Formel 4) gleichgesetzt werden. Da es sich um volumetrische Proben handelt, kann daraus auch der volumetrische Wassergehalt ( $WG_{Vol}$ , Formel 5) und das Raumgewicht ( $RG_{FE}$ ) bzw. die Lagerungsdichte ( $LD_{FE}$ ) bestimmt werden.

$$WG_{FE} \left[ \frac{g}{g} \right] = \frac{(FM_{GP} - M_{GP})}{M_{FE}} * 100\% \quad (4)$$

$$WG_{Vol} \left[ \frac{cm^3}{cm^3} \right] = \frac{(FM_{GP} - M_{GP})}{\rho_{H_2O} * V_{GP}} * 100\% \quad (5)$$

$WG_{FE}$	gravimetrischer Wassergehalt der Feinerde [g/g %]
$WG_{Vol}$	Volumetrischer Wassergehalt [ $cm^3/cm^3$ %] bzw. [ $g_{H_2O}/cm^3_{Boden}$ %]
$\rho_{H_2O}$	Dichte von Wasser, kann in Annäherung $\approx 1$ angenommen werden [ $g/cm^3$ ]
$FM_{GP}$	Frischmasse der Bodenprobe (feldfeucht) [g]
$M_{GP}$	Trockenmasse (105 °C) der gesamten Bodenprobe [g]
$M_{FE}$	Trockenmasse (105 °C) der Feinerde (< 2 mm) [g]
$V_{GP}$	Volumen der Probe insgesamt [ $cm^3$ ]

## 2.2.2 Saugspannung

Zur Messung der Saugspannung wurden in der Fläche R109\_F1 je vier Standard-Tensiometer (Typ SR60) in vier Teilflächen (siehe Kapitel 10.3) in den Tiefen 20, 40 und 60 cm installiert. Am Tag der Methodenvergleichsprüfung wurde zusätzlich in den gleichen Teilflächen und Tiefen mit einem Instant-Tensiometer (UGT, Tensio 100) die Wasserspannung gemessen. Die Saugspannung wird in cbar (kPa) angegeben.



Abbildung 4: Messung der Wasserspannung mit Standard-Tensiometer (links) und Instant-Tensiometer (rechts).

## 2.3 Untersuchungsstandorte

Die Vergleichsprüfungen wurden am Standort Reckenholz in Zürich Affoltern auf zwei Parzellen der Agroscope durchgeführt. Im Juli 2016 wurden erste Messungen in Schlag 115 (R115) durchgeführt. Die weiteren Untersuchungen fanden von August bis Oktober auf zwei Untersuchungsflächen in Schlag 109 (R109 F1 und R109 F2) statt. Die Untersuchungsflächen umfassten jeweils 10 m x 10 m.

Der Boden in R115 ist eine schwach gleyige tiefgründige Braunerde, schwach skeletthaltig, mit der Bodenart schwach humoser sandiger Lehm bis Lehm. Die Bodenstruktur in der gesamten Fläche war nach der Gerstenernte in einem vergleichbaren und guten Zustand.

Die beiden Flächen R109 F1 und R109 F2 lagen im Schlag 109 in Bearbeitungsrichtung direkt hintereinander (*Abbildung 5*). Der Boden ist eine tiefgründige pseudogleyige Braunerde, skelettarm mit der Bodenart schwach humoser Lehm über Lehm bis toniger Lehm. Bodenaufbau und Bodenstruktur sind in beiden Flächen vergleichbar. Nach der Weizenernte wurde Kompost ausgebracht und oberflächlich eingearbeitet. Phacelia wurde als Gründüngung eingesät. Am Anfang der Messperiode war der Pflanzenbestand noch wenig entwickelt. Daher war der Bodenwasserentzug durch Transpiration gering. Die Bodeneigenschaften und der Bodenzustand war in der gesamten Fläche sehr homogen.



*Abbildung 5: Schlag 109 mit den Untersuchungsflächen R109 F1 (hinten) und R109 F2 (vorne) zum Zeitpunkt der Vergleichsmessungen (Ende August 2016).*

## 2.4 Mess- und Probenahme-Design

Alle Messungen wurden gemäss dem in Abbildung 6 dargestellten generellen Plan in einer 10 m x 10 m-Fläche durchgeführt. Damit die Fläche bei jeder Erhebung exakt lokalisiert werden kann, werden die Eckpunkte eingemessen und mit vergrabenen Magneten markiert. Pro Erhebung erfolgen Messungen und Probenahme jeweils in 10 der insgesamt 100 Teilflächen, die in einem lateinischen Quadrat angeordnet sind. In jeder der 10 Teilflächen wird der Eindringwiderstand zwei Mal bis mindestens 60 cm Tiefe gemessen. Dies bedeutet, dass jede Erhebung des Eindringwiderstands aus 20 aggregierten Einzelmessungen besteht. In den vier Teilflächen in den Spalten 1, 5, 7 und 10 werden zusätzlich Bohrkern zur Bestimmung der Bodenwasser- und Dichteparameter entnommen ( $n = 4$ ). Mit diesem Design können 10 wiederholte Erhebungen auf je 10 zuvor ungestörten Teilflächen durchgeführt werden.

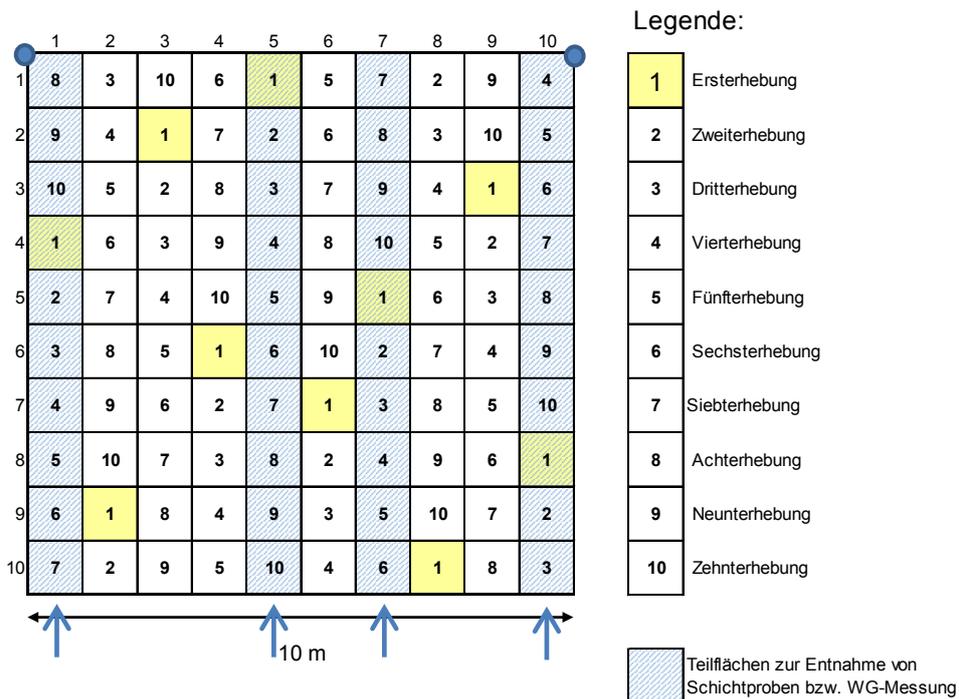


Abbildung 6: Mess- und Probenahme-Design 10 x 10 m für 10 wiederholte Erhebungen des Eindringwiderstandes (jeweils 10 Teilflächen) und des Wassergehaltes aus Bohrkernen (jeweils 4 Teilflächen, blau eingefärbte Spalten) .

## 2.5 Versuchsanordnungen

Im Folgenden sind die Versuchsanordnungen beschrieben, anhand derer die Fragestellungen A1 bis B3 untersucht wurden. Einige Untersuchungen fanden gleichzeitig statt. Tabelle 1 vermittelt eine Übersicht.

Tabelle 1: Übersicht zu den Messungen in den einzelnen Versuchsflächen (WG: Bestimmung Wassergehalt und Raumgewicht aus Bohrkernen).

Fläche	Datum	Messungen					Fragestellungen	Bemerkungen
		Panda-Sonde	Penetro-logger	WG	Tension	Tension (Instant)		
R115	5.7.	x	x	x			A2	Vorversuch
	22.8.	x	x	x	x		A2	1. Erhebung Zeitreihe
	30.8.			x	x	x	B1, B2	Methodenvergleich Bodenwasser
R109 F1	13.9.	x		x	x		B1-B3	wiederholte Erhebungen, Zeitreihen Eindringwiderstand und Bodenwasser
	22.9.	x		x	x			
	6.10.			x	x			
	24.10.	x		x	(x)*			
	27.10.	x		x				
R109 F2	30.8.	x	x				A1, A3-A5	Methodenvergleich Penetrometer, Vergleich PANDA von 3 Anwendern

\*die Tension wurden vom letzten Messzeitpunkt vom 20.10. übernommen

### 2.5.1 Wiederholbarkeit der Messungen mit demselben Gerät durch dieselbe Person (A1)

Die Wiederholbarkeit (Präzision) wurde untersucht, indem dieselbe Person am selben Tag drei wiederholte Erhebungen durchführte. Für jedes der drei verwendeten Verfahren (PANDA-Sonde und Penetrologger mit Sondenspitze 3.3 cm<sup>2</sup> bzw. 1 cm<sup>2</sup>) erfolgte je eine Erhebung in den Teilflächen 1, 4 und 7 der Fläche R109 F2 (siehe Beprobungsplan Abbildung 16 im Anhang 10.2.). Die Messungen mit der PANDA-Sonde und dem Penetrologger wurden je von einer unterschiedlichen Person ausgeführt, jedoch in denselben Teilflächen.

### 2.5.2 Wiederholbarkeit der Messungen mit demselben Gerät durch unterschiedliche Personen (A2)

Der Einfluss der Person auf die Messung des Eindringwiderstands wurde für die PANDA-Sonde und für den Penetrologger mit der Sondenspitze 3.3 cm in einem Vorversuch in der Fläche R115 untersucht. Drei Messpersonen führten je eine vollständige Erhebung mit beiden Verfahren durch. Die Messungen erfolgten am selben Tag in den Teilflächen 1, 2 bzw. 3. Die Messungen beider Verfahren erfolgte in denselben Teilflächen (siehe Beprobungsplan Abbildung 15 in Anhang 10.1). Die Untersuchung wurde mit anderen Messpersonen in der Fläche R109 F1 in den Teilflächen 1, 4 und 7 wiederholt (siehe Beprobungsplan Abbildung 17 in Anhang 10.3).

### 2.5.3 Vergleichbarkeit unterschiedlicher Geräte des Typs PANDA2 (A3)

Am 30.8.2016 wurde auf der Versuchsfläche R109 F1 die Vergleichbarkeit von drei unterschiedlichen Nutzern (User 1-3) mit ihren PANDA-Sonden Nr. 1-3 (Tabelle 2) untersucht. Dabei wurden mit den drei PANDA-Sonden in den einzelnen Teilflächen 1, 2 und 5 je eine vollständige Erhebung gemäss Probenplan in Abbildung 16 im Anhang 10.2. durchgeführt. Sonde Nr. 3 ist das Messgerät der NABO, das auch bei den übrigen Versuchen (Fragestellung mit PANDA-Sonde A1, A2 und A4) verwendet wurde.

Tabelle 2: Spezifikation der verwendeten PANDA-Sonden (PANDA2 TDD).

Sonde Nr.	Version	N°	Fabrikation Jahr
1	V1.03.09	34-013-04	2004
2	V1.05.02	45-022-05	2006
3	V1.06.00	32-025-12	2012

#### 2.5.4 Vergleichbarkeit PANDA-Sonde vs. Penetrologger (A4)

Wir analysierten zeitgleiche Erhebungen mit der PANDA-Sonde und dem Penetrologger mit Sondenspitze 3.3 cm<sup>2</sup> bzw. 1 cm<sup>2</sup>, um die drei Verfahren zu vergleichen. Dazu verwendeten wir die Messungen, die in Kapitel 2.5.1 beschrieben wurden. Für jedes Verfahren lagen somit je drei wiederholte Erhebungen vor. Wir betrachteten sowohl die absoluten und relativen Abweichungen der Verfahren untereinander als auch den Verlauf der Messwerte über die Tiefe.

#### 2.5.5 Bodenwasser: Präzision der Methoden und deren Eignung als erklärende Variable (B1-B3)

Über einen Zeitraum von rund zwei Monaten (22.8.-24.10.) wurde in der Versuchsfläche R109 F1 viermal der Eindringwiderstand mit der PANDA-Sonde erhoben (vgl. Beprobungsplan in Abbildung 17, Anhang 10.3). Bei jeder Erhebung wurden vier Bohrkerns gemäss Probenahme-Design entnommen, um Wassergehalt und Dichte zu bestimmen. Zusätzlich waren über den ganzen Zeitraum Tensiometer fest installiert, um die Saugspannung in 20, 40 und 60 cm Tiefe mit vier Wiederholungen zu messen.

Am 30.8. wurde eine zusätzliche Erhebung des Wassergehalts und der Saugspannung durchgeführt. Dabei wurde die Saugspannung auch mit einem Instant-Tensiometer mit vier Wiederholungen bestimmt. Diese Messungen erfolgten in denselben Teilflächen und Bodentiefen wie die Standard-Tensiometer.

Wir beurteilten die Präzision der einzelnen Verfahren anhand der Streuung der Einzelmessungen pro Zeitpunkt. Ihre Eignung als erklärende Variable für die Messung des Eindringwiderstands beurteilten wir anhand der Korrelationen Bodenwasserparameter vs. Eindringwiderstand innerhalb der Zeitreihe.

---

## 2.6 Berechnungen und Statistik

Für eine einheitliche Darstellung der Messungen des Eindringwiderstands wurden die Rohdaten jeder Einzel-Messung (Sondierung) über 5 cm-Schichten gemittelt. Für die Daten der Penetrologger-Verfahren, die in einer Auflösung von 1 cm über die Tiefe vorlagen, wurde mit Excel der Mittelwert pro 5 cm-Schicht berechnet. Die Daten der PANDA-Sonde wurden mit einem R-Skript zu 5 cm-Schichten aggregiert. Dabei wurde der Mittelwert aus den nach Vortrieb gewichteten Einzelwerten bestimmt.

Anschliessend wurden die 20 Einzelmessungen pro Schicht und Erhebung aggregiert. Dazu wurde der Median und dessen 95 %-Vertrauensintervall (VI; Formel 5) berechnet:

$$VI = \frac{q_t}{\sqrt{n}} * MAD / 0.06745 \quad (5)$$

$n$  entspricht der Anzahl Messwerte und  $q_t$  dem 97.5 %-Quantil der t-Verteilung mit  $(n-1)$  Freiheitsgraden. Weiter steht MAD für den Median der absoluten Abweichungen der Messwerte vom Median (Formel 6).

$$MAD = Median(abs(d)) \text{ mit } d = y_i - Median(y) \quad (6)$$

Um den Verlauf der Messkurven über die Tiefe zu vergleichen, wurde der relative Eindringwiderstand berechnet. Er ist definiert als Eindringwiderstand (Edw) in der jeweiligen Tiefe  $i$  dividiert durch den Eindringwiderstand in 55-60 cm Tiefe (Formel 7).

$$relativer\ Edw_i = Edw_i / Edw_{55-60\text{ cm}} \quad (7)$$

Die Streuung bzw. Präzision wiederholter ( $n=3$ ) Erhebungen wurde anhand der Variationskoeffizienten (CV) beschrieben. Dieser wurde berechnet als (empirische) Standardabweichung dividiert durch den Mittelwert der Stichprobe und in % angegeben. Die CV wurden für jede Schichttiefe einzeln berechnet.

### 3 Ergebnisse und Diskussion Eindringwiderstand

#### 3.1 Wiederholbarkeit der Messungen mit demselben Gerät durch dieselbe Person (A1)

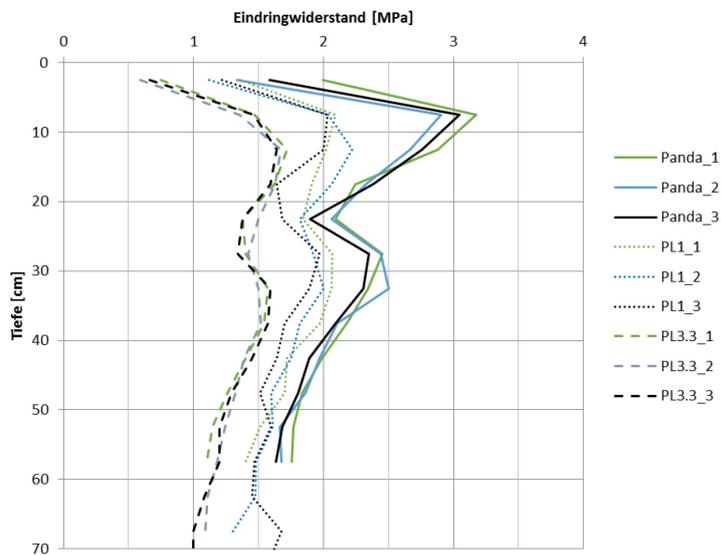


Abbildung 7: Wiederholbarkeit von Messungen des Eindringwiderstandes: je drei Wiederholungen durch dieselbe Person mit der PANDA-Sonde (Panda; durchgezogene Linien) und dem Penetrologger mit 1 cm<sup>2</sup>-Sondenspitze (PL1; gepunktete Linien) bzw. 3.3 cm<sup>2</sup>-Sondenspitze (PL3.3; gestrichelte Linien) (Messungen vom 30.8. in Schlag R109 Fläche 2).

Die in Abbildung 7 dargestellten Kurven des Eindringwiderstandes zeigen, dass die je drei Erhebungen der PANDA-Sonde (ausgezogene Linien) und des Penetrologgers mit 1 cm<sup>2</sup>-Sondenspitze bzw. 3.3 cm<sup>2</sup>-Sondenspitze (gepunktete bzw. gestrichelte Linien) in sich eine gute Wiederholbarkeit aufweisen. Die drei Wiederholungen stammen jeweils von derselben Sonde und Person. Die drei Erhebungen pro Verfahren wiesen insgesamt nur eine kleine Streuung auf, streuten aber je nach Tiefenschicht sehr unterschiedlich (Tabelle 3). PANDA-Sonde und Penetrologger mit 3.3 cm<sup>2</sup>-Spitze wiesen nur in der obersten Schicht (0-5 cm) mit CV > 10 % eine schlechte Wiederholpräzision auf. Beim Penetrologger mit 1 cm<sup>2</sup>-Spitze weisen hingegen auch tiefere Bodenschichten erhöhte Variationskoeffizienten (> 5 %) auf. Über alle Tiefenschichten ist die Wiederholpräzision der drei Verfahren jedoch vergleichbar.

Tabelle 3: Wiederholpräzision von drei wiederholten Messungen als Variationskoeffizient (CV in %) nach Bodentiefe für PANDA-Sonde und Penetrologger (Sondenspitzen 3.3 cm<sup>2</sup> und 1 cm<sup>2</sup>); CV > 5 % sind fett dargestellt und grau hinterlegt.

Tiefe (cm)	CV (%) PANDA-Sonde 4 cm <sup>2</sup>	CV (%) Penetrologger 3.3 cm <sup>2</sup>	CV (%) Penetrologger 1 cm <sup>2</sup>
0 - 5	<b>20.4</b>	<b>12.0</b>	<b>9.8</b>
5 - 10	4.4	4.7	1.6
10 - 15	3.9	2.4	<b>5.8</b>
15 - 20	2.9	1.3	<b>11.4</b>
20 - 25	5.1	4.9	4.9
25 - 30	2.3	3.0	3.8
30 - 35	4.3	3.0	4.3
35 - 40	2.2	1.6	<b>7.4</b>
40 - 45	2.7	2.3	3.3
45 - 50	1.5	2.3	<b>5.9</b>
50 - 55	3.3	4.0	3.5
55 - 60	3.8	4.6	3.0
Median	3.5	3.0	4.6
Min	1.5	1.3	1.6
Max	20.4	12.0	11.4

### 3.2 Wiederholbarkeit der Messungen mit demselben Gerät durch unterschiedliche Personen (A2)

Diese Fragestellung wurde zweimal untersucht: Sowohl in der Fläche R115 (Abbildung 8 links) als auch in Fläche R109 F1 (Abbildung 8 rechts). Die Kurven des Eindringwiderstandes zeigen jeweils die Mediankurven für drei wiederholte Erhebungen mit der PANDA-Sonde (ausgezogene Linien) und dem Penetrologger mit 3.3 cm<sup>2</sup>-Sondenspitze (gestrichelte bzw. gepunktete Linien). Die drei Wiederholungen erfolgten durch drei unterschiedliche Personen. Die detaillierten Messergebnisse mit Median und Vertrauensintervall der je 20 Sondenmessungen pro Verfahren sind in Anhang 10.5 dargestellt.

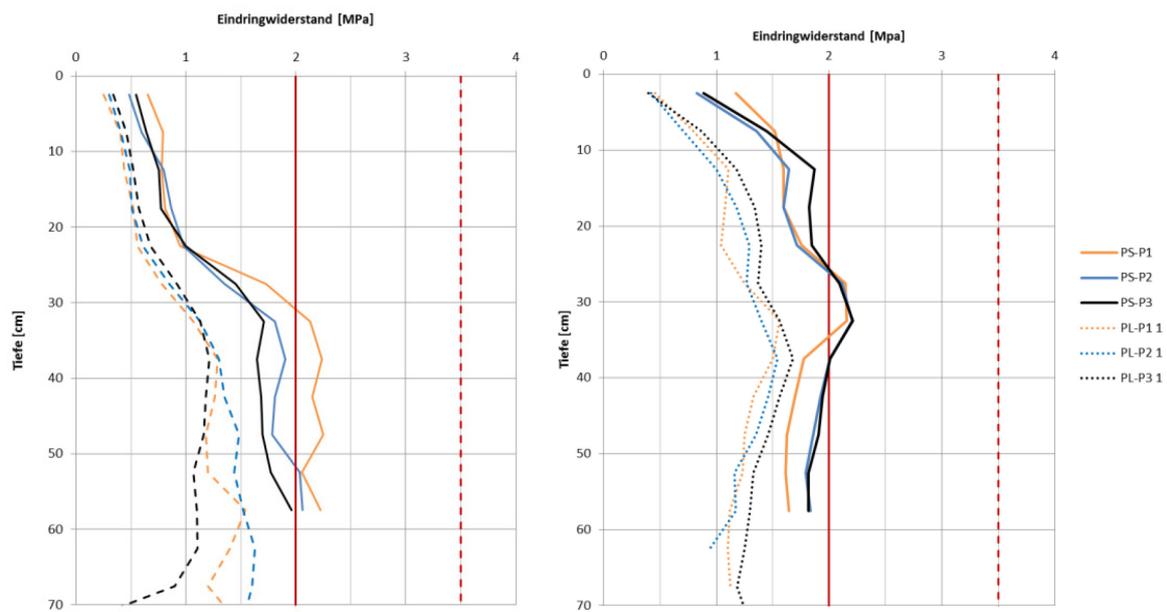


Abbildung 8: Wiederholbarkeit von Messungen des Eindringwiderstandes: je drei Wiederholungen durch drei Personen (P1-P3) mit der PANDA-Sonde (PS; durchgezogene Linien) und dem Penetrologger. 3.3 cm<sup>2</sup>-Sondenspitze (PL; gestrichelte bzw. gepunktete Linien)., links: Messungen vom 5.7.2016 in Fläche R115, rechts: 22.8.2016 in Fläche R109 F1.

Mit der PANDA-Sonde resultierten bei Person 1 (PS-P1) in Fläche R115 (Abbildung 8, Grafik links) zwischen 25 und 50 cm Tiefe deutlich höhere Werte für den Eindringwiderstand als bei den beiden anderen Personen. In Fläche R109 F1 (Grafik rechts) sind die Messwerte von Person 3 (PS-P3) in den meisten Tiefenschichten am höchsten. Die Personen mit den höchsten Messwerten (Person 1 in R115 bzw. Person 3 in R109) benötigten durchschnittlich am wenigsten Schläge, um die Messtiefe von 60 cm zu erreichen (siehe Tabelle 4). Dies bedeutet, dass ihre Schläge stärker waren. Sie erreichten so eine grössere Eindringtiefe pro Schlag. Daher vermuten wir, dass stärkere Schläge tendenziell zu höheren Messwerten führen. Die Messwerte der verbleibenden Personen bestätigen diese Hypothese jedoch nur teilweise, denn: Die Person mit den schwächsten Schlägen (in beiden Fällen Person 2) erzielte nicht durchwegs die tiefsten Werte. Daher gehen wir davon aus, dass weitere Eigenschaften des Schlagverhaltens die Messwerte beeinflussen. Möglicherweise hat auch die Gleichmässigkeit der Schläge einen Einfluss auf die Messqualität. Wir nehmen an, dass bei einer möglichst gleichmässigen Anzahl Schläge die Messwerte über die Tiefe gleichmässiger verteilt sind und damit der Eindringwiderstand pro Tiefenschicht präziser bestimmt werden kann.

Tabelle 4: durchschnittliche Anzahl Messungen pro Sondierung und Person mit der PANDA-Sonde:

	Vergleichsmessung R115			Vergleichsmessung R109		
	Person 1	Person 2	Person 3	Person 1	Person 2	Person 3
<b>Anzahl Schläge / Sondierung</b>						
Mittelwert	42.1	57.8	51.3	46.7	55.3	42.8
CV (%)	14.0	10.9	14.8	6.6	8.2	12.1
<b>Eindringtiefe (cm) / Schlag</b>						
Mittelwert	1.45	1.05	1.19	1.29	1.09	1.42

Auch für den Penetrologger zeigen sich Unterschiede zwischen den Personen. Für eine gute Messqualität muss die Sonde mit konstanter Geschwindigkeit in den Boden eindringen. Wir nehmen daher an, dass die grösseren Streuungen der Messungen in den einzelnen Bodenschichten durch unterschiedliche Eindringgeschwindigkeiten verursacht wurden. Aufgrund der vorliegenden Daten lässt sich diese Hypothese jedoch nicht überprüfen.

Der einzige Unterschied der Versuchsanordnungen A1 (vorheriges Kapitel) und A2 (dieses Kapitel) besteht darin, dass die Wiederholungen von derselben bzw. unterschiedlichen Personen stammten. Aus dem Vergleich der Ergebnisse lässt sich daher der Einfluss der Person ableiten. Tabelle 5 bestätigt, was sich bereits aus dem Vergleich der Grafiken erahnen lässt: wiederholte Erhebungen derselben Personen streuen weniger als solche unterschiedlicher Personen. Sowohl bei der PANDA-Sonde als auch beim Penetrologger ist der Median (Med) der Variationskoeffizienten mindestens doppelt so hoch für unterschiedliche Personen verglichen mit einer Person. Bei beiden Techniken ist die Person ein wichtiger „Bestandteil“ der Messsystems. Unterschiede zwischen Personen in der Handhabung der Geräte und somit der Resultate können durch gute Schulung und Einarbeitung sowie detaillierte Anleitungen (SOP, standard operation protocols) minimiert werden.

Tabelle 5: Wiederholpräzision des Eindringwiderstandes mit PANDA-Sonde und Penetrologger bei drei wiederholten Erhebungen durch drei unterschiedliche Personen verglichen mit der Wiederholpräzision von drei Erhebungen durch dieselbe Person in den einzelnen Tiefenschichten. Variationskoeffizient (CV in %) > 5 % sind grau hinterlegt; der minimale CV ist grün, der maximale CV rot eingefärbt.

Tiefe (cm)	CV (%) PANDA-Sonde			CV (%) Penetrologger 3.3 cm <sup>2</sup>		
	Unterschiedliche Personen		Eine Person	Unterschiedliche Personen		Eine Person
	R115	R109 F1	R109 F2	R115	R109 F1	R109 F2
0 - 5	15.2	19.0	20.4	15.2	7.2	12.0
5 - 10	15.1	5.7	4.4	7.6	10.1	4.7
10 - 15	2.8	8.4	3.9	8.4	8.3	2.4
15 - 20	6.0	7.8	2.9	6.0	10.9	1.3
20 - 25	2.5	3.8	5.1	9.8	14.8	4.9
25 - 30	12.8	1.3	2.3	8.2	5.0	3.0
30 - 35	11.9	1.3	4.3	3.1	6.1	3.0
35 - 40	15.3	7.0	2.2	3.9	6.0	1.6
40 - 45	12.8	7.4	2.7	6.7	8.0	2.3
45 - 50	15.5	8.3	1.5	14.1	7.8	2.3
50 - 55	8.2	6.5	3.3	15.2	6.9	4.0
55 - 60	6.3	5.9	3.8	17.9	7.8	4.6
Med	12.3	6.7	3.5	8.3	7.8	3.0
Min	2.5	1.3	1.5	3.1	5.0	1.3
Max	15.5	19.0	20.4	17.9	14.8	12.0

### 3.3 Vergleichbarkeit unterschiedlicher Geräte des Typs PANDA2 (A3)

Die Mediankurven des Eindringwiderstands (aus je 20 Einzelmessungen) der zeitgleichen Messungen dreier PANDA-Sonden sind in Abbildung 9 dargestellt. Die Werte der Sonde 1 liegen markant tiefer als jene der beiden anderen Sonden. Die Kurven des relativen Eindringwiderstandes (Relativwerte zu 57.5 cm Messtiefe) sind jedoch vergleichbar. Dies lässt auf eine systematische Abweichung schliessen.

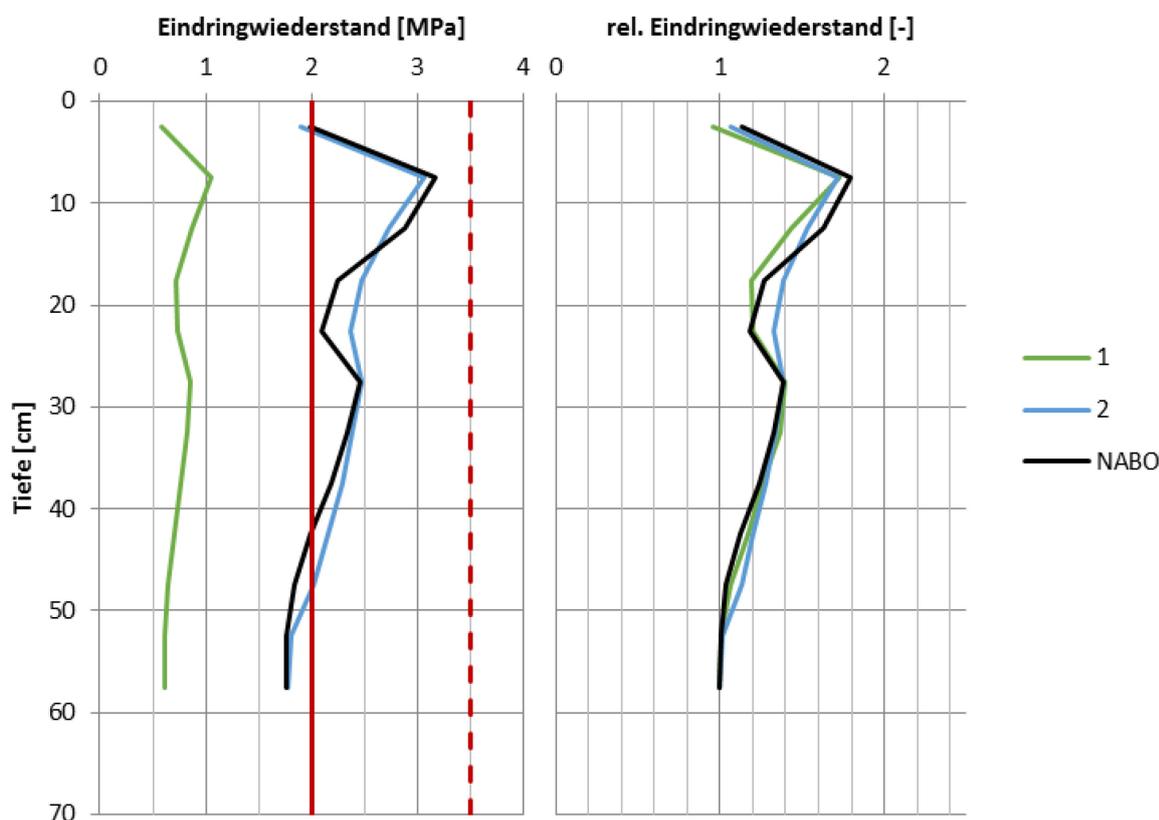


Abbildung 9: Links: Eindringwiderstand gemessen mit 3 verschiedenen PANDA-Sonden durch 3 unterschiedliche Personen; rechts: relative Eindringwiderstands-Werte, relativ zu Wert in einer Tiefe von 57.5 cm;

Die gute Übereinstimmung des relativen Eindringwiderstandes legte die Vermutung nahe, dass es sich um einen linearen Zusammenhang handelt. Zusammen mit den Ergebnissen von zusätzlichen Vergleichsmessungen aus zwei weiteren Flächen (2016 in Rümlang) wurde der folgende mathematische Zusammenhang berechnet:

$$Eindringwiderstand_{modelliert} = 2.76 * Eindringwiderstand_{gemessen} - 0.003 \quad (8)$$

Hierbei bezeichnen „Eindringwiderstand<sub>gemessen</sub>“ die Messwerte der Sonde 1 und „Eindringwiderstand<sub>modelliert</sub>“ die auf das Messniveau der Sonden 2 und 3 umgerechneten Werte. Aufgrund der Gleichung 8 können die Messwerte der Sonde 1 korrigiert werden, um vergleichbare Messergebnisse wie jene der beiden anderen Sonden zu erhalten.

Werden die Messwerte der Sonde 1 gemäss Formel 8 umgerechnet, so zeigen die transformierten Messwerte der Sonde 1 bis zum Messbereich von ca. 3.5 MPa eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten der Sonde 3 der NABO (Abbildung 10). Bei Messwerten oberhalb von 3.5 MPa ist die Abweichung zur 1:1-Geraden z. T. erheblich. Ein grosser Teil dieser Abweichungen kann jedoch durch die unterschiedlichen Messpersonen beim Messvergleich begründet werden.

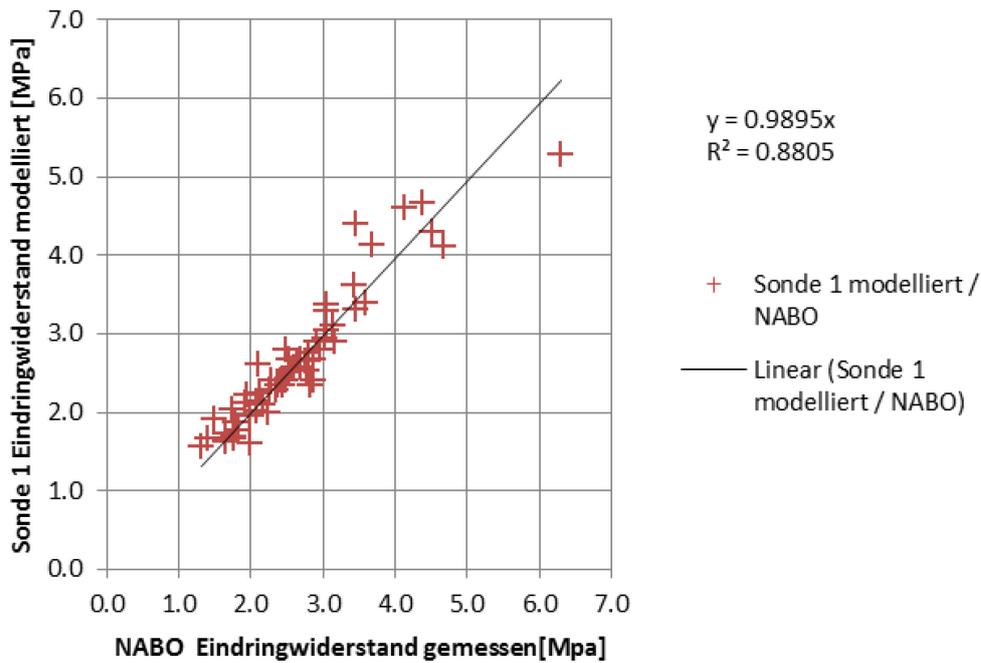


Abbildung 10: Eindringwiderstand der Sonde 1 umgerechnet mit Formel 8 vs. Eindringwiderstand gemessen mit der Sonde der NABO.

Wir nehmen an, dass der Grund für die grosse systematische Messabweichung der Sonde 1 zu den beiden anderen Sonden in einer unterschiedlichen Kalibrierung der Geräte liegt. Um die Vergleichbarkeit der Messwerte verschiedener PANDA-Sonden zu gewährleisten, braucht es eine Möglichkeit, die Geräte einheitlich zu kalibrieren. Der Hersteller Sol Solution muss auf das Problem hingewiesen werden. Ein möglicher Lösungsansatz ist die Verwendung standardisierter Testmedien (z. B. Wachsblock mit definierter und konstanter Dichte) zur Überprüfung der Gerätekalibration.

### 3.4 Vergleichbarkeit PANDA-Sonde vs. Penetrologger (A4)

Sowohl PANDA-Sonde als auch Penetrologger messen den Eindringwiderstand. Die absoluten Messwerte der beiden Verfahren sind jedoch nicht vergleichbar (Abbildung 11 links). Die PANDA-Sonde (PANDA) ergibt deutlich höhere Werte als der Penetrologger (PL; vgl. auch die Grafiken der Ergebnisse der einzelnen Messwiederholungen in Anhang 6.4). Der Penetrologger liefert mit der 1 cm<sup>2</sup>-Sondenspitze (PL1) deutlich höhere Werte als mit der 3.3 cm<sup>2</sup>-Spitze (PL3.3); erstere sind den Werten der PANDA-Sonde ähnlicher.

Betrachtet man die Kurven der relativen Eindringwiderstandswerte (Abbildung 11, rechts), so wird deutlich, dass auch die Kurvenverläufe der drei Messverfahren nicht vergleichbar sind. Es fällt auf, dass die Kurven der PANDA-Sonde oberhalb von 15-20 cm Tiefe sich deutlich von jenen der beiden anderen Messverfahren unterscheiden. Mit der PANDA-Sonde wurden im Oberboden (5-15 cm) und in der Pflugsohle (ca. 25-35 cm) deutlich erhöhte Werte gemessen. Die Messwerte der PANDA-Sonde scheinen in kompakteren Zonen deutlicher anzusteigen als jene des Penetrologgers.

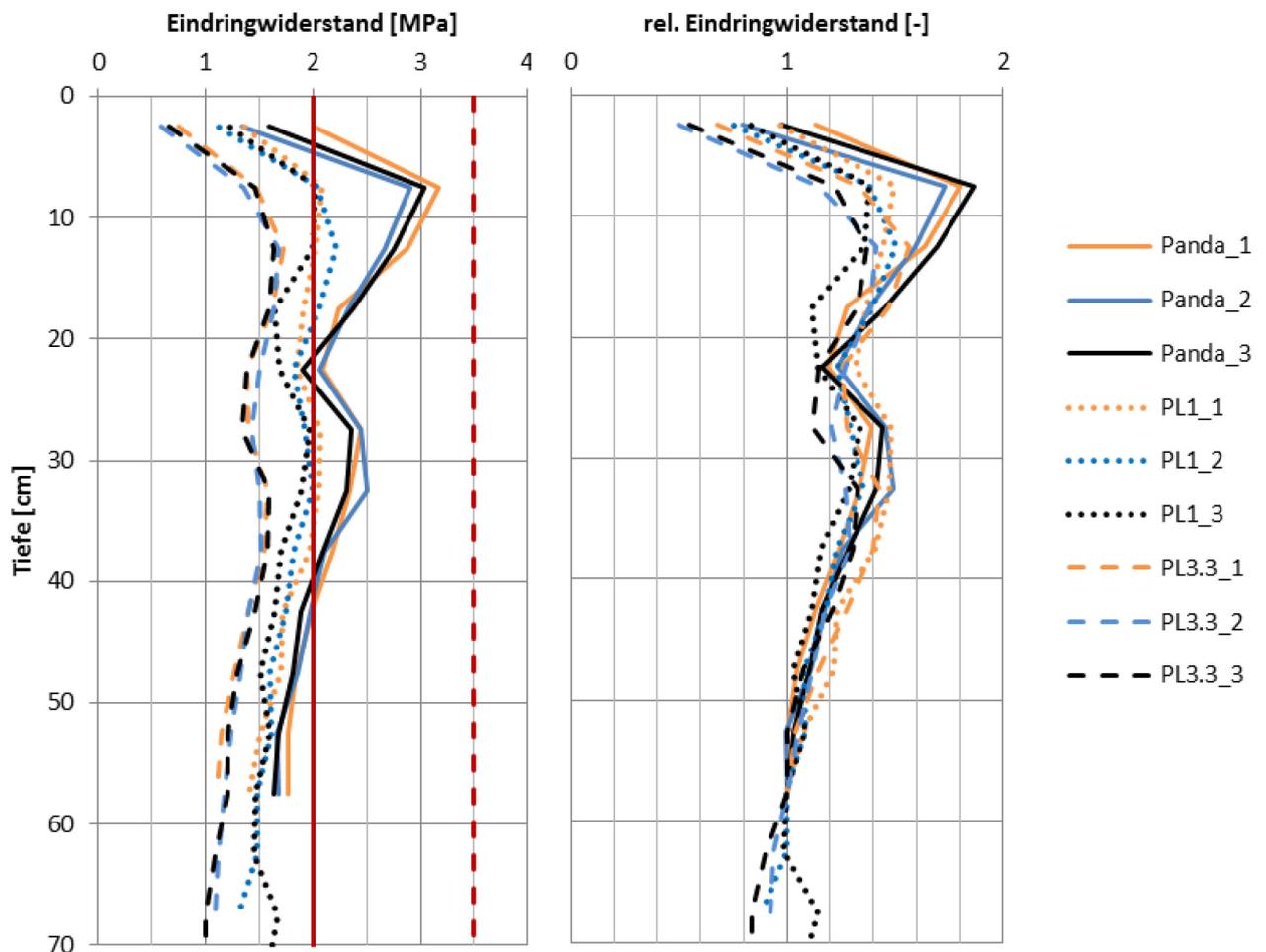


Abbildung 11: Vergleich von je drei (zeitgleichen) wiederholten Erhebungen des Eindringwiderstands mit der PANDA-Sonde (durchgehende Linie) und dem Penetrologger (gepunktete Linie – PL1 mit 1 cm<sup>2</sup>-Spitze, gestrichelte Linie – PL3.3 mit 3.3 cm<sup>2</sup>-Spitze); links Messwerte in MPa, rechts: Relativwert zu Messwert in 57.5 cm Tiefe gem. Formel 7.

Die Messabweichungen der Penetrologger-Werte zu den PANDA-Sonden-Werten sind je nach Tiefenschicht sehr unterschiedlich (Tabelle 6). Beide Verfahren zeigen in der Tiefe von 5-10 cm die grösste und in 40-55 cm die geringste Differenz. Im Mittel (Median) über alle Tiefenschichten erreicht der Eindringwiderstand beim Penetrologger mit der grossen Spitze (3.3 cm<sup>2</sup>) rund 70 % und mit der kleinen Spitze (1 cm<sup>2</sup>) rund 85 % des Messwertes der PANDA-Sonde. Die absoluten Messwerte des Penetrologgers sind je nach Sondenspitze im Mittel 0.65 MPa bzw. 0.35 MPa geringer als jene der PANDA-Sonde.

Tabelle 6: Mittelwert (Mw) der drei wiederholten Erhebungen pro Methode. Die Mw der Penetrologger-Verfahren wurden in Relation zu jenen der PANDA-Sonde gesetzt ( $\% Mw_{PS} = Mw_{PANDA} / Mw_{Penetrologger} * 100 \%$ ). Weiter wurden die absoluten Messabweichungen ( $\Delta Mw_{PS} = Mw_{Penetrologger} - Mw_{PANDA}$ ) berechnet.

Tiefe (cm)	PANDA-Sonde 4 cm <sup>2</sup>	Penetrologger 3.3 cm <sup>2</sup> (PL3.3)			Penetrologger 1 cm <sup>2</sup> (PL1)		
	Mw	Mw	% Mw <sub>PS</sub>	Δ Mw <sub>PS</sub>	Mw	% Mw <sub>PS</sub>	Δ Mw <sub>PS</sub>
0 - 5	1.64	0.67	40.7	-0.97	1.23	75.3	-0.41
5 - 10	3.04	1.43	46.9	-1.61	2.05	67.5	-0.99
10 - 15	2.77	1.68	60.6	-1.09	2.08	75.1	-0.69
15 - 20	2.32	1.61	69.7	-0.70	1.87	80.8	-0.45
20 - 25	2.02	1.42	70.4	-0.60	1.78	88.2	-0.24
25 - 30	2.41	1.39	57.4	-1.03	1.99	82.3	-0.43
30 - 35	2.38	1.55	65.2	-0.83	1.98	83.3	-0.40
35 - 40	2.13	1.54	72.6	-0.58	1.83	86.1	-0.30
40 - 45	1.95	1.41	72.5	-0.54	1.70	87.4	-0.25
45 - 50	1.83	1.29	70.4	-0.54	1.60	87.5	-0.23
50 - 55	1.71	1.20	70.1	-0.51	1.57	92.2	-0.13
55 - 60	1.69	1.16	68.7	-0.53	1.45	85.8	-0.24
Median	2.07	1.42	69.2	-0.65	1.81	84.6	-0.35
Min	1.64	0.67	40.7	-0.51	1.23	67.5	-0.13
Max	3.04	1.68	72.6	-1.61	2.08	92.2	-0.99

Für beide Penetrologger-Verfahren wurde mittels linearer Regression ein Modell abgeleitet, um die Werte auf das Messniveau der PANDA-Sonde umzurechnen. Die entsprechenden Formeln sind:

Für Sondenspitze 3.3 cm <sup>2</sup> :	$E_{dw,modelliert} = 1.08 * E_{dw,gemessen} + 0.68$	$R^2 = 0.41$ (9)
Für Sondenspitze 1 cm <sup>2</sup> :	$E_{dw,modelliert} = 1.41 * E_{dw,gemessen} - 0.32$	$R^2 = 0.71$ (10)

Hierbei entspricht  $E_{dw,gemessen}$  dem Messwert des Penetrologgers mit der jeweiligen Sondenspitze und  $E_{dw,modelliert}$  dem berechneten Wert entsprechend dem Messniveau der PANDA-Sonde.

Der Versuch, die Penetrologger-Messwerte mit einem linearen Modell auf jene der PANDA-Sonde umzurechnen, war für die Messung mit der grossen 3.3 cm<sup>2</sup>-Spitze nicht erfolgreich (Abbildung 12 links). Für die 1 cm<sup>2</sup>-Spitze wurde ein besserer linearer Zusammenhang gefunden (Abbildung 12 rechts). Bei beiden Modellen werden Werte oberhalb 2.5 MPa unterschätzt. Dies deckt sich mit der erwähnten Beobachtung, dass die Werte der PANDA-Sonde in Schichten mit erhöhtem Eindringwiderstand deutlicher ansteigen als jene des Penetrologgers. Der Zusammenhang sollte mit weiteren Versuchen und vor allem auch bei höheren Eindringwiderstandswerten überprüft werden.

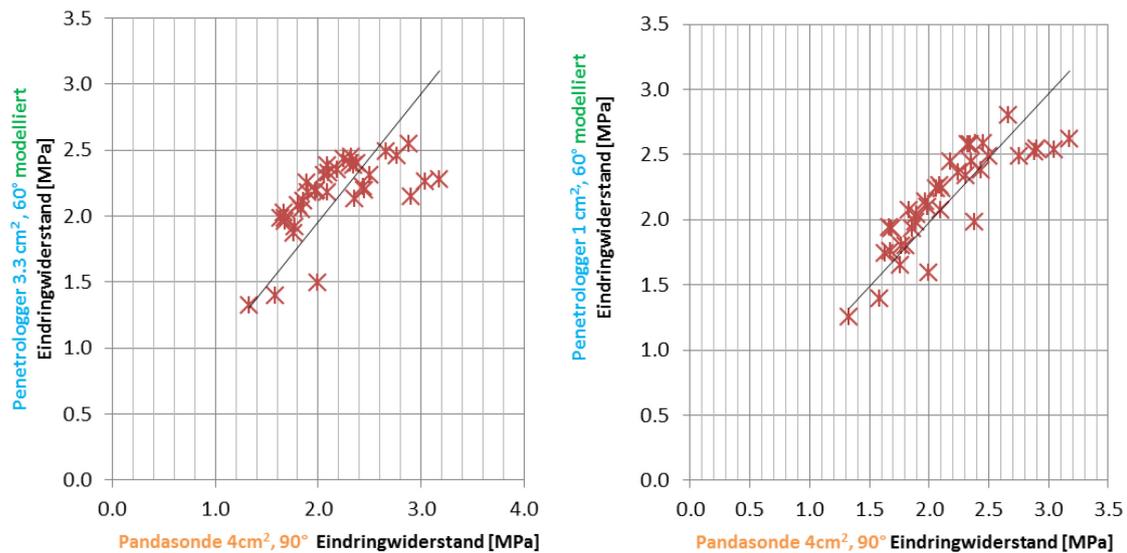


Abbildung 12: Vergleich der modellierten Werte der 3.3 cm<sup>2</sup>-Spitze (links) und der 1 cm<sup>2</sup>-Spitze (rechts) des Penetrologgers in Relation zu den Werten der PANDA-Sonde.

Weder der absolute noch der relative Eindringwiderstand ist für die drei Verfahren vergleichbar. Wir nehmen an, dass der systematisch geringere Eindringwiderstand beim Penetrologger vom kleineren Konuswinkel herrührt (PANDA 90°, Penetrologger 60°). Der Kraftaufwand ist für eine Spitze mit 60°-Winkel geringer. Die Ursache für die Differenz zwischen den beiden Sondenspitzen des Penetrologgers ist unbekannt.

Mit der PANDA-Sonde werden Schichten mit erhöhtem Eindringwiderstand deutlicher sichtbar, weil diese im Vergleich zum Penetrologger überproportional höher sind. Der Grund dafür könnte darin liegen, dass die Messperson beim Penetrologger die Kraft in kompakteren Bodenschichten zu wenig erhöht und dadurch die Eindringgeschwindigkeit nicht konstant halten kann. Eine konstante Eindringgeschwindigkeit ist jedoch wichtig, damit der Penetrologger den Eindringwiderstand korrekt berechnet.

### 3.5 Eignung für die Praxis (A5)

Der Zeitbedarf für eine Erhebung mit 20 Einzel-Messungen mit dem Penetrologger beträgt ca. ¼ Stunden. Mit der PANDA-Sonde ist der Zeitaufwand doppelt so gross.

Trotz des grösseren Zeitaufwands sprechen hauptsächlich zwei Gründe für die PANDA-Sonde:

- Potentiell verdichtete Zonen werden sensitiver dargestellt.
- Die PANDA-Sonde ist bei den meisten Böden und bei sehr unterschiedlichen Bodeneigenschaften einsetzbar. Im Gegensatz zum Penetrologger kann mit der PANDA-Sonde auch bei trockenen Bedingungen oder in Böden mit höherem Skelettgehalt gemessen werden.

## 4 Ergebnisse und Diskussion Bodenwasser

Aus den Vergleichsmessungen der Methoden zur Bestimmung des Bodenwasserzustandes Wassergehalt und Saugspannung können Aussagen zur Präzision, Praxistauglichkeit der Methoden und Aussagekraft als Begleitparameter gemacht werden.

### 4.1 Präzision der Methoden (B1)

Die Präzision der beiden Methoden wurde aufgrund der Streuung der Werte aus den jeweils vier Einzelmessungen pro Mess-Datum beurteilt. Da die Saugspannung nur für drei Tiefen (20, 40 und 60 cm) bestimmt wurde, betrachteten wir den Wassergehalt nur für die entsprechenden Schichtproben (15-25, 35-45 und 55-60 cm). Die gravimetrischen und volumetrischen Wassergehalte weisen im Allgemeinen kleinere Variationskoeffizienten (CV) als die Saugspannung auf (Tabelle 7). Ihre Präzision ist somit besser.

*Tabelle 7: Vergleich der Wassergehaltsbestimmungen aus volumetrischen Proben und Saugspannungsmessungen mit Standard-Tensiometer in drei Tiefen: Anzahl Messwerte (n), Mittelwert (Mw), Standardabweichung (s) und Variationskoeffizient (CV %); kursiv: Schätzwert nahe der Sättigung.*

Probentiefe	Prob_Dat	grav. WG FE (g/g)				volum.WG (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )				Messtiefe	Datum	Tension (cbar)			
		n	Mw	s	CV %	n	Mw	s	CV %			n	Mw	s	CV %
15-25 cm	22.08.16	4	34.9	11.6	33.1	4	35.6	2.0	5.7	20 cm	22.08.16	3	7.2	0.8	10.7
	30.08.16	4	26.0	1.4	5.5	4	32.9	1.5	4.5		30.08.16	4	26.8	5.0	18.7
	13.09.16	4	25.9	1.5	5.7	4	33.4	2.7	7.9		13.09.16	4	58.8	9.6	16.4
	22.09.16	4	25.1	0.8	3.1	4	33.2	4.2	12.7		22.09.16	3	32.3	14.6	45.1
	06.10.16	4	22.6	1.3	5.6	4	30.7	3.3	10.9		06.10.16	2	65.0	26.9	41.3
	24.10.16	4	24.6	2.1	8.6	4	31.7	2.2	7.1		20.10.16	0	nb		
35-45 cm	22.08.16	4	21.8	1.3	6.1	4	26.3	8.3	31.6	40 cm	22.08.16	3	3.7	3.2	87.7
	30.08.16	4	22.6	1.0	4.2	4	29.8	1.2	3.9		30.08.16	4	9.8	5.0	51.2
	13.09.16	4	21.6	1.3	5.9	4	29.6	5.2	17.6		13.09.16	4	11.3	3.0	26.5
	22.09.16	4	21.2	1.3	6.1	4	30.8	2.8	9.1		22.09.16	4	31.8	18.4	58.0
	06.10.16	4	20.8	2.0	9.6	4	29.7	1.6	5.4		06.10.16	3	67.7	6.8	10.1
	24.10.16	4	19.3	1.1	5.5	4	27.9	2.9	10.4		20.10.16	3	64.7	6.4	9.9
55-60 cm	22.08.16	4	26.2	2.6	9.8	4	45.4	11.4	25.0	60 cm	22.08.16	4	0.1	0.0	nb
	30.08.16	4	26.1	2.4	9.3	4	40.0	4.7	11.8		30.08.16	4	0.1	0.0	nb
	13.09.16	4	26.7	1.6	6.0	4	36.8	1.6	4.3		13.09.16	4	0.1	0.0	nb
	22.09.16	4	26.8	0.9	3.5	4	38.7	6.0	15.4		22.09.16	4	0.1	0.0	nb
	06.10.16	4	27.3	0.7	2.4	4	37.2	1.8	5.0		06.10.16	4	11.8	23.5	200.0
	24.10.16	4	23.5	1.2	5.2	4	31.5	2.2	7.0		20.10.16	4	16.5	29.1	176.6

## 4.2 Praxistauglichkeit der Methoden (B2)

Für die Wassergehaltsbestimmung konnte zu jedem Zeitpunkt für jede Messtiefe (12 Schichten) ein Mittelwert aus 4 Proben bestimmt werden. Die Saugspannungsmessung dagegen lieferte nicht bei allen Zeitpunkten und Messtiefen (3 Tiefen) valide Werte. Oft war mindestens ein Tensiometer wegen mangelndem Bodenkontakt nicht mehr funktionsfähig oder weil der Wert ausserhalb des Messbereiches lag. Die Wassergehaltsbestimmung aus Schichtproben ist somit verlässlicher.

Damit die Saugspannung bei der Messung des Eindringwiderstandes bestimmt werden kann, müssen Standard-Tensiometer mindestens einen Tag zuvor gesetzt werden. Daher stellte sich die Frage, ob mit Instant-Tensiometern vergleichbare Ergebnisse erzielt werden. Diese können zum Zeitpunkt der Messung des Eindringwiderstands installiert werden und sind somit eine mögliche Alternative.

Die Vergleichbarkeit der beiden Tensiometer-Typen wurde bei der Messung vom 30.8. untersucht. Die Ergebnisse in Tabelle 8 zeigen, dass die Werte dieser beiden Tensiometertypen vergleichbar sind.

Tabelle 8: Vergleich der Saugspannungsmessungen mit Standard- und Instant-Tensiometern in drei Tiefen: Anzahl Messwerte (n), Mittelwert (Mw), Standardabweichung (s) und Variationskoeffizient (CV %); kursiv: Schätzwert nahe der Sättigung.

Messtiefe	Saugspannungsmesswerte in cbar							
	Standard-Tensiometer				Instant-Tensiometer			
	n	Mw	s	CV %	n	Mw	s	CV %
20 cm	4	<b>26.8</b>	5.0	<b>18.7</b>	4	<b>24.0</b>	7.8	<b>32.6</b>
40 cm	4	<b>9.8</b>	5.0	<b>51.2</b>	4	<b>7.0</b>	0.8	<b>11.7</b>
60 cm	4	<i>0.1</i>	<i>nb</i>	<i>nb</i>	4	<i>0.1</i>	<i>nb</i>	<i>nb</i>

Der **Arbeitsaufwand** für die drei Verfahren ist nur bedingt vergleichbar, da die Messresultate eine unterschiedliche Datendichte aufweisen (siehe Tabelle 9). Mit Schichtproben kann beim aufgeführten Arbeitsaufwand eine grössere Datenauflösung in der Tiefe (12 Schichten) und mit vier Parametern insgesamt 48 Messwerte pro Parameter bestimmt werden. Beim Vergleich des Arbeitsaufwandes der Standard- mit den Instant-Tensiometern gilt zu bedenken: Bei mehrmaligen Messungen in derselben Fläche lohnt sich bereits nach der zweiten Messung der Arbeitsaufwand für die Installation der Standard-Tensiometer. Der Aufwand für diese ist somit geringer.

Tabelle 9: Datenmenge und ca. Arbeitsaufwand bei der Bestimmung der Bodenwasser-Parameter pro Messverfahren für einen Messzeitpunkt, bei Stichprobenzahl n=4 pro Schicht.

Methode	Datendichte n / 0-60cm			Arbeitsaufwand in h			
	Schichten (n)	Parameter	Werte	Probenahme / Tensiometer setzen	Schichtproben bearbeiten	Gravimetrie / Ablesen	Total
Schichtproben	12	4	4x48	2	2.5-4	1.5	<b>6 - 7.5</b>
Standard-Tensiometer	3	1	1x12	6		0.5	<b>6.5</b>
Instant-Tensiometer	3	1	1x12	3		0.5	<b>3.5</b>

### 4.3 Aussagekraft der Begleitparameter (B3)

Zwischen dem 22.8. und 24.10. variierte der Eindringwiderstand in der Versuchsfläche R109 F2 beträchtlich (Abbildung 13). Ebenso variierte die Bodenfeuchte, wie Wassergehalt und Saugspannung zeigen. Während der Messperiode wurde der Boden nur durch die Witterung und das Pflanzenwachstum, nicht aber durch Bewirtschaftungsmassnahmen beeinflusst.

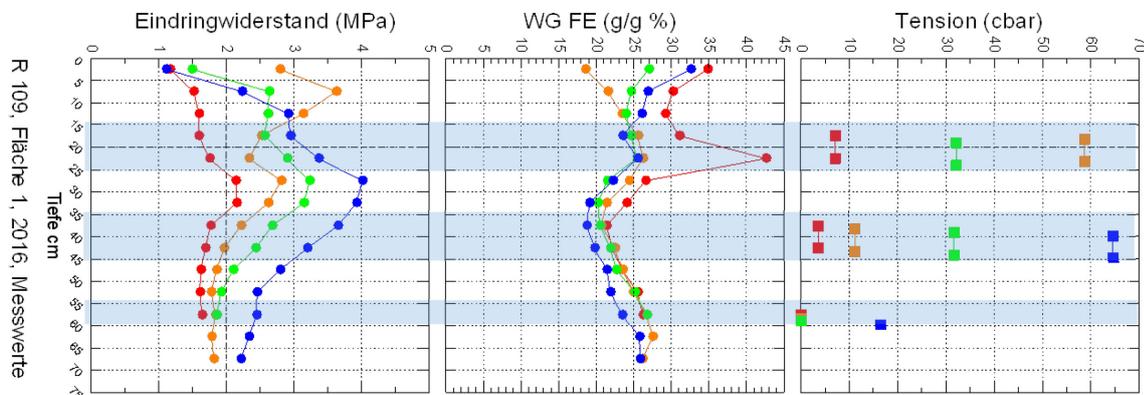


Abbildung 13: Eindringwiderstand, gravimetrischer Wassergehalt (WG FE) und Saugspannung (Tension) in den Tiefen 20, 40, 60 cm. Messwerte von 4 Messzeitpunkten: rot = 1. Erheb. (22.8.), orange=2. Erheb. (13.9.), grün=3. Erheb. (22.9.), blau=4. Erheb. (24.10.) in der Fläche R109 F1.

Der Eindringwiderstand ist je nach Tiefenschicht unterschiedlich gross. Unterhalb von 20 cm weisen die Verlaufskurven über die Tiefe eine hohe Parallelität auf und in der Tiefe von 25-35 cm liegen bei allen vier Messzeitpunkten die höchsten Werte der Verlaufskurven. Oberhalb 20 cm Tiefe sind die Kurvenverläufe hingegen sehr unterschiedlich. Die Werte nehmen zu und ab, da hier die Wassergehalte die grösste Dynamik aufwiesen. Grundsätzlich beobachtet man: Je höher der Wassergehalt bzw. je tiefer die Saugspannung, desto geringer ist der Eindringwiderstand. Die Korrelation mit dem gravimetrischen Wassergehalt ist bei extremen Gehalten sehr deutlich (Bsp. blaue Symbole in Abbildung 14). In einigen Bodentiefen (z. B. 20-25 cm) liegen die gemessenen gravimetrischen Wassergehalte jedoch nahe beieinander, obwohl die entsprechenden Eindringwiderstände sehr unterschiedlich sind. Qualitativ gilt der Zusammenhang jedoch für die meisten Tiefen.

Bei der Saugspannungsmessung stimmt der Zusammenhang nicht für alle Bodentiefen gleich gut (rote Symbole in Abbildung 14). In der Tiefe von 20 cm stimmen die Rangordnungen von Saugspannung und Eindringwiderstand nicht überein. In der Messtiefe von 40 cm korrelieren die Werte mit den Eindringwiderstandswerten der Messtiefen 35-40 cm sehr gut. Dies lässt den Schluss zu, dass der quantitative Zusammenhang mit der Saugspannung besser erklärt werden kann.

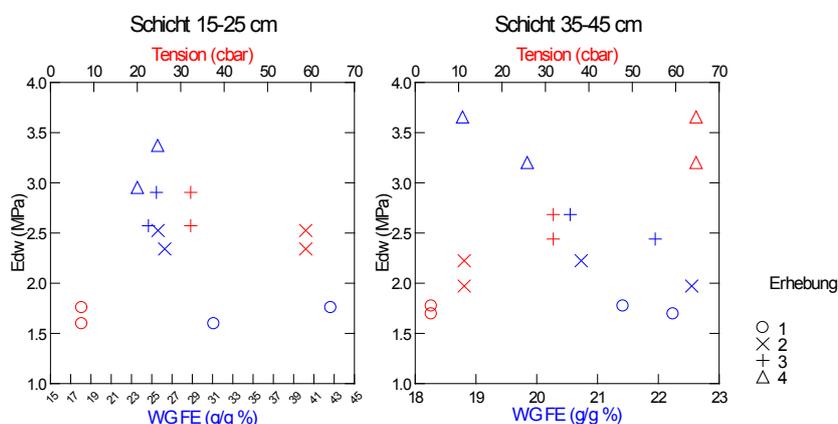


Abbildung 14: Streudiagramm des gravimetrischen Wassergehaltes ( $WG_{FE}$ ; blaue Symbole) und der Saugspannung (Tension; rote Symbole) zum Eindringwiderstand (Edw) der Erhebungen 1 bis 4 in den Tiefenschichten 15-25 und 35-45 cm.

## 5 Ausblick: Standardisierung von Messungen des Eindringwiderstands bei unterschiedlichen Wassergehalten

Wie die Ergebnisse in Kapitel 4.3 zeigten, hängt die Höhe des Eindringwiderstandes stark vom Bodenwassergehalt ab. Will man mehrere Messungen vergleichen, muss der Effekt des Bodenwassers bekannt sein. Dieser muss bei der Interpretation der Messwerte berücksichtigt werden. Mit wiederholten Erhebungen an mehreren Standorten untersucht die NABO die Effekte des Bodenwassers in Interaktion mit übrigen Bodeneigenschaften. Ziel dieser Untersuchungen ist das Erarbeiten von Grundlagen, um einen Korrekturalgorithmus von Messungen des Eindringwiderstands bei unterschiedlichem Wassergehalt zu entwickeln.

Wassergehaltsbestimmungen aus Volumenproben erlauben den Bodenwasserzustand über die gesamte erfasste Bodentiefe mit hoher Auflösung und guter Präzision zu bestimmen. Das Wasserpotential erklärt dagegen besser den Einfluss des Bodenwassers auf den Eindringwiderstand (vgl. Kapitel 4.3). Mit den wenigen Messtiefen einer Tensiometer-Installation (hier drei Messtiefen) kann aber nicht auf den gesamten Verlauf der Saugspannungswerte von 0-60 cm geschlossen werden.

Der Zusammenhang zwischen Saugspannung (Wasserpotential) und Wassergehalt ist für jeden Boden mit einer Wasserspannungskurve (pF-Kurve) definiert. Daher kann bei bekannter pF-Kurve das Wasserpotential aus dem Wassergehalt geschätzt werden. Die Gleichung von Van Genuchten (1980; Formel 11) beschreibt die pF-Kurve, sprich den Zusammenhang zwischen dem volumetrischen Wassergehalt  $\theta$  ( $WG_{vol}$ ) und dem zugehörigen Wasserpotential  $\Psi$  in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften.

$$\theta = (\theta_s - \theta_r)[1 + (\alpha * \psi)^n]^{-m} + \theta_r \quad \text{mit} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (11)$$

Mit Pedotransferfunktionen (z. B. nach Wösten et al. 1999) können aus horizontspezifischen Angaben zu Textur, org. Substanz und Trockenraumdicke die Van Genuchten-Parameter geschätzt werden. Dies sind der Wassergehalt bei Sättigung  $\theta_s$ , der residuale Wassergehalt  $\theta_r$ , sowie die Konstanten  $\alpha$  und  $n$ . So kann für jede Schicht aus dem Wassergehalt  $\theta$  mit Formel 11 das Wasserpotential  $\Psi$  geschätzt werden.

$$\psi(\theta) = \left[ \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} * \frac{1}{\alpha} \quad \text{mit} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (11)$$

Sollte es gelingen, den Zusammenhang zwischen Eindringwiderstand und Bodenwassergehalt zu beschreiben, könnten Messwerte unterschiedlicher Erhebungen zu einem standardisierten Eindringwiderstand bei definierten Bodenwasserzustand (z. B. Feldkapazität bei pF 1.8) umgerechnet werden. Dies würde den Vergleich zwischen wiederholten Erhebungen und, im Idealfall, zwischen unterschiedlichen Standorten erlauben.

---

## 6 Schlussfolgerungen

### 6.1 Messung des Eindringwiderstands

- Die Wiederholbarkeit einer Erhebung bestehend aus 20 Einzelmessungen ist bei einem repräsentativen, robusten Proben-Design sehr gut und weist Variationskoeffizienten von unter 5 % auf.
- Die Ergebnisse zeigen, dass die messende Person die Messwerte beeinflusst. Die Wiederholbarkeit einer Erhebung wird bei unterschiedlichen Messpersonen deutlich verschlechtert. Die Variationskoeffizienten verdoppeln sich im Vergleich zu Wiederholungen durch dieselbe Person. Der Einfluss der Messperson kann vermutlich minimiert werden, wenn eine möglichst konstante Schlagstärke (Vortrieb pro Schlag) definiert und eingehalten wird. Damit eine Standardisierung der Messung mit der PANDA-Sonde mit entsprechenden Vorgaben in einer SOP definiert werden kann, müssen die Ursachen von Messabweichungen durch unterschiedliche Nutzer weiter abgeklärt werden.
- Um die Vergleichbarkeit von Messwerten unterschiedlicher PANDA-Sonden zu gewährleisten, müssen alle Messgeräte einheitlich kalibriert sein. Dies muss vom Hersteller gewährleistet und von den PANDA-Nutzern inskünftig kontrolliert werden.
- Die Messwerte der PANDA-Sonde sind nicht mit jenen des Penetrologgers vergleichbar. Mit der PANDA-Sonde resultieren generell höhere Werte für den Eindringwiderstand und Unterschiede zwischen verschiedenen Bodenschichten werden deutlicher abgebildet. Zudem ist die Messung auch bei extremen und wechselnden Bodeneigenschaften (wie hoher Ton- oder Skelettgehalt, extreme Trockenheit) praktikabel. Für die Messung benötigt man jedoch rund doppelt so viel Zeit im Vergleich zum Penetrologger.

### 6.2 Erfassung des Bodenwasserzustandes

- Die Messung des Bodenwasserbegleitparameters Saugspannung ist weniger präzise als jene des gravimetrischen Wassergehaltes und sie weist eine grössere Messunsicherheit (Streuung) auf. Zudem liegen in der Regel nur Messungen für eine beschränkte Anzahl Schichten vor. Bei einer einmaligen Messung ist der Einsatz von Instant-Tensiometern angebracht. Diese können kurz vor der Messung installiert werden und die Resultate sind, gemäss unseren Erkenntnissen, mit jenen der Standard-Tensiometer vergleichbar.
- Für wiederholte Messungen korrelieren die Veränderungen der Saugspannung besser mit jenen des Eindringwiderstands als die Veränderungen des Wassergehalts. Daher scheint die Saugspannung als erklärende Variable besser geeignet zu sein.
- Aus Bohrkernen kann der Wassergehalt über den gesamten Tiefenbereich präzise und robust bestimmt werden. Zudem können aus derselben Probe gleichzeitig weitere Parameter, wie Raumgewicht und Lagerungsdichte der Feinderde, bestimmt werden. Diesen Vorteilen steht jedoch oben aufgeführte Nachteil gegenüber: Die Korrelation mit dem Eindringwiderstand ist schlechter. Um den Zusammenhang zwischen Veränderungen des Wassergehalts und des Eindringwiderstands besser erklären zu können sind weitere Bodeneigenschaften zu berücksichtigen. Es ist zu prüfen, ob die Saugspannung mittels Pedotransferfunktionen aus Wassergehalt, Raumgewicht, Textur und Humusgehalt genügend gut geschätzt werden kann, um damit Erhebungen des Eindringwiderstands bei unterschiedlicher Bodenfeuchte zu standardisieren.

## 7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messung Eindringwiderstand mit der PANDA-Sonde von Sol Solution. ....	7
Abbildung 2: Messung Eindringwiderstand mit dem Penetrologger von Eijkelkamp. ....	8
Abbildung 3: Bestimmung des gravimetrischen Wassergehaltes 0 bis 75 cm. ....	9
Abbildung 4: Messung der Wasserspannung mit Standard-Tensiometer (links) und Instant-Tensiometer (rechts). ....	9
Abbildung 5: Schlag 109 mit den Untersuchungsflächen R109 F1 (hinten) und R109 F2 (vorne) zum Zeitpunkt der Vergleichsmessungen (Ende August 2016). ....	10
Abbildung 6: Mess- und Probenahme-Design 10 x 10 m für 10 wiederholte Erhebungen des Eindringwiderstandes (jeweils 10 Teilflächen) und des Wassergehaltes aus Bohrkernen (jeweils 4 Teilflächen, blau eingefärbte Spalten) ....	11
Abbildung 7: Wiederholbarkeit von Messungen des Eindringwiderstandes: je drei Wiederholungen durch dieselbe Person mit der PANDA-Sonde (Panda; durchgezogene Linien) und dem Penetrologger mit 1 cm <sup>2</sup> -Sondenspitze (PL1; gepunktete Linien) bzw. 3.3 cm <sup>2</sup> -Sondenspitze (PL3.3; gestrichelte Linien) (Messungen vom 30.8. in Schlag R109 Fläche 2). ....	15
Abbildung 8: Wiederholbarkeit von Messungen des Eindringwiderstandes: je drei Wiederholungen durch drei Personen (P1-P3) mit der PANDA-Sonde (PS; durchgezogene Linien) und dem Penetrologger. 3.3 cm <sup>2</sup> -Sondenspitze (PL; gestrichelte bzw. gepunktet Linien)., links: Messungen vom 5.7.2016 in Fläche R115, rechts: 22.8.2016 in Fläche R109 F1. ....	16
Abbildung 9: Links: Eindringwiderstand gemessen mit 3 verschiedenen PANDA-Sonden durch 3 unterschiedliche Personen; rechts: relative Eindringwiderstands-Werte, relativ zu Wert in einer Tiefe von 57.5 cm; ....	18
Abbildung 10: Eindringwiderstand der Sonde 1 umgerechnet mit Formel 8 vs. Eindringwiderstand gemessen mit der Sonde der NABO. ....	19
Abbildung 11: Vergleich von je drei (zeitgleichen) wiederholten Erhebungen des Eindringwiderstands mit der PANDA-Sonde (durchgehende Linie) und dem Penetrologger (gepunktete Linie – PL1 mit 1 cm <sup>2</sup> -Spitze, gestrichelte Linie – PL3.3 mit 3.3 cm <sup>2</sup> -Spitze); links Messwerte in MPa, rechts: Relativwert zu Messwert in 57.5 cm Tiefe gem. Formel 7. ....	20
Abbildung 12: Vergleich der modellierten Werte der 3.3 cm <sup>2</sup> -Spitze (links) und der 1 cm <sup>2</sup> -Spitze (rechts) des Penetrologgers in Relation zu den Werten der PANDA-Sonde. ....	22
Abbildung 13: Eindringwiderstand, gravimetrischer Wassergehalt (WG FE) und Saugspannung (Tension) in den Tiefen 20, 40, 60 cm. Messwerte von 4 Messzeitpunkten: rot = 1. Erheb. (22.8.), orange=2. Erheb. (13.9.), grün=3. Erheb. (22.9.), blau= 4. Erheb. (24.10.) in der Fläche R109 F1.....	25
Abbildung 14: Streudiagramm des gravimetrischen Wassergehaltes (WG <sub>FE</sub> ; blaue Symbole) und der Saugspannung (Tension; rote Symbole) zum Eindringwiderstand (Edw) der Erhebungen 1 bis 4 in den Tiefenschichten 15-25 und 35-45 cm. ....	25
Abbildung 15: NABOphys-Probenplan für Messwiederholungen. Hier für zeitgleiche Messwiederholungen von drei Personen mit je zwei unterschiedlichen Methoden. ....	32
Abbildung 16: NABOphys-Probenplan für Messwiederholungen. Hier für zeitgleiche Methodenvergleichsprüfung. Methodenvergleich mit Wiederholpräzision, Vergleichbarkeit unterschiedliche Geräte und User, Vergleichbarkeit von Bestimmungsverfahren für Begleitparameter Wassergehalt.....	33
Abbildung 17: NABOphys-Probenplan für Messwiederholungen in der Versuchsfläche 1 zur Bestimmung des Einflusses von Wassergehalt (WG) auf den Eindringwiderstand (WG in schraffierten Flächen der Erhebung 1-5). In der Ersterhebung Bestimmung Einfluss der Person auf das Messergebnis von	

---

Eindringwiderstand mit zeitgleichen Messwiederholungen von drei Personen mit je zwei unterschiedlichen Methoden (PANDA-Sonde und Penetrologger in den Flächen 1, 4 und 7). .....	34
Abbildung 18: Eindringwiderstände mit PANDA-Sonde mit 4 cm <sup>2</sup> -Sondenspitze. Mediane pro 5cm-Schicht mit dem und zugehörige Vertrauensintervalle; (von einer Person gemessen; Messwiederholung 1 – grün, 2 – blau, 3 – schwarz); .....	35
Abbildung 19: Eindringwiderstände mit Penetrologger und 1 cm <sup>2</sup> -Sondenspitze. Mediane pro 5cm-Schicht mit zugehörigem Vertrauensintervalle (von einer Person gemessen; Messwiederholung 1 – orange, 2 – blau, 3 – schwarz); .....	36
Abbildung 20: Eindringwiderstände mit Penetrologger und 3.3 cm <sup>2</sup> -Sondenspitze. Mediane pro 5cm-Schicht mit zugehörigem Vertrauensintervalle (von einer Person gemessen; Messwiederholung 1 – orange, 2 – blau, 3 – schwarz); .....	36
Abbildung 21: Eindringwiderstand mit PANDA-Sonde mit 4 cm <sup>2</sup> -Sondenspitze durch 3 unterschiedliche Personen (Person 1 – grün, Person 2 – blau, Person 3 – schwarz); Mediane mit Vertrauensintervall pro 5cm-Schicht, n= 20; .....	37
Abbildung 22: Eindringwiderstand mit Penetrologger (Sondenspitze mit 3.3 cm <sup>2</sup> Querschnittsfläche) durch 3 unterschiedliche Personen (Person 1 – grün, Person 2 – blau, Person 3 – schwarz); Mediane mit Vertrauensintervall pro 5cm-Schicht, n= 20; .....	37
Abbildung 23: Eindringwiderstand mit PANDA-Sonde mit 4 cm <sup>2</sup> -Sondenspitze durch 3 unterschiedliche Personen (Person 1 – grün, Person 2 – blau, Person 3 – schwarz); Mediane mit Vertrauensintervall pro 5cm-Schicht, n= 20; .....	38
Abbildung 24: Eindringwiderstand mit Penetrologger (Sondenspitze mit 3.3 cm <sup>2</sup> Querschnittsfläche) durch 3 unterschiedliche Personen (Person 1 – orange, Person 2 – blau, Person 3 – schwarz); Mediane mit Vertrauensintervall pro 5cm-Schicht, n= 20; .....	38

---

## 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht zu den Messungen in den einzelnen Versuchsflächen (WG: Bestimmung Wassergehalt und Raumgewicht aus Bohrkernen).....	12
Tabelle 2: Spezifikation der verwendeten PANDA-Sonden (PANDA2 TDD).....	13
Tabelle 3: Wiederholpräzision von drei wiederholten Messungen als Variationskoeffizient (CV in %) nach Bodentiefe für PANDA-Sonde und Penetrologger (Sondenspitzen 3.3 cm <sup>2</sup> und 1 cm <sup>2</sup> ); CV > 5 % sind fett dargestellt und grau hinterlegt.....	15
Tabelle 4: durchschnittliche Anzahl Messungen pro Sondierung und Person mit der PANDA-Sonde: .....	17
Tabelle 5: Wiederholpräzision des Eindringwiderstandes mit PANDA-Sonde und Penetrologger bei drei wiederholten Erhebungen durch drei unterschiedliche Personen verglichen mit der Wiederholpräzision von drei Erhebungen durch dieselbe Person in den einzelnen Tiefenschichten. Variationskoeffizient (CV in %) > 5 % sind grau hinterlegt; der minimale CV ist grün, der maximale CV rot eingefärbt. ....	17
Tabelle 6: Mittelwert (Mw) der drei wiederholten Erhebungen pro Methode. Die Mw der Penetrologger-Verfahren wurden in Relation zu jenen der PANDA-Sonde gesetzt ( $\% Mw_{PS} = Mw_{PANDA} / Mw_{Penetrologger} * 100 \%$ ). Weiter wurden die absoluten Messabweichungen ( $\Delta Mw_{PS} = Mw_{Penetrologger} - Mw_{PANDA}$ ) berechnet. ....	21
Tabelle 7: Vergleich der Wassergehaltsbestimmungen aus volumetrischen Proben und Saugspannungsmessungen mit Standard-Tensiometer in drei Tiefen: Anzahl Messwerte (n), Mittelwert (Mw), Standardabweichung (s) und Variationskoeffizient (CV %); kursiv: Schätzwert nahe der Sättigung....	23
Tabelle 8: Vergleich der Saugspannungsmessungen mit Standard- und Instant-Tensiometern in drei Tiefen: Anzahl Messwerte (n), Mittelwert (Mw), Standardabweichung (s) und Variationskoeffizient (CV %); kursiv: Schätzwert nahe der Sättigung. ....	24
Tabelle 9: Datenmenge und ca. Arbeitsaufwand bei der Bestimmung der Bodenwasser-Parameter pro Messverfahren für einen Messzeitpunkt, bei Stichprobenzahl n=4 pro Schicht. ....	24

---

## 9 Literaturverzeichnis

- Dexter, A.R., Czyz, E.A., Gate, O.P. (2007) A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil & Tillage Research* 93, 412-419.
- Fachstelle Bodenschutz, Kanton Zürich (1997), 59 S. Messbarkeit von Bodenverdichtungen im Feld.
- Fachstelle Bodenschutz, Kanton Zürich (1998) 52 S. Messungen von Bodenverdichtungen im Feld.
- Fachstelle Bodenschutz, Kanton Zürich (1999) 91 S. Messungen von Bodenverdichtungen im Feld, Teilprojekt Bestandesaufnahme.
- Schwab, P. (2009) Eindringwiderstandsmessung mit dem Penetrometer – Referenzierung von Zeitreihen für die Boden-Dauerbeobachtung. *BGS Bulletin* 30, 139-142.
- Schwab, P., Gubler, A. (2016) Methoden zur Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben. *Agroscope Science* No. 40. Agroscope/NABO, Zürich.
- van Genuchten, M.Th. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898.
- Wösten, J.H.N., Lilly, A., Nemes, A., Le Ba, C. (1999) Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90, 169-185.

# 10 Anhang

## 10.1 Versuchsplan R115 (Test Methodenvergleich, Einfluss Person)

Standort Reckenholz Schlag 115, am 5.7.2016; Messung von je 3 Personen Eindringwiderstand mit 2 Methoden (PANDA-Sonde und Pentrologger).

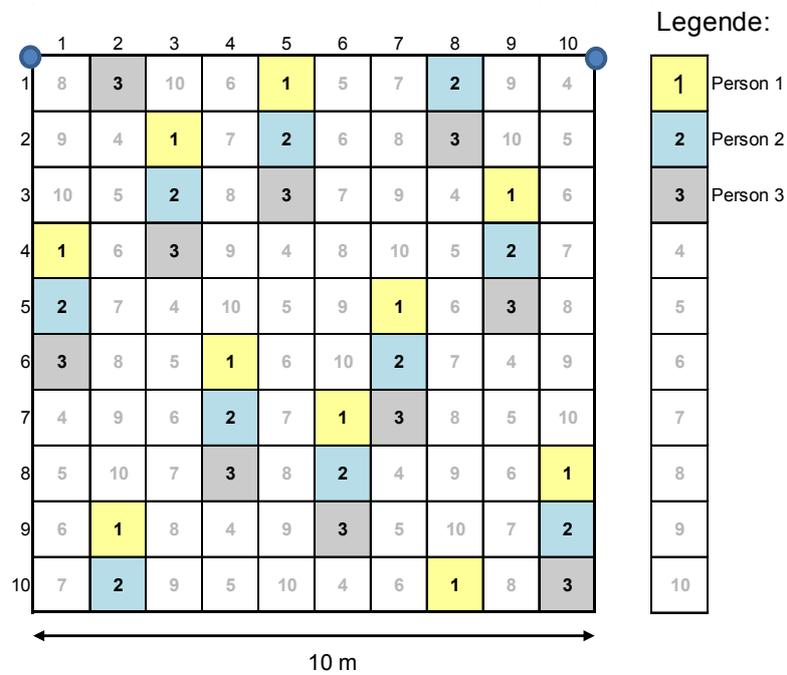


Abbildung 15: NABOphys-Probenplan für Messwiederholungen. Hier für zeitgleiche Messwiederholungen von drei Personen mit je zwei unterschiedlichen Methoden.

Jede Person führte in den zugewiesenen 10 Quadratmetern mit beiden Methoden je 2 Messungen durch. Dies ergibt für jede Person und Methode 20 Messungen.

## 10.2 Versuchsplan R109 F2 (Methodenvergleichsprüfung )

Standort Reckenholz Schlag 109, Fläche 2, am 30.8.2016

- **Vergleichbarkeit PANDA-User:** Flächen 1, 2 und 5 (rot markierte Flächen, rote Schrift). Zeitgleiche Messung Eindringwiderstand mit 3 unterschiedlichen PANDA-Sonden von drei Usern → unterschiedliche Geräte und unterschiedliche Personen, mit je 20 Sondenmessungen in je 10 Teilflächen.
- **Methodenvergleich, Bestimmung Wiederholpräzision:** Flächen 1, 4 und 7 (grün markiert). Messung Eindringwiderstand mit 2 Geräten, 3 Methoden (PANDA-Sonde, Penetrologger Sondenspitze 1cm<sup>2</sup> 60° und Penetrogger Sondenspitze 3.3 cm<sup>2</sup> 60°) mit je 3 Wiederholungen – gleiches Gerät von jeweils gleicher Person gemessen, mit je 20 Sondenmessungen in je 10 Teilflächen.
- **Vergleichbarkeit Wassergehaltsbestimmung:** Messung gravimetrischer Wassergehalt in 4 Teilflächen (blau markiert) aus 5cm-Schichten der Humaxproben, und Messung der Saugspannung in den Tiefen 20, 40 und 60 cm im Schlag 109, Fläche 1 (siehe Abbildung 16) mit Standard-Tensiometer und Instant-Tensiometer.



Abbildung 16: NABOphys-Probenplan für Messwiederholungen. Hier für zeitgleiche Methodenvergleichsprüfung. Methodenvergleich mit Wiederholpräzision, Vergleichbarkeit unterschiedliche Geräte und User, Vergleichbarkeit von Bestimmungsverfahren für Begleitparameter Wassergehalt.

## 10.3 Versuchsplan R109 F1 (Einfluss Person und Einfluss Bodenwasser)

Standort Reckenholz Schlag 109, Fläche 1, 5 Erhebung vom 22.8. bis 27.10.2017.

**Eindringwiderstandsmessung von drei Personen in den Teilflächen 1, 4 und 7 mit 2 Methoden bei der Ersterhebung 22.8.2017:** PANDA-Sonde (Sondenspitze 4 cm<sup>2</sup> 90°) und Pentrologger (Sondenspitze 3.3 cm<sup>2</sup> 60°). Pro Person und Methode mit je 20 Sondenmessungen in den 10 Teilflächen.

**Einfluss Bodenwasser auf den Eindringwiderstand:** Auf dieser Probe-Fläche wurden insgesamt 5 Messwiederholungen durchgeführt, um in 5 Zeitpunkten (22.8., 13.9., 22.9., 24.10. und 27.10.) den Einfluss der Bodenfeuchtigkeit auf die Messwerte des Eindringwiderstandes zu bestimmen. Bei jeder Erhebung wurde in den jeweiligen vier schraffierten Flächen der Erhebung ein Bohrkern zur Bestimmung des Wassergehaltes entnommen. Die Saugspannung in 20, 40 und 60 cm wurde bei den fix eingerichteten Tensiometer-Messstellen abgelesen (letzte Messung 20.10.).

**Vergleichbarkeit Bodenwasserbestimmung:** Aus diesen Untersuchungen kann die Vergleichbarkeit der Bodenwasserbestimmung bei den insgesamt 6 Zeitpunkten zwischen Messwerten der Standard-Tensiometer in 20, 40 und 60cm Tiefe und des gravimetrischen Wassergehaltes aus Humaxproben in entsprechenden Schichten bestimmt werden. Am 30.8. wurde in der schraffierten Teilfläche 10 die Vergleichbarkeit der Bodenwasserbestimmung zwischen Standard-Tensiometer, Instant-Tensiometer und Wassergehaltsbestimmung aus Volumenproben (Humax-Bohrkernen) untersucht.

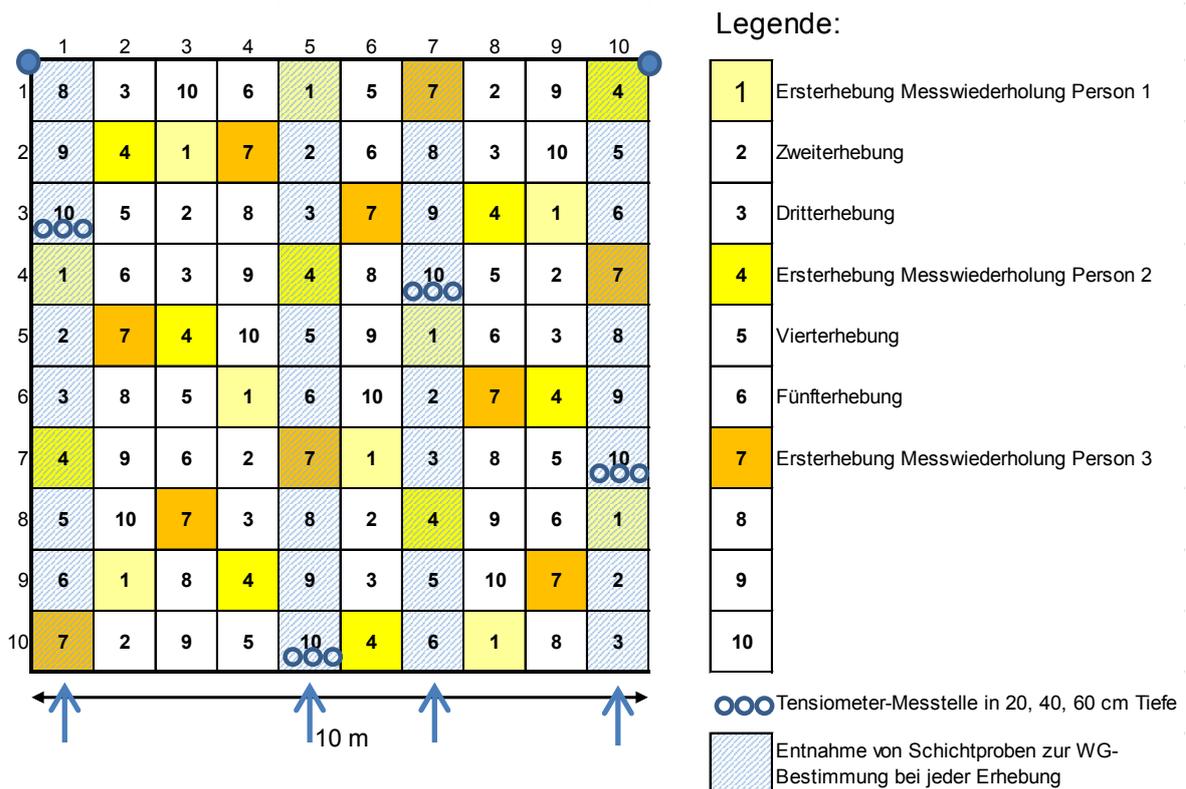


Abbildung 17: NABOphys-Probenplan für Messwiederholungen in der Versuchsfläche 1 zur Bestimmung des Einflusses von Wassergehalt (WG) auf den Eindringwiderstand (WG in schraffierten Flächen der Erhebung 1-5). In der Ersterhebung Bestimmung Einfluss der Person auf das Messergebnis von Eindringwiderstand mit zeitgleichen Messwiederholungen von drei Personen mit je zwei unterschiedlichen Methoden (PANDA-Sonde und Penetrologger in den Flächen 1, 4 und 7).

## 10.4 Einzelgrafiken; Messwiederholungen Methodenvergleich PANDA-Sonde vs. Penetrologger

### 10.4.1 Wiederholte Messungen PANDA-Sonde (4 cm<sup>2</sup>, 90°)

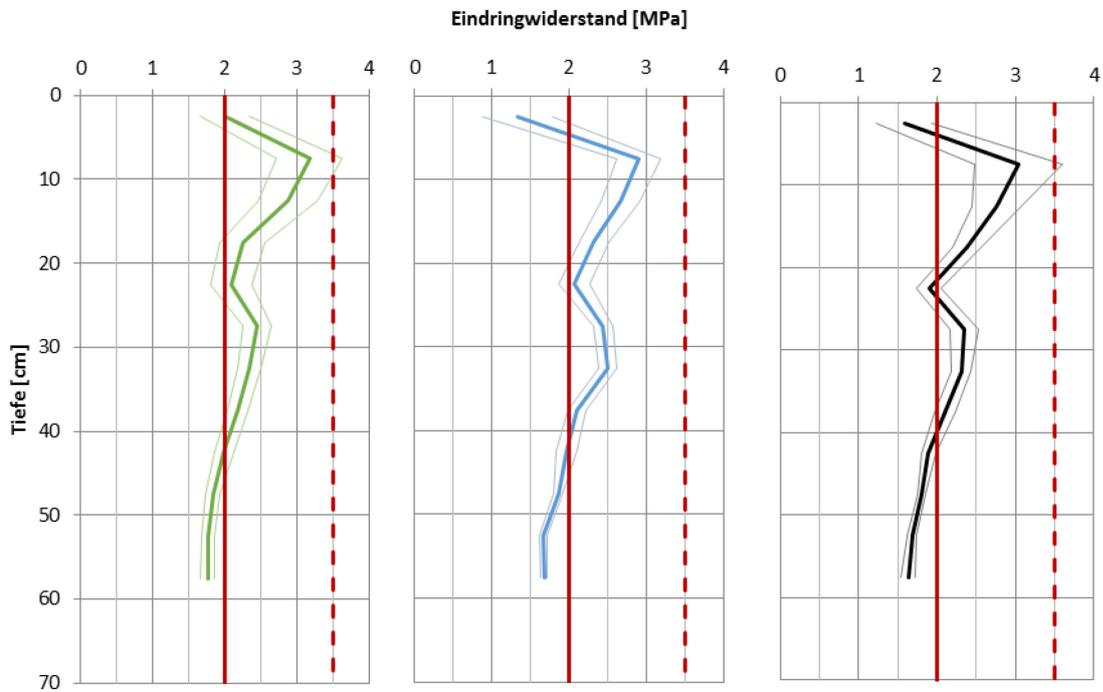


Abbildung 18: Eindringwiderstände pro 5 cm-Schicht mit PANDA-Sonde mit 4 cm<sup>2</sup> - Sondenspitze. Mediane mit Vertrauensintervall, n = 20 (von einer Person gemessen; Messwiederholung 1 – grün, 2 – blau, 3 – schwarz).

### 10.4.2 Wiederholte Erhebungen Penetrologger (1 cm<sup>2</sup>, 60° und 3.3 cm<sup>2</sup>, 60°)

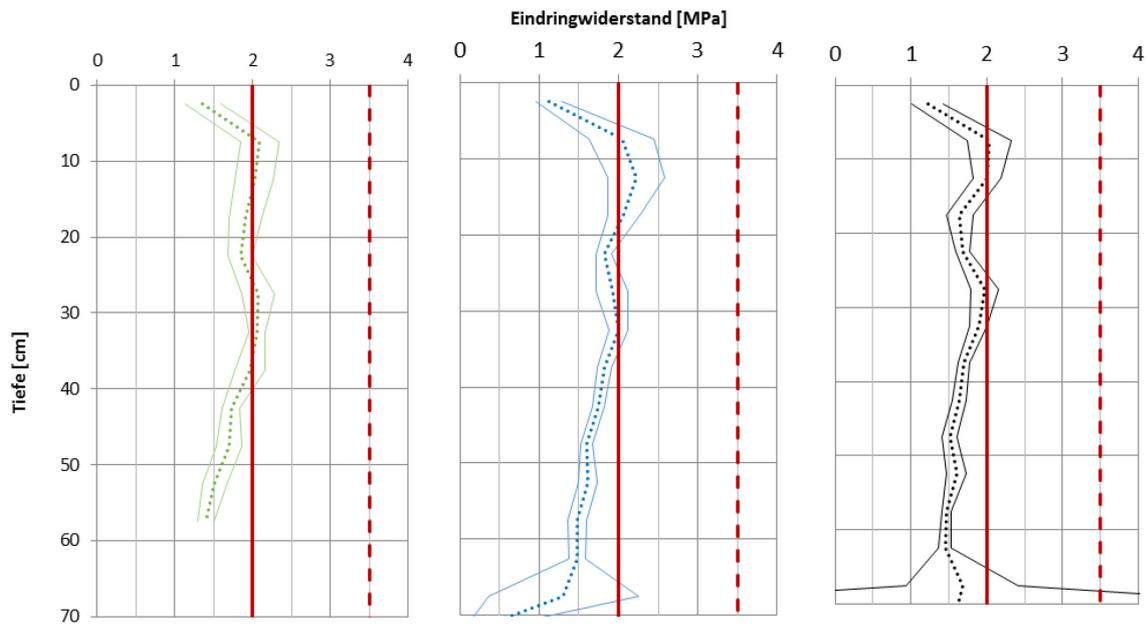


Abbildung 19: Eindringwiderstände pro 5 cm-Schicht mit Penetrologger und 1 cm<sup>2</sup> - Sondenspitze. Mediane Vertrauensintervall, n=20 (von einer Person gemessen; Messwiederholung 1 – orange, 2 – blau, 3 – schwarz).

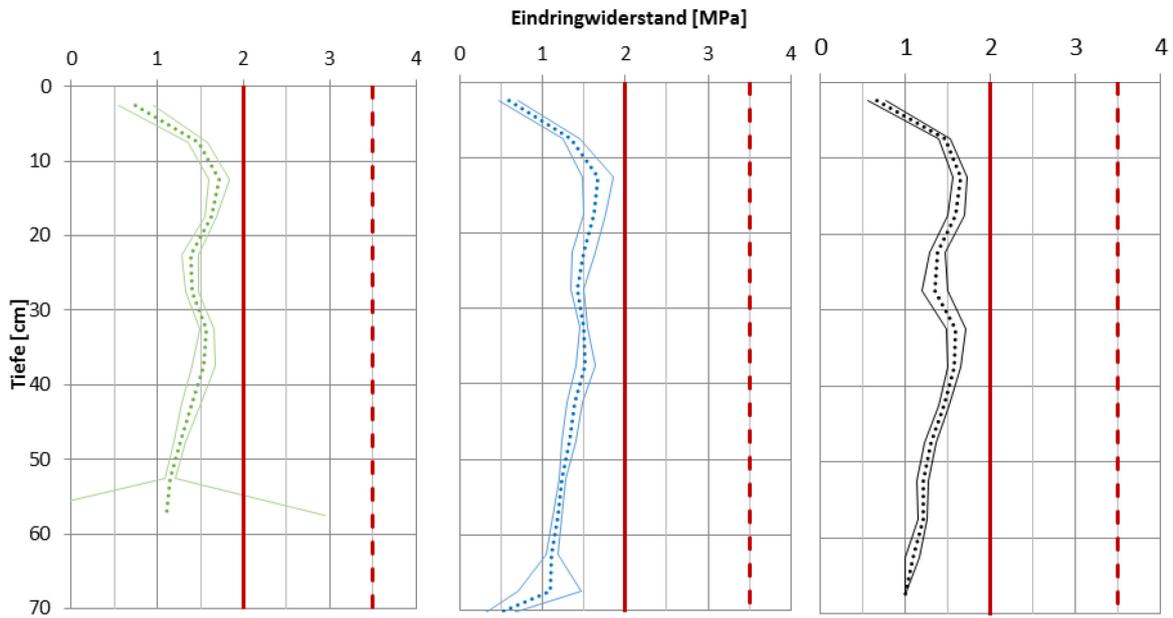


Abbildung 20: Eindringwiderstände pro 5 cm Schicht mit Penetrologger und 3.3 cm<sup>2</sup> - Sondenspitze. Mediane mit Vertrauensintervall, n=20 (von einer Person gemessen; Messwiederholung 1 – orange, 2 – blau, 3 – schwarz).

## 10.5 Einzelgrafiken; Wiederholbarkeit bei Messung durch unterschiedliche Personen

**Vorversuch am 5.7.2016 auf Schlag R115** Messungen von drei Personen mit je zwei Methoden (PANDA-Sonde oben, Penetrologger 3.3cm-Sondenspitze unten).

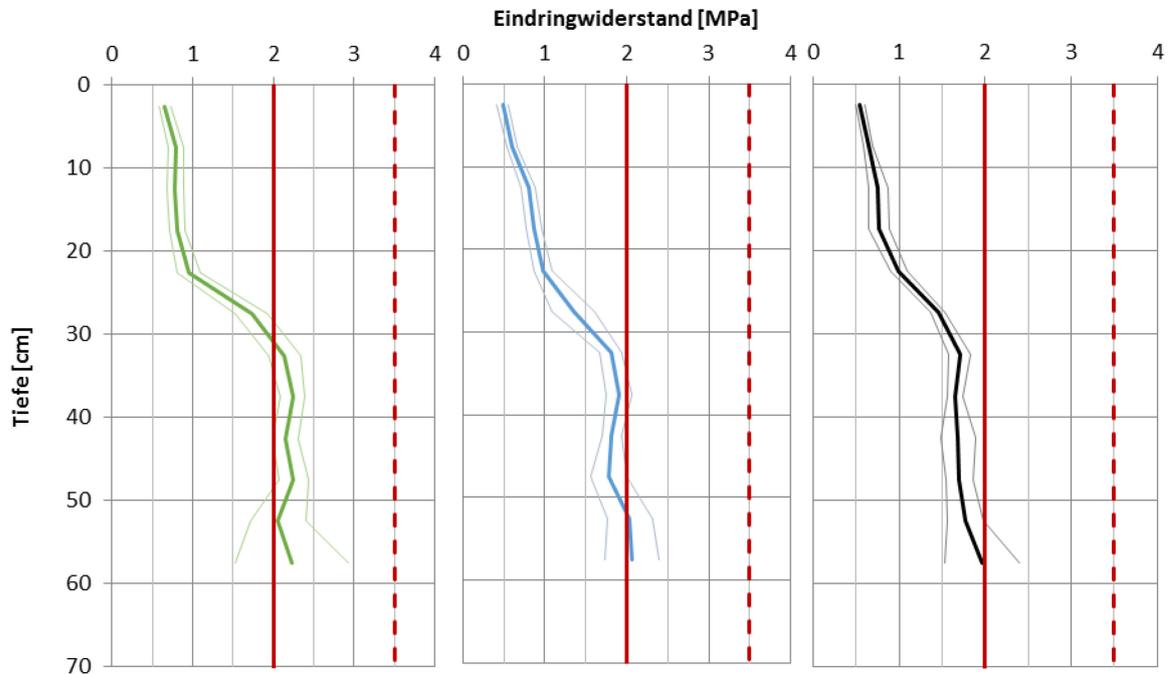


Abbildung 21: Eindringwiderstand pro 5 cm-Schicht mit PANDA-Sonde mit 4 cm<sup>2</sup> - Sondenspitze durch 3 unterschiedliche Personen (Person 1 – grün, Person 2 – blau, Person 3 – schwarz); Mediane mit Vertrauensintervall, n= 20.

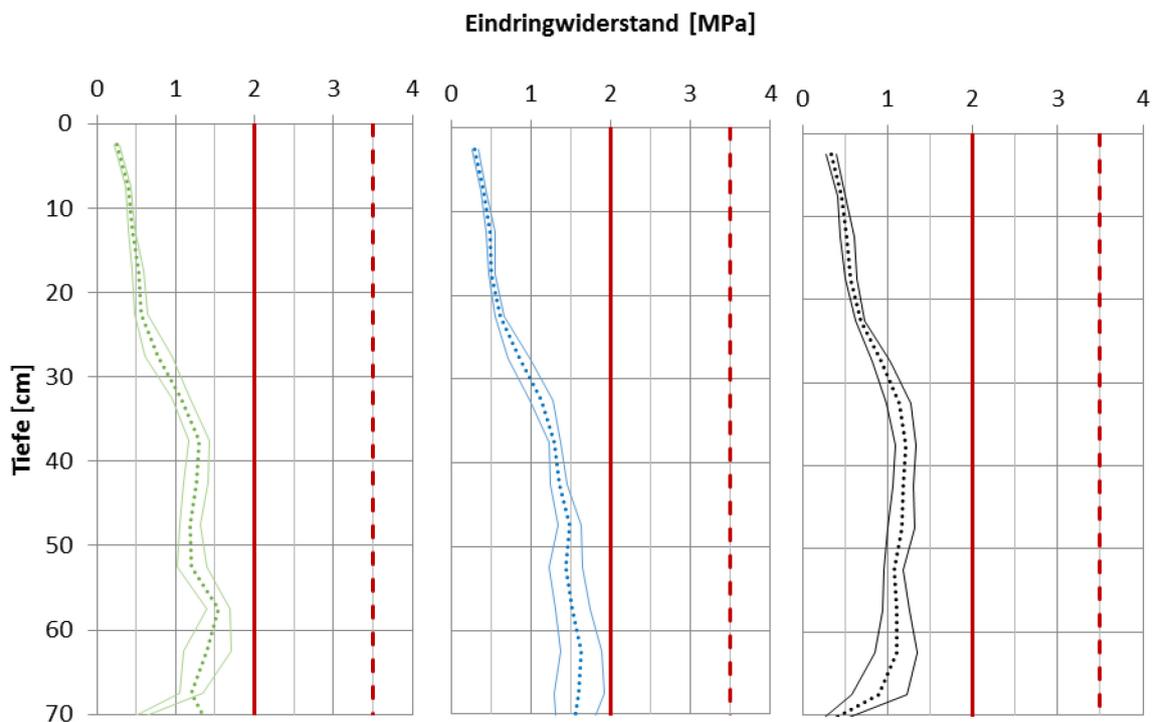


Abbildung 22: Eindringwiderstand pro 5 cm-Schicht mit Penetrologger mit 3.3 cm<sup>2</sup> - Sondenspitze durch 3 unterschiedliche Personen (Person 1 – grün, Person 2 – blau, Person 3 – schwarz); Mediane mit Vertrauensintervall, n= 20.

**Hauptversuch im Schlag R109** beim ersten Messzeitpunkt am 22.8.2016 in der Fläche 1, Messungen von drei Personen mit je zwei Methoden (PANDA-Sonde, Penetrologer 3.3 cm<sup>2</sup>-Spitze).

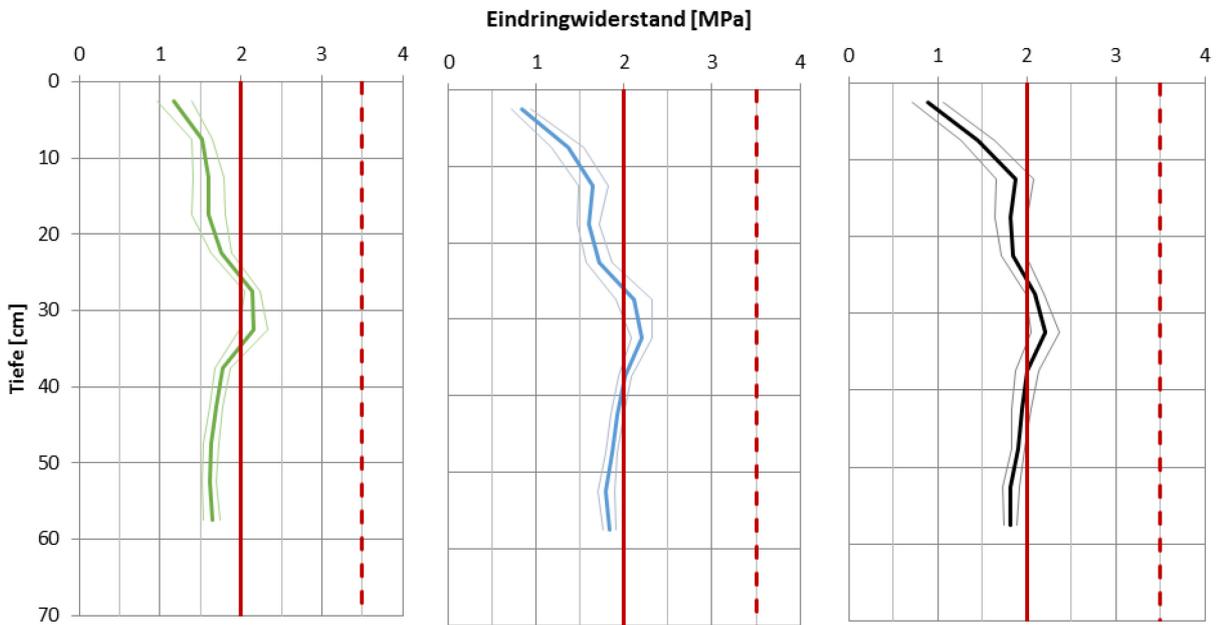


Abbildung 23: Eindringwiderstand pro 5 cm-Schicht mit PANDA-Sonde mit 4 cm<sup>2</sup> - Sondenspitze durch 3 unterschiedliche Personen (Person 1 – grün, Person 2 – blau, Person 3 – schwarz); Mediane mit Vertrauensintervall, n= 20.

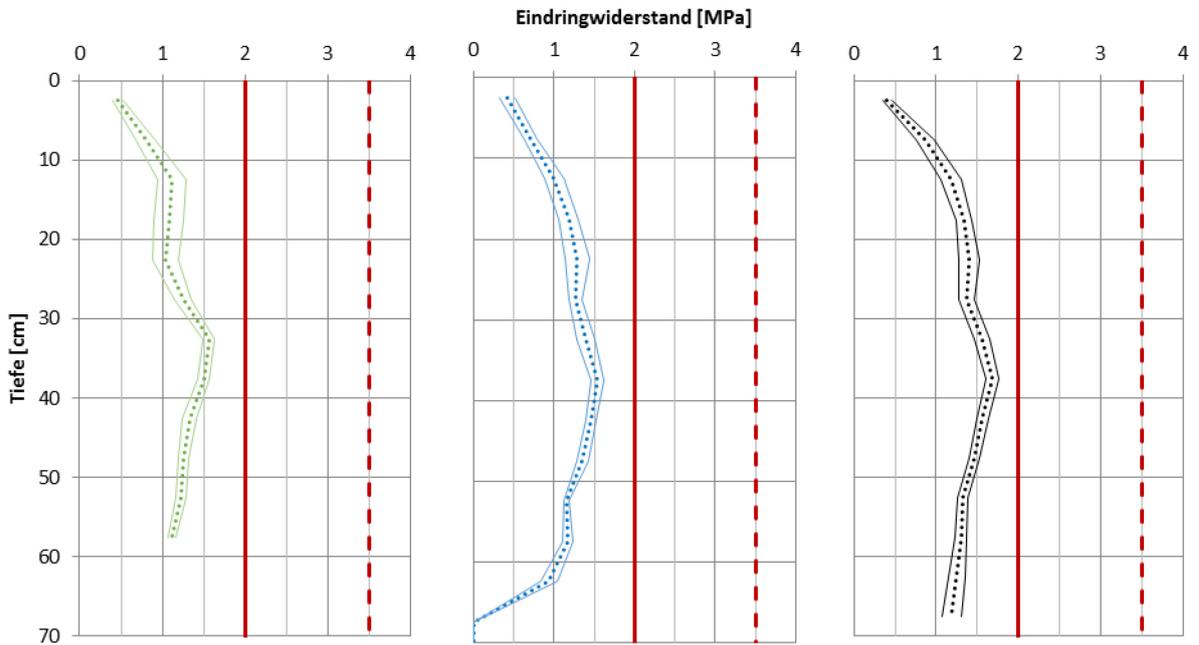


Abbildung 24: Eindringwiderstand pro 5 cm-Schicht mit Penetrologer mit 3.3 cm<sup>2</sup> - Sondenspitze durch 3 unterschiedliche Personen (Person 1 – orange, Person 2 – blau, Person 3 – schwarz); Mediane mit Vertrauensintervall, n= 20.



