



Physikalische Bodeneigenschaften: Recherche zum Stand der Technik zu Bestimmungsmethoden und zu Geräten

KOBO-Bericht Nr. 1

Lena Weiss, Selina Lutz
Thomas Keller, Peter Weisskopf

Agroscope, Zürich
Agrarökologie und Umwelt (AOU)
Forschungsgruppe Bodenqualität und Bodennutzung

Schlussversion Januar 2021

Impressum

Autoren: Lena Weiss, Selina Lutz, Dr. Thomas Keller und Dr. Peter Weisskopf, Agroscope, Forschungsgruppe Bodenqualität und Bodennutzung

Erscheinungsjahr: 2021

Herausgeberin: Kompetenzzentrum Boden (KOBO), ccsols.ch.

Das KOBO arbeitet im Auftrag der drei Bundesämter BAFU (Bundesamt für Umwelt), BLW (Bundesamt für Landwirtschaft) und ARE (Bundesamt für Raumentwicklung) und ist an der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL) der Berner Fachhochschule (BFH) in Zollikofen angesiedelt.

Projektleitung: Sandra Racine und Dr. Armin Keller, KOBO

Externer Gutachter: Dr. Markus Berli, Associate Research Professor am Desert Research Institute in Las Vegas

Layout: Magma Branding, Sandrainstrasse 3, 3007 Bern, magma-branding.ch

Empfohlene Zitierweise: Weiss L., S. Lutz, T. Keller und P. Weisskopf (2021): Physikalische Bodeneigenschaften – Recherche zum Stand der Technik zu Bestimmungsmethoden und zu Geräten. Agroscope, Forschungsgruppe Bodenqualität und Bodennutzung. KOBO-Bericht Nr. 1, BFH-HAFL, CH-3052 Zollikofen-Bern, verfügbar unter www.ccsols.ch

Hinweis: Dieser Bericht wurde im Auftrag des KOBO verfasst. Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Copyright: Gemäss untenstehendem Creative Commons-Lizenzsymbol ist die nicht-kommerzielle Vervielfältigung erwünscht, jedoch mit Quellenangabe und einem Belegexemplar an den Herausgeber. Die Weitergabe erfolgt nur unter gleichen Lizenzbedingungen.



Inhalt

1. Einführung und Ausgangslage	5
2. Methodik der Recherche	7
2.1. Aufbau der Excel Tabelle	7
3. Ergebnisse	9
3.1. Lagerungsdichte	9
3.1.1. Degree of compactness	4
3.2. Reelle Dichte	14
3.3. Skelettgehalt	16
3.4. Porosität der Bodenstruktur: Gesamtporenvolumen und Porengrößenverteilung	17
3.5. Luftleitfähigkeit	23
3.6. Gesättigte Wasserleitfähigkeit	24
3.7. Wasserinfiltrationsrate	27
3.8. Saugspannung	31
3.9. Wassergehalt	34
3.10. Nutzbare Feldkapazität	37
3.11. Wasserstand	37
3.12. Redoxpotential	38
3.13. Eindringwiderstand	39
3.14. Schrumpfverhalten des Bodens	40
3.15. Aggregatsstabilität	42
3.16. Visuelle Strukturbeurteilung	44
4. Diskussion und Konklusion	47
4.1. Lagerungsdichte	47
4.1.1. Degree of compactness	49
4.2. Reelle Dichte	49
4.3. Skelettgehalt	50
4.4. Porosität der Bodenstruktur: Gesamtporenvolumen und Porengrößenverteilung	51
4.5. Luftleitfähigkeit	53
4.6. Gesättigte Wasserleitfähigkeit	54
4.7. Wasserinfiltrationsrate	56
4.8. Saugspannung	57
4.9. Wassergehalt	58
4.10. Nutzbare Feldkapazität	59
4.11. Wasserstand	59
4.12. Redoxpotential	60
4.13. Eindringwiderstand	61
4.14. Schrumpfverhalten des Bodens	62
4.15. Aggregatsstabilität	63
4.16. Visuelle Strukturbeurteilung	64
4.17. Übersicht der empfohlenen Messmethoden	65
4.18. Schlussbemerkungen	66
7. Literaturverzeichnis	72
8. Anhang	82
8.1. Tabelle Evaluation Bestimmungsmethoden	82
8.2. Beispiel für Laborabfolge an ungestörter Zylinderprobe	86

Vorwort



Für eine nachhaltige Nutzung der Böden in der Schweiz ist es zwingend notwendig anhand von Bodenkartierungen die Bodeneigenschaften und die Qualität der Böden in ihrer Tiefe zu erheben. In diesem Kontext gilt es auszuloten, welche Optionen es für die Umsetzung einer Bodenkartierung nach neuem Stand der Technik zukünftig geben kann, und welcher Bedarf an Bodeninformationen mit welchen Kosten für die Erhebung verbunden sind. Effiziente und kostengünstige Bestimmungsmethoden von chemischen, physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften stellen daher einen zentralen Aspekt für einen wirksamen Bodenschutz dar.

Das primäre Ziel von Bodenkartierungen war bis anhin die Eignung der Böden für die landwirtschaftliche Produktion bewerten zu können. Zukünftig sollte auch vermehrt den stets zunehmenden Ansprüchen weiterer Nutzer von Bodeninformationen Rechnung getragen werden. Hierzu zählen unter anderem die Raumplanung, der Klima-, Hochwasser- und Bodenschutz, der Naturschutz, die Forstwirtschaft sowie die Biodiversität. Dies stellt neue Ansprüche an die zu erhebenden Bodeneigenschaften in einer Bodenkartierung.

Doch dem Bedarf an umfangreichen Bodeninformationen stehen in der Regel relativ hohe Kosten für die Feldarbeit und für die Analysen von Bodeneigenschaften gegenüber. Die Entwicklung von kostengünstigen Messmethoden für Feld und Labor ist daher für eine moderne Bodenkartierung essenziell. In diesem Sinne bildet die vorliegende Recherche zum Stand der Technik von bodenphysikalischen Bestimmungsmethoden, welche von der Agroscope Forschungsgruppe Bodenqualität und Bodennutzung durchgeführt wurde, eine wichtige Grundlage. Der Bericht richtet sich primär an kantonale Fachämter und Labore, soll aber auch den Hochschulen, Forschungsinstitutionen und Ingenieurbüros für ihre Arbeit dienen.

Ich danke den Autoren für diese gelungene Arbeit und hoffe sie unterstützt viele Akteure bei der Weiterentwicklung der Gewinnung von Bodeninformationen.

Dr. Armin Keller
Leiter KOBO

1. Einführung und Ausgangslage

Das Kompetenzzentrum Boden (KOBO) ist der Berner Fachhochschule (HAFL) angegliedert und hat als zentrales Anliegen, die Erhebungs- und Analysemethoden von Bodeneigenschaften zu vereinheitlichen. Dies ist notwendig, um eine national einheitliche, flächendeckende Bodenkartierung durchführen zu können und dabei Eigenschaften und Qualität der Böden zu erheben.

In diesem Kontext gilt es festzustellen, welche Bestimmungsmethoden es zur Umsetzung einer flächendeckenden Bodenkartierung gibt und mit welchen Kosten und Aufwänden die bodenkundlichen Erhebungen verbunden sind. Dabei werden sämtliche Schritte von der Probenahme, der Aufbereitung, einem allfälligen Aufschluss bis hin zur eigentlichen Messung untersucht. Die dafür zu bestimmenden Bodeneigenschaften sind in chemische, biologische und physikalische Parameter unterteilt. Die Liste der zu untersuchenden Bodeneigenschaften wurde vorgängig anhand einer Bedarfsanalyse vom KOBO herausgearbeitet. Die Forschungsgruppe «Bodenqualität und Bodennutzung» von Agroscope hat dabei den Auftrag erhalten, für sämtliche bodenphysikalischen Parameter auf der Liste (Tabelle 1) mögliche bzw. geeignete Methoden und technische Lösungen zu recherchieren. Dafür wurde eine Excel-Methodentabelle erstellt, um den Überblick über die verfügbaren Methoden sowie den Stand der Technik zu erleichtern. Des Weiteren wurde auch ein Verfahren erarbeitet, um Aufwand und Kosten der Bestimmungsmethoden abzuschätzen, damit der sinnvolle Einsatz dieser bodenphysikalischen Methoden für die grossflächige Bodenkartierung zweckmässig geplant werden kann.

Bei der Bestimmung von physikalischen Eigenschaften kann nicht nur die Messmethode das Resultat beeinflussen, sondern auch die Probenahme und Probenaufbereitung spielen eine entscheidende Rolle. Physikalische Bodeneigenschaften sind oft dynamische Grössen, d.h. sie verändern sich innerhalb eines Jahres markant. Deshalb muss auch der Zeitpunkt der Probenahme bzw. der Feldmessung umsichtig gewählt werden.

Dem Bedarf an umfangreichen Bodeninformationen stehen in der Regel beträchtliche Kosten für die Analyse von Bodeneigenschaften im Labor gegenüber. Pedotransferfunktionen, welche Bodeneigenschaften mit empirischen Funktionen und Modellen mit einfach verfügbaren Bodeninformationen (z. B. der Textur) schätzen, stellen dabei eine kostengünstige Alternative dar. Häufig sind diese aber noch in der Entwicklungsphase, oder ihre Validität ist für Schweizer Verhältnisse nicht belegt. Der Fokus dieser Arbeit liegt deshalb auf den direkten Messmethoden der physikalischen Bodeneigenschaften.

Bodenphysikalische Eigenschaften

1. Prioritäre Eigenschaften

(im Sinne einer grossen Anzahl Messungen an Profilen und Sondierungen oder für Referenzprofile)

- Lagerungsdichte
- Gesamtporenvolumen und Porengrössenverteilung

Referenzprofile

- Saugspannung (Wasserretention), nutzbare Feldkapazität, Wassergehalt und Wasserstand (inkl. Vergleich von Bodenfeuchtesonden)
- Wasserleitfähigkeit (gesättigt)
- Wasserinfiltrationsrate (gemessen an Bodenoberfläche und/oder gemessen im Bohrloch)
- Skelettgehalt

2. Optionale Eigenschaften (zu diskutieren)

- Luftleitfähigkeit
- Redoxpotential
- Gefügebeurteilung
- Perkolationsstabilität
- Eindringwiderstand (Penetrometergeräte)
- Entwässerungsverhalten des Bodens, z.B. mit Schrumpfungskurven
- Degree of compactness D
- Weitere?

Tabelle 1: Liste der zu untersuchenden Bodeneigenschaften gemäss Pflichtenheft vom 19.12.2019 des KOBOS. Im Laufe dieses Auftrages wurden die Fragestellungen etwas angepasst, so wurden z.B. die Parameter reelle Dichte und Aggregatsstabilität in die Recherche aufgenommen.

2. Methodik der Recherche

In einem ersten Schritt wurden aus verschiedenen Quellen unterschiedliche Bestimmungsmethoden zu den verschiedenen bodenphysikalischen Parametern herausgesucht. Alle Methoden wurden in einer Excel-Tabelle (im Anhang, Kapitel 8) aufgelistet und in Kapitel 3 beschrieben. Insgesamt wurden 77 Methoden ausgesucht, eingetragen und beschrieben. Für jeden auf der KOBO-Liste vorgegebenen Parameter wird mindestens eine Methode aufgeführt. Dafür wurden folgende Quellen und Hilfsmittel verwendet:

- Peer reviewed papers (Web of Science, Google Scholar)
- Vorträge, Poster und Zusammenfassungen von wissenschaftlichen Konferenzen
- Methodensammlungen von Institutionen (VDLUFA, Agroscope Referenz- und Forschungsmethoden)
- Methoden- und Lehrbücher («Waldböden der Schweiz», «Bodenkunde und Standortlehre», «The nature and properties of soils», «Bodenkundliches Praktikum»)
- Verschiedene Formen grauer Literatur (div. Internetressourcen, interne Methodenbeschreibungen von Agroscope)
- Normendatenbanken

Im zweiten Schritt wurden für Geräte und Apparaturen bei verschiedenen Herstellern und Firmen Offerten eingeholt, um die Gerätekosten der jeweiligen Methoden abschätzen und vergleichen zu können. In der Tabelle wird jeweils ein Richtpreis aufgelistet, welcher für die jeweiligen Geräte zu erwarten ist. Oft gibt es preisliche Unterschiede bezüglich Grösse bzw. Fassungsvermögen der Geräte. Die Firmen sind nicht immer in der Schweiz vertreten, deshalb muss möglicherweise mit weiteren Kosten für Transport, Einfuhr und Verzollung gerechnet werden.

Im dritten Schritt wurden die für die Bestimmung eines bodenphysikalischen Parameters gefundenen Methoden miteinander verglichen und ihre Vor- bzw. Nachteile herausgearbeitet (Kapitel 4). Dazu wurde, falls möglich, pro Bodeneigenschaft eine Empfehlung abgegeben, welche Methode für den Einsatz im Rahmen einer nationalen Bodenkartierung am besten geeignet sein könnte. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde für einige Parameter eine Graphik erstellt, die die Methodenbewertungen nach verschiedenen Kriterien aufzeigt. Die Bewertungskriterien stammen dabei aus der Excel-Tabelle, welche im nächsten Unterkapitel genauer erläutert ist.

2.1. Aufbau der Excel Tabelle

Die Excel-Tabelle beinhaltet die «Rohdaten» dieser Arbeit. Hier sind alle evaluierten Methoden aufgelistet. Die Methodenbeschreibungen sind im Kapitel 3 zu finden, im Kapitel 4 werden die Methoden diskutiert sowie deren Vor- und Nachteile abgewogen. Die empfohlenen Methoden sind in der Excel-Tabelle fett markiert. Der Aufbau der Tabelle wird im Folgenden genauer erläutert:

Parameter: Gibt an, um welchen Parameter es sich handelt. Die Reihenfolge in der Excel-Tabelle entspricht jener in diesem Bericht.

Methode: Hier wird der Name der Methode aufgeführt. Wurde bereits in der Literatur ein spezifischer Name verwendet, wird dieser übernommen. Ansonsten wurde ein möglichst aussagekräftiger, eindeutiger Name für die Methode definiert. Der verwendete Name in diesem Bericht ist identisch mit jenem in der Excel-Tabelle. Dieser ist bei der ersten Nennung im Methodenbeschrieb jeweils unterstrichen. Wenn möglich wurde in der Tabelle auch die Referenz- bzw. Kennnummer angegeben. Zusätzlich wird angezeigt, ob es sich bei der erwähnten Methode um eine Feld- oder Labormethode handelt.

Messgerät: Angabe des in der Methode verwendeten (Haupt-)Messgerätes. Wann immer möglich werden ein Hersteller und ein Richtpreis genannt, welcher durch eine Offertanfrage eingeholt wurde. Falls es zum Gerät eine Angabe zur Messgenauigkeit gab, wird diese hier ebenfalls aufgeführt.

Infrastruktur: Da bei der Anwendung der Methoden neben dem eigentlichen Messgerät meist auch noch weitere Geräte und Apparaturen benutzt werden (z.B. für die Probenaufbereitung), wird in der Tabelle zwischen «Messgerät» und «Infrastruktur» unterschieden. Im Abschnitt «Infrastruktur» werden weitere für die Durchführung der Methode notwendige Geräte aufgeführt, die oft auch zur Grundausstattung eines Labors gehören. Auch hier wurde zum Teil ein Richtpreis bei Herstellern angefragt.

Software / Datenformat: Falls für das Hauptmessgerät benötigt, wird hier die entsprechende Software respektive das verwendete Datenformat aufgeführt. Bei vielen Geräten gibt es jedoch keine spezifische Software und die Resultate müssen abgelesen, bzw. von Hand notiert werden.

Probennahme: Je nach Methode und physikalischer Bodeneigenschaft werden andere Arten von Bodenproben benötigt. Dies ist hier aufgeführt. Hauptsächlich wird zwischen gestörten und ungestörten Proben unterschieden. Auch wird die Anzahl Proben pro Horizont notiert, die im Allgemeinen als minimal erforderlich betrachtet wird, um einen robusten Mittelwert des gemessenen Parameters zu erhalten.

Probenaufbereitung: Falls die Probe vor der Messung aufbereitet (Trocknen / Sieben) werden muss, wird dies hier erläutert. Falls weitere Probeaufbereitungsschritte notwendig sind (z.B. Sättigung der Probe), wird dies ebenfalls aufgeführt.

Aufwand: Beim Aufwand wird zwischen «effektivem Arbeitsaufwand» und «Wartezeit» unterschieden. «Wartezeit» entsteht, wenn zum Beispiel eine Probe gesättigt werden muss. Während dieser Zeit erfordert die Bestimmung nur gelegentlichen Kontrollaufwand, aber keinen permanenten Arbeitseinsatz. Für die Übersichtsgraphiken im Teil «Diskussion» wurde der Aufwand jeweils als Relativvergleich zwischen den Methoden bewertet.

Zusätzliche Parameter:

Können mit einer Methode gleichzeitig noch weitere physikalische Bodeneigenschaften gemessen werden, sind diese hier aufgelistet. Oft können an derselben Bodenprobe verschiedene Parameter ermittelt werden. Ein Vorschlag für eine mögliche Abfolge von Messungen unterschiedlicher bodenphysikalischer Parameter mit unterschiedlichen Labormethoden an einer einzigen Bodenprobe ist in Anhang 8.2 zu finden.

3. Ergebnisse

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird auf jeden Bodenparameter einzeln eingegangen. Zuerst wird der Parameter jeweils erklärt, danach folgt die Beschreibung der Messmethoden. Die Methodenvergleiche sowie die Methodenempfehlungen finden sich im Kapitel 4. Die Methodentabelle mit allen beschriebenen Methoden enthält der Anhang (Kapitel 8).

3.1. Lagerungsdichte

Begriffserklärung

Die Lagerungsdichte beschreibt die Dichte eines Bodens in natürlicher Lagerung und wird definiert als das Verhältnis der trockenen Bodenmasse zum Bodenvolumen (Weil & Brady, 2017; Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996; Blume, Stahr & Leinweber, 2011). Das Bodenvolumen schliesst die festen Bodenbestandteile sowie die Poren mit ein (Weil & Brady, 2017). Üblicherweise wird die Lagerungsdichte direkt an Bodenproben gemessen und als Quotient aus dem Trockengewicht einer Bodenprobe und deren Volumen gebildet (Lagerungsdichte (g/cm^3) = Trockengewicht (g) / Volumen (cm^3)). Je nach Körnung, Humusgehalt und Strukturzustand erreichen mineralische Böden typischerweise Lagerungsdichten von $0.9 \text{ g}/\text{cm}^3$ bis $1.9 \text{ g}/\text{cm}^3$, organische Böden haben Werte von $0.1 \text{ g}/\text{cm}^3$ bis $0.9 \text{ g}/\text{cm}^3$ (Weil & Brady, 2017). Weitere Begriffe für die Lagerungsdichte sind Trockenrohichte, Raumgewicht oder scheinbare Dichte. Im Englischen wird für die Lagerungsdichte der Begriff «bulk density» verwendet.

Neben der Lagerungsdichte wird im deutschsprachigen Raum auch die effektive Lagerungsdichte (Gleichung 1) sowie die Lagerungsdichte der Feinerde (Gleichung 2) verwendet. Die Umrechnung der Lagerungsdichte auf die effektive Lagerungsdichte erfolgt über den Einbezug des Tongehaltes (Buchter et al., 2004; Weil & Brady, 2017) und hat zum Ziel, die Vergleichbarkeit der Lagerungsdichte über verschiedene Körnungen hinweg zu ermöglichen. Bei der Lagerungsdichte der Feinerde wird im Gegensatz zur Lagerungsdichte der Gesamtprobe der Skelettgehalt (Fraktion $>2 \text{ mm}$) nicht berücksichtigt. Zur Ermittlung von Vorräten, zum Beispiel an organisch gebundenem Kohlenstoff, sollte immer die Lagerungsdichte der Feinerde verwendet werden (Buchter et al., 2004; Weil & Brady, 2017). In der gravimetrischen Bezugswelt wird oft auch der Begriff «spezifisches Volumen» verwendet, welches als Inverses der Lagerungsdichte in cm^3/g angegeben wird.

(1)

$$\text{effektive Lagerungsdichte} = (\text{Trockengewicht} / \text{Volumen}) + 0.009 \times \text{Tongehalt} (\%)$$

(2)

$$\text{Lagerungsdichte Feinerde} = \frac{(\text{Trockengewicht} - \text{Gewicht Skelett})}{(\text{Volumen Bodenprobe} - \text{Volumen Skelett})}$$

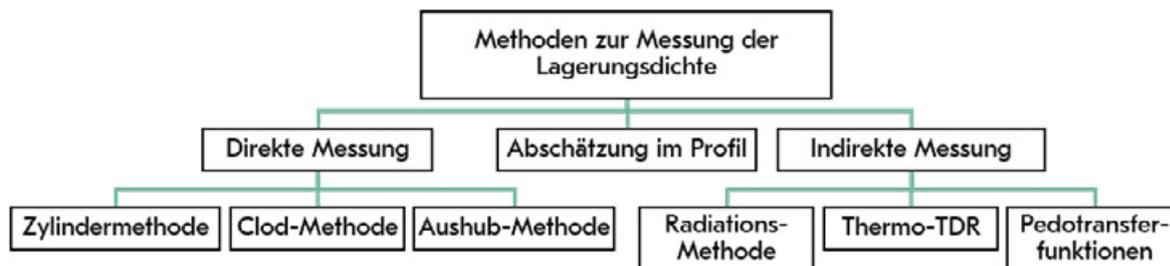


Abbildung 1: Übersicht über die verschiedenen Methoden zur Lagerungsdichte-Bestimmung. Grafik adaptiert und verändert nach Al-Shammary et al., 2018.

Für die Bestimmung der Lagerungsdichte gibt es verschiedene Messverfahren, die in direkte und indirekte Methoden unterteilt werden können (Abbildung 1). Des Weiteren kann die Lagerungsdichte direkt am Profil geschätzt werden. Die Hauptschwierigkeit ist meist die genaue Bestimmung des Volumens der Bodenprobe und auch des Skeletts im Falle der Lagerungsdichte der Feinerde.

Abschätzung am Profil

Bei der Abschätzung am Profil wird die Lagerungsdichte direkt im Feld über den Eindringwiderstand geschätzt. Dafür wird ein Messer in die Profilwand getrieben und der Widerstand beurteilt. Dabei handelt es sich allerdings nur um eine grobe Abschätzung der Lagerungsdichte (Blume, Stahr & Leinweber, 2011; Walthert et al., 2004). Ebenfalls zur Abschätzung der Lagerungsdichte können Messungen des Eindringwiderstandes mittels Penetrometer (Kapitel 3.13) dienen. Hierbei ist zu beachten, dass der Eindringwiderstand stark vom Wassergehalt abhängig ist und daher eine Umrechnung in die Lagerungsdichte viele Zusatzinformationen benötigt.

Direkte Messungen

Direkte Messungen sind einfach anzuwenden und daher bei BodenwissenschaftlerInnen weit verbreitet. Die verschiedenen direkten Methoden unterscheiden sich vor allem in der Art der Volumensmessung sowie bei der Probenahme (Al-Shammary et al., 2018). Bei allen direkten Messverfahren kann durch Wägung vor und nach dem Trocknen auch gleich der gravimetrische Wassergehalt bestimmt werden. Das Prinzip der Zylindermethode (ISO 11272:2017) gilt als das am weitesten verbreitete und angewendete und ist ebenfalls die Referenzmethode der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (PYZYL-D) (Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996; Al-Shammary et al., 2018; Buchter & Häusler, 2009; Schwab & Gubler 2016; VDLUFA, 2016; Tian et al., 2018). Je nach Land und Institution wird für dieses Vorgehen eine andere Bezeichnung verwendet. Bei dieser Methode wird im Feld eine ungestörte Bodenprobe von bekanntem Volumen entnommen, üblicherweise mit Stechzylindern (Abbildung 2, 3 & 4). Nach der Präparation auf das Normvolumen gemäss der Referenzmethode PYZYL-PA (Eidg. landwirtschaft-



Abbildung 2: Einbringen der Schlagsonde mit einem enthaltenen Stechzylinder in den Boden zur Entnahme einer ungestörten Bodenprobe.
Bildquelle: Freundliche Genehmigung der Forschungsgruppe Bodennutzung und Bodenschutz der HAFL.



Abbildung 3: Ungestörte Zylinderprobe, welche noch auf das definierte Normvolumen präpariert werden muss.
Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Báfková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiology, Food and Natural Resources Czech University of Life Sciences Prague.



Abbildung 4: Eine Zylinderprobe, die mit einem Messer exakt auf das Normvolumen präpariert wurde.
Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Báfková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiology, Food and Natural Resources Czech University of Life Sciences Prague.

liche Forschungsanstalten, 1996) (Abbildung 4) wird die Probe bei 105°C für mindestens 24 Stunden getrocknet und anschliessend gewogen. Je grösser das verwendete Probenvolumen, desto repräsentativer ist die Methode. Die Genauigkeit der Methode ist auch stark von der Probennahme und der Präparation abhängig (Al-Shammary et al., 2018; Buchter & Häusler, 2015; Tian et al., 2018). Pro Horizont sollten 3-5 Proben genommen werden, um einen robusten Mittelwert zu erhalten. Bei der Probennahme sollte auch auf die saisonale Dynamik geachtet werden. Damit die Bodenproben qualitativ hochwertig sind, sollte ausserdem nur bei günstigen Bodenfeuchteverhältnissen im Bereich der Feldkapazität beprobt werden.

Eine weitere direkte Methode, die in den ISO (2017) und ASTM (2015) Normen erwähnt wird, ist die Clod-Methode (Al-Shammary et al., 2018; Department of sustainable natural resources New South Wales Government, 2020). Bei dieser Methode werden nicht Proben mit einem bestimmten, vordefinierten Volumen entnommen, sondern das Volumen wird mittels des archimedischen Prinzips der Verdrängung bestimmt (auch Tauchwägungsmethode genannt). Mindestens 3 Bodenblöcke pro Horizont werden entnommen, gewogen und im Labor mit einem wasserabweisenden Material (z. B. Paraffin) umhüllt. Dafür muss die Probe für etwa 24 Stunden ins Wachsbad. Alternativ kann die Probe auch in einen kleinen Plastiksack vakuumverpackt werden (Abbildung/Video 5). Die Probe wird dann in eine Flüssigkeit mit bekannter Dichte (typischerweise Wasser) getaucht und die verdrängte Masse mittels Waage bestimmt. Daraus kann dann das Volumen der Probe berechnet werden. Bei hohen Tongehalten müssen die Blöcke nach der Volumenmessung für mind. 48 Stunden bis zur Gewichtskonstanz getrocknet werden, um die Trockensubstanz ermitteln zu können. Für die Tauchwägung müssen die Bodenblöcke stabil genug sein, was die Grösse der Blöcke und somit auch die Genauigkeit der Methode minimiert. Daher kann mit dieser Methode nur die Lagerungsdichte von Böden mit fester Struktur erfasst werden. Die Messwerte dieser Methode

5: Agroscope-Lernvideo zur Plastiksack-Methode (Variante der Tauchwägung)

Dieses Agroscope-Video zeigt unter anderem die korrekte Anwendung der Variante der Tauchwägung «Plastiksack-Methode» zur Ermittlung der Lagerungsdichte einer Bodenprobe.



Bild/Video: Forschungsgruppe Bodenqualität und Bodenschutz, Agroscope

youtube.com/watch?v=PV77qMfdbK4



fallen meist höher aus als bei den anderen direkten Messverfahren (Al-Shammary et al., 2018; Department of sustainable natural resources New South Wales Government, 2020).

Können weder die Zylindermethode noch die Clod-Methode angewendet werden, kann auf die Aus-hub- oder Densitometer-Methode zurückgegriffen werden (DIN 18125-2 (Densitometer) / ISO 11272:2017; Al-Shammary et al., 2018; Buchter & Häusler, 2009; VDLUFA, 2016). Diese Methode eignet sich besonders für sehr skelettreiche Böden. Dabei wird eine klar begrenzte Grube ausgehoben und der ausgehobene Boden im Labor bei 105°C zur Ermittlung des Trockengewichts für mindestens 24 Stunden getrocknet und anschliessend gewogen. Zur Ermittlung des Volumens der ausgehobenen Grube können grundsätzlich drei verschiedene Methoden angewendet werden:

- i) Densitometer
- ii) Die Grube wird mit Sand aufgefüllt und das verwendete Volumen an Sand gemessen.
- iii) Die Grube wird mit einem wasserdichten Material ausgelegt (z.B. Plastiksack in passender Grösse aus dünnem, flexiblem Material) und bis zur umgebenden Bodenoberfläche mit Wasser gefüllt. Die verwendete Wassermenge wird gemessen und daraus das Grubenvolumen berechnet.

Bei allen erwähnten direkten Bestimmungsmethoden für die Lagerungsdichte sind die Genauigkeit (mindestens 0.01 g) und die Kalibration der Waage zur korrekten Bestimmung des Trockengewichts von entscheidender Bedeutung. Bei der Clod-Methode ist die Waage besonders wichtig, da sie hier auch für die Volumenmessung gebraucht wird. Je grösser das beurteilte Probenvolumen und je mehr Wiederholungen gemacht werden, desto repräsentativer sind die Ergebnisse der verwendeten Methode.

Indirekte Messungen

Neben den direkten Methoden gibt es auch indirekte Methoden zur Bestimmung der Lagerungsdichte, bei denen keine Bodenproben entnommen werden müssen. Dies hat den Vorteil, dass der Boden intakt bleibt und mehrere Messungen am gleichen Ort stattfinden können.

Eine indirekte Methode zur Messung der Lagerungsdichte ist die Radiations-Methode (Al-Shammary et al., 2018). Bei dieser Methode wird die Abschwächung von Gammastrahlung aus einer Strahlungsquelle beim Passieren eines Bodenkörpers genutzt («Transmission»), um die Lagerungsdichte des durchstrahlten Bodenkörpers zu messen. Die Abschwächung der Gammastrahlung durch den Bodenkörper wird mit dem Beer-

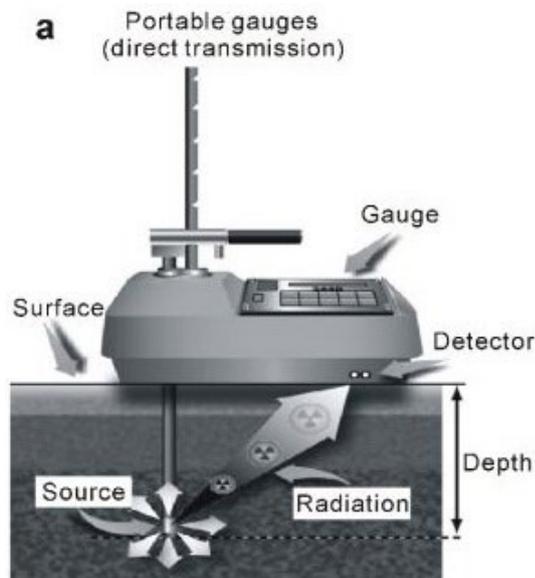


Abbildung 6a: Diese Abbildung zeigt ein nukleares Messgerät, das die direkte Transmission der ausgesendeten Gammastrahlung misst.
Abbildung aus Al-Shammary et al., 2018.

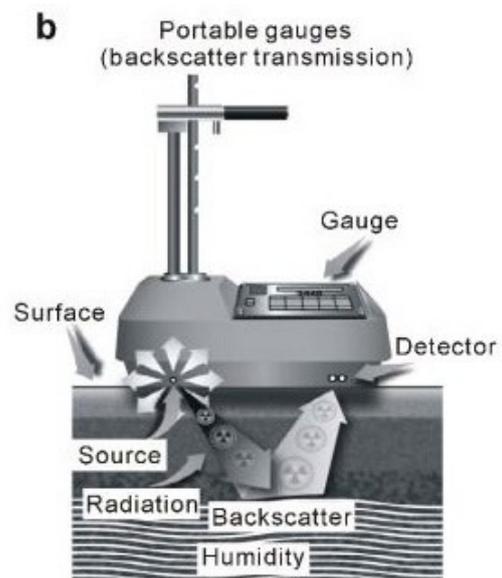


Abbildung 6b: Auf dieser Abbildung sieht man ein Messgerät mit nuklearer Strahlungsquelle, welche die Rückstrahlung der ausgesendeten Strahlung misst. Beide Techniken (Abbildungen 6a & 6b) können zur Ermittlung der Lagerungsdichte eines Bodens verwendet werden.
Abbildung aus Al-Shammary et al., 2018.

Lambert-Gesetz beschrieben. Die Radiations-Methode ist schnell und exakt, die Genauigkeit nimmt aber mit zunehmender Mächtigkeit des Bodenkörpers ab. Aus diesem Grund sollten mit dieser Methode maximal 30 cm mächtige Bodenschichten gemessen werden. Dabei ist der «Einflussbereich» der Strahlenquelle nicht gut definiert, wodurch das Gerät nicht immer bis in die gleiche Tiefe misst. Daher kann die gemessene Lagerungsdichte nicht immer klar einer bestimmten Bodentiefe zugeordnet werden. Für die Messung wird ein Messgerät mit nuklearer Strahlungsquelle benötigt, dass entweder die direkte Strahlung (Abbildung 6a) oder die indirekte Rückstrahlung misst (Abbildung 6b). Diese Geräte sind teuer und setzen eine hohe Expertise des Anwenders voraus. Durch die Strahlungsquelle sind zudem erhöhte Sicherheitsvorschriften einzuhalten.

Eine weitere indirekte Möglichkeit, die Lagerungsdichte in-situ zu bestimmen, ist die sogenannte thermo time-domain reflectometry (Thermo-TDR) (Tian et al., 2018). Mit dieser Methode kann die Lagerungsdichte des Bodens automatisiert und kontinuierlich direkt im Boden gemessen werden. Zur Messung werden Thermo-TDR Sonden ver-

wendet. Das sind TDR-Sonden (Kapitel 3.9.), die mit einem Wärmepulssensor kombiniert werden. Damit können thermische Eigenschaften des Bodens wie die Wärmekapazität (C) oder die Wärmeleitfähigkeit (λ) gemessen werden. Aus diesen Eigenschaften wird dann aufgrund des gemessenen Wassergehaltes und mittels Modellen die Lagerungsdichte des erfassten Bodenkörpers bestimmt (siehe dafür Tian et al., 2018). Prinzipiell gibt es zwei unterschiedliche Auswertungsverfahren: (1) Beim einen Verfahren wird die Lagerungsdichte auf Grundlage der Wärmekapazität des Bodens bestimmt («C-based»); dabei können aber relativ grosse Fehler entstehen ($R^2 = 0.32$ RMSE = 0.178 Mgm^{-3}). (2) Ein neueres Vorgehen ermittelt die Lagerungsdichte aus der Wärmeleitfähigkeit (« λ -based»). Dafür muss allerdings zusätzlich auch die Körnung des Bodens bekannt sein. Diese Herangehensweise ist genauer ($R^2 = 0.70$ RMSE = 0.103 Mgm^{-3}) als die C-based Methode, da sie weniger empfindlich auf den Wassergehalt reagiert. Dennoch wird für beide Herangehensweisen eine genaue Messung des Wassergehaltes benötigt (Tian et al., 2018).

3.1.1. Degree of compactness

Begriffserklärung

Bei diesem Parameter wird die Lagerungsdichte in Bezug zu einer Referenzdichte gebracht. Die Lagerungsdichte (Kapitel 3.1) ist u.a. von der Bodentextur abhängig, daher lässt sich die Kompaktheit von Böden nicht über verschiedene Texturen hinweg mit der Lagerungsdichte vergleichen. Bei der Berechnung der effektiven Lagerungsdichte wird zumindest für den Tongehalt korrigiert. Um das Problem der Vergleichbarkeit zu lösen, wurde der «Degree of compactness», oft auch als DC abgekürzt, eingeführt. (Buchter et al., 2004; Håkansson, 1990). Der «Degree of compactness» ist in Gleichung 3 definiert und wird in Prozenten angegeben (Håkansson, 1990). Je nach Methode wird die Referenzdichte allerdings anders bestimmt (vgl. nachfolgenden Abschnitt).

$$(3) \quad DC = \frac{\text{Dichte}}{\text{Referenzdichte}} \times 100$$

Bestimmung des «Degree of compactness»

Håkansson (1990) ermittelt die Referenzdichte als Lagerungsdichte nach einer einwöchigen Druckapplikation von 200 kPa. Dafür wird eine (sehr grosse) Bodenprobe in einer grossen Oedometerzelle nach DIN 18135 unter drainierten Bedingungen uniaxial belastet (Buchter et al., 2004; Naderi-Boldaji et al., 2016; Reichert et al., 2009; Håkansson 1990). Ein Druck von 200 kPa entspricht dabei einer

typischen Belastung durch landwirtschaftliche Fahrzeuge (Naderi-Boldaji et al., 2016). Nach der Belastung wird die Lagerungsdichte der Bodenprobe ermittelt und als Referenzdichte für die Berechnung des «degree of compactness» verwendet. Neben grossen Proben können auch kleinere Proben oder andere Druckstufen verwendet werden, um die Referenzdichte nach Håkansson (1990) zu bestimmen (Reichert et al., 2009; Naderi-Boldaji et al., 2016).

Alternativ kann die Referenzdichte auch mit einem Proctor-Test ermittelt werden. Die Proctor-Dichte ist die höchste erreichbare Lagerungsdichte bei einem «optimalen» Wassergehalt (optimaler Wassergehalt = Wassergehalt bei maximaler Proctor-Dichte) und wird als Referenzdichte zur Ermittlung des «degree of compactness» verwendet (Naderi-Boldaji et al., 2016). Bei dieser Methode wird ein Proctor-Gerät nach DIN 18127 verwendet. Dabei wird eine gestörte Bodenprobe durch einen aus einer bestimmten Höhe auftreffenden Fallhammer mit einer festgelegten Anzahl von Schlägen verdichtet. Die auf die Bodenprobe einwirkende Kraft kann je nach Test variieren, es existieren verschiedene Standards zur Durchführung. Der Proctor-Test wird bei unterschiedlichen Wassergehalten durchgeführt und so die Proctor-Dichte ermittelt.

3.2. Reelle Dichte

Begriffserklärung

Die reelle Dichte, auch Festkörperdichte genannt, ist die Dichte der trockenen Festsubstanz des Bodens. Im Gegensatz zur Lagerungsdichte wird hier der Porenraum nicht berücksichtigt. Die reelle Dichte wird üblicherweise in g/cm^3 angegeben (Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996; VDLUFA, 2016).

Messung der reellen Dichte

Nach der Referenzmethode PY-DR der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten wird die reelle Dichte an Bodenproben mit gestörter Struktur gemessen (Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996). Dabei wird das Festsubstanzvolumen mit Hilfe eines Wasserypknometers gravimetrisch bestimmt (Abbildung 7).



Abbildung 7: Handelsübliches Wasser-Pyknometer zur Bestimmung der Dichte von Festkörpern. Hierfür sind keine strukturell ungestörten Bodenproben notwendig. Bildquelle: Wikimedia Commons.



Abbildung 8: Luftpyknometer zur Bestimmung der Festsubstanz einer Bodenprobe. Es sind strukturell ungestörte Proben notwendig. Bildquelle: Freundliche Genehmigung von UGT GmbH.

Zusammen mit dem Trockensubstanzgewicht des Bodenmaterials lässt sich daraus die reelle Dichte berechnen. Zur Bestimmung des Feststoffvolumens wird eine repräsentative Menge der getrockneten Bodenprobe in ein Wasserpyknometer eingewogen, mit demineralisiertem Wasser überstaut und über Nacht stehen gelassen. Am Folgetag wird die Probe gekocht, um alle eingeschlossenen Luftblasen zu entfernen. Anschliessend wird das Wasserpyknometer mit demineralisiertem Wasser vollständig aufgefüllt und ins Wasserbad gestellt, um die Probe auf 20 °C zu thermostatisieren. Ist diese Temperatur erreicht, erfolgt die Wägung. Aus der Wägung, der Dichte von Wasser bei 20 °C, dem Trockensubstanzgewicht sowie dem vorgängig bestimmten Wasserwert des Pyknometers kann die reelle Dichte berechnet werden (Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996; VDLUFA, 2016).

Eine weitere Methode, um die reelle Dichte zu bestimmen, ist die volumetrische Methode mittels Xylol (VDLUFA, 2016). Hierfür wird eine bestimmte Menge getrockneter Boden in einen kalibrierten Messkolben eingewogen. Aus einer Bürette mit demselben Volumen wie der Messkolben wird Xylol auf die Bodenprobe gegeben. Durch Schütteln werden Luftblasen aus der Bodenprobe entfernt. Danach wird der Messkolben bis zu dessen Mar-

kierung weiter mit Xylol aus der Bürette aufgefüllt. Das Feststoffvolumen ergibt sich als Differenz zwischen dem Volumen des Messkolbens und dem gebrauchten Xylol, welches an der Bürette abgelesen werden kann. Die reelle Dichte wird dann als Quotient aus der Bodenmasse und dem Feststoffvolumen berechnet (VDLUFA, 2016).

Zusätzlich kann die reelle Dichte mit Hilfe des Feststoffvolumens berechnet werden, das mittels Luftpyknometer gemessen wird (Kapitel 3.4.) (Abbildung 8). Hierfür werden strukturell ungestörte Bodenproben benötigt. Diese werden getrocknet in das Gerät eingebaut, welches dann das Volumen der Festsubstanz misst. Durch Wägung wird die Masse der Bodenprobe ermittelt und durch Bildung des Quotienten aus Masse und Volumen kann die reelle Dichte berechnet werden (Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996).

3.3. Skelettgehalt

Begriffserklärung

Der Skelettgehalt bezeichnet alle mineralischen Bodenbestandteile («Kies und Steine») mit einem Partikeldurchmesser >2 mm (Walthert et al., 2004). Der Skelettgehalt wird entweder gravimetrisch oder volumetrisch angegeben, wobei die Angabe als Volumenprozent Skelettanteil an der Bodenprobe am üblichsten ist (Walthert et al., 2004; Blume, Stahr & Leinweber, 2011; Buchter et al., 2004; Schwab & Gubler, 2016). Dafür wird der Skelettgehalt vorzugsweise an einer (grösseren) ungestörten Zylinderprobe gemessen. Alternativ kann der Skelettgehalt auch durch visuelle Abschätzung im Profil ermittelt werden. Dabei erfolgt die Schätzung des Skelettanteils an der Profilwand, indem aufgrund der visuellen flächenbezogenen Einschätzung des Skelettanteils an der Profilwand auf den Skelettanteil im Bodenvolumen geschlossen wird, wofür verschiedene Vergleichstafeln (Abbildung 9) als Hilfe genutzt werden können (Walthert et al., 2004).

Masse Skelettgehalt

Durch die Definition des Bodenskeletts als Fraktion >2 mm bietet es sich an, die Masse des Skelettgehaltes des Bodens mittels Sieben und Wägen der Bodenprobe zu bestimmen. Der Skelettgehalt wird entweder durch Trockensiebung oder durch Nasssiebung bestimmt (Schwab & Gubler, 2016).

Bei der Trockensiebung wird die Bodenprobe erst getrocknet und dann die Fraktion >2 mm mit einem 2 mm Sieb abgetrennt und von Erd- und Pflanzenresten befreit. Allenfalls müssen hierfür die Bodenaggregate mit einem Backenbrecher zerkleinert werden. Anschliessend wird die Fraktion >2mm zur Bestimmung der Masse des Skelettgehaltes gewogen (Schwab & Gubler, 2016; Blume, Stahr & Leinweber, 2011).

Bei der Nasssiebung wird die Probe in ein Wasserbad gegeben und anschliessend die Fraktion >2 mm durch Auswaschung über ein 2 mm Sieb gewonnen. Die Fraktion, die auf dem Sieb zurückbleibt wird anschliessend von Pflanzenresten befreit, bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und zur Bestimmung der Masse des Skelettgehaltes gewogen (Schwab & Gubler, 2016).

Vergleichstafeln zur Skelettschätzung

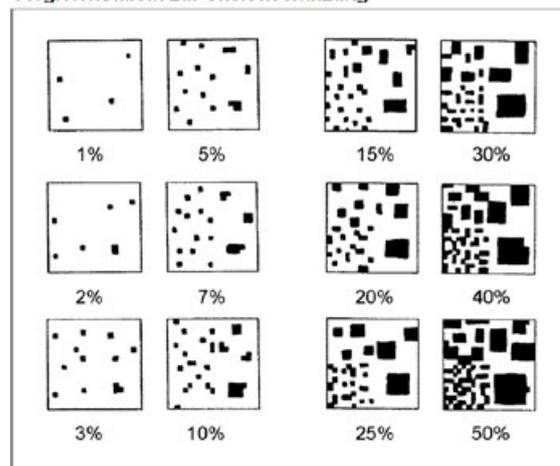


Abbildung 9: Vergleichstafeln zur visuellen Schätzung des volumetrischen Skelettgehaltes nach der Schweizerischen Klassifikation KLABS.

Bildquelle: KLABS 2010, v.3, Annex 3.7.2

Skelettvolumen

Das Skelettvolumen kann entweder rechnerisch als Quotient aus Masse und Dichte (Gleichung 4) oder mit der Tauchwägungsmethode bestimmt werden (Schwab & Gubler, 2016; Buchter et al., 2004). Bei der rechnerischen Variante muss zusätzlich die Dichte des Skeletts bestimmt werden oder als Schätzwert angenommen werden (Schwab & Gubler, 2016). Bei der Tauchwägungsmethode wird der Skelettanteil in eine Flüssigkeit mit bekannten Volumen getaucht und der Volumenunterschied gemessen. Hierfür eignen sich zum Beispiel mit Wasser gefüllte Messzylinder, an denen die Volumenänderung direkt abgelesen werden kann.

$$(4) \quad \text{Volumen Skelett} = \frac{\text{Masse Skelett}}{\text{Dichte Skelett}}$$

3.4. Porosität der Bodenstruktur: Gesamtporenvolumen und Porengrössenverteilung

Begriffserklärung

Der Porenraum bezeichnet die Gesamtheit aller mit Luft oder Wasser gefüllten Hohlräume im Boden. Ob die Poren mit Luft oder Wasser gefüllt sind, hängt von ihrem Durchmesser sowie vom Wasserhaushalt des Standortes ab (Blume, Stahr & Leinweber, 2011; Isler, Luzius & Buchter, 2001). Grobporen werden durch die Schwerkraft in kürzester Zeit entleert und sind anschliessend luftgefüllt. In den feinsten Poren (mit dem kleinsten Äquivalentdurchmesser) findet man hingegen viel häufiger Wasser als Luft. Das Wasser in den Feinporen wird auch als «Totwasser» bezeichnet, da es von der Pflanzenwurzel nicht aufgenommen werden kann (Blume, Stahr & Leinweber, 2011). Die Verteilung des Porenvolumens in verschiedene Porengrössen bzw. Porengrössenklassen ist ein wichtiges Kriterium für die Eignung eines Bodens als Pflanzenstandort. Dabei kann das Porenvolumen entweder als Gesamtporenvolumen angegeben werden oder als Verteilung in die verschiedenen Porengrössenklassen (Tabelle 2) (Isler, Luzius & Buchter, 2001; Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996). Die Porenvolumenverteilung wird an ungestörten Zylinderproben gemessen und üblicher-

weise als volumetrischer Prozentanteil am Gesamtvolumen ausgedrückt (Blume, Stahr & Leinweber, 2011).

Messung des Porenvolumens verschiedener Porengrössenklassen

Die Porengrössenverteilung wird mittels Desorptionskurve beschrieben (Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996). Dabei wird die auf die Wasserphase der Zylinderprobe einwirkende Saugspannung stufenweise erhöht und dadurch die Proben sukzessive entwässert. Ist die Probe im Gleichgewicht mit der angelegten Saugspannung, wird die Wassergehaltsänderung gravimetrisch bestimmt. Die Differenzen aus den Wägungen und dem Trockengewicht ergeben die Wassergehalte bei den bestimmten Saugspannungen. Bei bekanntem Probenvolumen können die gravimetrischen in volumetrische Wassergehalte bzw. in Porenvolumenanteile umgerechnet werden. Da die Saugspannung umgekehrt proportional zum Porendurchmesser ist, können so die Volumen der verschiedenen Porengrössenklassen berechnet werden. Dafür wird idealisierend angenommen, dass die Poren röhrenförmig sind (Isler, Luzius &

Benennung der Porengrössenklasse	Wasserspannungsbereich (hPa, Beträge)	Wasserspannungsbereich (pF-Wert)	Äquivalentdurchmesser (μm)
Grobe Grobporen	Kleiner als 30 hPa	Kleiner als pF 1.5	Grösser als 100 μm
Mittlere Grobporen	30 – 60 hPa	pF 1.5 – pF 1.8	100 – 50 μm
Feine Grobporen	60 – 100 hPa	pF 1.8 – pF 2.0	50 – 30 μm
Grobe Mittelporen	100 – 1'000 hPa	pF 2.0 – pF 3.0	30 – 3 μm
Mittlere Mittelporen	1'000 – 5'000 hPa	pF 3.0 – pF 3.7	3 – 0.6 μm
Feine Mittelporen	5'000 – 15'000 hPa	pF 3.7 – pF 4.2	0.6 – 0.2 μm
Feinporen	Grösser als 15'000 hPa	Grösser als pF 4.2	Kleiner als 0.2 μm

Tabelle 2: Unterteilung des Porenraumes in verschiedene Porengrössenklassen mit den dazugehörigen Saugspannungsbereichen und Äquivalentdurchmessern. Unterteilung wie auch Benennung der Porengrössenklassen können sich je nach Land, Fachgebiet und Untersuchungsziel unterscheiden. Tabelle aus den Schweizerischen Referenzmethoden der eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten 1996, Band 2, PYZYL-P.



Abbildung 10: Handelsübliche Sandbox als Unterdruckapparat zur Ermittlung des Grobporenvolumens einer Bodenprobe.
Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Royal Eijkelkamp.



Abbildung 11: Innenansicht einer Sandbox mit Zylinderproben mit strukturell ungestörtem Boden. Die Proben werden zu Beginn vollständig wassergesättigt. Anschliessend werden steigende Saugspannungen angelegt und sobald die Proben bei einer bestimmten Saugspannung equilibriert sind werden sie gewogen. Zusammen mit dem Trockengewicht und der bekannten, temperaturabhängigen Dichte von Wasser können die Porenvolumina von bestimmten Porengrössenklassen berechnet werden. Die Sandbox eignet sich für den Grobporenbereich.
Bildquelle: Freundliche Genehmigung der Forschungsgruppe Bodennutzung und Bodenschutz der HAFL.

Buchter, 2001; Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996). Die Schwierigkeit besteht hauptsächlich darin, definierte Saugspannungen an die Bodenprobe anzulegen (Blume, Stahr & Leinweber, 2011). Jede Porengrössenklasse wird durch einen Bereich der Saugspannung bzw. des entsprechenden Poren-Äquivalentdurchmessers charakterisiert (Tabelle 2). Die Äquivalentdurchmesser widerspiegeln nicht die tatsächlichen Verhältnisse im Boden, sondern der komplex geformte Porenraum wird gedanklich durch ein Bündel von Kapillaren idealisiert. Deshalb sind die zugeordneten Äquivalentdurchmesser nur Näherungswerte für die tatsächlich im Boden vorhandenen Porendurchmesser (Stahr et al., 2012).

Welche Porengrössenklassen bestimmt werden, ist vom Untersuchungsziel abhängig. Für die Bestimmung der Desorptionskurve werden ungestörte Zylinderproben verwendet. Dabei sollten mindestens 5 Proben pro Horizont bei günstigen Bodenfeuchteverhältnissen (d.h. bei Feldkapazität) genommen werden. Je kleiner die Proben sind, desto eher wird der Gleichgewichtszustand bei einer bestimmten Saugspannung erreicht; allerdings wird mit kleineren Proben die Bodenstruktur weniger repräsentativ abgebildet (Eidg. landwirt-

schaftliche Forschungsanstalten, 1996). Untersuchungen im tieferen pF-Bereich (<300 hPa, entsprechend $pF < 2.5$) werden üblicherweise mit einer Unterdruckapparat nach DIN EN ISO 11274:2018-04 durchgeführt. Im höheren pF-Bereich (>300 hPa, entsprechend $pF > 2.5$) muss eine Überdruckapparat verwendet werden, die auf Richards (1949) zurückgeht (Blume, Stahr & Leinweber, 2011; Isler, Luzius & Buchter, 2001; Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996). In der Praxis wird allerdings manchmal schon ab 100 hPa oder sogar ausschliesslich mit Überdruck gearbeitet (Isler, Luzius & Buchter, 2001). Dies kann aber zu Ungenauigkeiten vor allem im Grobporenbereich führen. Wichtig ist in jedem Fall, dass die Probe vor der Messung vollständig wassergesättigt ist.

Die Referenzmethode PYZYL-P der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten empfiehlt für die Messung im Grobporenbereich eine Sandbox als Unterdruckapparat (Abbildung 10 & 11) und für Messungen in höheren pF-Bereichen einen Drucktopf als Überdruckapparat (Abbildung 12). Bei der Messung mittels Sandbox mit hängender Wassersäule wird die ungestörte, präparierte und wassergesättigte Zylinderprobe auf die Sandbox gesetzt (Abbildung 11). Luftfein-



Abbildung 12: Handelsübliche Drucktopfanlage als Überdruckapparatur zur Ermittlung des Porenvolumens in höheren pF-Bereichen, d.h. für die Mittel- und Feinporen.
 Bildquelle: Freundliche Genehmigung der UGT GmbH.

schlüsse an der Kontaktfläche zwischen Bodenprobe und Sandbox-Oberfläche müssen vermieden werden. Während des Desorptionsvorganges wird die Probe nicht mehr berührt und die Sandbox zugedeckt, um Wasserverluste durch Verdunstung zu verhindern (Abbildung 10). Die Desorption dauert bis zur Gewichtskonstanz, im Grobporenbereich in der Regel 2–4 Tage. Die Desorptionsdauer ist u.a. von Probengröße, Bodenart und Strukturzustand abhängig. Nach jedem Desorptionsschritt wird die Probe gewogen, um den Wasserverlust gravimetrisch zu bestimmen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass kein Boden an der Sandbox-Oberfläche haften bleibt oder anderweitig verloren geht, da dadurch das Messergebnis stark verfälscht werden kann. Über den gravimetrischen Wasserverlust kann das Porenvolumen der entsprechenden Porengrößenklasse berech-

net werden. Danach kann auf der nächsthöheren Desorptionsstufe weitergemessen werden. Bei Messungen mit dem Drucktopf ist das Prozedere analog zur Sandbox. Im Drucktopf stehen die Proben auf einer porösen Keramikplatte, die zuvor mit Wasser gesättigt worden ist (Abbildung 12). Auch hier wird die Probe nach jeder Desorptionsstufe gewogen und das entwässerte Porenvolumen bestimmt. Die Ergebnisse können entweder numerisch als Volumen einzelner Porengrößenklassen oder grafisch als Desorptionskurve dargestellt werden. Die Desorption bis zur Gewichtskonstanz dauert im Drucktopf je nach Druckstufe mindestens fünf Tage (grobe Mittelporen), teilweise aber auch mehrere Wochen (Feinporen). Da die Dauer der Desorption auch von der Probengröße abhängt, wird die Probengröße für Untersuchungen bei hohen Wasserspannungen (ab 15000 hPa) redu-

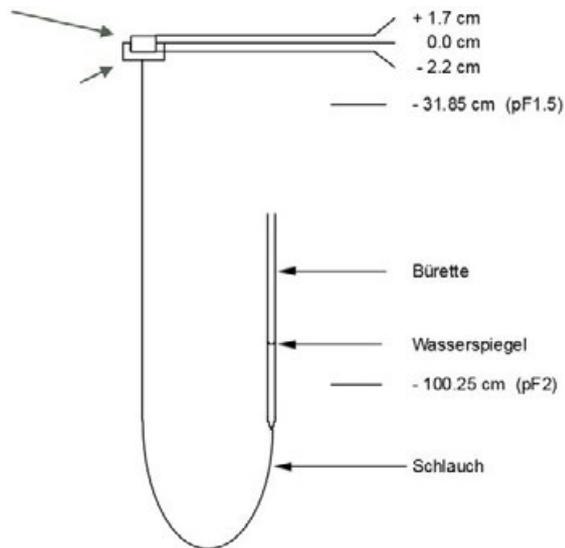


Abbildung 13: Skizze der Versuchsanlage für die Desorptionsmessung mit der VHW-Methode und mit einer 3.9 cm hohen Bodenprobe. 0 cm bezieht sich auf die Oberkante der Plexiglashalterung. Die Mitte der Bodenprobe liegt 0.25 cm darunter. Abbildung übernommen und adaptiert nach Isler, Luzius & Buchter, 2001; Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich.

ziert, indem die Zylinderproben in weniger hohe Ringe überführt werden. Der Rest der Probe muss aufbewahrt werden, um die Lagerungsdichte und weitere Parameter bestimmen zu können (Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996).

Problematisch bei der Desorptionsmessung mittels Sandboxen und Drucktöpfen ist der Anfangswassergehalt der Bodenproben. Da die Probe nicht am gleichen Ort gesättigt und gemessen wird, kann beim Transport der Probe Wasser verloren gehen, was die Resultate verfälscht. Je nach Labor und Handhabung ist dieser Fehler zwar nicht relevant, kann aber eine unbekannte und schwierig zu kontrollierende Grösse sein. In der Sandbox empfiehlt es sich deshalb, die Saugspannung mittels Tensiometer direkt in der Probe zu überprüfen, um allfällige Fehler zu erkennen (Buchter & Häusler, 2009).

Zur Bestimmung des Grobporenvolumens gibt es auch die volumetrische Methode mit hängender Wassersäule (VHW-Methode) (Isler, Luzius & Buchter, 2001). Diese Methode bedient sich des gleichen Prinzips wie die Sandbox mit hängender

Wassersäule. Dabei wird eine einzelne Bodenprobe auf eine poröse Keramikplatte gleichen Durchmessers gesetzt, welche in einer Plexiglashalterung installiert ist. Das Ganze wird mit einem O-Ring abgedichtet und mit einem Glas abgedeckt, um Verdunstungsverluste zu vermeiden. Unten an der Apparatur gibt es zwei Ausgänge für die Entlüftung und Sättigung bzw. die Desorption von der poröser Keramikplatte und Bodenprobe. Die Probe wird zuerst gesättigt, in dem der Wasserstand in der Bürette auf die Höhe der Probenmitte bzw. der Oberkante der Plexiglashalterung gebracht wird (Abbildung 13). Durch Absenken der Bürette wird die wirksame Saugspannung in der Probe sukzessive erhöht und die Probe dadurch schrittweise entwässert. Dabei entspricht eine Absenkung der Bürette auf 31.6 cm unter die Oberkante der Plexiglashalterung einem pF von 1.5. Zur Messung bei pF 2 wird die Bürette auf 100 cm gesenkt (Isler, Luzius & Buchter, 2001). Der Ablesefehler an der Bürette beläuft sich auf ca. ± 0.1 ml. Der Gesamtfehler der Methode beträgt 0.3% bei einem Probenvolumen von 100 cm^3 (Isler, Luzius & Buchter, 2001). Die Methode hat den Vorteil, dass die Probe am gleichen Ort gesättigt und entwässert wird und so unbeabsichtigte Wasserverluste minimiert werden können. Das Volumen des entwässerten Wassers wird dabei nicht gravimetrisch bestimmt, sondern direkt an der Bürette volumetrisch abgelesen. Zudem sind Fehler durch auftretende Luftblasen wegen der Plexiglasskonstruktion erkennbar, so dass die Messung jeder einzelnen Probe überwacht und erkannte Fehler behoben werden können (Isler, Luzius & Buchter, 2001; Buchter & Häusler, 2009).

Des Weiteren gibt es die Möglichkeit, Grobporen im Saugspannungsbereich von 0 bis 820 hPa mit dem HYPROP® 2 (Hydraulic Property Analyser) der Meter Group zu messen (UMS, 2015). Dieses Messgerät beinhaltet ein vollautomatisches Mess- und Auswertungssystem basierend auf Schindlers Verdampfungsmethode (1980). Es werden ungestörte, zuvor wassergesättigte Bodenproben von 100 ml oder 250 ml verwendet und jede Probe einzeln analysiert (Abbildung 14). HYPROP® 2 misst automatisch mit Hilfe von zwei Tensiometerzellen in verschiedenen Höhen die Saugspannung; daraus werden Desorptionskurve und ungesättigte Wasserleitfähigkeit abgeleitet (Schindler, Doerner und Müller, 2015; UMS, 2015). Zur Auswertung



Abbildung 14: Hyprop 2 für die Messung des Porenvolumens im Saugspannungsbereich von 0-820 hPa (ganzer Grobporenbereich bis grobe Mittelporen). Der Hyprop 2 erlaubt an strukturell ungestörten Bodenproben die simultane Messung der Desorptionskurve im angegebenen Saugspannungsbereich und der ungesättigten Wasserleitfähigkeit. Bildquellen: Freundliche Genehmigung der METER Group.

der Daten werden die Softwarepakete HYPROP-VIEW und HYPROP-FIT verwendet, welche online heruntergeladen werden können. Eine Messung mit dem HYPROP® 2 dauert je nach Bodenart zwei bis zehn Tage, der Aufwand des Laboranten ist durch die automatische Messung und Auswertung aber sehr gering (Schindler, Doerner und Müller, 2015; UMS, 2015).

Messungen im sehr hohen pF-Bereich (4.2 – 7) können neben der Drucktopfmethode auch durch Dampfspannungsausgleich mit verschiedenen Salzlösungen gemacht werden (Blume, Stahr & Leinweber, 2011). Diese Methode geht auf Mitscherlich (1954) zurück. Dabei werden die mit geringeren Saugspannungen entwässerten Proben zerkleinert und in Petrischalen ausgebreitet. Es wird also keine ungestörte Bodenprobe mehr gebraucht für die pF-Bereiche, die die Feinporen repräsentieren. In einem Exsikkator werden die Proben dann mit übersättigten Salzlösungen von definierten Dampfspannungen ins Gleichgewicht gebracht (analog der Hygroskopizitätsmessung). Dafür wird zum Beispiel $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ für pF 4.7; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ für pF 5.5; $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ für pF 6.0 und CH_3COOK für pF 6.3 verwendet. Die Gewichtskonstanz stellt sich bei stufenweiser Entwässerung der Boden-

probe mit verschiedenen Salzlösungen jeweils nach ca. sieben Tagen ein. Nach Abschluss der Messungen werden die Proben getrocknet und gewogen, um den Wassergehalt gravimetrisch zu bestimmen (Blume, Stahr & Leinweber, 2011).

Eine Alternative zur Ermittlung der Porenvolumen im hohen Saugspannungsbereich ist die Taupunkt-Methode. Hierfür wird ein Taupunkt-Potentiometer verwendet. Dieser misst die relative Luftfeuchtigkeit über einer Bodenprobe mit der Taupunkt-Methode. Dabei wird zum Beispiel ein Spiegel über der Probe solange gekühlt, bis sich Tau bildet. Sowohl Spiegel- wie auch Probentemperatur werden gemessen (Campbell, Smith & Teare, 2017). Trotz komplexer Technik sind Taupunkt-Potentiometer einfach in der Anwendung: Ein kleines Bodenvolumen wird in einen Behälter gegeben und in das Gerät eingesetzt, die Messung erfolgt vollautomatisch. Ein Beispiel für ein Taupunkt-Potentiometer wäre der WP4C Dew-Point-Meter der Meter Group, der die Messbereiche von pF 3.5 – 6.2 abdeckt (Meter, 2020) (Abbildung 15). Zusätzlich zu den genannten Verfahren gibt es die Möglichkeit, die Porenstruktur und den Porenverbund mit bildgebenden Verfahren wie zum Beispiel Computertomographie zu bestimmen (siehe dazu Tabelle 1 in Helliwell et al.,



Abbildung 15: Das WP4C-Dew Point Meter erlaubt die Bestimmung der Feinporen im Messbereich pF 3.5 – 6.2. Dafür sind keine strukturell ungestörten Proben notwendig.
Bildquelle: Freundliche Genehmigung der METER Group.



Abbildung 16: Handelsübliches Luftpyknometer welches die Bestimmung des Fest- und Flüssigvolumens einer Bodenprobe erlaubt. Werden getrocknete, strukturell ungestörte Bodenproben verwendet und ist das Gesamtvolumen der Bodenprobe bekannt, so kann das Gesamtporenvolumen berechnet werden.
Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Royal Eijkamp.

2013). Bildgebende Verfahren haben den Vorteil, dass nicht nur die Porengrösse charakterisiert werden kann, sondern auch Form, Verteilung und Verbund der Poren (Helliwell et al., 2013). Bildgebende Verfahren sind nicht Teil dieser Arbeit und werden deswegen nicht genauer erläutert.

Messung Gesamtporenvolumen

Zur Überprüfung der gemessenen Porengrössenverteilung wird oft zusätzlich das Gesamtporenvolumen unabhängig von der Desorptionskurve ermittelt. Dies wird entweder rechnerisch oder mittels Luftpyknometer (DIN 19683; Referenzmethode PYZYL-V der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten) bestimmt (Abbildung 16). Mit dem Luftpyknometer wird das Volumen der festen und flüssigen Substanz der Probe nach dem Prinzip des Boyle-Mariotte'schen Gesetzes bestimmt. Auf der Skala des Luftpyknometers kann das Volumen direkt abgelesen werden. Wird das Volumen der Festsubstanz an einer getrockneten Bodenprobe im Luftpyknometer

gemessen und ist das Gesamtvolumen der Bodenprobe bekannt, kann daraus das Gesamtporenvolumen berechnet werden (Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996; VDLUFA, 2016; Buchter et al., 2004).

Alternativ kann das Gesamtporenvolumen auch mit der reellen Dichte und der Lagerungsdichte berechnet werden (Gleichung 5) (Blume, Stahr & Leinweber, 2011; VDLUFA, 2016; Buchter et al., 2004). Die reelle Dichte wird mittels Wasserpyknometer nach der Referenzmethode PY-DR der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten bestimmt (Abbildung 7, Kapitel 3.2.). Methoden zur Messung der Lagerungsdichte sind in Kapitel 3.1 beschrieben.

Des Weiteren kann das Gesamtporenvolumen abhängig von Körnung, Humusgehalt und Lagerungsdichte mit verschiedenen Pedotransferfunktionen abgeschätzt werden (siehe insbesondere Kapitel 3.6.2.2 in Blume, Stahr & Leinweber, 2011).

(5)
$$\text{Gesamtporenvolumen} = (1 - (\text{Lagerungsdichte} / \text{Reelle Dichte})) \times \text{Probenvolumen}$$

3.5. Luftleitfähigkeit

Begriffserklärung

Analog zur gesättigten Wasserleitfähigkeit ist die Luftleitfähigkeit definiert als das Volumen an Luft, das nach Anlegen eines bestimmten Druckes pro Zeiteinheit durch eine Bodensäule mit bekannter Länge und bekanntem Querschnitt fließt. Sie wird üblicherweise als Länge pro Zeiteinheit angegeben (z.B. cm/s) (VDLUFA, 2016; DIN 19682-9). Die Luftleitfähigkeit wird auch als Luftdurchlässigkeit bezeichnet und beschreibt die Durchlässigkeit der Bodenstruktur für Gase aufgrund eines Druckgradienten. Im Gegensatz dazu beschreibt die Gasdiffusion den im Boden stattfindenden Gasaustausch aufgrund eines Konzentrationsgradienten (z.B. ΔO_2 Konzentration). Die Luftleitfähigkeit ist abhängig von der Textur und der Struktur eines Bodens sowie vom Wassergehalt. Die Luftleitfähigkeit kann deswegen räumlich (horizontal wie auch vertikal) und zeitlich sehr stark variieren (DIN 19682-9; Ball & Schjønning, 2002). Für die Luftdurchlässigkeit eines Bodens ist nur der wasserfreie Porenraum nutzbar, daher sind die Werte der Luftleitfähigkeiten nur bei gleicher Saugspannung vergleichbar. Es ist empfehlenswert, die Luftleitfähigkeit bei einer definierten Saugspannung zu messen (VDLUFA, 2016; DIN 19682-9; Ball & Schjønning, 2002).

Messung der Luftleitfähigkeit

Die Luftleitfähigkeit kann mit verschiedenen Geräten entweder im Feld oder im Labor gemessen werden; einige Geräte können sowohl im Feld wie auch im Labor eingesetzt werden. Die Geräte unterscheiden sich in der Erzeugung und Messung des Luftstroms (VDLUFA, 2016). In der deutschen Industrienorm (DIN 19682-9) wird die Messung mit dem Gasometerprinzip beschrieben. Bei Messgeräten, die nach dem Gasometerprinzip arbeiten, erzeugt ein Gasometeroberteil mit seinem Eigengewicht einen Druck, der die Strömung im Bodenvolumen anregt (VDLUFA, 2016). Die im Gasometer eingeschlossene Luft strömt über eine Schlauchverbindung zum Messzylinder. Der Messzylinder wird in den Boden gedrückt und umschließt seitlich das zu beschreibende Bodenvolumen. Dabei wird die Durchströmungsdauer der Luft (in s) und das Absinken des Gasometer-Oberteils (in cm) gemessen, um das pro Zeiteinheit durchströmte

Luftvolumen zu ermitteln. Aus diesen Daten können die aufgetretene Druckdifferenz und somit die Luftleitfähigkeit k_L mittels Darcy-Gleichung (Gleichung 6) ermittelt werden, wobei V das Volumen der durchgeströmten Luft, l die Länge der Bodensäule, A der Querschnitt der Bodensäule, p die Druckdifferenz und t die Zeitdauer ist (DIN 19682-9; VDLUFA, 2016). Die Apparatur kann auch mit Manometer und Flussmeter ausgestattet werden, was die Messung effizienter macht, da Druck und durchströmendes Luftvolumen direkt gemessen und abgelesen werden können und nicht mehr berechnet werden müssen (Ball & Schjønning, 2002). Bei den meisten Messgeräten, die nach dem Gasometerprinzip funktionieren, wird der Wert für die Luftleitfähigkeit intern berechnet und kann direkt abgelesen werden (DIN 19682-9; VDLUFA, 2016).

(6)

$$k_L = \frac{V \times l}{A \times p \times t}$$

Ein anderes Prinzip zur Messung der Luftleitfähigkeit ist das Differenzdruckprinzip. Hierbei wird von einem Gerät mittels Pumpe oder Gasflasche eine konstante Druckdifferenz erzeugt und der resultierende Luftfluss gemessen (VDLUFA, 2016; Ball & Schjønning, 2002). Der erzeugte Luftstrom wird durch eine Kapillare auf die Bodenoberfläche geleitet, wo ein Druck erzeugt wird, der durch adäquaten Ersatz der durch den Boden strömenden Luft konstant gehalten wird. Dazu ist ein Volumenstrom erforderlich, der die Druckdifferenz an beiden Enden der Kapillare verändert. Aus diesem Differenzdruck kann das den Boden durchströmende Luftvolumen berechnet werden (VDLUFA, 2016). Auch bei diesen Geräten kann die Luftleitfähigkeit mit Flowmetern gemessen werden. Eine Apparatur, die mit diesem Prinzip arbeitet, ist zum Beispiel der PL-300 von der Umwelt-Geräte-Technik GmbH (UGT), welcher sowohl im Feld wie auch im Labor angewendet werden kann (Abbildung 17). Für die Anwendung im Labor werden

ungestörte Zylinderproben benötigt (VDLUFA, 2016; Umwelt-Geräte-Technik GmbH, 2019).

Die Luftleitfähigkeit nahe der Bodenoberfläche kann ausserdem mit einer akustischen Methode gemessen werden. Hierfür wird die Ausbreitung eines akustischen Signals über und im Boden mittels Mikrofonen gemessen. Die Differenz der akustischen Spektren der Mikrofone wird genutzt, um die Porosität des luftgefüllten Porenraums und die effektive Luftleitfähigkeit abzuleiten. Diese Methode kann allerdings nur in Bodennähe angewandt werden und wurde erfolgreich verwendet, um Bodenverdichtung zu beobachten (Ball & Schjønning, 2002).



Abbildung 17: Flowmeter PL-300 zur Bestimmung der Luftleitfähigkeitsbedingungen in einer strukturell ungestörten Bodenprobe.
Bildquelle: Freundliche Genehmigung der UGT GmbH.

3.6. Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Begriffserklärung

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_{sat}) ist ein Mass für die Wasserdurchlässigkeit einer wasser-gesättigten Bodenmatrix. Die Berechnung erfolgt mit Hilfe der Darcy-Gleichung (1856) (Gleichung 7), wobei Q die Wassermenge, F die Querschnittsfläche der Bodenprobe, i der hydraulische Gradient und k_f der strukturspezifische Koeffizient («Durchlässigkeitbeiwert») ist. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit wird in Länge pro Zeit (cm/s oder cm/d) angegeben (Buchter et al., 1998; Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996).

(7)

$$Q = k_f \times F \times i$$

Die Wasserleitfähigkeit ist unter anderem von Struktur und Textur des Bodens und den physikalischen Eigenschaften des Wassers (Dichte und Viskosität) abhängig (Zhang et al., 2019). Sie wird durch die Porengrössenverteilung, die Tortuosität und die

Kontinuität der Poren bestimmt. Die Leitfähigkeit kann dadurch am gleichen Standort in erheblichem Masse räumlich und zeitlich schwanken. Diese grosse Variabilität erschwert die Bestimmung von repräsentativen Messwerten (Buchter et al., 1998).

Dieser bodenhydrologische Parameter kann sowohl im Feld als auch im Labor gemessen werden. Im Feld wird jedoch von der feldgesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (k_f) gesprochen. Der Feldwert unterscheidet sich vom Laborwert dadurch, dass die vollständige Aufsättigung des Porenraums oberhalb des Grundwasserspiegels aufgrund von Lufteinschlüssen fast nie erreicht wird (Durner, 2003). Deshalb wird in diesem Kapitel auf die Beschreibung von Methoden zur Bestimmung der feldgesättigten Leitfähigkeit oberhalb des Grundwasserspiegels (z.B. Ringinfiltrometer oder Guelph-Permeameter) verzichtet. Diese Methoden haben jedoch eine wichtige Bedeutung für die Bestimmung der Wasserinfiltrationsrate eines Bodens (Kapitel 3.7.). Auch im Labor stellt die vollständige Sättigung der Proben ein Problem dar und kann ein Grund für die hohe Variabilität der Messresultate sein.

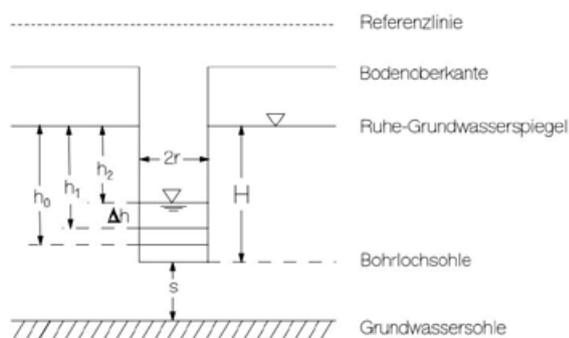


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Bohrlochmethode. H = Tiefe des Bohrlochs unter Grundwasser-ruhespiegel; h_0 = Tiefe der maximalen Wasserabsenkung; h_1, h_2 = Tiefen zu zwei Zeitpunkten während des Wiederanstiegs; s = Abstand zwischen Bohrlochsohle und Grundwassersohle; r = Radius des Bohrlochs. Abbildung übernommen aus Durner, 2003.

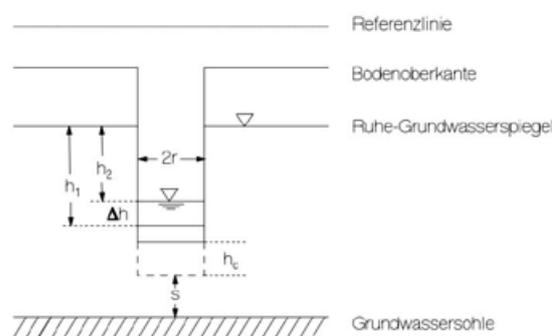


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Piezometermethode. h_c = Tiefe des nicht ummantelten Bohrlochs, h_1, h_2 = Tiefen zu zwei Zeitpunkten während des Wiederanstiegs; s = Abstand zwischen Bohrlochsohle und Grundwassersohle; r = Radius des Bohrlochs. Abbildung übernommen aus Durner, 2003.

Feldmethoden

Feldmessungen zur Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit werden vorzugsweise unterhalb des Grundwasserspiegels durchgeführt. Für eine solche Bestimmung stehen Bohrlochmethoden und Piezometermethoden zur Verfügung (Durner, 2003).

Bei der Bohrlochmethode unterhalb des Grundwasserspiegels besteht das Grundprinzip darin, den Wiederanstieg des Grundwasserspiegels in einem abgepumpten Bohrloch unter definierten Rahmenbedingungen zu bestimmen (Durner, 2003). Dabei wird die Annahme gemacht, dass es sich um homogene und isotrope Böden handelt. Mehrschichtprofile sind daher nicht bestimmbar. Für die Durchführbarkeit der Methode muss als Grundvoraussetzung hoch anstehendes, nicht gespanntes Grund- oder Stauwasser vorhanden sein. Je ungleichmäßiger der Bodenaufbau, desto mehr Wiederholungen sind erforderlich. Die Untersuchungsstellen müssen daher sorgfältig ausgewählt werden (DIN 19682-8, 2012). Das Bohrloch, welches bis unter den Grundwasserspiegel reichen muss, wird unter minimaler Störung mit einem geeigneten Bohrgerät (z.B. Flügelbohrer) in die zu untersuchende Bodenschicht eingeteuft. Die Bohrlochwandung kann bei nicht standfesten Böden mit einem dünnwandigen Filterrohr gestützt werden. Nach der Einstellung des Ruhewasserspiegels (nach rund 24 h) muss die Höhe der Wassersäule H , der Radius des Bohrlochs r und die Strecke zwischen Bohrloch- und Grundwassersohle s ermittelt

werden (Abbildung 18) (Durner, 2003). Die Grundwassersohle kann erbohrt oder durch die Auswertung einer bodenkundlichen Kartierung bestimmt werden, sofern diese in genügender Auflösung vorhanden ist. Zu Beginn der Messung wird das Wasser aus dem Bohrloch schnellstmöglich abgepumpt (z.B. mit einem Schöpfgerät oder einer Handpumpe) und die Anstiegsgeschwindigkeit des Wassers mit Hilfe eines Schwimmers oder einer elektrischen Anzeige gemessen (DIN 19682-8, 2012). Es müssen 3–6 Einzelmessungen bis zum Erreichen der Wasserstandhöhe von $h = 0.25 h_0$ (Abbildung 18) durchgeführt werden. Anhand von empirischen Gleichungen kann die feldgesättigte Wasserleitfähigkeit berechnet werden. Für die Wahl der Gleichung ist die Strecke zwischen Bohrloch- und Grundwassersohle von entscheidender Bedeutung. Die Gleichungen können der DIN 19682-8 (2012) entnommen werden. Fehler und Abweichungen zwischen den Messungen können durch Verschmieren der Bohrlochwandungen, einem ungleichmäßigen Bohrlochdurchmesser oder fehlerhafter Messung der Bohrlochtiefe entstehen. Abweichungen zwischen den Wiederholungen um 100% gelten als normal (Durner, 2003).

Analog zur Bohrlochmethode wird bei der Piezometermethode die feldgesättigte Wasserleitfähigkeit in einem abgepumpten Grundwasserbohrloch aus dem Wiederanstieg des Grundwasserspiegels bestimmt (Durner et al., 2008). Im Gegensatz zur Bohrlochmethode wird das Bohrloch bei der Piezometermethode mit Ausnahme des unteren Abschnittes mit einem Piezometerrohr geschlossen ummantelt (Abbildung 19) (Danladi et al., 2018). Dadurch kann das Wasser nur in den unteren, nicht ummantelten Teil des Bohrlochs hineinfließen. Die Berechnung der Leitfähigkeit erfolgt ebenfalls anhand einer empirischen Gleichung, in der zusätzlich ein Geometriefaktor C miteinbezogen wird. Dieser ist abhängig von der Bohrlochtiefe unterhalb des Grundwasserspiegels H , dem Bohrlochradius r und der Tiefe des offenen Bohrlochs (nicht ummantelter Bereich) h_c (Abbildung 19). Zur Berechnung der feldgesättigten Wasserleitfähigkeit muss auf tabellierte Werte für den Geometriefaktor zurückgegriffen werden.

Die Piezometermethode wird für die Bestimmung stark geschichteter Grundwasserleiter eingesetzt, da so die Bestimmung einzelner Schichten möglich ist. Die Methode ist jedoch ungeeignet für steinige und felsige Untergründe, da hier die Ummantelung zu Schwierigkeiten führt (Durner et al., 2008). Je nach Verhältnis zwischen h_c und r kann die horizontale oder die vertikale Wasserleitfähigkeit erfasst werden. Ist h_c im Vergleich zu r gross, wird hauptsächlich die horizontale Wasserleitfähigkeit erfasst. Ansonsten erfolgt die Bestimmung der vertikalen Leitfähigkeit (Danladi et al., 2018).

Labormethoden

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit wird im Labor mit Permeametern (Durchlässigkeitsmessgeräten) nach der Methode der konstanten Druckhöhe oder nach der Methode der fallenden Druckhöhe bestimmt. Das Messprinzip bei Permeametern beruht darauf, dass eine Wassersäule auf der Bodenprobe steht und die Infiltrationsrate gemessen wird. Aus der gemessenen Infiltrationsrate kann die gesättigte Wasserleitfähigkeit berechnet werden (Buchter et al., 1998).

Für die Labormethoden müssen vorgängig ungestörte Bodenproben mittels Stechzylinder entnommen und im Labor präpariert werden. Pro Standort müssen mindestens drei, besser fünf, Proben pro Tiefe entnommen werden. Es ist darauf zu achten,

dass die Zylinderproben möglichst ungestört bei Feldkapazität entnommen und sorgfältig transportiert werden. Im Labor werden die Proben vorsichtig durch Abbrechen von Bodenkrümeln (z.B. mit einem Skalpell) auf die Länge des Probenzylinders verkürzt. Schwer durchlässige Proben sollten mit einem Paraffinmantel (ca. 2 mm dick) versehen werden, damit kein Wasser zwischen die Bodenprobe und die Zylinderwand fließen kann. Anschliessend folgt die Aufsättigung der Proben mit Leitungswasser im Wasserbad (Buchter et al. 2000b; Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996).

Bei der Methode der konstanten Druckhöhe («stationäres Verfahren») wird die Höhe der Wassersäule und damit der Druckgradient in der Probe konstant gehalten. Die Druckhöhe kann entweder mit Hilfe einer Boyle-Mariotte'schen Flasche oder einer gesteuerten Pumpe aufrechterhalten werden. Diese Methode ist geeignet für Proben mit relativ hoher hydraulischer Leitfähigkeit wie Kies, Sand oder sandiger Ton, weil mit kleinen Druckgradienten gemessen werden kann (Buchter et al., 1998). Aus dem Wasserausfluss, der Druckhöhe sowie dem Probendurchmesser und der Probenlänge lässt sich die Leitfähigkeit der wassergesättigten Zylinderprobe berechnen (Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996).

Bei der Methode der fallenden Druckhöhe («instationäres Verfahren») nimmt die Höhe der Wassersäule und damit der Druckgradient während der Messung ab. Bei dieser Methode wird die Menge des zugeflossenen Wassers durch die Messung der Wassersäule zu Beginn und am Ende der Messung bestimmt. Dieser methodische Ansatz wird aufgrund des üblicherweise zu Beginn grösseren Druckgradienten häufig bei Proben mit geringeren Leitfähigkeiten verwendet (Buchter et al., 1998; Buchter & Häusler, 2009).

Für die Messungen können käufliche (z.B. Eijkelkamp oder Soilmoisture) oder selbst hergestellte Apparaturen verwendet werden. Selbst hergestellte Apparaturen haben den Vorteil, dass sie an die Dimensionen der verwendeten Probezylinder angepasst werden können. Ausserdem gibt es Permeameter, die sowohl nach der Methode der konstanten als auch der fallende Druckhöhe betrieben werden können (z.B. ItÖ-Apparatur, Chameleon von Soilmoisture, Abbildung 20) (Buchter et al., 1998).

Die Probleme bei der Durchführung der Labormethoden werden meistens unterschätzt. Die Messungen sind fehleranfällig und die Resultate aufgrund der grossen Bandbreite möglicher Wasserleitfähigkeitswerte schwierig interpretierbar. Bei Probenahme, Präparation und Einbau in die Messapparatur können Risse, verschmierte Bereiche und Lufteinschlüsse entstehen, welche die Messresultate verfälschen. Proben mit kontinuierlichen Makroporen (z.B. durch Regenwurmaktivität) oder mit grossen Steinen führen ebenfalls zu Verfälschungen (Buchter & Häusler, 2009). Eine Fehlerrechnung ist zwingend nötig, damit die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit mit der gewünschten Genauigkeit berechnet werden kann. Dies wird aber in der Praxis kaum gemacht. Ein Beispiel für eine Fehlerrechnung kann aus dem Projektbericht von Buchter et al. (1998) entnommen werden. Zudem sollte der Zustand der Probe nach der Messung beurteilt werden (Risse im Paraffinmantel, Zustand der Querschnittsfläche) (Buchter & Häusler, 2009).



Abbildung 20: Apparatur zur simultanen Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit an fünf Zylindern mit strukturell ungestörten Bodenproben. An der gleichen Apparatur kann sowohl die Methode «fallende Druckhöhe» wie «konstante Druckhöhe» (durch Anbringen eines Aufsatzes auf die Kunststoffzylinder) verwendet werden.

Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Soilmoisture Corp.

3.7. Wasserinfiltrationsrate

Begriffserklärung

Bei der Wasserinfiltrationsrate handelt es sich um die Wassermenge, die bezogen auf eine gegebene Zeit und Fläche senkrecht in den Boden eintritt (DIN 19682-7, 2015). Sie wird in Länge pro Zeiteinheit (mm/min oder mm/h) angegeben (Lili et al., 2008). Die Wasserinfiltrationsrate ist abhängig von verschiedensten Einflussfaktoren, wobei der Bodenwassergehalt zu den wichtigsten Faktoren zählt (Fritz et al., 2007). Zudem wird der Parameter durch die Art des Wasserangebots (z.B. Niederschlagsintensität), den Zustand der Bodenoberfläche und das Auftreten von Makroporen bzw. Stauschichten beeinflusst. Die Wasserinfiltrationsrate unterliegt einer saisonalen Dynamik (Durner, 2003). Der Parameter wird hauptsächlich im Feld bestimmt, es existieren aber auch Labormethoden. Im Folgenden soll jedoch lediglich auf die Erhebungen im Feld (gemessen an der Bodenoberfläche und im Bohrloch) eingegangen wer-

den. Diese haben den Vorteil, dass sie im Feld unter ungestörten Verhältnissen durchgeführt werden können.

Messung der Wasserinfiltrationsrate

Für die Bestimmung der Wasserinfiltrationsrate werden am häufigsten Einzel- und Doppelring-Infiltrrometer verwendet (Abbildung 21 & 22). Beide Methoden beruhen auf einem ähnlichen Prinzip, wobei unter konstanter («stationäres Verfahren») oder fallender Druckhöhe («instationäres Verfahren») gemessen werden kann (Lili et al., 2008; DIN 19682-7, 2015). Bei der Einzelring-Methode wird ein einzelner Ring (z.B. aus Edelstahl) auf die ungestörte Bodenoberfläche aufgesetzt, wenige cm in den Boden gedrückt und mit Wasser gefüllt (Abbildung 21). Danach wird die Zeit bis zum Abschluss der Messung bestimmt sowie der erreichte Wasserstand festgehalten (Eijkelkamp Soil & Water, 2018; Lili et al., 2008). Die Messung wird



Abbildung 21: Einzelring-Infiltrometer im Einsatz zur Bestimmung der Infiltrationsrate in den Boden. Bildquelle: Wikimedia Commons.



Abbildung 22: Doppelringinfiltrometer im Einsatz zur Bestimmung der Infiltrationsrate. Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Bářková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiology, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague.

beendet, sobald eine konstante Infiltrationsrate beobachtet wird, die Wasserinfiltration also nicht mehr gebremst wird (DIN 19682-7, 2015; Lunzer, 2009). Ein Hauptproblem bei der Infiltration über lediglich einen Ring ist die laterale Komponente des Wasserflusses. Diese bewirkt, dass die Messwerte der Infiltrationsrate stets höher liegen als die der Wasserleitfähigkeit. Durch die Anwendung der Doppelring-Methode, mit einem inneren und einem äusseren Ring, kann dieser Effekt vermindert werden (Abbildung 22). Dabei muss der äussere Ring im Verhältnis zum inneren Ring möglichst gross sein (Durner, 2003; Durner, 2008). Die Installation der beiden Ringe und die Messung sind identisch wie bei der Einzelring-Methode (Lili et al., 2008). Die Berechnung der Wasserinfiltrationsrate erfolgt aus dem Wasserverlust des Innenrings. Die Berechnungsformeln können der DIN 19682-7 (2015) entnommen werden. Bei beiden Methoden müssen die Messungen an mindestens 3–5 Stellen wiederholt werden, um den Einfluss von Inhomogenitäten der Vegetation und des Bodens gering zu halten (Blume, Stahr & Leinweber, 2011). Bei mehrschichtigen Bodenprofilen muss die Infiltrationsrate für jeden einzelnen Horizont gemessen werden (DIN 19682-7, 2015). Eine Messung wird solange fortgesetzt, bis die Infiltrationsrate konstant ist. Dieser Zeitpunkt wird je nach Vorsättigung und Bodeneigenschaften nach

10–60 min erreicht. Bei tonreichen Böden kann dies aber auch Stunden bis Tage dauern (Blume, Stahr & Leinweber, 2011, Durner et al., 2008). Durch die Anwendung eines Doppelring-Infiltrometers kann die Infiltrationsrate auf eine einfache Weise bestimmt werden; die Methode ist jedoch mit einigen Problemen behaftet. So ist eine Messung lediglich in flachem Gelände möglich, und für eine Messung werden je nach Bodenbedingungen 30 bis mehrere 100 Liter Wasser benötigt. Zudem kann das Einbringen der Ringe in den Boden und die schnelle Vernässung der Bodenoberfläche bzw. die hohe Flussrate zu einer Störung des Strukturzustandes führen, was die Bestimmung einer ungestörten Wasserinfiltrationsrate erschwert (DIN 19682-7, 2015; Lili et al., 2008). Eine einfachere und schnellere Methode, bei der ebenfalls Ringinfiltrometer zum Einsatz kommen, ist die «simplified falling head» Methode. Dabei werden die Ringe in den Boden gedrückt und lediglich mit einem geringen, vordefinierten Wasservolumen gefüllt. Die Zeit von der Applikation bis zur vollständigen Infiltration des Wassers wird gemessen. Sobald die Bodenoberfläche nicht mehr mit Wasser bedeckt ist, wird die Messung beendet. Weitere Informationen zu dieser Methode können der Publikation von Bagarello et al. (2004) entnommen werden. Für diese Methode sind weder umfangreiche Messinstrumente noch Analysen notwendig.



Abbildung 23: Grosses Tensions-Infiltrometer zur Ermittlung der Wasserinfiltration in einen Boden auf einem Ackerstandort. Oben links an der Apparatur ist das Unterdruckrohr zu sehen, welches einen Luffeinlass hat und mit dem Wasserreservoir verbunden ist.

Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Báfková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiology, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague.

Die Wasserinfiltrationsrate kann auch mit Hilfe eines sogenannten Tensionsinfiltrometers bestimmt werden (Abbildung 23). Im Unterschied zum Ringinfiltrometer kann mit dieser Methode bei einer definierten Saugspannung gemessen werden. Ein Tensionsinfiltrometer besteht im Wesentlichen aus einer Versorgungsmembran, einem Wasserreservoir und einem Unterdruckrohr bzw. Seitenrohr. Das Unterdruckrohr ist mit dem Wasserreservoir verbunden und hat einen Luffeinlass (Durner, 2003; Lili et al., 2008). Der Aufbau des Gerätes im Feld ist grundsätzlich nicht kompliziert, erfordert jedoch besondere Sorgfalt, um Fehler zu vermeiden (Weber, 2013). Die Hauptschwierigkeit bei der Installation ist es, eine ebene Fläche herzustellen und den Kontakt zwischen dem Gerät (der Versorgungsmembran) und der Bodenoberfläche zu garantieren. Detaillierte Beschreibungen zum Aufbau und zur Funktionsweise des Gerätes können aus den Publikationen von Durner et al. (2008) sowie Weber (2013) entnommen werden. Während der Messung wird einer ungesättigten Bodenoberfläche Wasser



Abbildung 24: Das Mini-Disk-Infiltrometer zur Bestimmung der Infiltrationsrate ist ein handliches Tensionsinfiltrometer, welches nur von einer Person bedient werden kann.

Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Báfková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiology, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague.

unter der gewünschten Saugspannung zugeführt (Durner, 2003; Weber, 2013). Für eine Erhebung werden rund 2 l Wasser benötigt. Die Messung wird so lange fortgesetzt, bis eine konstante Infiltrationsrate erreicht wird. Dies kann je nach Strukturzustand und Bodenbedingungen zwischen 0.5 Stunden und 3 Stunden in Anspruch nehmen (Durner et al., 2008; Lili et al, 2008). Für die Durchführung der Messung (v.a. dem Ablesen der Wasserstände) sollten idealerweise zwei Personen zur Verfügung stehen. Bei genügender Vorbereitung kann die Messung jedoch auch von einer einzelnen Person durchgeführt werden. Die Erhebung der Wasserinfiltrationsrate mit einem Tensionsinfiltrometer ist sehr zeitintensiv (Durner et al. 2008; Weber, 2013). Bei der Verwendung des Gerätes muss sorgfältig vorgegangen werden, da insbesondere die Versorgungsmembran sehr empfindlich ist (Durner et al., 2008). Inzwischen gibt es auch kleinere Tensionsinfiltrometer (Mini-Disk Tensionsinfiltrometer). Durch ihre geringere Grösse sind sie handlicher und benötigen weniger Wasser (Meter, 2020) (Abbildung 24).

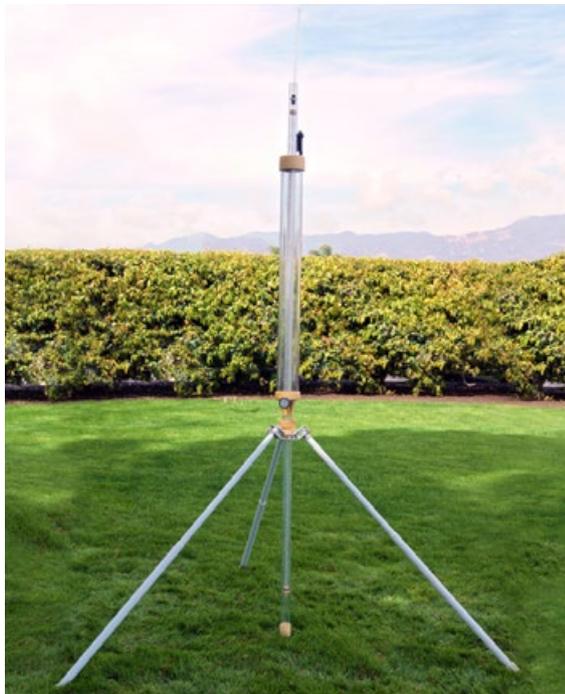


Abbildung 25: Handelsübliches Guelph-Permeameter zur Messung der Infiltrationsrate in den Boden.
Bildquelle: Freundliche Genehmigung von SoilMoisture Corp.

Allerdings beeinträchtigt die Grösse des Durchmessers auch die Qualität der Daten, wodurch die kleineren Tensionsinfiltrimeter für eine grössere Fläche (Feldskala) weniger repräsentativ sind als die grösseren Tensionsinfiltrimeter.

Ein weiteres Gerät, mit welchem die Infiltrationsrate bestimmt werden kann, ist das Guelph-Permeameter (Abbildung 25). In einem Bohrloch wird mit dem Gerät ein konstanter Überdruck eingestellt und die resultierende Infiltrationsrate gemessen. Die Wassernachführung wird nach dem Boyle-Mariotte'schen Prinzip geregelt (Durner, 2003). Der Wasserfluss breitet sich im Boden zunächst kugelförmig aus, bevor in der stationären Phase hauptsächlich ein senkrechter Fluss nach unten erfolgt. Aufgrund der geringen Infiltrationsfläche werden für eine Messung lediglich 2 l Wasser benötigt (Durner, 2007). Die Anzahl Wiederholungen ist abhängig von der Heterogenität des Bodens und der Art der Anwendung (Eijkelkamp Soil & Water, 2012). Durch mehrere Messungen in



Abbildung 26: Cornell-Sprinkler-Infiltrimeter im Einsatz in einem Maisfeld. Die Infiltrationsrate lässt sich bei dieser Methode als Differenz zwischen der applizierten Regenmenge und der gemessenen Oberflächenabflussrate berechnen.
Bildquelle: Freundliche Genehmigung des Cornell Soil Health Staff.

verschiedenen Tiefen ist eine tiefendifferenzierte Bestimmung der Wasserinfiltrationsrate möglich (Durner et al., 2008). Gemessen werden kann zwischen 15–75 cm unterhalb der Bodenoberfläche (Gosh et al., 2019). Mit Tiefenaufsätzen sind sogar Messungen bis zu einer Tiefe von 315 cm möglich. Der Zeitbedarf pro Messung beträgt zwischen 0.5–2 Stunden. Das Gerät kann von einer Person zusammengebaut und betrieben werden (Eijkelkamp Soil & Water, 2012). Detaillierte Beschreibungen zur Anwendung des Gerätes im Feld können aus der Publikation von Lunzer (2009) entnommen werden. Die Messung der Wasserinfiltrationsrate mit einem Guelph-Permeameter bringt neben dem Vorteil der einfachen und schnellen Anwendung auch Probleme mit sich. Durch den Bohrvorgang können z.B. die Wandungen des Bohrlochs verschmiert werden, was zu einer Verfälschung der Messwerte führen kann (Durner, 2007).

Berechnungsversuche stellen eine weitere Möglichkeit dar, um die Wasserinfiltrationsrate zu bestimm-

men. Bei Beregnungsversuchen (Sprinkler-Infiltrometer) wird eine bekannte Niederschlagsintensität erzeugt und anschliessend der Oberflächenabfluss gemessen. Die Infiltrationsrate ergibt sich aus der Differenz zwischen der erzeugten Niederschlagshöhe und der Abflussrate des Oberflächenabflusses (Lili et al., 2008). Grosse Beregnungsanlagen kommen aufgrund des material- und zeitaufwendigen Aufbaus für eine flächendeckende Erhebung der Infiltrationsrate nicht in Frage. Aus diesem Grund bieten sich kleine mobilen Beregnungsanlagen an, welche eine rasche und reproduzierbare Bestimmung der Infiltrationsrate ermöglichen (Iserloh, 2013). Sprinkler-Infiltrometer haben den Vorteil, dass der Boden auf eine natürliche Weise bewässert wird und dadurch die Verschlammung der Bodenoberfläche verhindert oder zumindest reduziert wird. Zudem findet die Bestimmung direkt an der Bodenoberfläche statt, was ebenfalls zur Erhaltung des natürlichen Bodengefüges beiträgt (Van Es & Schindelbeck, 2003). Weltweit werden viele unterschiedliche mobile Beregnungsanlagen eingesetzt. Diese variieren jedoch aufgrund der Verschiedenheit der Forschungsfelder stark bezüg-

lich Bauart, Niederschlagsintensität und Datenerhebung bzw. -auswertung. Eine Standardisierung der Geräte ist aufgrund der Verschiedenheit der Forschungsfelder und Anwendungszwecke nicht in Sicht (Iserloh, 2013). Eine mobile Beregnungsanlage, welche für die Bestimmung der Infiltrationsrate Anwendung findet und auch in der Literatur erwähnt wird, ist der Cornell Sprinkler-Infiltrometer (Abbildung 26). Dieses Gerät besteht aus einem mobilen Sprinkler-Infiltrometer, welcher auf einen Einzelring-Infiltrometer platziert wird. Weitere Informationen zu diesem Gerät können dem Artikel von Van Es und Schindelbeck (2003) entnommen werden.

Es gibt noch weitere Methoden, welche für die Bestimmung der Wasserinfiltrationsrate verwendet werden (z.B. die «run off-on-ponding method» oder «linear source method») (Lili et al., 2008). Da es sich hierbei jedoch um sehr zeitaufwendige und komplexe Methoden handelt, welche sich zudem teilweise noch in der Entwicklungsphase befinden, werden diese in der vorliegenden Arbeit nicht weiter thematisiert (Lili et al., 2008).

3.8. Saugspannung

Begriffserklärung

Die Saugspannung (auch Wasserspannung) ist ein Mass für die Bindung des Wassers an die Bodenmatrix. Sie gibt an, mit welcher Energie die in den Bodenporen wirkenden Kapillarkräfte das Wasser festhalten. Die Saugspannung entspricht physikalisch einem Unterdruck. Sie ist am höchsten bei niedrigen Wassergehalten (entsprechend trockenen Böden) und nimmt mit zunehmender Bodenfeuchte ab. Mit zunehmender Saugspannung wird die Bodenmatrix besser stabilisiert und der Boden somit tragfähiger. Der Parameter wird in Druckeinheiten gemessen und in Zentimeter Wassersäule oder Pascal angegeben. Die Saugspannung kann entweder im Labor oder im Feld gemessen werden. Zudem ist eine direkte und indirekte Messung der Saugspannung möglich (DIN EN ISO 11276, 2014; Stehrenberger & Huguenin-Landl, 2016).

Direkte Messung der Saugspannung

Die direkte Messung der Saugspannung erfolgt mit Tensiometern nach dem Prinzip der Tensiometrie, einer altbewährten Methode (Abbildung 27). Ein Tensiometer besteht üblicherweise aus einem wassergefüllten Rohr, an dessen einem Ende sich eine poröse Saugkerze befindet (Abbildung 28). Das Wasser in der Saugkerze und im Tensiometerrohr steht in Kontakt mit dem Wasser in den Bodenporen. Am anderen Tensiometerende ist eine verbundene Druckmesseinrichtung angebracht. Die Einzelheiten der Konstruktion eines Tensiometers variieren je nachdem ob das Gerät im Feld oder im Labor verwendet wird. Es gibt sie in vielen unterschiedlichen Längen, Grössen und Bauweisen. Die gemessene Saugspannung wird je nach Gerät entweder manuell abgelesen oder automatisch gemessen und gespeichert (Blume, Stahr & Leinweber, 2011; DIN EN



Abbildung 27: Dauerhaft im Feld installierte Tensiometer beim Langzeitversuch Oberacker im Kanton Bern zur Messung der Saugspannung.
Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Lorenz Ramseier, LANAT, Fachstelle Bodenschutz Kt. Bern.

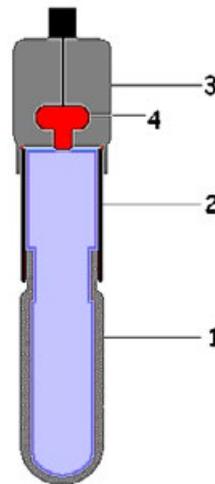


Abbildung 28: Aufbau eines Tensiometers:
1) poröse Keramikzelle,
2) wassergefülltes Schauglas,
3) Elektronik,
4) Drucksensor.
Bildquelle: Wikimedia Commons.

ISO 11276, 2014). Da Tensiometer lediglich Punktmessungen der Wasserspannung liefern, müssen sie im Feld in mehreren Parallelen pro Tiefe eingebaut werden (mindestens 3 Tensiometer pro Tiefe) bzw. es müssen bei mobilen Felddensiometern mehrere Messungen durchgeführt werden. Die Einstellzeit bis zum Druckausgleich zwischen dem Wasser in der Bodenstruktur und im Tensiometer reicht je nach Gerätetyp und Boden von wenigen Minuten bis zu Tagen. Die Messgenauigkeit beträgt je nach Hersteller und Modell circa zwischen 2.5 – 5 hPa. Die Genauigkeit wird von Temperaturschwankungen des Wassers und der Luft beeinflusst (DIN EN ISO 11276, 2014; UMEG, 2003). Nachteilig zu beurteilen ist der begrenzte Messbereich der Geräte (0 – 850 hPa). Der Unterhalt von dauerhaft im Boden installierten Tensiometern ist zudem aufwendig, da während Trockenperioden Wasser nachgefüllt werden muss. Des Weiteren müssen die Geräte regelmässig entlüftet werden, da durch das Eindringen von Luft in das System Messfehler entstehen (Blume, Stahr & Leinweber, 2011). Bei Frostgefahr müssen fest im Boden verbaute Messgeräte zudem über den Winter ausgebaut oder mit frostsicherer Flüssigkeit befüllt werden. Während längerer Trockenperioden im Sommer können sich die Tensiometer vollständig entleeren und werden erst nach genügender erneuter Bodenbefeuchtung wieder nachgefüllt. In dauerhaft trockenen Böden ist eine stationäre Messung deshalb

nicht möglich. Weiter sollten laut der Literatur jährliche Kontrollkalibrierungen durchgeführt werden (Stehrenberger & Huguenin-Landl, 2016).

Indirekte Messung der Saugspannung

Für die indirekte Messung der Saugspannung stehen grundsätzlich drei Messmethoden zur Verfügung: die Equitensiometrie, die elektrische Leitfähigkeit und die thermische Leitfähigkeit (Stehrenberger & Huguenin-Landl, 2016). Für jede Messmethode gibt es eine Vielzahl verschiedener Messgeräte bzw. Sensoren und Hersteller, auf die in den folgenden Abschnitten allerdings nicht eingegangen werden kann.

Die Messmethode der Equitensiometrie wird bei höheren Saugspannungen (über 500 hPa) eingesetzt, bei welchen Tensiometer nur noch bedingt oder gar nicht mehr verwendet werden können. Bei einem Equitensiometer handelt es sich um eine FDR-Sonde, über welche einen poröser Keramikkörper geklebt ist. Bei einer bestimmten Saugspannung stellt sich in der Keramikzelle ein definierter Wassergehalt ein, welcher anschliessend von der FDR-Sonde gemessen wird. Durch die Bestimmung des Wassergehaltes in der Tensiometerkeramik mit bekannter Desorptionskurve kann das Matrixpotenzial indirekt bestimmt werden. Die Beziehung zwischen Saugspannung und Sensorausgangsspannung ist jedoch für jedes einzelne Gerät individuell, da der



Abbildung 29: Handelsüblicher Watermark-Sensor bestehend aus zwei Elektroden, die in das gipsgetränkte Gewebe eingearbeitet sind, welches von einer perforierten Hülle eingefasst wird.

Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Royal Eijkelkamp.

Keramikkörper nicht vollkommen identisch hergestellt werden kann. Der Zusammenhang zwischen dem Ausgangssignal des Equitensiometers und der Saugspannung im Boden ist zudem nichtlinear und muss interpoliert werden. Jede Sonde muss deshalb einzeln kalibriert werden (UMEG, 2003; Zuber, 2007). Equitensiometer müssen, wie stationäre Tensiometer, in mehreren Parallelen pro Tiefe eingebaut werden. Die Messgenauigkeit beträgt rund 50 hPa (UMEG, 2003). Im Vergleich zu Tensiometern sind Equitensiometer wartungsfrei; allerdings erfordern sie eine intensive Kalibrierung. Zudem ist die Messgenauigkeit bei niedrigen Saugspannungen gering, und Überstauhöhen im Bereich der Wassersättigung können prinzipiell nicht gemessen werden. Weiter unterliegen die Messgeräte einer sondenspezifischen Hysterese (Stehrenberger & Huguenin-Landl, 2016, UMEG, 2003). Die geringe Erfahrung in der Praxis und die Kosten werden im Evaluationsbericht von Stehrenberger und Huguenin-Landl (2016) als weitere Nachteile der Methode aufgeführt.

Die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit im Boden erfolgt mittels Gipsblöcken oder Watermark-Sensoren (Abbildung 29). Bei der Bestimmung mittels Gipsblock wird der elektrische Widerstand zwischen zwei eingegossenen Elektroden gemessen (Zuber, 2007). Aufgrund der geringen Leitfähigkeit des Gipses und der Luft ist die gemessene Leitfähigkeit lediglich von der elektrischen Leitfähigkeit des Bodenwassers in den Poren des Gipsblockes abhängig (Blume, Stahr & Leinweber, 2011).

Das Wasser im Gipsblock ist im Kontakt mit dem Wasser in der Bodenstruktur und besitzt deshalb dieselbe Saugspannung nachdem sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Hohe Saugspannungen resultieren in hohen elektrischen Widerständen (Blume, Stahr & Leinweber 2011). Gipsblöcke werden für wissenschaftliche Untersuchungen nur selten verwendet, was auf die geringe Lebensdauer der Gipsblöcke und auf die instabile Eichkurve bzw. den individuellen Kalibrierungsbedarf zurückzuführen ist (Zuber, 2007). Weiter unterliegen auch die Gipsblöcke einer starken Hysterese (Stehrenberger & Huguenin-Landl, 2016; Zuber, 2007). Bei den Watermark-Sensoren handelt es sich um eine Weiterentwicklung der Gipsblöcke. Die röhrenförmigen Watermark-Sensoren bestehen aus zwei Elektroden, welche von einem gipsgetränkten Gewebe bzw. einer granularen Matrix umgeben sind (Zuber, 2007) (Abbildung 29). Der Watermark-Sensor wird permanent im Boden eingegraben und hat eine durchschnittliche Lebensdauer von 3–5 Jahren. Der Messbereich reicht von 30–2000 hPa. Die Geräte sind wartungsfrei und frostsicher. Sie reagieren aber träger auf wechselnde Bodenfeuchtigkeiten als andere Messgeräte (Pan et al., 2010; UGT, 2020).

Eine indirekte Bestimmung der Saugspannung kann auch über die thermische Leitfähigkeit des Bodens erfolgen (Stehrenberger & Huguenin-Landl, 2016). Die Methode beruht auf einem ähnlichen Prinzip wie die Bestimmung über die elektrische Leitfähigkeit. Die Sensoren bestehen aus einer porösen Spitze, typischerweise aus Keramik, in der ein Heizelement integriert ist. Das Wasser in der Keramikspitze besitzt die gleiche Saugspannung wie das Bodenwasser nachdem sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Hohe Saugspannungen resultieren dabei in hohen thermischen Leitfähigkeiten. Der Wassergehalt der Keramikspitze wird über den Temperaturanstieg während der Erhitzung der Spitze bzw. über die Wärmekapazität bestimmt. Der Temperaturanstieg, welcher mit der thermischen Leitfähigkeit und dem Wassergehalt zusammenhängt, kann als Proxy für das Matrixpotential verwendet werden. Diese Geräte haben ebenfalls den Vorteil, dass sie wartungsfrei und frostsicher sind. Zudem decken sie einen grossen Messbereich ab. Insbesondere bei höheren Saugspannungen reagieren die Sensoren jedoch unempfindlich und ungenau. Zudem ist für jeden Sensor eine separate Eichkurve notwendig, da die Struktureigenschaften der Keramikspitzen voneinander abweichen (Pan et al., 2010).

3.9. Wassergehalt

Begriffserklärung

Der Wassergehalt bezeichnet die Masse oder das Volumen an Wasser, das zu einem gewissen Zeitpunkt im Boden vorhanden ist. Der Wassergehalt wird vor allem durch Niederschlag, Tiefensickerung, Verdunstung und den Wasserverbrauch der Pflanzen beeinflusst, weshalb der Parameter zeitlich und räumlich variabel ist. Der Wassergehalt kann entweder gravimetrisch (Gleichung 8) oder volumetrisch (Gleichung 9) berechnet werden und wird üblicherweise in Prozenten angegeben (Fühler & Roth, 2004; Stahr et al., 2012). In der Bodenphysik wird der Wassergehalt vorzugsweise volumetrisch angegeben, da dieser Wert ökologisch aussagekräftiger ist (z.B. Berechnung von Wasserbilanzen). Allerdings ist es technisch einfacher, den Wassergehalt gravimetrisch durch Wägung zu bestimmen, weshalb gravimetrische Messungen öfter angewendet werden (Fühler & Roth, 2004; Stahr et al., 2012). Durch Multiplikation mit der Lagerungsdichte kann der gravimetrische Wassergehalt in den volumetrischen Wassergehalt umgerechnet werden (Stahr et al., 2012; Blume, Stahr & Leinweber, 2011). Der Wassergehalt kann entweder direkt im Labor oder im Feld gemessen oder indirekt über im Boden eingebaute Sonden bestimmt werden.

Direkte Messungen

Der Wassergehalt kann durch gravimetrische Messung nach DIN 19683-4 ermittelt werden. Bei dieser Methode werden strukturell ungestörte Proben mittels Stechzylinder im Feld entnommen. Dies sollte bei feldfeuchten Bedingungen gemacht werden, d.h. im Bereich der für eine ungestörte Beprobung günstig ist (60 – 100 hPa) entnommen. Um einen repräsentativen Wert zu erhalten, sollten

mindestens drei, besser aber fünf, Proben pro Horizont entnommen werden. Nach der Entnahme sollten die ungestörten Zylinderproben möglichst rasch verpackt werden, um sie vor Verdunstung zu schützen. Im Labor werden die Proben auf das Normvolumen präpariert und feldfeucht gewogen. Dies muss möglichst bald nach der Probenahme gemacht werden, damit kein Wasser durch Verdunstung verloren geht und das Resultat verfälscht. Anschliessend wird die Probe bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und nochmals gewogen («Trockensubstanz»). Die Differenz aus den beiden Wägungen ergibt die Masse Wasser, woraus der gravimetrische Wassergehalt berechnet wird. Da das Bezugsvolumen der Probe bekannt ist, kann daraus auch der volumetrische Wassergehalt berechnet werden. (Stahr et al., 2012; Blume, Stahr & Leinweber, 2011; Fühler & Roth, 2004; Weil & Brady 2017). Alternativ kann auch eine strukturell gestörte Probe nach dem gleichen Prinzip untersucht werden, hierbei kann der Wassergehalt aber nicht auf das Bodenvolumen bezogen werden, d.h. der Wassergehalt kann nur gravimetrisch angegeben werden (Blume, Stahr & Leinweber, 2011).

Eine weitere exotische, aber direkte Feldmethode ist die Messung des Wassergehaltes mittels Carbid (nach Sibriski 1935). Die Methode beruht darauf, dass aus Carbid mit Wasser Acetylen freigesetzt wird. Die Menge an Acetylen kann dann gasvolumetrisch bestimmt werden (VDLUFA, 2016; Blume, Stahr & Leinweber, 2011). Dafür werden je nach Feuchte ca. 5–20 g Boden aus einer Mischprobe aus 8–10 Bohrungen entnommen und zusammen mit Stahlkugeln und einer Calciumcarbid-Ampulle in eine Druckflasche gegeben; diese wird mit einem Mano-

(8)

$$\text{Gravimetrischer Wassergehalt } \theta_m = \frac{\text{Masse Wasser}}{\text{Masse trockener Boden}} \times 100 [\%]$$

(9)

$$\text{Volumetrischer Wassergehalt } \theta_v = \frac{\text{Volumen Wasser}}{\text{Volumen Bodenprobe}} \times 100 [\%]$$



Abbildung 30: Einsatz einer TDR-Sonde an der Profilwand zur Messung des volumetrischen Wassergehaltes.
Bildquelle: KOBO.



Abbildung 31: Einsatz einer TDR-Sonde auf der Bodenoberfläche zur Messung des volumetrischen Wassergehaltes.
Bildquelle: KOBO.



Abbildung 32: Auswahl an verschiedenen Modellen von TDR-Sonden zur Messung des volumetrischen Wassergehaltes.
Bildquelle: KOBO.

meterkopf luftdicht verschlossen. Durch Schütteln der Flasche wird die Calciumcarbid-Ampulle durch die Stahlkugeln zum Platzen gebracht und das Calciumcarbid mit dem Boden vermischt. Wenn der Druck nicht mehr weiter ansteigt (nach ca. 10 – 20 min), kann der Enddruck am Manometerkopf abgelesen und der Wassergehalt ermittelt werden. Ein Druckanstieg von 1 bar entspricht dabei 1 g Wasser (VDLUFA, 2016). Diese Methode kann nicht bei Moorböden angewandt werden und wird ungenau, wenn der Wassergehalt im Boden mehr als 30% beträgt (VDLUFA, 2016; Blume, Stahr & Leinweber, 2011).

Indirekte Messungen

Da direkte Messungen destruktiv sind und keine zweite Messung am selben Ort durchgeführt werden kann, wurden verschiedene indirekte Alternativmethoden entwickelt (Stahr et al., 2012). Indirekte Methoden erfassen dabei den Wassergehalt nicht direkt, sondern messen sogenannte Proxygrößen, die eng mit dem Wassergehalt korrelieren (Fühler & Roth, 2004). Für die Messung des Wassergehaltes gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Sensoren und Herstellern, die nicht alle in dieser Arbeit beschrieben werden können. Eine viel verwendete Proxygröße ist die Dielektrizitätskonstante des Bodens, welche im Wasser viel höher ist als in den anderen Bodenkomponenten «Luft» und «Festkörper». Ein Anstieg des Wassergehaltes resultiert deshalb in einem deutlichen Anstieg der Dielektrizitätskonstante des Bodens (Stahr et al., 2012; Blume, Stahr & Leinweber, 2011; Fühler & Roth, 2004; Gimper, 2010). Die Dielektrizitätskonstante

wird mit verschiedenen Sonden, die entweder mobil genutzt oder stationär im Boden eingebaut werden können, ermittelt. So kann über längere Zeiträume der Wassergehalt im (nahezu) selben Bodenvolumen gemessen und die zeitliche Variabilität verfolgt werden (Stahr et al., 2012; Blume, Stahr & Leinweber, 2011; Fühler & Roth, 2004; Stehrenberger & Huguenin-Landl, 2016).

Die bekannteste indirekte Methode ist die Time Domain Reflectometry Messung (TDR-Messung) (Abbildung 30, 31 & 32). Bei der TDR-Messung werden zwei TDR-Sondenstäbe an einer Profilwand horizontal in der zu messenden Tiefe (Abbildung 30) oder vertikal von der Bodenoberfläche aus in den Boden gedrückt (Abbildung 31). Die Sonden werden über ein Koaxialkabel mit dem eigentlichen TDR-Gerät (Impulsgenerator, Zeitmessung, Messanzeige) verbunden. Bei der Messung wird die Laufzeit einer elektromagnetischen Welle entlang der Sondenstäbe gemessen. Die Laufzeit des Signals ist von der Dielektrizitätskonstante des Bodens abhängig. Da diese hauptsächlich vom Wassergehalt abhängt, kann der Wassergehalt mit Hilfe von kalibrierten Umrechnungsformeln aufgrund der Laufzeit bestimmt und oft direkt am Gerät abgelesen werden (Blume, Stahr & Leinweber, 2011; Gimper, 2010).

Nach einem ähnlichen Prinzip arbeitet die Frequency Domain Reflectometry Messung (FDR-Messung). Auch diese Methode ermittelt den Wassergehalt indirekt über die Dielektrizitätskonstante des Bodens

(Gimper, 2010). Die FDR-Sonden erzeugen im Boden ein schwingendes elektromagnetisches Feld. Der Boden zwischen den Sonden wirkt dabei als elektrisch isolierendes Material, welches die Ausbreitung des Feldes abschwächt. Die Abschwächung des Feldes führt zu einer Amplitudenänderung, welche von den Sonden erfasst wird. Über die Abschwächung des elektromagnetischen Feldes kann die relative Dielektrizitätskonstante des Bodens ermittelt und über Regressionsfunktionen der Wassergehalt bestimmt werden (UGT-GmbH, 2020).

Neben den TDR- und FDR-Sonden gibt es noch die Kapazitätsmessung (Stehrenberger & Huguenin-Landl, 2016). Bei dieser Messung wird die Dielektrizitätskonstante des Bodens mittels der Kapazitätsmessung eines Kondensators bestimmt. Dieser Kondensator besteht aus zwei Elektroden, zwischen denen sich der Boden als Nichtleiter befindet. Die Menge an elektrischer Ladung, welche vom Kondensator gespeichert wird, ist proportional zur angelegten Spannung. Die Beziehung zwischen Spannung und Ladung wird von der Kapazität beschrieben. Diese ändert sich, wenn sich die Dielektrizitätskonstante des Bodens ändert. Aus dieser Beziehung kann die Dielektrizitätskonstante des Bodens ermittelt und wiederum der Wassergehalt des Bodens berechnet werden (UGT-GmbH, 2020).

Die Firma UGT GmbH hat weitere Sensoren zur Wassergehaltsbestimmung aufgrund der Dielektrizitätskonstante des Bodens entwickelt. Die UMP-Sensoren sind quasi eine Kombination aus TDR und FDR Messungen (Abbildung 33). Der UMP-Sensor sendet ein kontinuierliches Signal aus (wie die FDR-Sensoren) und misst den Zeitversatz zum Ursprungssignal (wie TDR-Sonden). Aus dem gemessenen Zeitwert wird die Dielektrizitätskonstante ermittelt (UGT-GmbH, 2020).

Neben diesen Sonden, die alle den Wassergehalt indirekt über die Dielektrizitätskonstante des Bodens ermitteln, gibt es auch die Möglichkeit, den Wassergehalt mittels Neutronen- oder Gammasonden zu bestimmen. Da diese Sonden radioaktive Quellen enthalten, unterliegen sie besonderen Strahlenschutzvorschriften (Fühler & Roth, 2004; Blume, Stahr & Leinweber, 2011) und werden deshalb nur selten eingesetzt und in dieser Arbeit nicht weiter erläutert.



Abbildung 33: Auf dem Markt erhältliche UMP-Sonde zur Messung des volumetrischen Wassergehaltes des Bodens. UMP-Sonden kombinieren die TDR- und FDR-Technologie.

Bildquelle: Freundliche Genehmigung der UGT GmbH.

3.10. Nutzbare Feldkapazität

Begriffserklärung

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) bezeichnet den Anteil des Bodenwassers, der für Pflanzen zugänglich und nutzbar ist. Pflanzenverfügbares Wasser befindet sich in den feinen Grobporen (bis 50 µm Äquivalentdurchmesser) und in den Mittelporen mit Äquivalentdurchmesser zwischen 30 und 0.2 µm (Eidg. landwirtschaftliche Forschungsanstalten, 1996; Stahr et al., 2012; VDLUFA, 2016). Bei Schluff- und Lehmböden ist die nFK am höchsten (Stahr et al., 2012).

Messung der nutzbaren Feldkapazität

Die nutzbare Feldkapazität kann aus der Desorptionskurve (Kapitel 3.4.) eines Bodens abgeleitet werden. Für die Bestimmung der Desorptionskurve im Labor werden ungestörte Bodenproben verwendet. Sie berechnet sich durch Abzug des Tot-

wassers von der Feldkapazität. Als Totwasser wird jener Anteil des Bodenwassers definiert, welcher sich bei einem pF von 4.2 noch im Boden befindet. Die Feldkapazität bezeichnet jene Wassermenge, die ein Boden im statischen Gleichgewicht gegen die Schwerkraft in seinen Poren zurückzuhalten vermag. Sie liegt je nach Grundwasserstand zwischen pF 1.8 und pF 2.5 (Stahr et al., 2012; VDLUFA, 2016). Im Labor wird der Äquivalentwert für die Feldkapazität nach der deutschen Bodenkundlichen Kartieranleitung (4. Auflage) in der Regel als volumetrischer Wassergehalt bei pF 1.8 bestimmt, entsprechend einem Äquivalentdurchmesser von etwa 50 µm (AG Boden, 1994; VDLUFA, 2016). Je nach Land und Literatur ist dieser Wert aber bei verschiedenen Saugspannungen definiert, international ist die Feldkapazität bei pF 2 festgelegt.

3.11. Wasserstand

Begriffserklärung

Der Wasserstand, auch Grundwasserstand genannt, beschreibt die Lage des Grund-, bzw. Hangwassers unterhalb der Bodenoberfläche oder einer anderen Bezugsebene. Der Abstand zwischen Wasserstand und Bodenoberfläche wird in der Hydrogeologie «Flurabstand» genannt (Quante, 2017). Aus agronomischer Sicht beeinflusst der Wasserstand Pflanzenwachstum, Wurzelentwicklung und Evapotranspiration (Gray & Mahapatra, 1965). Niederschlagsereignisse erhöhen den Wasserstand, Trockenperioden hingegen lassen den Wasserstand absinken.

Messung des Wasserstandes

Der Wasserstand wird normalerweise im Bohrloch ermittelt. Dieses kann zusätzlich mit einem Piezometerrohr ausgestattet sein (Kapitel 3.6.). Bei der Bohrloch-Methode wird ein Bohrloch mit einem geeigneten Bohrergerät in den Boden bis unter den Grundwasserspiegel eingeteuft. Nach Einstellen des

Ruhewasserspiegels, was je nach Bodenart und hydraulischer Leitfähigkeit unterschiedlich lange dauern kann, wird der Wasserstand ermittelt. Dafür wird der Abstand zwischen Bodenoberfläche und Wasserspiegel in Zentimetern gemessen (VDLUFA, 2016; Gray & Mahapatra, 1965).

Die Piezometer-Methode ist vom Prinzip her gleich wie die Bohrloch-Methode. In das Bohrloch wird aber noch ein Piezometerrohr von ca. 5 cm Durchmesser eingebaut. Das Piezometerrohr sollte in dem zu bestimmenden Grundwasserstands-Bereich perforiert sein. Die Einrichtung kann optional auch mit einem Schwimmer ausgestattet werden, wodurch der Wasserstand kontinuierlich über die Zeit gemessen werden kann (Blume, Stahr & Leinweber, 2011). Der Wasserstand wird nach Einstellung des Ruhewasserspiegels als Höhe des Wasserspiegels in Zentimeter unter der Bodenoberfläche gemessen (Blume, Stahr & Leinweber, 2011; Gray & Mahapatra, 1965).

3.12. Redoxpotential

Begriffserklärung

Das Redoxpotential im Boden bestimmt, ob ein Stoff oxidativ oder reduktiv umgesetzt wird. Das Potential zeigt also den Status und biochemische Effekte der Sauerstoffversorgung im Boden an (Reiser et al., 2020; Stahr et al., 2012; Weil & Brady, 2017) (Abbildung 34). Redoxreaktionen werden von Mikroorganismen genutzt, um Energie zu gewinnen. Dabei gilt, je höher das Redoxpotential des umgesetzten Stoffes ist, desto höher ist der Energiegewinn. Solange freier Sauerstoff im Boden verfügbar ist, bleibt das Oxidationspotential hoch. Wird der Sauerstoff aufgebraucht oder durch Wassereinschlüsse im Boden ersetzt, sinkt das Redoxpotential im Boden ab (Stahr et al., 2012). Der Parameter ist also stark abhängig vom Wassergehalt und kann daher zeitlich und räumlich stark variieren. Redoxpotentiale können in natürlichen Böden zwischen -500 mV und +1000 mV schwanken (Stahr et al., 2012; Reiser et al., 2020). Diese zeitliche und räumliche Variabilität erfordert eine mehrmalige, bzw. kontinuierliche Messung des Redoxpotentials (Reiser et al., 2020). Zusätzlich hängt der Parameter auch vom pH ab, weshalb eine Standardisierung auf pH 7 gemacht werden sollte. Dafür ist jeweils zusätzlich zur Redoxpotentialmessung die Messung des pH notwendig (Stahr et al., 2012; Weil & Brady, 2017).

Messung des Redoxpotentials

Üblicherweise wird das Redoxpotential direkt im Feld nach ISO 11271 mittels Elektroden gemessen (Stahr et al., 2012; Blume, Stahr & Leinweber, 2011). Dafür wird eine Platinelektrode so in den Boden eingebaut, dass die Bodenstruktur möglichst wenig gestört wird. Das Potential wird gegen eine Standardelektrode mit bekanntem Potential gemessen. So kann auf einem verbundenen Spannungsmesser das Redoxpotential direkt abgelesen werden (Stahr et al., 2012; Blume, Stahr & Leinweber, 2011). Sind die beteiligten Ionen bekannt, kann das Redoxpotential zusätzlich den Stabilitätsfeldern von Redoxzuständen zugeordnet werden (Blume, Stahr & Leinweber, 2001). Mit denselben Elektroden kann auch die Sauerstoffdiffusionsrate (ODR) gemessen werden, welche ebenfalls Einblick in die Sauerstoffversorgung des Bodens gibt. Da die Messung der ODR allerdings das Redoxpotential beeinflusst,



Abbildung 34: Profilwand mit Rostflecken, deutliche Zeichen von Redoxreaktionen, welche stattgefunden haben.

Bildquelle: Wikimedia Commons.

sollten die Messungen zeitlich oder räumlich versetzt stattfinden (Reiser et al., 2020). Eine Methode, wie mit derselben Platinelektrode sowohl Redoxpotential als auch ODR kontinuierlich über längere Zeit gemessen werden können, ist in Reiser et al. (2020) beschrieben.

Eine weitere Methode zur Ermittlung des Redoxpotentials ist die IRIS (Indicator of Reduction In Soils) – Methode (Rabenhorst, 2018). Hier werden mit Eisenhydrid oder Birnessit beschichtete PVC-Rohre im Boden vergraben. Je nach Redoxpotential im Boden wird die Beschichtung (Fe- oder Mn-Verbindungen) mehr oder weniger stark von den PVC-Rohren abgelöst. Nach ca. 2 Wochen werden die Rohre wieder ausgegraben und die freien Flächen fotografisch bestimmt. Mit dieser Methode kann das Redoxpotential allerdings nur semiquantitativ erfasst werden.

3.13. Eindringwiderstand

Begriffserklärung

Der Eindringwiderstand wird zur Lokalisierung und Ermittlung der räumlichen Ausdehnung von Zonen mit verdichteten Böden verwendet (Schwab, Dietrich & Gubler, 2018; Buchter & Häusler, 2009). Zur Messung des Eindringwiderstandes werden verschiedene Penetrometertypen verwendet, wobei je nach Eindringmechanismus zwischen dynamischen und statischen Geräten unterschieden wird (Lutz & Keller, 2020; Herrick & Jones, 2002). Grundsätzlich bestehen Penetrometer aus einem Messgerät und einer Sondierstange, welche in einem Konus als Sondenspitze endet. Je nach Gerät sind Durchmesser oder Winkel der Eindringstange verschieden, was wiederum die Messresultate beeinflussen kann (Lutz & Keller, 2020). Zusätzlich ist der Eindringwiderstand abhängig vom Stukturzustand, der Zusammensetzung sowie der Feuchte des Bodens (Schwab, Dietrich & Gubler, 2018; Lutz & Keller, 2020; Herrick & Jones, 2002).

Dynamische Geräte zur Messung des Eindringwiderstandes

Bei dynamischen Geräten, auch «Rammsonden» genannt, wird die Sonde mit gleichmässigen Hammerschlägen in den Boden getrieben. Dabei wird pro Schlag sowohl die aufgebrachte Schlagenergie



Abbildung 35: Die Panda-Sonde ist ein Beispiel für ein dynamisches Penetrometer zur Ermittlung des Eindringwiderstandes in den Boden.

Bildquelle: Freundliche Genehmigung der nationalen Bodenbeobachtung, NABO.

als auch die Eindringtiefe der Sondenspitze gemessen und daraus der Eindringwiderstand (in MPa) berechnet. Dafür muss zusätzlich die Konusoberfläche sowie die Masse des Hammers und aller beweglichen Teile des Geräts bekannt sein (Lutz & Keller, 2020; Buchter & Häusler, 2009). Ein Beispiel für eine Rammsonde ist die PANDA-Sonde (Pénétrromètre Automatique Numérique Dynamique Assisté par Ordinateur), welche in der Schweiz sehr häufig eingesetzt wird (Abbildung 35). Bei diesem Gerät wird die Sonde mit einem normierten Hammer in den Boden gerammt. Daneben gibt es Rammsonden, bei denen kein Hammer gebraucht wird, sondern ein ins Gerät integriertes Fallgewicht, das aus einer bestimmten Höhe fallen gelassen wird und so eine definierte Schlagkraft ausübt. Dadurch wird der Einfluss des Operators auf das Messergebnis minimiert. Ein Beispiel für eine Rammsonde, die mit diesem Prinzip arbeitet, ist der Light Weight Deflectometer von Sol Solution (Sol Solution, 2020).



Abbildung 36: Auf dem Markt erhältliches statisches Penetrometer zur Ermittlung des Eindringwiderstandes in den Boden.

Bildquelle: Freundliche Genehmigung der UGT GmbH.

Statische Geräte zur Messung des Eindringwiderstandes

Im Vergleich zu dynamischen Geräten wird bei statischen Penetrometern die Sondenspitze mit konstanter Geschwindigkeit in den Boden gedrückt (Abbildung 36). Dabei wird die angewandte Kraft als Funktion der Eindringtiefe gemessen, um den Eindringwiderstand zu berechnen. Diese Kraft kann entweder manuell, hydraulisch oder elektrisch ausgeübt werden. Ein Beispiel für einen statischen

Penetrometer, der manuell in den Boden gedrückt wird, ist der Penetrologger von Eijkelkamp. Je nach Bodenfestigkeit wird eine grössere oder kleinere Sondenspitze montiert. An den Penetrologger kann zusätzlich ein Bodenfeuchtefühler angeschlossen werden, womit bei jeder Messung auch der Feuchtezustand an der Bodenoberfläche gemessen wird (Eijkelkamp, 2020). Dies ist wichtig, da der Eindringwiderstand stark vom Wassergehalt des Bodens abhängt.

3.14. Schrumpfverhalten des Bodens

Begriffserklärung

Bei zunehmender Entwässerung des Bodens entstehen Schrumpfprozesse infolge von Zugkräften der Wassermenisken zwischen den Bodenteilchen (Düllmann, 2014). Die Schrumpfkurve bildet die Beziehung zwischen Volumen und Wassergehalt der Bodenprobe während der Trocknung ab (Leong & Wijaya, 2015; Li & Zhang, 2019; Braudeau et al., 1999). Je nach Bodenart bzw. Körnung sieht die Schrumpfkurve anders aus und kann in zwei bis vier Phasen unterteilt werden (Abbildung 37) (Leon & Wijaya, 2015; Braudeau et al., 1999; Düllmann, 2014). In der ersten Phase, der Struktur-Schrumpfung, werden die Grobporen entleert und es kommt nur zu einer vernachlässigbaren Volumenänderung der Bodenprobe. In der zweiten Phase, auch «Normalschrumpfung» genannt, führt der Wasserverlust zu einer gleichgrossen Volumenabnahme der Bodenprobe. In der dritten Phase ist die Volumenabnahme der Bodenprobe nicht mehr linear zum Wasserverlust, das Volumen nimmt aber immer noch ab. Diese Phase wird daher «Restschrumpfung» genannt. In der vierten und letzten Phase, der «Nullschrumpfung», ändert sich das Probenvolumen nicht mehr, da die Tonteilchen nicht mehr näher zusammenrücken können, obwohl noch weiter Wasser abgegeben wird (Düllmann, 2014). Das Schrumpfverhalten von Böden hängt stark von ihrer Zusammensetzung ab, insbesondere von ihrem Tongehalt und den vorhandenen Tonmineralien. Je feinkörniger ein Boden ist, desto höher ist sein Schrumpfvermögen (Leon &

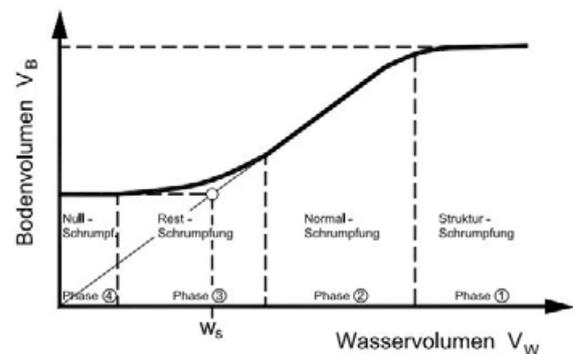


Abbildung 37: Schematische Darstellung der Schrumpfkurve eines feinkörnigen Bodens mit den vier unterschiedlichen Schrumpfphasen. Abbildung übernommen aus Düllmann, 2014.

Wijaya, 2015; Braudeau et al., 1999; Düllmann, 2014). Das Schrumpf-Quellverhalten von Böden spielt auch bei der Interpretation von Desorptionskurven (Kapitel 3.4.) eine wichtige Rolle (Düllmann, 2014; Li & Zhang, 2019).

Messung des Schrumpfverhaltens von Böden

Zur Charakterisierung des Schrumpf-Quellverhaltens existieren keine Normen, lediglich das Bestimmen der Schrumpfgrenze ist in DIN 18122 und ASTM D4943 sowie in ASTM D427 festgelegt (Düllmann, 2014; Li & Zhang, 2019). Um die Schrumpfkurve und damit die Bodendeformation während des Trocknungsvorganges darstellen zu

können, müssen Bodenvolumen und Bodenwassergehalt simultan gemessen werden. Somit kann das Schrumpfverhalten der Böden bei abnehmendem Wassergehalt dargestellt werden. Der Wassergehalt kann gravimetrisch mit einer Waage gemessen werden. Schwieriger ist die akkurate Messung des Bodenvolumens, wofür es eine Vielzahl an Methoden gibt. Diese Methoden können grob in kontaktfreie Methoden und Methoden mit direktem Kontakt unterteilt werden (Li & Zhang, 2019). Dabei werden entweder alle drei Dimensionen der Volumenänderung separat gemessen oder die Schrumpfung wird nur in einer Richtung gemessen und unter Annahme eines isometrischen Schrumpfverhaltens gleichförmig in alle anderen Richtungen extrapoliert. An einigen Institutionen werden die Bodenproben zusätzlich mit Mini-Tensiometern ausgestattet um zusätzlich das Matrixpotential während der Trocknung zu bestimmen. So kann im Idealfall neben der Schrumpfkurve auch die Desorptionskurve aufgezeichnet werden (Weisskopf 2020, persönliche Mitteilung).

Direkte Methoden zur Volumenmessung von Bodenproben

Eine einfache Methode zur wiederholten Bestimmung des Volumens einer Bodenprobe ist die Messung mit der Schublehre. Damit werden Höhe und Durchmesser von zylindrischen Bodenproben gemessen, sodass deren Volumen berechnet werden kann. Diese Methode kann allerdings nur bei festen, gleichmässig zylindrischen und schön präparierten Proben durchgeführt werden (Li & Zhang, 2019).

Des Weiteren kann die Höhe der Bodenprobe mit einem Wegsensor oder Wegaufnehmer automatisch und kontinuierlich gemessen werden. Der Durchmesser der Probe wird dabei als konstant angenommen, was aber nicht unbedingt der Fall sein muss und zu verfälschten Ergebnissen führen kann (Li & Zhang, 2019). Unter Annahme eines isometrischen Schrumpfvorganges kann die Volumenänderung auch in die anderen Richtungen (Durchmesser) extrapoliert werden.

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, kann das Volumen auch mittels des archimedischen Prinzips der Wasserverdrängung gemessen werden. Mit dieser Methode können auch ungleichmässige Proben gut gemessen werden, wenn sich die Ummantelung an die Form der Bodenprobe anpasst. Allerdings kann das Eindringen von Wasser oder Luftblasen die Ergebnisse verfälschen (Li & Zhang, 2019; Braudeau et al., 1999). Der Aufwand für diese Methode ist enorm hoch, so dass diese Art von Volumenmessung für eine kontinuierliche Messung eigentlich nicht in Frage kommt.

Kontaktfreie Methoden zur Volumenmessung

Berührungsfreie Methoden messen das Probenvolumen, ohne dass die Probe bei der Messung durch einen Sensor berührt wird. Eine Möglichkeit ist die Volumenbestimmung durch Photogrammetrie. Dafür werden Fotografien der Probe aufgenommen; mittels Triangulation und weiteren Auswertungen kann ein 3D-Modell rekonstruiert werden. Anstatt Fotografie können auch Lasersensoren zur Erstellung des Modelles eingesetzt werden. Aus diesen Modellen kann das Probenvolumen berechnet werden (Li & Zhang, 2019).

In Braudeau et al. (1999) wurde zur Ermittlung des Probenvolumens ein Retractometer verwendet. Dieses Gerät misst die Höhe und den Durchmesser der Probe mittels mehrerer Lasersensoren simultan und kontinuierlich. Die Messung des Schrumpfverhaltens des Bodens wird dabei unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt (Braudeau et al., 1999; Gabrielli Technology).

3.15. Aggregatsstabilität

Begriffserklärung

Ein Aggregat ist ein Körper aus zusammenhängenden, primären Bodenpartikeln mineralischer oder organischer Art (Stahr et al., 2012). Unter anderem ist die Aggregatsstabilität ein Mass zur Beurteilung der Erodierbarkeit von Böden (Blume, Stahr & Leinweber, 2011). Da der Parameter von verschiedenen, variablen Faktoren abhängig ist, gibt es auch eine Vielzahl von Methoden, um die Aggregatsstabilität zu bestimmen (Mair, 2017; Le Bissonais, 2016). In Folge wird auf die am weitesten verbreiteten Methoden eingegangen. Je nach Methode ist die Einheit, in der die Aggregatsstabilität gemessen wird, verschieden. Oft wird sie als Prozent stabiler Aggregate angegeben oder es wird der «mean weight diameter» berechnet, der als Mass für die Aggregatsstabilität betrachtet wird.

Visuelle Beurteilung der Aggregatstabilität

Die Verschlammungsneigung von Aggregaten bei Kontakt mit Wasser kann man nach dem Widerstand einschätzen, den die Aggregate der Verschlammung durch Überstauen mit Wasser entgegensetzen. Bei der Verschlammungsmethode (nach Sekera & Brunner 1943) werden etwa zehn Aggregate von 1–3 mm Durchmesser in einer Schale mit deionisiertem Wasser überstaut. Nach kurzem Umschwenken kann der Zerfallsgrad mit einer 6-stufigen Beurteilungsskala visuell bestimmt werden. Diese Methode kann auch im Feld angewendet werden, allerdings nur bei sand- und kiesarmen Böden (Blume, Stahr & Leinweber, 2011; Mair, 2017).

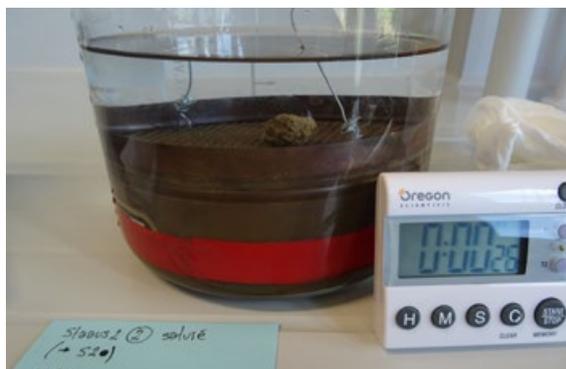


Abbildung 38: Bewegen der Bodenaggregate auf einem Sieb das sich in einem Wassergefäss befindet zur Ermittlung der Aggregatsstabilität.

Bildquelle: Freundliche Genehmigung der Forschungsgruppe Bodennutzung und Bodenschutz der HAFL.

Messung der Aggregatstabilität

Nach der deutschen Industrienorm DIN 19683-16 wird die Aggregatsstabilität mit dem Nasssiebverfahren bestimmt (Buchter et al., 2004). Nasssiebverfahren sollten Effekte, die bei einem Starkregenereignis auftreten und zu Wassererosion führen, nachbilden. Dabei gibt es mehrere unterschiedliche Verfahren, die aber alle nach dem gleichen Prinzip arbeiten (Mair, 2017; Le Bissonais, 2016). Bei allen Verfahren werden Aggregate auf einem Sieb wiederbefeuchtet, das ganz in Wasser getaucht und für eine festgelegte Zeit und mit festgelegter Geschwindigkeit im Wasser auf und ab bewegt wird (Abbildung 38). Oft werden dafür Siebtürme mit mehreren Maschenweiten verwendet. Durch das Wiederbefeuchten und die hydraulischen Kräfte während der Nasssiebung können die Aggregate je nach Stabilität zerfallen (Abbildung 39). Dadurch nimmt die Grösse der Aggregate ab und die instabilen Aggregate fallen auf das nächst kleinere Sieb nach unten. Die getrockneten Siebrückstände werden gewogen und ergeben die Grössen- bzw. Gewichtsverteilung der stabilen Aggregatanteile und können als Prozentanteil der Gesamtprobe berechnet werden (Mair, 2017; Agroscope Arbeitsvorschrift). Je nach Methode werden die Aggregate lufttrocken, auf eine bestimmte Saugspannung konditioniert oder feldfeucht analysiert. Ebenfalls unterscheiden sich die Methoden in der Anzahl der verwendeten Siebe und Siebmaschenweiten (Mair, 2017; Le Bissonais, 2016). Zum Nasssieben wird vorzugsweise ein Sieb-



Abbildung 39: Resultierendes Bodenaggregat nach Anwendung des Nasssiebverfahren zur Ermittlung der Aggregatsstabilität.

Bildquelle: Freundliche Genehmigung der Forschungsgruppe Bodennutzung und Bodenschutz der HAFL.

turm verwendet, bei dem Dauer und Geschwindigkeit des Nasssieb-Vorganges in einer Nasssieb-Apparatur eingestellt werden können. Meist dauert der Nasssieb-Vorgang ca. eine Stunde. Pro Bodenprobe werden meist fünf Laborwiederholungen gemacht und daraus der Mittelwert als Kenngrösse für die Bodenprobe berechnet. Ebenfalls kann der «mean weight diameter» als Mass für die Aggregatstabilität aus der Grössenverteilung berechnet werden. Dieser berechnet sich aus den Summen der mittleren Aggregatsdurchmesser, multipliziert mit den prozentualen Gewichtsanteilen jeder Aggregatsklasse und ermöglicht einen Vergleich von Nass- und Trockensiebung (Buchter et al., 2004; Agroscope Arbeitsvorschrift; Mair, 2007).

Abgeleitet vom Nasssiebverfahren entstand das modifizierte Nasssiebverfahren nach Frei (2006). Dabei wird eine Zylinderprobe in zwei Stücke gebrochen. Die eine Hälfte der Zylinderprobe wird dann auf ein Sieb mit einer Maschenweite von 20 mm gestellt und mit einer Gitternetzhalterung befestigt, damit sie nicht umstürzt. Dann werden Siebapparatur und Bodenprobe in einem Plastikbehälter unter Wasser gesetzt, sodass die Probe vollständig unter Wasser steht. Nach fünf Minuten wird das Wasser innerhalb von ca. 90 Sekunden bis auf den unteren Rand des Siebes abgelassen. Das Bodenmaterial unterhalb und oberhalb des Siebes wird separat vom Skelett befreit und getrocknet. Daraus berechnet sich die Aggregatstabilität als Quotient vom Bodenmaterial über dem Sieb und der gesamten Menge des Bodenmaterials der halben Zylinderprobe. Dieses Verfahren untersucht die Stabilität der Aggregate im natürlichen Zustand und in natürlicher Zusammensetzung des Bodens, da die Bodenstruktur erst im Siebprozess aufgebrochen wird (Burri, 2006).

Analog zum Nasssiebverfahren gibt es auch die Methode des Trockensiebens. Dieses Verfahren soll die Reibungskräfte bei der Winderosion abbilden. Dabei werden Aggregate kleiner als 4 mm auf einer rotierenden Siebanlage für eine bestimmte Dauer mit festgelegter Intensität gesiebt. Die Siebrückstände gelten als resistente Aggregate und werden zurückgewogen. Daraus ergibt sich die Grössenverteilung der Aggregate, oder es kann der «mean weight diameter» berechnet werden (Mair, 2007).

Für die Bestimmung der Aggregatsstabilität unter dem Einfluss von Starkniederschlägen kann das Berechnungsverfahren (Rainfall Impact Methode RMI) angewendet werden. Dabei werden Aggregate in einem Regensimulator berechnet und Abfluss sowie Bodenverlust gemessen. Regenintensität und -dauer können variiert werden. Die Bedingungen sind sehr ähnlich zu den realen Bedingungen im Feld, die Aggregate werden nur von oben bewässert (Mair, 2017; Le Bissonnais, 2016). Wird nach dem Berechnungsversuch noch ein Siebvorgang durchgeführt, kann das Resultat als «mean weight diameter» angegeben werden (Le Bissonnais, 2016).

Die Aggregatsstabilität kann ebenfalls durch Ultraschalldispersion ermittelt werden (Mair, 2017; Mentler et al., 2004). Dabei werden die Bodenaggregate zuerst in destilliertem Wasser mit Ultraschall vorbehandelt. Durch die Schallwellen wird die Flüssigkeit beschleunigt und zwischen die Bodenpartikel gedrückt, wodurch die Aggregate zerfallen. Auch werden die Aggregate selbst beschleunigt, wodurch es zum Zusammenprall und zu weiterer Zerkleinerung kommt. Die Beschallung findet für eine definierte Zeitspanne und mit einer definierten Intensität statt. Danach wird eine Nasssiebung durchgeführt, um die Anteile an stabilen Aggregaten zu ermitteln (Mentler et al., 2004).

Ein weiteres Mass für die Aggregatsstabilität ist die Dispergierbarkeit von Ton. In instabilen Böden werden Tonpartikel bei Kontakt mit Wasser abgelöst, während sie in stabilen Böden im Aggregat eingebunden bleiben. Werden die Tonpartikel abgelöst, werden sie mobil und können zu Krustenbildung an der Bodenoberfläche («Verschlammung»), verminderter Wasserinfiltration, erhöhter Erosionsanfälligkeit und zum Kollaps der Bodenstruktur führen (Dexter & Czyz, 2000). Die Dispergierbarkeit von Ton in Böden wird mittels Turbidimetrie untersucht (Dexter & Czyz, 2000; Burri, 2006). Dafür wird eine Bodenprobe mit destilliertem Wasser geschüttelt und für 18 h stehen gelassen. In einem Turbidimeter wird dann die Trübheit des Wassers gegenüber einer Kalibrationslösung gemessen. Je trüber das Wasser, desto mehr Ton wurde abgelöst und desto instabiler ist der Boden (Czyz & Dexter, 2008).

Die **Perkolationsstabilität** ist ein weiteres Näherungsmass für die Aggregatsstabilität. Der Parameter ermittelt die Aggregatsstabilität basierend auf der Menge Wasser, die durch eine Säule mit zu Beginn lufttrockenen Bodenaggregaten perkoliert (Mbagwua & Auerswald, 1999).

Das Verfahren zur Messung der Perkolationsstabilität wurde von Sekera & Brunner (1943) entwickelt und vor allem in Deutschland weiterentwickelt (Mair, 2017; Mbagwua & Auerswald, 1999; Kainz & Weiss 1988). Dabei werden 10 g lufttrockene Aggregate von 1–2 mm Durchmesser in ein Röhrchen von 10 cm Länge und 1.5 cm Durchmesser gefüllt, das am unteren

Ende mit einer Gaze verschlossen wurde. Dann wird die Packung lufttrockener Aggregate von oben mit destilliertem Wasser und einem hydrostatischen Druck von 20 cm durchspült. Die Wassermenge, die durch das Röhrchen fliesst, wird gravimetrisch als Funktion der Zeit bestimmt. Nach 10 min wird die Messung beendet (Mbagwua & Auerswald, 1999; Kainz & Weiss, 1988). Die Perkolationsstabilität kann in ml/min angegeben werden oder es wird die Summenkurve als Mass für die Aggregatsstabilität gebildet. Bleibt der Durchfluss über die Zeit konstant, gelten die Aggregate als stabil. Als instabil gilt der Boden, wenn der Durchfluss mit der Zeit stark abnimmt (Mbagwua & Auerswald, 1999).

3.16. Visuelle Strukturbeurteilung

Begriffserklärung

Bei der Strukturbeurteilung wird der Bodenzustand über visuelle Merkmale beurteilt. Die Bodenstruktur ist eine dynamische Bodeneigenschaft und wird von natürlichen Prozessen sowie vom Menschen (u.a. durch Bodenbearbeitung und Befahrung) beeinflusst (Guimaraes et al., 2017). Einfache visuelle Verfahren zur Beurteilung des Bodengefüges haben an Popularität gewonnen und werden häufiger in der Landwirtschaft angewendet, um Bodenverdichtungen zu erkennen. Die Strukturbeurteilung ist vor allem wichtig, um Landwirte bei Entscheidungen bezüglich Bodenmanagement zu unterstützen (Guimaraes et al., 2017; Ball et al., 2017). Es wurde eine Vielzahl von unterschiedlichen visuellen Verfahren entwickelt und in verschiedenen Teilen der Welt angewendet. Nachfolgend wird nur eine Auswahl an visuellen Beurteilungsmethoden vorgestellt (für weitere Verfahren siehe auch Guimaraes et al. (2017), Ball et al. (2017) und Boizard et al. (2007)).

Visuelle Beurteilung des Bodenstruktur-Zustandes

Zur Beurteilung des Bodenstruktur-Zustandes können verschiedene Verfahren sowohl im Feld wie auch im Labor angewendet werden. Die Verfahren sind prinzipiell recht ähnlich und beurteilen den Strukturzustand des Bodens meist auf Grund der

Grösse, Form und Stabilität von Aggregaten, der sichtbaren Porosität, der Bodenfarbe sowie der Durchwurzelung des Bodens (Guimaraes et al., 2017). Die verschiedenen Methoden unterscheiden sich deutlich bei ihren Resultaten. Einige Methoden verwenden Noten oder einen Index, die Resultate liegen also als Zahl vor und können so einfacher verglichen werden. Andere Methoden beschreiben die Bodenstruktur, ohne dabei den Zustand mit einem Zahlenwert zu beurteilen. Eine Methode, die Bodenstruktur zu beschreiben, ist die Spatendiagnose nach Görbing (Beste, 2005). Hierbei wird ein Gesamteindruck der Bodenstruktur gewonnen. Dafür wird mit dem Spaten ein ziegelförmiger Erdquader aus dem



Abbildung 40: Spatenproben zur visuellen Beurteilung der Bodenstruktur auf dem Feld.
Bildquelle: KOBO.

Boden entnommen (die «Spatenprobe»), der ein aktuelles Bild des Strukturzustandes liefert. Die Durchführung der Spatendiagnose ist bei einer zu hohen (nasser Boden oberhalb der Feldkapazität) oder einer zu geringen Bodenfeuchte (trockener Boden) nicht ratsam. Die Spatenprobe wird direkt im Feld auf Gefügestand, Bodenfeuchte, Wurzelwachstum und Verdichtung untersucht und beschrieben (Abbildung 40). Weitere Geräte sind dafür nicht notwendig (Beste, 2005).

Eine weitere Methode ist die visuelle Beurteilung der Aggregat- und Segregattypen von Nievergelt, Petrasek & Weisskopf (2002). Diese Methode ist eine semiquantitative, standardisierte Beschrei-

bung der Gefügestform durch Bestimmung von Grösse, Form, Stabilität und Masseanteilen der Aggregate. Die Gefügestbeurteilung sollte bei mässig feuchten Bedingungen (pF 1.8 – 2.5) durchgeführt werden. Dafür wird eine Spatenprobe genommen; die vorhandenen Aggregate werden zunächst in Grössenklassen unterteilt. Mittels Bildtafeln und Tabellen können dann Form bzw. Typ der Aggregate in den jeweiligen Grössenklassen bestimmt werden. Durch einen Fingertest wird die Festigkeit der Aggregate bestimmt. Ein detaillierter Ablauf dieser visuellen Strukturbeurteilung wird in Abbildung 41 dargestellt. Die Ergebnisse werden in einem Formular protokolliert und ausgewertet (Nievergelt, Petrasek & Weisskopf, 2002).

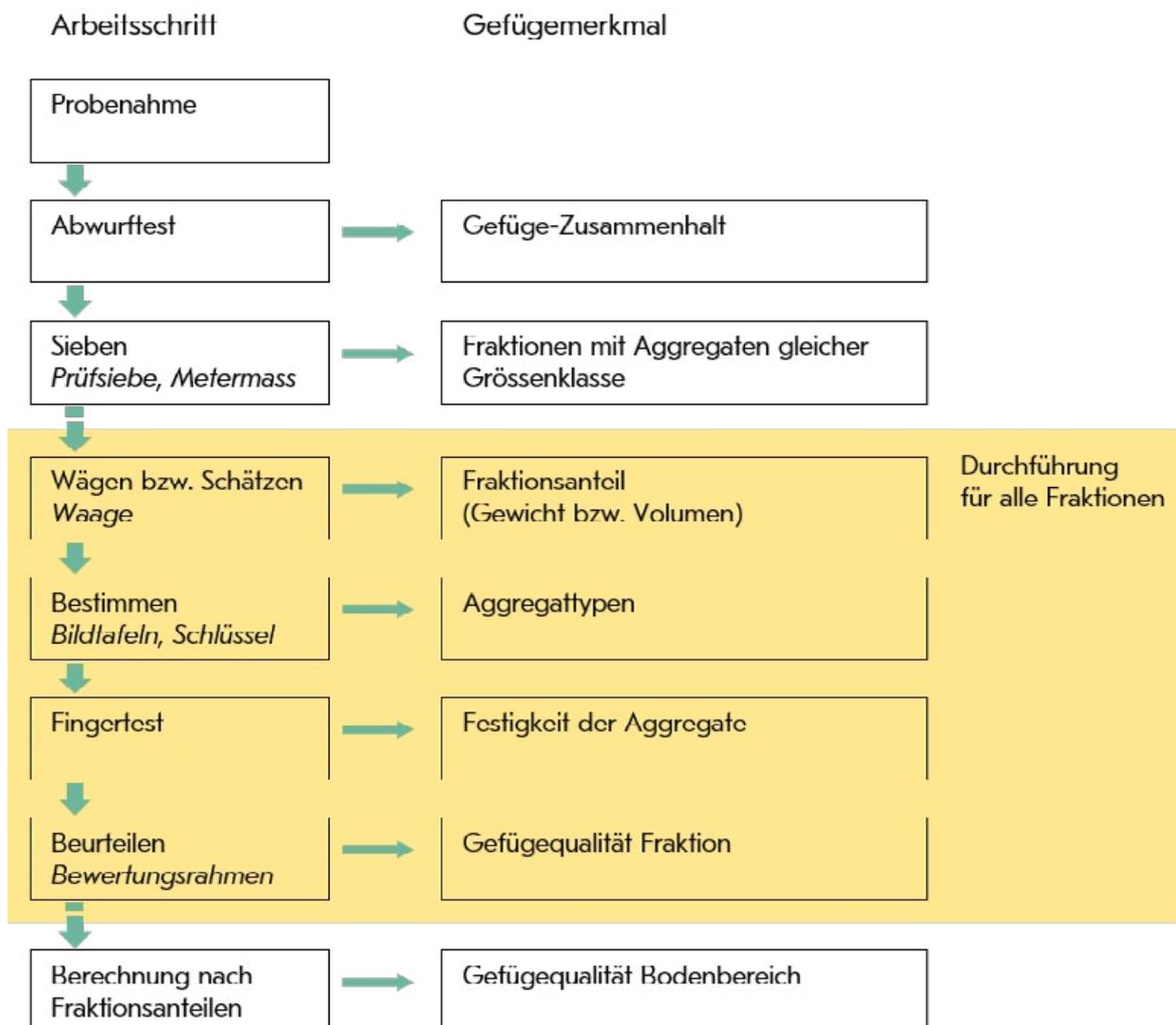


Abbildung 41: Ablauf der visuellen Gefügestbeurteilung der Forschungsanstalt Reckenholz. Graphik adaptiert und verändert nach Nievergelt, Petrasek & Weisskopf, 2002.

Ebenfalls auf der Basis einer Spatenprobe wird die Methode Visual Evaluation of Soil Structure (VESS) durchgeführt (Ball et al., 2017). Auch hier wird die Bodenstrukturqualität direkt im Feld (an der Profilwand oder anhand einer Spatenprobe) mit Hilfe von Tabellen beurteilt. Die Methode ist eine Weiterentwicklung des Peerkamp Spatentest (Peerkamp, 1959). Die Spatenprobe wird von Hand aufgebrochen, um Form, Grösse und sichtbare Porosität von Fragmenten und Aggregaten zu beurteilen. Zudem wird die Durchwurzelung der Probe untersucht. Anhand einer Tabelle werden diesen Parametern Noten zwischen eins und fünf zugeordnet, wobei eins die beste Note und fünf die schlechteste Note ist. Es existiert ein VESS-Vorgehen («VESS-Tabelle») für den Oberboden, aber auch für den Unterboden («subVESS-Tabelle»). Bei subVESS werden Zusammenhalt, Porosität, Durchwurzelung und die Form der Aggregate beurteilt. Sowohl VESS wie auch subVESS sollten nicht bei zu trockenem oder zu nassem Boden durchgeführt werden (Ball et al., 2017).

Um die VESS Methode auch mit Zylinderproben durchführen zu können, wurde das Verfahren angepasst und als «coreVESS Methode» beschrieben. Hierbei werden Zylinderproben im Labor konditioniert (auf -60 oder -100 hPa) und dann nach Festigkeit, Aggregatform und Porosität visuell anhand einer coreVESS-Tabelle beurteilt und benotet. Dies erlaubt eine standardisierte Beurteilung des Bodengefüges (Johannes et al., 2017).

Von der Agroscope, der HAFL und dem FiBL wird eine «neue Spatenprobemethode» erarbeitet. Bei dieser Methode werden anhand einer Spatenprobe die verschiedenen Horizonte bis zur Tiefe von 40 cm in Bezug auf Festigkeit, Art, Grösse und Häufigkeit der Bodenaggregate, auf Porosität,

Farbe und Geruch, Durchwurzelung sowie Regenwurmmaktivität und Ernterückstände untersucht. Pro Bodenschicht wird jedes Kriterium mit einer Note bewertet und in einem Bewertungsformular eingetragen. Für landwirtschaftliche Beurteilungen werden kurzfristige Verbesserungs- und mittelfristige Vorsorgemassnahmen passend zum Ergebnis der Spatenprobe erläutert. Pro Bodenschicht sollten mindestens zwei Spatenproben bei geeignetem Bodenzustand (bis 40 cm Tiefe) durchgeführt werden. Bei Winterkulturen findet die Spatenprobe im Sommer nach der Ernte statt, bei Sommerkulturen Mitte Vegetationsdauer, evtl. zusätzlich nach der Ernte (Weisskopf 2020, persönliche Mitteilung).

4. Diskussion und Konklusion

4.1. Lagerungsdichte

Methoden zur Bestimmung der Lagerungsdichte können in direkte und indirekte Methoden unterteilt werden (Kapitel 3.1., Abbildung 1). Daneben gibt es noch die Möglichkeit der Abschätzung am Profil, was aber lediglich eine grobe Klassierung der Lagerungsdichte ermöglicht: Die durch Schätzung am Profil erhaltenen Werte können aufgrund der Ungenauigkeit nicht für weitere Berechnungen verwendet werden. Die Methode ist jedoch schnell, kostengünstig und ergibt eine erste qualitative Einschätzung der Lagerungsdichte.

Bei direkten Methoden muss im Vergleich zu indirekten Methoden Probenmaterial entnommen werden, was den Aufwand deutlich erhöht und zu Störungen des Bodens führt (destruktive Methoden). Wird die Bodenprobe wie bei der Zylindermethode mit einem bekannten Volumen entnommen, muss sie ausserdem auf das Normvolumen des Zylinders präpariert werden. Dieser Arbeitsschritt bedeutet zusätzliche Arbeit, ist aber für die Genauigkeit der Methode von grosser Bedeutung. Je nach Bodentyp kann eine andere direkte Bestimmungsmethode besser geeignet sein. Die Zylindermethode wird vor allem in Landwirtschaftsböden eingesetzt. Ist der Boden sehr steinhaltig, ist die Aushub-Methode besser geeignet. Ein Aushub dauert allerdings ca. 30 Minuten. Je tiefer im Boden die Messung stattfinden soll, desto arbeitsintensiver und aufwendiger wird die Methode. Wird das Volumen mittels Densitometer oder Ballongerät bestimmt, fallen zusätzliche Kosten für die Anschaffung des Gerätes an. Bei beiden direkten Methoden muss die Probe im Labor für mindestens 24 h zur Ermittlung der Trockenmasse getrocknet werden. Bei sehr tonigen Böden eignet sich aufgrund des guten Materialzusammenhalts die Clod-Methode, die auf dem Prinzip der Verdrängung einer Flüssigkeit bekannter Dichte durch die Bodenprobe beruht. Laut Literatur (Al-Shammary et al., 2018) ist die Entnahme repräsentativer Blöcke aus dem Boden allerdings schwierig, da grosse Blöcke leicht zerfallen. Die Entnahme wird zudem mit zunehmender Bodentiefe immer aufwendiger. Da tonhaltiges

Bodenmaterial länger zum Trocknen braucht, müssen die Proben für mindestens 48 h in den Trockenschrank. Neben der Lagerungsdichte kann bei allen diskutierten Methoden durch Wägen der Probe vor und nach dem Trocknen der gravimetrische Wassergehalt bestimmt werden.

Unter den direkten Methoden sind Methoden, die auf dem gleichen Prinzip wie die Zylindermethode beruhen am weitesten verbreitet und haben die höchste räumliche Auflösung (Al-Shammary et al., 2018; Buchter & Häusler, 2015). Zudem ist die Volumenmessung bei dieser Methode weniger aufwendig als bei den anderen direkten Methoden, da das Volumen direkt durch die Probenahme-Zylinder mit definierten Dimensionen bestimmt wird. In der Literatur wird die Methode als robust beschrieben. Oft wird die Trockenmasse zur Berechnung der Lagerungsdichte erst am Schluss einer Serie verschiedener Messungen an derselben ungestörten Zylinderprobe gemessen, da danach die Probe nicht mehr weiterverwendet werden kann (Kapitel 8.2.). Da bei dieser Methode zur Lagerungsdichte-Bestimmung vorwiegend Geräte gebraucht werden, die in jedem Labor zur Standardausrüstung gehören, gilt diese Methode als kostengünstig und auch für Laien leicht anwendbar.

Im Gegensatz zu den direkten Methoden müssen bei den indirekten Methoden keine Bodenproben entnommen werden. Dadurch sind sie zerstörungsfrei und effizienter. Dies hat den Vorteil, dass die Lagerungsdichte am selben Bodenvolumen mehrfach gemessen werden kann, wodurch die zeitliche Dynamik effizienter erfasst werden kann. Allerdings sind indirekte Methoden wegen ihres Bedarfes an zusätzlichen Messgeräten meist teurer. So sind die Feldmessungen mittels Gammastrahlung (Radiations-Methode) zwar schnell, dafür ist die Anschaffung eines Messgerätes teuer. Das Gerät muss zudem kalibriert werden und setzt eine hohe Expertise des Anwenders sowie erhöhte Ansprüche an Sicherheitsvorkehrungen und Arbeitsorganisation voraus. Die Genauigkeit der Methode wird als

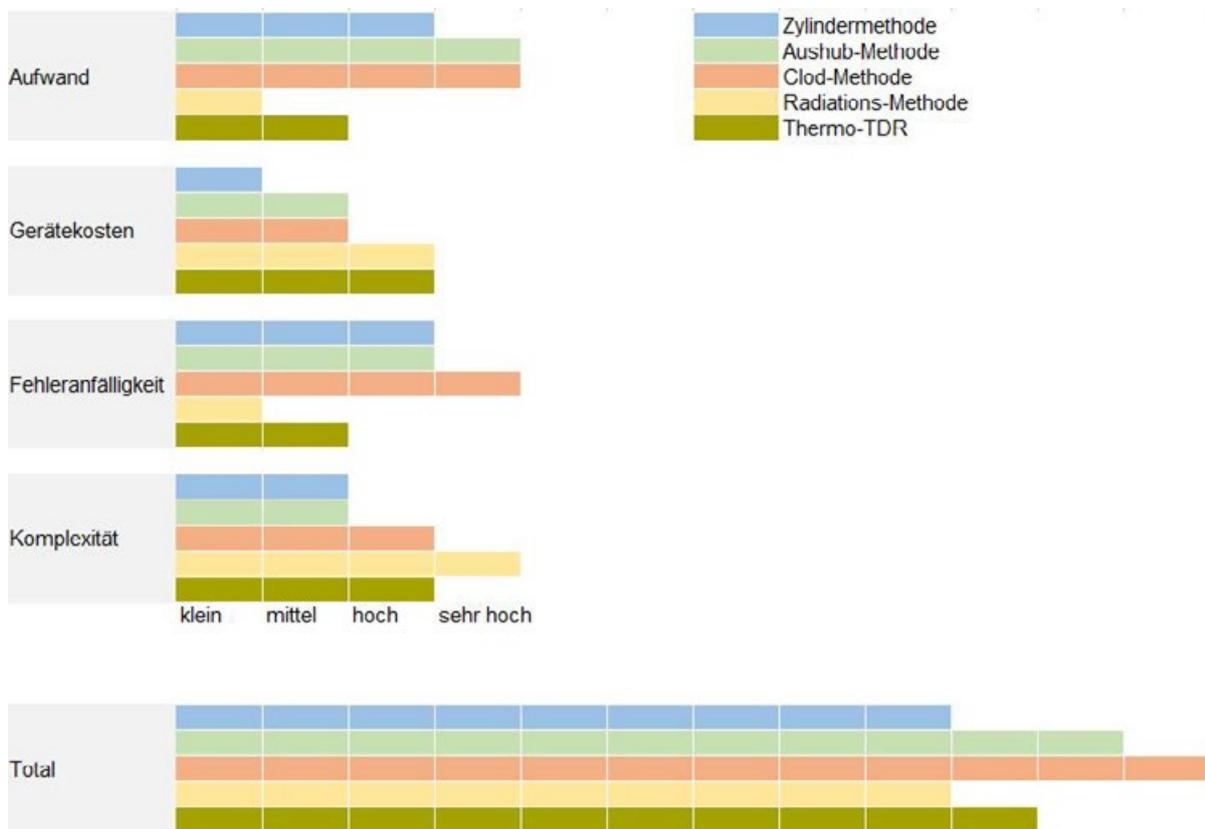


Abbildung 42: Bewertung der Methoden zur Analyse der Lagerungsdichte bezüglich Kosten, Aufwand, Fehleranfälligkeit und Komplexität pro Analyse. Die Kosten beziehen sich dabei nur auf die Gerätekosten. Wartezeiten sind beim Aufwand nicht miteinbezogen. Ein Überblick über die Bewertungskriterien ist in Kapitel 2.1 zu finden. Die Bewertungen sind als relativ zwischen den Methoden zu verstehen. «Total» zeigt die summierten Felder je Methode an. Je grösser das Total, desto schwieriger, teurer, arbeitsintensiver und fehleranfälliger ist die Methode. Die Radiations-Methode wurde dabei nur bis zu einer Tiefe von 30 cm bewertet.

moderat eingestuft. Allerdings nimmt die Fehleranfälligkeit bei Messungen von der Bodenoberfläche aus mit der Bodentiefe stark zu, weshalb höchstens bis 30 cm Tiefe gemessen werden kann (Al-Shammary et al., 2018).

Die Thermo-TDR Methode ist die einzige Methode, mit der die Lagerungsdichte kontinuierlich über die Zeit gemessen werden kann. Die Sonden müssen im Boden vergraben werden, weshalb der Arbeitsaufwand höher ist als bei den anderen indirekten Methoden. Zur Ermittlung der Lagerungsdichte aus den thermischen Eigenschaften des Bodens müssen teilweise auch weitere Parameter, wie zum Beispiel der Wassergehalt oder die Körnung, bekannt sein.

Empfehlung: Trotz des eher hohen Aufwandes schneidet die Zylindermethode, die durch eine Bodenprobenahme von bereits bekanntem Volumen

gekennzeichnet ist, insgesamt am besten ab (Abbildung 42). Sie ist zwar zeitintensiver als indirekte Methoden, kann aber gut in den Laborablauf integriert werden und ist einfach zu handhaben. Zudem lässt sich via Kalibrierung und Fehlerrechnung auch die Genauigkeit und Präzision der Methode einfach bestimmen. Zusätzlich sind die Gerätekosten tief, da die benötigten Geräte zur Standardausrüstung eines Labors gehören sollten, ausser den erforderlichen Stechzylindern. Ist der Boden allerdings zu steinig wird die Methode ungenau und es sollte die Aushub- angewendet werden.

Die Radiations-Methode ist bei Bodenoberflächenmessungen bis zu einer Tiefe von 30 cm sehr gut und mit hoher Genauigkeit anwendbar, was die Tiefenauflösung dieser Methode aber stark beschränkt (Abbildung 42). Deswegen und wegen der erhöhten Sicherheitsvorschriften empfehlen wir die Zylindermethode noch vor der Radiations-Methode.

4.1.1. Degree of compactness

Die Methode nach Hakansson (1990) ist zeitaufwendig (eine Woche Druckapplikation) und benötigt ein Oedometergerät, was nicht in vielen Laboren zu finden ist. Zudem wurde gezeigt, dass Messergebnisse mit geringem Druck (200 kPa) möglicherweise durch Bodenstruktur und Wassergehalt beeinflusst werden, was die Werte für die Referenzdichte verfälscht. Reichert et al. (2009) bestimmten unter Anwendung dieser Methode tiefere Werte für Referenzdichten und somit höhere Werte für den «Degree of compactness», verglichen mit anderen Methoden (u.a. Proctor-Test und verschiedene Druckstufen).

Der Proctor-Test hingegen ist unabhängig vom Anfangswassergehalt, gut standardisiert, und Proctorgeräte sind einfach erhältlich. Diese Methode wird auch von Naderi-Boldaji et al. (2016) zur Bestimmung der Referenzdichte empfohlen.

Empfehlung: Zur Ermittlung des «Degree of compactness» empfehlen wir die Verwendung des Proctor-Tests zur Bestimmung der Referenzdichte, da dieser unabhängiger von anderen Bodenparametern ist. Allgemein sei darauf hingewiesen, dass unabhängig von der Bestimmungsmethode die Referenzdichte stark mit dem Tongehalt korreliert.

4.2. Reelle Dichte

Die reelle Dichte wird aus dem Quotienten von Masse und Festsubstanzvolumen der Bodenprobe gebildet. Das Festsubstanzvolumen kann methodisch unterschiedlich bestimmt werden. Bei der Referenzmethode PY-DR der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten wird das Festsubstanzvolumen mittels Wasserpyknometer bestimmt. Hier werden die Proben über Nacht stehengelassen, für mindestens 20 min gekocht und im Wasserbad thermostatisiert, was den Zeitaufwand erhöht. Zusätzlich werden verschiedene Geräte (Wasserpyknometer, Magnetrührer mit Heizung, thermostatisiertes Wasserbad) für diese Methode benötigt. Die Methode wird als sehr genau bezeichnet (VDLUFA, 2016).

Die Bestimmung mittels Xylol ist im Vergleich zur Referenzmethode weniger zeitintensiv. Allerdings kann es auch hier mehrere Stunden dauern, bis alle Luftblasen aus der Probe entfernt sind (VDLUFA, 2016). Der Umgang mit Xylol ist nicht ungefährlich, wodurch diese Methode in der Praxis weniger Anklang findet. Sowohl die Bestimmung mit Xylol wie auch mit Wasserpyknometer haben den Vorteil,

dass sie an gestörten Bodenproben durchgeführt werden können. Sie lassen sich somit gut am Ende eines Laborablaufes einplanen und es müssen keine zusätzlichen ungestörten Proben entnommen werden (Kapitel 8.2.).

Die Methode mit einem Luftpyknometer benötigt hingegen getrocknete Bodenproben mit ungestörtem Gefüge. Durch die beschränkte Ablesegenauigkeit am Luftpyknometer ist die Genauigkeit dieser Methode schlechter. Die Gerätekosten sind eher hoch, dafür ist der Arbeitsaufwand im Vergleich zu den anderen Methoden deutlich geringer.

Empfehlung: Zur Bestimmung der reellen Dichte empfehlen wir die Referenzmethode der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (PY-DR) mit einem Wasserpyknometer, da sie sich gut in den Laborablauf integrieren lässt und keine zusätzlichen Proben genommen werden müssen.

4.3. Skelettgehalt

Masse Skelettgehalt

Die Masse des Skelettgehaltes wird durch Sieben der Bodenprobe mit einem 2 mm Sieb bestimmt. Dabei kann die Probe entweder trocken oder nass gesiebt werden. Für grössere Volumenproben verwendet die NABO (nationale Bodenbeobachtung der Schweiz) die Nasssiebmethode, für Horizontproben wird der Skelettgehalt durch Trockensieben bestimmt (Schwab & Gubler, 2016). Die Methoden sind vom Aufwand her gleichwertig. Bei beiden Verfahren kann durch Subtraktion der Skelettmasse von der Gesamtmasse der Bodenprobe die Masse der Feinerde bestimmt werden. Beim Trockensieben kann durch das vorgängig erforderliche Zerkleinern mit einem Backenbrecher Boden verloren gehen. Dies beeinflusst die Masse des Skelettgehaltes jedoch nicht. Bei beiden Methoden werden die gleichen Geräte benötigt, die in einem Labor zur Standardausrüstung gehören (2 mm Sieb, Waage, Trockenschrank).

Skelettvolumen

Nach dem Aussieben kann das Volumen des Skelettanteiles mit der Verdrängungsmethode bestimmt werden. Dies erfordert zusätzlichen Aufwand, zudem ist die Bestimmung bei kleinen Skelettgehalten fehleranfällig, da die numerische Auflösung der Volumenablesung beschränkt ist. Alternativ kann das Volumen aus der Masse und der Dichte des Skelettanteiles berechnet werden (Kapitel 3.3., Gleichung 3). Dafür muss die Dichte des Skelettes mittels Wasseryknometer bestimmt werden. Die NABO verwendet seit 2010 einen Schätzwert für die Dichte des Bodenskelettes von 2.4 g/cm^3 für das Berechnen des Volumens (Schwab & Gubler, 2016). Die Verwendung eines Schätzwertes minimiert den Arbeitsaufwand, allerdings auf Kosten eines systematischen Fehlers. Dieser ist besonders bei unterschiedlichen Skelett-Mineralogien von grosser Bedeutung. Alternativ kann der Skelettgehalt in Volumenprozent direkt an der Profilwand visuell geschätzt werden. Dies erfordert jedoch viel Erfahrung und ist immer von den Fähigkeiten der beurteilenden Person abhängig.

Empfehlung: Zur Bestimmung der Masse des Skelettgehaltes empfehlen sich sowohl Trockensieben als auch Nasssieben. Der volumetrische Skelettgehalt wird am einfachsten mit Hilfe von Masse und Dichte des Skelettes berechnet. Bei skelettreichen Böden (ab ca. 10% Skelettanteil) kann das Volumen des Bodenskelettes auch mit der Verdrängungsmethode bestimmt werden.

4.4. Porosität der Bodenstruktur: Gesamtporenvolumen und Porengrößenverteilung

Je nach pF-Bereich werden Untersuchungen zur Porengrößenverteilung mit verschiedenen Apparaturen durchgeführt (Kapitel 3.4.). Messungen bis pF 4.2 werden oft in Laboratorien gemacht. Üblicherweise sind Messungen im Bereich pF 4.2 und höher für die physiologische Wasserverfügbarkeit für Pflanzenwurzeln nicht relevant, deshalb werden sie in den Laboratorien nur selten eingesetzt. Für Modellierungen des Wasserhaushalts können die Messungen in hohem pF Bereich allerdings relevant sein. Bei der Referenzmethode der Eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten wird im Grobporenbereich bis pF 2 mit Sandboxen und hängenden Wassersäulen bzw. mit Tensionsplatten und gesteuertem Unterdruck gemessen. In höheren pF-Bereichen wird die Überdruckmethode mittels Drucktopf verwendet. Die Methoden mit einer Unterdruckapparatur und einem Drucktopf gelten als weitgehend gleichwertig. Analysen der Fachstelle Bodenschutz Zürich haben aber gezeigt, dass die Sandboxmethode mit hängender Wassersäule jeweils kleinere Werte der Porenvolumen ergibt. Es wird vermutet, dass die Sandoberfläche nicht immer die gewünschte Saugspannung aufweist, weshalb die effektiv an der Bodenprobe anliegende Saugspannung mittels Tensiometer an jeder Probe überprüft werden sollte (Isler, Luzius & Buchter, 2001). Ausserdem kann mit der Sandboxmethode mit hängender Wassersäule nur im unteren pF-Bereich gemessen werden, während im Drucktopf über den ganzen Bereich gemessen werden kann (Abbildung 43). Allerdings sind die Messungen mit Drucktöpfen im tiefen Druckbereich von schlechterer Qualität.

Für die Grobporenbestimmung bis pF 2 kann auch die volumetrische Methode mit hängender Wassersäule (VHW-Methode) oder das Messgerät HYPROP 2 (bis pF 2.8) eingesetzt werden. Bei beiden Apparaturen kann jeweils nur eine einzelne Probe eingesetzt und gemessen werden. Dadurch sind mögliche Fehlerquellen und Probleme v.a. im Gröbstporenbereich leichter überprüfbar, der Aufwand wird jedoch deutlich erhöht (Abbildung 43).

Zudem sind die Kosten für ein HYPROP 2-Gerät hoch. Mit Unter- und Überdruckapparaturen können mehrere Proben gleichzeitig gemessen werden (ca. 30 Proben, je nach Grösse der Proben und Apparatur), was den Aufwand deutlich minimiert.

Empfehlung: Für hohe Durchsatzstufen eignen sich Unter- resp. Überdruckapparaturen, da mit ihnen gleichzeitig mehrere Proben gemessen werden können, was auch den Preisunterschied zu Einzelplatz-Apparaturen relativiert. Mit dem Drucktopf kann zudem über den gesamten pF-Bereich gemessen werden, wodurch sich diese Methode besonders empfiehlt. Da die Fehleranfälligkeit im Grobporenbereich jedoch hoch sein kann, empfehlen wir die Messung nach der Referenzmethode der Eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (Abbildung 43).

Gesamtporenvolumen

Das Gesamtporenvolumen kann als Summe der verschiedenen Porengrößenklassen (Desorptionsschritte einer Desorptionskurve) berechnet werden. Oft wird aber das Gesamtporenvolumen unabhängig von der Desorptionskurve bestimmt, um deren Plausibilität zu überprüfen. Für diesen Zweck kann das Gesamtporenvolumen direkt mit dem Luftpyknometer bestimmt werden. Das Festsubstanzvolumen kann direkt am Gerät abgelesen und vom Probenvolumen abgezogen werden, um das Gesamtporenvolumen zu erhalten. Diese Methode ist dementsprechend effizient und die Kosten sind überschaubar. Alternativ kann das Gesamtporenvolumen als Differenz von Lagerungsdichte und reeller Dichte berechnet werden. Die Bestimmung der reellen Dichte mit dem Wasserpyknometer bedeutet allerdings einen erheblichen zusätzlichen Arbeitsaufwand. Zudem muss auch die Lagerungsdichte bekannt sein oder zusätzlich ermittelt werden. Daher ist diese Methode gegenüber dem Luftpyknometer deutlich aufwendiger und die Kosten sind nur unwesentlich kleiner.

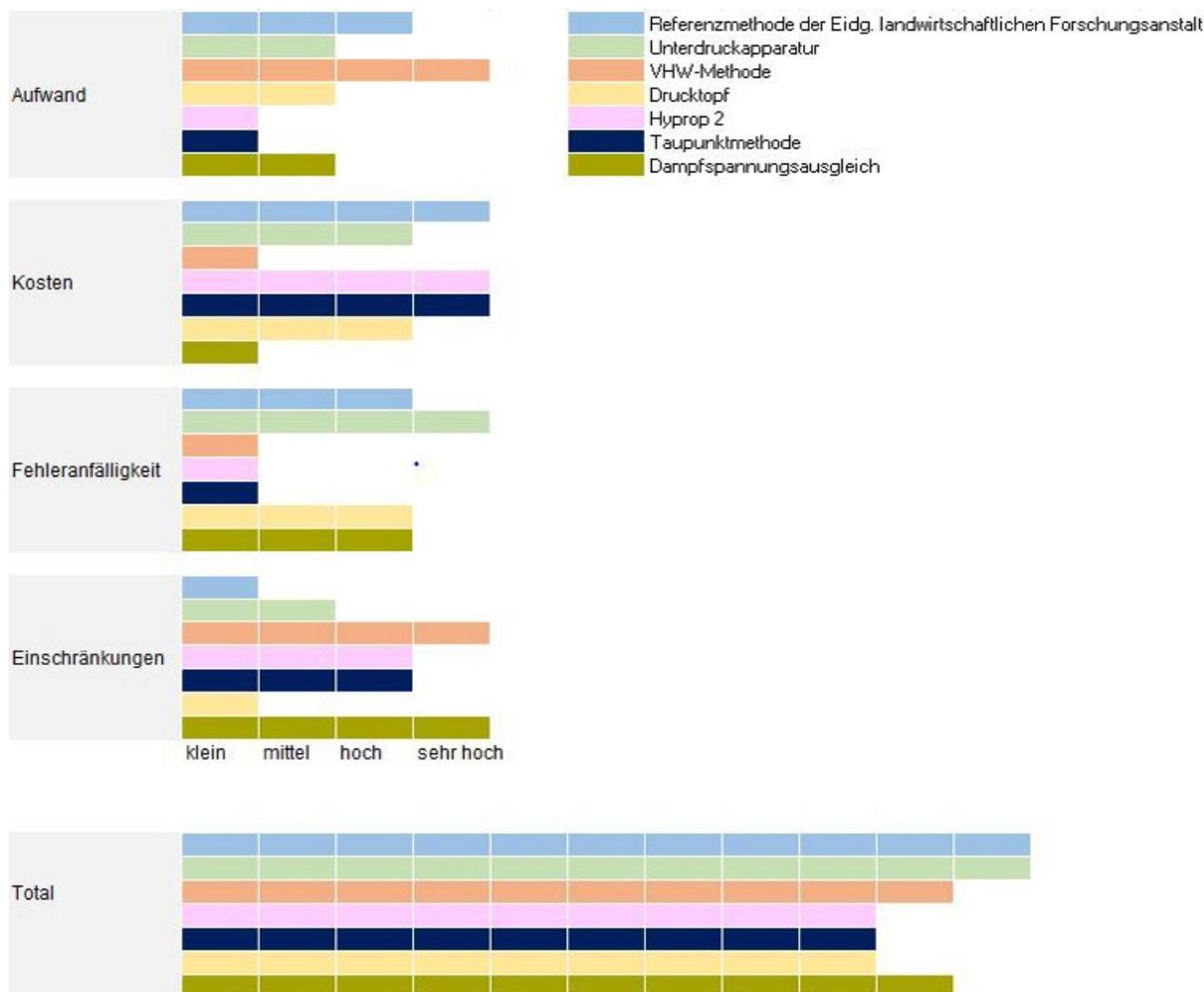


Abbildung 43: Bewertung der Methoden zur Analyse der Porengrößenverteilung bezüglich Kosten, Aufwand, Fehleranfälligkeit und Einschränkungen pro Analyse. Die Kosten beziehen sich dabei nur auf die Gerätekosten. Wartezeiten (z.B. bis zum Einstellen des Gleichgewichts bei einer bestimmten Saugspannung) sind beim Aufwand nicht mit einbezogen. Einschränkungen ergeben sich aus dem Anwendungsbereich: kann mit einer Apparatur über den ganzen pF-Bereich gemessen werden, sind die Einschränkungen klein, kann nur ein spezifischer Bereich gemessen werden, sind die Einschränkungen hoch. Die Einschränkungen beziehen sich ausserdem auf die Probenkapazität der Apparaturen. Kleinere Probenkapazitäten bedeuten hier grössere Einschränkungen. Die Bewertungen sind als relativ zwischen den Methoden zu verstehen. «Total» zeigt die summierten Felder je Methode an. Je grösser das Total, desto spezifischer, teurer, arbeitsintensiver und fehleranfälliger ist die Methode.

Empfehlung: Zur Bestimmung des Gesamtporenvolumens ist die Methode mittels Luftpyknometer am wenigsten aufwendig und daher empfehlenswert. Werden die Lagerungsdichte und die reelle Dichte sowieso bestimmt, bietet es sich an, das Gesamtporenvolumen mit diesen Parametern zu berechnen. Grundsätzlich empfiehlt es sich immer, das Gesamtporenvolumen zur Überprüfung der Korrektheit der Arbeitsabläufe während der gesamten Desorptionmessung als unabhängige Messung zu bestimmen.

4.5. Luftleitfähigkeit

Die Luftleitfähigkeit kann sowohl im Feld wie auch im Labor mit verschiedenen Geräten gemessen werden. Für die Analyse im Labor sind ungestörte Zylinderproben zu entnehmen. Diese können auch pro Horizont entnommen und analysiert werden, was Labormethoden besonders für Böden mit mehreren unterschiedlichen Horizonten geeignet macht. Ausserdem können im Labor Analysen bei verschiedenen Wassergehalten durchgeführt werden. Bei der Probenahme ist darauf zu achten, dass die Porenöffnungen an der Probenoberfläche nicht verschmiert werden. Bei in-situ Messungen wird die Bodenstruktur weniger gestört. Auch eignen sich Feldmethoden besser für lockere Böden, da hier die ungestörte Probenahme schwieriger ist. Allerdings sind bei Feldmethoden die Randbedingungen sowie das zu messende Bodenvolumen schwieriger zu kontrollieren (Ball & Schjønning, 2002).

Die Messgeräte funktionieren nach unterschiedlichen Prinzipien, dieselben Prinzipien lassen sich aber sowohl im Feld wie auch im Labor anwenden.

Das Gasometerprinzip hat den Vorteil, dass der Luftstrom sowohl gedrückt wie auch gesaugt werden kann. Ausserdem sind die Messwerte unabhängig von der aktuellen Versuchstemperatur, da zwei Strömungswiderstände verglichen werden (VLDUFA, 2016).

Das Differenzdruckprinzip wird in Geräten von Herstellern wie Eijkelkamp verwendet. Bei solchen Geräten ist die Abdichtung der beprobten Bodenoberfläche während der Messung einfacher (VLDUFA, 2016; Ball & Schjønning, 2002). Das Gerät PL-300 der Firma Umwelt-Geräte-Technik GmbH funktioniert ebenfalls nach dem Differenzdruckprinzip. Dieses Gerät kann sowohl im Feld wie auch im Labor eingesetzt werden. Zusätzlich können Tensiometer und TDR-Sonden zur Messung der Saugspannung und der Bodenfeuchte installiert werden. Mit diesen Zusätzen können die Randbedingungen im Feld bestimmt werden, was die Interpretation der Daten deutlich verbessert, da die Luftleitfähigkeit von der Bodenfeuchte abhängt (Umwelt-Geräte-Technik GmbH, 2019).

Die akustische Methode kann nur im Feld und nur in der Nähe der Bodenoberfläche angewandt werden, was diese Methode stark limitiert. Zudem muss die Luftleitfähigkeit von den gemessenen akustischen Werten abgeleitet werden, was den Zeitaufwand gegenüber Messgeräten mit direkter Anzeige erhöht.

Empfehlung: Je nach Versuchsfrage bzw. Bodenzustand sollten Feld- oder Laborgeräte gewählt werden. Feldmethoden eignen sich vor allem für lockeren, uniformen Boden. Hier sollte zusätzlich die Bodenfeuchte bestimmt werden, um die Ergebnisse besser interpretieren zu können. Labormethoden zeigen eine höhere Genauigkeit, können mehrfach und bei verschiedenen Matrixpotentialen gemessen und in definierten Horizontmächtigkeiten angewendet werden. Ausserdem können die gemessenen Luftdurchlässigkeiten mit weiteren an derselben Bodenprobe gemessenen Parametern verknüpft werden (siehe ein Beispiel in Anhang 8.2). Die beiden Messprinzipien Gasometerprinzip und Differenzdruckprinzip sind sehr ähnlich zu beurteilen. Ein Messgerät, das sich sowohl im Feld wie auch im Labor nutzen lässt, kann vorteilhaft sein.

4.6. Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Für die Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit stehen Feld- und Labormethoden zur Verfügung, wobei im Feld von der feldgesättigten Wasserleitfähigkeit gesprochen wird. Bei Feldmethoden wird die Wasserleitfähigkeit des Bodens in natürlicher Lagerung gemessen, was wegen der Erfassung profilübergreifender Eigenschaften ein Vorteil gegenüber den Labormethoden sein kann (Buchter et al., 1998). In-situ Messungen spielen insbesondere im Grundwasserbereich eine wichtige Rolle, da in diesem Bereich eine Probenahme mit anschliessender Laboruntersuchung kaum möglich ist (Durner, 2003). Des Weiteren sind die Ergebnisse der Feldmethoden repräsentativer als

an Einzelproben gewonnene Laborwerte (DIN 19682-8, 2012; Durner, 2003). Der zeitliche Aufwand für die Durchführung der Feldmethoden ist jedoch enorm (Abbildung 44). So muss ein Standort z.B. an zwei Tagen in Folge besucht werden, damit der Ruhewasserspiegel erfasst werden kann. Zudem ist in Landwirtschaftsböden selten hoch anstehendes Grund- oder Stauwasser vorhanden, was eine Erhebung im Feld verunmöglicht. Die Bohrloch- und die Piezometermethode fallen deshalb, trotz einiger Vorteile gegenüber den Labormethoden, für eine routinemässige und flächendeckende Messung von Böden ausser Betracht (Buchter et al., 1998).



Abbildung 44: Bewertung der Methoden zur Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit bezüglich Kosten, Aufwand, Fehleranfälligkeit und Einschränkungen. Die Kosten beziehen sich dabei nur auf die Gerätekosten. Wartezeiten sind beim Aufwand nicht miteinbezogen. Einschränkungen beziehen sich auf die flächendeckende Anwendbarkeit der Methoden und die Aussagekraft der Messwerte. Die Bewertungen sind als relativ zwischen den Methoden zu verstehen. «Total» zeigt die summierten Felder je Methode an. Je grösser das Total, desto spezifischer, teurer, arbeitsintensiver und fehleranfälliger ist die Methode.

Labormethoden brauchen zwar weniger Zeit als Feldmethoden, sind aber dennoch zeitintensiv und mit einigen Problemen behaftet. Insbesondere der zeitliche Aufwand für die manuelle Präparation der Bodenprobe sollte nicht unterschätzt werden (rund 10 – 30 min pro Probe, je nach Struktur bzw. Textur). Hinzu kommt die Zeit bis die Probe vollständig aufgesättigt ist. Die präparierten Zylinderproben können dagegen auch für die Bestimmung weiterer Bodenparameter, wie die Lagerungsdichte, verwendet werden. Kleine Zylinderproben repräsentieren, wie bereits erwähnt, den zu untersuchenden Standort häufig ungenügend, und beschreiben höchstens die Eigenschaften eines einzelnen Horizontes. Dies kann bis zu einem gewissen Grad durch eine hohe Probenzahl wettgemacht werden (Buchter et al. 1998). Die Probleme bezüglich der Fehleranfälligkeit und der grossen Bandbreite möglicher Wasserleitfähigkeitswerte und der damit verbundenen schwierigen Interpretierbarkeit der Messwerte sollten jedoch nicht unterschätzt werden (Buchter & Häusler, 2009). Eine Studie der Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich (Buchter et al., 2000a) hat gezeigt, dass Probenlänge und Randeffekte (Wasserfluss zwischen der Zylinderwand und der Bodenprobe) sowie die verwendete Messapparatur einen erheblichen Einfluss auf die Messwerte haben können. Vergleiche mit anderen Labors sind nur möglich, wenn die anzuwendende Methode normiert und genau vorgeschrieben ist sowie regelmässig Ringversuche durchgeführt werden. Als Durchlässigkeitsapparatur sollte ein Gerät gewählt werden, bei dem die Wasserleitfähigkeiten sowohl bei konstanter als auch bei fallender Druckhöhe gemessen werden können, da sich je nach Probe die eine oder andere Methode eignet (Buchter et al. 1998, Buchter et al., 2000a).

Empfehlung: Bei der Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit im Feld oder im Labor handelt es sich grundsätzlich um aufwendige und fehleranfällige Methoden (Abbildung 44). Aus diesem Grund ist die Umsetzung einer grossflächigen und repräsentativen Erhebung dieses Parameters mit einer hohen Durchsatzstufe als schwierig einzustufen, zumal die Wasserleitfähigkeit am gleichen Standort in erheblichem Masse variieren kann und eine beträchtliche zeitliche Dynamik aufweist. Da die beiden Labormethoden der konstanten und fallenden Druckhöhe im Vergleich mit den Feldmethoden einem minimal geringeren Zeitaufwand haben und auch Erhebungen oberhalb des Grundwasserspiegels möglich sind, werden diese, trotz der Vielzahl an Problemen, für die Erhebung der gesättigten Wasserleitfähigkeit empfohlen.

4.7. Wasserinfiltrationsrate

Die Wasserinfiltrationsrate kann sowohl im Feld als auch im Labor bestimmt werden. Im Folgenden sollen jedoch lediglich die Feldmethoden diskutiert werden.

Für die Bestimmung des Parameters in flachem Gelände stehen teilweise methodisch und gerätetechnisch gut etablierte Infiltrometer und Permeameter zur Verfügung (Ghosh et al., 2019). Für die Erhebung der Wasserinfiltrationsrate werden am häufigsten Einzel- und Doppelring-Infiltrometer verwendet. Die Doppelringmethode ist eine etablierte und standardisierte Methode, welche jedoch zeit- und ressourcenaufwendig ist. Die «simplified falling head» Methode wirkt diesen Nachteilen entgegen und ermöglicht eine zeit- und wassersparende Bestimmung der Wasserinfiltrationsrate mit Ringinfiltrometern. Tensionsinfiltrometer ermöglichen ebenfalls eine wassersparende und relativ genaue Bestimmung der Wasserinfiltrationsrate. Zudem kann im Unterschied zu Ringinfiltrometern bei einer gewissen Saugspannung gemessen werden, d.h. bestimmte Porengrößenbereiche lassen sich vom Wassertransport ausschließen. Die Erhebung ist jedoch sehr zeitintensiv. Mit einem Guelph-Permeameter kann die Wasserinfiltrationsrate ebenfalls auf eine einfache und genaue Weise bestimmt werden. Das Gerät kann ohne Probleme von einer Person zusammengebaut und betrieben werden. Durch die Bestimmung im Bohrloch kann das natürliche Bodengefüge jedoch, wie beim Doppelring-Infiltrometer, gestört werden. Die Erhebung im Bohrloch ermöglicht dafür eine tiefendifferenzierte Erhebung. Felderhebungen mit dem Guelph-Permeameter sind ausserdem gut etabliert und werden detailliert in der Literatur beschrieben und diskutiert (Ghosh et al., 2019). Neben der Anwendung von Infiltrometern und Permeametern besteht auch die Möglichkeit, die Wasserinfiltrationsrate mit Beregnungsversuchen (Sprinkler-Infiltrometer) zu bestimmen. Beregnungsversuche kommen jedoch aufgrund der fehlenden Standardisierung der Beregnungsanlagen und der damit einhergehenden Unsicherheiten bezüglich der Erhebung und Auswertung des Parameters für eine flächendeckende Erhebung nicht in Frage.

Empfehlung: Die Methoden zur Messung der Wasserinfiltrationsrate im Feld sind grundsätzlich zeitaufwendig. Zudem handelt es sich bei der Infiltrationsrate um einen in räumlicher und zeitlicher Hinsicht dynamischen Parameter. Es stellt sich deshalb die Frage, ob eine einmalige Erhebung dieses Parameters zu verschiedenen Zeitpunkten im Rahmen einer Bodenkartierung als sinnvoll und aussagekräftig erachtet werden kann. Infiltrationsmessungen können jedoch gebraucht werden, um bodenphysikalische Parameter wie die hydraulische Leitfähigkeit abzuleiten.

Aufgrund der Etablierung und Standardisierung der Doppelring-Methode wird für die Erhebung der Wasserinfiltrationsrate diese Methode empfohlen. Falls jedoch das Bedürfnis für eine wasser- und zeitsparendere Methode besteht, könnte die «simplified falling head»-Methode oder der Guelph-Permeameter eine geeignete Alternative sein. Die «simplified falling head»-Methode ist schnell und einfach und benötigt nicht viel Wasser. Der Guelph-Permeameter ermöglicht einerseits eine tiefendifferenzierte Erhebung des Parameters und kann andererseits von einer einzelnen Person bedient werden. Zudem handelt es sich hierbei ebenfalls um eine gut etablierte Methode.

4.8. Saugspannung

Die Saugspannung kann entweder direkt oder indirekt gemessen werden. Die direkte Bestimmung der Saugspannung erfolgt über die Tensiometrie. Hierbei handelt es sich um eine altbewährte Methode, welche z.B. auch in den kantonalen Bodenfeuchte-Messnetzen der Schweiz eingesetzt wird. Der Vorteil der Methode liegt darin, dass eine direkte Aussage über die Saugspannung gemacht werden kann. Der Nachteil ist jedoch, dass bei langanhaltender Trockenheit oder Frost keine Messungen gemacht bzw. die Geräte nicht eingesetzt werden können (Stehrenberger & Huguenin-Landl, 2016). Bauartbedingt können Tensiometer zudem lediglich Saugspannungen zwischen 0–850 hPa erfassen, der Messbereich ist somit stark begrenzt. In den letzten Jahren wurden jedoch sogenannte Ultra High-Tensiometer entwickelt, welche auch höhere Saugspannungen messen können. Diese Geräte befinden sich aber noch in der Entwicklungsphase und werden bisher nicht standardisiert eingesetzt (Mendes & Gallipoli, 2020). Indirekt kann die Saugspannung mit sogenannten Equitensiometern und mit Bodenfeuchtesensoren (elektrische bzw. thermische Leitfähigkeit) bestimmt werden. Für jede Messmethode gibt es eine Vielzahl verschiedener Messgeräte bzw. Sensoren und Hersteller. Alle Geräte haben den Vorteil, dass sie wartungsfrei und frostsicher sind und einen relativ grossen Messbereich abdecken, insbesondere im Bereich trockener Böden (Pan, 2010). Es handelt sich jedoch um nicht standardisierte Messverfahren, für die teilweise Erfahrungswerte aus der Praxis fehlen. Die Bodenfeuchtesensoren reagieren des Weiteren träger auf wechselnde Bodenfeuchtigkeiten als Tensiometer und erfordern teilweise eine individuelle Kalibrierung.

Empfehlung: Für die Bestimmung der Saugspannung empfehlen wir aufgrund der vielen Erfahrungswerte und der standardisierten Methode den Einsatz von Tensiometern. Je nach Fragestellung, Anwendungsdauer und -bereich stehen unterschiedliche Grössen und Bauweisen zur Verfügung. Für genaue, kontinuierliche Messungen der Saugspannung mit aussagekräftigen Daten sind jedoch Kombinationsmessungen mit indirekten Messmethoden oder mit Methoden zur Bestimmung des Wassergehaltes empfehlenswert («Felddesorptionskurven»). Sollen Equitensiometer oder Bodenfeuchtesensoren für die Bestimmung der Saugspannung angewendet werden (indirekte Methoden), empfehlen sich Kontrollmessungen mit Tensiometern (Matile & Meyer, 2017; Stehrenberger & Huguenin-Landl, 2016).

4.9. Wassergehalt

Der Wassergehalt kann entweder direkt oder indirekt gemessen werden. Indirekte Messungen mit Sonden haben den Vorteil, dass der Wassergehalt mehrmals am selben Ort und über längere Zeiträume gemessen werden kann. Somit können Schwankung des Wassergehaltes innerhalb desselben Bodenvolumens erfasst werden. Direkte Messungen sind destruktiv und werden vor allem zur Kalibrierung indirekter Messungen gemacht (Gimper, 2010; Weil & Brady, 2017). Unter den direkten Messungen ist die gravimetrische Messung am einfachsten durchzuführen und in den Laborablauf zu integrieren (Kapitel 8.2.). Sie gilt auch als Referenzmethode für den Wassergehalt, nach der andere indirekte Methoden kalibriert werden (Stahr et al., 2012; Weil & Brady, 2017; Fühler & Roth, 2004). Durch die Probennahme ist die Methode arbeitsaufwendiger als indirekte Messungen, die Gerätekosten sind jedoch günstiger.

Da der Wassergehalt oft nicht nur einmal, sondern kontinuierlich über die Zeit gemessen werden soll, sind indirekte Methoden der normale Anwendungsfall (Fühler & Roth, 2004). Bei diesen Methoden ist besonders auf einen guten Kontakt zwischen Boden und Sondenoberfläche zu achten, da sonst die Messergebnisse verfälscht werden können. Weiter erhöht eine bodenspezifische Kalibrierung die Genauigkeit, indem der Einfluss der Bodenstruktur und allenfalls einer besonderen Zusammensetzung der Festsubstanz reduziert wird (Gimper, 2010). Mit einigen Sonden kann zudem gleichzeitig auch die Bodentemperatur ermittelt werden. Unter den indirekten Methoden ist die TDR-Messung zurzeit die wichtigste und auch genaueste Methode (Stahr et al., 2012; Gimper, 2010). Oft sind auch Sonden auf dem Markt zu finden, die nur von einzelnen Firmen entwickelt worden sind und hergestellt werden. Diese Sonden sind meist günstiger als die anderen erwähnten Sonden, allerdings ist jeweils nicht klar, wie umfangreich diese Sensoren auf Genauigkeit und Brauchbarkeit getestet worden sind (Gimper, 2010).

Empfehlung: Zur einmaligen Bestimmung des Wassergehaltes mit minimalem Aufwand empfiehlt sich die gravimetrische Methode, da keine Sensoren verbaut werden müssen. Wird sowieso ein bodenphysikalischer Laborablauf eingehalten, kann der Wassergehalt auch gleich volumetrisch bestimmt werden (in Anhang 8.2 ist ein Beispiel zu finden). Es stellt sich allerdings die Frage, wie aussagekräftige eine einmalige Erhebung des Wassergehaltes im Feld ist, da dieser zeitlich und räumlich stark variieren kann. Zur kontinuierlichen Messung des Wassergehaltes werden TDR-Sonden empfohlen, da diese erfahrungsgemäss präzise Resultate liefern.

4.10. Nutzbare Feldkapazität

Die nutzbare Feldkapazität wird als Differenz der Wassergehalte bei Feldkapazität und am permanenten Welkepunkt (pF 4.2) bestimmt. Dafür werden die Wassergehaltswerte bei pF 1.8 und pF 4.2 aus der Desorptionskurve abgelesen. Beim Auslesen der Wassergehaltswerte aus der Desorptionskurve kann die Feldkapazität je nach Grundwasserstand zwischen pF 1.8 und pF 2.5 variieren. Da je nach Literatur und Land die Feldkapazität anders definiert wird, ist der Referenz-Saugspannungswert für die Feldkapazität umstritten und liegt in einem Bereich zwischen pF 1.8 und 2.5. Wird eine Desorptionskurve bestimmt, können daraus die Werte bei verschiedenen Saugspannungen ausgelesen werden. Somit kann man für jedes nFK-System einen geeigneten Vorschlag machen. Alternativ können Proben direkt bei Feldkapazität entnommen und deren Wasser-

gehalt bestimmt werden. Allerdings ist auch hier schwierig zu bestimmen, wann nun tatsächlich Feldkapazität vorliegt. Zudem ist die Probenahme dann stark von der Witterung abhängig. Nach der Entnahme werden die Bodenproben bei pF 4.2 entwässert, um das Feinporenvolumen zu bestimmen. Dafür ist ein Drucktopf und eine Neupräparation der Probe (Volumenverkleinerung) notwendig, was diese Methode teuer und aufwendig macht.

Empfehlung: Die nutzbare Feldkapazität kann am einfachsten aus der Desorptionskurve abgelesen werden. Auch wenn die Definition der Feldkapazität bei einem bestimmten pF umstritten ist, liefert diese Labormethode ein kohärentes Set an Messwerten, das Kennwerte für jede nFK-Definition liefern kann.

4.11. Wasserstand

Zur Messung des Wasserstandes im Boden kann entweder die Bohrloch- oder die Piezometer-Methode angewendet werden. Wird beim Piezometerrohr zusätzlich ein Schwimmer angebracht, kann der Wasserstand kontinuierlich über die Zeit gemessen werden (Blume, Stahr & Leinweber, 2011). Das Prinzip der beiden Methoden ist sehr ähnlich. Die Bohrloch-Methode hat allerdings den Vorteil, dass keine weiteren Geräte (wie ein Piezometerrohr) gebraucht werden und ist daher kostengünstiger. Allerdings muss der Boden stabil genug sein, damit das Bohrloch während der Einstellung des Ruhewasserspiegels nicht zerfällt. Da der Grundwasserspiegel stark schwanken kann, macht es Sinn, den Wasserstand über eine längere Zeit zu messen. Dafür ist es sinnvoll, das Bohrloch mit einem Piezometerrohr zu stabilisieren. Somit wird garantiert, dass der Wasserstand immer am gleichen Ort und mit der gleichen Bezugsebene

gemessen wird. Der Aufwand ist bei beiden Methoden ähnlich, die Messstation muss mindestens zweimal besucht werden, da sich der Ruhewasserpegel erst nach einer gewissen Zeit einstellt. Je feiner die Textur des Bodens, desto länger dauert die Einstellung des Ruhewasserpegels (Gray & Mahapatra, 1965). Es sollten aber immer mehrere Messungen stattfinden, um die Schwankungen des Grundwasserspiegels repräsentativ erfassen zu können.

Empfehlung: Wir empfehlen den Wasserstand mit der Piezometer-Methode zu messen. Damit wird garantiert, dass das Bohrloch stabil ist und die Messung sachgemäß über längere Zeit durchgeführt werden kann. Da der Grundwasserspiegel stark schwanken kann, lohnt es sich, über einen längeren Zeitraum zu messen.

4.12. Redoxpotential

Das Redoxpotential wird üblicherweise direkt im Feld bestimmt. Die Elektroden müssen im Boden eingebracht werden, wobei darauf geachtet werden muss, dass ein guter Kontakt zwischen Boden und Elektrode besteht, damit keine Messfehler auftreten. Die Elektroden sind sehr stabil, wodurch sie für viele Messungen und über mehrere Jahre genutzt werden können, was den hohen Preis der Sonden wieder relativiert. Das Redoxpotential kann direkt vom Messgerät abgelesen werden, an das die Elektroden angeschlossen sind. Über dieselben Sonden kann gleichzeitig auch die Sauerstoffdiffusionsrate (ODR) bestimmt werden. Es muss aber berücksichtigt werden, dass dadurch die Messung des Redoxpotentials beeinflusst werden kann und deshalb die Messfrequenz reduziert werden muss. Die IRIS-Methode scheint ungenauer zu sein, da eine eher qualitative Bewertung erfolgt, die allein auf der Auswertung der visuellen Merkmale basiert. Da bei der IRIS-Methode der Standort zweimal besucht werden muss, ist der Zeitaufwand deutlich höher als bei der einmaligen Messung mittels Elektroden.

Empfehlung: Am besten wird das Redoxpotential mittels Elektroden direkt im Feld bestimmt. Das Redoxpotential variiert jedoch räumlich und zeitlich so stark, dass eine einmalige Erhebung im Feld normalerweise nicht aussagekräftig ist. Allgemein sind Redoxmessungen zeit- und wartungsintensiv. Zudem ist die Interpretation nicht trivial und erfordert die Verfügbarkeit weiterer Bodenparameter, weshalb wir von einmaligen Messungen des Redoxpotentials bei Bodenkartierungsprojekten abraten.

4.13. Eindringwiderstand

Der Eindringwiderstand kann entweder mit statischen oder dynamischen Geräten gemessen werden. Dazu können Winkel und Durchmesser der Sondenspitzen der verschiedenen Geräte variieren. Da sowohl der Eindringmechanismus wie auch die Eigenschaften der Sondenspitze die Penetrometer-Ergebnisse beeinflussen, ist der Vergleich von Messungen mit verschiedenen Penetrometern erschwert (Schwab, Dietrich & Gubler, 2018; Lutz & Keller, 2020). Zusätzlich hängt der gemessene Eindringwiderstand stark vom Bodenwassergehalt, der Lagerungsdichte, der Bodentextur und von der Handhabung des Gerätes ab (Schwab, Dietrich & Gubler, 2018; Herrick & Jones, 2002; Dexter et al., 2007). Dies erschwert auch den Vergleich von Werten, die mit demselben Gerät an verschiedenen Standorten und Zeitpunkten bestimmt worden sind (Lutz & Keller, 2020).

Untersuchungen zwischen der dynamischen PANDA-Sonde und dem statischen Penetrologger von Eijkelkamp haben gezeigt, dass die PANDA-Sonde deutlich höhere Werte für den Eindringwiderstand ergibt. Die Messwerte scheinen in kompakteren Zonen deutlicher anzusteigen, d.h. die PANDA-Sonde reagiert sensitiver auf Verdichtungen als der Penetrologger. Ausserdem ist die PANDA-Sonde auch bei einer grösseren Bandbreite an Bodenbedingungen (wie höheren Skelettgehalten) einsetzbar (Schwab, Dietrich & Gubler, 2018; Lutz & Keller 2020). Bei Penetrologgern wird empfohlen, Messungen lediglich mit der 1 cm²-Sondenspitze durchzuführen, da diese sensitiver auf Verdichtungen reagiert und einfacher anzuwenden ist als Sondenspitzen mit grösserer Querschnittsfläche (Lutz & Keller, 2020). Statische Penetrometer wie der Penetrologger erfordern einen deutlich geringeren Messaufwand als dynamische Penetrometer wie die PANDA-Sonde: Für eine Erhebung mit 20 Einzelmessungen werden 45 Minuten gebraucht, bei der PANDA-Sonde ist der Aufwand rund doppelt so hoch (Schwab, Dietrich & Gubler, 2018; Lutz & Keller 2020). Die PANDA-Sonde wird in der Schweiz und in Frankreich häufig angewandt. Ausserhalb dieser Länder wird das Gerät aber kaum eingesetzt, weshalb die internationale Vergleich-

barkeit von Ergebnissen statischer Penetrometer wie dem Penetrologger besser ist. Bei beiden Geräten zeigte sich deutlich, dass der Eindringwiderstand umso geringer ist, je höher der Wassergehalt ist. Der Einfluss des Bodenwassers muss also zwingend bekannt sein, wenn mehrere Messungen miteinander verglichen werden sollen. Auch wurde bei beiden Geräten gezeigt, dass Werte, die von unterschiedlichen Personen erhoben wurden, stärker streuen, als wenn immer dieselbe Person das Gerät benutzt (Schwab, Dietrich & Gubler, 2018). Dieser Einfluss ist bei Geräten, die mit hydraulischer oder elektrischer Kraft betrieben werden, deutlich geringer. Solche Geräte sind aber meist auch schwerer und umständlicher in der Handhabung. Beim Light Weight Deflectometer wird anstatt eines Hammers (wie bei der PANDA-Sonde) ein montiertes Gewicht benutzt, was ebenfalls den Einfluss des Operators minimiert, da immer dieselbe Kraft auf die Sonde einwirkt.

Empfehlung: Wegen der internationalen Vergleichbarkeit und des geringeren Aufwandes empfehlen wir für eine landesweite Bodenkartierung ein statisches Gerät, wie zum Beispiel den Penetrologger zur Messung des Eindringwiderstandes. Es stellt sich allerdings die Frage, wie aussagekräftig eine einmalige Erhebung des Eindringwiderstandes ist, da dieser zeitlich und räumlich stark variieren kann.

4.14. Schrumpfverhalten des Bodens

Zur Darstellung einer Schrumpfkurve müssen während des Trocknungsvorganges einer Bodenprobe simultan deren Volumen und Wassergehalt kontinuierlich gemessen werden. Der Wassergehalt kann gravimetrisch bestimmt und mit automatischen Waagen problemlos über die Zeit gemessen werden. Schwieriger ist die kontinuierliche Ermittlung des Bodenvolumens. Hierbei muss die Methode möglichst geeignet für kontinuierliche Messungen sein.

Die Methoden zur Ermittlung des Volumens einer Bodenprobe können in direkte und indirekte Methoden unterteilt werden. Bei direkten Methoden kommt die Probe zur Volumenmessung zumindest in Kontakt mit einem Messgerät. Dies erhöht das Risiko, dass die Probe zerstört wird. Deshalb sind indirekte Methoden, die kontaktlos messen, attraktiver (Li & Zhang, 2019). Das Messen von Höhe und Durchmesser mittels Schublehre oder Wegsensor ist nur bei festen, gleichmässig zylindrischen und schön präparierten Proben anwendbar, da sonst die Fehleranfälligkeit hoch ist. Der Wegsensor hat allerdings den Vorteil, dass kontinuierliche Messungen gemacht werden können, ohne die Probe anderweitig zu beeinträchtigen. Die Ermittlung des Volumens mittels archimedischem Verdrängungsprinzip funktioniert auch bei unförmigen Proben zufriedenstellend, allerdings besteht hier das Risiko, dass die (lockere) Probe bei der Messung zerstört wird. Zudem ist diese Methode für kontinuierliche Messungen ungeeignet, und kleine Volumenänderungen werden nur unzureichend erfasst. Bei allen direkten Methoden ausser dem Wegsensor wird das Volumen nicht kontinuierlich über die Zeit gemessen, sondern es werden nur einzelne Punkte auf der Schrumpfkurve ermittelt (Braudeau et al., 1999). Dieses Problem besteht auch bei der indirekten Methode mittels Photogrammetrie. Bei einem Retractometer hingegen werden sowohl Volumen wie auch Gewicht simultan und kontinuierlich gemessen, was die Genauigkeit der Kurve erhöht. Zudem ist hier der Arbeitsaufwand für den Anwender kleiner, da nur die Probe in das Gerät eingesetzt werden muss und die restlichen Mes-

sungen automatisiert ablaufen. Dafür sind die Gerätekosten deutlich höher als bei den anderen Methoden. Die Analyse im Retractometer dauert zwei bis drei Tage (Braudeau et al., 1999; Gabrielli Technology, 2020).

Empfehlung: Die Analyse mit einem Retractometer ist am wenigsten fehleranfällig. Die Gerätekosten sind zwar hoch, der Aufwand ist aber deutlich geringer als bei anderen Methoden. Da nur eine Probe pro Durchgang analysiert werden kann, eignet sich ein Retractometer nicht für Untersuchungen mit hohen Durchsatzzahlen. Darum empfehlen wir die Ermittlung des Volumens bei gleichmässigen Proben mittels Wegsensor. Hier sind die Gerätekosten tiefer, und es können mehrere Messplätze eingerichtet werden.

4.15. Aggregatsstabilität

Zur Bestimmung der Aggregatsstabilität existiert ein breites Spektrum an Methoden. Häufig verwendet werden die Nass- und Trockensiebung, Dispergierungsuntersuchungen mit Ultraschall oder Turbidimetrie, sowie Beregnungsversuche (Burri, 2006; Mair, 2017; Le Bissonnais 2016). Dabei basieren alle Messverfahren auf demselben Prinzip: Es wird gemessen, wie sich Aggregate unter Kraffteinwirkung verändern. Dabei wird ein Zustand vor und nach der Messung untersucht, und das Aggregatsstabilitätsmass ergibt sich aus dem Vergleich dieser beiden Zustände (Mair, 2017). Je nach Methode und Verfahren wird eine andere einwirkende Kraft und damit ein anderer Aspekt der Aggregatsstabilität untersucht. Zudem wird die Aggregatsstabilität nicht immer gleich dargestellt: Oft wird ein «mean weight diameter» berechnet oder die Aggregatsstabilität wird als prozentualer Anteil stabiler Aggregate angegeben. Deshalb sind die Ergebnisse verschiedener Methoden nicht direkt miteinander vergleichbar (Burri, 2006; Mair, 2017).

Bezüglich Zeitbedarf scheint die Dispergierbarkeit von Ton am aufwendigsten zu sein, da die Proben für 18 Stunden ruhen müssen. Ansonsten ist die Methode aber nicht sehr aufwendig. Bei der Nasssiebmethode sind die Proben während einer Stunde in der Siebmaschine. Beim Ultraschallverfahren muss die Probe vorgängig mit Ultraschall dispergiert werden, was zusätzlichen Aufwand bedeutet. Zudem werden bei diesem Verfahren verschiedene Geräte benötigt (Ultraschallbad und Nasssiebturm). Die Trockensiebung ist bedeutend schneller als die Nasssiebung, da die Proben für lediglich ca. 10 Minuten gesiebt werden. Allerdings wird dabei auch eine andere Kraffteinwirkung (Wind anstatt Regen) betrachtet. Das Beregnungsverfahren bildet die realen Bedingungen im Feld gut nach. Allerdings ist auch hier der Aufwand hoch. Sollte ein «mean weight diameter» angegeben werden, ist nach dem Versuch noch eine Siebung durchzuführen. Grundsätzlich erfordern viele Methoden einen Eingriff in die Bodenstruktur, um Aggregate aus dem Verband herauszulösen, und anschliessend eine mechanische Siebbelastung, um die einzelnen Aggregate in Grössenklassen aufzutrennen.

Diese Arbeiten erfordern nicht nur einen hohen Zeit- und Arbeitsaufwand, sondern erschweren die methodisch einheitliche Durchführung der Untersuchungen und Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Das Messverfahren der Perkulationsstabilität bedeutet einen geringen Arbeits- und Geräteaufwand für die Messung. Eine Messung dauert lediglich 10 min. Es müssen keine speziellen Geräte angeschafft werden, somit sind die Kosten für diese Methode gering. Messwiederholungen zeigen eine geringe Streuung, weshalb sich diese Methode eignet, um die Aggregatsstabilität in Hinblick auf die Erosionsanfälligkeit zu bestimmen (Kainz & Weiss, 1988).

Da je nach Verfahren ein anderer Aspekt des Gesamtsystems erfasst wird, muss die Wahl einer geeigneten Methode auf die jeweilige Fragestellung ausgerichtet sein. Es ist dabei wichtig, dass Typ und Stärke der einwirkenden Kräfte im Bereich realer Einwirkungen sind (Burri, 2006, Mair, 2017, Le Bissonnais 2016). Aus diesen Gründen wird hier auf eine Methodenempfehlung verzichtet.

4.16. Visuelle Strukturbeurteilung

Es existiert eine Vielzahl an visuellen Methoden, um den Bodenzustand zu beurteilen. Bei der Spaten-diagnose nach Görbing wird die Bodenstruktur direkt im Feld beschrieben. Es ist eine günstige und schnelle Methode, hat aber den Nachteil, dass es lediglich eine Beschreibung ist, ohne eine Bewertung des Strukturzustandes vorzunehmen. Dies macht es schwierig, verschiedene Proben miteinander zu vergleichen (Beste, 2005). Um bei dieser Methode Zahlenwerte zu erhalten, kann die Spaten-diagnose nach Görbing zum Beispiel mit der Gefüge- und Wurzelbonitur nach Beste (2003) kombiniert werden (siehe dazu Beste, 2003). Dies erhöht allerdings den Zeitaufwand sowie die Gerätekosten, da zusätzliche Geräte benötigt werden. Auch die visuelle Beurteilung der Aggregat- und Segregattypen von Nievergelt, Petrasek & Weisskopf (2002) findet direkt im Feld statt. Bei dieser Methode liegt der Fokus auf den Aggregaten bzw. Segregaten, welche in Grössenklassen und Typen unterteilt werden (Nievergelt, Petrasek und Weisskopf, 2002). Dafür sind Siebe und eine Waage notwendig, was sowohl die Kosten wie auch den Aufwand dieser Methode erhöht. Die VESS-Methode ist günstig, schnell und einfach durchzuführen (Johannes et al., 2017). Zudem kann diese Methode sowohl für die Beurteilung des Oberbodens (VESS) wie auch des Unterbodens (sub-VESS) verwendet werden. Eine umfangreiche Analyse, ohne zusätzliche Geräte zu benötigen, bietet auch die neue Spatenprobemethode von der Agroscope, der HAFL und dem FiBL. Diese ist sowohl für Ober- wie auch Unterböden geeignet (0–40 cm) und beurteilt den Boden nach mehreren Kriterien bezüglich Struktur und biologischer Aktivität. Zudem werden hier – passend zum Ergebnis der Spatenprobe – Verbesserungs- und Vorsorgemassnahmen für die landwirtschaftliche Bodenbewirtschaftung vorgeschlagen (Weisskopf 2020, persönliche Mitteilung).

Bei allen genannten Methoden ist der Wassergehalt des Bodens bei der Durchführung der Beurteilungen eine kritische Grösse. Es kann passieren, dass der Effekt des Bodenwassers auf die Bodenfestigkeit nicht richtig erkannt wird und so zu falschen Einschätzungen führt (Guimaraes et al., 2017). Eine weitere Einschränkung der Methoden ist ihre Subjektivität. Es wird daher dazu geraten, die Beurteilungen mindestens zu zweit durchzuführen und das Erkennungsvermögen der beteiligten Personen regelmässig zu schulen (Johannes et al., 2017). In der coreVESS Methode werden diese zwei Limitationen angegangen. Durch die Konditionierung der Bodenproben im Labor auf eine Standard-Bodenfeuchte von -60 oder -100 hPa wird der Einfluss unterschiedlicher Bodenfeuchten minimiert und die Ergebnisse vergleichbarer gemacht. Dies bedeutet aber auch höhere Gerätekosten und einen zusätzlichen Aufwand, da die Konditionierung der Probe ca. eine Woche dauert. Durch die anonymisierte Beurteilung der Proben im Labor wird die Subjektivität verringert. Somit ist dieses Verfahren standardisierter als andere Methoden zur Beurteilung des Strukturzustandes; trotzdem wird auch hier geraten, die Proben zu zweit zu beurteilen (Johannes et al., 2017). Weil bei dieser Methode nur eine isolierte Zylinderprobe analysiert wird, erhält man verglichen mit einer Spatenprobe oder einer Profilsprache im Feld nur ein beschränkter Einblick in den Strukturzustand eines natürlich gewachsenen Bodens.

Empfehlung: Wird eine möglichst standardisierte Methode favorisiert, ist die coreVess-Methode zu empfehlen. Für eine rasche Bestimmung im Feld empfiehlt sich die VESS-Methode, weil hier keine zusätzlichen Geräte gebraucht werden und das Bodengefüge mit einer Note beurteilt wird. Interessant wird sicher aber auch die neue Spatenprobe-Methode der Agroscope, HAFL und des FiBL werden, wenn diese fertig ausgearbeitet ist.

4.17. Übersicht der empfohlenen Messmethoden

Lagerungsdichte	Zylindermethode, Radiations-Methode
Reelle Dichte	Referenzmethode der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten
Masse Skelettgehalt	Trockensiebung, Nasssiebung
Skelettvolumen	rechnerisch als Quotient, Tauchwägung (ab ca. 10% Skelettvolumen)
Gesamtporenvolumen	Luftpyknometrie / Gaspyknometrie
Porengrössenverteilung	Referenzmethode der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (PYZYL-P)
Feinporenvolumen	Taupunkt-Methode (1'000 hPa – 50'000 hPa)
Luftleitfähigkeit	Differenzdruckprinzip
gesättigte Wasserleitfähigkeit	konstante Druckhöhe, fallende Druckhöhe
Wasserinfiltrationsrate	Tensionsinfiltrimeter (engl.: disc permeameter), Guelph-Permeameter (engl.: constant head well-permeameter)
Saugspannung	Tensiometrie
Wassergehalt	gravimetrische Messung, TDR (Time Domain Reflectometry)
nutzbare Feldkapazität	Ablezen aus Desorptionskurve (Differenz zwischen Feinporenanteil und Mittel- und engen Grobporen)
Wasserstand	Piezometerrohr
Eindringwiderstand	statisches Penetrometer
Degree of Compactness	Proctor-Test
Entwässerungsverhalten des Bodens	Messung mittels Wegsensor / Wegaufnehmer (displacement transducer), Retractometer
Visuelle Strukturbeurteilung	VESS (visual evaluation of soil structure), CoreVess, neue Spatenprobe-Methode

Tabelle 3: Übersicht über die in diesem Bericht untersuchten bodenphysikalische Parameter und den dazu empfohlenen Messmethoden.

4.18. Schlussbemerkungen

Die Recherche beschränkt sich auf eine Liste von physikalischen Bodeneigenschaften, welche vom Auftraggeber KOBO vorgegeben wurde. Andere bodenphysikalische Eigenschaften, z.B. mechanische Bodeneigenschaften (welche z. B. für die vorsorgliche Verminderung des Bodenverdichtungsrisikos notwendig wären), waren nicht Bestandteil dieser Recherche.

In Anbetracht der Bedeutung der anstehenden Entscheidungen zur Auswahl von Parametern und Methoden für die Quantifizierung von Bodeneigenschaften im Rahmen von grossflächigen Bodenkartierungen sind uns besonders zwei Punkte aufgefallen:

- **Parameterauswahl für wichtige Kundenkreise:** Wenn bei der Auswahl von quantitativen Bodenparametern zur Ergänzung und Abrundung der Bodeninformationen aus den Bodenkartierungen für wichtige Kundenkreise relevante Parameter nicht ausgewählt werden, dürfte es schwierig sein, diese Parameter später jemals noch in der bei Kartierungen möglichen Breite an Standort erheben zu können.

Deshalb könnten wir uns vorstellen, dass eine breite und vertiefte Bedarfsanalyse bei ExpertInnen aus Wissenschaft, Praxis und Behörden, d.h. bei den künftigen NutzerInnen der Bodeninformationen aus den Bodenkartierungsprojekten, sehr wichtig wäre: Ergeben sich aufgrund dieser Kundenbedürfnisse allenfalls noch zusätzliche Kriterien für die Auswahl von Bodenparametern?

- **Feinabstimmung der Parameter- und Methodenauswahl:**
Die Empfehlungen dieses Berichtes basieren auf einzelnen Kriterien und wurden auf einzelne Parametergruppen angewendet.
Der eigentliche Auswahlprozess dürfte zusätzliche Überlegungen und Abwägungen erfordern, die in der benötigten Form und Detailliertheit nicht in diesem Bericht enthalten sein können.
Deshalb bieten die AutorInnen dieser Recherche dem KOBO an, bei Bedarf als «Sparring Partner» für die Parameter- und Methodenauswahl zur Verfügung zu stehen und gezielte Detail- und Abwägungsfragen zu beantworten.

5. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über die verschiedenen Methoden zur Lagerungsdichte-Bestimmung. Grafik adaptiert und verändert nach Al-Shammary et al., 2018.	10
Abbildung 2: Einbringen der Schlagsonde mit einem enthaltenen Stechzylinder in den Boden zur Entnahme einer ungestörten Bodenprobe. Bildquelle: Freundliche Genehmigung der Forschungsgruppe Bodennutzung und Bodenschutz der HAFL.	11
Abbildung 3: Ungestörte Zylinderprobe, welche noch auf das definierte Normvolumen präpariert werden muss. Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Báfková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiolgy, Food and Natural Resources Czech University of Life Sciences Prague.»	11
Abbildung 4: Eine Zylinderprobe, die mit einem Messer exakt auf das Normvolumen präpariert wurde. Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Báfková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiolgy, Food and Natural Resources Czech University of Life Sciences Prague.»	11
Video 5: Agroscope-Lernvideo zur Plasticksack-Methode (Variante der Tauchwägung) Dieses Agroscope-Video zeigt unter anderem die korrekte Anwendung der Variante der Tauchwägung «Plasticksack-Methode» zur Ermittlung der Lagerungsdichte einer Bodenprobe. Bild/Video: Forschungsgruppe Bodenqualität und Bodenschutz, Agroscope	12
Abbildung 6a: Diese Abbildung zeigt ein nukleares Messgerät, das die direkte Transmission der ausgesendeten Gammastrahlung misst. Abbildung aus Al-Shammary et al., 2018.	13
Abbildung 6b: Auf dieser Abbildung sieht man ein Messgerät mit nuklearer Strahlungsquelle, welche die Rückstrahlung der ausgesendeten Strahlung misst. Beide Techniken (Abbildungen 6a & 6b) können zur Ermittlung der Lagerungsdichte eines Bodens verwendet werden. Abbildung aus Al-Shammary et al., 2018.	13
Abbildung 7: Handelsübliches Wasser-Pyknometer zur Bestimmung der Dichte von Festkörpern. Hierfür sind keine strukturell ungestörten Bodenproben notwendig. Bildquelle: Wikimedia Commons.	15
Abbildung 8: Luftpyknometer zur Bestimmung der Fests substanz einer Bodenprobe. Es sind strukturell ungestörte Proben notwendig. Bildquelle: Freundliche Genehmigung von UGT GmbH.	15
Abbildung 9: Vergleichstabellen zur visuellen Schätzung des volumetrischen Skelettgehaltes nach der Schweizerischen Klassifikation KLABS. Bildquelle: KLABS 2010, v.3, Annex 3.7.2	16
Abbildung 10: Handelsübliche Sandbox als Unterdruckapparatur zur Ermittlung des Grobporenvolumens einer Bodenprobe. Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Royal Eijkelkamp.	18
Abbildung 11: Innenansicht einer Sandbox mit Zylinderproben mit strukturell ungestörtem Boden. Die Proben werden zu Beginn vollständig wassergesättigt. Anschliessend werden steigende Saugspannungen angelegt und sobald die Proben bei einer bestimmten Saugspannung equilibriert sind werden sie gewogen. Zusammen mit dem Trockengewicht und der bekannten, temperaturabhängigen Dichte von Wasser können die Porenvolumina von bestimmten Porengrössenklassen berechnet werden. Die Sandbox eignet sich für den Grobporenbereich. Bildquelle: Freundliche Genehmigung der Forschungsgruppe Bodennutzung und Bodenschutz der HAFL.	18
Abbildung 12: Handelsübliche Drucktopfanlage als Überdruckapparatur zur Ermittlung des Porenvolumens in höheren pF-Bereichen, d.h. für die Mittel- und Feinporen. Bildquelle: Freundliche Genehmigung der UGT GmbH.	19
Abbildung 13: Skizze der Versuchsanlage für die Desorptionsmessung mit der VHW-Methode und mit einer 3.9 cm hohen Bodenprobe. 0 cm bezieht sich auf die Oberkante der Plexiglashalterung. Die Mitte der Bodenprobe liegt 0.25 cm darunter. Abbildung übernommen und adaptiert nach Isler, Luzius & Buchter, 2001; Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich.	20

Abbildung 14: Hyprop 2 für die Messung des Porenvolumens im Saugspannungsbereich von 0-820 hPa (ganzer Grobporenbereich bis grobe Mittelporen). Der Hyprop 2 erlaubt an strukturell ungestörten Bodenproben die simultane Messung der Desorptionskurve im angegebenen Saugspannungsbereich und der ungesättigten Wasserleitfähigkeit. Bildquellen: Freundliche Genehmigung der METER Group.	21
Abbildung 15: Das WP4C-Dew Point Meter erlaubt die Bestimmung der Feinporen im Messbereich pF 3.5–6.2. Dafür sind keine strukturell ungestörten Proben notwendig. Bildquelle: Freundliche Genehmigung der METER Group.	22
Abbildung 16: Handelsübliches Luftpyknometer welches die Bestimmung des Fest- und Flüssigvolumens einer Bodenprobe erlaubt. Werden getrocknete, strukturell ungestörte Bodenproben verwendet und ist das Gesamtvolumen der Bodenprobe bekannt, so kann das Gesamtporenvolumen berechnet werden. Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Royal Eijkelpamp.	22
Abbildung 17: Flowmeter PL-300 zur Bestimmung der Luftleitfähigkeitsbedingungen in einer strukturell ungestörten Bodenprobe. Bildquelle: Freundliche Genehmigung der UGT GmbH.	24
Abbildung 18: Schematische Darstellung der Bohrlochmethode. H = Tiefe des Bohrlochs unter Grundwasser-ruhespiegel; h_0 = Tiefe der maximalen Wasserabsenkung; h_1, h_2 = Tiefen zu zwei Zeitpunkten während des Wiederanstiegs; s = Abstand zwischen Bohrlochsohle und Grundwassersohle; r = Radius des Bohrlochs. Abbildung übernommen aus Durner, 2003.	25
Abbildung 19: Schematische Darstellung der Piezometermethode. h_c = Tiefe des nicht ummantelten Bohrlochs, h_1, h_2 = Tiefen zu zwei Zeitpunkten während des Wiederanstiegs; s = Abstand zwischen Bohrlochsohle und Grundwassersohle; r = Radius des Bohrlochs. Abbildung übernommen aus Durner, 2003.	25
Abbildung 20: Apparatur zur simultanen Messung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit an fünf Zylindern mit strukturell ungestörten Bodenproben. An der gleichen Apparatur kann sowohl die Methode «fallende Druckhöhe» wie «konstante Druckhöhe» (durch Anbringen eines Aufsatzes auf die Kunststoffzylinder) verwendet werden. Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Soilmoisture Corp.	27
Abbildung 21: Einzelring-Infiltrrometer im Einsatz zur Bestimmung der Infiltrationsrate in den Boden. Bildquelle: Wikimedia Commons.	28
Abbildung 22: Doppelringinfiltrrometer im Einsatz zur Bestimmung der Infiltrationsrate. Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Bářková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiolgy, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague.	28
Abbildung 23: Grosses Tensions-Infiltrrometer zur Ermittlung der Wasserinfiltration in einen Boden auf einem Ackerstandort. Oben links an der Apparatur ist das Unterdruckrohr zu sehen, welches einen Luffeinlass hat und mit dem Wasserreservoir verbunden ist. Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Bářková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiolgy, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague.	29
Abbildung 24: Das Mini-Disk-Infiltrrometer zur Bestimmung der Infiltrationsrate ist ein handliches Tensionsinfiltrrometer, welches nur von einer Person bedient werden kann. Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Bářková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiolgy, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague.	29
Abbildung 25: Handelsübliches Guelph-Permeameter zur Messung der Infiltrationsrate in den Boden. Bildquelle: Freundliche Genehmigung von SoilMoisture Corp.	30

Abbildung 26: Cornell-Sprinkler-Infiltrometer im Einsatz in einem Maisfeld. Die Infiltrationsrate lässt sich bei dieser Methode als Differenz zwischen der applizierten Regenmenge und der gemessenen Oberflächenabflussrate berechnen. Bildquelle: Freundliche Genehmigung des Cornell Soil Health Staff.	30
Abbildung 27: Dauerhaft im Feld installierte Tensiometer beim Langzeitversuch Oberacker im Kanton Bern zur Messung der Saugspannung. Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Lorenz Ramseier, LANAT, Fachstelle Bodenschutz Kt. Bern.	32
Abbildung 28: Aufbau eines Tensiometers: 1) poröse Keramikzelle, 2) wassergefülltes Schauglas, 3) Elektronik, 4) Drucksensor. Bildquelle: Wikimedia Commons.	32
Abbildung 29: Handelsüblicher Watermark-Sensor bestehend aus zwei Elektroden, die in das gipsgetränkte Gewebe eingearbeitet sind, welches von einer perforierten Hülle eingefasst wird. Bildquelle: Freundliche Genehmigung von Royal Eijkelkamp.	33
Abbildung 30: Einsatz einer TDR-Sonde an der Profilwand zur Messung des volumetrischen Wassergehaltes. Bildquelle: KOBO.	35
Abbildung 31: Einsatz einer TDR-Sonde auf der Bodenoberfläche zur Messung des volumetrischen Wassergehaltes. Bildquelle: KOBO.	35
Abbildung 32: Auswahl an verschiedenen Modellen von TDR-Sonden zur Messung des volumetrischen Wassergehaltes. Bildquelle: KOBO.	35
Abbildung 33: Auf dem Markt erhältliche UMP-Sonde zur Messung des volumetrischen Wassergehaltes des Bodens. UMP-Sonden kombinieren die TDR- und FDR-Technologie. Bildquelle: Freundliche Genehmigung der UGT GmbH.	36
Abbildung 34: Profilwand mit Rostflecken, deutliche Zeichen von Redoxreaktionen, welche stattgefunden haben. Bildquelle: Wikimedia Commons.	38
Abbildung 35: Die Panda-Sonde ist ein Beispiel für ein dynamisches Penetrometer zur Ermittlung des Eindringwiderstandes in den Boden. Bildquelle: Freundliche Genehmigung der nationalen Bodenbeobachtung, NABO.	39
Abbildung 36: Auf dem Markt erhältliches statisches Penetrometer zur Ermittlung des Eindringwiderstandes in den Boden. Bildquelle: Freundliche Genehmigung der UGT GmbH.	39
Abbildung 37: Schematische Darstellung der Schrumpfkurve eines feinkörnigen Bodens mit den vier unterschiedlichen Schrumpfpfasen. Abbildung übernommen aus Düllmann, 2014.	40
Abbildung 38: Bewegen der Bodenaggregate auf einem Sieb das sich in einem Wassergefäss befindet zur Ermittlung der Aggregatstabilität. Bildquelle: Freundliche Genehmigung der Forschungsgruppe Bodennutzung und Bodenschutz der HAFL.	42
Abbildung 39: Resultierendes Bodenaggregat nach Anwendung des Nasssiebverfahren zur Ermittlung der Aggregatstabilität. Bildquelle: Freundliche Genehmigung der Forschungsgruppe Bodennutzung und Bodenschutz der HAFL.	42

Abbildung 40: Spatenproben zur visuellen Beurteilung der Bodenstruktur auf dem Feld. Bildquelle: KOBO.	44
Abbildung 41: Ablauf der visuellen Gefügebeurteilung der Forschungsanstalt Reckenholz. Graphik adaptiert und verändert nach Nievergelt, Petrusek & Weisskopf, 2002.	45
Abbildung 42: Bewertung der Methoden zur Analyse der Lagerungsdichte bezüglich Kosten, Aufwand, Fehleranfälligkeit und Komplexität pro Analyse. Die Kosten beziehen sich dabei nur auf die Gerätekosten. Wartezeiten sind beim Aufwand nicht miteinbezogen. Ein Überblick über die Bewertungskriterien ist in Kapitel 2.1 zu finden. Die Bewertungen sind als relativ zwischen den Methoden zu verstehen. «Total» zeigt die summierten Felder je Methode an. Je grösser das Total, desto schwieriger, teurer, arbeitsintensiver und fehleranfälliger ist die Methode. Die Radiations-Methode wurde dabei nur bis zu einer Tiefe von 30 cm bewertet.	48
Abbildung 43: Bewertung der Methoden zur Analyse der Porengrössenverteilung bezüglich Kosten, Aufwand, Fehleranfälligkeit und Einschränkungen pro Analyse. Die Kosten beziehen sich dabei nur auf die Gerätekosten. Wartezeiten (z.B. bis zum Einstellen des Gleichgewichts bei einer bestimmten Saugspannung) sind beim Aufwand nicht mit einbezogen. Einschränkungen ergeben sich aus dem Anwendungsbereich: kann mit einer Apparatur über den ganzen pF-Bereich gemessen werden, sind die Einschränkungen klein, kann nur ein spezifischer Bereich gemessen werden, sind die Einschränkungen hoch. Die Einschränkungen beziehen sich ausserdem auf die Probenkapazität der Apparaturen. Kleinere Probenkapazitäten bedeuten hier grössere Einschränkungen. Die Bewertungen sind als relativ zwischen den Methoden zu verstehen. «Total» zeigt die summierten Felder je Methode an. Je grösser das Total, desto spezifischer, teurer, arbeitsintensiver und fehleranfälliger ist die Methode.	52
Abbildung 44: Bewertung der Methoden zur Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit bezüglich Kosten, Aufwand, Fehleranfälligkeit und Einschränkungen. Die Kosten beziehen sich dabei nur auf die Gerätekosten. Wartezeiten sind beim Aufwand nicht miteinbezogen. Einschränkungen beziehen sich auf die flächendeckende Anwendbarkeit der Methoden und die Aussagekraft der Messwerte. Die Bewertungen sind als relativ zwischen den Methoden zu verstehen. «Total» zeigt die summierten Felder je Methode an. Je grösser das Total, desto spezifischer, teurer, arbeitsintensiver und fehleranfälliger ist die Methode.	54

6. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Liste der zu untersuchenden Bodeneigenschaften gemäss Pflichtenheft vom 19.12.2019 des KOBOS. Im Laufe dieses Auftrages wurden die Fragestellungen etwas angepasst, so wurden z.B. die Parameter reelle Dichte und Aggregatsstabilität in die Recherche aufgenommen.	6
Tabelle 2: Unterteilung des Porenraumes in verschiedene Porengrössenklassen mit den dazugehörigen Saugspannungsbereichen und Äquivalentdurchmessern. Unterteilung wie auch Benennung der Porengrössenklassen können sich je nach Land, Fachgebiet und Untersuchungsziel unterscheiden. Tabelle aus den Schweizerischen Referenzmethoden der eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten 1996, Band 2, PYZYL-P.	17
Tabelle 3: Übersicht über die in diesem Bericht untersuchten bodenphysikalische Parameter und den dazu empfohlenen Messmethoden.	65

7. Literaturverzeichnis

Lagerungsdichte

- Al-Shammary, A.A.G., Kouzani, A.Z., Kaynak, A., Khoo, S.Y., Norton, M., Gates, W., 2018: Soil bulk density estimation methods: A review. *Pedosphere*. 28(4): 581 – 596.
- Blume, H-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011: *Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler*. 3. Neubearbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Buchter, B., und Häusler, S., 2015: Ringversuch bodenphysikalische Kenngrößen: Laborvergleich mit Standardmethoden. *Agroscope Science* Nr. 13.
- Buchter, B., und Häusler, S., 2009: Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen. *Bodenkundliche Gesellschaft Schweiz (BGS)*.
- Buchter, B., Häusler, S., Schulin, R., Weisskopf, P., Tobias, S., 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. *Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Dokument 13. Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale Zollikofen*.
- Department of sustainable natural resources, New South Wales Government, Australia: Bulk density of a soil: Clod Method. Soil survey standard test method. <https://www.environment.nsw.gov.au/resources/soils/test-methods/bdsc.pdf> (09.07.2020).
- Schwab, P., und Gubler, A., 2019: Herleitung von Schätzwerten für Lagerungsdichte und Raumgewicht Feinerde. *Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Agroscope, Zürich-Reckenholz*.
- Schwab, P., und Gubler, A., 2016 (korrigiert 2018): Methoden zu Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben. *Umwelt, Agroscope Science* Nr. 40.
- Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (FAL) 1996: *Bodenuntersuchungen zur Standort-Charakterisierung. Band 2. Ausgabe 1996 (Änderungen 1997 – 2012)*. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Forschungsanstalt Agroscope Changins Wädenswil ACW.
- Tian, Z., Lu, Y., Ren, T., Horton, R., Heitman, J.L., 2018: Improved thermo-time domain reflectometry method for continuous in-situ determination of soil bulk density. *Soil & Tillage Research* 178: 118 – 129.
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: *Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik. VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. Teillieferungen 1 – 7*. VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- Walthert, L., Zimmermann, S., Blaser, P., Luster, J., Lüscher, P., 2004: *Waldböden der Schweiz. Band 1: Grundlagen und Region Jura*. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Bern, Hep Verlag.
- Weil, R., und Brady, C., 2017: *The nature and properties of soils*. 15th edition. Pearson Education.

Reelle Dichte

- Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (FAL) 1996: Bodenuntersuchungen zur Standort-Charakterisierung. Band 2. Ausgabe 1996 (Änderungen 1997 – 2012). Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Forschungsanstalt Agroscope Changins Wädenswil ACW.
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. Teillieferungen 1-7. VDLUFA-Verlag Darmstadt.

Skelettgehalt

- Buchter, B., Häusler, S., Schulin, R., Weisskopf, P., Tobias, S., 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Dokument 13. Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale Zollikofen.
- Klassifikation der Böden der Schweiz (KLABS): 2010. Version 3, Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz.
- Schwab, P., und Gubler, A., 2016 (korrigiert 2018): Methoden zu Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben. Umwelt, Agroscope Science Nr. 40.
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. Teillieferungen 1-7. VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- Walthert, L., Zimmermann, S., Blaser, P., Luster, J., Lüscher, P., 2004: Waldböden der Schweiz. Band 1: Grundlagen und Region Jura. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Bern, Hep Verlag.

Porosität der Bodenstruktur: Gesamtporenvolumen und Porengrößenverteilung (Grob-, Mittel- und Feinporenvolumen)

- Blume, H-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011: Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Neubearbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Buchter, B., und Häusler, S., 2009: Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen. Bodenkundliche Gesellschaft Schweiz (BGS).
- Buchter, B., Häusler, S., Schulin, R., Weisskopf, P., Tobias, S., 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Dokument 13. Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale Zollikofen.
- Campbell, G.S., Smith, D.M., Teare, B.L., 2007: Application of a Dew Point Method to Obtain the Soil Water Characteristics. In: Schanz T. (eds) Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Springer Proceedings in Physics, vol 112. Springer, Berlin, Heidelberg.

- Helliwell, J.R., Sturrock, C.J., Grayling, K.M., Tracy, S.R., Flavel, R.J., Young, I.M., Whalley, W.R., Mooney, S.J., 2013: Applications of X-ray computed tomography for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: a review. *European Journal of Soil Science* 64: 279 – 297.
- Isler, S., Luzius, M., Buchter, B., 2001: Grobporenbestimmung – Verfahrensoptimierung für den Vollzug. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich, Amt für Landschaft und Natur, Direktion der Volkswirtschaft.
- METER, 2020: WP4C User Manual. METER Group AG München, Germany. http://library.metergroup.com/Manuals/20588_WP4C_Manual_Web.pdf (20.08.2020).
- Schindler, U., Doerner, J., Müller, L., 2015: Simplified method for quantifying the hydraulic properties of shrinking soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178 (1), 136 – 145.
- Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (FAL) 1996: Bodenuntersuchungen zur Standort-Charakterisierung. Band 2. Ausgabe 1996 (Änderungen 1997 – 2012). Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Forschungsanstalt Agroscope Changins Wädenswil ACW.
- UMS, 2015: Manual HYPROP, Version 2015-01, 96 pp. UMS GmbH, Gmunder Strasse 37, Munich, Germany. URL www.metergroup.com/hyprop-2/#support (19.05.2020).
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. Teillieferungen 1-7. VDLUFA-Verlag Darmstadt.

Luffleitfähigkeit

- Ball, B.C., und Schjønning, P., 2002: Air Permeability. Chapter 4.4 in: *Methods of Soil Analysis. Part 1, 3rd Edition.* Soil Science Society of America.
- DIN 19682-9: 2011-04, Bodenbeschaffenheit – Felduntersuchungen – Teil 9: Bestimmung der Luftdurchlässigkeit.
- Umwelt-Geräte-Technik GmbH, 2019: Bedienungsanleitung PL-300. Version 13/06/2019.
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. Teillieferungen 1-7. VDLUFA-Verlag Darmstadt.

Gesättigte Wasserleitfähigkeit

- Buchter, B., und Häusler, S., 2009: Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen. Empfohlene Labor- und Feldmethoden – Beilage: Gesättigte Wasserleitfähigkeit. Bodenkundliche Gesellschaft Schweiz (BGS).
- Buchter, B., Isler, S., Matile, L., 2000a: Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit k_{sat} an ausgewählten Standorten. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich.

- Buchter, B., Isler, S., Matile, L., 2000b: Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit k_{sat} im Labor. Laboranleitung. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich.
- Buchter, B., Isler, S., Matile, L., 1998: Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit k_{sat} . Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich.
- Danladi, A., Usman, I. A., Drambi, U. D., Ofache, A. E., Musa, Y., 2018: Review of Some Methods of Determining in-Situ Saturated Hydraulic Conductivity of Soil. *American Journal of Science, Engineering and Technology*, 3(3), 53.
- DIN 19682-8:2012-07, Bodenbeschaffenheit - Felduntersuchungen - Teil 8: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit mit der Bohrlochmethode.
- Durner, W., Foken, T., Huwe, B., 2008: Geoökologisches Freilandpraktikum—Physikalische Methoden. Skript, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Bayreuth.
- Durner, W., 2003: Bodenhydrologische Versuche im Praktikum Hydrologie I. Skript. Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik, TU Braunschweig.
- Kashani, M. H., Ghorbani, M. A., Shahabi, M., Naganna, S. R., Diop, L., 2020. Multiple AI model integration strategy-application to saturated hydraulic conductivity prediction from easily available soil properties. *Soil and Tillage Research*, 196, 104449.
- Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (FAL), 1996: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Bodenproben mit ungestörtem Gefüge. Methode PYZYL-WD (Zylinderproben). Band 2. Version 2015. Zürich-Reckenholz.
- Zhang, S. Y., Hopkins, I., Guo, L., Lin, H., 2019: Dynamics of infiltration rate and Field-Saturated soil hydraulic conductivity in a Wastewater-Irrigated cropland. *Water*, 11(8), 1632.

Wasserinfiltrationsrate

- Bagarello, V., Iovino, M., Elrick, D., 2004: A simplified falling – head technique for rapid determination of field – saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 68(1), 66–73.
- Blume, H-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011: Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologische Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Neubearbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- DIN 19682-7:2015-08, Bodenbeschaffenheit – Felduntersuchungen – Teil 7: Bestimmung der Infiltrationsrate mit dem Doppelring-Infiltrometer.
- Durner, W., 2008: Ringinfiltration. Skript. Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik, TU Braunschweig.
- Durner, W., Foken, T., Huwe, B., 2008: Geoökologisches Freilandpraktikum—Physikalische Methoden. Skript, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Bayreuth.
- Durner, W., 2007: Bohrloch-Infiltration. Skript. Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik, TU Braunschweig.

- Durner, W., 2003: Bodenhydrologische Versuche im Praktikum Hydrologie I. Skript. Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik, TU Braunschweig.
- Eijkelkamp Soil & Water, 2018: Doppelring-Infiltrimeter. Gebrauchsanweisung.
- Eijkelkamp Soil & Water, 2012: Guelph-Permeameter. Operating Instructions.
- Fritz, H., Ollesch, G., Weigert, A., und Schmidt, J., 2007: Methodenvergleich der Bodenfeuchtebestimmung und Messung der Infiltration in teilweise gefrorene Böden. *Hercynia-Ökologie und Umwelt in Mitteleuropa*, 40(1), 19 – 31.
- Ghosh, B., Pekkat, S., Yamsani, S.K., 2019: Evaluation of infiltrimeters and permeameters for measuring hydraulic conductivity. *Advances in Civil Engineering Materials*, 8(1).
- Iserloh, T., 2013: Niederschlagssimulationen mit kleinen mobilen Beregnungsanlagen – Tropfenerzeugung, Regnervergleich, windbeeinflusster Niederschlag. Dissertation an der Universität Trier, Fachereich VI.
- Lili, M., Bralts, V.F., Yinghua, P., Han, L., und Tingwu, L., 2008: Methods for measuring soil infiltration: State of the art. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 1(1), 22 – 30.
- Lunzer, E., 2009: Untersuchung des Durchlässigkeitsbeiwertes in biologisch bewirtschafteten Böden. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien.
- Meter, 2020: Mini Disk Infiltrimeter. Manual. http://publications.meter-group.com/Manuals/20421_Mini_Disk_Manual_Web.pdf (11.12.2020).
- Van Es, H.M., und Schindelbeck, R.R., 2003: Field procedures and data analysis for the cornell sprinkle infiltrimeter. Department of Crop and Soil Science Research Series R03-01.
- Weber, M., 2013: Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme und der Vorfrucht auf Pflanzenwachstum, Ertrag und Qualität sowie auf ausgewählte bodenphysikalische Kennzahlen bei Winterweizen (*Triticum aestivum* L.). Masterarbeit an der Universität für Bodenkultur in Wien.

Saugspannung

- Blume, H-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011: Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Neubearbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- DIN EN ISO 11276:2014-07, Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Porenwasserdrucks – Tensiometerverfahren.
- Matile, L., und Meyer, C., 2017: Bodenfeuchtesensoren, eine brauchbare Alternative zu Tensiometern auf Baustellen?. In *Bulletin-Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz* (Vol. 38, pp. 77 – 81). Elvadata.
- Pan, H., Qing, Y., Pei-yong, L., 2010: Direct and indirect measurement of soil suction in the laboratory. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15(3), 1 – 14.
- UGT, 2020: Produktkatalog. Umwelt-Geräte-Technik GmbH. https://www.ugt-online.de/fileadmin/Public/downloads/Produkte/Katalog_de.pdf (13.10.2020)

- UMEG, 2003: Saugspannungsmessung. Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg. U24-U61-NO3.
- Stehrenberger, E., und Huguenin-Landl, B., 2016: Evaluation Bodenfeuchtemessnetze. Bestehende Messnetze, Erwartungen der Nutzer und Anforderungen an ein ideales Bodenfeuchte-Messnetz. Genossenschaft Meteotest.
- Zuber, T., 2007: Untersuchungen zum Wasserhaushalt eines Fichtenwaldstandorts unter Berücksichtigung der Humusaufgabe. Dissertation an der Universität Bayreuth.

Wassergehalt

- Blume, H-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011: Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Neubearbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Flühler, H., und Roth, K., 2004: Physik der Ungesättigten Zone. ETH Zürich und Universität Heidelberg.
- Gimper, S., 2010: Evaluierung bestehender Messsensoren zur Ermittlung des Matrixpotenzials in Böden. Diplomarbeit zur Erlangung des Grades eines Diplom-Ingenieurs für Umwelttechnik. Fachhochschule Jena.
- Stahr, K., Kandeler, E., Herrmann, L., Streck, T., 2012: Bodenkunde und Standortlehre. Grundwissen Bachelor. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.
- Stehrenberger, E., und Huguenin-Landl, B., 2016: Evaluation Bodenfeuchtemessnetze. Bestehende Messnetze, Erwartungen der Nutzer und Anforderungen an ein ideales Bodenfeuchte-Messnetz. Meteotest Bern.
- UGT-GmbH, 2020: Über Bodenfeuchtesensoren.
URL <https://www.ugt-online.de/produkte/bodenkunde/bodenfeuchtetemperaturleitfaehigkeit/ueber-bodenfeuchtesensoren/> (10.08.2020)
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. Teillieferungen 1–7. VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- Weil, R., und Brady, C., 2017: The nature and properties of soils. 15th edition. Pearson Education.

Nutzbare Feldkapazität

- AG Boden, 1994: Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Stahr, K., Kandeler, E., Herrmann, L., Streck, T., 2012: Bodenkunde und Standortlehre. Grundwissen Bachelor. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. Teillieferungen 1-7. VDLUFA-Verlag Darmstadt.

Wasserstand

- Blume, H-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011: Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Neubearbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Gray, D.M., und Mahaptra, A.K., 1965: A method of measurement of the ground water table and soil hydraulic conductivity. Canadian Agricultural Engineering, 25 – 27.
- Quante, S., 2017: Messstellenbau – verständlich! 68. Deutsche Brunnenbauertage und BAW-Baugrundkolloquium.
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. Teillieferungen 1-7. VDLUFA-Verlag Darmstadt.

Redoxpotential

- Blume, H-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011: Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Neubearbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Rabenhorst, M. C., 2018: A System for Making and Deploying Oxide-Coated Plastic Films for Environmental Assessment of Soils. Soil Science Society of America Journal, 82(5), 1301 – 1307.
- Reisser, R., Stadelmann, V., Weisskopf, P., Gram, L., Keller, T., 2020: System for quasi-continuous simultaneous measurement of oxygen diffusion rate and redox potential in soil. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 183, 316 – 326.
- Stahr, K., Kandeler, E., Herrmann, L., Streck, T., 2012: Bodenkunde und Standortlehre. Grundwissen Bachelor. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.
- Weil, R., und Brady, C., 2017: The nature and properties of soils. 15th edition. Pearson Education.

Eindringwiderstand

- Buchter, B., und Häusler, S., 2009: Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen. Bodenkundliche Gesellschaft Schweiz (BGS).
- Dexter, A.R., Czyz, E.A., Gate, E.A., 2007: A method for prediction of soil penetration resistance. Soil and Tillage Research (93), 412 – 419.
- Eijkelkamp, Soil & Water 2020: Penetrologger. Gebrauchsanweisung.
- Herrick, J.E., und Jones, T.L., 2002: A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. Soil Science Society of America Journal, 1320 – 1324.
- Schwab, P., Dietrich, M., Gubler, A., 2018: Messung des Eindringwiderstands und des Bodenwasserzustandes. Methodenvergleich verschiedener Geräte und Verfahren. Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Agroscope, Zürich-Reckenholz.
- Sol Solution, 2020: URL <https://www.sol-solution.com/en/our-materials/light-weight-deflectometer/#description> (17.09.2020).

Degree of compactness

- Buchter, B., Häusler, S., Schulin, R., Weisskopf, P., Tobias, S., 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Dokument 13. Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale Zollikofen.
- Håkansson, I., 1990: A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Tillage Research*, 16, 105–120.
- Naderi-Boldaji, M., und Keller, T., 2016: Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index S. *Soil and Tillage Research*, 159, 41–46.
- Reichert, J.M., Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.K., Horn, R., Hakansson, I., 2009: Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 102, 242–254.

Entwässerungsverhalten des Bodens

- Braudeau, E., Constantini, J.M., Bellier, G., Colleuille, H., 1999: New Device and Method for Soil Shrinkage Curve Measurement and Characterization. *Soil Science Society of America Journal*, Vol 63, 525–535.
- Düllmann, H., 2014: Reaktionen feinkörniger Böden auf Wasserentzug und mögliche Auswirkungen auf die Geländeoberfläche und Gebäude im Rheinischen Braunkohlerevier. Geotechnisches Büro Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann GmbH, Aachen.
- Gabrielli Technology: URL <http://www.gabrielli.com/en/prodotto.php?id=82> (28.09.2020).
- Leong, E.C., und Wijaya, M., 2015: Universal soil shrinkage curve equation. *Geoderma*, 237–239, 78–87.
- Li, L., und Thang, X., 2019: A New Approach to Measure Soil Shrinkage Curve. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 42, No.1, 1–18.

Aggregatsstabilität

- Agroscope Arbeitsvorschrift Aggregatsstabilität (internes Dokument).
- Blume, H-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011: Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Neubearbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Buchter, B., Häusler, S., Schulin, R., Weisskopf, P., Tobias, S., 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Dokument 13. Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale Zollikofen.
- Burri, K., 2006: Boden-Aggregatstabilität als Parameter zur Quantifizierung von Vegetationseffekten auf oberflächennahe Bodenbewegung. Masterarbeit an der ETH Zürich und WSL.
- Czyz, E.A., und Dexter, A.R., 2008: Soil physical properties under winter wheat grown with different tillage systems at selected locations. *International Agrophysics*, 22, 191–200.
- Dexter, A.R., und Czyz, E.A., 2000: Effects of soil management on the dispersibility of clay in sandy soil. *International Agrophysics*, 14, 269–272.

- Kainz, M., und Weiss, A., 1988: Eignung verschiedener Aggregatstabilitätsmethoden zur Charakterisierung der Erosionsanfälligkeit.- In: Mitteilung der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft. Band 56, 81 – 84.
- Le Bissonnais, Y., 2016: Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 67(1), 11 – 21.
- Mair, S., 2017: Vergleich der Aggregatsstabilität von Böden mit unterschiedlicher Bodenbearbeitung. Masterarbeit an der Universität für Bodenkulturen, Wien.
- Mentler, A., Mayer, H., Blum, W.E.H., 2004: Characterization of soil aggregate stability by ultrasonic dispersion. *International Agrophysics*, 18, 39 – 45.
- Stahr, K., Kandeler, E., Herrmann, L., Streck, T., 2012: Bodenkunde und Standortlehre. Grundwissen Bachelor. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.

Perkolationsstabilität

- Kainz, M., und Weiss, A., 1988: Eignung verschiedener Aggregatstabilitätsmethoden zur Charakterisierung der Erosionsanfälligkeit.- In: Mitteilung der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft. Band 56, 81 – 84.
- Mair, S., 2017: Vergleich der Aggregatsstabilität von Böden mit unterschiedlicher Bodenbearbeitung. Masterarbeit an der Universität für Bodenkulturen, Wien.
- Mbagwua, J.S.C., und Auerswald, K., 1999: Relationship of percolation stability of soil aggregates to land use, selected properties, structural indices and simulated rainfall erosion. *Soil & Tillage Research*, 50, 197 – 206.

Gefügebeurteilung

- Ball, B.C., Guimarães, R.M.L., Cloy, J.M., Hargreaves, P.R., Shepherd, T.G., McKenzie, B.M., 2017: Visual soil evaluation: a summary of some applications and potential developments for agriculture. *Soil & Tillage Research*, 173, 114 – 124.
- Beste, A., 2005: Bodenqualität als Grundlage für Produktqualität im ökologischen Landbau. Vortrag XXXI. Fortbildungskurs Ökologischer Landbau, 10. und 11. März 2005. Büro für Bodenschutz und ökologische Agrarkultur.
- Beste, A., 2003: Weiterentwicklung und Erprobung der Spatendiagnose als Feldmethode zur Bestimmung ökologisch wichtiger Gefügeeigenschaften landwirtschaftlich genutzter Böden. Dissertation Universität Gießen, Verlag Dr. Köster, Berlin.
- Boizard, H., Batey, T., McKenzie, D.C., Richard, G., Roger-Estrade, J., Ball, B.C., Bradley, I., Cattle, S., Hasinger, G., Munkholm, L.J., Niewergelt, J., Peigné, J., Shepherd, G., 2007: Field meeting «Visual Soil Structure Assessment» held at the INRA Research Station, Estrées-Mons, France, 25 – 2 May 2005.
- Buchter, B., Häusler, S., Schulin, R., Weisskopf, P., Tobias, S., 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Dokument 13. Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale Zollikofen.

- Guimaraes, R.M.L., Lamande, M., Munkholm, L.J., Ball, B.C., & Keller, T., 2017: Opportunities and future directions for visual soil evaluation methods in soil structure research. *Soil and Tillage Research*, 173, 104 – 113. Johannes, A., Weisskopf, P., Schuli, R., Boivin, P., 2017: To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure? *Soil and Tillage Research*, 173, 24 – 32.
- Nievergelt, J., Petrasek, M., Weisskopf, P., 2002: Bodengefüge Ansprechen und Beurteilen mit visuellen Mitteln. Schriftenreihe der FAL41. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, FAL, Zürich-Reckenholz.
- Peerlkamp, P.K., 1959: A visual method of soil structure evaluation. *Meded. v.d. Landbouwhogeschool en Opzoekingsstations van de Staat te Gent*, 24, 216 – 221.

8.2. Beispiel für Laborabfolge an ungestörter Zylinderprobe

Für viele bodenphysikalische Methoden werden ungestörte Zylinderproben verwendet. Wenn diese Proben durch die Messungen nicht zerstört werden, können an einer einzelnen ungestörten Zylinderprobe mehrere Parameter gemessen werden. Im Folgenden wird ein Beispiel für einen Laborablauf gezeigt, bei dem verschiedene Parameter an einer Probe gemessen werden. Zusätzlich zur Luftdurchlässigkeit könnte auch noch eine Diffusionsmessung eingeschoben werden. Solche «Laborabfolgen» gibt es auch für andere Parametergruppen, z.B. für die Kombination von Porositäts- und mechanischen Stabilitätsmessungen. Je nach Kombination der Parameter können mehr oder weniger Eigenschaften an einer Probe gemessen werden. Speziell zu beachten ist der Wassergehalt, welcher durch Wägung ganz am Anfang des Laborablaufs und nach der Trocknung ermittelt wird.

Arbeitsschritt	Parameter
Präparation	→ Wassergehalt
Wassersättigung	
Desorption 30 hPa	→ Grobe Grobporen
Luftdurchlässigkeit 30 hPa	→ Luftleitfähigkeit
Desorption 60 hPa	→ Mittlere Grobporen
Luftdurchlässigkeit 60 hPa	→ Luftleitfähigkeit
Desorption 100 hPa	→ Feine Grobporen
Desorption 1000 hPa	→ Grobe Mittelporen
Desorption 15'000 hPa	→ Mittlere Mittelporen, Feine Mittelporen
Trocknung, Wägung	→ Lagerungsdichte, Wassergehalt
Sieben > 2 mm	→ Skelettgehalt
Wasserpyknometer	→ Gesamtporenvolumen, Reelle Dichte, Feinporen

Kompetenzzentrum Boden
BFH-HAFL

Länggasse 85_3052 Zollikofen
info@ccsols.ch_ccsols.ch