



universität
wien

MASTERARBEIT

Titel der Masterarbeit

„Möglichkeiten und Grenzen
der bodenphysikalischen Analytik“

verfasst von

Lisa-Maria Bauer, BSc

angestrebter akademischer Grad

Master of Science (MSc)

Wien, 2015

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 066 855

Studienrichtung lt. Studienblatt: Masterstudium Geographie

Betreuer: Ass.-Prof. Mag. Dr. Robert Peticzka

EINVERSTÄNDNISERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich,

- dass die ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubter Hilfe bedient habe,
- dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsaufgabe vorgelegt habe
- und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit vollständig übereinstimmt.

Wien,

ZUSAMMENFASSUNG

Die Bodenphysik entwickelte sich aus der allgemeinen Bodenkunde und wird seit dem 20. Jahrhundert als eigenständige Wissenschaft angesehen. Die Instrumente der Bodenphysik sind bodenphysikalische Analysen. Diese werden zur Untersuchung bodenphysikalischer Eigenschaften, (z.B. Textur, Struktur) und Prozesse (z.B. Luft-, Wasserbewegungen,...) eingesetzt und finden in unterschiedlichen Bereichen, wie z.B. der Landwirtschaft, der Ökologie oder der Bautechnik Verwendung. Infolge der fortschreitenden technischen Entwicklung besteht die Möglichkeit bodenphysikalische Parameter mit verschiedenen Methoden zu analysieren. Jedoch wird der Einsatz bodenphysikalischer Analysemethoden durch deren Messbereich und deren Genauigkeit begrenzt. Zusätzlich steht der gelungene Einsatz bodenphysikalischer Analysen einigen Problemen gegenüber, die bei der Vorbereitung und Durchführung der Analysen zu beachten sind. Um die Fragestellung: „*Welche Möglichkeiten bietet die bodenphysikalische Analytik zur Untersuchung von Böden und wo liegen ihre Grenzen?*“ unter den genannten Aspekten zu beantworten wird ein Fallbeispiel herangezogen. Zukünftig wird sich die Bodenphysik unter Zuhilfenahme bodenphysikalischer Analysen und in Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftsdisziplinen neben der bodenphysikalischen Untersuchung von Böden zum Verständnis von Bodeneigenschaften und –prozessen auch mit prognostizierten globalen Problemen wie zum Beispiel der Ressourcenknappheit aufgrund der Bodendegradation auseinandersetzen.

ABSTRACT

Soil physics emerged from the general soil science and is considered as an independent science since the 20th century. To investigate soil physical properties (e.g. texture, structure, ...) and processes (e.g. air and water movement, ...) soil physical analysis are used. They are applied to work on practical problems of agriculture, ecology or engineering. As a result of ongoing technical progress many methods to analyse different soil physical parameters have been developed. However, the use of soil physical analysis is limited by the measuring range and the accuracy of a method. In addition, the successful use of soil physical analyses faces many problems, during preparing and carrying out the analyses. To provide answers to these issues a case study is used to answer the research question "What are the opportunities of soil physical analyses to investigate soil and what are its limitations?" In future, soil physics and its analytical methods will deal with projected global problems such as resource scarcity due to land degradation in cooperation with other scientific disciplines.

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	1
2.	FRAGESTELLUNG.....	3
3.	BODENKUNDE.....	5
3.1.	HISTORISCHE ENTWICKLUNG DER BODENPHYSIK ALS WISSENSCHAFT IN DER BODENKUNDE.....	5
4.	DIE BODENPHYSIK ALS INTERDISZIPLINÄRE WISSENSCHAFT.....	9
5.	BODENPHYSIKALISCHE ANALYSEN	10
5.1.	EINSATZGEBIETE	13
5.2.	DIE BEDEUTUNG DER PROBENAHME	15
5.3.	METHODEN ZUR BESTIMMUNG DER KORNGRÖßenVERTEILUNG	15
5.4.	METHODEN ZUR BESTIMMUNG DES WASSERGEHALTS	19
5.4.1.	Direkte Methode.....	19
5.4.2.	Indirekte Methoden	20
5.5.	METHODEN ZUR BESTIMMUNG DER BODENDICHTE	21
5.6.	METHODEN ZUR BESTIMMUNG DES WASSERRÜCKHALTEVERMÖGENS	22
5.7.	METHODEN ZUR BESTIMMUNG DER AGGREGATSTABILITÄT.....	24
6.	FALLBEISPIEL	26
6.1.	FRAGESTELLUNG UND ZIELSETZUNG	26
6.2.	STANDORTE	27
6.2.1.	Niederösterreich – Strengberg	27
6.2.2.	Oberösterreich – Pollham	30
6.2.3.	Burgenland – Kemeten	31
6.3.	ANALYSEPARAMETER.....	32
6.3.1.	Korngröße	32
6.3.2.	Wassergehalt	33
6.3.3.	Dichte	33
6.3.4.	Wasserrückhaltevermögen	33
6.3.5.	Aggregatstabilität.....	34
6.4.	METHODIK	34
6.4.1.	Probenahme.....	34
6.4.2.	Probevorbereitung im Glashaus	35
6.4.3.	Probenahme und Probevorbereitung.....	37
6.4.4.	Bestimmung der Korngrößeverteilung	38
6.4.5.	Bestimmung des Wassergehalts in % TM und % Volumen.....	39
6.4.6.	Bestimmung der Rohdichten feucht & trocken in % Vol	39
6.4.7.	Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens.....	40
6.4.8.	Bestimmung der Aggregatstabilität in %	41
6.4.9.	Statistische Auswertung.....	42
6.4.9.1.	<i>Deskriptive Statistik</i>	42
6.4.9.2.	<i>Induktive Statistik</i>	43

6.5. ERGEBNISSE	44
6.5.1. Korngröße	44
6.5.2. Wassergehalt in % TM und in % Volumen.....	45
6.5.3. Rohdichte feucht & trocken in % Volumen	46
6.5.4. Wasserrückhaltevermögen	47
6.5.5. Aggregatstabilität in %.....	49
7. DISKUSSION DER METHODIK	50
7.1. LABORMETHODE	50
7.1.1. Probenahme	50
7.1.2. Analytik.....	51
7.1.2.1. Korngrößenverteilung.....	51
7.1.2.2. Wassergehalt frisch in % TM und in % Volumen	53
7.1.2.3. Rohdichte feucht und trocken in %Volumen.....	53
7.1.2.4. Wasserrückhaltevermögen.....	53
7.1.2.5. Aggregatstabilität in %	57
8. AKTUELLER STAND DER BODENPHYSIKALISCHEN WISSENSCHAFT	58
9. CONCLUSIO	61
10. VERZEICHNISSE.....	64
10.1. LITERATUR & ONLINEQUELLEN	64
10.2. ABBILDUNGEN	71
10.3. TABELLEN	71
10.4. DIAGRAMME	72
11. ANHANG	73
NACHWORT	78
CURRICULUM VITAE	80

1. EINLEITUNG

Die Bodenphysik hat sich im Laufe der Geschichte aus der Bodenkunde als Unterdisziplin herausentwickelt und wird seit Anfang des 20. Jahrhunderts als eigenständige Wissenschaft angesehen. Unter dem Begriff Bodenphysik versteht man allgemein die Wissenschaft bodenphysikalischer Eigenschaften (z.B. Textur, Struktur, Wassergehalt, etc.) und Prozesse (z.B. Luft-, Wasserbewegungen, etc.). Zur Untersuchung dieser Eigenschaften und Prozesse werden bodenphysikalische Analysemethoden eingesetzt, die auch unter Anwendung von Grundprinzipien verschiedener Nachbarsdisziplinen durchgeführt werden. Aus diesem Grund wird die Bodenphysik auch als interdisziplinäre Wissenschaft bezeichnet. Diese Interdisziplinarität macht den Einsatz bodenphysikalischer Analysen zur Beantwortung landwirtschaftlicher, bautechnischer und ökologischer Fragestellungen möglich. (LAL & SHUKLA 2004:5ff, SHUKLA 2014:2ff) Während bodenphysikalische Analysen im Bereich der Landwirtschaft dafür eingesetzt werden, um Informationen über den qualitativen Bodenzustand zu erhalten, sind bodenphysikalische Untersuchungen in der Bautechnik zur Erfassung der physikalischen und hydromechanischen Eigenschaften eines Standortes hilfreich. Für die Ökosystemforschung sind bodenphysikalische Untersuchungen bedeutend, um Rückschlüsse auf Austauschvorgänge zwischen der Pedosphäre und den sie umgebenden Sphären machen zu können. (LAL & SHUKLA 2004:5ff)

Im Laufe der Entwicklung der Bodenphysik als eigenständige Wissenschaft wurden unterschiedliche Untersuchungsmethoden entwickelt, die zur Ermittlung verschiedener bodenphysikalischer Eigenschaften herangezogen werden können. Durch den technischen Fortschritt haben sich in den letzten Jahrzehnten neue Methoden zur bodenphysikalischen Untersuchung etabliert, welche neben verschiedenen Vorteilen, wie z.B. die Möglichkeit in kürzerer Zeit eine größere Probenanzahl zu analysieren, oftmals auch Nachteile mit sich bringen. Die Vorstellung verschiedener Methoden zur Untersuchung ausgewählter bodenphysikalischer Parameter als „Möglichkeiten der bodenphysikalischen Analytik“ ist Teil dieser Arbeit.

Die Probenahme repräsentativer Bodenproben ist, wie auch die Wahl einer geeigneten Untersuchungsmethode hinsichtlich des begrenzten Messbereichs und der Genauigkeit einer Methode, Voraussetzung für ein aussagekräftiges Analyseergebnis. (GOOSENS 2008:87; HARTGE & HORN 1992³:4) Zusätzlich steht der gelungene Einsatz bodenphysikalischer Analysen vielen Herausforderungen und Problemen gegenüber, die bei der Vorbereitung und Durchführung der Analysen zu beachten sind. Unter den

genannten Aspekten werden die Grenzen der in dieser Masterarbeit beschriebenen Untersuchungsmethoden zur Bestimmung ausgewählter bodenphysikalischer Parameter beschrieben.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Möglichkeiten und Grenzen ausgewählter bodenphysikalischer Analysen anhand eines Fallbeispiels vorzustellen. (Kapitel 6) Dazu werden neben der Definition der Fragestellung für das Fallbeispiel auch die Analyseparameter und die Standorte vorgestellt. Das Kapitel zur Methodik umfasst die Beschreibung der Probenahme sowie der Durchführung der gewählten Untersuchungsmethoden. In der anschließenden Diskussion werden die während der Probenahme und der Durchführung der Analysen aufgetretenen Probleme und Herausforderungen erläutert. (Kapitel 7)

Abschließend wird ein kurzer Überblick über den aktuellen Stand der bodenphysikalischen Wissenschaft gegeben. Hierfür werden einige Studien, welche sich mit der Beurteilung von aktuellen Problemen in unterschiedlichen Bereichen beschäftigen, vorgestellt. (Kapitel 8) Den Abschluss dieser Arbeit bildet eine kurze Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse sowie die Beantwortung der in Kapitel 2 festgelegten Forschungsfrage und Subfragen.

2. FRAGESTELLUNG

Die folgende Masterarbeit hat sich in Zusammenarbeit mit dem Institut für Bodenforschung an der Universität für Bodenkultur ergeben. Im Zuge eines Projekts wurde untersucht, wie sich die Applikation von Kalkstein und Branntkalk auf bodenmikrobiologische Organismen und Prozesse sowie auf ausgewählte bodenphysikalische Parameter auswirkt. Die Bearbeitung dieses Projekts gliederte sich in zwei Arbeitsgruppen (Bodenmikrobiologie, Bodenphysik). Die Untersuchung bodenmikrobiologischer Prozesse und Organismen wurde vom Institut für Bodenforschung durchgeführt. Die Analysen ausgewählter bodenphysikalischer Parameter erfolgten am Institut für Geographie und Regionalforschung und sind Grundlage zur Beantwortung der zentralen Fragestellung der vorliegenden Masterarbeit.

Unter dem Titel „Möglichkeiten und Grenzen der bodenphysikalischen Analytik“ sollen die Möglichkeiten und Grenzen der bodenphysikalischen Analytik präsentiert werden. Die Beschreibung von Einsatzgebieten und Untersuchungsmethoden bodenphysikalischer Analysen soll dazu dienen, ihre Möglichkeiten vorzustellen und sie als geeignetes Instrument zur Lösung wissenschaftlicher Problemstellungen in der Bodenforschung darzustellen. Der Einsatz bodenphysikalischer Analysemethoden wird, je nach Methode, durch ihren Messbereich limitiert. Zusätzlich unterliegen bodenphysikalische Analysen von der Methode abhängigen Genauigkeitsgrenzen. Die zentrale Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit lautet daher:

**„WELCHE MÖGLICHKEITEN BIETET DIE BODENPHYSIKALISCHE ANALYTIK ZUR
UNTERSUCHUNG VON BÖDEN UND WO LIEGEN IHRE GRENZEN?“**

Das genannte Projekt wird für diese Masterarbeit als Fallbeispiel herangezogen. Dieses dient dazu, die Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der im Zuge des Projekts ausgewählten bodenphysikalischen Parameter vorzustellen. Zusätzlich sollen mit Hilfe des Fallbeispiels auf die während der Probenahme, der Probenvorbereitung bzw. der Durchführung der Analysen auftretende Probleme aufmerksam gemacht werden, um auf deren begrenzte Genauigkeit hinzuweisen. Unter Berücksichtigung der zentralen Fragestellung können folgende Hypothesen für diese Masterarbeit formuliert werden:

H₀: Die bodenphysikalische Analytik ist nicht zur Untersuchung von Böden geeignet.

H_a: Die bodenphysikalische Analytik ist zur Untersuchung von Böden geeignet.

Ausgehend von den genannten Hypothesen haben sich folgende allgemeine und auf das Fallbeispiel bezogene Subfragen ergeben, welche zur Beantwortung der zentralen Forschungsfrage herangezogen werden sollen:

- Welche Probleme können bei der Durchführung bodenphysikalischer Analysen auftreten und wie können sich diese auf das Ergebnis auswirken?
- Wie wirkt sich die Applikation von CaCO_3 bzw. CaO auf ausgewählte bodenphysikalische Parameter aus?
- Können mit Hilfe der bodenphysikalischen Analytik Unterschiede in der Wirkung von CaCO_3 und CaO auf die gewählten bodenphysikalischen Parameter festgestellt werden?
- Kann ein manuell erstellter Versuchsansatz eine dem im Feld entsprechende Korngrößenverteilung garantieren?

Zusammengefasst beschäftigt sich diese Arbeit allgemein mit der Bedeutung und der Zweckmäßigkeit der bodenphysikalischen Analytik für die Beantwortung wissenschaftlicher Fragen in der Bodenforschung. Mit Hilfe der formulierten Subfragen soll die zentrale Forschungsfrage „*Welche Möglichkeiten bietet die bodenphysikalische Analytik zur Untersuchung von Böden und wo liegen ihre Grenzen?*“ beantwortet werden.

3. BODENKUNDE

Die Bodenkunde hat ihren Ursprung in der landwirtschaftlichen Praxis und hat sich über lange Zeit zu einer eigenständigen Wissenschaft entwickelt. (WILDING & LIN 2006:260) Unter zu Hilfenahme von Methoden anderer naturwissenschaftlicher Disziplinen haben sich im Laufe der bodenkundlichen Geschichte unter dem Begriff Bodenkunde drei Forschungsschwerpunkte (Bodenbiologie, Bodenchemie, Bodenphysik) gebildet, welche heute als eigenständige Wissenschaftsdisziplinen anerkannt sind. (BLUM 2012:160; MÜCKENHAUSEN 1993:187) Die Bodenkunde wird heute als eine „...naturwissenschaftliche Disziplin, die sich im Überschneidungs- bzw. Grenzbereich von Physik, Chemie, Biologie [...], Geowissenschaften [...] und Agrar- und technischen Wissenschaften [...] mit dem Boden in Forschung und Lehre beschäftigt. [...]“ (BLUM 2012:2) angesehen.

Die Bodenkunde wird als Wissenschaft definiert, welche sich mit der Entwicklung und der Verbreitung von Böden auseinandersetzt und die „...Erfassung der Funktionen des Bodens als Filter-, Puffer- und Transformationssystem...“ (BLUM 2012:3) sowie die Untersuchung des Bodens „...als Lebensraum für Organismen und Genreserve (Biodiversität). [...]“ (BLUM 2012:3) ins Zentrum ihrer Forschung stellt.

3.1. HISTORISCHE ENTWICKLUNG DER BODENPHYSIK ALS WISSENSCHAFT IN DER BODENKUNDE

Seit dem Beginn des Ackerbaus vor ca. 10 000 Jahren haben sich die Menschen immer intensiver mit dem Boden auseinandergesetzt. (BLUM 2001:159; MÜCKENHAUSEN 1993:187; YAALON & BERKOWICZ 1997:2) Es wird angenommen, dass die ersten landwirtschaftlichen Versuche auf Schwemmfächern in semiariden Gebieten und in weiterer Folge in Überschwemmungsgebieten größerer Flüsse gemacht wurden, da der Wasserbedarf durch periodische Grundwasseranreicherung bzw. Überschwemmungen gedeckt wurde. (BREVIK & HARTEMINK 2010b:24; YAALON & BERKOWICZ 1997:2) Mit der Zeit entwickelten sich verschiedene Bodenbearbeitungstechniken. Das Pflügen wurde zuerst mit Hilfe eines Stockes oder einer Hacke durchgeführt. (YAALON & BERKOWICZ 1997:2) Erst in der Bronzezeit kam der von Menschen oder Tieren gezogene Pflug zum Einsatz. (BLUM 2012:159; YAALON & BERKOWICZ 1997:2) Für eine gleichmäßige Wasserverteilung wurden kultivierte Flächen nivelliert und Hänge terrassiert, um der Bodenerosion entgegenzuwirken. (BLUM 2012:159; BREVIK & HARTEMINK 2010b:24; YAALON & BERKOWICZ 1997:2) Durch den weiteren Fortschritt der Technik wurden in Mittelamerika vor etwa 2000 Jahren erste Dränungsversuche durchgeführt. Damit konnten bis dahin nicht landwirtschaftlich nutzbare Flächen kultiviert werden. (YAALON & BERKOWICZ 1997:2) Aufgrund des sich immer weiter entwickelnden Wissens über die Verschiedenheit von

Böden wurden erste Bodeneinteilungen nach der Bearbeitbarkeit in z.B. schwere oder leichte Böden durchgeführt und verschiedene Methoden zur Bodenverbesserung üblich. (MÜCKENHAUSEN 1993:187, YAALON & BERKOWICZ 1997:2) In Ägypten erkannten die Bewohner des Nildeltas wie fruchtbar der Boden in diesem Gebiet war und verwendeten Nilschlamm, um auch andere landwirtschaftlich genutzte Böden ertragreicher zu machen. (MÜCKENHAUSEN 1993:187) Die Menschen arbeiteten nach einem sogenannten „trial and error approach“ und erweiterten ihr Wissen über das Beobachten der Auswirkungen ihrer Versuche. Obwohl das Wissen über Böden zu dieser Zeit bereits umfangreich war, hat es noch keine Bodenkunde im heutigen wissenschaftlichen Sinn gegeben. (BREVIK 2005; BREVIK & HARTEMIK 2010a; BREVIK & HARTEMIK 2010b:23)

Bodenkunde im Römischen Reich und in der Griechischen Hochkultur

Der erste Wissenschaftler, der seine gewonnenen Erkenntnisse über den Boden schriftlich festhielt war der griechische Philosoph *Theophratus* (327-287 BC). Wie dieser setzten sich viele griechische und römische Naturwissenschaftler und Philosophen, wie *Cato* (234-149 BC), *Varro* (116-27 BC), *Vergil* (70-19 BC) und *Pliny* (23-79 BC) mit dem Boden auseinander und gaben ihr Wissen über schriftliche Aufzeichnungen weiter. (YAALON & BERKOWICZ 1997:3) Durch *Vergil* wurde erstmals die Bodenfarbe als Indikator für die Qualität eines Bodens erwähnt. (BLANCK 1929:35) Im 1. Jahrhundert n. Chr. schrieb *Columella* das Werk „*De re rustica*“ in welchem er die Möglichkeit einer Bodenklassifikation mittels einfacher Methoden beschreibt. (BLANCK 1929:35, YAALON & BERKOWICZ 1997:3) Unter zu Hilfenahme von Geschmacks- und Geruchssinn und der bis heute üblichen Fingerprobe wurden Böden beurteilt und klassifiziert. (BLANCK 1929:35; ROWELL 1997:14ff)

Bodenkunde von 1500 bis 1900

In der Zeit bis zum 14. Jahrhundert gab es eine naturwissenschaftliche Repression, in welcher der Boden als Forschungsobjekt vernachlässigt wurde. Erst in der Renaissance (15. – 17. Jahrhundert) wurde der Boden wieder ins Zentrum wissenschaftlicher Untersuchungen gerückt. In dieser Zeit wurde unter anderem von *Palissy* (1510-1789) und *Van Helmont* (1579-1644) der Boden als Nährstoffquelle untersucht. Der britische Wissenschaftler *TULL* (1674-1741) machte als einer der Ersten auf die Wichtigkeit der Bodenstruktur eines Bodens aufmerksam. (BREVIK & HARTEMINK 2010a) Die von *Lomonosov* im Jahr 1763 veröffentlichte Arbeit wird als Grundstein für die Entwicklung der Bodenkunde als unabhängige Wissenschaft gesehen. Darin wird der Boden als „...evolutionary, geobiologic body that formed over long periods of time. [...]“ (BREVIK & HARTEMINK 2010b:26) bezeichnet und auf den Einfluss von physikalischen und

biologischen Prozessen auf die Bodenentwicklung aufmerksam gemacht. (BREVIK & HARTEMINK 2010b:26ff)

Bodenkunde ab dem 19. Jahrhundert

Im 19. Jahrhundert entwickelten sich zwei Forschungsrichtungen, die sich unter sehr unterschiedlichen Aspekten mit dem Boden auseinandersetzten. (BLUM 2012:159; BLUME 2002:377, YAALON & BERKOWICZ 1997:3ff) Unter dem Begriff Agrikulturchemie wurde der Boden als Nährstoffspeicher für Pflanzen gesehen und mit Hilfe chemischer und auch physikalischer Analysemethoden untersucht. In der sich zeitgleich entwickelten Agrogeologie steht die Untersuchung der Eigenschaften, Beschaffenheit und der Verbreitung von Böden im Mittelpunkt der Forschung. (BLUM 2012:159; YAALON & BERKOWICZ 1997:3ff)

Das Ziel des deutschen Wissenschaftlers A. Thaer (1752-1828) war die Wissenserweiterung über die Heterogenität von landwirtschaftlich genutzten Böden. Weiters war er der Meinung, dass das Wasserrückhaltevermögen eine der wichtigsten Eigenschaften eines Bodens sei und entwickelte aus diesem Grund eine Methode zur Bestimmung dieses Bodenparameters. Zusätzlich versuchte er die Korngrößenverteilung eines Bodens mit Hilfe der heute noch gebräuchlichen Methoden Siebung und Dispersion zu analysieren. (YAALON & BERKOWICZ 1997:263) Weitere deutsche Wissenschaftler, welche im 19. Jahrhundert mit dem Einsatz bodenphysikalischer Untersuchungen wichtige Beiträge für landwirtschaftlich genutzte Flächen leisteten waren G. Schübler (1787-1834), W. Schumacher (1834-1888) und M.E. Wollny (1846-1901). (DUIKER & FRITTON 2009:24ff; YAALON & BERKOWICZ 1997:5) G. Schübler stellte als einer der Ersten einen Zusammenhang zwischen bodenphysikalischen Eigenschaften und der Produktivität von Agrarböden her und machte auf die Bedeutung der Bodenstruktur für das Bodenwasserregime sowie auf den Zusammenhang zwischen der Bodenfarbe und der Bodentemperatur aufmerksam. (BLUME 2002:378; YAALON & BERKOWICZ 1997:263) Seine Arbeit wurde von W. Schumacher fortgesetzt, welcher im Gegensatz zu Schübler Wasser- und Luftbewegungen ins Zentrum seiner Untersuchungen stellte und seine Ergebnisse in der Publikation „*Die Physik des Bodens in ihren theoretischen und praktischen Beziehungen zur Landwirtschaft*“ (1864) veröffentlichte. Auch M.E. Wollny untersuchte, wie bereits Schübler, vorwiegend die Abhängigkeit des Pflanzenwachstums von den physikalischen Gegebenheiten eines Bodens und gründete eines der ersten Fachjournale zur Bodenphysik („Forschungen auf dem Gebiete Agrikulturphysik“). (BAVER 1966³:2ff; BLUME 2002:378; DUIKER & FRITTON 2009:24ff; YAALON & BERKOWICZ 1997:243)

Zur selben Zeit wurden auch in Amerika viele bodenkundliche Untersuchungen durchgeführt. Der deutsch-amerikanische Wissenschaftler E.W. *Hilgard* (1833-1916) setzte sich wie zuvor A. *Thaer* mit der Korngrößenverteilung und deren Bedeutung für die Fruchtbarkeit im Ackerbau auseinander (BLUME 2002:378; DUIKER & FRITTON 2009:24ff) F. H. *King* (1848-1911), welcher in Amerika als „Father of Soil Physics“ bezeichnet wird, veröffentlichte in seiner Arbeit „*Physics of Agriculture*“ (1899) seine Untersuchungsergebnisse zur Wasserhaltekapazität eines Bodens. (BAVER 1966³:2ff, DUIKER & FRITTON 2009:24ff) Am Ende des 19. Jahrhunderts publizierte E. *Ramann* (1851-1926) in seinem Buch „*Forestry Soil and Site Science*“ (1895) die von E.W. *Hilgard*, dem russischen Wissenschaftler W.W. *Dokuchaev* (1846-1903) und ihm vertretene Ansicht, dass sich Böden abhängig von folgenden fünf bodenbildender Faktoren entwickeln: Ausgangsmaterial, Klima, Topographie, Organismen und Zeit. (BLANCK 1929:27; BLUME 2002:378; BLUME ET AL. 2010¹⁶:274; BOCKHEIM ET AL. 2005:26; BREVIK & HARTEMINK 2010b:29) Die Veröffentlichung dieses Buches wird allgemein als der Beginn der Bodenkunde als eigenständige Naturwissenschaft angesehen. (BLUME 2002:378; MÜCKENHAUSEN 1993:187) Im Jahr 1924 erfolgte daraufhin die Gründung der „Internationalen Bodenkundlichen Gesellschaft“ (BLUME 2002:378; BLUM 2012:161) und die Unterteilung der Bodenkunde in drei unabhängige Forschungsdisziplinen: Bodenbiologie, Bodenchemie und Bodenphysik. (BLUM 2012:161)

4. DIE BODENPHYSIK ALS INTERDISZIPLINÄRE WISSENSCHAFT

Unter dem Begriff Bodenphysik versteht man die Wissenschaft von bodenphysikalischen Eigenschaften (z.B. Textur, Struktur, Wassergehalt, etc.), ebenso wie die Ermittlung bodenphysikalischer Prozesse (z.B. Luft-, Wasserbewegungen, etc.) mittels bodenphysikalischer Analysemethoden. (LAL & SHUKLA 2004:5ff, SHUKLA 2014:2ff) Die Bodenphysik beschäftigt sich somit neben der Untersuchung der einzelnen Komponenten (organische und mineralische Bestandteile, Bodenwasser, Bodenluft) und Phasen (fest, flüssig, gasförmig) eines Bodens auch mit deren Wechselwirkungen untereinander, als auch mit der Umwelt. (HILLEL 2004:438; LAL & SHUKLA 2004:16ff) Mit Hilfe bodenphysikalischer Analysen können sowohl räumliche als auch temporäre Veränderungen der genannten Komponenten und Phasen in Folge natürlicher oder anthropogener Einflüsse erfasst werden. (LAL & SHUKLA 2004:16ff)

Früher wurden bodenphysikalische Untersuchungen für technische oder landwirtschaftliche Zwecke eingesetzt, um z.B. Informationen über den Boden als Baumaterial bzw. als landwirtschaftlichen Produktionsstandort zu erhalten. Später wurde der Einsatz bodenphysikalischer Untersuchungen auch in der Ökosystemforschung üblich. (HILLEL 2004:4) Aufgrund dieser unterschiedlichen Anwendungsbereiche werden in der Bodenphysik auch Grundprinzipien aus verschiedenen Nachbarsdisziplinen wie Physik, Hydrologie, Technik, Mathematik, Klimatologie etc. angewendet. (Abbildung 1) Die Bodenphysik wird daher auch als interdisziplinäre Wissenschaft angesehen. (HILLEL 2004:4; LAL & SHUKLA 2004:6; SHUKLA 2014:4ff)

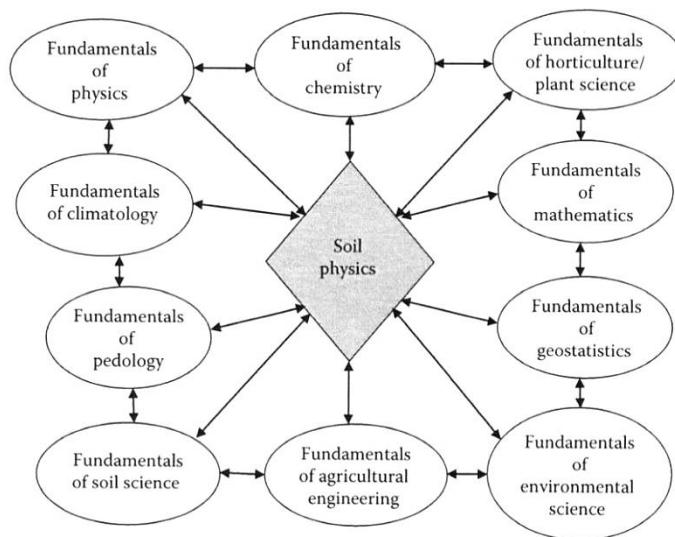


Abbildung 1: Die Bodenphysik als interdisziplinäre Wissenschaft (SHUKLA 2014:5)

5. BODENPHYSIKALISCHE ANALYSEN

SCHÖNWIESE deutet in seinem Buch „Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler“ (1992²:87) darauf hin, dass „...*Messungen nach physikalischen [...] Meßprinzipien...*“ zur „*quantitativen Erfassung einer physikalischen Größe G(=Meßgröße) bezüglich konstanter oder variabler Koordinaten (Raum x,y,z; Zeit t) i.a. unter konstanten Randbedingungen (Versuchsbedingungen, möglichst ungestörter zu untersuchender Mechanismus)*“ dienen.

$$G = G(x,y,z,t)$$

Formel 1: Berechnung einer Messgröße in Abhängigkeit bestimmter Einflussgrößen

Das Ergebnis einer Analyse unterliegt dabei begrenzten Messgenauigkeiten, welche die Messgröße beeinträchtigen. Die Messgenauigkeit kann durch entstandene Fehler bei der Probenahme, der Vorbereitung der Proben, der Durchführung der Analyse oder durch Variationen im Messsystem selbst begrenzt werden. (SCHÖNWIESE 1992²:87) Die gewonnene Messgröße ist ein Konstrukt aus dem „wahren Wert“, systematischen Messfehlern und den Fehlern, welche im Laufe der einzelnen Arbeitsschritte zufällig entstehen. (BUWAL 2003:16; HARTUNG ET AL. 1986:321) Tabelle 1 fasst eine Auswahl potentieller Fehlerquellen unter anderem bei Probenahme, Probevorbereitung und Auswertung zusammen und gibt zugleich Auskunft über die Art (systematisch, zufällig) der Fehler.

Systematische Messfehler entstehen durch eine fehlerhafte Durchführung des Versuchs. Diese haben „... *bei gleichen Meßvorgängen die gleiche Struktur ...*“ (HARTUNG ET AL. 1986:332) Im Gegensatz zu systematischen Fehlern können zufällige Fehler nicht korrigiert werden, da sie auf zufallsgesteuerte Störeinflüsse beruhen. „*Sie können nur durch häufige Wiederholung des Messvorganges erkannt und durch die Ermittlung der Messunsicherheit beschrieben werden. [...]*“ (ADUNKA 2007:44)

Zusammen ergeben zufällige und systematische Fehler den Gesamtfehler. Dieser führt zu einer Abweichung des Messergebnisses vom sogenannten „wahren Wert“. Unter diesem Begriff versteht man „... *jenen Wert, der sich bei einer idealen Messung ergeben würde. [...]*“ (ADUNKA 2007:39)

Genauigkeit

Zur Beschreibung aller zufälligen und systematischen Abweichungen vom „wahren Wert“ dient die Genauigkeit. (KROMIDAS 1995:184) Sie wird als quantitatives Maß zur „...*Annäherung von einzelnen Meßergebnissen an den wahren Wert. [...]*“ (KROMIDAS

1995:184) definiert. Eine hohe Genauigkeit eines Messergebnisses ergibt sich durch hohe Präzision und Richtigkeit. (FUNK ET AL. 2005:200, KROMIDAS 1995:184) (Abbildung 2A)

FEHLERURSACHE	FEHLERART	
	SYSTEMATISCH	ZUFÄLLIG
1. PROBENFEHLER		
1.1. FEHLER BEI DER PROBENAHME		
• NICHT REPRÄSENTATIVE PROBE	X	
• FALSCHER PROBENAHMEORT		X
1.2. FEHLER BEI TRANSPORT UND AUFBEWAHRUNG DER PROBE		
• VERDUNSTUNG	X	
• UNTERLASSENE ODER FEHLERHAFTE PROBENKONSERVIERUNG	X	
1.3. FEHLER BEI DER PROBENIDENTIFIZIERUNG		
• VERWECHSLUNGEN	X	
• FÄLSCHE ZEIT- ODER MENGENANGABEN	X	
1.4. FEHLER BEI DER PROBENVORBEREITUNG		
• MESS- ODER WÄGEFEHLER	X	
• VERLUSTE	X	
2. METHODISCHE FEHLER		
• ABWEICHUNG VON DER ANALYSENVORSCHRIFT	X	
• ZEITEN NICHT GENAU EINGEHALTEN	X	X
• BENUTZUNG EINES FÄLSCHEN ANALYSENVERFAHRENS	X	
3. KALIBRIERFEHLER		
3.1. WÄGEFEHLER		
• ERSCHÜTTERUNGEN DER WAAGE		X
• UNGENAUE NULLPUNKTEINSTELLUNG	X	
4. GERÄTEFEHLER		
4.1. ALLGEMEINER FEHLER		
• UNTERLASSENE WARTUNG	X	
• PHYSIKALISCHE GERÄTEEINFLÜSSE (Z.B. ÄUßERE TEMPERATUR)	X	X
5. FEHLER BEI DER MESSWERTREGISTRIERUNG UND —ÜBERTRAGUNG		
• WAHL DES FÄLSCHEN MESSBEREICHES	X	X
• WAHL DER FÄLSCHEN MESSGRÖÙE	X	
• ABLESEFEHLER		X
• VERWECHSLUNG VON DATEN		X
• SCHREIBFEHLER		X
6. FEHLER BEI DER ERGEBNISBERECHNUNG		
• RECHENFEHLER, KOMMAFEHLER, FÄLSCHE MAÙEINHEIT		X
• RUNDUNGSFEHLER		X
7. FEHLER BEI DER ERGEBNISÜBERMITTLUNG		
• ZUORDNUNGSFEHLER, VERWECHSLUNGEN		X
• SCHREIBFEHLER		X
• ÜBERTRAGUNGSFEHLER		X
8. FEHLER BEI DER BEFUNDUNG DER ERGEBNISSE		
• ÜBERSEHEN EINES PROBENFEHLERS		X
• FEHLINTERPRETATION VON EINHEITEN UND ZEHNERPOTENZEN		X
• VERZICHT AUF QUALITÄTSSICHERUNGSMÄÙNAHMEN	X	

Tabelle 1: Ursachen für zufällige und systematische Fehler im analytischen Labor (FUNK ET AL. 2005:155ff, bearbeitet)

Präzision

Ein Messergebnis weist dann eine hohe Präzision auf, wenn die Einzelwerte einer Analyse kaum um deren Mittelwert streuen und kaum voneinander abweichen. (LEWANDOWSKI ET AL. 1997:247) (Abbildung 2C) Die Präzision stellt „... *eine qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der gegenseitigen Annäherung voneinander unabhängiger Ermittlungsergebnisse bei mehrfacher Anwendung eines festgelegten Ermittlungsverfahrens unter vorgegebenen Bedingungen...*“ (KROMIDAS 1995:185) dar. Sie dient als „...*Maß für den zufälligen Fehler. [...]*“ (KROMIDAS 1995:185) Zur Quantifizierung der Präzision wird die Standardabweichung herangezogen. (KROMIDAS 1995:358) Durch mehrmaliges Wiederholen einer Analyse können zufällige Fehler ausgeglichen werden. (FUNK ET AL. 2005:200)

Richtigkeit

Ein hohes Maß an Richtigkeit besteht, wenn die gewonnenen Werte „...*vom Zielwert in bevorzugten Richtungen...*“ (SCHÖNWIESE 1992²:88) abweichen. Bei der Beurteilung der Richtigkeit „... *wird die Richtigkeit eines Verfahrens danach beurteilt, wie weit der wahre Wert vom Mittelwert aller Meßergebnisse entfernt ist. [...]*“ (HARTUNG ET AL. 1986:342) (Abbildung 2B) Die Richtigkeit eines Ergebnisses ist von systematischen Fehlern abhängig. (KROMIDAS 1995:359) Diese können nur durch das Beseitigen ihrer Ursache korrigiert werden. (FUNK ET AL. 2005:200)

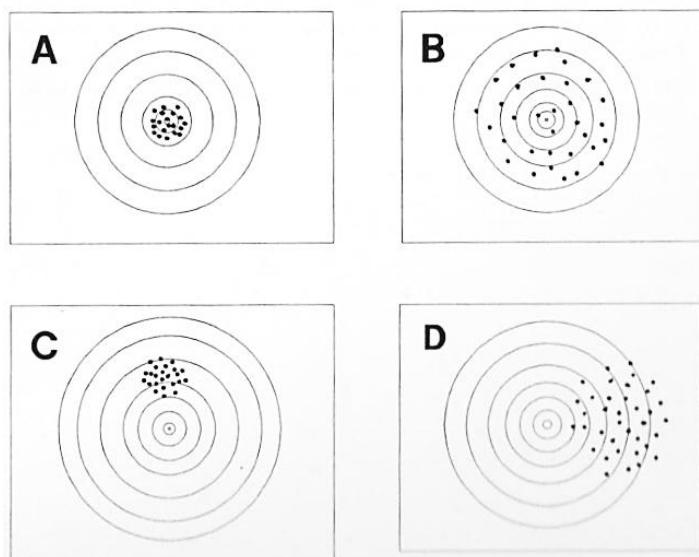


Abbildung 2: Vergleich Präzision und Richtigkeit; (A) Richtigkeit und Präzision hoch und damit hohe Genauigkeit, (B) hohe Richtigkeit, geringe Präzision (C) hohe Präzision, geringe Richtigkeit, (D) Richtigkeit und Präzision gering (aus: Kromidas 1995:136)

5.1. EINSATZGEBIETE

Wie bereits erwähnt werden bodenphysikalische Analysen in vielen verschiedenen Bereichen eingesetzt. In der Landwirtschaft dienen bodenphysikalische Untersuchungen dazu, Informationen über den qualitativen Bodenzustand bewirtschafteter Flächen zu erhalten. In Österreich sind Informationen über die Eigenschaften eines Bodens Voraussetzung für die Bodenbewertung im Rahmen der Finanzbodenschätzung. (ÖSTERREICHISCHE BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT 2001:205) Auch Belastungen nichtstofflicher Art können mit Hilfe bodenphysikalischer Analysen (Bestimmung der Trockenrohdichte, Korngrößenverteilung, Porosität, Bodenstruktur) ermittelt werden. Dazu zählen unter anderem die mechanische Beanspruchung des Gefüges z.B. durch die Auflast von Maschinen und die damit verbundene Verdichtung. Der Prozess der Verdichtung beeinflusst neben dem Wurzelwachstum auch die Wasser- und Nährstoffaufnahme der Pflanzen. (BLUME ET AL. 2010:506ff; LAL & SHUKLA 2004:9) Ein weiteres landwirtschaftliches Problem neben der Verdichtung ist der Prozess der Bodenerosion. Bodenphysikalische Eigenschaften wie die Strukturstabilität, die Korngrößenverteilung sowie die hydraulische Leitfähigkeit und das Infiltrationsvermögen eines Bodens haben unter anderem großen Einfluss auf die Erosion. Im Zuge der Untersuchung von bodenphysikalischen Bodenparametern kann die Erodierbarkeit des Bodens bestimmt werden. (LAL & SHUKLA 2004:9)

Ein weiteres Einsatzgebiet bodenphysikalischer Analysen ist das Bauwesen. Für Bauvorhaben jeder Art ist das Wissen um die physikalische Bodenbeschaffenheit (z.B. Verdichtungsgrad) sowie die hydraulischen Eigenschaften (z.B. Permeabilität) eines Standortes Voraussetzung. Die Ermittlung der Porosität und der Korngrößenverteilung sowie die Untersuchung des Bodenwassergehalts dienen dazu, Aussagen über die Tragfähigkeit und die Befahrbarkeit des Untersuchungsstandortes zu machen. Auch um Informationen über die für bautechnische Vorhaben wichtigen Bodenwasserbewegungen zu erhalten, ist die Analyse des Porenanteils und die Untersuchung der hydraulischen Leitfähigkeit wesentlich. (LAL & SHUKLA 2004:5ff)

Als Teil des Ökosystems stehen Böden (unter dem Begriff Pedosphäre zusammengefasst) in Form von Stoff- und Energieweisen in ständiger Wechselwirkung mit den ihn umgebenden Sphären (Hydrosphäre, Atmosphäre, Biosphäre, Lithosphäre). Viele dieser Interaktionen werden neben chemischen auch von bodenphysikalischen Eigenschaften beeinflusst und gesteuert. (LAL & SHUKLA 2004:6ff) Durch den Einsatz bodenphysikalischer Analysen können wichtige Bodenparameter zur Ermittlung ökologischer Prozesse bestimmt werden. Einer davon ist zum Beispiel die Bodenfilterung des

Niederschlagswassers, welcher unter anderem von der Korngrößenzusammensetzung abhängt. (BLUME ET AL. 2010:171ff) Unter dem Aspekt des Treibhauseffekts werden bodenphysikalische Analysen auch dazu eingesetzt, um jene bodenphysikalischen Parameter zu untersuchen, welche die Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Pedosphäre in Form von gasförmigen Bodenemissionen (z.B. CO₂, CH₄,...) beeinflussen. (LAL & SHUKLA 2004:6ff) Ein weiteres Forschungsgebiet, in welchem bodenphysikalische Untersuchungen Anwendung finden, ist die Paläopedologie. Mit Hilfe der gewonnen Analyseergebnisse wird versucht, Informationen über die Paläoumwelt zu erhalten und diese zu rekonstruieren. (BUGGLE & ZECH 2011)

Die genannten Beispiele machen die Bedeutung bodenphysikalischer Analysen für die Bereiche, Landwirtschaft, Bautechnik und Ökologie deutlich. Die Untersuchung bodenphysikalischer Eigenschaften und Prozesse ist wichtig, um die für das jeweilige Einsatzgebiet relevanten Bodenfunktionen festzustellen. Tabelle 2 gibt einen Überblick darüber, welche bodenphysikalischen Eigenschaften zur Untersuchung herangezogen werden, um die für die genannten Einsatzgebiete wichtigen Bodenfunktionen zu ermitteln.

PROCESS	PROPERTIES	SOIL FUNCTIONS
AGRICULTURAL FUNCTIONS		
• COMPACTION	Bulk density, porosity, particle size distribution, soil structure	Root growth, water and nutrient uptake by plants
• EROSION	Structural stability, erodibility, particle size, infiltration and hydraulic conductivity, transportability, rillability	root growth, water and nutrient uptake, aeration
• WATER MOVEMENT	Hydraulic conductivity, pore size distribution, tortuosity	Water availability to plants, chemical transport
• AERATION	Porosity, pore size distribution, soil structure, concentration gradient, diffusion coefficient	Root growth and development, soil and plant respiration
• HEAT TRANSFER	Thermal conductivity, soil moisture content	Root growth, water and nutrient uptake, microbial activity
ENGINEERING FUNCTIONS		
• SEDIMENTATION	Particle size distribution, dispersibility	Filtration, water quality
• SUBSIDENCE	Soil strength, soil water content, porosity	Bearing capacity, trafficability
• WATER MOVEMENT	Hydraulic conductivity, porosity	Seepage, waste disposal, drainage
• COMPACTION	Soil strength, compactability, texture	Foundation strength
ENVIRONMENTAL FUNCTIONS		
• ABSORPTION/ADSORPTION	Particle size distribution, surface area, charge density	Filtration, water quality regulation, waste disposal
• DIFFUSION/AERATION	Total and aeration porosity, tortuosity, concentration gradient	Gaseous emission from soil to the atmosphere

Tabelle 2: Bodenphysikalische Eigenschaften und deren Bedeutung für Landwirtschaft, Ökologie und Bautechnik
(aus: LAL & SHUKLA 2004:9, eigene Bearbeitung)

5.2. DIE BEDEUTUNG DER PROBENAHME

Für ein repräsentatives Ergebnis einer bodenphysikalischen Untersuchung ist eine repräsentative Probenahme Voraussetzung. (BAIZE 1993:4; HARTGE & HORN 1992³) HARTGE & HORN betonen in ihrem Buch „*Die physikalische Untersuchung von Böden*“ (1992³), dass das Ergebnis einer Analyse nicht besser sein kann als die gewonnenen Proben. Auch HEINRICH (1990:65 aus LEWANDOWSKI ET AL. 1997:29) macht die Wichtigkeit der sorgfältigen Probenahme mit folgender Aussage deutlich:

„[...] Die [...] Analyse kann nicht besser sein als die ihr zugrunde liegende Probe. KeinE AnalytikerIn kann die Fehler korrigieren, die bei der Probenahme durch mangelnde Sorgfalt oder fehlende Sachkenntnis entstanden sind. Probendahmefehler setzen sich über die ganze Analyse fort. [...]“

Die Probenahme dient dazu, ein verkleinertes Abbild einer Grundgesamtheit darzustellen (HARTUNG ET AL. 1986:315ff) mit dem Ziel „... einen „repräsentativen“ Meßwert für bestimmte Bodeneigenschaften zu gewinnen. [...]“ (ROWELL 1997:22) Von einem hohen Maß an Repräsentativität spricht man, wenn von einer Stichprobe „...ein Schluss auf die Gesamtheit erlaubt ist. [...]“ (HARTUNG ET AL. 1986:315) Sehr heterogene Untersuchungsflächen müssen aus diesem Grund in kleinere homogene Flächen aufgeteilt werden „..., die in ihrer räumlichen Gesamtheit die Eigenschaften der Untersuchungsfläche widerspiegeln. [...]“ (ÖNORM L 1051 2005:3) Die Wahl einer geeigneten Entnahmestelle ist damit grundlegend für ein repräsentatives Ergebnis. Nicht-repräsentative Entnahmestellen sind z.B. Ackerfurchen. Das Gefüge in diesen Bereichen wurde durch die mechanische Bearbeitung beeinflusst und ist daher nicht repräsentativ für die restliche Untersuchungsfläche. (PETERSEN & CALVIN 1986:35ff)

Folgend wird ein Überblick über verschiedene Methoden zur Bestimmung ausgewählter Analyseparameter gegeben. Dabei handelt es sich um jene bodenphysikalischen Parameter, die im Zuge des Fallbeispiels untersucht wurden. Neben den geläufigen Standardmethoden werden zusätzlich neuere Untersuchungsmethoden vorgestellt. Für konkretere Informationen zu den genannten Methoden wird auf die zitierte Literatur verwiesen.

5.3. METHODEN ZUR BESTIMMUNG DER KORNGRÖßenVERTEILUNG

Die Ermittlung der Korngrößenverteilung erfolgt in zwei Schritten: Dispersion und Fraktionierung. Durch die Dispersion werden Bodenaggregate in ihre Primärbestandteile zerlegt. (GEE & BAUDER 1986²:383ff; HILLEL 2004:45; LAL & SHUKLA 2004:37) Dies erfolgt

entweder unter Zugabe von Natriumpyrophosphat ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$) mit Hilfe von Ultraschall oder mit destilliertem Wasser. Aggregierende Stoffe wie z.B. die in einer Probe enthaltenen Carbonate oder die enthaltende organische Substanz werden mittels Wasserstoffperoxyd (H_2O_2) zerstört. (GEE & BAUDER 1986²:390ff; HARTGE & HORN 1992³:29ff) Die am häufigsten angewandten Methoden zur Fraktionierung der Bodenbestandteile in verschiedene Größenklassen sind die Siebung und die Sedimentation. (DAY 1965:546 ; GEE & BAUDER 1986²:383ff; LAL & SHUKLA 2004:38) Erstere ist eine mechanische Analyse und dient zur Ermittlung der Anteile der Korngrößenklassen des Grobbodens (> 2 mm) und des Sandes (63 -2000 µm). Im Gegensatz dazu dienen Sedimentationsverfahren dazu, die Schluff- (2 - 63 µm) und Tonanteile (< 2 µm) einer Probe zu ermitteln. (HARTGE & HORN 1992³:35; ROWELL 1997:47) Diese Methoden basieren auf dem Prinzip der Abhängigkeit der Sinkgeschwindigkeit der Suspensionstemperatur und vom Äquivalentdurchmesser eines Partikels nach dem Gesetz von G.G. Stokes. (GEE & BAUDER 1986²:393; HILLEL 2004:438; LAL & SHUKLA 2004:38) Ausführlichere Informationen über die Durchführung der vorgestellten Methoden zur Korngrößenbestimmung werden in McCRAVE & SYVITSKI (1991) („*Principles and methods of geological particle size analysis*“) gegeben.

Siebung mittels Siebturm

Die Siebung zur Bestimmung der Anteile des Grobbodens (> 2 mm) und des Sandes (63 - 2000 µm) einer Probe wird durch ein Nasssiebverfahren mittels Siebturm als Standardmethode durchgeführt. Das Prinzip dieser Methode basiert darauf, dass durch die mechanische Siebung Bodenpartikel verschiedener Größen voneinander getrennt werden. Dazu werden Siebe mit verschiedenen Maschenweiten übereinander gestellt. Das Sieb mit der größten Maschenweite befindet sich an oberster Stelle und das Sieb mit der kleinsten Maschenweite ganz unten. (HARTGE & HORN 1992³:29ff) Dieses Verfahren wurde im Zuge des folgenden Fallbeispiels (Kapitel 6) zur Bestimmung des Grobboden- und Sandanteils nach ÖNORM L 1061-1 (2002) angewendet. Die Durchführung dieser Methode wird in Kapitel 6.4.4. beschrieben.

Bei der Durchführung der Siebung mittels Siebturm ist die Sicherheit, dass alle Bodenpartikel nach Ende eines Siebvorgangs restlos voneinander getrennt sind, nicht gegeben. Die Schwierigkeit besteht darin, dass das Durchfallen der Partikel von der Partikelstruktur und der Maschenform des Siebs abhängig ist. (DAY 1965:547; GEE & BAUDER 1986²; HARTGE & HORN 1992³:32ff) Durch Hinzufügen von Wasser während der Siebung und der mechanischen Bewegung wird versucht, diese Schwierigkeit zu umgehen. Trotz dieser Unsicherheiten wird die Siebung mittels Nasssiebapparatur für

die Bestimmung der Korngrößen > 2 mm als Standardmethode angesehen. Ihre Standardabweichung wird mit $s \sim \pm 1,5\%$ angegeben. (HARTGE & HORN 1992³:32ff)

Pipettmethode

Eine häufig angewandte Methode zur Bestimmung von Schluff- und Tonanteilen durch Sedimentation ist die Pipettmethode. Nach ÖNORM L 1061-2 (2002) wird bei diesem Verfahren eine Probe nach der Dispergierung und Entfernung organischer Substanz in Suspension gebracht und mit Hilfe einer Pipette beprobt. Die Entnahme der Proben erfolgt entsprechend der Fallzeiten für die jeweilige Korngröße. (Tabelle 3) (ÖNORM L 1061-2 2002) Der Nachteil dieser Methode ist eine hohe Fehleranfälligkeit. (GOOSENS 2008:68) Die im Vergleich zur Siebmethode größere Streuung von $s \sim \pm 6\%$ bei einem Äquivalentdurchmesser von 63 µm und $s \sim \pm 3\%$ für Korngrößen zwischen 2 – 20 µm wird auf die erhöhte Sinkgeschwindigkeit von Korngrößen mit einem Äquivalentdurchmesser von 63 µm zurückgeführt. Diese ist sowohl von der Temperatur der Suspension als auch von der Raumtemperatur abhängig. Aus diesem Grund ist eine konstante Raumtemperatur bei der Durchführung der Pipettmethode wesentlich, um Konvektionsströmungen aufgrund der Brownschen Bewegung zu vermeiden. (HARTGE & HORN 1992³:32ff)

Temperatur °C	Viskosität mPa-s	Fallzeit für eine Korngröße von			
		0,063 mm	0,02 mm	0,006 mm	0,002 mm
18	1,04	29 s	4 min 49 s	53 min 34 s	8 h 2 min 3 s
19	1,019	29 s	4 min 43 s	52 min 29 s	7 h 52 min 19 s
20	1,002	28 s	4 min 39 s	51 min 36 s	7 h 44 min 26 s
21	0,979	27 s	4 min 32 s	50 min 25 s	7 h 33 min 47 s
22	0,958	27 s	4 min 26 s	49 min 20 s	7 h 24 min 3 s
23	0,938	26 s	4 min 21 s	48 min 19 s	7 h 14 min 47 s
24	0,9917	26 s	4 min 15 s	47 min 14 s	7 h 5 min 46 s
25	0,897	25 s	4 min 10 s	46 min 12 s	6 h 55 min 46 s
26	0,877	25 s	4 min 4 s	45 min 10 s	6 h 36 min 30 s
27	0,856	24 s	3 min 58 s	44 min 5 s	6 h 36 min 46 s
28	0,836	23 s	3 min 52 s	43 min 3 s	6 h 27 min 30 s
29	0,815	22 s	3 min 47 s	41 min 58 s	6 h 17 min 46 s
30	0,797	22 s	3 min 42 s	41 in 3 s	6 h 9 min 25 s
<ul style="list-style-type: none"> - Fallhöhe (Eintauchtiefe der Pipette): 100 mm - Fallbeschleunigung für Österreich: $9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ - Feststoffdichte von Quarz: $2,65 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$ - Dichte von Wasser bei 20 °C: $1.00 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$ 					

Tabelle 3: Fallzeiten in Abhängigkeit von der Suspensionstemperatur (ÖNORM L 1061-2 2002:6)

Die Anwendung von den klassischen Sieb- und Sedimentationsmethoden (Siebturm, Pipettmethode) ist im Vergleich zu den neuen Techniken zur Bestimmung von

Korngrößenverteilungen zeitaufwändig und fehleranfällig. Aus diesem Grund wurden neue Methoden entwickelt, die neben einer schnelleren Durchführung auch die Analyse einer höheren Probenanzahl erlauben. (ANDRENELLI ET AL. 2013:381; BEUSELINCK ET AL. 1998:194)

Sedigraph

Ein anderes Untersuchungsinstrument, welches auf das Prinzip der Sedimentation zurückgreift, ist die Ermittlung der Korngrößenanteile von Schluff ($2\text{-}63 \mu\text{m}$) und Ton ($< 2 \mu\text{m}$) mittels Sedigraph. Dieses Instrument ermittelt mit Hilfe von Röntgenstrahlen die Sedimentationsrate der Bodenteilchen in Suspension nach dem Gesetz von G.G. Stokes und gibt das Analyseergebnis als Konzentrationswert in kumulativen Massenprozent an. (GOOSENS 2008:66ff; STEIN 1985:590) Wie bei anderen Sedimentationsverfahren dient eine dispergierende Vorbehandlung dazu, aggregierte Bodenpartikel in ihre Primärbestandteile zu zerlegen. Die Notwendigkeit organische Substanz, Carbonate oder Eisenoxide aus einer Probe zu entfernen ist abhängig von der Fragestellung und der zu analysierenden Probe. (ANDRENELLI ET AL. 2013:383) Im Vergleich zum Pipettierverfahren hat diese Methode die Vorteile einer geringeren zur Analyse benötigten Probemenge und eines geringeren Zeitaufwandes für die Analyse mehrerer Proben. Der Nachteil der Korngrößenbestimmung mittels Sedigraph ist die Überschätzung des Tonanteils im Vergleich zur Pipettmethode, wie sie in verschiedenen Studien belegt wurde. (ANDRENELLI ET AL. 2013:383ff; BEUSELINCK ET AL. 1998:194; STEIN 1985:592ff) Die Bestimmung der Korngrößenanteile von Schluff ($2\text{-}63 \mu\text{m}$) und Ton ($< 2 \mu\text{m}$) mittels Sedigraph wurde im Zuge des Fallbeispiels (Kapitel 6) angewendet und wird in Kapitel 6.4.4. näher beschrieben.

Laserdiffaktometrie

Bei der Laserdiffaktometrie treffen Laserstrahlen auf Bodenteilchen, die sich nach der dispergierenden Vorbehandlung und der Entfernung bindender Stoffe wie z.B. der organischen Substanz in Suspension befinden. (BEUSELINCK ET AL. 1998:195) Das Prinzip dieser Methode basiert darauf, dass Bodenteilchen aufgrund ihrer Größe auf sie treffende Laserstrahlen unterschiedlich streuen. Mit Hilfe des Einfallswinkels, mit dem die Laserstrahlen auf die registrierenden Detektoren treffen, kann die Größe der Bodenteilchen ermittelt werden. Je größer der Winkel ist, mit dem der gestreute Laserstrahl auftrifft, desto kleiner ist die Korngröße. (BEUSELINCK ET AL. 1998:195; RYZAK & BIEGANOWSKI 2011:624) Das Ergebnis dieser Methode wird in Volumsprozent angegeben. Eine kurze Analysedauer sowie ein großer Messbereich sind die Vorteile der

Korngrößenbestimmung mittels Laserdiffaktometrie. (BUURMAN ET AL. 2001:49; GOOSENS 2008:82; KONERT & VANDENBERGHE 1997:531)

5.4. METHODEN ZUR BESTIMMUNG DES WASSERGEHALTS

Die Bestimmung des Wassergehalts kann mit Hilfe direkter (gravimetrisch) und indirekter Methoden (z.B. TDR-Sonde, Neutronen-Sonde,...) durchgeführt werden. (GARDNER 1986²:493; HILLEL 2004:96ff; LAL & SHUKLA 2004:298) Gravimetrische Bestimmungen haben den Vorteil, dass der Wassergehalt einer Probe direkt bestimmt werden kann. (HARTGE & HORN 1992³:21ff; LAL & SHUKLA 2004:298) Im Gegensatz dazu werden bei der indirekten Wassergehaltsbestimmung jene Bodeneigenschaften gemessen, welche vom Wassergehalt eines Bodens abhängig sind, um anschließend auf den Wassergehalt rückzurechnen. (GARDNER 1986²:98ff) Indirekte Methoden sind im Gegensatz zur direkten gravimetrischen Methode zur Bestimmung des Wassergehalts nicht destruktiv und haben den Vorteil kontinuierliche Messungen unter geringem Zeitaufwand durchzuführen. (GARDNER 1986²:512ff; HILLEL 2004:97ff) Ergänzende Informationen über die folgend vorgestellten Methoden und weitere Methoden zur Bestimmung des Wassergehalts können in SHUKLA (2014:121ff) nachgelesen werden.

5.4.1. Direkte Methode

Trocknung mittels Trockenschrank

Das Prinzip dieser Analyse basiert auf dem Verlust der Wassermenge, welche durch den Trocknungsvorgang bei 105°C nach 24 Stunden im Trockenschrank aus dem Boden entfernt wurde. (GARDNER 1986²:493ff; HARTGE & HORN 1992³:21ff) Das Analyseergebnis wird üblicherweise „... in „Gewichtsprozent“, d.h. bezogen auf 100g trockenen Bodens ...“ (HARTGE & HORN 1992³:23ff) angegeben und entspricht der Angabe in % Trockenmasse (TM). Während für die Bestimmung des Wassergehalts in % TM sowohl gestörte als auch ungestörte Proben herangezogen werden können, ist für die Bestimmung des Wassergehalts in % Volumen eine ungestörte Stechzylinderprobe notwendig. (HARTGE & HORN 1992³:21ff) In diesem Fall wird das Wasservolumen auf das Volumen der Bodenprobe bezogen. (HILLEL 2004:15; ROWELL 1997:143) Diese Art der Wassergehaltsangabe wird vor allem für Fragestellungen in der Landwirtschaft oder der Hydrologie verwendet. (HARTGE & HORN 1992³:21ff) Für das folgende Fallbeispiel (Kapitel 6) wurde die Ermittlung der Wassergehalte in % TM und in % Volumen nach ÖNORM L 1062 durchgeführt und wird in Kapitel 6.4.5. beschrieben.

5.4.2. Indirekte Methoden

TDR-Sonde

Die Bestimmung des Wassergehalts mittels TDR-Sonde dient zur Ermittlung der vom Bodenwassergehalt abhängigen dielektrischen Konstante eines Bodens. Bei dieser Methode werden zwei mit einem Empfänger verbundene parallel verlaufende Eisenstäbe in den Boden eingebracht und ein elektrischer Impuls ausgesendet. Durch die Ermittlung der zwischen dem Aussenden und Empfangen dieses Impulses gemessenen Zeit und des definierten Abstandes zwischen den Eisenstäben kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit des elektrischen Impulses und in weiterer Folge der Bodenwassergehalt in % Volumen ermittelt werden. (DALTON & VAN GENUCHTEN 1986:237ff; GARDNER ET AL. 1998: 395ff; HILLEL 2004:103ff; NOBORIO 2001:213ff; TOPP ET AL. 1980:575) Die Vorteile der Bestimmung des Wassergehalts mittels TDR-Sonde sind eine hohe Genauigkeit ($\pm 2\%$) und eine hohe Präzision ($\pm 1\%$) sowie die Möglichkeit kontinuierliche Messungen durchzuführen. (HILLEL 2004:103ff; SHUKLA 2014:127) Die Nachteile dieser Bestimmung sind ein hoher Kosten- und Kalibrationsaufwand. (KANOUN ET AL. 2004:475, SHUKLA 2014:127)

Neutronensonde

Eine weitere Möglichkeit den Wassergehalt indirekt zu ermitteln, ist die Bestimmung durch radiometrische Verfahren z.B. mittels Neutronensonde. Diese Methode basiert auf dem Prinzip der Thermalisierung von „schnellen“ Neutronen, welche von einer radioaktiven Quelle emittieren und sich linear bewegen bis sie auf den Kern eines Wasserstoffatoms treffen. Dadurch werden die Neutronen abgebremst und abgelenkt. Mit Hilfe eines Detektors werden die Anzahl der auftreffenden Neutronen ermittelt, womit in weiterer Folge der volumetrische Wassergehalt berechnet werden kann. (HILLEL 2004:98ff; ROBINSON ET AL. 2008:362; SHUKLA 2014:124ff) Trotz der genannten Vorteile gegenüber der direkten Wassergehaltsbestimmung hat die Bestimmung des Wassergehalts mittels Neutronensonde den Nachteil eines hohen Kostenaufwandes. Zusätzlich ist es aufgrund der niedrigen räumlichen Auflösung mit Neutronensonden nicht möglich, Wassergehaltsveränderungen in tieferen Bodenhorizonten zu ermitteln. Die Akzeptanz zur Verwendung radiometrischer Verfahren ist aufgrund des Einsatzes von radioaktiven Materialien sehr gering. Aus diesen genannten Gründen werden radiometrische Verfahren selten angewendet. (DALTON & VAN GENUCHTEN 1986:237; HILLEL 2004:98ff; KANOUN ET AL. 2004:475)

5.5. METHODEN ZUR BESTIMMUNG DER BODENDICHTE

Für die Ermittlung der Bodendichte bestehen zwei Möglichkeiten. Einerseits die Bestimmung der Dichte einer Probe mit definiertem Volumen (Stechzylinder) oder andererseits die sogenannte Volumenersatzmethode. Bei Letzterer wird das entnommene unbekannte Volumen durch ein anderes Material ersetzt und kann dadurch ermittelt werden. (HARTGE & HORN 1992³:47ff) Ergänzende Informationen zu den vorgestellten Methoden zur Bodendichtebestimmung können in BLAKE & HARTGE (1986²) sowie BAIZE (1993) nachgelesen werden.

Stechzylindermethode

Die Entnahme einer ungestörten Stechzylinderprobe ist für diese Methode Voraussetzung. Für die Bestimmung der Feuchtrohdichte wird das Gewicht der frischen Probe ermittelt, während für die Berechnung der Trockenrohdichte das Gewicht der trockenen Probe bestimmt werden muss. Mit Hilfe des bekannten Stechzylindervolumens ist es möglich sowohl die Feuchtrohdichte als auch die Trockenrohdichte der Probe zu berechnen. (BLAKE & HARTGE 1986²:368; HARTGE & HORN 1992³:50ff) Die Ermittlung der Dichten mittels Stechzylindermethode kann im Zuge der Untersuchung des Wassergehalts in % Volumen durchgeführt werden. Die Vorteile dieser Methode sind ein geringer Aufwand sowie die Möglichkeit eine Mehrfachbestimmung einfach durchzuführen. Die richtige Probenahme spielt bei der Stechzylindermethode eine große Rolle. Durch das Einschlagen des Zylinders besteht die Möglichkeit, die Probe zu verdichten. (BAIZE 1993:120) Dieses Problem tritt vor allem bei zu feuchten oder trockenen Bedingungen auf. Aus diesem Grund wird der Einsatz dieser Methode durch die jeweilig vorherrschenden Feuchtebedingungen eingeschränkt. (KEMPER & ROSENAU 1986²:436ff) Die Bestimmung der Feucht- und Trockenrohdichte mittels Stechzylinder wurde im Zuge des Fallbeispiels nach ÖNORM L 1068 (2005) durchgeführt und kann in Kapitel 6.4.6. nachgelesen werden.

Volumenersatzmethode

Die Volumenersatzmethode wird dann eingesetzt, wenn die Dichte einer Probe unbekannten Volumens bestimmt werden soll. Dafür wird eine möglichst regelmäßige Grube ausgehoben und das Gewicht der frischen Probe und das Trockengewicht des gesamten gewonnenen Materials bestimmt. Das entnommene unbekannte Volumen der entstandenen Hohlform wird durch ein anderes Material (meist Sand) mittels Messzylinders aufgefüllt. Vorhandene Wurzel- und Wurmgänge sollten verschlossen werden, um Sandverluste zu vermeiden. Mit Hilfe der Sandmenge, die im Messzylinder zurückbleibt, kann das Volumen des benötigten Sandes zur Auffüllung der Hohlform

bestimmt werden. Nach der Ermittlung des entnommenen Volumens und des Bodentrockengewichts kann die Bodendichte berechnet werden. (BAIZE 1993:121; BLAKE & HARTGE 1986²:368; HARTGE & HORN 1992³:50ff) Der Nachteil der Volumenersatzmethode ist eine geringe Genauigkeit, da das Volumen nur annäherungsweise bestimmt werden kann. Zusätzlich findet diese Methode nur bei trockenen Böden Anwendung. (BAIZE 1993:121)

Radiometrische Methoden

Weitere Möglichkeiten die Trocken- bzw. Feuchetrohdichte zu bestimmen basieren auf radiometrischen Verfahren. Das Prinzip dieser Methoden ist dem der Neutronensonde ähnlich, bei welcher ein radioaktiver Emitter eingesetzt wird. Sie basiert auf der Abhängigkeit der Transmission bzw. Streuung der ausgesendeten Gammastrahlen von der Bodendichte. Ein geringer Zeit- und Arbeitsaufwand für die Probenahme sowie die Möglichkeit kontinuierliche Messungen unter minimaler Störung der Untersuchungsfläche durchzuführen sind die Vorteile radiometrischer Verfahren. (BAIZE 1993:122ff; BLAKE & HARTGE 1986²:373ff) Ein Nachteil radiometrischer Methoden ist die notwendige Ermittlung des volumetrischen Wassergehalts zur Zeit der Messung der Dichte. Oft wird diese im Zuge der Wassergehaltsbestimmung mittels Neutronensonde durchgeführt. Hohe Kosten und der umstrittene Einsatz radioaktiver Materialien sind neben einem hohen Kalibrierungsaufwand weitere Nachteile radiometrischer Methoden. (BAIZE 1993:122ff)

5.6. METHODEN ZUR BESTIMMUNG DES WASSERRÜCKHALTEVERMÖGENS

Zur Ermittlung des Wasserrückhaltevermögens können verschiedene Methoden herangezogen werden. Einen Überblick darüber geben KLUTE (1986²) und SHUKLA (2014:138ff). Im Labor kann die Bestimmung dieses bodenphysikalischen Parameters mit unterschiedlichen Apparaturen durchgeführt werden, die aber auf dem gleichen Prinzip basieren. Dieses beruht darauf, nicht gestörte wassergesättigte Proben verschiedenen Druckstufen auszusetzen und deren Wassergehalt in % Vol. bei der jeweils gewählten Druckstufe zu bestimmen. (HARTGE & HORN 1992³:86ff; KLUTE 1986²:635ff) Für in-situ Untersuchungen werden vorwiegend Tensiometer eingesetzt, um das Wasserrückhaltevermögen zu ermitteln. Folgend werden einige ausgewählte Methoden vorgestellt, die zur Bestimmung des Wassergehalts bei verschiedenen Druckstufen eingesetzt werden können. Nach der Ermittlung der Wassergehalte bei unterschiedlichen Druckstufen kann mit gewonnenen Werten eine Wasserspannungskurve erstellt werden, welche ein wichtiges Hilfsmittel zur Beantwortung für Fragestellungen zum Wasserhaushalt, zur Wasserbewegung und –speicherung und Wasserverfügbarkeit

für Pflanzen sowie für technische Fragen zur Be- und Entwässerbarkeit von Böden oder Verdichtungsfolgen ist. (BITELLI & FLURRY 2009:1453; HARTGE & HORN 1992³:86ff)

Druckplattenapparat

Im Gegensatz zur Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens mittels Kapillarimeter wird bei Verwendung eines Druckplattenapparates ein Überdruck an eine wassergesättigte Probe angelegt, der dazu führt, dass die Probe je nach angelegtem Druck zu entwässern beginnt, womit deren Wassergehalt bei der jeweils gewählten Druckstufe bestimmt werden kann. (HILLEL 2004:436) Bei der Durchführung der Analyse mit Hilfe des Druckplattenapparates ist zu beachten, dass sich die Probe solange in der Druckzelle befinden muss, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. (HARTGE & HORN 1992³:98) Als Richtwert für das Wasserspannungs- und Luftdruckgleichgewicht werden 48 Stunden angegeben. (HARTGE & HORN 1992³:98; ÖNORM L 1062 2006:5) Eingesetzt werden kann diese Überdruckmethode für einen Messbereich von 1000 bis 15000 hPa. (KLUTE 1986²:648) Im folgenden Fallbeispiel wurde das Wasserrückhaltevermögen bei -7000 hPa ebenfalls mit einem Druckplattenapparat durchgeführt. (Kapitel 6.4.7.)

Tensiometer

Im Feld kann zur Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens der Tensiometer eingesetzt werden. Dieser besteht aus einer mit Wasser gefüllten porösen Keramikzelle, die mit einem Vakuummeter verbunden ist, um den Wasserdruck in der Zelle zu messen, der von der Bodenfeuchte abhängig ist. Verringert sich der Bodenwassergehalt steigt die sogenannte Saugspannung im Boden. Der dadurch entstandene Unterdruck kann am Manometer abgelesen werden. (HILLEL 2004:119ff) Der Messumfang von Tensiometern reicht von 0 hPa bis 800 hPa. Aufgrund des begrenzten Messbereichs werden Tensiometer vorwiegend für Fragestellungen zum Bodenwassermanagement eingesetzt, um für die Landwirtschaft wichtige Informationen zur Feldkapazität und dem pflanzenverfügbaren Wasser zu erhalten. (HILLEL 2004:119ff; NOLZ ET AL. 2013:13; SHUKLA 2014:138ff) Die Vorteile von Tensiometern sind der geringe Zeitaufwand im Vergleich zur Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens mittels Druckplattenapparat sowie die kostengünstige Durchführung zur direkten Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens. (TOLL ET AL. 2013:29; ZERMEÑO-GONZÁLEZ ET AL. 2012:207) Ein hoher Wartungsaufwand ist der Nachteil der Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens mittels Tensiometer. (NOLZ ET AL. 2013:13) Bei der Durchführung ist zu beachten, dass die Keramikzelle vor der Einbringung in den Boden wassergesättigt ist und sich keine Luftblasen in dem Instrument befinden. (SHUKLA 2014:140) Aufgrund des begrenzten Messbereichs wurden sogenannte „high-suction-tensiometer“ entwickelt, die auf dem gleichen Prinzip

beruhen, aber die Untersuchung des Wasserrückhaltevermögens im Messbereich bis zu 1000 hPa erlauben. (TOLL ET AL. 2013)

Elektrische Leitfähigkeit

Eine indirekte Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens kann mit Hilfe von porösen Blöcken durchgeführt werden. (SHUKLA 2014:142ff) Das Prinzip dieser Methode basiert auf der Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit vom Wassergehalt. (HILLEL 2004:97ff; KLUTE 1986²:619ff) Verwendet werden wassergesättigte Blöcke aus Gips, Nylon oder Fiberglas, die in den Boden eingebracht werden. (KLUTE 1986²:625; SHUKLA 2014:142ff) Mit Hilfe von in den Blöcken installierten Elektroden kann der elektrische Widerstand gemessen und in Relation zu seinem Wassergehalt gesetzt werden, um das Wasserrückhaltevermögen zu ermitteln. (ROWELL 1997:152) Diese kostengünstige Methode zur Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens ist einfach in der Durchführung und kann in-situ zur kontinuierlichen Untersuchung temporärer Veränderung des Wasserrückhaltevermögens angewendet werden. (KLUTE 1986²:625) Mit Hilfe dieser Methode ist die Untersuchung des Wasserrückhaltevermögens im Bereich von 100 hPa bis 2000 hPa möglich. (SHUKLA 2014:143)

5.7. METHODEN ZUR BESTIMMUNG DER AGGREGATSTABILITÄT

Die Bestimmung der Aggregatstabilität kann mit Hilfe verschiedener Methoden durchgeführt werden, die auf unterschiedlichen Prinzipien zur Zerteilung von Bodenaggregaten in ihre Bestandteile basieren. (AMEZKETA 1999; LE BISSONNAIS 1996) Folgend werden einige ausgewählte Methoden zur Ermittlung der Aggregatstabilität erläutert.

Nasssiebung

Die häufigste verwendete Methode zur Bestimmung der Aggregatstabilität ist die Nasssiebung. (HILLEL 2004:88; LAL & SHUKLA 2004:124) Diese dient dazu, die Resistenz der Bodenaggregate gegen Wasser- und Winderosion zu ermitteln. Aus diesem Grund ist die Ermittlung der Aggregatstabilität für Fragestellungen in der Landwirtschaft bedeutend. (LAL & SHUKLA 2004:124; MURER ET AL. 1993:540; NIMMO & PERKINS 2002:317) Mit dieser Methode können durch die Siebung von Feinerde mittels Siebtauchapparat die Masse der stabilen Aggregate und nach der Dispersion die Masse des Sandes bestimmt werden, um den Anteil der stabilen Aggregate in % zu berechnen. (KEMPER & ROSENAU 1986²:435ff; MURER ET AL. 1993:541) Die Studie von MURER ET AL. (1993) macht deutlich, dass mit dieser Methode Ergebnisse mit hoher Präzision erreicht werden können. Die Nasssiebmethode wurde im Zuge des folgenden Fallbeispiels zur Ermittlung der Aggregatstabilität nach ÖNORM L 1072 (2004) durchgeführt. (Kapitel 6.4.8.)

Beregnung

Die Aggregatstabilität mit Beregnungsversuchen zu ermitteln ist eine weitere Möglichkeit. Bei diesem Verfahren wird ermittelt, wie resistent Bodenaggregate (< 2 mm) gegenüber simuliertem Niederschlag sind und wird oft in Zusammenhang mit Untersuchungen zur Erosionsanfälligkeit von Böden angewendet. (AMEZKETA 1999; LE BISSONNAIS 1996:434; MA ET AL. 2014) Für die Ermittlung gibt es zwei Ansätze: einerseits kann die Restmenge an Aggregaten, die nach einer kontrollierten Beregnung in einem Sieb verbleiben, festgestellt werden oder andererseits kann jene Tropfenmenge ermittelt werden, die notwendig ist, um die Aggregate soweit zu zerteilen, dass sie durch die zuvor definierte Maschenweite des Siebs passen. (HILLEL 2004:88; LE BISSONNAIS 1996:431) Die Nachteile siebbasierter Methoden, wie die Ermittlung der Aggregatstabilität durch Beregnung oder mittels Nasssiebverfahren sind die Beschränkung der Bestimmung stabiler Aggregate „... *for only a few, discrete sieve size fractions...*“ (RAWLINS ET AL. 2013:93) sowie ein hoher Laboraufwand. (RAWLINS ET AL. 2013:93)

Perkolationsverfahren

Eine weitere Möglichkeit die Aggregatstabilität zu bestimmen ist das Perkolationsverfahren. Bei dieser Methode wird jene Wassermenge gemessen, die in definierten Zeitintervallen durch ein mit luftgetrockneter Feinerde gefülltes Rohr perkoliert. (BAIZE 1993:143) Die Summe der Wassermenge, die sich nach Ablauf der Zeit in dem Auffanggefäß befindet, wird als Stabilitätsmaß herangezogen. (BECHER & KAINZ 1983) Mit Hilfe dieser Methode kann auf die Aggregatstabilität und in weiterer Folge auf die Erodierbarkeit des untersuchten Standortes geschlossen werden. Je höher die Perkolationsstabilität ist, desto resistenter sind die Bodenaggregate gegenüber dem Erosionsprozess. (CHERVET ET AL. 2005:162ff) Im Gegensatz zu den zuvor genannten siebbasierten Methoden hat das Perkolationsverfahren die Vorteile eines geringeren Material- und Laboraufwandes. (AUERSWALD 1995:142)

6. FALLBEISPIEL

Zur Beantwortung der zentralen Fragestellung „Welche Möglichkeiten bietet die bodenphysikalische Analytik und wo liegen ihre Grenzen“ sollen mit Hilfe des vorgestellten Projekts die Möglichkeiten, die die bodenphysikalischen Analytik zur Untersuchung von bodenphysikalischen Parametern bietet, vorgestellt werden. Gleichzeitig sollen damit auch ihre Grenzen aufgezeigt werden.

6.1. FRAGESTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Im Zentrum des Projekts stehen schwere Böden. Diese weisen oft hohe Lehm- bzw. Tonanteile auf, welche sich negativ auf den Wasser- und Lufthaushalt auswirken können. In der landwirtschaftlichen Praxis wird die Applikation von Kalkstein (CaCO_3) empfohlen, um der natürlichen Versauerung entgegen zu wirken und eine Verbesserung des Gefüges zu bewirken. (VDLUFA 2000:3) Der Einsatz von Branntkalk (CaO) in der Landwirtschaft zur Strukturstabilisierung ist hingegen umstritten. Diesem Düngemittel werden negative Auswirkungen auf bodenmikrobiologische Prozesse und Organismen zugeschrieben.

Bei diesem Projekt soll untersucht werden, wie sich die Melioration von Böden mit Kalkstein und Branntkalk sowohl auf die Bodenmikrobiologie als auch auf ausgewählte bodenphysikalische Parameter auswirkt. Die Fragestellung dafür lautet: „*Wie verändert sich die Bodenmikrobiologie durch die Applikation von Kalkstein bzw. Branntkalk als Maßnahme zur Strukturstabilisierung von verdichtungsanfälligen Böden?*“ Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich ausschließlich mit der Untersuchung bodenphysikalischer Parameter.

Dieses Projekt wurde in einem Glashaus durchgeführt. Das Bodenmaterial für die Versuchsansätze stammt von landwirtschaftlich genutzten Flächen aus drei verschiedenen Regionen Österreichs. Die Bodentypen der gewählten Standorte entsprechen einem Pseudogley und sind aufgrund ihrer schlechten Bedingungen im Wasser- und Lufthaushalt zur Ausbringung von Kalkstein (CaCO_3) und Branntkalk (CaO) potentiell geeignet. Das entnommene Bodenmaterial wurde in Kübel gefüllt und nach dem Hinzufügen von CaCO_3 und CaO in randomisierter Verteilung im Glashaus aufgestellt.

Für die bodenphysikalischen Untersuchungen wurden sowohl die Korngrößen Zusammensetzung als auch der Wassergehalt als grundlegende Parameter der bodenphysikalischen Analytik erhoben. Zusätzlich wurde untersucht, ob und wie sich

die Applikation von Kalkstein (CaCO_3) und Branntkalk (CaO) auf folgende bodenphysikalische Parameter auswirkt: Feucht- und Trockenrohdichte, Wasserrückhaltevermögen, Aggregatstabilität.

6.2. STANDORTE

Zur Beantwortung der Fragestellung des Projekts wurden drei unterschiedliche Standorte ausgewählt. Diese liegen in den Bundesländern Niederösterreich, Oberösterreich und im Burgenland. (Abbildung 3) Folgend werden die drei Standorte und deren klimatische Bedingungen mit Hilfe einer Referenzstation der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) näher beschrieben und ihre Standortbedingungen kurz charakterisiert. Die gewählten Referenzstationen wurden aufgrund ihrer räumlichen Nähe zu den drei Standorten gewählt.

Für eine repräsentative Bodenprobe wurde bei jedem Standort das Material ungefähr 10m vom Feldrand entfernt genommen. Damit wurde versucht, potentielle Randeffekte zu verhindern.

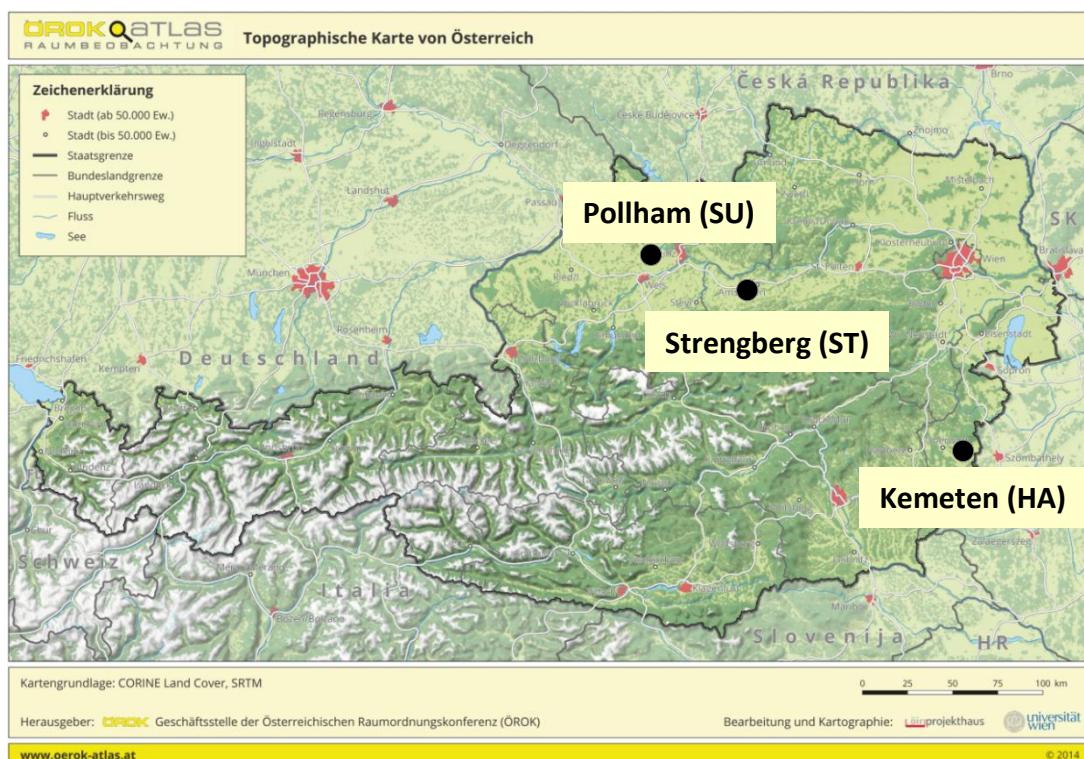


Abbildung 3: Lage der Standorte in Österreich (<http://www.oerok-atlas.at>, zuletzt abgerufen am 6.5.2014)

6.2.1. Niederösterreich – Strengberg

Ein Standort befindet sich im westlichen Niederösterreich in der Gemeinde *Strengberg* auf einer Höhe von 300 m über NN. Um Aussagen über klimatische Verhältnisse machen zu können, wurde die 30 Kilometer entfernte Klimastation Waidhofen/Ybbs gewählt.

Aufgrund der räumlichen Nähe wird davon ausgegangen, dass die Daten dieser Station auch den klimatischen Gegebenheiten des Standorts Strengberg entsprechen.

Zum Zeitpunkt der Entnahme des Bodenmaterials war das auf einem Oberhang liegende Feld mit Mais angebaut. Vor der Entnahme wurde die Biomasse auf einer Fläche von etwa 5 m² entfernt. Laut der elektronischen Bodenkarte des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft ist diese Fläche als extremer Pseudogley ausgewiesen. (Abb. 4) An der Oberfläche liegende Mangankonkretionen und sichtbare rostfarbene Verfärbungen des Bodens deuteten bereits zum Zeitpunkt der Entnahme auf diesen Bodentyp hin.



Abbildung 4: Standort in Niederösterreich – *Strengberg*
(http://gis.lebensministerium.at/eBOD/frames/index.php?&gui_id=eBOD)

Zum Zeitpunkt der Entnahme (1. August 2013) waren starke und tiefe Risse an der Bodenoberfläche sichtbar, die möglicherweise in Folge der hohen Temperaturen und des geringen Niederschlags im Juli entstanden sind. Den Daten der Bezugsstation Waidhofen/Ybbs zufolge war dieser Monat mit 21,6 °C um 3,4 °C wärmer als im Bezugszeitraum 1981-2010. Gleichzeitig wurde im Juli mit 60 mm weniger als die Hälfte des mittleren Juliniederschlags des Bezugszeitraums erreicht.
(<http://www.zamg.ac.at/cms/de/aktuell/monatsrueckblick/wetterrueckblick?monat=07&jahr=2013>) Auch das Klimadiagramm für das Jahr 2013 (Diagramm 2) zeigt wie wenig Niederschlag im Juli im Vergleich zu den Monaten Mai und Juni fiel. Zusätzlich wurde in diesem Monat das österreichische Temperaturmaximum mit 39,2 °C erreicht.

	1981-2010	2013	Δ
Temperatur [°C]	18,2	21,6	+3,4
Niederschlag [mm]	139	60	-79

Tabelle 4: Temperatur und Niederschlag im 30jährigen Mittel und im Jahr 2013 für den Monat Juli

Klimatisch betrachtet befindet sich dieser Standort im nordalpinen Bereich. Jahresniederschläge zwischen 800 mm und 1000 mm sind charakteristisch für diese Klimazone. (HARLFINGER & KNEES 1999:16) Anhand des folgenden Langzeitdiagramms (1981-2010) ist ein Temperatur- und Niederschlagsmaximum in den Sommermonaten zu erkennen. Von Dezember bis Februar liegen die Temperaturen durchschnittlich unter 0 °C. Dadurch ergibt sich eine mittlere Jahresmitteltemperatur von 8,3 °C. (Bezugszeitraum 1981-2010). Die durchschnittliche Jahresniederschlagssumme liegt für den gleichen Bezugszeitraum bei ca. 1200 mm.

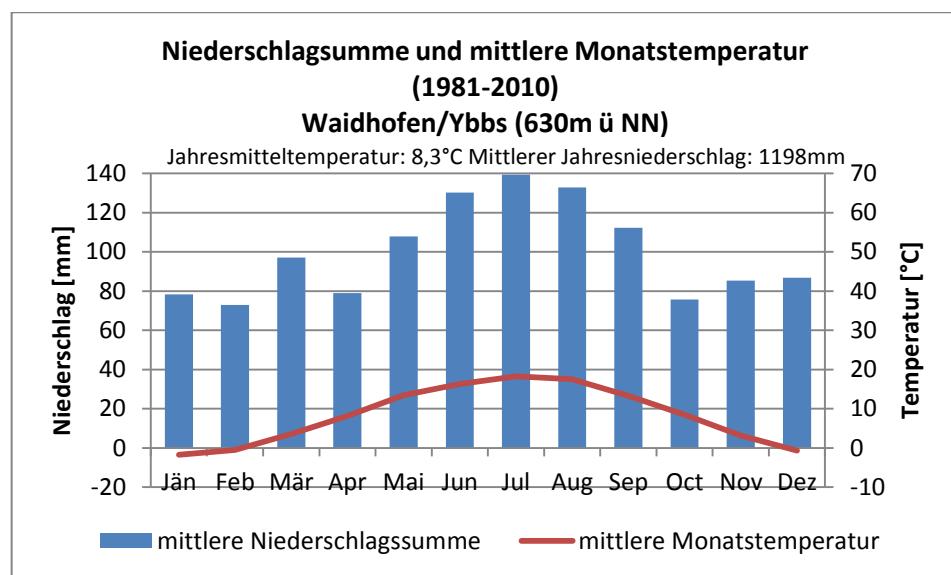


Diagramm 1: Niederschlagssumme und Temperatur im Monatsmittel (1981-2010) – Waidhofen/Ybbs

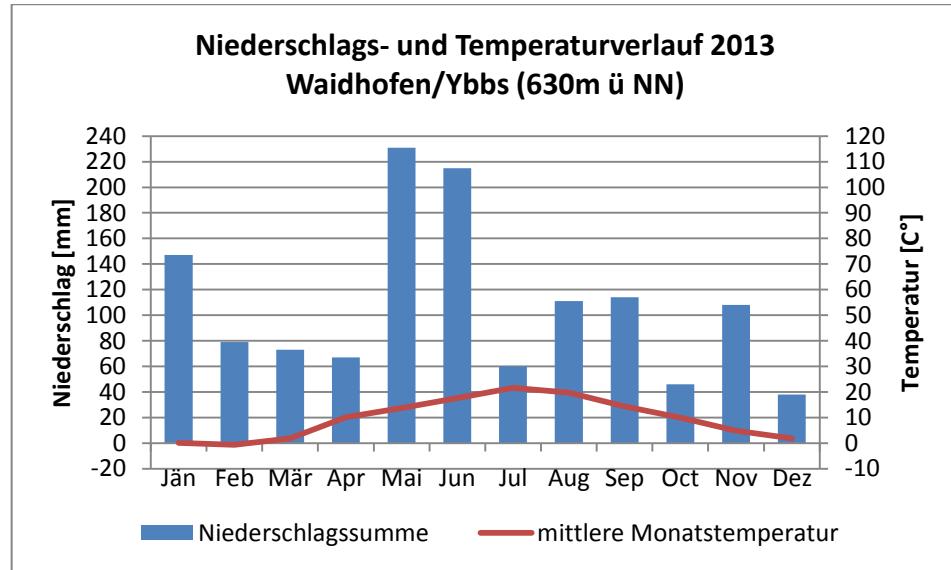


Diagramm 2: Niederschlags- und Temperaturverlauf (2013) – Waidhofen/Ybbs

6.2.2. Oberösterreich – Pollham

Ein weiterer Standort befindet sich in Oberösterreich im Bezirk Grieskirchen auf einer Höhe von 385 m über NN. Aufgrund nicht vorhandener Klimadaten für diesen Standort wurde die nächstgelegene Klimastation Ried im Innkreis herangezogen, um die klimatischen Bedingungen an diesem Standort zu beschreiben. Die von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geophysik betriebene Station liegt 30 Kilometer Luftlinie vom Entnahmestandort entfernt. Die mittlere Jahresniederschlagssumme liegt im Bezugszeitraum 1981-2010 bei 1006 mm. Die Jahresmitteltemperatur bei 8,7°C. Klimatisch gesehen befindet der Standort *Pollham* wie der Standort *Strengberg* im nordalpinen Bereich. (HARLFINGER & KNEES 1999:16)

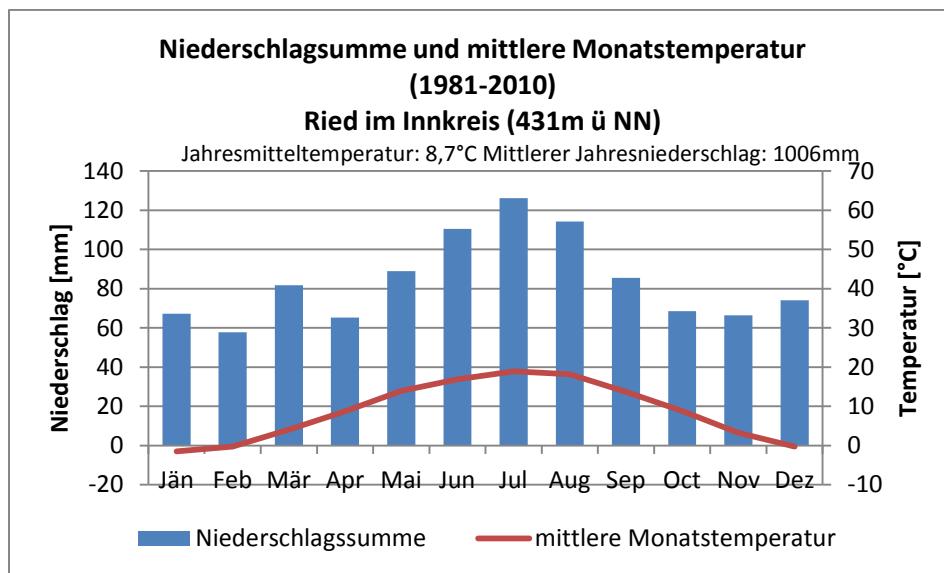


Diagramm 3: Niederschlagssumme und Temperatur im Monatsmittel (1981-2010) – Ried im Innkreis

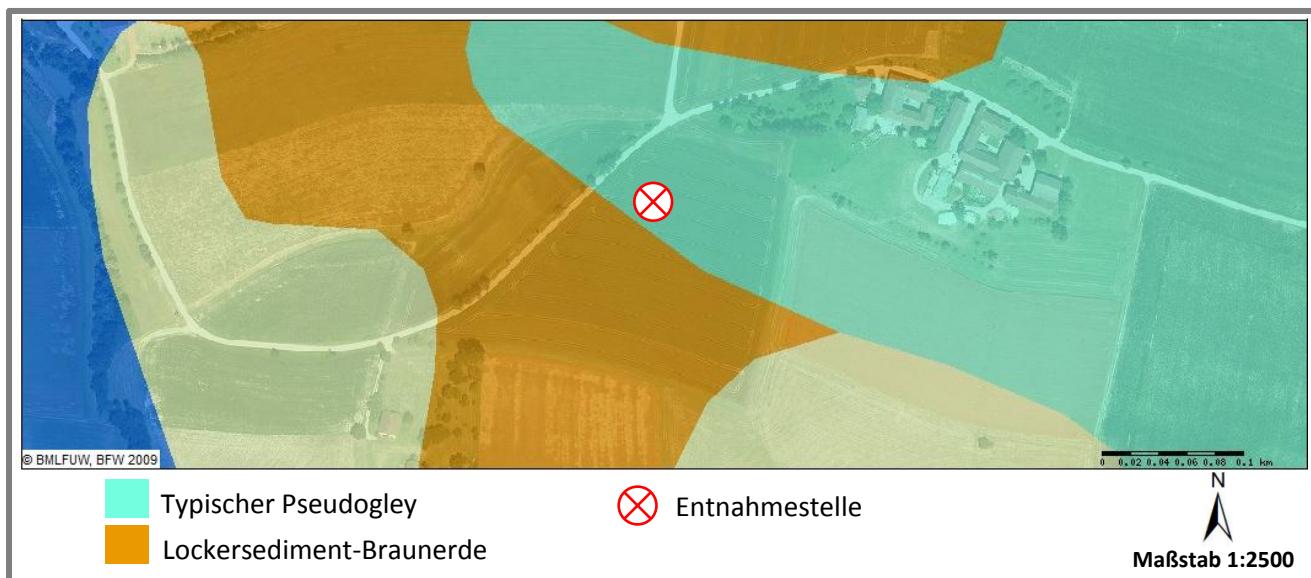


Abbildung 5: Standort in Oberösterreich – Pollham
[\(\[http://gis.lebensministerium.at/eBOD/frames/index.php?&gui_id=eBOD\]\(http://gis.lebensministerium.at/eBOD/frames/index.php?&gui_id=eBOD\)\)](http://gis.lebensministerium.at/eBOD/frames/index.php?&gui_id=eBOD)

Bei diesem Standort in *Pollham* wurde das Bodenmaterial aus einem bereits gegrubberten Weizenfeld entnommen. Das betreffende Feld wird von der elektronischen Bodenkarte (<https://gis.lebensministerium.at/ebod>) in zwei unterschiedliche Bodentypen eingeteilt. (Abbildung 5) Der höher liegende Abschnitt des Feldes wird als „typischer Pseudogley aus schluffig-lehmigem Schliermaterial“ ausgewiesen, während der tiefer liegende Abschnitt als „pseudovergleyte, kalkfreie Lockersediment-Braunerde aus schluffig-lehmigen Schliermaterial“ identifiziert wird. Das für den Versuchsansatz entnommene Bodenmaterial stammt aus dem Bereich des „Typischen Pseudogleys“. (http://gis.lebensministerium.at/eBOD/frames/index.php?&gui_id=eBOD)

6.2.3. Burgenland – Kemeten

Im Burgenland befindet sich der nächste Standort, Kemeten. Dieser liegt in der Gemeinde Oberwart an der westlichen Grenze zur Steiermark auf einer Höhe von 333 mm über NN. Zum Zeitpunkt der Probenahme war dieser Standort mit Soja bepflanzt und noch nicht geerntet. Der Bodentyp entspricht laut der elektronischen Bodenkarte einem typischen Pseudogley. (Abbildung 6) Aufgrund der ausgetrockneten Oberfläche war das Bodenmaterial für die Versuchsansätze am Tag der Entnahme schwer zu gewinnen.

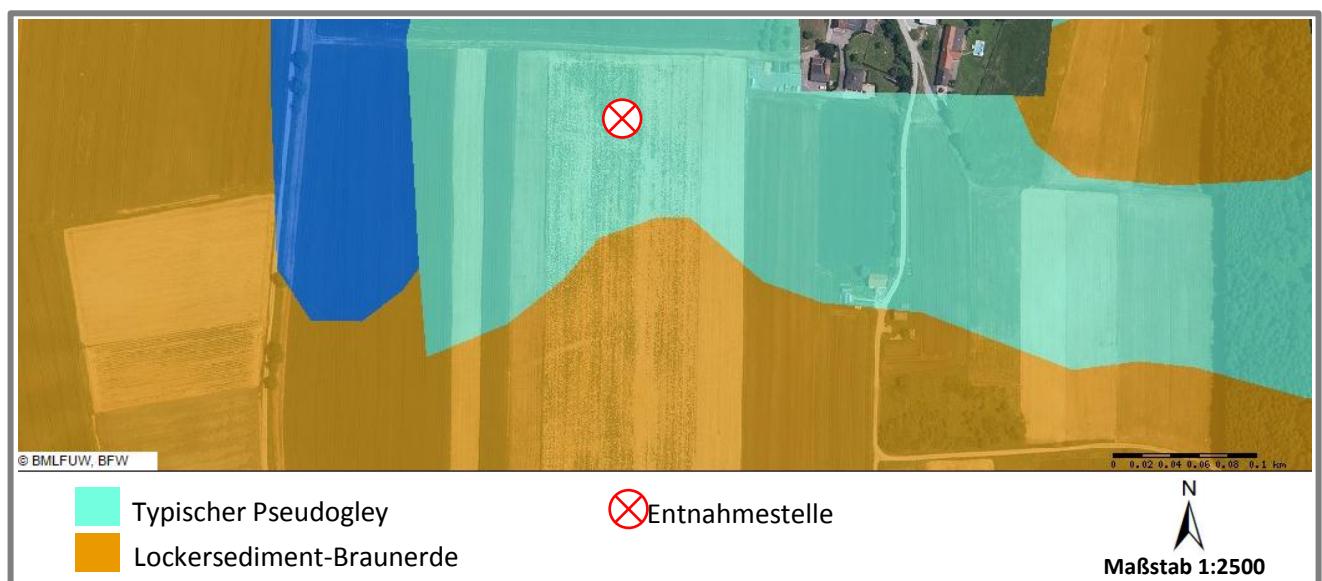


Abbildung 6: Standort im Burgenland – Kemeten
(http://gis.lebensministerium.at/eBOD/frames/index.php?&gui_id=eBOD)

Im Vergleich zu den beiden anderen Standorten liegt der Ort *Kemeten* klimatisch gesehen im illyrischen Klimaraum. Diese zeichnet sich durch eine hohe Jahresmitteltemperatur und durchschnittlichen Jahresniederschlägen zwischen 700 und 900 mm aus. (HARLFINGER & KNEES 1999:16) Als Referenzstation wurde die 70 Kilometer

entfernte Klimastation Bad Gleichenberg gewählt. Wie Kemeten liegt auch dieser Ort in der illyrischen Klimazone. Beim Vergleich der Jahresmitteltemperatur und der mittleren Jahresniederschlagssumme der Referenzstationen wird der Charakter des illyrischen Klimas bestätigt. Die Jahresmitteltemperatur für den Bezugszeitraum (1981-2010) liegt bei 9,5 °C und der durchschnittliche Jahresniederschlag bei 832 mm.

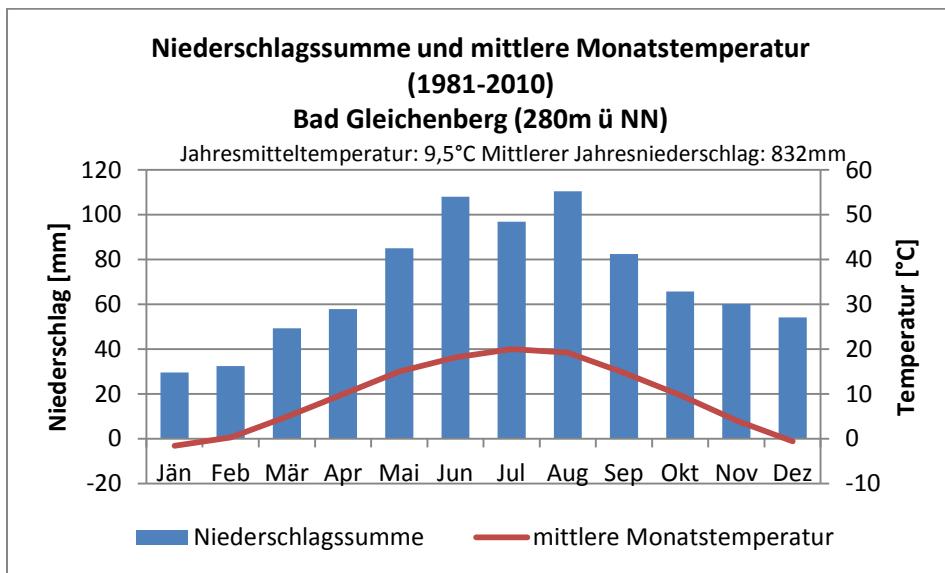


Diagramm 4: Niederschlagssumme und Temperatur im Monatsmittel (1981-2010) – Bad Gleichenberg

6.3. ANALYSEPARAMETER

6.3.1. Korngröße

Die Analyse der Korngrößenverteilung ist ein wichtiger Bestandteil für die Charakterisierung eines Bodens. (BLUME ET AL. 2010:171) HARTGE & HORN (1992:29) bezeichnen die Korngrößenanalyse als die grundlegendste Bestimmung zur Untersuchung eines Bodens. Ihre Wichtigkeit wird dadurch deutlich gemacht, dass „... viele verschiedene Bodeneigenschaften mehr oder weniger stark mit der Korngrößenverteilung...“ (HARTGE & HORN 1992³:29) zusammenhängen. Dazu zählen physikalische Eigenschaften, wie zum Beispiel die Porengrößenverteilung und die damit verbundene Wasser- und Luftspeicherfähigkeit eines Bodens. (BLUME ET AL. 2010:171ff)

Die primären Bestandteile eines Bodens bestimmen dessen Charakter und Eigenschaften. (BLUME ET AL. 2010:175) Die Dimension der Körner kann stark variieren und reicht von größeren Steinen bis hin zu Teilchen, die nur unter dem Mikroskop zu erkennen sind. (GEE & OR 2002:255) In der Bodenkunde wird zwischen Grobboden (= Bodenskelett) (>2 mm) und Feinboden (<2 mm) unterschieden. Die Fraktionen des Feinbodens sind Sand (63-2000 µm), Schluff (2-63 µm) und Ton (<2 µm). Die Teilchen dieser Korngrößenklassen haben im Gegensatz zum Bodenskelett erheblichen Einfluss

auf Speicher- und Austauschvorgänge im Boden. (BLUME ET AL. 2010:172, LEWANDOWSKI ET AL. 1997:43) Der Grobboden bestimmt sowohl den Luft- als auch den Wasserhaushalt. (ÖNORM L 1061-1 2002:3)

6.3.2. Wassergehalt

Die Bestimmung des Wassergehalts zählt wie die Korngrößenanalyse zu den grundlegenden Untersuchungen in der bodenphysikalischen Analytik. (HARTGE & HORN 1992³:21) Der Wassergehalt einer Feldprobe „...hängt von den vorausgegangenen Witterungsverhältnissen ab.[...]“ (ROWELL 1997:77) Im Gegensatz dazu sind die Wassergehalte der Versuchsansätze durch manuelle Bewässerung künstlich konstruiert. Neben der Bestimmung des volumetrischen Wassergehalts der frischen Probe wurde der Wassergehalt in % Masse der frischen Probe ermittelt. Mit der Bestimmung des volumetrischen Wassergehalts konnte in weiterer Folge auch die Dichte der Proben berechnet werden.

6.3.3. Dichte

Die Dichte eines Bodens gibt den Lagerungs- und Verdichtungszustand wider. Damit stellt die Dichte einen veränderlichen physikalischen Bodenparameter und keine Materialkonstante dar. (HARTGE & HORN 1992³:47) Da ein Bodenhorizont verschiedene Dichten aufweisen kann, ist eine Parallelbestimmung nötig, um die Variabilität festzustellen (ROWELL 1997:112) Auf Grund der begrenzten Fläche war eine Parallelbestimmung der Feuchtrohdichte bzw. Trockenrohdichte nicht möglich. Bei jeder Probenahme wurde pro Standort und Variante ein Einzelwert bestimmt.

6.3.4. Wasserrückhaltevermögen

Die sogenannte pF-Kurve ergibt sich aus der Beziehung zwischen dem Bodenwassergehalt und dem Matrixpotenzial. (BLUME ET AL. 2010:227, ROWELL 1997:138) Diese kennzeichnet die Fähigkeit eines Bodens, Wasser entgegen einer definierten Saugspannung zu halten. (LESER ET AL. 2005:793) Diese wird auch als Wasserrückhaltvermögen bezeichnet. Die Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens eines Bodens dient dazu, den Bodenwasserhaushalt zu charakterisieren und Aussagen über die Wasserspeicherfähigkeit eines Bodens zu machen. Neben dem Einsatz im wasserwirtschaftlichen Bereich wird die Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens in technischen Bereichen eingesetzt. Diese wird als Hilfsmittel zur Beantwortung technischer Fragen zur Bearbeitbarkeit, Be- und Entwässerbarkeit sowie zu Verdichtungsfolgen eines Bodens eingesetzt. (HARTGE & HORN 1992³:86)

Um eine pF-Kurve graphisch darzustellen, werden die Wassergehalte bei verschiedenen Matrixpotentialen im Boden bestimmt. Dazu wurden zwei verschiedene Methoden herangezogen. Mit Hilfe der Unterdruckmethode, auch Absaugmethode genannt, wurden Wassergehalte bei Matrixpotentialen von -30 hPa, -60 hPa, -100 hPa, -300 hPa ermittelt. Diese „... beruht darauf, daß eine vorher unter standardisierten Bedingungen mit Wasser gesättigte Bodenprobe stufenweise entwässert wird, indem die Kapillarmenisken und Wasserfilme im Boden einer immer stärkeren Kraft [Saugkraft] ausgesetzt werden.[...]“ (HARTGE & HORN 1992³:86-87) Bei der Überdruckmethode wird der Druck hingegen nicht von unten, sondern von oben auf die Bodenprobe angelegt. (HARTGE & HORN 1992³:94) Mit Hilfe einer Druckzelle konnte der Wassergehalt bei -7000 hPa ermittelt werden.

6.3.5. Aggregatstabilität

Aggregate werden als zusammenhängende Primärteilchen im Boden bezeichnet, welche untereinander einen stärkeren Zusammenhalt haben, als mit den sie umgebenden Bodenpartikeln. (BLUME ET AL., 2010:196; KEMPER & ROSENAU, 1986:425) Gebildet werden Aggregate durch verschiedene physikalische Prozesse, wie Quellen, Schrumpfen oder durch wiederholtes Gefrieren oder Tauen des Bodens. (BLUME ET AL. 2010:196) Die Bildung der Aggregate verläuft dabei je nach Bodenart und vorherrschenden Bodenbedingungen unterschiedlich. (BLUME ET AL., 2010:287) Auch mineralische Düngemittel, wie z.B. Calciumcarbonate können zu einer Verbesserung der Aggregatstabilität führen. (BLUME ET AL. 2010:208)

Ein Bodengefüge wird dann als stabil bezeichnet, „... wenn die Lage der Primärteilchen zueinander bei einer Spannungsveränderung erhalten bleibt. [...]“ (BLUME ET AL. 2010:207) Stabile Aggregate sorgen für einen hohen Anteil an Grobporen. Diese garantieren neben einer hohen Infiltrationsrate auch eine optimale Belüftung für Pflanzen. (KEMPER & ROSENAU 1986:426) Zusätzlich schützen größere und stabile Aggregate vor Bodenerosion und Verschlammung. (NIMMO & PERKINS 2002:317)

6.4. METHODIK

6.4.1. Probenahme

Das Bodenmaterial für die Versuchskübel wurde jeweils am 1. August 2013 in *Strengberg*, am 8. August 2013 in *Pollham* (Region Suben) und am 12. August in *Kemeten* (Region Hartberg) genommen. Vor der Probenahme wurde die Feldfrucht auf einer Fläche von 5 m² entfernt. Mit Hilfe von Spitzhacke, Spaten und Schaufel konnte das Bodenmaterial bis aus einer Tiefe von 15 cm gewonnen werden und wurde durch ein

Wurfgitter mit einer Maschenweite von ca. 15 mm von groben Erdklumpen getrennt. Grobe Erdstücke wurden durch mechanische Bearbeitung zerkleinert und wiederum mittels Wurfgitter gesiebt. Das Bodenmaterial wurde abschließend in zuvor beschriftete Plastiksäcke gefüllt. Insgesamt wurden pro Standort 18 Säcke mit etwa 25 kg grobgesiebtem Bodenmaterial gefüllt und zur Universität für Bodenkultur transportiert.

6.4.2. Probevorbereitung im Glashaus

Vor dem Befüllen der 23 cm hohen zylindrischen Kübel (\varnothing 27 cm) wurde das vorhomogenisierte Bodenmaterial durch ein Sieb mit der Maschenweite von 11,2 mm gesiebt. Für eine bessere Belüftung wurden neun Löcher in den Boden der Kübel gebohrt. Die folgende Abbildung (Abbildung 7) zeigt den Aufbau des Versuchsansatzes. Gewaschener Grantsplit (ca. 2 kg) wurde bis auf eine Höhe von 2,5 cm gefüllt und mit zugeschnittenem Filtervlies bedeckt. Darauf wurden ca. 11 kg des auf kleiner als 11,2 mm gesiebten Bodenmaterials in die Kübel gefüllt.

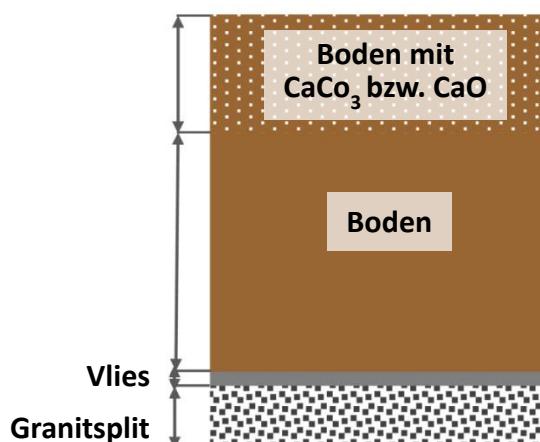


Abbildung 7: Versuchsansatz (eigene Darstellung)

Um sicherzustellen, dass Sickerwasser abfließen kann, wurden die Versuchsansätze auf Holzleisten in einer randomisierten Verteilung nach dem lateinischen Quadrat im Glashaus der Universität für Bodenkultur aufgestellt. Dieses Verteilungssystem dient dazu, beeinflussende Faktoren, wie eine inhomogene Beschattung und daraus resultierende Temperaturunterschiede sowie Unterschiede in der Luftzufuhr repräsentativ auf alle Kübel zu verteilen. In der folgenden Abbildung (Abbildung 8) wird der Versuchsaufbau dargestellt. Die drei fett umrandeten Bereiche kennzeichnen die zur Verfügung gestellten Tische (155 cm x 230 cm). Die in Schwarz hervorgehobenen Bezeichnungen stellen die Position der für die bodenphysikalischen Analysen verwendeten Kübel dar. Insgesamt wurde pro Probenahmezeitpunkt ein Block kreiert. Einer davon enthält für jeden Standort (ST, SU, HA) jeweils eine Probe, auf welche einerseits Kalkstein „CaCO₃“ (I) und andererseits Branntkalk „CaO“ (II) appliziert wurde

und zusätzlich eine unbehandelte Kontroll-Probe (**C**). Daraus ergeben sich insgesamt neun Proben pro Block und aufgrund von vier Wiederholungen (Beispiel: 1B-4B) insgesamt 36 Proben für die Analysen der Bodenphysik. Aufgrund der drei Probenahmezeitpunkte werden nur die ersten drei Blöcke herangezogen. Der vierte Block dient als Reserve, um Analysen wiederholen zu können, falls Probleme bei der Probenahme oder während der Durchführung von Analysen auftreten.

Für eine gleichmäßige aszendente Befeuchtung wurden die Kübel in mit Wasser gefüllte Maurerträger gestellt. Aufgrund des begrenzten Platzes in den Behältern konnte nur ein Standort nach dem anderen von unten befeuchtet werden. Das Wasser in den Trägern wurde auf eine Höhe von 12 cm eingefüllt. Nach 24 Stunden wurden die Kübel wieder aus den Behältern entfernt.

EINGANG GLASHAUS						
	51	HA-C-1A	59	HA-I-1A	67	HA-II-1A
34	SU-I-1A	26	SU-C-1A	17	ST-II-1A	
42	SU-II-1A	1	ST-C-1A	9	ST-I-1A	
35	SU-I-2A	18	ST-II-2A	43	SU-II-2A	
10	ST-I-2A	27	SU-C-2A	68	HA-II-2A	
2	ST-C-2A	60	HA-I-2A	52	HA-C-2A	
19	ST-II-3A	69	HA-II-3A	28	SU-C-3A	
61	HA-I-3A	53	HA-C-3A	36	SU-I-3A	
11	ST-I-3A	44	SU-II-3A	3	ST-C-3A	
37	SU-I-4A	45	SU-II-4A	4	ST-C-4A	
70	HA-II-4A	54	HA-C-4A	12	ST-I-4A	
29	SU-C-4A	20	ST-II-4A	62	HA-I-4A	
21	ST-II-1B	63	HA-I-1B	30	SU-C-1B	
13	ST-I-1B	5	ST-C-1B	46	SU-II-1B	
55	HA-C-1B	38	SU-I-1B	71	HA-II-1B	
31	SU-C-2B	64	HA-I-2B	47	SU-II-2B	

FENSTERSEITE						
	56	HA-C-2B	6	ST-C-2B	39	SU-I-2B
14	ST-I-2B	72	HA-II-2B	22	ST-II-2B	
23	ST-II-3B	40	SU-I-3B	65	HA-I-3B	
15	ST-I-3B	7	ST-C-3B	57	HA-C-3B	
32	SU-C-3B	48	SU-II-3B	73	HA-II-3B	
16	ST-I-4B	66	HA-I-4B	24	ST-II-4B	
41	SU-I-4B	8	ST-C-4B	58	HA-C-4B	
49	SU-II-4B	33	SU-C-4B	74	HA-II-4B	

Abbildung 8: Randomisierte Verteilung der Versuchsansätze (eigene Darstellung)

Um den Wassergehalt in % Volumen eines Versuchsansatzes zu bestimmen, müssen sowohl das Volumen als auch die Lagerungsdichte des Bodenmaterials im Kübel bekannt sein. Für die Ermittlung des Bodenvolumens wurde der Abstand der Oberfläche des eingefüllten Bodenmaterials zur Oberkante des Kübels an vier symmetrisch angelegten

Messpunkten gemessen und gemittelt. Da die Füllhöhe des Granitsplittes und des Filtervlieses bekannt war, konnte daraus das Bodenvolumen [cm³] im Versuchsansatz bestimmt werden. Das Gewicht des Kübels inklusive Kies und Vlies war bekannt, woraus die Masse [kg] des eingefüllten Bodenmaterials ermittelt werden konnte. Nach Berechnung der Lagerungsdichte konnte der momentane Wassergehalt in % berechnet werden.

Um den Wassergehalt bei etwa 30 % Volumen zu halten, musste die Menge an Wasser, die für diesen Wert fehlt, gravimetrisch bestimmt und mit Hilfe einer Mensur aufgebracht werden. Ab diesem Zeitpunkt wurde der Wassergehalt täglich punktuell überprüft und bei Bedarf bewässert. Bevor Kalkstein (CaCO₃) und Branntkalk (CaO) appliziert wurden, musste der Wassergehalt über einen Zeitraum von einem Monat gehalten werden. Am 17. September 2013 erfolgte die Applikation. Der Oberboden (0 – 7 cm) wurde mit Hilfe einer Gartenkralle aufgelockert und pro Standort jeweils ein Versuchsansatz mit CaCO₃ bzw. CaO versetzt. Die dabei applizierte Menge entspricht mit 12,5 g der tatsächlichen Aufbringung von 2000 kg ha⁻¹ CaCO₃ am Feld. Die Applikation von Branntkalk auf landwirtschaftlich genutzten Böden ist in diesem Ausmaß nicht geläufig. Sie wurde jedoch bewusst gewählt, um die Auswirkung einer überhöhten Dosis auf bodenphysikalische Parameter und auf die Bodenmikrobiologie zu ermitteln. Mittels Handkultivator wurden der Kalkstein und der Branntkalk in den aufgelockerten Oberboden eingearbeitet und zusätzlich 400 ml Wasser hinzugefügt. Um für alle Kübel gleiche Bedingungen zu schaffen wurde selbiges Verfahren bei den Referenzproben angewandt. Für die Untersuchung von kurz- und mittelfristigen Auswirkungen auf bodenphysikalische Parameter erfolgten die Probenahmen zwei Tage (19.09.2013), 30 Tage (17.10.2013) und 86 Tage (12.12.2013) nach der Applikation.

Die Analysen zu den einzelnen Bestimmungen wurden im Physiogeographischen Labor des Instituts für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien durchgeführt. Für die Durchführung der Laborarbeiten wurde für jede Probenahme eine Zeitdauer von 10 Tagen veranschlagt.

6.4.3. Probenahme und Probevorbereitung

Wie bereits erwähnt wurden insgesamt 36 Versuchsansätze hergestellt und daraus 45 ungestörte Stechzylinder (5 pro Standort und Variante = 5x3x3) entnommen. Diese wurden für die Analyse des Wasserrückhaltevermögens (4 Stechzylinder) und für die Bestimmung der Rohdichte und des Wassergehalts in % Volumen (1 Stechzylinder) verwendet. Für die Analysen des Wassergehalts in % TM (mind. 50 g), der Aggregatstabilität als auch für die Korngrößenanalyse (100 g) wurden Mischproben bis

aus einer Tiefe von 7 cm entnommen und für die Analysemethode entsprechend aufbereitet.

6.4.4. Bestimmung der Korngrößenverteilung

Die Analysen zur Bestimmung der Korngrößenverteilung der Fraktionen > 0,2 mm wurden nach Vorlage der ÖNORM L 1061-1 (Grobboden) und ÖNORM L 1061-2 (Feinboden) durchgeführt. Die Ermittlung des Korngrößenanteils von Kies/Grus (> 2 mm), Grobsand (2 – 0,63 mm), Mittelsand (0,63 – 0,2 mm) und Feinsand (0,2 – 0,063 mm) erfolgte mittels Nasssiebung im Siebturm. Unter der Annahme, dass der Humusanteil der Proben unter 5 % liegt, wurde diese Bestimmung ohne Humuszerstörung durchgeführt. (ÖNORM L 1061-2, 2002:3) Die Korngrößen Schluff und Ton konnten mittels Sedigraph 5120 der Firma MICROMERITICS und der Software SedigraphIII V1.04 ermittelt werden.

Aufgrund des homogenisierten Bodenmaterials, der einheitlichen Vorbereitung und Bearbeitung der einzelnen Versuchsansätze wurde von keinen gravierenden Unterschieden in der Korngrößenzusammensetzung ausgegangen. Aus diesem Grund wurde pro Standort jeweils ein Kübel (Kontroll-Variante) für die Analyse der Korngrößenverteilung herangezogen.

Im Gegensatz zur Nasssiebung musste bei der Vorbereitung für die Korngrößenanalyse (< 0,063 mm) per Sedigraph der Humusanteil zerstört werden. Dazu wurden 10 g einer Probe in ein 1000 ml Becherglas eingewogen und so lange mit Wasserstoffperoxid (15 %) versetzt, bis keine Reaktion in Form von Aufschäumung mehr zu sehen war. Im nächsten Schritt wurde entionisiertes Wasser hinzugefügt und bei 120 °C abgedampft. Nach Beendigung dieses Vorgangs konnte die Probe mit entionisiertem Wasser durch ein Sieb mit der Maschenweite von 0,063 mm in ein 1000 ml Becherglas überführt werden. Das im Sieb zurückbleibende Material wurde in eine beschriftete und abgewogene Porzellanschale überführt und entspricht dem Sandanteil der Probe in g. Das Becherglas enthält alle Korngrößen < 0,063 mm und wurde so lange bei 70 °C im Trockenschrank belassen, bis sich die Probe abgesetzt hatte. Das restliche überstehende Wasser wurde per Schlauch abgesaugt bis nur mehr wenige ml im Becherglas vorhanden waren. Mit Hilfe einer Spritzflasche wurde der Inhalt des Becherglases restlos in einen Probebecher überführt, mit 10 ml Natriumpyrophosphat ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, 0,1) versetzt und vor der Analyse im Sedigraphen kurz aufgerührt. Der Output enthält die Anteile der Korngrößen zwischen 63 µm und 2000 µm angegeben in kumulativen Massenprozent.

Wie HARTGE & HORN (1992:29) festhalten, ändert sich das Ergebnis der Korngrößenanalyse unter Beibehaltung der Untersuchungsmethode kaum. Aus diesem Grund wurde die Analyse der Korngrößenverteilung nur einmal durchgeführt, da eine Veränderung der Korngrößenverteilung im zeitlichen Verlauf des Projektes ausgeschlossen wurde.

6.4.5. Bestimmung des Wassergehalts in % TM und % Volumen

Es wurden pro Probenahme sowohl der Wassergehalt in % TM als auch der Wassergehalt in % Volumen der frischen Probe nach ÖNORM L 1062 (2003) berechnet. Für Erstere wurden über 50 g der frischen Probe auf eine beschriftete und abgewogene Petrischale gegeben, gewogen und über Nacht bei 105 °C auf ihre Trockenmasse getrocknet. Nach Abwiegen der auf Raumtemperatur gekühlten Proben konnte der Wassergehalt in % TM der frischen Probe ermittelt werden. (Formel 3)

$$W_m = ((m_w - m_d) / m_d) * 100$$

Formel 2: Berechnung des Wassergehalts in % TM nach ÖNORM L 1062 (2003:4)

Der Wassergehalt in % Volumen der frischen Probe konnte mit Hilfe der Ergebnisse der Rohdichteberechnung bestimmt werden. (Formel 4)

$$\Theta_v = ((m_w - m_d) / V) * 100$$

Formel 3: Berechnung des Wassergehalts in % Volumen nach ÖNORM L 1062 (2003:4)

Dabei sind W_m und Θ_v jeweils der Wassergehalt in % TM (W_m) bzw. % Volumen (Θ_v), m_w und m_d die Masse der frischen bzw. der trockenen Probe bei 105°C [g] und V das Volumen des Stechzylinders [cm^3].

6.4.6. Bestimmung der Rohdichten feucht & trocken in % Vol

Zur Bestimmung der Rohdichten wurde am Tag der Probenahme jeweils ein Stechzylinder pro Standort und Variante entnommen, auf eine abgewogene und beschriftete Petrischale gestellt und über Nacht bei 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Nach dem Abkühlen wurde die Probe erneut gewogen und nach Abzug des Gewichts des Zylinders die Rohdichten – trocken und feucht – mit folgender Formel bestimmt:

$$a) \rho_w = m_w / V \quad b) \rho_d = m_d / V$$

Formel 4: Berechnung der Rohdichten a) feucht und b) trocken nach ÖNORM L 1068 (2006:5)

ρ_w und ρ_d stellen die Rohdichte (g/cm^3) jeweils für die feuchte und trockene Probe dar. Bei der Berechnung werden die Massen der feuchten m_w [g] oder der trockenen Probe

m_d [g] durch das Volumen der Probe V (100 cm^3) dividiert. Das Ergebnis der Berechnung der Rohdichte feucht ist die Dichte des Bodens zum Zeitpunkt der Probenahme.

6.4.7. Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens

Vorbereitung

Vor der Analyse des Wasserrückhaltevermögens mussten die Filterpakte vorbereitet werden. Wichtige Grundlage für die Filterpakte ist reiner Löss. Dieser wurde von $75 \mu\text{m}$ auf $45 \mu\text{m}$ gesiebt. Nach Befeuchtung des Lösses wurde er in die dafür vorgesehenen Trichter gefüllt. Dabei muss die vollständige Abdichtung der Filterpakte gewährleistet werden, um bei der Durchführung der Analyse Druckverlust zu verhindern. Bevor die Stechzylinder auf die Filterpakte aufgebracht werden, müssen diese mit Wasser gesättigt sein. Dazu wurden diese für mindestens drei Tage in ein mit Wasser gefülltes Gefäß gestellt und luftdicht verschlossen.

Durchführung

Bei dieser Bestimmung wurden die wassergesättigten Stechzylinder bei vier Druckstufen (-30 mbar, -60 mbar, -100 mbar, -300 mbar) analysiert. Diese mussten über eine Stunde konstant gehalten werden, bevor die Stechzylinder auf die Filterpakte aufgebracht wurden. Dabei muss der lückenlose Kontakt zum Filterpaket gegeben sein, da der Wassergehalt in der Probe nur dann dem angelegten Druck entsprechen kann, wenn der hydraulische Kontakt zwischen der Probe und dem Filterpaket gegeben ist. Zusätzlich wurde jeweils ein mit Sand gefüllter Zylinder (20 cm^3) (= Nullvariante) auf eine der vier Filterpakte hinzugefügt. Mit Hilfe dieser Referenzprobe und der gewonnenen Ergebnisse können Fehler bei der Analyse erkannt werden. Nach Aufbringen der Stechzylinder und der Referenzprobe wurden diese mit einer Plastikfolie bedeckt, um ein Verdunsten zu verhindern. Da der Druck in den folgenden sechs Stunden vom System nicht konstant gehalten wurde, musste der Druck regelmäßig kontrolliert und bei Bedarf nachgestellt werden. Anschließend wurden die Proben gewogen und über Nacht bei 105°C in den Trockenschrank gestellt. Mit Hilfe folgender Formel konnte am darauffolgenden Tag der Wassergehalt in % TM für jede Druckstufe berechnet werden:

$$\Theta_{(\psi_{mf})} = (m_{(\psi_{mf})} - m_d / p_{H2O} * V) * 100$$

Formel 5: Berechnung des Wasserrückhaltevermögens nach ÖNORM L 1062 (2006:6)

Dabei sind $\Theta_{(\psi_{mf})}$ der Wassergehalt auf Grundlage der Masse bei einem Matrixpotential ψ_{mf} , [g], $m_{(\psi_{mf})}$ die Masse der Bodenprobe bei einem Matrixpotential ψ_{mf} [g] und m_d die Masse der ofentrockenen Bodenprobe [g]. Im Quotienten stehen die Dichte des Wassers ($\approx 1 \text{ g/cm}^3$) und das Volumen der Bodenprobe ($\approx 100 \text{ g/cm}^3$).

Die Durchführung dieser Analyse erfolgte bei jeder Probenahme innerhalb von drei Tagen. Am ersten Tag wurde der Wassergehalt der Kontroll-Proben (C-Kübel) bei den jeweiligen Matrixpotentialen bestimmt. An den zwei weiteren Tagen folgten zuerst die Proben der ersten (CaCO_3) und danach die Proben der zweiten (CaO) Variante. In der Zeit zwischen den Probennahmen wurden die Filterpakte jeweils mit Hilfe eines Tonkegels feucht gehalten. Diese waren über einen Schlauch mit einem mit Wasser gefüllten Becherglas verbunden. Damit konnte eine Austrocknung der Filterpakte über den Zeitraum bis zur nächsten Probenahme verhindert werden.

Um den Wassergehalt bei einem Überdruck von -7000 mbar festzustellen, wurden Mischproben aus den Kübeln entnommen, in kleine Porzellanschälchen gefüllt und für mindestens drei Tage mit Wasser gesättigt. Am Tag der Analyse wurde der Boden der Druckzelle mit einem Filtertuch und einer Cellophanmembran überzogen, dabei muss das Bilden von Luftblasen verhindert werden, um bei der Analyse eine gleichmäßige Entwässerung der Proben zu gewährleisten. Bei der Aufbringung der mit den wassergesättigten Proben gefüllten Stechzylinder muss der hydraulische Kontakt zwischen der Platte und der Proben gewährleistet sein. Die Stechzylinder wurden für vier Tage bei einem Druck von -7000 mbar in der Druckzelle belassen und anschließend auf zuvor beschriftete und abgewogene Petrischalen gewogen und über Nacht bei 105 °C im Trockenschrank getrocknet. Am nächsten Tag konnte der Wassergehalt bei -7000 mbar nach dem Wiegen der Proben bestimmt werden.

6.4.8. Bestimmung der Aggregatstabilität in %

CaCO_3 und CaO wurden bis in die Tiefe von 7 cm eingebracht. Für die Bestimmung der Aggregatstabilität wurde Material aus diesem Bereich entnommen und ein Nasssiebverfahren nach ÖNORM L 1072 (2004) angewendet. Bereits am Tag vor der Nasssiebung wurde ein mit entionisiertem Wasser gefüllter Kübel vorbereitet und das luftgetrocknete Bodenmaterial zwischen 1 mm und 2 mm gesiebt. Im nächsten Schritt wurden 10 g des gesiebten Materials in ein Sieb (\varnothing 10 cm) mit der Maschenweite von 250 µm überführt und fünf Minuten mit einer Frequenz von 42 Hüben pro Minute vertikal mittels Siebetauchapparat gesiebt. Bei der Durchführung der Siebung müssen alle Bodenaggregate vollständig unter Wasser sein. Mit Hilfe einer Spritzflasche wurden an der Oberfläche schwimmende Aggregate zum Sinken gebracht. Nach Beendigung des Siebvorgangs wurde die im Sieb zurückbleibende Probe in eine zuvor beschriftete und abgewogene Petrischale restlos überführt und über Nacht bei 105°C in den Trockenschrank gestellt. Nach Erreichen der Raumtemperatur wurden die Petrischalen abermals gewogen. Die in der Petrischale verbliebene Masse entspricht der Masse der

stabilen Aggregate, des Sandes sowie der in der Probe befindlichen Organik. Um die Masse des Sandes und der stabilen Aggregate getrennt voneinander zu bestimmen, wurde die zur Massekonstanz getrocknete Probe mindestens zwei Stunden mit 0,1 molarem Natriumpyrophosphat ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, 0,1 mol) versetzt, um Aggregate in ihre Primärkörner zu dispergieren. (BLUME ET AL. 2010:174) Anschließend konnte die Probe durch das Sieb mit der Maschenweite von 250 μm mit Hilfe von Leitungswasser und eines Gummiwischers gründlich durchgewaschen werden, sodass nur der Anteil des Sandes im Sieb zurückblieb, welcher nach der Trocknung bei 105° durch Auswiegen des überführten Siebrückstandes bestimmt wurde. Die Berechnung des Anteils der stabilen Aggregate ergibt sich aus folgender Formel:

$$AS = (m_{A,S} - m_S) / (m_p - m_S)$$

Formel 6: Berechnung der Aggregatstabilität nach ÖNORM L 1072 (2004:5)

Dabei sind AS der Anteil der stabilen Aggregate in %, $m_{A,S}$ die Summe der Masse der stabilen Aggregate und des Sandes [g], m_S die Masse des Sandes [g] und m_p die Masse der Probe (Einwaage) in g. Die Analyse der Aggregatstabilität wurde für jeden Standort, jede Variante und jeden Probenahmezeitpunkt jeweils dreimal durchgeführt. Entsprechend der oben angeführten Formel wurde die Aggregatstabilität in Prozent berechnet und aus den drei gewonnenen Werten der Mittelwert bestimmt.

6.4.9. Statistische Auswertung

Mit Hilfe der Programme Microsoft EXCEL 2010 und STATGRAPHICS Centurion XVI wurden die gewonnenen Analyseergebnisse aufbereitet und statistisch ausgewertet.

Für die Analysen der Korngröße, Dichte sowie des Wassergehalts und des Wasserrückhaltevermögens wurde jeweils nur ein Wert pro Standort, Variante und Probenahme bestimmt. Da der Datensatz mit einem Wert pro Analyse zu gering ist, kann keine umfangreiche statistische Auswertung – weder deskriptiv noch induktiv – durchgeführt werden. Im Gegensatz dazu wurden für die Aggregatstabilität pro Standort und Behandlungsvariante drei Einzelwerte ermittelt, mit welchen eine statistische Auswertung durchgeführt werden kann.

6.4.9.1. Deskriptive Statistik

Die deskriptive Statistik dient dazu, einen Datensatz zu beschreiben. Dazu werden oft Lage- und Streuungsparameter herangezogen, um unter anderem die Häufigkeiten und die Schiefe der Häufigkeitsverteilung gewonnener Werte zu ermitteln. (HARTUNG ET AL. 1986:15ff) Meistens wird die deskriptive Statistik als Vorstufe zur schließenden Statistik durchgeführt. (HARTUNG ET AL. 1986:15)

6.4.9.2. *Induktive Statistik*

Mit Hilfe der induktiven Statistik kann die Messunsicherheit ermittelt werden. (KROMIDAS 1995:265) Zusätzlich kann festgestellt werden, ob die Verteilung der Werte zufällig entstanden ist oder nicht. Nach der Formulierung von Hypothesen wird damit die statistische Signifikanz der Ergebnisse und die Abhängigkeiten zwischen den Variablen geprüft. (HARTUNG ET AL. 1986:2)

Wie erwähnt wurden von den ausgewählten Laboranalysen nur bei der Aggregatstabilität ausreichend viele Werte für eine statistische Signifikanzprüfung ermittelt. Nach einer Nullhypotesenprüfung mittels Kolgomorov-Smirnoff-Test konnte eine weitere Abhängigkeitsanalyse mittels 2-faktorieller ANOVA (Konfidenzintervall: 95 %) durchgeführt werden, um den Einfluss der beiden Faktoren „Kalk“ (Variante: Kontrolle, CaCO₃, CaO) und „Zeit“ (Zeit nach Applikation: 2, 30, 86 Tage) zu ermitteln. Zusätzlich wurde der Einfluss der Interaktion (Kalk x Zeit) dieser Faktoren mittels 2-faktorieller ANOVA untersucht. Der Tukey HSD-Test wurde herangezogen, um die Mittelwerte über alle Varianten und Zeitpunkte der Probenahme zu vergleichen. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) werden dabei mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet. (DELTEDESCO ET AL. 2014:5-6)

6.5. ERGEBNISSE

6.5.1. Korngröße

Wie die folgende Tabelle (Tabelle 5) zeigt, sind die Anteile der einzelnen Kornfraktionen am Feinboden bei allen drei Standorten ähnlich. Der Sandanteil der einzelnen Standorte am Feinboden liegt zwischen 9,3 % (*Strengberg*) und 28 % (*Hartberg*). Die Standorte *Strengberg* und *Pollham* haben einen Schluffanteil mit Werten zwischen 56,6 und 60,6 %, während der Standort *Kemeten* im Vergleich dazu einen geringeren Schluffanteil am Feinboden von 32,2 % aufweist. Die Anteile an der Tonfraktion liegen zwischen 26,5 % (SU) und 39,6 % (HA). Die Anteile am Grobboden sind hingegen bei allen drei Standorten ähnlich und liegen im Bereich zwischen 1,2 % (SU) und 2,3 % (HA).

	Ton	Feinschluff	Mittelschluff	Grobschluff	Feinsand	Mittelsand	Grobsand	Grus
<i>in µm</i>	<2	2 – 6,3	6,3 – 20	20 – 63	63 – 200	200 – 630	630 – 2000	> 2000
ST	34,2	13,1	21,5	22,0	3,3	2,6	3,4	1,3
SU	26,5	11,7	22,3	26,7	9,9	1,4	1,5	1,2
HA	39,6	8,4	12,1	11,8	15,7	8,4	4,1	2,3

Tabelle 5: Anteil an Fein- und Grobboden in % der Gesamtmasse

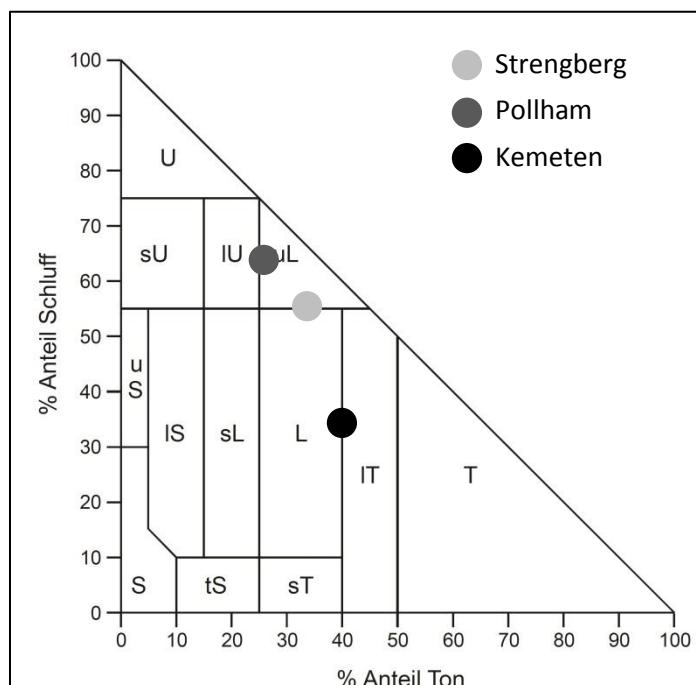


Abbildung 9: Korngrößendreieck Standorte *Strengberg*, *Pollham* und *Kemeten* nach ÖNORM L 1050 (2004)

Nach dem Übertragen der Werte der Korngrößenanalyse des Feinbodens in das österreichische Korngrößendreieck (ÖNORM L 1050, 2004) können die Bodenarten der drei Standorte festgestellt werden. (Abbildung 9) Wie anhand der vorigen Tabelle gezeigt wurde, sind sich die Standorte *Strengberg* (ST) und *Pollham* (SU) in ihrer

Korngrößenzusammensetzung sehr ähnlich, was auch an der Position im Korngrößendreieck erkennbar ist. Die Korngrößenzusammensetzung ergibt als Bodenart für die beiden genannten Standorte einen schluffigen Lehm. Aus der Zusammensetzung der Korngrößenanteile am Feinboden kann für den dritten Standort *Kemeten* (HA) als Bodenart ein Lehm bzw. lehmiger Ton festgestellt werden.

Neben der Bestimmung der Bodenart nach ÖNORM L 1050 (2004) wurde zusätzlich in 1-cm-Schritten die Korngrößenzusammensetzung bis in die Tiefe von 14 cm untersucht. Die folgende Tabelle zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung eines Standorts (*Pollham*). Infolge der Durchmischung des Bodenmaterials konnte über die gesamte Bodentiefe im Kübel eine homogene Verteilung der Korngrößen pro Zentimeter erzielt werden.

<i>Probe</i>	<i>Ton</i> $<2 \mu\text{m}$	<i>Feinschluff</i> $2 - 6,3 \mu\text{m}$	<i>Mittelschluff</i> $6,3 - 20 \mu\text{m}$	<i>Grobschluff</i> $20 - 63 \mu\text{m}$	<i>Gesamtsand</i> $63 - 2000 \mu\text{m}$
A1	27,6	10,1	22,2	25,1	15
A2	27,5	10,2	21,9	25,3	15,1
A3	27,2	10,2	22,2	25,1	15,3
A4	26,7	10,4	21,4	26,1	15,4
A5	26,6	10,6	21,5	26,3	15
A6	26,6	11,1	21,4	25,7	15,3
A7	26,5	10,6	21,6	26,6	14,7
A8	26,5	10,3	21,5	26,4	15,4
A9	26,7	10,1	21,4	26,4	15,4
A10	25,8	11,5	21,6	26,2	14,8
A11	26,5	10,5	21,6	26,1	15,3
A12	26,7	10,5	21,7	26	15
A13	26,7	10,9	21,9	25,7	14,8
A14	25,7	11,3	21,7	26,6	14,7

Tabelle 6: Korngrößenzusammensetzung pro Zentimeter, Standort *Pollham* (Anteile in % am Feinboden)

6.5.2. Wassergehalt in % TM und in % Volumen

Die folgende Grafik zeigt die Wassergehalte (in % TM und in % Volumen) am Tag der Probenahme. Mittels manueller Bewässerung wurde versucht, den gravimetrischen Wassergehalt während der gesamten Untersuchung konstant zwischen 20 % und 30 % Volumen zu halten. Die Werte des Standortes *Kemeten* liegen bei der dritten Probenahme zwischen 30,7 % Volumen und 34,6 % Volumen und damit über dem gewünschten Maximalwert von 30 % Volumen. Der Standort *Strengberg* weist bei den mit CaCO₃ (30,6 % Volumen) und CaO (32,4 % Volumen) versetzten Proben ebenfalls erhöhte Werte auf. Zusammengefasst können in Folge der konstruierten Wassergehalte und der fehlenden Parallelbestimmungen keine Aussagen über die Wirkung von CaCO₃ oder CaO auf den Wassergehalt – weder in % TM noch in % Volumen – gemacht werden.

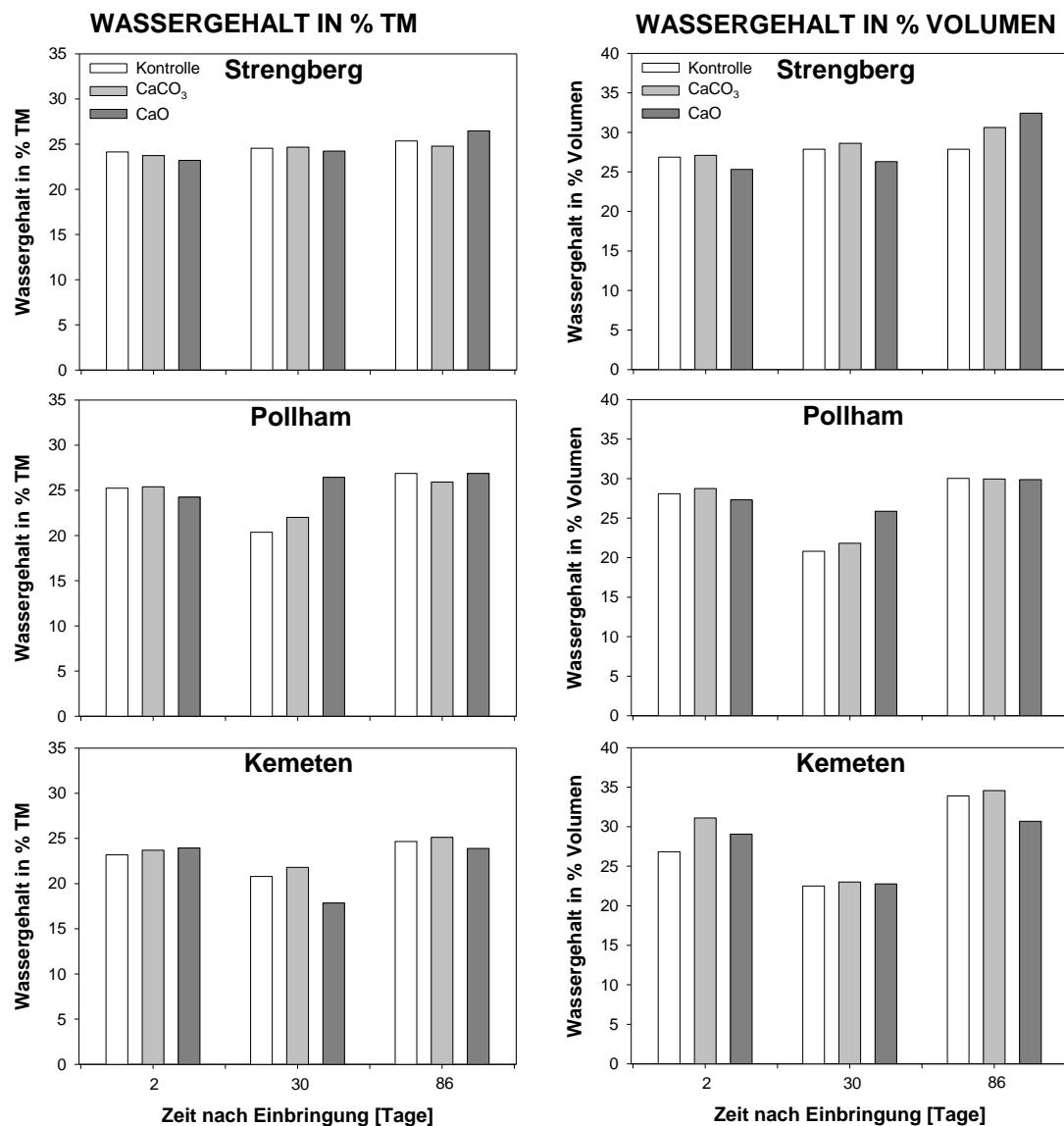


Diagramm 5: Wassergehalt in % TM und Wassergehalt in % Volumen

6.5.3. Rohdichte feucht & trocken in % Volumen

Beim Standort *Strengberg* kann eine Erhöhung der Dichte von der ersten bis zur dritten Probenahme festgestellt werden. Für den Standort *Kemeten* ist diese Entwicklung nur teilweise erkennbar. Bei diesem Standort kommt es sowohl bei der Kontrollprobe als auch bei dem mit CaO behandelten Boden zu einer Erhöhung der Dichte bis zur dritten Probenahme. Im Gegensatz dazu liegen die Werte der zweiten Probenahme des mit CaCO₃ behandelten Bodens unter denen der ersten Probenahme. Beim Standort *Pollham* ist ebenfalls eine Abnahme der Dichte von der ersten zur zweiten Probenahme bei allen Varianten erkennbar. Bei der dritten Probenahme nach 86 Tagen liegen die Werte über denen der ersten Probenahme.

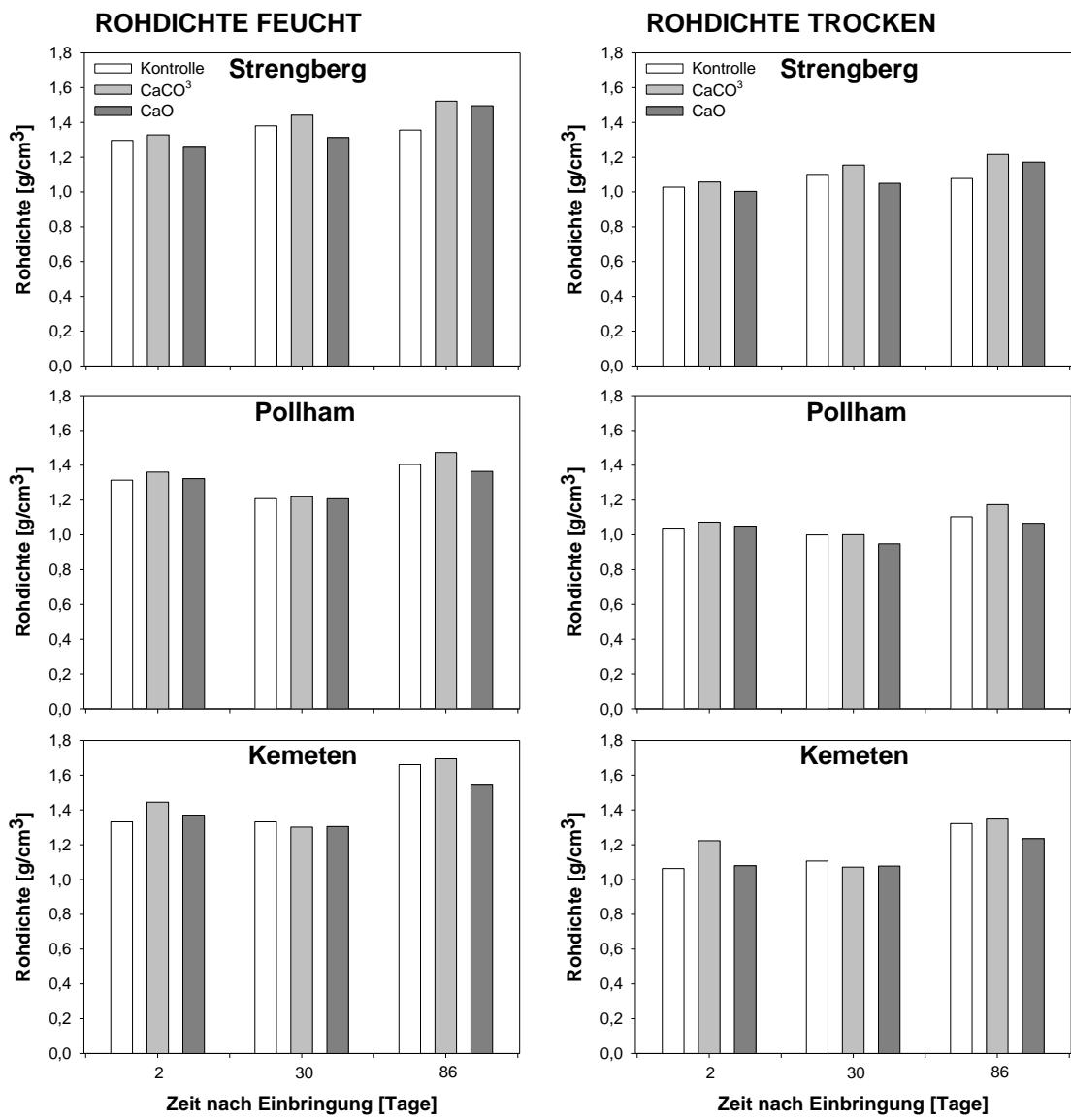


Diagramm 6: Rohdichte feucht und Rohdichte trocken

6.5.4. Wasserrückhaltevermögen

Die folgenden Diagramme zeigen das Wasserrückhaltevermögen für jeden Standort und jede Variante. Auf der X-Achse sind neben den angelegten Matrixpotentialen -30 hPa, -60 hPa, -100 hPa, -300 hPa und -7000 hPa zusätzlich die entsprechenden pF-Werte angegeben. Die Wassergehalte bei den angelegten Matrixpotentialen liegen bei allen Standorten im selben Wertebereich. Aus diesem Grund wird angenommen, dass weder CaCO_3 noch CaO Einfluss auf das Wasserrückhaltevermögen haben bzw. dass die Abhängigkeit vom Standort den Effekt der applizierten Düngemittel übersteigt.

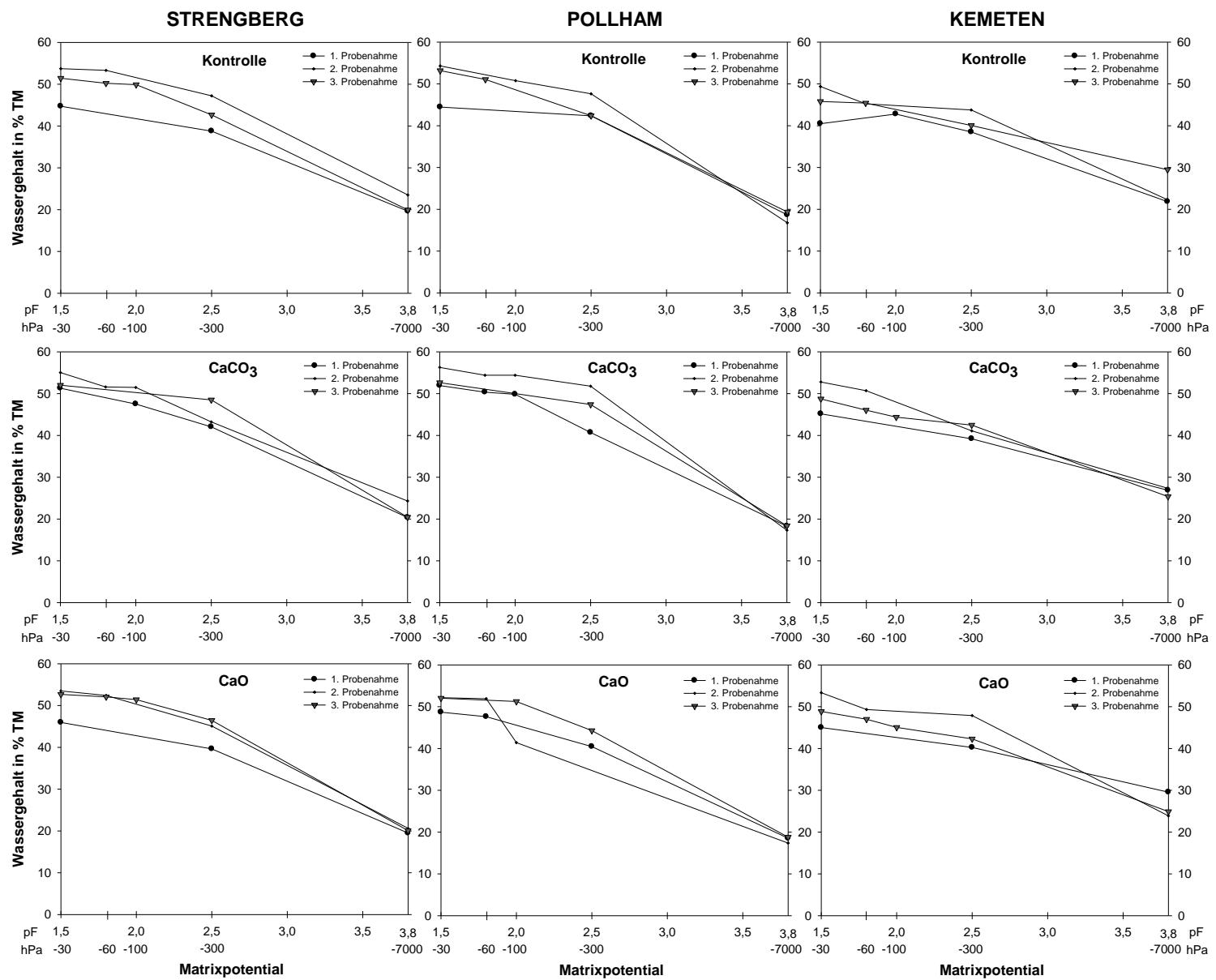


Diagramm 7: Wasserrückhaltevermögen pro Standort und Variante

6.5.5. Aggregatstabilität in %

Die Ergebnisse der Aggregatstabilitätsanalyse zeigen, dass die Applikation von CaO zur Bildung von stabilen Aggregaten beiträgt. Verglichen mit der Referenzprobe ist bereits innerhalb von zwei Tagen eine signifikante Erhöhung der Aggregatstabilität erkennbar. Dieser Effekt hält auch nach drei Monaten noch an. Im Gegensatz dazu führt die Applikation von CaCO₃ zu keinem signifikanten Anstieg der Aggregatstabilität. Mittels zweifaktorieller ANOVA wird belegt, dass sowohl der Faktor „Kalk“ (CaCO₃ bzw. CaO) als auch der Faktor „Zeit“ signifikanten Einfluss ($p < 0,05$) auf das Ergebnis der Aggregatstabilitätsanalyse haben.

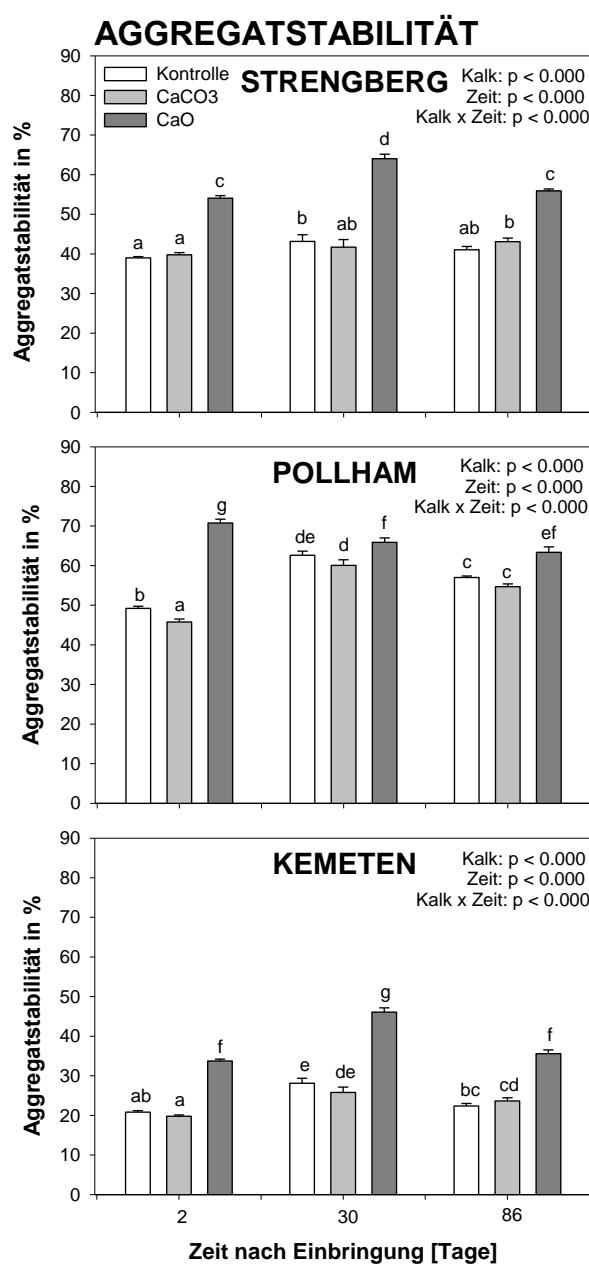


Diagramm 8: Aggregatstabilität in %

7. DISKUSSION DER METHODIK

Zur Beantwortung der zentralen Fragestellung „WELCHE MÖGLICHKEITEN BIETET DIE BODENPHYSIKALISCHE ANALYTIK ZUR UNTERSUCHUNG VON BÖDEN UND WO LIEGEN IHRE GRENZEN?“ wird in diesem Kapitel auf die im Zuge des Projekts durchgeführten Arbeitsschritte (Probenahme, Durchführung der Analysen) eingegangen und eventuelle Probleme bei der Durchführung erläutert.

7.1. LABORMETHODE

Die gezogenen Stechzylinder und die entnommenen Mischproben zur Bestimmung der Aggregatstabilität und der Korngröße sind nur repräsentativ für den künstlich erstellten Bodenaufbau in den Kübeln. In dieser Hinsicht sind die gewonnenen Ergebnisse der Analysen nur für den künstlich erstellten Bodenaufbau und die im Glashaus herrschenden Bedingungen während des gesamten Versuchs in den Kübeln repräsentativ. Da das von den drei Standorten stammende Bodenmaterial nach der Entnahme vom Feld durch Siebung bearbeitet und homogenisiert wurde, entspricht der Aufbau im Kübel nicht den realen Bedingungen am Feld. Auch wenn das Ergebnis der Korngrößenanalyse in 1-cm-Schritten zeigt, dass das Material sehr gut homogenisiert wurde, entspricht die Lagerung der Bodenteilchen keinesfalls der Realität auf dem Feld und der jahrelangen natürlichen Entwicklung des Gefüges.

7.1.1. Probenahme

Grundsätzlich soll die Entnahme von Proben ohne mechanische Zerstörung von Probenmaterial ablaufen, um das Gefüge der Probe nicht zu beeinflussen. Eine ungestörte Entnahme der Stechzylinder für die Analysen des Wasserrückhaltevermögens, der Dichte und der Bestimmung des Wassergehalts in % Volumen wurde durch oberflächliche Risse erschwert. (Abbildung 10) Um einen repräsentativen Stechzylinder für einen Versuchsansatz zu entnehmen, mussten diese so positioniert werden, dass keine an der Oberfläche sichtbaren Risse enthalten sind. In diesem Zusammenhang ist der Standort *Kemeten* hervorzuheben. Die Böden dieses Standortes bildeten bereits nach kurzer Zeit Risse an der Oberfläche, womit die Entnahme von repräsentativen Stechzylindern beeinträchtigt wurde.

Stechzylinderproben, deren Gefüge mit Rissen durchzogen ist, können z.B. bei der Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens schneller entwässern und das Ergebnis verfälschen. Bei der Bestimmung der Rohdichten kann das Setzen der Stechzylinder auf nicht repräsentative Stellen eine Verfälschung des Ergebnisses hervorrufen. Enthält eine Probe Klüfte, könnte das zu niedrigeren Werten bei der Dichte führen. Zusammengefasst

müssen die Stellen zur Stechzylinderentnahme so gewählt werden, dass die Proben keine offensichtlichen Risse enthalten und für die Fragestellung repräsentativ sind.



Abbildung 10: Versuchsansatz mit an der Oberfläche sichtbaren Rissen; Standort Kemeten (BAUER 2013)

Durch das Glattschneiden der entnommenen Stechzylinder muss das Verschmieren der Oberfläche der Probe und damit das Verschließen der Poren verhindert werden. (HARTGE & HORN, 1992:13) Bei der Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens ist die Entwässerung der Grob- und Mittelporen wesentlich. Verschmierte Poren können eine reale Entwässerung nicht gewährleisten und damit das Ergebnis beeinflussen.

Wenn der Wassergehalt eines Bodens etwa der Feldkapazität entspricht, ist der beste Zeitpunkt für eine Probenahme. (BLAKE & HARTGE 1986:366; ROWELL 1997:113) Ist der Boden zu feucht, kann es durch das mechanische Beanspruchen zur Verdichtung des Gefüges kommen. (BLAKE & HARTGE 1986:366) Bei einer Austrocknung verfestigt sich der Boden und bildet Risse, wodurch die Dichte dazwischen zunimmt. Dadurch weist der Boden zwischen den Rissen eine höhere Dichte auf, „...als der Boden insgesamt hat. [...].“ (ROWELL 1997:113) Das Problem der oberflächlichen Austrocknung konnte bei der Probenahme erkannt werden. Aufgrund der vorgegebenen Mittel und der begrenzten Probenahmefläche im Versuchsansatz konnten die Risse bei der Entnahme der Stechzylinder nicht umgangen werden. Das Ausmaß des Fehlers, welcher dadurch entstanden ist, konnte aufgrund fehlender Parallelbestimmungen nicht festgestellt werden.

7.1.2. Analytik

7.1.2.1. Korngrößenverteilung

Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung war es notwendig, mehrere Methoden anzuwenden. Um die Korngrößen Kies/Grus (>2 mm), Grobsand (630-2000 µm),

Mittelsand (200-630 µm) und Feinsand (63-20 µm) zu ermitteln, wurde eine Nasssiebung mittels Siebturm durchgeführt, während die Ermittlung aller kleineren Korngrößen (<20 µm) mittels Sedigraph erfolgte.

Um die einzelnen Anteile der Korngrößenfraktionen festzustellen ist es notwendig, nach der elektromechanischen Siebung mittels Siebturm die Siebrückstände in den Sieben zusätzlich per Hand so lange durchzuwaschen, bis in der Auffangtasse nur mehr klares Wasser zu sehen ist. Damit soll garantiert werden, dass sich keine kleineren Korngrößen mehr in den jeweiligen Sieben befinden. Da dieser Schritt nicht ordnungsgemäß durchgeführt wurde, musste die Bestimmung der Korngrößen 63-2000 µm mittels Siebturm wiederholt werden. Bei der erneuten Durchführung dieser Bestimmung war das manuelle Durchwaschen vor allem bei dem Sieb mit der Maschenweite von 63 µm erforderlich. Die folgende Tabelle zeigt die Werte sowohl für die falsche als auch für die ordnungsgemäße Durchführung der Korngrößenanalyse. Damit wird die Wichtigkeit einer genauen Arbeitsweise deutlich gemacht.

Standort	Korngröße in µm	Anteil in % richtig	Anteil in % falsch
Strengberg	63 – 2000	9,25	11,41
Pollham	63 – 2000	12,84	27,39
Kemeten	63 – 2000	28,23	36,38

Tabelle 7: Vergleich Ergebnisse der Analyse Sand- und Kiesanteil in %

Da die Primärteilchen teilweise durch partikelverbindende Stoffe, wie Eisen- oder Aluminiumoxide, Calciumcarbonate oder organischen Stoffe zusammengehalten werden, ist bei der Bestimmung der Korngrößenverteilung eine Unterscheidung von einzelnen Teilchen von Aggregaten problematisch. (BLUME ET AL. 2010:208, GEE & BAUDER 1986:386, PANSU & GAUTHEYROU 2006:16) Pseudo-Sande, wie größere Eisenkonkretionen oder andere verkitte Körner können einen höheren Sandanteil vortäuschen. (PANSU & GAUTHEYROU 2006:16) Um diese Unsicherheit zu umgehen, werden dispergierende Zusätze, wie zum Beispiel Natriumphyrophosphat ($\text{Na}_4\text{P}_7\text{O}_2$) zugesetzt. Damit werden verkitte Aggregate in ihre Primärbestandteile aufgespalten. (HARTGE & HORN, 1992:29, PANSU & GAUTHEYROU 2006:16ff). In wie weit die Teilchen bereits aufgebrochen sind und ob diese weiter dispergiert werden müssen, ist nicht feststellbar und eine weitere Problematik bei der Korngrößenanalyse. (ROWELL, 1997:46) In umgekehrter Folge können angewitterte Körner während des Siebvorgangs zerfallen und werden dadurch kleineren Korngrößenklassen zugeordnet. (HARTGE & HORN, 1992:29) Eine Möglichkeit bei der Korngrößenbestimmung Fehler auszuschließen, ist die Durchführung einer Parallelbestimmung.

7.1.2.2. Wassergehalt frisch in % TM und in % Volumen

Während des gesamten Ablaufs des Projekts wurde versucht, den Wassergehalt in den Versuchsansätzen manuell in einem zuvor festgelegten Bereich (zwischen 20 % und 30 % Volumen) zu halten. Die Ergebnisse der Wassergehaltsanalysen zeigen, dass die Wassergehalte während der gesamten Untersuchung konstant gehalten werden konnten. Die Wassermenge, die sich zum Zeitpunkt der Probenahme im Boden befindet, ist von der manuellen Bewässerung abhängig und stellt einen künstlich konstruierten Wert dar. Aus diesem Grund können keine Aussagen über die Wirkung von CaCO₃ oder CaO auf den Wassergehalt gemacht werden.

Für die Wassergehaltsbestimmung in % Volumen konnte jeweils ein Wert pro Standort und Variante ermittelt werden. Eine Parallelbestimmung konnte aufgrund der gegebenen Ressourcen nicht durchgeführt werden.

7.1.2.3. Rohdichte feucht und trocken in %Volumen

Wie in Kapitel 6.5.3. beschrieben wurde, weisen alle Standorte bei der zweiten Probenahme die geringsten Rohdichten auf. Schließt man die Werte der zweiten Probenahme für eine inhaltliche Interpretation aus, könnte man von einer natürlichen Verdichtung bei allen Standorten ausgehen. Parallelbestimmungen waren aufgrund der unzureichenden Fläche im Versuchsansatz nicht möglich. Aus diesem Grund können Fehler in der Durchführung der Analyse nicht ausgeschlossen werden.

7.1.2.4. Wasserrückhaltevermögen

Bei der Bestimmung der Wasserspannungskurve ist die Geschlossenheit des Systems wichtig. Um den Druck permanent gleich zu halten, ist eine vollständige Abdichtung der Filterpakte Voraussetzung. Bei der Durchführung der Analyse konnte der Druck nicht bei allen Druckzellen konstant gehalten werden. Vor allem die Druckzelle mit -100 mbar musste regelmäßig nachgestellt werden.

Für ein vollständig geschlossenes System muss der Kontakt zwischen den Stechzylinderproben und dem Filterpaket gegeben sein. Ist der Kontakt zwischen den Proben und dem Filterpaket nicht gegeben, kann keine optimale Entwässerung erfolgen. Die Wassergehaltswerte für das jeweilige Matrixpotential können in Folge des fehlenden Kontakts und der verzögerten Entwässerung höher sein, als bei einem geschlossenen System. (HARTGE & HORN 1992³:99) Um dieser Problematik zu entgehen, wurden die Proben bei der Anbringung vorsichtig in das Filterpaket hineingedrückt bzw. hineingedreht. Dieses Vorgehen kann zur Verschmierung der Poren der Stechzylinderproben führen und ebenfalls eine optimale Entwässerung verhindern.

Werden die Filterpakete und die darauf aufgebrachten Proben nicht ausreichend vor Verdunstung geschützt, kann das Ergebnis zu geringe Werte aufweisen. Um diesen Effekt zu verhindern, wurden die Proben inklusive dem Filterpaket mit einer Plastikfolie bedeckt und verschlossen.

Um eine Wasserspannungskurve zu erhalten, müssen die Werte von -30 mbar auf -300 mbar erkennbar abnehmen. Bei Betrachtung der Ergebnisse des Wassergehalts bei -60 mbar und -100 mbar liegen die gewonnenen Werte bei allen Standorten und Varianten überwiegend über den Wassergehaltswerten von -30 mbar. (Tabelle 7). Die in dieser Tabelle angeführten Werte zeigen die Ergebnisse des Wasserrückhaltevermögens für die Referenzprobe Sand. Die Referenzproben (ca. 20 cm³) wurden bei der Durchführung der Analyse für jede Variante zusätzlich auf das Filterpaket aufgebracht und bestätigen den Fehler während der Durchführung der Analyse. Ob die Fehlerquelle der fehlende Kontakt zwischen den Stechzylinderproben und den Filterpaketen oder die unvollständige Geschlossenheit des Systems ist, konnte nicht festgestellt werden.

Die Bestimmung des Wassergehaltes bei 7000 mbar wurde mit Hilfe einer Überdruckzelle durchgeführt. Die luftdichte Abdichtung dieser Zelle ist für diese Bestimmung Voraussetzung. Bei der Aufbringung des Vlies' und der Plastikfolie dürfen keine Luftblasen vorhanden sein, um das Eintreten von Luft in das System zu verhindern. Sollte Luft in das System eindringen, ist dies an den Luftblasen erkennbar, welche im Wasserauffanggefäß aufsteigen. Dementsprechend müssen die Proben nach neuerlicher Abdichtung früher aus der Druckzelle genommen werden, da die Proben durch die Luftzufuhr schneller austrocknen. Bei ausreichend vorhandenen Ressourcen sollte eine komplett neue Analyse durchgeführt werden.

Der Überdruck wurde mittels Hausleitung angelegt. Aufgrund dieser Abhängigkeit waren Schwankungen von bis zu 500 mbar möglich. Diese Tatsache verdeutlicht die Abhängigkeit einer Methode von den technischen Gegebenheiten. Aufgrund der begrenzten Fläche in den Versuchskübeln konnten keine Stechzylinder für die Bestimmung des Wassergehalts bei Überdruck entnommen werden. Die Analyse wurde aus diesem Grund mit künstlich erstellten Stechzylinderproben (20 cm³) durchgeführt. Der Kontakt zur Keramikplatte war auch bei dieser Analyse Voraussetzung. Ist die Probe nicht richtig auf dem Filterpaket aufgebracht, kann das zu einem höheren Wassergehalt führen, als für das angelegte Potential zu erwarten wäre. (ÖNORM L 1063, 2006:8)

Zusammengefasst bildet die Abdichtung aller Elemente für ein vollständig geschlossenes System sowohl bei der Über- als auch bei der Unterdruckmethode die größte

Herausforderung. (HARTGE & HORN 1992³:99) Die Identifikation einer Fehlerquelle ist schwierig bzw. ist es kaum möglich, den Einfluss externer Faktoren zu vermeiden. Dazu zählen z.B. die im Labor herrschenden Temperaturschwankungen während einer Analyse. Diese können zu unterschiedlichen Wassergehalten bei gegebenem Potential führen. Aus diesem Grund ist die Raumtemperatur während der Durchführung ständig zu überwachen. (ÖNORM L 1063, 2006:5)

Probe	1. Probenahme				
	-30 mbar	-60 mbar	-100 mbar	-300 mbar	-7000 mbar
ST-C	44,73	48,08	48,11	38,78	19,63
ST-I	45,95	47,92	47,30	39,63	19,50
ST-II	51,29	51,47	47,50	42,05	20,35
SU-C	44,45	49,37	46,89	42,35	18,65
SU-I	48,69	47,61	51,65	40,45	18,53
SU-II	51,93	50,33	49,84	40,68	18,28
HA-C	40,47	44,82	42,79	38,48	21,83
HA-I	45,01	49,35	48,90	40,25	29,55
HA-II	45,16	45,94	46,84	39,19	26,88
2. Probenahme					
ST-C	53,73	53,32	53,79	47,23	23,50
ST-I	53,50	52,41	66,26	45,08	20,63
ST-II	55,04	51,59	51,49	43,23	24,30
SU-C	54,29	53,76	50,76	47,63	16,78
SU-I	52,15	51,90	41,40	50,66	17,38
SU-II	56,27	54,41	54,40	51,77	17,30
HA-C	49,37	45,23	48,34	43,75	22,28
HA-I	53,34	49,32	51,66	47,89	23,88
HA-II	52,78	50,70	50,79	41,08	27,33
3. Probenahme					
ST-C	51,43	50,23	49,90	42,68	19,93
ST-I	52,67	52,07	51,41	46,45	20,08
ST-II	52,02	55,07	53,00	48,50	20,43
SU-C	53,17	51,06	53,12	42,39	19,35
SU-I	52,04	52,56	51,24	44,28	18,78
SU-II	52,62	55,73	54,04	47,39	18,38
HA-C	45,79	45,41	45,55	40,05	29,48
HA-I	48,85	47,00	45,05	42,29	24,90
HA-II	48,74	46,05	44,36	42,47	25,38

Tabelle 8: Wassergehalt in % TM beim Matrixpotential, alle Standorte und Varianten

Probe	1. Probenahme			
	-30 mbar	-60 mbar	-100 mbar	-300 mbar
Sand-C	36,45	36,85	33,6	36,40
Sand-I	41,05	40,90	39,65	38,35
Sand-II	41,80	42,00	37,65	38,60
2. Probenahme				
Sand-C	42,65	41,50	41,60	37,15
Sand-I	39,40	40,95	41,50	41,95
Sand-II	42,70	40,80	42,55	41,30
3. Probenahme				
Sand-C	40,40	40,20	41,55	30,05
Sand-I	43,45	44,00	42,40	37,10
Sand-II	65,70	65,75	63,40	62,05

Tabelle 9: Wassergehalt in % TM beim Matrixpotential, Referenzprobe Sand

Auf ähnliche Probleme während der Durchführung der Analysen zur Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens wurden in verschiedenen Studien aufmerksam gemacht. SOLONGE ET AL. (2012) beschäftigten sich in ihrer Arbeit mit der Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens mittels Druckplattenapparat und diskutieren Grenzen und Fehler dieser Untersuchungsmethode.

7.1.2.5. Aggregatstabilität in %

Die Bestimmung der Masse der stabilen Aggregate und des Sandes zur Ermittlung der Aggregatstabilität eines Bodens, weisen ähnliche Unsicherheiten auf wie die Korngrößenanalyse. Um den Sandanteil jeder Probe zu ermitteln, ist es notwendig, das Sieb so lange durchzuwaschen bis die Auffangtasse klares Wasser enthält. Wird dieser Arbeitsschritt nicht ordnungsgemäß durchgeführt, enthält das Sieb neben dem Sand auch kleinere Bodenteilchen. Das erhöht den Sandanteil und verfälscht das Ergebnis. Bei der weiteren Berechnung führt ein hoher Sandanteil in weiterer Folge zu einer niedrigeren Aggregatstabilität.

Die Bestimmung der Aggregatstabilität wurde bei jeder Probenahme für jeden Standort und jede Variante dreimal durchgeführt. Ein zufälliger Fehler kann damit ausgeschlossen werden.

8. AKTUELLER STAND DER BODENPHYSIKALISCHEN WISSENSCHAFT

Zu Beginn der Bodenforschung wurde die Untersuchung von Böden mit einfachen Geräten durchgeführt. Mit dem technischen Fortschritt konnten komplexere Methoden zur Bodenuntersuchung entwickelt werden. In den letzten Jahren haben sich aufgrund der immer höheren Anforderungen (schnellere Durchführung, größere Probenanzahl,...) an die Analysen neue Methoden etabliert, die auf komplexere und weiter fortgeschrittene Techniken wie „...*inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy, high-temperature combustion, x-ray diffraction and scanning electron microscopy analyses, and laser diffraction systems...*“ (BREVIK 2014:2) zurückgreifen. (BREVIK 2014:2) Mit Hilfe dieser Möglichkeiten zur bodenphysikalischen Untersuchung von Böden werden bodenphysikalische Analysen zum Verständnis von Bodeneigenschaften und –prozessen für unterschiedliche Sachverhalte eingesetzt.

Auf dem Gebiet der Landwirtschaft werden bodenphysikalische Analysen zur Beurteilung aktueller Probleme, wie Bodenverdichtung und Bodendegradation eingesetzt. Der langjährige Einsatz von zum Teil schweren landwirtschaftlichen Geräten hat das Bodengefüge beeinflusst und zu Veränderungen der Bodenstruktur in Form von Verdichtungen geführt. In weiterer Folge können dadurch verschiedene Bodenfunktionen und –prozesse und damit die Bodenqualität beeinträchtigt werden. (BLUME ET AL. 2010¹⁶:513ff) Unter diesen Aspekten wurden in den letzten Jahren im landwirtschaftlichen Forschungsbereich Untersuchungen über den Einfluss von verschiedenen Bodenbearbeitungstechniken (AIKINS & AFUAKWA; HUSNJAK ET AL. 2012) und –tiefen (ALAM & SALAHIN 2013) auf unterschiedliche bodenphysikalische Bodenkennwerte durchgeführt. An der Universität für Bodenkultur werden seit 1994 Langzeituntersuchungen durchgeführt, welche einen Vergleich über die Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitung (konventionelle Bearbeitung, konservierende Bearbeitung, Direktsaat) auf ausgewählte Bodenparameter ermöglichen. (KAMPTNER 2014) Bodenphysikalische Analysen kommen dabei unter anderem zur Untersuchung der Korngrößenverteilung, des Wassergehalts, der Dichten und Porenanteile sowie zur Ermittlung des Wasserrückhaltevermögens zum Einsatz. (AIKINS & AFUAKWA 2012; ALAM & SALAHIN 2013; HUSNJAK ET AL. 2012; KAMPTNER 2014)

Im Zusammenhang mit dem aktuellen Problem der Bodendegradation werden Untersuchungen zur Erhaltung und Verbesserung der Bodenqualität bzw. –produktivität durchgeführt. Viele Studien beschäftigen sich mit Möglichkeiten, diese durch verschiedene Meliorationsmaßnahmen zu optimieren. Zur Ermittlung der Auswirkungen

auf bodenphysikalische Eigenschaften, die infolge der Applikation hervorgerufen werden, finden bodenphysikalische Analysen Anwendung.

Derzeit werden einige Studien durchgeführt, die den Einfluss von Asche auf landwirtschaftlich genutzte Böden behandeln. Asche ist ein Abfallprodukt aus der Kohleproduktion, welches aufgrund seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften zur Melioration von Böden potentiell geeignet ist. Die Applikation der schluffähnlichen Partikel (0,01 µm – 100 µm) verändert die Textur und in weiterer Folge die Dichte und Porosität. Dies führt zu einer Verbesserung des Bodenlufthaushaltes und beeinflusst positiv sowohl das Wasserrückhaltevermögen als auch die Durchlässigkeit des Bodens. (BLISSETT & ROWSON 2012:7; RAM & MASTO 2014:54ff; UKWATTAGE ET AL. 2013:402ff) Weiterführend werden in verschiedenen Studien die Auswirkungen von applizierter Asche in Kombination mit unterschiedlichen organischen und inorganischen Stoffen durchgeführt. (RAM & MASTO 2014)

Weitere Studien befassen sich mit strukturstabilisierenden Maßnahmen, wie zum Beispiel die Applikation von Kalk. Mit Hilfe dieser Meliorationsmaßnahme kann der natürlichen Versauerung entgegen gewirkt und eine Verbesserung der Gefügestabilität hervorgerufen werden. (VDLUFA 2000:3) Die Einbringung von Kalkstein (CaCO_3) ist in der Land- und Forstwirtschaft gebräuchlich. Im Gegensatz dazu ist der Einsatz von Branntkalk (CaO) auf landwirtschaftlich genutzte Böden aufgrund negativer Auswirkungen auf die Bodenmikrobiologie umstritten und daher nicht geläufig. Mit Hilfe des in dieser Masterarbeit präsentierten Fallbeispiels konnten neue Erkenntnisse über die Auswirkungen von Branntkalk sowohl auf die Bodenmikrobiologie als auch auf ausgewählte bodenphysikalische Parameter gewonnen werden. Zum Einsatz gelangten dabei bodenphysikalische Analysen zur Untersuchung der Korngrößenverteilung, des Wassergehalts, der Rohdichten (trocken, feucht) sowie die Ermittlung des Wasserrückhaltevermögens und der Aggregatstabilität.

In aktuellen geoökologischen Studien werden bodenphysikalische Analysen für Paläoumweltuntersuchungen eingesetzt. Der Wechsel zwischen der Ablagerung von eiszeitlichen Sedimenten (Löss) und der interglazialen Bodenentwicklung hat zur Bildung von sogenannten Löss-Paläobodenabfolgen geführt, die wertvolle Klima- und Landschaftsentwicklungsarchive darstellen. Die Untersuchung dieser auch als Paleosols bezeichneten Ablagerungsabfolgen dient zur Rekonstruktion und Erforschung der Paläoumwelt. (BUGGLE & ZECH 2011:11ff) Neben dem Einsatz verschiedener Datierungsmethoden werden auch Analysen zur Untersuchung bodenphysikalischer Parameter eingesetzt. Aktuell stehen in Österreich die Regionen um Paudorf in

Niederösterreich (SPRAFKE ET AL. 2013; SPRAFKE ET AL. 2014) und Oberlaab in Oberösterreich (OTTNER ET AL. 2013; SOLLEIRO-REBOLLEDO ET AL. 2013) im Zentrum paläoklimatischer Untersuchungen. SPRAFKE ET AL. (2013) setzen sich mit jenen Prozessen auseinander, die zur Entwicklung der Löss-Paläobodensequenzen beitragen. Für die detaillierte Beschreibung des Bodenprofils wurden Laboranalysen zur Korngrößenverteilung sowie zur Bestimmung der Bodenfarbe durchgeführt. Im Gegensatz dazu wurden in der Studie von OTTNER ET AL. (2013) bodenphysikalische Untersuchungen zur Ermittlung der Verwitterungsstadien eingesetzt, um die Bodenhorizonte in der Löss-Paläobodenabfolge zu identifizieren.

Die genannten Beispiele zeigen, wie vielseitig einsetzbar bodenphysikalische Analysen sind. Vor allem in Verbindung mit Methoden der Geographie (Geographische Informationssysteme) oder räumlichen Erfassungsmethoden (Fernerkundung) dient der Einsatz bodenphysikalischer Analysen zur räumlichen Modellierung und damit zur Bearbeitung verschiedener Fragestellungen und Probleme in der Landwirtschaft, Ökologie oder Geotechnik. (BREVIK 2014:2; LAL & SHUKLA 2004:5ff)

Auch in Zukunft wird sich die Wissenschaft der Bodenphysik unter Zuhilfenahme bodenphysikalischer Analysen und in Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftsdisziplinen mit prognostizierten globalen Problemen, wie Ressourcenknappheit aufgrund fortschreitender Bodendegradation auseinandersetzen und versuchen, Lösungen zu finden. (JURY ET AL. 2011)

9. CONCLUSIO

Die bodenphysikalische Analyse als Instrument zur Untersuchung von Böden steht im Zentrum dieser Arbeit. Entwickelt hat sich die Wissenschaft der Bodenphysik aus der Bodenkunde und bedient sich bei der Untersuchung von Böden mittels bodenphysikalischer Analysen verschiedener Grundprinzipien aus Nachbarsdisziplinen, wie Hydrologie, Klimatologie oder Physik. Aus diesem Grund wird die Bodenphysik auch als interdisziplinäre Wissenschaft bezeichnet. (Kapitel 4.) Wie in Kapitel 5. gezeigt wurde, bietet die bodenphysikalische Analytik viele Möglichkeiten, um verschiedene bodenphysikalische Parameter zu bestimmen und wird zur Beantwortung von Fragestellungen in unterschiedlichen Bereichen (Landwirtschaft, Ökologie, Bautechnik) eingesetzt. Die Möglichkeiten der bodenphysikalischen Analytik zur Bestimmung bodenphysikalischer Parameter sind vielfältig. Unter dem Kapitteltitel „*Bodenphysikalische Analysen*“ wurden einige Methoden zur Bestimmung der im Fallbeispiel untersuchten bodenphysikalischen Eigenschaften vorgestellt. Zusätzlich wurde in diesem Kapitel auf mögliche Probleme in der Durchführung sowie auf die Grenzen (Messbereich, Messgenauigkeit,...) der präsentierten Methoden aufmerksam gemacht. Als Beispiel kann die Ermittlung der Korngrößenverteilung genannt werden. Hierfür müssen mehrere Untersuchungsmethoden angewendet werden, da mit einer Methode nicht das gesamte Korngrößenspektrum (< 2 µm bis > 2 mm) abgedeckt wird.

Anhand eines Fallbeispiels wurde versucht, die Möglichkeiten und Grenzen der bodenphysikalischen Analytik vorzustellen. Um die für das Fallbeispiel definierte Fragestellung hinsichtlich der Wirkung von CaCO₃ und CaO auf ausgewählte bodenphysikalische Parameter zu beantworten, wurde ein Glashausversuch mit manuell erstellten Versuchsansätzen durchgeführt. Das Bodenmaterial für den Versuchsansatz entstammt aus drei verschiedenen Regionen Österreichs. Die Aufstellung der Versuchskübel im Glashaus folgte einer zufälligen Verteilung, um externe Einflüsse möglichst homogen zu verteilen. Die Probenahmen erfolgten zwei Tage, 30 Tage und 86 Tage nach der Applikation von 12,5 g CaCO₃ und CaO. Untersucht wurden neben der Korngrößenverteilung und dem Wassergehalt als grundlegende Untersuchungsparameter auch die Rohdichten (feucht, trocken) sowie das Wasserrückhaltevermögen und die Aggregatstabilität.

Während der Durchführung einiger Analysen konnten einige das Ergebnis beeinflussende Probleme erkannt werden. In welchem Ausmaß sich diese auf das Ergebnis auswirken, konnte aufgrund der fehlenden Ressourcen nicht ermittelt werden. Die größten Herausforderungen brachte die Bestimmung des

Wasserrückhaltevermögens mit sich. Aufgrund der gewonnenen Analyseergebnisse konnte ein Fehler in der Bestimmung festgestellt werden. Ob ein fehlender Kontakt zwischen den Stechzylinderproben die Fehlerquelle war, konnte nicht ermittelt werden. Es wird davon ausgegangen, dass ein Druckabfall bei manchen Filterpaketen zu einem Fehler geführt hat, der aber aufgrund der technischen Abhängigkeit von der Apparatur nicht vermieden werden konnte. Durch wiederholtes Nachstellen des Drucks wurde versucht, den durch den Druckabfall entstandenen Fehler so gering wie möglich zu halten. Weitere Probleme, die bei der Durchführung der Analysen aufgetreten sind und wie sich diese auf das Ergebnis auswirken können, wurden bereits in Kapitel 7 erläutert. Die Frage „*Welche Probleme können bei der Durchführung bodenphysikalischer Analysen auftreten und wie können sich diese auf das Ergebnis auswirken?*“ wurde somit bereits im Zuge der im vorigen Kapitel durchgeführten Diskussion beantwortet.

Für die statistische Untersuchung sind Parallel, Doppel- oder Mehrfachbestimmungen notwendig. Aufgrund des geringen Platzes in den Versuchskübeln war dies bei der Bestimmung der Dichte, des volumetrischen Wassergehalts und des Wasserrückhaltevermögens nicht durchführbar. Im Gegensatz dazu war bei der Untersuchung der Aggregatstabilität aufgrund einer Dreifachbestimmung eine Überprüfung auf statistische Signifikanz möglich. Eine Auswirkung der Applikation von CaCO₃ und CaO auf die untersuchten Bodenparameter konnte nur teilweise festgestellt werden. Wie die Ergebnisse zeigen, haben CaCO₃ und CaO keinen Einfluss auf den Wassergehalt, die Dichte oder das Wasserrückhaltevermögen. Im Vergleich dazu konnte mit Hilfe der bodenphysikalischen Analytik festgestellt werden, dass die Applikation von CaO bereits nach zwei Tagen zur Bildung von stabilen Aggregaten beiträgt. Dieser Effekt hält auch noch drei Monate nach der Einarbeitung an. Die Applikation von CaCO₃ hat im Vergleich zu CaO keine diesem Ausmaß entsprechende stabilisierende Wirkung. Diese Erkenntnisse machen deutlich, dass sich die Applikation von CaCO₃ bzw. CaO unterschiedlich auf die untersuchten Parameter auswirkt. Während mit Hilfe bodenphysikalischer Analysen Auswirkungen auf die Aggregatstabilität festgestellt werden konnten, waren bei den anderen bodenphysikalischen Parametern keine Auswirkungen durch die Applikation von CaCO₃ oder CaO erkennbar. Mit Hilfe diesen Aussagen können die Subfragen „*Wie wirkt sich die Applikation von CaCO₃ bzw. CaO auf ausgewählte bodenphysikalische Parameter aus?*“ und „*Können mit Hilfe der bodenphysikalischen Analytik Unterschiede in der Wirkung von CaCO₃ und CaO auf die gewählten bodenphysikalischen Parameter festgestellt werden?*“ beantwortet werden.

Um die vierte Subfrage („*Kann ein manuell erstellter Versuchsansatz eine dem im Feld entsprechende Korngrößenverteilung garantieren?*“) zu beantworten, wurde die Korngrößenverteilung im Versuchsansatz in 1-cm-Schritten untersucht. Unter der Annahme, dass die Korngrößenzusammensetzung am Feld homogen ist, konnte gezeigt werden, dass der Kübelversuch gelungen ist. Die Ergebnisse dieser Untersuchung veranschaulichen, dass aufgrund der Durchmischung des vom Feld gewonnenen Bodenmaterials vor der Erstellung der Versuchsansätze eine homogene Verteilung der Korngrößen über die gesamte Tiefe (14 cm) erreicht werden konnte.

Das Kapitel über den aktuellen Stand der bodenphysikalischen Forschung macht deutlich, wie vielfältig einsetzbar bodenphysikalische Analysen sind. Um den Bogen zur zentralen Fragestellung „*Welche Möglichkeiten bietet die bodenphysikalische Analytik zur Untersuchung von Böden und wo liegen ihre Grenzen?*“ zu schließen, kann somit festgehalten werden, dass die Verwendung bodenphysikalischer Analysen zur Beantwortung von Fragestellungen zur Bodenuntersuchung gerechtfertigt ist. Trotz der Beschränkungen von Methoden aufgrund ihres begrenzten Messbereichs und einiger Herausforderungen, die während der Durchführung der Analysen auftreten können, ist es mit Hilfe bodenphysikalischer Analysen möglich, einen Beitrag zur Bodenuntersuchung zu leisten. Die kritische Betrachtung der Ergebnisse ist dafür in jedem Fall Voraussetzung. Die Nullhypothese wird verworfen und die Alternativhypothese angenommen.

10. VERZEICHNISSE

10.1. LITERATUR & ONLINEQUELLEN

- ADUNKA, F. (2007): *Messunsicherheiten: Theorie und Praxis*, Vulkan-Verlag GmbH, Essen.
- AIKINS, S.H.M., AFUAKWA, J.J. (2012): Effect of four different tillage practices on soil physical properties under cowpea. In: *Agriculture and Biology Journal of North America*, Vol. 3, S. 17-24.
- ALAM, M.K., SALAHIN, N. (2013): Changes in soil physical properties and crop productivity as influenced by different tillage depths and cropping patterns. In: *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, Vol. 38, S. 289-299.
- AMEZKETA, E. (1999): Soil aggregate stability: a review. In: *Journal of Sustainable Agriculture*, Vol. 14, S. 83-151.
- ANDRENELLI, M.C., FIORI, V., PELLEGRINI, S. (2013): Soil particle-size analysis up to 250 m by X-ray granulometer: Device set-up and regressions for data conversion into pipette-equivalent values. In: *Geoderma*, Vol. 192, S. 380-393.
- AUERSWALD, K. (1995): Percolation Stability of Aggregates from arable topsoils. In: *Soil Science*, Vol. 159, S. 142-148.
- BAIZE, D. (1993): *Soil Science Analyses – A Guide to Current Use*, John Wiley & Sons, Chichester.
- BAVER, L.D. (1966³): *Soil Physics*, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- BECHER, H.H., KAINZ, M. (1983): Auswirkungen einer langjährigen Stallmistdüngung auf das Bodengefüge im Lößgebiet bei Straubing. In: *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau*, Vol. 152, S. 152-158.
- BEUSELINCK, L., GOVERS, G., POESEN, J., DEGRAER, G., FROYEN, L. (1998): Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method. In: *Catena*, Vol. 32, S. 193-208.
- BLAKE, G.R., HARTGE, K.H. (1986²): Bulk Density. In: Klute, A. (Hrsg.) *Methods of Soil Analysis – Part 1. Physical and mineralogical methods*. Soil Science Society of America, Inc. – Madison.
- BLISSETT, R.S., ROWSON, N.A. (2012): A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. In: *Fuel*, Vol. 97, S. 1-23.
- BLUM, W.E.H. (2012⁷): *Bodenkunde in Stichworten*. Gebr. Borntraeger, Stuttgart.
- BLUME, H.-P. (2002): Some aspects of history of German soil Science. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Vol. 165, S. 377-381.

- BLUME, H.-P., BRÜMMER, G.W., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETZSCHMAR R., STAHR, K. WILKE, B.-M. (2010¹⁶): Scheffer/Schachtschabel – Lehrbuch der Bodenkunde, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- BOCKHEIM, J.G., GENNADIYEV, A.N., HAMMER R.D., TANDARICH, J.P. (2005): Historical development of key concepts in pedology. In: Geoderma, Vol. 124, S. 23-36.
- BREVIK, E.C. (2005): A brief history of soil science. In: V. SQUIRES, W. VERHEYE (Hrsg.): Encyclopedia of Life Support Systems, EOLSS Publishers, Oxford.
- BREVIK, E.C., HARTEMINK A.E. (2010a): History, Philosophy, and Sociology of Soil Science. In: V. SQUIRES, W. VERHEYE (Eds.): Encyclopedia of Life Support Systems, EOLSS Publishers, Oxford.
- BREVIK, E.C., HARTEMINK, A.E. (2010b): Early soil knowledge and the birth and development of soil science. In: Catena, Vol. 83, S. 23-33.
- BREVIK, E.C. (2014): Soil Science: Selected Historical Highlights in Celebration of the Upcoming International Year of Soils. In: Soil Horizons, Vol. 55, S. 1-5.
- BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL) (Hrsg.) (2003): Handbuch – Probenahme und Probevorbereitung für Schadstoffuntersuchungen in Böden, Bern.
- BUGGLE B., ZECH, M. (2011): Mit Biomarkern den Wäldern der Vergangenheit auf der Spur – Pflanzenbürtige Lipide als molekulare Fossilien: neue Einblicke in die Vegetationsgeschichte Mitteleuropas. In: SCHMÄZLE F. (Hrsg.): Spektrum-Magazin der Universität Bayreuth, Universität Bayreuth, Vol. 1, S. 10-13.
- BUURMAN, P., PAPE, TH., REIJNEVELD, J.A., DE JONG, F., VAN GELDER, E. (2001): LASER-DIFFRACTION AND PIPETTE-METHOD GRAIN SIZING OF DUTCH SEDIMENTS: CORRELATIONS FOR FINE FRACTIONS OF MARINE, FLUVIAL, AND LOESS SAMPLES. IN: NETHERLANDS JOURNAL OF GEOSCIENCES, VOL. 2, S. 49-57.
- CHERVET, A. RAMSEIER, L. STURNY, W.G., WEISSKOPF, P., ZIHLMANN, U., MÜLLER, M., SCHAFFLÜTZEL, R. (2006): Bodenwasser bei Direktsaat und Pflug. In: Agrarforschung, Vol. 13, S. 162-169.
- DALTON,F.N., VAN GENUCHTEN, M.Th. (1986): The time-domain reflecotmerty method for measuring woil water content and salinity. In: Geoderma, Vol. 38, S. 237-250.
- DAY, P.R. (1965): Particle Fractionation and Particle size Analyses. In: BLACK, C.A. (Hrsg.), EVANS, D.D., WHITE, J.L., ENSMINGER, L.E., CLARK F.E. Methods of Soil Analytics – Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling, American Society of Agronomy, Inc., Madison.
- DELTEDESCO, E., BAUER, L.-M., UNTERFRAUNER, H., PETICZKA, R., ZEHETNER F., KEIBLINGER K.M. (2014): Effekt von Kalkungsmaßnahmen auf die Strukturstabilisierung und Mikrobiologie von landwirtschaftlichen Böden. In: ÖSTERREICHISCHE BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT (ÖBG), Beitrag zur Jahrestagung der ÖBG am 22. September 2014, Wien.

BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (BMLFUW). Digitale Bodenkarte von Österreich, http://gis.lebensministerium.at/eBOD/frames/index.php?&146=true&gui_id=eBOD (zuletzt abgerufen am 4. Juni 2014)

DIKIER, S.W., FRITTON, D.D. (2009): Introduction to soil physics. In: Agricultural Sciences, Vol. 1, S. 23-47.

FUNK, W., DAMMAN, V., DONNEVERT G. (2005): Qualitätssicherung in der Analytischen Chemie, WILEY-VCH GmbH & Co, Weinheim.

GARDNER, W.H. (1986²): Water Content. In: KLUTE, A. (Hrsg.) Methods of Soil Analysis – Part 1. Physical and mineralogical methods. Soil Science Society of America, Inc., Madison.

GARDNER, C.M.K., DEAN, T.J., COPPER, J.D. (1998): Soil Water Content Measurement with High-Frequency Capacitance Sensor. In: Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 71, S. 395-403.

GEE, G.W., OR, D. (2002): Particle-Size Analysis. In: DANE, J.H., TOPP, G.C., (Hrsg.) Methods of Soil Analysis – Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc., Madison.

GOOSENS, D. (2008): Techniques to measure grain-size distributions of loamy sediments: a comparative study of ten instruments for wet analysis. In: Sedimentology, Vol. 55. S.65-96.

HARLFINGER, O, KNEES, G. (1999): Handbuch der österreichischen Bodenschätzung – Klimatographie Teil 1, Universitätsverlag Wagner, Innsbruck.

HARTGE, K.H., HORN R. (1992³): Die physikalische Untersuchung von Böden, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

HARTUNG, J., ELPELT B., KLÖSENER, K.-H. (1986⁵): Statistik – Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, R. Oldenbourg Verlag, München.

HILLEL, D. (2004): Introduction to Environmental Soil Physics, Elsevier Academic Press, Amsterdam.

HUSNJAČ, S., FILIPOVIČ, KoŠUTIČ, S. (2002): Influence of different tillage systems on soil physical properties and crop yield. In: Rostlinna Vyroba, Vol. 2002, S. 249-254.

JURY, W.A., Or, D., PACHEPSKY, Y., VEREECKEN, H., HOPMANS, J.W., AHUJA, L.R., CLOTHIER, B.E., BRISTOW, K.L., KLUITENBERG, G.J., MODRUP, P., ŠIMŮNEK, J., VAN GENUCHTEN, M.Th., HORTON, R. (2011): Kirkham's Legacy and Contemporary Challenges in Soil Physics Research. In: Soil Science Society of America Journal, Vol. 75, S. 1589-1601.

KAMPTNER, E. (2014): Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungssysteme auf bodenphysikalische Eigenschaften im pannonischen Trockengebiet. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.

KANOUN, O., TETYUEV, A., TRÄNKLER, H.-R. (2004): Bodenfeuchtemessung mit Impedanzspektroskopie. In: Technisches Messen, Vol. 71, S. 475-485.

KEMPER, W.D., ROSENAU, R.C. (1986²): Aggregate Stability and Size Distribution. In: KLUTE, A. (Hrsg.) Methods of Soil Analysis – Part 1. Physical and mineralogical methods. Soil Science Society of America, Inc., Madison.

KLUTE, A. (1986²): Water Retention: Laboratory Methods. In: KLUTE, A. (Hrsg.) Methods of Soil Analysis. Part 1 – Physical and mineralogical methods. Soil Science Society of America, Inc., Madison.

KONERT, M., VANDENBERGHE, J. (1997): Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. In: Sedimentology, Vol. 44, S. 523-535.

KROMIDAS, ST. (Hrsg.) (1995): Qualität im analytischen Labor – Qualitätssicherungssysteme, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim.

LAL, R., SHUKLA, M.K. (2004): Principles of Soil Physics, Marcel Dekker, Inc., New York.

LEWANDOWSKI, J., LEITSCHUH, ST., KOß, V. (1997): Schadstoffe im Boden – Eine Einführung in die Analytik und Bewertung, Springer-Verlag, Berlin.

LESER, H., HAAS, H.-D., MEIER, St., MOSIMANN, T., PAESLER, R., HUBER-FRÖHLI, J. (2005¹³): Wörterbuch – Allgemeine Geographie, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co, München.

MA, R.-M., LI, Z.-X., CAI, C.-F., WANG, J.G. (2014): The dynamic response of splash erosion to aggregate mechanical breakdown through rainfall simulation events in Ultisols (subtropical China). In: Catena, Vol. 121, S. 279-287.

McCAVE, I.N., SYVITSKI, J.P.M. (1991): Principles and methods of geological particle size analysis. In: SYVITSKI, J.P.M. (Hrs.) Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis, Cambridge Univ. Press, Cambridge.

MÜCKENHAUSEN, E. (1993⁴): Die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologische, mineralogischen und petrologischen Grundlagen, DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt am Main.

MURER, E.J., BAUMGARTEN, A., EDER, G., GERZABEK, M.H., KANDELER, E., RAMPAZZO, N. (1993): An improved sieving machine for estimation of soil aggregate stability. In: Geoderma, Vol. 56, S. 539-547.

NIMMO, J.R., PERKINS, K.S. (2002): Aggregate Stability and Size Distribution. In: DANE, J.H., TOPP, G.C., (Hrsg.) Methods of Soil Analysis – Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc., Madison.

NOBORIO, K. (2001): Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. In: Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 31, S. 213-237.

ÖNORM L 1050 (2004): Boden als Pflanzenstandort – Begriffe und Untersuchungsverfahren. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖNORM L 1061-1 (2002): Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens, Teil 1: Grobboden. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖNORM L 1061-2 (2002): Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens, Teil 2: Feinboden. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖNORM L 1062 (2003): Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung des Wassergehaltes und des Wasseranteils. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖNORM L 1063 (2006): Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens mittels Drucktopf mit keramischer Platte. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖNORM L 1068 (2005): Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Dichte von Mineralböden. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖNORM L 1072 (2004): Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Aggregatstabilität nach dem Siebtauchverfahren. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖSTERREICHISCHE BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT (ÖGB) (2001): Bodenaufnahmesysteme in Österreich, Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft, Heft 62, Wien.

OTTNER, F., SEDOV, S. BAATAR, U.-O., WRIESSNIG, K. (2013): Grain size and mineralogical indicators of weathering in the Oberlaab loess-paleosol sequence, Upper Austria. In: E & G Quaternary Science Journal, Vol. 62, S. 34-43.

PANSU, M., GAUTHEYROU J. (2006): Handbook of soil analysis – Mineralogical, organic and inorganic methods, Springer-Verlag, Berlin.

PETERSEN R. G., CALVIN L.D. (1986²): Sampling. In: KLUTE, A. (Hrsg.) Methods of Soil Analysis – Part 1. Physical and mineralogical methods, Soil Science Society of America, Inc., Madison.

RAM, L.C., MASTO, R.E. (2014): Fly ash for soil amelioration: A review on the influence of ash blending with inorganic and organic amendments. In: Earth-Science Reviews, Vol 128, S. 52-74.

RAWLINS, B.G., WRAGG, J., LARK, R.M. (2013): Application of a novel method for soil aggregate stability measurement by laser granulometry with sonication. In: European Journal of Soil Science, Vol. 64, S. 92-103.

ROBINSON, D.A., CAMPBELL, C.S., HOPMANS, J.W., HORNBUCKLE, B.K., JONES, S.B., KNIGHT, R. OGDEN, F., SELKER, J., WENDROTH, O. (2008): Soil Moisture for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review. In: Vadose Zone Journal, Vol. 7, S. 358-389.

ROWELL, D.L. (1997): Bodenkunde – Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen, Springer-Verlag, Berlin.

RYZAK, M., BIEGANOWSKI A. (2011): Methodological aspects of determining soil particle-size distribution using the laser diffraction method. In: Journal of Plant Nutrition and Soil Science, Vol. 174. S.624-633.

SCHÖNWIESE, Chr.-D. (1992²): Praktische Statistik für Meteorologien und Geowissenschaftler, Gebrüder Borntraeger, Berlin.

SHUKLA, M.K. (2014): Soil Physics – An Introduction, CRC Press, Boca Raton.

SOLLEIRO-REBOLLEDO, E., CABADAS, H., SEDOV, S., TERHORST, B. (2013): Paleopedological record along the loess-paleosol sequence in Oberlaab Austria. In: E & G Quaternary Science Journal, Vol. 62, S. 22-33.

SPRAFKE, T., TERHORST, B., PETICZKA, R., THIEL, Ch. (2013): Paudorf locus typicus (Lower Austria) revisited – The potential of the classic loess outcrop for Middle to Late Pleistocene landscape reconstructions. In: E&G Quaternary Science Journal, Vol. 62, S. 59–72.

SPRAFKE, T. THIEL, C., TERHORST, B. (2014): From micromorphology to palaeoenvironment: The MIS 10 to MIS 5 record in Paudorf (Lower Austria). In: Catena, Vol. 117, S. 60-72.

STEIN, R. (1985): RAPID GRAIN-SIZE ANALYSIS OF CLAY AND SILT FRACTION BY SEDIGRAPH 5000D: COMPARISON WITH COULTER COUNTER AND ATTERBERG METHODS. IN: JOURNAL OF SEDIMENTARY PETROLOGY, VOL. 55, S. 590-615.

TOLL, D.G., LOURENÇO, S.D.N., MENDES, J. (2013): Advances in suction measurements using high suction tensiometers. In: Engineering Geology, Vol. 165, S. 29-37.

TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. (1980): Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. In: Water Resources Research, Vol. 16, S. 574-582.

UKWATTAGE, N.L., RANJITH, P.G., BOUAZZA, M. (2013): The use of coal combustion fly ash as a soil amendment in agricultural lands (with comments on its potential to improve food security and sequester carbon). In: Fuel, Vol. 109, S. 400-408.

VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSASTALTEN (VDLUFA) (Hrsg.) (2000): Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden. In: Standpunkt, Darmstadt.

WILDING, L.P., LIN, H. (2006): Advancing the frontiers of soil science towards a geoscience. In: Geoderma, Vol. 131, S. 257-274.

YAALON, D.H., BERKOWICZ, S. (1997): History of Soil Science – International Perspectives, CATENA VERLAG GMBH, Reiskirchen.

ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK (ZAMG)
[http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/
monatsrueckblick/wetterrueckblick?monat=07&jahr=2013](http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/monatsrueckblick/wetterrueckblick?monat=07&jahr=2013) (zuletzt abgerufen am 23.6.2014)

ZERMEÑO-GONZÁLEZ, A., MUNGUIA-LÓPEZ, J., CADENA-ZAPATA, M., Campos-Magaña, S.G., IBARRA-JIMÉNEZ, L., RODRIGUEZ-GARCÍA, R. (2012): Critical Evaluation of Different Techniques for Determining Soil Water Content. In: KUMAR, M. (Hrsg.): Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management, INTECH Open Accesss Publisher.

10.2. ABBILDUNGEN

Abbildung 1: Die Bodenphysik als interdisziplinäre Wissenschaft (Shukla 2014:5).....	9
Abbildung 2: Vergleich Präzision und Richtigkeit; (A) Richtigkeit und Präzision hoch und damit hohe Genauigkeit, (B) hohe Richtigkeit, geringe Präzision (C) hohe Präzision, geringe Richtigkeit, (D) Richtigkeit und Präzision gering (aus: Kromidas 1995:136).....	12
Abbildung 3: Lage der Standorte in Österreich (http://www.oerok-atlas.at , zuletzt abgerufen am 6.5.2014).....	27
Abbildung 4: Standort in Niederösterreich – Strengberg (http://gis.lebensministerium.at/eBOD/frames/index.php?&gui_id=eBOD).....	28
Abbildung 5: Standort in Oberösterreich – Pollham (http://gis.lebensministerium.at/eBOD/frames/index.php?&gui_id=eBOD).....	30
Abbildung 6: Standort im Burgenland – Kemeten.....	31
Abbildung 7: Versuchsansatz (eigene Darstellung).....	35
Abbildung 8: Randomisierte Verteilung der Versuchsansätze (eigene Darstellung).....	36
Abbildung 9: Korngrößendreieck Standorte Strengberg, Pollham und Kemeten nach ÖNORM L 1050 (2004).....	44
Abbildung 10: Versuchsansatz mit an der Oberfläche sichtbaren Rissen; Standort Kemeten (BAUER 2013).....	51

10.3. TABELLEN

Tabelle 1: Ursachen für zufällige und systematische Fehler im analytischen Labor (Funk et al. 2005:155ff, bearbeitet).....	11
Tabelle 2: Bodenphysikalische Eigenschaften und deren Bedeutung für Landwirtschaft, Ökologie und Bautechnik.....	14
Tabelle 3: Fallzeiten in Abhängigkeit von der Suspensionstemperatur (ÖNORM L 1061-2 2002:6).....	17
Tabelle 4: Temperatur und Niederschlag im 30jährigen Mittel und im Jahr 2013 für den Monat Juli.....	29
Tabelle 5: Anteil an Fein- und Grobboden in % der Gesamtmasse nach ÖNORM L 1050 (2004).....	44
Tabelle 6: Korngrößen Zusammensetzung pro Zentimeter, Standort Pollham (Anteile in % am Feinboden).....	45
Tabelle 7: Vergleich Ergebnisse der Analyse Sand- und Kiesanteil in %.....	52
Tabelle 8: Wassergehalt in % TM beim Matrixpotential, alle Standorte und Varianten	56
Tabelle 9: Wassergehalt in % TM beim Matrixpotential, Referenzprobe Sand	56

10.4. DIAGRAMME

Diagramm 1: Niederschlagssumme und Temperatur im Monatsmittel (1981-2010) – Waidhofen/Ybbs.....	29
Diagramm 2: Niederschlags- und Temperaturverlauf (2013) – Waidhofen/Ybbs.....	29
Diagramm 3: Niederschlagssumme und Temperatur im Monatsmittel (1981-2010) – Ried im Innkreis.....	30
Diagramm 4: Niederschlagssumme und Temperatur im Monatsmittel (1981-2010) – Bad Gleichenberg.....	32
Diagramm: 5: Wassergehalt in % TM und Wassergehalt in % Volumen.....	46
Diagramm 6: Rohdichte feucht und Rohdichte trocken	47
Diagramm 7: Wasserrückhaltevermögen pro Standort und Variante.....	48
Diagramm 8: Aggregatstabilität in %.....	49

11. ANHANG

KORNGRÖÙE

Ton		Schluff			Sand			Kies
Probe	<2 µm	fein 2 – 6,3 µm	mittel 6,3 – 20 µm	grob 20 – 63 µm	fein 63 – 200 µm	mittel 200 – 630 µm	grob 630 – 2000 µm	> 2000 µm
ST-C	34,15	13,13	21,51	21,96	3,3	2,6	3,35	1,3
SU-C	26,53	11,68	22,28	26,67	9,91	1,42	1,51	1,18
HA-C	39,59	8,35	12,08	11,75	15,74	8,42	4,07	2,32

Anhang 1: KorngröÙe des Fein- und Grobbodens in % der Fraktion

WASSERGEHALT FRISCH IN % TM & IN % VOLUMEN

Probe	1. Probenahme		2. Probenahme		3. Probenahme			
	<i>in % TM</i>	<i>in % Volumen</i>	<i>in % TM</i>	<i>in % Volumen</i>	<i>in % TM</i>	<i>in % Volumen</i>		
ST-C	24,14	26,88	ST-C	24,55	27,88	ST-C	25,36	27,88
ST-I	23,20	25,32	ST-I	24,24	26,30	ST-I	26,47	32,43
ST-II	23,74	27,10	ST-II	24,67	28,62	ST-II	24,78	30,62
SU-C	25,24	28,09	SU-C	20,36	20,81	SU-C	26,88	30,02
SU-I	24,24	27,32	SU-I	26,44	25,87	SU-I	26,87	29,87
SU-II	25,40	28,74	SU-II	22,01	21,82	SU-II	25,92	29,95
HA-C	23,19	26,83	HA-C	20,79	22,50	HA-C	24,67	33,90
HA-I	23,94	29,05	HA-I	17,86	22,77	HA-I	23,89	30,69
HA-II	23,70	31,10	HA-II	21,80	23,00	HA-II	25,13	34,57

Anhang 2: Wassergehalt frisch in % TM & in % Volumen

ROHDICHTE FEUCHT & TROCKEN IN % VOLUMEN

Probe	<i>Rohdichte feucht</i>			Probe	<i>Rohdichte trocken</i>		
	1. Probenahme	2. Probenahme	3. Probenahme		1. Probenahme	2. Probenahme	3. Probenahme
ST-C	1,30	1,38	1,36	ST-C	1,03	1,10	1,08
ST-I	1,26	1,31	1,50	ST-I	1,00	1,05	1,17
ST-II	1,33	1,44	1,52	ST-II	1,06	1,15	1,22
SU-C	1,31	1,21	1,40	SU-C	1,03	1,00	1,10
SU-I	1,32	1,21	1,36	SU-I	1,05	0,95	1,07
SU-II	1,36	1,22	1,47	SU-II	1,07	1,00	1,17
HA-C	1,33	1,33	1,66	HA-C	1,06	1,11	1,32
HA-I	1,37	1,31	1,54	HA-I	1,08	1,08	1,24
HA-II	1,44	1,30	1,69	HA-II	1,22	1,07	1,35

Anhang 3: Rohdichte feucht & trocken in % Volumen

WASSERRÜCKHALTEVERMÖGEN

Probe	<i>1. Probenahme</i>				
	-30mbar	-60mbar	-100mbar	-300mbar	-7000mbar
ST-C	44,73	48,08	48,11	38,78	19,63
ST-I	45,95	47,92	47,30	39,63	19,50
ST-II	51,29	51,47	47,50	42,05	20,35
SU-C	44,45	49,37	46,89	42,35	18,65
SU-I	48,69	47,61	51,65	40,45	18,53
SU-II	51,93	50,33	49,84	40,68	18,28
HA-C	40,47	44,82	42,79	38,48	21,83
HA-I	45,01	49,35	48,90	40,25	29,55
HA-II	45,16	45,94	46,84	39,19	26,88
S-C	36,45	36,85	33,60	36,40	-
S-I	41,05	40,90	39,65	38,35	-
S-II	41,80	42,00	37,65	38,60	-

2. Probenahme

Probe	-30mbar	-60mbar	-100mbar	-300mbar	-7000mbar
ST-C	53,73	53,32	53,79	47,23	23,50
ST-I	53,50	52,41	66,26	45,08	20,63
ST-II	55,04	51,59	51,49	43,23	24,30
SU-C	54,29	53,76	50,76	47,63	16,78
SU-I	52,15	51,90	41,40	50,66	17,38
SU-II	56,27	54,41	54,40	51,77	17,30
HA-C	49,37	45,23	48,34	43,75	22,28
HA-I	53,34	49,32	51,66	47,89	23,88
HA-II	52,78	50,70	50,79	41,08	27,33
S-C	42,65	41,50	41,60	37,15	-
S-I	39,40	40,95	41,50	41,95	-
S-II	42,70	40,80	42,55	41,30	-

3. Probenahme

Probe	-30mbar	-60mbar	-100mbar	-300mbar	-7000mbar
ST-C	51,43	50,23	49,9	42,68	19,93
ST-I	52,67	52,07	51,41	46,45	20,08
ST-II	52,02	55,07	53,00	48,50	20,43
SU-C	53,17	51,06	53,12	42,39	19,35
SU-I	52,04	52,56	51,24	44,28	18,78
SU-II	52,62	55,73	54,04	47,39	18,38
HA-C	45,79	45,41	45,55	40,05	29,48
HA-I	48,85	47,00	45,05	42,29	24,90
HA-II	48,74	46,05	44,36	42,47	25,38
S-C	40,40	40,20	41,55	30,05	-
S-I	43,45	44,00	42,40	37,10	-
S-II	65,70	65,75	63,40	62,05	-

Anhang 4: Wasserrückhaltevermögen

AGGREGATSTABILITÄT IN %

76

Probe	Aggregatstabilität in %		
	1. Probenahme	2. Probenahme	3. Probenahme
ST-C	38,98	43,14	41,02
ST-I	54,06	64,03	55,88
ST-II	39,75	41,71	43,08
SU-C	49,19	62,63	56,99
SU-I	70,74	65,89	63,36
SU-II	45,76	60,05	54,68
HA-C	20,84	28,11	22,37
HA-I	33,75	46,06	35,58
HA-II	19,80	25,81	23,64
Probe	Standardabweichung		
	1. Probenahme	2. Probenahme	3. Probenahme
ST-C	0,33	1,69	0,85
ST-I	0,67	1,13	0,51
ST-II	0,57	1,91	0,91
SU-C	0,56	1,02	0,36
SU-I	1,00	1,10	1,38
SU-II	0,75	1,42	0,70
HA-C	0,36	1,24	0,64
HA-I	0,46	1,11	0,96
HA-II	0,32	1,33	0,83

Anhang 5: Aggregatstabilität in % und Standardabweichung (für jede Probe wurden jeweils drei Werte bestimmt)

NACHWORT

Für mich hat sich bereits während des Geographie-Bachelorstudiums herauskristallisiert, dass mein Schwerpunkt eindeutig in der physischen Geographie liegt. Vor allem die Arbeitsmethoden dieser Forschungsrichtung haben mein Interesse geweckt, allen voran die Durchführung der bodenphysikalischen Analysen am institutseigenen Labor.

Nachdem ich meine Bachelorarbeit im Bereich der Geomorphologie abgefasst hatte, entschloss ich mich ebenfalls dazu, das Masterstudium Geographie mit dem Schwerpunkt in der Geoökologie und Bodenkunde zu absolvieren, da dieses Studium für meine Begriffe praktischer ausgelegt ist als andere Disziplinen in der Geographie. Diese Entscheidung wurde vor allem durch den Besuch diverser Lehrveranstaltungen, wie „Labormethoden in der Physiogeographie“ und „Labormethoden für Fortgeschrittene“ an der Universität Wien bekräftigt. Auch durch die freiwillige Absolvierung ausgewählter Lehrveranstaltungen, wie zum Beispiel „Physical and Selected Chemical Methods of Soil Analysis“, an der Universität für Bodenkultur, konnte ich einen noch intensiveren Einblick in den Bereich der Bodenforschung und dessen Untersuchungsmethoden erlangen. Weiters wurde mir die Möglichkeit geboten, bei Projekten verschiedener Auftraggeber, unter anderem bei der Beurteilung von Rekultivierungsflächen für die niederösterreichische Umweltanalytik (NUA) oder dem Humusaufbauprojekt Kaindorf zur Kompensation von CO₂-Emissionen (TB für Landschaftsökologie, -Planung, -Pflege) mitzuarbeiten, womit ein weiterer „Meilenstein“ in Richtung Bodenforschung und Bodenkunde gelegt wurde. Schlussendlich stellt diese Masterarbeit den letzten universitären Punkt in meinem „bodenkundlichen Lebenslauf“ dar.

Ein Dank gilt meinem Betreuer, Ass.-Prof. Mag. Dr. Robert Peticzka, welcher mich immer wieder darauf aufmerksam machte, nicht den roten Faden zu verlieren. Außerdem bedanke ich mich bei Christa Hermann für die Unterstützung bei den analytischen Untersuchungen im Physiogeographischen Labor. Besonderer Dank gilt dem Institut für Bodenforschung an der Universität für Bodenkultur, insbesondere Dipl.-Ing. Dr. Katharina Keiblinger und Assoc. Prof. Dr. Franz Zehetner, die mir Arbeitsplatz und Materialien für diese Masterarbeit zur Verfügung gestellt haben. Und natürlich auch ein großes Dankeschön an meine Kollegin Evi Deltedesco, ohne welche die Tätigkeiten im Glashaus nur halb so amüsant gewesen wären.

Ich danke besonders meiner Familie, meine Eltern und meine beiden Schwestern, die mich während meines gesamten Studiums und vor allem während der Schreibphase unterstützt hat. Speziell hervorheben möchte ich meine Mutter, bei welcher ich mich für ihren unermüdlichen Einsatz beim Korrekturlesen bedanke.

Ein großes Dankeschön möchte ich auch meinen Freunden aussprechen, die immer ein offenes Ohr und motivierende Worte für mich hatten. Danke euch allen!

Und nicht zu vergessen, ein riesiger Dank an meinen großen Helden Christian, der mich meine gesamte Studienzeit begleitet und unterstützt hat. Danke für deine Geduld und dein Verständnis

CURRICULUM VITAE

PERSÖNLICHE DATEN

Name	Bauer Lisa-Maria
Staatsbürgerschaft	Österreich

AUSBILDUNG

03/2012 – 04/2015	Universität Wien , Masterstudium Geographie
10/2008 – 02/2012	Universität Wien , Bachelorstudium Geographie
09/2004 – 06/2008	Bundesoberstufenrealgymnasium Mistelbach , musischer Zweig
09/2000 – 06/2004	Volksschule Zistersdorf

BERUFSEFAHRUNG

07/2014 – 12/2014	Umweltbundesamt GmbH , FEMtech Praktikum im Bereich Ökosystemforschung und Umweltinformation
03/2014 – 06/2014	Universität Wien , Tutorium für „Übungen zur Klimageographie“
03/2013 – 06/2013	Universität Wien , Tutorium für „Übungen zur Klimageographie“ und „Feldmethoden in der Physiogeographie“
07/2012	Wiener Umweltschutzabteilung (MA22) , Praktikum im Bereich Verkehr, Lärm und Geodaten
07/2011 – 08/2011	Geologische Bundesanstalt Wien , Praktikum im Bereich Geoinformation

PROJEKTMITARBEIT

03/2013 – 04/2013	Bioforschung Austria , Laboranalytik zur Bestimmung der Aggregatstabilität und Datenanalyse
02/2013 – 04/2013	Technisches Büro für Landschaftsökologie, -Planung, -Pflege Unterfrauner , Projekt „Wiener Stadtböden“, Laboranalytik zur Bestimmung der Aggregatstabilität
10/2012 – 02/2013	Technisches Büro für Landschaftsökologie, -Planung, -Pflege Unterfrauner , Humusaufbauprojekt Kaindorf, Durchführung von Feld- und Labormethoden zur Kompensation von CO ₂ -Emissionen
10/2012 – 11/2012	NUA-Umweltanalytik , Projekt S10 Mühlviertlerschnellstrasse Rekultivierungsflächen, Bodenprofilaufnahmen im Raum Freistadt

