



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Wirtschaft,
Bildung und Forschung WBF

Agroscope

Vergleich von Messungen mit verschiedenen Penetrometertypen

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

09.01.2020

Forschungsgruppe für Bodenschutz und Bodenfruchtbarkeit, Agroscope

Impressum

Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Boden und Biotechnologie CH-3003 Bern Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
Datum	09.01.2020
Version	Schlussbericht
Autoren	Selina Lutz, Agroscope, 8046 Zürich Thomas Keller, Agroscope, 8046 Zürich
Mitwirkende	Forschungsgruppe Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Agroscope, 8046 Zürich
Begleitung BAFU	Corsin Lang, Sektion Boden
Hinweis	Die Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich. Die Rohdaten können von den Autoren auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.

Zusammenfassung

Mit einem Penetrometer kann auf eine einfache Weise der Eindringwiderstand im Boden gemessen werden. Dadurch können indirekt Bodenverdichtungen lokalisiert und beurteilt werden. Je nach Eindringmechanismus wird zwischen statischen und dynamischen Gerätearten differenziert. Zusätzlich zum Eindringmechanismus unterscheiden sich die Gerätearten auch oft in Bezug auf die Konusspitzen. Der gemessene Eindringwiderstand ist von verschiedenen Einflussfaktoren, wie der Geräteart, der Lagerungsdichte oder dem Bodenwassergehalt, abhängig. Der Vergleich von Messungen zwischen verschiedenen Penetrometertypen, wiederholten Erhebungen oder unterschiedlichen Standorten wird dadurch erschwert.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, Messungen verschiedener Penetrometertypen miteinander zu vergleichen und Ursachen für allfällige Messunterschiede zu finden. Das Projekt sollte zudem Vorschläge für weiterführende Arbeiten machen. Um die definierten Projektziele erreichen zu können, fanden im Sommer 2019 in Zusammenarbeit mit der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) Vergleichsprüfungen statt. Zu diesem Zweck wurden auf insgesamt 12 Standorten zeitgleich sowohl mit der dynamischen PANDA-Sonde als auch mit dem statischen Penetrologger von Eijkelkamp Messungen durchgeführt. Dadurch konnten Messdaten von Standorten mit unterschiedlichen Bodentexturen und, aufgrund wiederholter Erhebungen, auch mit variierenden Bodenfeuchten gesammelt werden. Zudem ermöglichen die zeitgleichen Erhebungen mit den beiden Verfahren ein Vergleich zwischen den Penetrometertypen.

Durch die zeitgleiche Messung mit verschiedenen Penetrometertypen und Sondierkonen konnten systematische Abweichungen zwischen den Verfahrensarten aufgezeigt werden. Die absoluten Eindringwiderstände der PANDA-Sonde und des Penetrologgers sind deshalb nicht miteinander vergleichbar. Mit dem Penetrologger werden durchschnittlich tiefere Eindringwiderstände gemessen, insbesondere bei der Verwendung grösserer Sondierkonen. Zudem werden potenziell verdichtete Schichten mit der PANDA-Sonde überproportional hoch abgebildet. Durch die Herleitung einfacher empirischer Gleichungen wurde versucht, Eindringwiderstände anhand der Lagerungsdichte und des Wassergehaltes herzuleiten. Die modellierten Messwerte zeigten jedoch im Allgemeinen eine ungenügende Übereinstimmung mit den gemessenen Eindringwiderständen. Zur Verbesserung der Modelle müssten möglicherweise noch weitere Variablen, wie die Bodentextur oder ein Geometriefaktor für die Konusspitze, in die Gleichungen integriert werden.

Anhand der durchgeführten Felduntersuchungen konnten die Unterschiede zwischen den Gerätearten nur unzureichend erklärt werden. Aus diesem Grund sollten bei weiterführenden Studien neue Methodenansätze berücksichtigt werden. So könnten Felddaten mit Computersimulationen ergänzt werden. Durch solche Simulationen kann die Spitze-Boden-Interaktion und die dabei wirkenden Kräfte und Widerstände besser nachvollzogen werden. Ein weiterer Ansatz wäre eventuell auch die Messung des Eindringwiderstandes auf künstlichen Böden oder bodenähnlichen Materialien, bei denen die Dichten und Wassergehalte der einzelnen Schichten bekannt und konstant sind. Auch dieses Vorgehen könnte Erklärungen für die Messabweichungen zwischen den Verfahrensarten liefern.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungen.....	III
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage	1
1.2 Ziele	1
1.3 Vorgehen	2
2 Methoden und Analysen.....	2
2.1 Messung Eindringwiderstand und Begleitparameter.....	2
2.2 Versuchsrahmenbedingungen.....	3
2.3 Statistische Auswertung	4
3 Ergebnisse	4
3.1 Vergleich zwischen den Gerätearten.....	4
3.2 Einfluss der gemessenen Begleitparameter	5
3.3 Herleitung einfacher empirischer Gleichungen für die Abschätzung des Eindringwiderstandes aus der Lagerungsdichte und dem Wassergehalt.....	6
4 Diskussion.....	7
4.1 Diskussion der Ergebnisse	7
4.2 Diskussion der Geräteanwendung und Penetrometertypen.....	8
5 Empfehlungen und Ausblick	9
6 Literatur	11
7 Anhang.....	12

Abbildungen

Abb. 1: Links: Messung mit PANDA-Sonde von Sol Solution. Rechts: Messung mit Penetrologger von Eijkelkamp.	2
Abb. 2: Orthofoto des Standort Reckenholz in Affoltern mit den eingezeichneten Versuchsflächen.	3
Abb. 3: Gemittelter Eindringwiderstand aus 5 Erhebungen gemessen mit 2 verschiedenen Penetrometertypen der Versuchsfläche R2 am Standort Reckenholz in Zürich Affoltern.	4
Abb. 4: Eindringwiderstand (Q) PANDA-Sonde gegenüber Penetrologger mit der 1 cm ² -Spitze. Messwerte von allen 12 Standorten und Erhebungen.	5
Abb. 5: Einfluss des Tongehaltes auf den Messunterschied zwischen der PANDA-Sonde und dem Penetrologger mit der 1 cm ² -Sondenspitze. Messwerte von allen 12 Standorten und Erhebungen.	5
Abb. 6: Einfluss des volumetrischen Wassergehaltes auf den Messunterschied zwischen der PANDA-Sonde und dem Penetrologger mit der 1 cm ² -Sondenspitze. Messwerte von den drei Versuchsflächen am Standort Reckenholz in Zürich Affoltern.	6
Abb. 7: Korrelation zwischen dem modellierten und dem gemessenen Eindringwiderstand (Q) des Penetrologgers mit der 1 cm ² -Spitze. Messwerte von allen 12 Standorten und Erhebungen. LD=Lagerungsdichte,WG=Wassergehalt.	7

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Gefahr der Bodenverdichtung ist in den letzten Jahren und Jahrzehnten aufgrund der Intensivierung der Landwirtschaft vermehrt in den Fokus des Interesses gerückt (Denker, 2011). Diese Form der Strukturdegradation wird durch übermässige mechanische Belastung verursacht und ist einer der grössten Risiken für die Bodenqualität und Ertragsfähigkeit einer Fläche (Krebs et al., 2017). Dies hat zu einer erhöhten Nachfrage an geeigneten methodischen Ansätzen zur Erfassung und Bewertung von Bodenverdichtungen geführt (Denker, 2011). Das am häufigsten verwendete und geeigneteste Messinstrument zur indirekten Bestimmung von Verdichtungen im Boden ist das sogenannte Penetrometer (Herrick & Jones, 2002). Das Gerät ermöglicht eine schnelle und standardisierte Ermittlung des mechanischen Widerstandes und ist somit ein Indikator für die Durchwurzelbarkeit bzw. Durchdringbarkeit eines Bodens (Krebs et al. 2017, Schmidt et al., 2015).

Ein Penetrometer besteht generell aus einem Messgerät und einer Sondierstange, welche am bodenseitigen Ende in einen Sondierkonus (Spitze) endet. Je nach Eindringmechanismus wird zwischen statischen und dynamischen Gerätearten unterschieden. Bei statischen Penetrometern (z.B. Penetrologgern) wird der Sondierkonus mit konstanter Geschwindigkeit in den Boden gedrückt, wobei die angewandte manuelle, hydraulische oder elektrische Kraft gemessen wird. Im Vergleich dazu wird die Sonde dynamischer Geräte (Rammsonden) mittels gleichmässiger Hammerschläge in den Boden getrieben und die eingebrachte Energie berechnet (Schwab et al., 2017; Sun et al., 2011). Zusätzlich zum Eindringmechanismus unterscheiden sich die Gerätearten auch oft in Bezug auf den Konuswinkel (Schwab et al., 2017). Sowohl der Eindringmechanismus als auch der Öffnungswinkel und Durchmesser der Spitze haben einen Einfluss auf den Messwert, den ein Penetrometer ausgibt (Denker, 2011). Der gemessene Eindringwiderstand ist zudem abhängig von der Lagerungsdichte (Denker, 2011; Dexter et al., 2007), der Bodentextur (Herrick & Jones, 2002), dem Bodenwassergehalt (Dexter et al., 2007; Kirkham, 2014), der Temperatur (Kirkham, 2014) und vom Benutzer bzw. von der Handhabung des Gerätes (Kirkham, 2014; Sun et al., 2011). Bodenwassergehalt und Lagerungsdichte sind dabei die zwei tragenden Grössen (Denker, 2011; Dexter et al., 2007; Vaz et al., 2011). Aufgrund der beschriebenen Einflussfaktoren ist der Vergleich von Messungen zwischen verschiedenen Penetrometertypen, wiederholten Erhebungen oder unterschiedlichen Standorten erschwert. Sollte es gelingen, den Zusammenhang zwischen dem Eindringwiderstand und den verschiedenen Einflussfaktoren zu beschreiben, könnten Messwerte korrigiert werden. Dies würde einen Vergleich zwischen verschiedenen Gerätearten, Erhebungen und Standorten ermöglichen (Schwab et al., 2017).

1.2 Ziele

Basierend auf der beschriebenen Ausgangslage im Kapitel 1.1 sind die Ziele des vorliegenden Projektes i) ein Vergleich von Messungen mittels Rammsonde und Penetrologger bei verschiedenen Bodenbedingungen und Bodentexturen, und ii) die Herleitung von einfachen empirischen Gleichungen, um Messungen der beiden Gerätearten vergleichen zu können. Das

Projekt soll zudem Vorschläge machen, welche Arbeiten notwendig wären, um die Messunterschiede zwischen den beiden Gerätearten besser verstehen zu können.

1.3 Vorgehen

Um die definierten Projektziele erreichen zu können, wurden im Sommer 2019 in Zusammenarbeit mit der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) Vergleichsprüfungen durchgeführt. Zur Bestimmung des Eindringwiderstandes wurde die dynamische PANDA-Sonde von Sol Solution und der statische Penetrologger von Eijkelkamp verwendet (siehe Abb. 1). Die Vergleichsmessungen fanden auf insgesamt 12 Standorten statt. Dadurch konnten Messdaten von Standorten mit unterschiedlichen Bodentexturen und, aufgrund wiederholter Erhebungen, auch mit variierenden Bodenfeuchten gesammelt werden. Zudem ermöglichen die zeitgleichen Erhebungen mit den beiden Verfahren ein Vergleich zwischen den Penetrometertypen.

2 Methoden und Analysen

2.1 Messung Eindringwiderstand und Begleitparameter

Im Feld wurde der Eindringwiderstand jeweils zeitgleich mit der PANDA-Sonde von Sol Solution und dem Penetrologger von Eijkelkamp bestimmt. Für die Messung mit der PANDA-Sonde kam ein Sondierkonus mit einer 4 cm² Querschnittsfläche und einem 90° Konuswinkel zum Einsatz. Beim Penetrologger, bei dem die Sonde mit manueller Kraft in den Boden gedrückt wurde (siehe Abb. 1), wurde aufeinanderfolgend eine Spitze mit einer Fläche von 1 cm² und 3.3 cm² verwendet. Die beiden Penetrologgerspitzen hatten beide einen Konuswinkel von 60° (Schwab et al., 2017).



Abb. 1: **Links:** Messung mit PANDA-Sonde von Sol Solution. **Rechts:** Messung mit Penetrologger von Eijkelkamp (Fotos P. Schwab, 2019).

Zusätzlich zum Eindringwiderstand wurde bei jedem Standort über den gesamten Tiefenbereich von 70 cm weitere physikalische und chemische Bodenparameter bestimmt. Für

die Bestimmung der Bodenparameter wurden bei jeder Erhebung vier Bohrkern mit einer HUMAX-Schlagsonde entnommen und im Labor aufbereitet (beschrieben in Schwab & Gubler, 2016; Schwab et al, 2017). Aus diesen Proben konnten der volumetrische Wassergehalt, die Lagerungsdichte, die Bodentextur, der organische Kohlenstoff und der Humusgehalt bestimmt werden. Die verwendeten Labormethoden entsprechen den Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (Eidg. Forschungsanstalten, 2015).

2.2 Versuchsrahmenbedingungen

Die Vergleichsmessungen fanden auf drei Parzellen am Standort Reckenholz in Zürich Affoltern (siehe Abb. 2) und auf 9 NABO-Referenzstandorten (siehe Anhang 7.1) statt. Bei der Auswahl der Versuchsflächen wurde auf eine möglichst hohe Variabilität in Bezug auf die Bodentexturen geachtet. Während bei den NABO-Referenzstandorten jeweils eine Erhebung durchgeführt wurde, wurden bei den Standorten am Reckenholz insgesamt 5 Erhebungen gemacht. Jede Erhebung bestand aus 10-20 Sondierungen pro Verfahrensart beziehungsweise Sondierkonus. Die Messstelle wurde innerhalb einer vordefinierten und möglichst homogenen Versuchsfläche von 10 m x 10 m gemäss einem lateinischen Quadrat variiert (beschrieben in Schwab et al., 2017). Bei allen 12 Standorten handelt es sich um Ackerflächen oder Grasland.

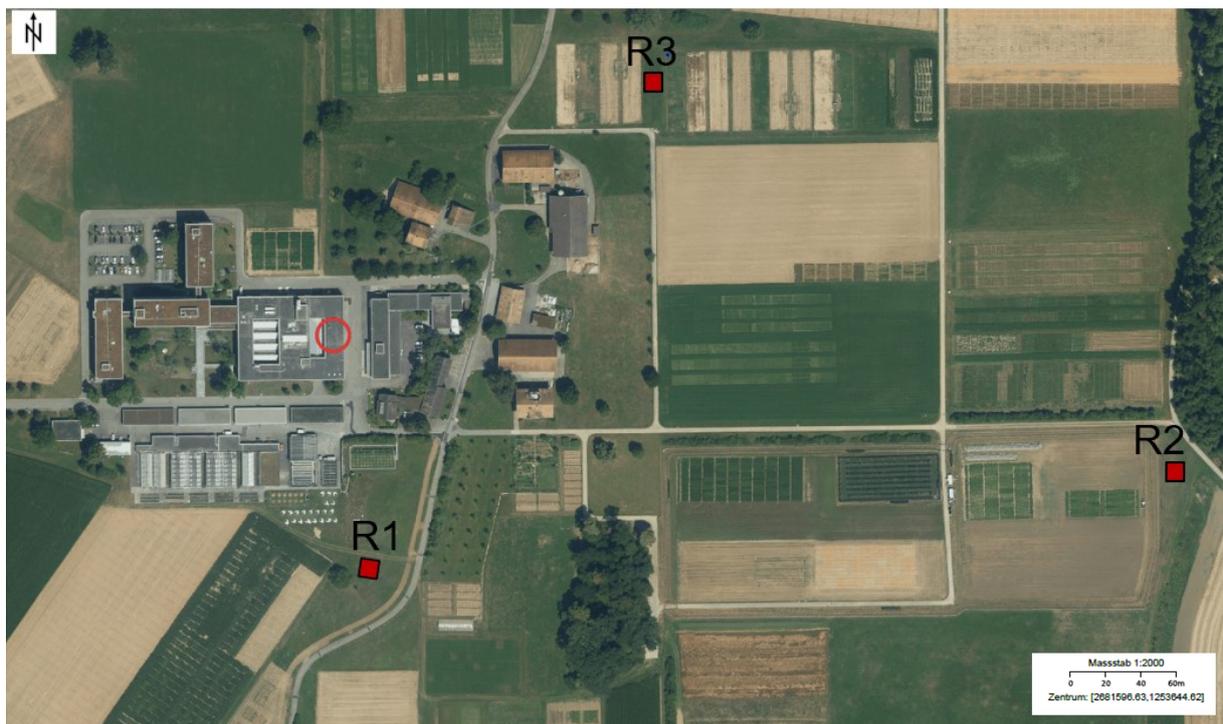


Abb. 2: Orthofoto des Standort Reckenholz in Affoltern mit den eingezeichneten Versuchsflächen (rote Quadrate) (GIS-ZH, 2019, ergänzte Darstellung).

Am Standort Reckenholz liegt in der Versuchsfläche R1 eine labil aggregierte Kalkbraunerde mit der Bodenart Lehmboden bis lehmiger Sand vor. Bei der Versuchsfläche R2 und R3 handelt es sich um schwach grundnasse Buntogleye, wobei bei R2 ein lehmiger Ton und bei R3 ein toniger Lehm bis lehmiger Schluff vorzufinden ist (Eidg. Forschungsanstalten, 1999). Bei den 9 NABO-Referenzstandorten reicht die Feinbodenart von einem reinen Ton bis zu

einem schluffig-lehmigen Sand. Auf weitere Bodeneigenschaften der Versuchsflächen wird in der vorliegenden Arbeit nicht näher eingegangen.

2.3 Statistische Auswertung

Für eine einheitliche Darstellung wurden die Rohdaten der einzelnen Sondierungen über 5 cm-Schichten gemittelt. Anschliessend wurden die Einzelmessungen pro Schicht und Erhebung aggregiert, wobei der Median und dessen 95 %-Vertrauensintervall berechnet wurde (Schwab et al., 2017). Mittels verschiedener Regressionen wurden einfache empirische Modelle abgeleitet. Die statistischen Auswertungen wurden mit Hilfe der Software GraphPad Prism 8 und dem Programm Microsoft Excel durchgeführt.

3 Ergebnisse

3.1 Vergleich zwischen den Gerätearten

Die zeitgleiche Messung mit zwei Geräte- bzw. drei Verfahrensarten ermöglicht einen Vergleich zwischen den Methoden. Der gemittelte Eindringwiderstand pro Verfahrensart der Versuchsfläche R2 ist in Abb. 3 dargestellt. Die Werte des Penetrologgers mit der 3 cm²-Sondenspitze liegen markant tiefer als jene der anderen beiden Spitzen (vgl. auch die Graphiken der Versuchsfläche R1 und R3 im Anhang 7.2). Der Penetrologger mit der 1 cm²-Spitze ist den Werten der Panda-Sonde ähnlicher. Die PANDA-Sonde zeigt jedoch im Allgemeinen deutlich höhere Eindringwiderstände und grössere Werteschwankungen über die Tiefe als der Penetrologger.

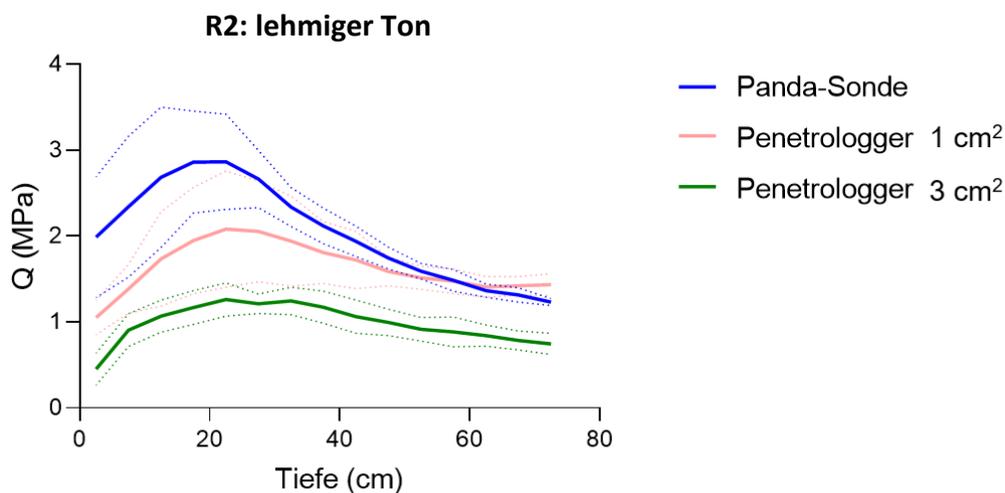


Abb. 3: Gemittelter Eindringwiderstand (Q) aus 5 Erhebungen gemessen mit 2 verschiedenen Penetrometertypen der Versuchsfläche R2 am Standort Reckenholz in Zürich Affoltern. Die gestrichelte Linie zeigt die Standardabweichung.

In Abb. 4 ist der lineare Zusammenhang zwischen den Messwerten der PANDA-Sonde und des Penetrologgers mit der 1 cm²-Spitze dargestellt. Das Verhältnis zwischen den beiden Messverfahren ist relativ konstant, die Variabilität wird jedoch mit zunehmendem

Eindringwiderstand ausgeprägter, da mit der PANDA-Sonde durchschnittlich höhere Eindringwiderstände gemessen werden.

Da der Penetrologger mit der 3 cm²-Spitze im Vergleich zu den anderen beiden Sondierkonen systematisch tiefere Werte zeigt, weichen diese Verhältnisse z.T. erheblich von der 1:1-Geraden ab (siehe Anhang 7.3).

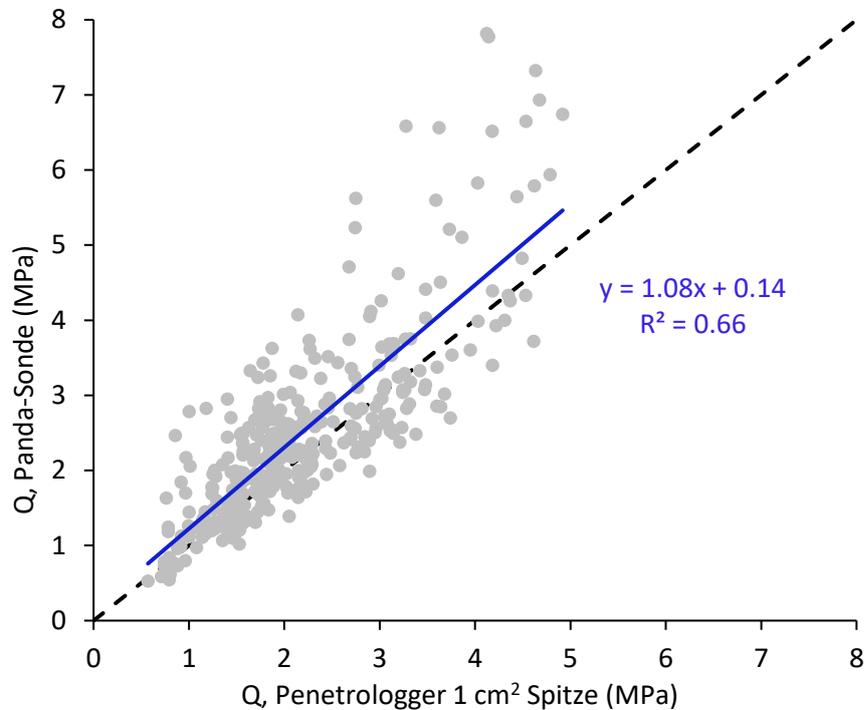


Abb. 4: Eindringwiderstand (Q) PANDA-Sonde gegenüber Penetrologger mit der 1 cm²-Spitze. Messwerte von allen 12 Standorten und Erhebungen.

3.2 Einfluss der gemessenen Begleitparameter

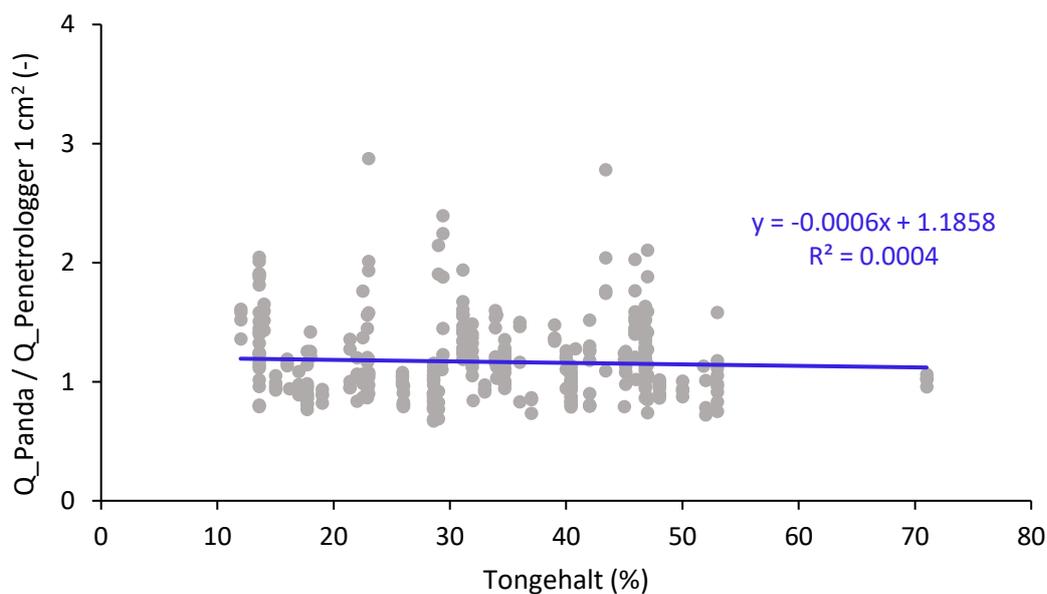


Abb. 5: Einfluss des Tongehaltes auf den Messunterschied zwischen der PANDA-Sonde und dem Penetrologger mit der 1 cm²-Sondenspitze. Messwerte von allen 12 Standorten und Erhebungen.

Bei der Abb. 5 und Abb. 6 wurden für die y-Achse die Messwerte der PANDA-Sonde durch die des Penetrologgers mit der 1 cm²-Sondenspitze dividiert. Dadurch kann untersucht werden, ob der Messunterschied zwischen den Gerätearten eine Funktion der Begleitparameter ist. Aus den beiden Abbildungen wird ersichtlich, dass der Tongehalt und der volumetrische Wassergehalt keinen Einfluss auf den berechneten Quotienten haben. Der Unterschied zwischen den Gerätearten kann somit nicht durch diese beiden Begleitparameter erklärt werden. Ein ähnliches Bild kann auch für die anderen untersuchten Bodenparameter, wie die Lagerungsdichte oder den Humusgehalt, beobachtet werden.

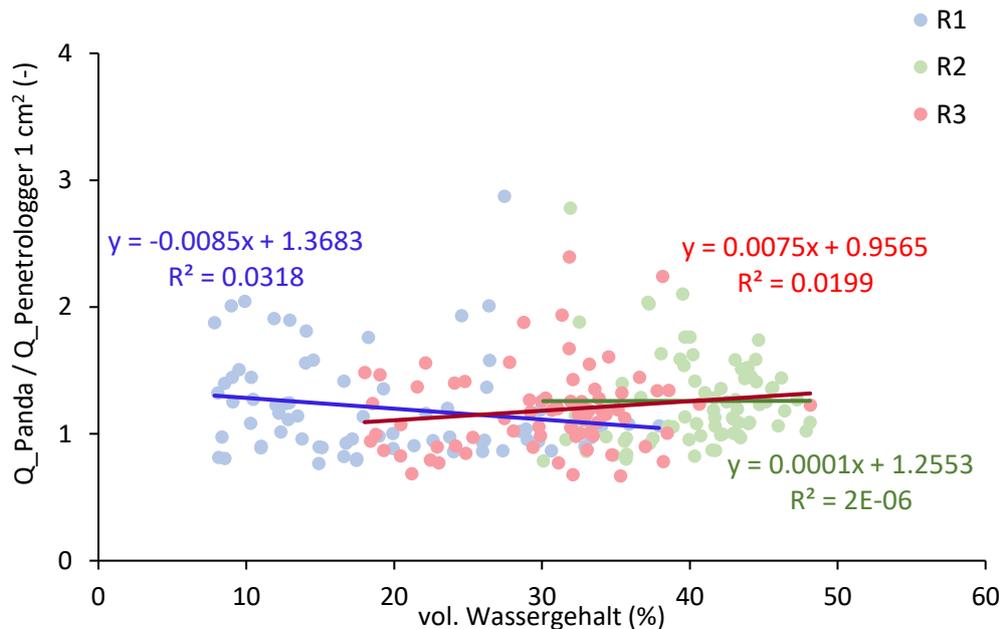


Abb. 6: Einfluss des volumetrischen Wassergehaltes auf den Messunterschied zwischen der PANDA-Sonde und dem Penetrologger mit der 1 cm²-Sondenspitze. Messwerte von den drei Versuchsflächen am Standort Reckenholz in Zürich Affoltern.

3.3 Herleitung einfacher empirischer Gleichungen für die Abschätzung des Eindringwiderstandes aus der Lagerungsdichte und dem Wassergehalt

Untersuchungen haben gezeigt, dass der Eindringwiderstand im Wesentlichen von der Lagerungsdichte und dem Bodenwassergehalt abhängig ist (Denker, 2011; Vaz et al., 2011). Aus diesem Grund wurden für die Abschätzung des Eindringwiderstandes einfache empirische Gleichungen an die Daten angepasst, welche diese beiden Variablen beinhalten. In Abb. 7 ist der modellierte Eindringwiderstand des Penetrologgers mit dem 1 cm²-Sondierkonus gegenüber dem gemessenen Eindringwiderstand abgebildet, wobei die Lagerungsdichte und der volumetrische Wassergehalt verwendet wurde. Es wird ersichtlich, dass die Lagerungsdichte einen höheren Koeffizienten als der Wassergehalt hat. Das gleiche Muster zeigt sich auch bei der Anpassung der Gleichung an die Daten der PANDA-Sonde (siehe Anhang 7.4). Die modellierten Messwerte zeigen im Allgemeinen eine ungenügende Übereinstimmung mit den gemessenen Eindringwiderständen. Tiefe Werte werden im Modell über- und hohe Werte unterschätzt. Wird die Gleichung für jeden Boden separat angepasst, erhöht sich das Bestimmtheitsmass und somit die Korrelation zwischen den Werten.

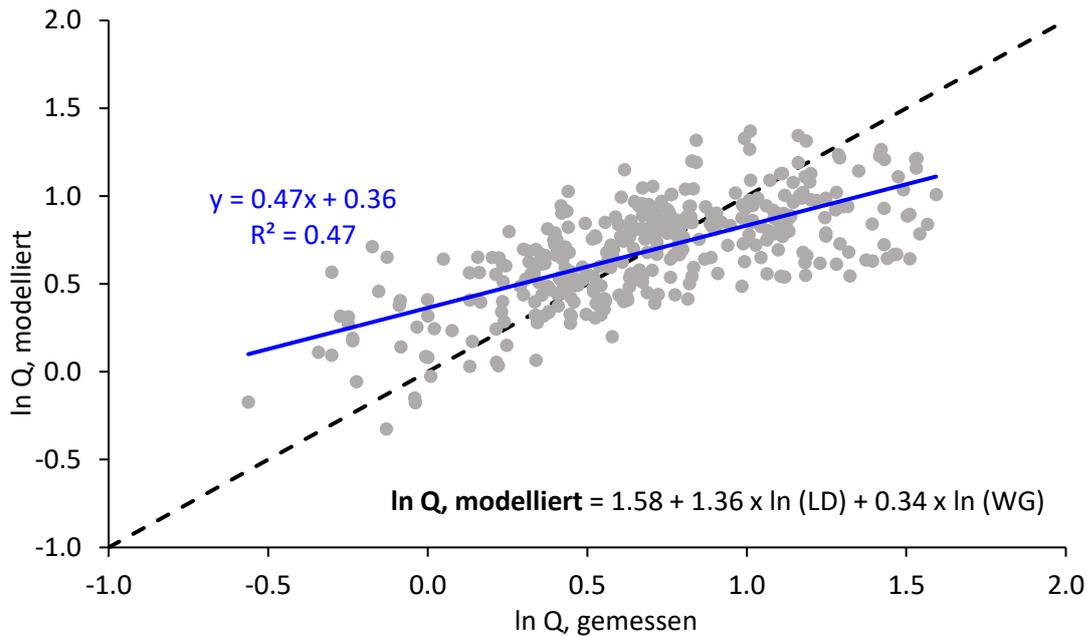


Abb. 7: Korrelation zwischen dem modellierten und dem gemessenen Eindringwiderstand (Q) des Penetrologgers mit der 1 cm²-Spitze. Messwerte von allen 12 Standorten und Erhebungen. LD=Lagerungsdichte, WG=Wassergehalt.

Die Verwendung der relativen Bodendichte und des relativen Wassergehaltes führte zu keiner Verbesserung der Korrelation zwischen den gemessenen und modellierten Werten. Für die Berechnung der relativen Bodendichte wurde die gemessene Lagerungsdichte durch die Proctordichte dividiert. Der relative Wassergehalt entspricht dem Sättigungsgrad des Bodens. Dieser ist abhängig vom volumetrischen Wassergehalt, der Lagerungsdichte und der reellen Dichte des untersuchten Bodens.

4 Diskussion

Im Folgenden werden die in Kapitel 3 präsentierten Ergebnisse interpretiert und miteinander verknüpft. Neben den Resultaten soll auch vertieft über die Geräteanwendung im Feld und die Penetromertypen diskutiert werden, da diese Aspekte ebenfalls ein Bestandteil der vorliegenden Untersuchung sind.

4.1 Diskussion der Ergebnisse

Durch die zeitgleiche Messung mit verschiedenen Penetromertypen und Sondierkonen konnten systematische Abweichungen zwischen den Verfahrensarten aufgezeigt werden. Während die PANDA-Sonde verdichtete Bereiche überproportional hoch anzeigt, ist der Messbereich des Penetrologgers mit der 3 cm²-Spitze stark eingeschränkt. Mit dem 3 cm²-Sondierkonus werden verdichtete Schichten ungenügend abgebildet, da lediglich Eindringwiderstände bis maximal 2 MPa gemessen werden konnten. Die Messwerte der PANDA-Sonde und des Penetrologgers mit dem 1 cm²-Sondierkonus zeigen einen relativ guten linearen Zusammenhang. Die absoluten Eindringwiderstände der beiden Gerätarten sind jedoch nicht miteinander vergleichbar, was auch die Untersuchung von Schwab et al. (2017) gezeigt hat. Die gemessenen Begleitparameter, wie der Ton- und Wassergehalt, liefern

keine Erklärung für die systematischen Abweichungen zwischen den Gerätearten. So scheinen die untersuchten Bodenparameter sowohl auf die PANDA-Sonde als auch auf den Penetrologger von Eijkelkamp einen ähnlich starken Einfluss zu haben. Messunterschiede können somit nicht genügend anhand von Felddaten erklärt werden. In einem nächsten Schritt wäre es deshalb sinnvoll, die Daten mit Computersimulationen zu ergänzen. Ruiz et al. (2016) konnte in seinen Simulationen zeigen, dass der gemessene Eindringwiderstand vom Durchmesser und der Geometrie der Konusspitze beeinflusst wird. Dies würde auch die systematischen Messabweichungen zwischen den drei Verfahrensarten erklären. Der Kraftaufwand beziehungsweise Widerstand ist für eine Spitze mit einem kleineren Konuswinkel und Durchmesser geringer (Colombi, 2017; Ruiz et al., 2016; Schwab et al., 2017).

Durch die Herleitung einfacher empirischer Gleichungen wurde versucht, Eindringwiderstände anhand der Lagerungsdichte und dem Wassergehalt herzuleiten. In der vorliegenden Untersuchung ist die Variabilität des Wassergehaltes besser abgebildet als die der Lagerungsdichte, da die Böden zwischen den einzelnen Erhebungen keinen mechanischen Belastungen ausgesetzt wurden. Die Lagerungsdichte blieb somit über den gesamten Erhebungszeitraum mehr oder weniger konstant. Im Vergleich mit anderen Studien, zum Beispiel mit derjenigen von Dexter et al. (2007), ist der Korrelationskoeffizient zwischen den modellierten und gemessenen Werten in einem ähnlichen Bereich. Wenn die Gleichung für jeden einzelnen Boden angepasst wird, erhöht sich der Zusammenhang zwischen den modellierten und gemessenen Werten. Dies zeigte sich auch in der Studie von Vaz et al. (2011).

Obwohl die Lagerungsdichte und der Wassergehalt laut der Literatur die wichtigsten Rechengrößen für den Eindringwiderstand sind, könnten zur Verbesserung der Modelle noch weitere Variablen in die Gleichungen integriert werden. So zeigte die Studie von Vaz et al. (2011), dass die Bodentextur den gemessenen Eindringwiderstand signifikant beeinflusst. Mit dem Verwenden des Sättigungsgrades für die Modellierungen, für dessen Berechnung der Tongehalt berücksichtigt wurde, konnte die Korrelation zwischen dem gemessenen und modellierten Eindringwiderstand jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht verbessert werden. Zusätzlich zur Bodentextur müsste möglicherweise auch ein sogenannter Geometriefaktor für die jeweilig verwendete Sondierspitze in die Gleichungen miteinfließen (Colombi, 2017). Dafür müsste jedoch, wie bereits im oberen Abschnitt erwähnt, die Spitzen-Boden-Interaktion besser verstanden beziehungsweise für die varrierende Spitzen simuliert werden.

4.2 Diskussion der Geräteanwendung und Penetrometertypen

Sowohl mit der PANDA-Sonde als auch mit dem Penetrologger konnte auf eine einfache Weise der Eindringwiderstand im Boden erfasst werden. Die Sondierungen im Feld erforderten generell nur einen geringen zeitlichen Aufwand. Mit dem Penetrologger dauerte eine Erhebung (10 einzelne Sondierungen) durchschnittlich rund 20 Minuten, mit der PANDA-Sonde doppelt so lange. Der Zeitaufwand für die Erhebung mit dem Penetrologger war jedoch stark abhängig von der vorherrschenden Bodenfeuchte und -dichte. Je trockener und kompakter die Böden waren, umso erschwerter waren die Feldmessungen. Bei trockenen Bedingungen mussten aus diesem Grund, insbesondere mit der 3 cm²-Spitze, die Erhebungen teilweise abgebrochen oder die Anzahl Sondierungen stark reduziert werden. Zudem war es den Messpersonen nicht immer möglich, die Eindringgeschwindigkeit des Penetrologgers konstant zu halten,

insbesondere beim Durchdringen von kompakteren Schichten. Damit der Eindringwiderstand vom Datenlogger korrekt berechnet werden kann, ist jedoch eine konstante Eindringgeschwindigkeit zwingend notwendig (Schwab et al., 2017). Dies könnte erklären, weshalb potenziell verdichtete Bereiche mit dem Penetrologger weniger deutlich abgebildet werden und der Wertebereich im Allgemeinen deutlich tiefer liegt. Anhand von Untersuchungen an künstlichen Böden oder bodenähnlichem Material mit bekannten, konstanten Dichten und Wassergehalten könnte diese Erkenntnis noch genauer evaluiert werden.

Die in dieser Studie verwendeten Penetrometertypen unterscheiden sich unter anderem in ihrem Eindringmechanismus. Je nach Mechanismus wurde der Eindringwiderstand unterschiedlich berechnet. Bei der PANDA-Sonde wurde für die Berechnung des Widerstandes die «Holländische Rammformel» (siehe Schwab et al., 2017) verwendet. Bei der Anwendung dieser Formel wird angenommen, dass die gesamte eingebrachte Energie auf den Sondierkonus übertragen wird, die Reibung zwischen der Sondierstange und dem Boden minimal ist und der Boden ideal-plastische Eigenschaften hat (Schwab et al., 2017). Sun et al. (2011) konnte jedoch in ihrer Studie aufzeigen, dass aufgrund von Vibrationen, Reibungen und Schallwellen rund 15% der eingebrachten Energie verloren geht und dadurch nicht auf die Spitze übertragen wird. Eine Überprüfung und allenfalls Anpassung der verwendeten Formeln zur Berechnung des Eindringwiderstandes wäre somit sinnvoll und für zukünftige Arbeiten empfehlenswert.

5 Empfehlungen und Ausblick

Basierend auf den Resultaten der vorliegenden Arbeit können folgende Empfehlungen für die Geräteanwendung in der Praxis abgegeben werden. Bei Messungen mit dem Penetrologger von Eijkelkamp sollte lediglich die 1 cm²-Spitze verwendet werden. Grössere Sondierkonen zeigen verdichtete Bereiche weniger sensitiv an und können unter erschwerten Bodenbedingungen (wie Trockenheit und Steine) nicht mehr eingesetzt werden. Zudem ist deren Messwertebereich stark eingeschränkt. Die PANDA-Sonde wiederum ist bei variierenden Bodenbedingungen einsetzbar und zeigt potenziell verdichtete Bereiche besser an als der Penetrologger. Jedoch wird für eine Sondierung, im Vergleich zum Penetrologger, rund doppelt so viel Zeit benötigt.

Anhand der durchgeführten Felduntersuchungen konnten die systematischen Messabweichungen zwischen den Gerätearten nur unzureichend erklärt werden. Aus diesem Grund müssen bei weiterführenden Studien neue Methodenansätze berücksichtigt werden. So können Felddaten zum Beispiel mit Computersimulationen ergänzt werden. Durch solche Simulationen kann die Spitze-Boden-Interaktion und die dabei wirkenden Kräfte und Widerstände besser nachvollzogen werden. Die Erkenntnisse könnten zu einer Verbesserung der Modellierungen beitragen, da die Geometrie der Spitze ein wichtiger Einflussfaktor zu sein scheint. Ein weiterer Ansatz ist die Messung auf künstlichen Böden oder bodenähnlichen Materialien, bei denen die Dichten und der Wassergehalt der einzelnen Schichten bekannt und konstant sind. Auch dieser Ansatz könnte Erklärungen für die Messabweichungen zwischen den Verfahrensarten liefern. Zudem sollten auch die physikalischen Formeln, welche für die Berechnung des Eindringwiderstandes verwendet wurden, überprüft und allenfalls angepasst werden. So scheinen die Annahmen, welche bei der Anwendung der Holländischen

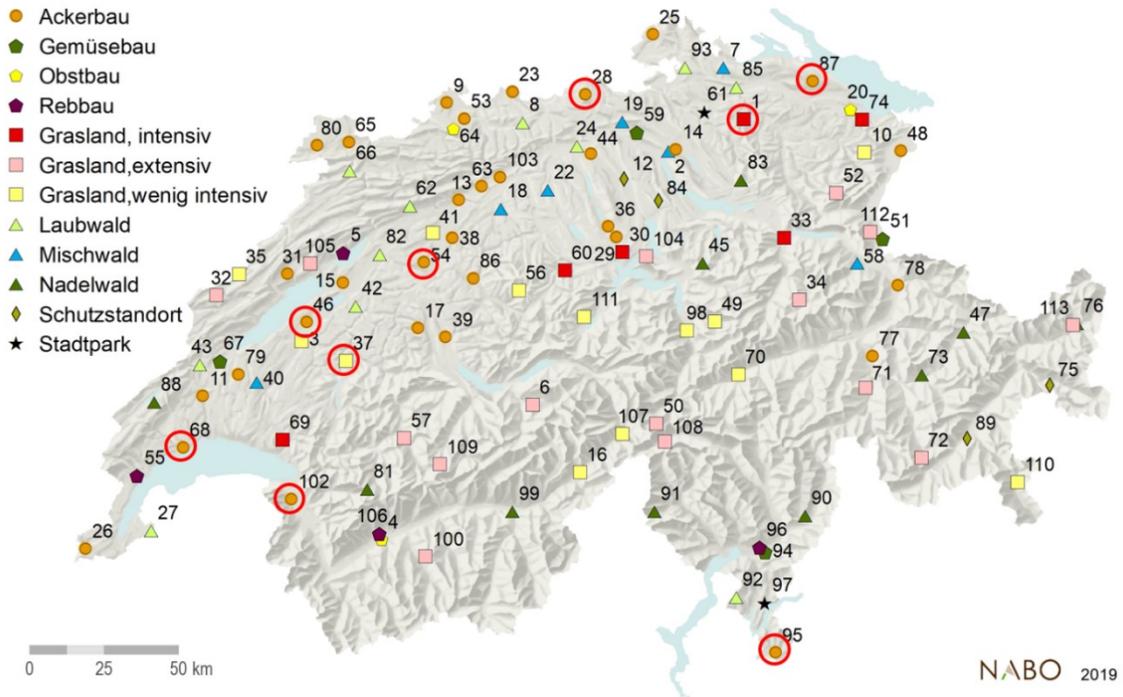
Rammformel zur Anwendung kommen, nicht den neusten Forschungserkenntnissen gerecht zu werden.

6 Literatur

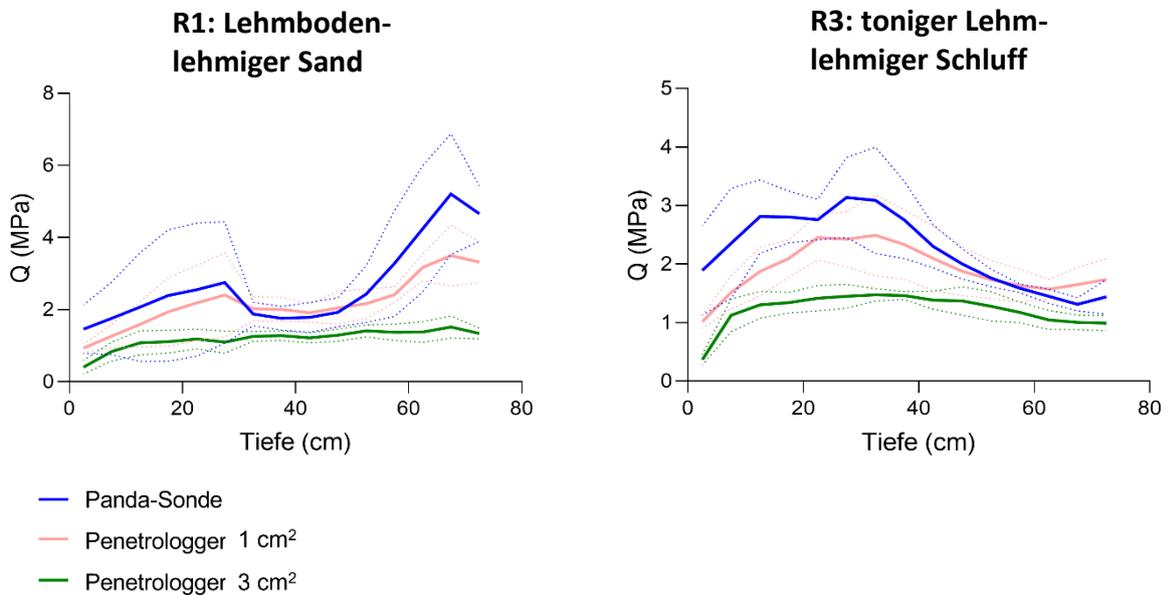
- Colombi, T. (2017). Strategies for yield recovery after soil compaction assessed by multi-level phenotyping. Dissertation. ETH Zürich.
- Denker, S. (2011). Landtechnische Methoden zur Erfassung von Bodenverdichtungen. Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen.
- Dexter, A. R., Czyz, E. A., & Gate, E. A. (2007). A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil and Tillage Research*(93), S. 412-419.
- Eidg. Forschungsanstalten (1999). Bodenkarte "Versuchsland" M1:2500 FAL, Reckenholz-Zürich.
- Eidg. Forschungsanstalten (2015). Schweizerische Referenzmethoden der Eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten. Band 2: Bodenuntersuchung zur Standort-Charakterisierung. Agroscope, Version 2015.
- Herrick, J. E., & Jones, T. L. (2002). A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. *Soil Science Society of America Journal*, S. 1320-1324.
- Kirkham, M. B. (2014). Principles of soil and plant water relations. Academic Press.
- Krebs, R., Egli, M., Schulin, R., & Tobias, S. (2017). Bodenschutz in der Praxis. Haupt Verlag.
- Ruiz, S., Straub, I., Schymanski, S., & Or, D. (2016). Experimental evaluation of earthworm and plant root soil penetration-cavity expansion models using cone penetrometer analogs. *Vadose Zone Journal*(15).
- Schmidt, H., Bruns, C., & Wilbois, K. (2015). Eindringwiderstand ökologisch bewirtschafteter Ackerböden - Einfluss von Standort und Bewirtschaftung sowie Auswirkungen auf den Ertrag von Wintergetreide. 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau.
- Schwab, P., & Gubler, A. (2016). Methoden zur Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben. *Agroscope Science*(40).
- Schwab, P., Dietrich, M., & Gubler, A. (2017). Messung des Eindringwiderstands und des Bodenwasserzustandes. Methodenvergleich verschiedener Geräte und Verfahren. Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Agroscope, Zürich Reckenholz.
- Sun, Y., Q., C., Lin, J., Schulze Lammers, P., Berg, A., Meng, F., Zeng, Q & Li, L. (2011). Energy-based comparison between dynamic cone penetrometer and a motor-operated static cone penetrometer. *Soil & Tillage Research*, S. 105-109.
- Vaz, C. M., Manieri, J. M., de Maria, I. C., & Tuller, M. (2011). Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma*(166), S. 92-101.
- Whitmore, A. P., Whalley, W. R., Bird, N. R., Watts, C. W., & Gregory, A. S. (2011). Estimating soil strength in the rooting zone of wheat. *Plant Soil*(339), S. 363-375.

7 Anhang

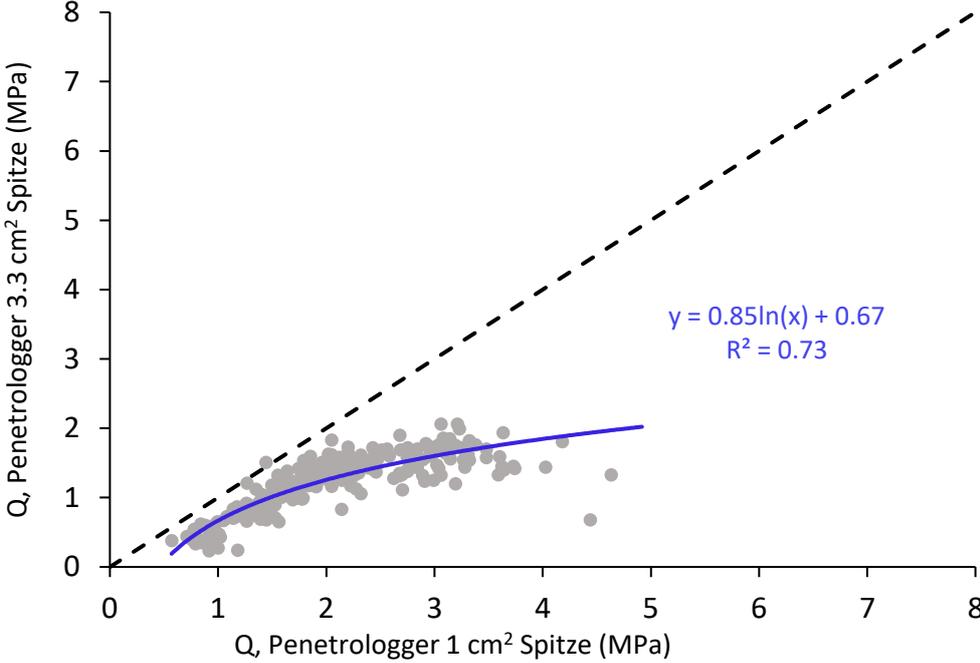
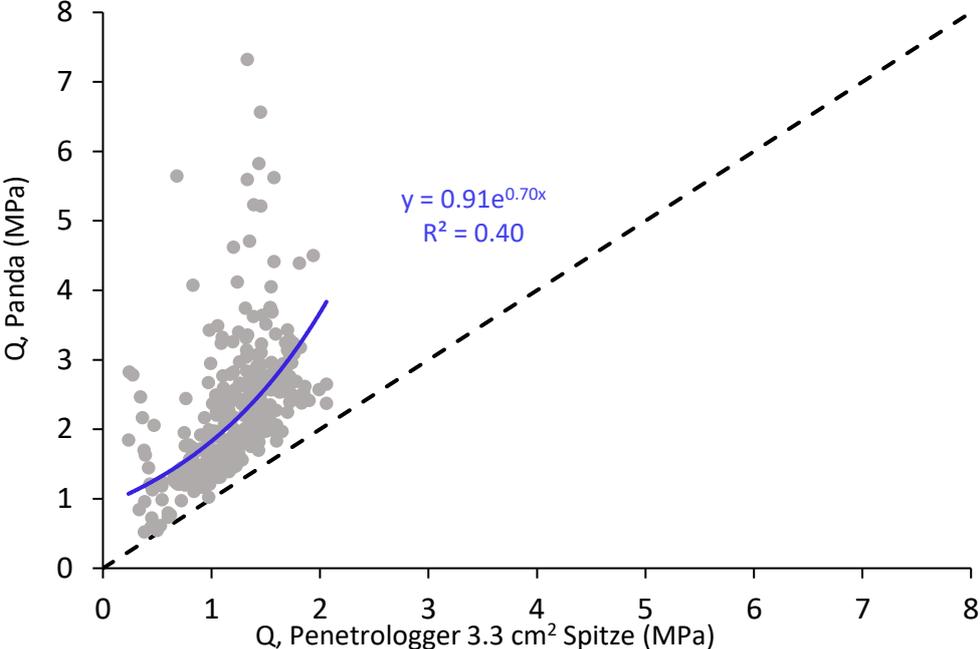
7.1 Lage der untersuchten NABO-Referenzstandorte (rot)



7.2 Eindringwiderstand (Q) pro Standort und Verfahrensart



7.3 Korrelationen mit Penetrologger 3 cm²-Sondierkonus



7.4 Abschätzung Eindringwiderstand Panda-Sonde aus der Lagerungsdichte und dem Wassergehalt

