
Abschlussbericht für die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

**Verbesserung der Nährstoffeffizienz und der Bodenfruchtbarkeit im
Landbau – Praxisorientiertes integrierendes Bewertungs- und Bera-
tungsverfahren zur schnellen Einschätzung der Bodenstruktur im
Feld**

(Field-Tool for improving Nutrient Efficiency by determining Soil Structure)

Projektleitung: Fachhochschule Kiel, Prof. Dr. Conrad Wiermann

Projektbearbeitung: M. Sc. Gerrit Müller

Projektpartner: Universität Kassel, Dr. Daniel Uteau Puschmann
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Dr. Heiner Fleige
Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche
Räume, Jörn Fröhlich

Kooperationspartner: Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt,
Natur und Digitalisierung, Kiel
Leibniz Universität Hannover, Prof. Dr. Stephan Peth

Aktenzeichen:

Berichtszeitraum: März 2019 – März 2023

Stand: 31.07.2023

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	5
Abbildungsverzeichnis.....	6
1 Vorbemerkung	11
2 Einleitung.....	12
3 Thematische Einführung zur Bodenstruktur	13
3.1 Bodenstruktur	13
3.1.1 Definition.....	13
3.1.2 Bodengefüge- bzw. Bodenstrukturformen und deren Entstehung.....	13
3.1.3 Funktionalität der Bodenstruktur	14
3.1.4 Einfluss der Bewirtschaftung auf die Bodenstruktur und ihre Funktionalität	16
3.1.4.1 Bodenschadverdichtung	16
3.1.4.2 Auswirkungen reduzierter Bodenbearbeitung.....	18
3.2 Methoden zur Beurteilung der Bodenstruktur	19
3.2.1 Spatendiagnose	20
3.2.2 Profilmethode ("Profil Cultural"-Methode)	21
3.2.3 VESS = Visual Evaluation of Soil Structure	22
3.2.4 Bildanalytische Verfahren	24
3.2.4.1 Mikroskopie	24
3.2.4.2 Computertomographie.....	26
3.3 Bodenstruktur und Nährstoffeffizienz.....	27
3.4 Zielsetzungen des Forschungsvorhabens	28
4 Material und Methoden	31
4.1 Standorte.....	31
4.2 Bodenuntersuchungen	34
4.2.1 Chemische Bodenuntersuchung.....	34
4.2.2 Physikalische Bodenuntersuchungen	34
4.3 Untersuchungen zur Aggregatstabilität:.....	35

4.4	Mikroskopie	36
4.5	Computertomographie.....	40
4.6	Ertragserhebungen.....	41
4.7	Statistik.....	41
5	Ergebnisse.....	42
5.1	VESS.....	42
5.2	Bodenchemische Untersuchungen.....	43
5.3	Kohlenstoffgehalte und Körnung	45
5.4	Bodenphysikalische Untersuchungen.....	49
5.4.1	Aggregatstabilität	49
5.4.2	Bewertung des Verdichtungszustandes.....	54
5.4.3	Anisotropie der gesättigten Wasserleitfähigkeit	56
5.4.4	Effektive Lagerungsdichte.....	57
5.5	Bildanalytische Untersuchungen	58
5.5.1	Mikroskopie.....	58
5.5.2	Computertomographie	60
5.6	Ertragserhebungen.....	61
6	Zusammenhang verschiedener Parameter.....	65
6.1	Korrelation einzelner Laborparameter	65
6.1.1	Korrelation bodenphysikalischer Parameter und VESS	65
6.1.2	Korrelation bodenphysikalischer Parameter und quantitativer Mikroskopie	69
6.1.3	Korrelation bodenphysikalischer Parameter und quantitativer Computertomographie.....	71
6.1.4	Vergleich quantitativer Mikroskopie und quantitativer Computertomographie.....	74
6.1.5	Korrelation bodenphysikalischer Eigenschaften und Ertragsparameter	74
7	Diskussion.....	77
7.1	Strukturzustand der Ackerböden in Schleswig-Holstein	77

7.2	Anwendung von bildanalytischen Verfahren zur Beurteilung der Bodenstruktur	80
0		
7.3	Entwicklung eines Beratungstools	82
8	Öffentlichkeitsarbeit	84
9	Ausblick und weiteres Vorgehen	86
10	Literatur	89
11	Anhang	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Richtwerte zur Bewertung der mittleren gewichteten Durchmesser bei Nasssiebverfahren (adaptiert von Din EN-ISO 10930).....	36
Tabelle 2: Ergebnisse der Untersuchungen zum Kohlenstoffgehalt (verrechnet als Humusgehalt) und der Körnungsanalyse für die im Jahr 2019 beprobten Standorte.	46
Tabelle 3: Ergebnisse der Untersuchungen zum Kohlenstoffgehalt (verrechnet als Humusgehalt) und der Körnungsanalyse für die im Jahr 2020 beprobten Standorte.	47
Tabelle 4: Ergebnisse der Untersuchungen zum Kohlenstoffgehalt (verrechnet als Humusgehalt) und der Körnungsanalyse für die im Jahr 2021 beprobten Standorte.	48
Tabelle 5: Mittlere gewichtete Durchmesser (MWD) bei Nasssiebverfahren an den BDF-Standorten 2019.	102
Tabelle 6: Mittlere gewichtete Durchmesser (MWD) bei Nasssiebverfahren an den Probennahmestandorten aus 2020.	103
Tabelle 7: Mittlere gewichtete Durchmesser (MWD) bei Nasssiebverfahren an den Probennahmestandorten aus 2021.	104
Tabelle 8: Korrelationskoeffizient für Laborparameter der Standorte < 12 % in der 1. Tiefe (n= 45).....	105
Tabelle 9: Korrelationskoeffizient für Laborparameter der Standorte < 12 % in der 2. Tiefe (n= 45).....	106
Tabelle 10: Korrelationskoeffizient für Laborparameter der Standorte < 12 % in der 3. Tiefe (n= 45).....	107
Tabelle 11: Korrelationskoeffizient für Laborparameter der Standorte > 12 % in der 1. Tiefe (n= 45).....	108
Tabelle 12: Korrelationskoeffizient für Laborparameter der Standorte > 12 % in der 2. Tiefe (n= 45).....	109
Tabelle 13: Korrelationskoeffizient für Laborparameter der Standorte > 12 % in der 3. Tiefe (n= 45).....	110
Tabelle 14: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes Marsch in der 1. Tiefe (n=7).	111

Tabelle 15: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes Marsch in der 2. Tiefe (n=7).	112
Tabelle 16: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes Hohe Geest in der 1. Tiefe (n=12).	113
Tabelle 17: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes Hohe Geest in der 2. Tiefe (n=12).	114
Tabelle 18: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes Vorgeest in der 1. Tiefe (n=7).	115
Tabelle 19: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes Vorgeest in der 2. Tiefe (n=7).	116
Tabelle 20: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes östliches Hügelland in der 1. Tiefe (n=19).	117
Tabelle 21: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes östliches Hügelland in der 2. Tiefe (n=19).	118

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: VESS-Beurteilungsschema	233
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Mikrogefüges	255
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Grundkonzeption des Forschungsvorhabens.	300
Abbildung 4: Übersichtskarte der für das DBU-Projekt untersuchten Standorte.	333
Abbildung 5: Darstellung ausgewählter Porenflächen und Bereiche organischer Substanz eines Dünnschliffs. A= linear polarisiertes Bild, B= Bild A unter Kreuzpolarisation, C= Bereich mit hohem Anteil organischer Substanz mit dem Verweis (rot) auf Bild A und B, D= Bereichsauswahl einer Porenfläche mit hellen Reflektionen mit dem dazugehörigen Verweis (gelb).	39
Abbildung 6: Ergebnisse der Strukturbeurteilung (Visual Estimation of Soil Structure = VESS) nach Ball et al. (2007) in Abhängigkeit vom Naturraum (OH = Östliches Hügelland, NG = Niedere Geest, HG = Hohe Geest, MA = Marsch) und der Tiefe (1 = bearbeiteter Oberboden, 2 = Übergang bearbeitet/unbearbeitet, 3 = Unterboden).	422

Abbildung 7: Ergebnisse der Strukturbeurteilung (Visual Estimation of Soil Structure = VESS) nach Ball et al. (2007) in Abhängigkeit vom Tongehalt (über/unter 12 %) und der Tiefe (1 = bearbeiteter Oberboden, 2 = Übergang bearbeitet/unbearbeitet, 3 = Unterboden).	433
Abbildung 8: pH-Werte an Standorten und Tiefen mit > 12 % Tongehalt (135 Mittelwerte, n=180 je Tiefe).	444
Abbildung 9: pH-Werte an Standorten und Tiefen mit < 12 % Tongehalt (135 Mittelwerte, n=180 je Tiefe).	455
Abbildung 10: Aggregatstabilität (Crushing-Test) für n = 36 Standorte in Abhängigkeit von der Aggregatgrößenfraktion (2 – 4 mm; 4 – 8 mm, 8 – 16 mm) und der Tiefe (1 = bearbeiteter Oberboden, 2 = Übergang bearbeitet/unbearbeitet, 3 = Unterboden).	49
Abbildung 11: Aggregatstabilität (Crushing-Test) für n = 36 Standorte in Abhängigkeit vom Tongehalt für die Aggregatgrößenfraktionen (2 – 4 mm; 4 – 8 mm, 8 – 16 mm) über alle Tiefen.....	500
Abbildung 12: Luftkapazität in Abhängigkeit von der Aggregatstabilität (Crushing-Test) für die Aggregatgrößenfraktionen (2 – 4 mm; 4 – 8 mm, 8 – 16 mm) über alle Tiefen (n= 36 Standorte).	511
Abbildung 13: Mean Weight Diameter (MWD) (n = 36 je Tiefe) für die Entnahmetiefen (1 = bearbeiteter Oberboden, 2 = Übergang bearbeitet/unbearbeitet, 3 = Unterboden) unter Berücksichtigung der Bewertung des MWD gemäß DIN-EN-ISO 10930 (rot = instabil, gelb = mäßig stabil – stabil, grün = sehr stabil).....	522
Abbildung 14: Mean Weight Diameter (MWD) (n = 108) in Abhängigkeit vom organischen Kohlenstoffgehalt (Corg) für alle Entnahmetiefen.	533
Abbildung 15: Bewertung des Verdichtungsstatus nach CVT anhand kritischer Grenzwerte der vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) und Luftkapazität (LK) unterteilt nach Tiefe und Bodenarten-Hauptgruppe.....	555
Abbildung 16: Horizontale und vertikale kf-Werte sowie daraus berechnete Anisotropiefaktoren unterteilt nach Tiefe und Bodenarten-Hauptgruppe.....	56
Abbildung 17: Bewertung der effektiven Lagerungsdichte (Grenzwert > 1,7) und Korrelation mit der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf-vertikal) von 45 Standorten in Schleswig-Holstein in Abhängigkeit von der Tiefe (n=135)	577

Abbildung 18: Darstellung der Ergebnisse zum Anteil der Porenfläche zur gesamten Bodenmatrix eines Dünnschliffs aus der Mikroskopie für die beiden beprobten Tiefen (n=98).....	588
Abbildung 19: Darstellung der Ergebnisse aus den mikroskopischen Untersuchungen für Standorte mit > 8 % Ton und der ersten Tiefe (n=14). Abgebildet ist die gesamte Porenfläche der Dünnschliffe, sowie die Untergliederung in den Flächenanteil der Poren in den Bereich > 50 µm und 50-10 µm.....	59
Abbildung 20: Darstellung der Ergebnisse aus den mikroskopischen Untersuchungen für Standorte mit > 8 % Ton und der zweiten Tiefe (n=17). Abgebildet ist die gesamte Porenfläche der Dünnschliffe, sowie die Untergliederung in den Flächenanteil der Poren in den Bereich > 50 µm und 50-10 µm.....	600
Abbildung 21: Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore für alle Standorte der ersten beiden Probennahmejahre und Tiefen (n=90).....	600
Abbildung 22: Ergebnisse zur Makroporosität für alle Standorte der ersten beiden Probennahmejahre und Tiefen (n=90).....	611
Abbildung 23: Übersicht der mehrjährigen Ertragsdaten, verrechnet als Relativerträge zu den Ergebnissen der Landessortenversuche (LSV) für den nächst vergleichbaren Standort, für die untersuchten Böden in Schleswig-Holstein und der Einschätzung des Standortpotenzials anhand des Müncheberger Soil Quality Ratings (MSQR) (n=64).....	622
Abbildung 24: Übersicht Ertragsdaten, die jeweils im Jahr der Bodenprobennahme genommen wurde, verrechnet als Relativerträge zu den Ergebnissen der Landessortenversuche (LSV) für den nächst vergleichbaren Standort, für die untersuchten Böden in Schleswig-Holstein und der Einschätzung des Standortpotenzials anhand des Müncheberger Soil Quality Ratings (MSQR) (n=32).	633
Abbildung 25: Darstellung des negativen Zusammenhangs von Ertrag und Proteingehalt (n=61).....	644
Abbildung 26: Vergleich der Ergebnisse des Crushing-Tests für die Aggregatgröße 8-16 mm (gemessen in kPa) über alle drei Beprobungstiefen der 45 Standorte und dem Tongehalt der Proben in % (n= 135).	666
Abbildung 27: Einfluss des Tongehaltes auf die Ausrichtung des Porensystems, verglichen anhand des Quotienten aus horizontaler zu vertikaler gesättigter Wasserleitfähigkeit in der zweiten Beprobungstiefe (n=45).....	677

Abbildung 28: Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit (Tensile Strength) und Bodenstrukturzustand nach VESS für die Aggregatgrößenklasse 8 – 16 mm in den Entnahmetiefen (1 = bearbeiteter Oberboden, 2 = Übergang bearbeitet/unbearbeitet, 3 = Unterboden).....	68
Abbildung 29: Darstellung der gesamten Porenfläche in % in Darstellung zum gesamten Porenvolumen (n=90).....	69
Abbildung 30: Darstellung der Porenfläche > 50 µm in % in Darstellung zur Luftkapazität in Volumenprozent (n=90).....	70
Abbildung 31: Zusammenhang von Porenfläche > 50 µm in % und Luftkapazität [Vol.%] für Horizonte mit Tongehalten > 8 % (n=31)..	70
Abbildung 32: Darstellung der Porenfläche 50 - 10 µm in % in Darstellung zur nutzbaren Feldkapazität in Volumenprozent (n=90).....	71
Abbildung 33: Zusammenhangzwischen horizontaler und vertikaler kf-Werte (n = 45) sowie der Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore drei Beprobungstiefen der in 2019 beprobten BDF-Standorte.	72
Abbildung 34: Zusammenhang zwischen Makroporosität [Vol. %] und Luftkapazität [Vol. %] für die 2019 beprobten BDF-Standorte in drei Entnahmetiefen Vol.-% (n=90).....	73
Abbildung 35: Zusammenhang zwischen Makroporosität [Vol. %] und Luftkapazität [Vol.%] für die in 2019 beprobten BDF-Standorte. Nur Horizonte > 8 % Ton (n=31).	73
Abbildung 36: Vergleich der Porenfläche [%] > 50 µm (Dünnschliffe) und Makroporosität [Vol. %] (CT-Scans) der 2019 beprobten BDF-Standorte aus der ersten und zweiten Entnahmetiefe. Nur Horizonte > 8 % Ton (n=31).	74
Abbildung 37: Einfluss der Ausrichtung des Porensystems auf die Ertragsbildung im Verlauf des untersuchten Zeitraums (n=45).	75
Abbildung 38: Entwurf eines Grundschemas für die Entwicklung eines erweiterten Beratungs-tools zur Beurteilung der Bodenstruktur im Feld für norddeutsche Böden.	888
Abbildung 39: Zugfestigkeit (tensile strength) gemessen anhand von Crushing-Tests an lufttrockenen Bodenaggregaten bei drei Größenklassen in 3 Tiefen der BDF-Standorte im Jahr 2019. Jede Kachel repräsentiert ca. 30 bis 35 Aggregate.	99

Abbildung 40: Zugfestigkeit (tensile strength) gemessen anhand von Crushing-Tests an lufttrockenen Bodenaggregaten bei drei Größenklassen in 3 Tiefen der Probennahmestandorte im Jahr 2020. Jede Kachel entstand aus ca. 30 bis 35 Aggregate.....	1000
Abbildung 41: Zugfestigkeit (tensile strength) gemessen anhand von Crushing-Tests an lufttrockenen Bodenaggregaten bei drei Größenklassen in 3 Tiefen der Probennahmestandorte im Jahr 2021. Jede Kachel repräsentiert aus ca. 30 bis 35 Aggregate.....	1011
Abbildung 42: Visualisierung und Prozess der mikroskopischen Aufnahme von einem Dünnschliff aus der ersten Tiefe eines Standortes der Vorgeest, Bodentyp GG-PP. Im Ergebnisbild kennzeichnet die rote Farbe die Porenfläche.	102
Abbildung 43: Visualisierung und Prozess der mikroskopischen Aufnahme von einem Dünnschliff aus der ersten Tiefe eines Standortes der Marsch, Bodentyp MCn. Im Ergebnisbild kennzeichnet die weiße Farbe die Porenfläche.....	102
Abbildung 44: Visualisierung und Prozess der mikroskopischen Aufnahme von einem Dünnschliff aus der ersten Tiefe eines Standortes des östlichen Hügellandes, Bodentyp SS-LL. Im Ergebnisbild kennzeichnet die rote Farbe die Porenfläche.	102

1 Vorbemerkung

Das im Folgenden berichtete Projekt wurde mit dem Ziel durchgeführt, ein Beurteilungstool zur schnellen und standortbezogenen Einschätzung des Bodenfruchtbarkeitszustandes im Feld zu entwickeln. Ende 2018 wurde das Projekt durch die DBU genehmigt, die erste Probenahmekampagne startete planmäßig im März 2019. Alle für 2019 geplanten Untersuchungen wurden termingerecht durchgeführt. Mit den im März 2020 beginnenden Einschränkungen durch die Corona Pandemie verzögerten sich die Laborarbeiten und die damit direkt verbundenen Auswertungen. Erst ab Mitte 2022 konnte in den im Projekt beteiligten Institutionen der Regelbetrieb vollständig wiederaufgenommen werden. Dies hatte zur Folge, dass die Projektlaufzeit mehrfach kostenneutral bzw. nur mit geringen zusätzlichen Finanzmitteln bis Ende März 2023 verlängert wurde. In der gesamten Projektlaufzeit ist es mehrfach zu einem Wechsel der Bearbeiter:innen gekommen. Auch konnte auf Grund der Pandemie und den damit wiederholt abgesagten Tagungen nur ein begrenzter wissenschaftlicher Austausch stattfinden. Praxistage, auf denen die Ergebnisse und das weitere Vorgehen vorgestellt und diskutiert werden sollte, mussten mehrfach auf Grund von pandemiebedingten Einschränkungen abgesagt werden. Dies hatte insgesamt zur Folge, dass bis zum jetzigen Zeitpunkt zwar (fast) alle Messungen durchgeführt werden konnten, eine Gesamtauswertung allerdings nur bedingt möglich war. Weitergehende Auswertungen und damit verbundene Publikationen in redigierten Zeitschriften sind für nächsten Monate in Vorbereitung.

2 Einleitung

Die Erhaltung und Entwicklung der Bodenfruchtbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden ist eine der zentralen Fragestellungen im Hinblick auf nachhaltige und resiliente Landnutzungssysteme. Die Bodenfruchtbarkeit ist hierbei nicht nur als wesentliche Einflussgröße für die Ertragshöhe und -qualität landwirtschaftlicher Erzeugnisse maßgeblich, sondern auch für die Nähr- bzw. Stickstoffstoffeffizienz bestimmend. Nur in Gegenwart von intakten Bodensystemen wird es zukünftig möglich sein, Nähr- bzw. Stickstoffemissionen zu reduzieren und damit negative Umwelteffekte (u.a. Eutrophierung, Grund- und Trinkwasserqualität) zu verhindern. Über den Bodenfruchtbarkeitszustand landwirtschaftlich genutzter Böden liegen für Schleswig-Holstein, genauso wie in anderen Bundesländern, keine belastbaren und systematisch erhobenen Ergebnisse vor. Lediglich im Rahmen von Bodendauerbeobachtungen wurden Untersuchungen insbesondere zu chemischen und biologischen Bodeneigenschaften durchgeführt. Untersuchungen zum Strukturzustand der ackerbaulich genutzten Böden in Schleswig-Holstein liegen keine bzw. nur punktuell erhobene Daten vor. Gerade Kenntnisse zur Bodenstruktur sind im Hinblick auf die Intensität von Transformations- und Translokationsprozessen sowie die Erschließung eines ausreichenden Bodenvolumens durch die Pflanzenwurzel bedeutsam. Von diesen Eigenschaften hängt wiederum insgesamt die Ressourceneffizienz und damit direkt verbunden das Ausmaß sogenannter externer Effekte der landwirtschaftlichen Bodennutzung ab. Für den Flächenbewirtschafter sind somit Kenntnisse der Struktureigenschaften für die konkrete Planung von Bewirtschaftungsmaßnahmen äußerst relevant. Zielsetzung des Forschungsvorhabens war deshalb a) detaillierte Daten über den aktuellen Strukturzustand repräsentativer Ackerstandorte in Schleswig-Holstein zu erarbeiten, b) aus dem dann sehr komplexen Datensatz auf Grundlage von Regressionsanalysen relevante Zusammenhänge zwischen optisch erkennbaren Strukturmerkmalen und besonders bodenphysikalischen Bodeneigenschaften zu erkennen und c) Erkenntnisse über die Bedeutung der Bodenstruktur für Bodenfunktionen (u.a. Produktionsfunktion, Filter- und Speicherfunktion) zu erhalten und d) mit Hilfe dieser Zusammenhänge vorhandene optische Methoden zur Beurteilung der Bodenstruktur weiterzuentwickeln (= Beratungstool).

3 Thematische Einführung zur Bodenstruktur

3.1 Bodenstruktur

3.1.1 Definition

Der Boden stellt ein Dreiphasensystem dar: er setzt sich aus festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteilen zusammen. Die räumliche Anordnung der festen Bodenbestandteile, also der mineralischen und organischen Elemente, wird als Bodengefüge oder Bodenstruktur bezeichnet. Mit der räumlichen Anordnung der festen Bestandteile des Bodens ergibt sich die Ausgestaltung des Porensystems, in dem sich die Bodenlösung und verschiedene Gase befinden. Letey (1991) definiert Bodenstruktur als räumliche Anordnung einer großen Anzahl von Poren verschiedener Größe und Form, die durch verschiedene Aggregierungsprozesse der festen Bodenbestandteile entstanden ist. Eine Definition der Bodenstruktur von Lal (1991) schließt einzelne Funktionen des Bodengefüges mit ein: „Der Begriff Bodenstruktur bezieht sich auf die Größe, Form und Anordnung von Feststoffen und Hohlräumen, der Kontinuität der Poren, ihre Kapazität Flüssigkeiten, organische und anorganische Substanzen zu speichern und zu transportieren, und der Fähigkeit ein kräftiges Wurzelwachstum zu ermöglichen“. Die Gefügeformationen können in Abhängigkeit von den Standortverhältnissen (u.a. Ausgangsmaterial, Klima/Witterung, Relief) und der Nutzung sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Im Hinblick auf die landwirtschaftliche Nutzung ist die Bodenstruktur von zentraler Bedeutung für den Wasser-, Gas-, Wärme- und Nährstoffhaushalt des Bodens.

3.1.2 Bodengefüge- bzw. Bodenstrukturformen und deren Entstehung

Die aktuell auf landwirtschaftlich genutzten Böden vorliegende Bodenstruktur ist das Ergebnis von natürlichen und anthropogen beeinflussten Strukturierungsprozessen. Im Zuge dieser Prozesse kommt es zur Entwicklung von separaten Bodenkörpern = Aggregaten (Amelung et al., 2018). Als natürlich werden die Prozesse bezeichnet, die während der natürlichen, nicht durch den Menschen beeinflussten Bodenentwicklung stattfinden. Hierzu gehören Quellungs- und Schrumpfungsprozesse, deren Ausmaß mit dem Tongehalt und den Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes variiert. Auch der Wechsel von Frost- und Tauzyklen löst Strukturierungsprozesse

aus, die im landwirtschaftlichen Sinne als „Frostgare“ bezeichnet und für den Anbau von Sommerkulturen von Bedeutung sind. Neben diesen physikalischen Prozessen sind vor allen Dingen biologische Prozesse im Zusammenhang von strukturbildenden Vorgängen sehr bedeutsam: Zum einen werden durch grabende, wühlende Tätigkeiten und andere Wachstumsprozesse der Bodenfauna und -flora (u.a. Regenwurm, Pflanzenwurzel) Röhrensysteme (= Porensysteme) gebildet und damit eine Kompartimentierung der Bodenmatrix vorgenommen. Andererseits werden Aggregierungsprozesse durch mikrobielle Umsetzungsprozesse der organischen Substanz ausgelöst bzw. unterstützt. Auch chemische Lösungs- und Fällungsreaktionen in Verbindung mit Transport-, Ein- und Umlagerungsvorgängen (u.a. Eisenoxide, Carbonatverbindungen) führen zu einer Strukturbildung des Bodens. Mit der landwirtschaftlichen Bodennutzung werden anthropogene Bodenstrukturveränderungen ausgelöst: In diesem Zusammenhang sind besonders die Bodenbearbeitung und die Beanspruchung des Bodens durch die Befahrung mit landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen zu nennen.

Die Bodenaggregate sind in Größe, Form und Eigenschaften sehr unterschiedlich ausgeprägt. In Abhängigkeit von den strukturbildenden Prozessen werden Absonderungs- (physikalisch), Aufbau- (biologisch), Kitt- (chemisch) und Fragmentgefüge (mechanisch) unterschieden. Ziel landwirtschaftlicher Bewirtschaftung von Ackerstandorten ist in der Regel ein stabiles Krümelgefüge im Oberboden und die Vermeidung von Plattengefügen und anderen Verfestigungen bzw. Grenzschichten im unbearbeiteten Unterboden.

3.1.3 Funktionalität der Bodenstruktur

Die Bodenstruktur erfüllt eine große Anzahl von Funktionen bzw. mit der Ausgestaltung der Bodenstruktur werden Qualität und Quantität verschiedener Prozesse determiniert: Wasserleitfähigkeit und Wasserspeicherkapazität, Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre, Wärmekapazität und -leitfähigkeit, Nährstoffverfügbarkeit und -speicherbarkeit sowie Lebensraumfunktionen. Der Begriff „Funktionalität“ bezieht sich also auf Leitungs-, Transport-, Speicherungs- und Transformationsprozesse. Hierbei wird die zentrale Bedeutung einer funktionalen Bodenstruktur im Hinblick auf die Beeinflussung des Wachstums landwirtschaftlicher Kulturpflanzen deutlich.

Eine hohe Funktionalität ist dann gegeben,

- wenn ein kontinuierliches Porensystem, das Ober- und Unterboden miteinander verbindet, vorliegt,
- wenn Wasser in ausreichendem Maß gespeichert, Starkregenereignisse kein Stauwasser und damit anaerobe Verhältnisse oder oberflächennahen Abfluss bewirken,
- wenn Nährstoffe nicht nur in ausreichendem Maße gespeichert und verfügbar, sondern auch zugänglich, d.h. erreichbar durch die Wurzeln, sind,
- wenn (mineralische und organische) Düngungsmaßnahmen effizient in Pflanzenertrag transformiert werden können und damit negative Umweltwirkungen minimiert werden, d.h. eine hohe Nährstoffeffizienz vorliegt,
- wenn eine schnelle Erwärmung besonders im Frühjahr gegeben ist,
- wenn eine hohe Biodiversität aus verschiedenen Bodenlebewesen vorhanden ist,
- wenn keine dauerhafte Freisetzung von Kohlenstoffdioxid aus den Bodenkohlenstoffvorräten erfolgt und
- wenn ein ungehinderter Stoffaustausch zwischen Böden als individuelle Elemente einer Landschaft und angrenzende Sphären stattfinden können.

Um diese verschiedenen Funktionen und Zusammenhänge besser erklären und systematisieren zu können, wird in der Literatur (u.a. Six et al., 2004; Tosche et al., 2018) zwischen Mikro- und Makroaggregaten unterschieden. Elliot und Colemann (1988) haben in diesem Zusammenhang ein Konzept, das die Entwicklung von Mikroaggregaten (20 – 250 μm) in Makroaggregaten (> 250 μm) erklärt, veröffentlicht. Mit diesem Konzept ergeben sich vier hierarchische Kategorien von Poren: (1) Makroporen, (2) Porenraum zwischen Makroaggregaten, (3) Poren zwischen Mikroaggregaten aber in Makroaggregaten und (4) Poren in Mikroaggregaten. Diese Zusammenhänge bedeuten, dass die Bodeneigenschaften immer das Ergebnis unterschiedlicher Prozesse und deren wechselnde Kombinationen auf verschiedenen hierarchischen Ebenen darstellen. Stehen beispielsweise Infiltrationsprozesse im Vordergrund sind Makroporen bestimmend, stehen hingegen Ad- und Desorptionsprozesse oder die Mineralisierung der organischen Substanz im Mittelpunkt der Betrachtungen ist vorrangig die Erreichbarkeit der Austauscheroberflächen, die durch die Entstehung und Struktur von Mikroaggregaten determiniert wird, bedeutsam.

Die Bodenstruktur und die durch sie beeinflussten Prozesse und Funktionen sind also sehr komplex und variabel – die Bodenstruktur ist demnach multifunktional und von zentraler Bedeutung für verschiedene Ökosystemdienstleistungen. Bronick und Lal (2005) bezeichnen Bodenstruktur zusammenfassend als einen Schlüsselfaktor für die Funktionalität des Bodens, also der Fähigkeit des Bodens das Pflanzen- und Tierwachstum sowie die Umweltqualität im Hinblick auf u.a. die Kohlenstoffsenkenfunktion und Wasserqualität zu unterstützen.

3.1.4 Einfluss der Bewirtschaftung auf die Bodenstruktur und ihre Funktionalität

Die landwirtschaftliche Bewirtschaftung beeinflusst die Bodenstruktur direkt durch Bodenbearbeitungsmaßnahmen und Befahrungseignisse. Indirekt wird die Ausprägung des Bodengefüges u.a. durch Düngungs- und Fruchtfolgegestaltungen modifiziert. Im Folgenden sollen nur die direkten Einflussnahmen durch Befahrung und Bodenbearbeitung näher beleuchtet werden.

3.1.4.1 Bodenschadverdichtung

Während die Bodenbearbeitung in Abhängigkeit von der Bearbeitungstiefe, -intensität, -häufigkeit und den Bearbeitungswerkzeugen besonders die Oberbodenstruktur beeinflusst, können Befahrungen, die die Eigenstabilität (= Tragfähigkeit) des Bodens überschreiten und somit plastische Verformungen hervorrufen, langfristig wirksame Strukturschädigungen (= Bodenschadverdichtungen) des Unterbodens hervorrufen. Nach Ergebnissen von Hakansson und Reeder (1994) ist zwischen kurz- und langfristigen Wirkungen von Bodenschadverdichtungen zu unterscheiden: während kurzfristige Effekte von mechanischen Lastimpulsen hauptsächlich auf Strukturschäden des Oberbodens zurückzuführen sind, wirken sich Veränderungen im Unterboden langfristig aus. Da regenerative Prozesse (u.a. Quellung/Schrumpfung, Frosteinwirkung, biologische Aktivität) in ihrer Intensität mit zunehmender Bodentiefe abnehmen, deuten zahlreiche Angaben in der Literatur (u.a. Hakansson und Reeder, 1994) darauf hin, dass Strukturschäden im Unterboden als permanente Veränderungen zu bewerten sind. Die Ertragswirkung von gezielt aufgebrauchten Lastimpulsen ist mittlerweile in zahlreichen Ackerkulturen untersucht worden.

Grundsätzlich sind Untersuchungen mit einem einmaligen Lastimpuls und deren anschließende Ertragswirkung von Feldversuchen mit mehrmaligen, in der Regel jährlich wiederholten Lasteinträgen zu unterscheiden. Bei einmaligen Lastimpulsen wurden langfristige Ertragseinbußen von ca. 5 % (u.a. Hakanson et al., 1987; Arvidsson und Hakansson, 2014; Alakukku und Elonen, 1995) ermittelt. Werden die Lastimpulse allerdings jährlich wiederholt, kommt es zu einer Akkumulation von schädlichen Strukturänderungen besonders im Unterboden. Dies kann in Abhängigkeit von dem Belastungsszenario, den Standortbedingungen (u.a. Niederschlag, Tongehalt) und den Bodenbearbeitungsverfahren langfristig zu Ertragsausfällen von > 10 % (u.a. Arvidsson und Hakansson, 1991; Chamen et al., 1992; Alblas et al., 1994; Riley, 1994; Ball et al., 1997; Blumenthal, 2016) führen. Auf regelmäßig mechanisch belasteten (Teil-)Flächen von Ackerstandorten wie dem Vorgewende ist also mit langfristigen Ertragsausfällen von bis zu 10 % zu rechnen. Die Ertragswirkungen auf anderen, weniger mechanisch beanspruchten Teilflächen, sind hingegen im Mittel auf ca. 5 % einzuschätzen.

Von Zink et al. (2011) ist zur Beurteilung des Verdichtungszustandes von Ackerböden das so genannte „Compaction Verification Tool“ (CVT) vorgestellt worden. Unter gleichzeitiger Einbeziehung der Parameter „Luftkapazität“ (LK) und „gesättigte Wasserleitfähigkeit“ (kf) sowie der jeweils kritischen Werte (5 Vol. % und 10 cm/d) ermöglicht dieses Modell eine Einschätzung der Funktionalität des Porensystems und damit des Verdichtungszustandes. Mordhorst et al. (2016) und Mordhorst et al. (2020) kommen unter Verwendung dieses Modells zu folgender Einschätzung für schleswig-holsteinische Ackerböden: Braunerden, Podsole und Podsol-Gleye weisen in der Regel einen geringen Anteil (ca. 6 %) potenzieller Schadverdichtungen im Unterboden auf. Bei den typischen Böden des östlichen Hügellandes (u.a. Parabraunerden, Pseudogleye und Kolluvisole) sind die Anteile potenziell schadverdichteter Unterböden mit Anteilen zwischen 17 und 30 % deutlich höher. Noch höhere Anteile an Schadverdichtungen wiesen die Böden der Marschen mit 50 – 60 % auf. Dies ist insofern erstaunlich, als besonders die Kalk- und Kleimarschen sehr hohe Ertragsleistungen aufweisen, die zunächst keinen hohen Anteil an Schadverdichtungen im Unterboden vermutet lassen. Bei den tonreichen Altmarschen hingegen sind hohe Anteile schadverdichteter Unterbodenhorizonte erklärbar. Mit Hilfe des

CVT-Modells kann allerdings nicht zwischen pedo-/geogen und anthropogen verursachten Schadverdichtungen differenziert werden, so dass die Anteile eindeutig bewirtschaftungsbedingter Bodenschadverdichtungen deutlich geringer als die genannten Anteile einzuschätzen sind. Weitergehende Berechnungen für repräsentative Böden Schleswig-Holsteins zeigen, dass lediglich 6 – 10 % der Unterböden durch anthropogenen Einfluss als schadverdichtet einzustufen sind (Mordhorst et al., 2020). Allerdings deuten separate Betrachtungen der verwendeten Parameter daraufhin, dass Bewirtschaftungsmaßnahmen Veränderungen des Porensystems bewirkt haben. Bei den Parabraunerden und Pseudogleyen liegen anthropogenbedingt ca. 25 bis über 45 % der untersuchten Böden bei der Luftkapazität oder der gesättigten Wasserleitfähigkeit unterhalb des jeweils kritischen Wertes (Mordhorst et al., 2020).

3.1.4.2 Auswirkungen reduzierter Bodenbearbeitung

In zahlreichen Untersuchungen (u.a. Teebrügge und Düring, 1999; Wiermann et al., 2000; Pöhlitz et al., 2018) konnte gezeigt werden, dass mit einer Reduzierung der Bearbeitungsintensität die natürlichen (bodeninternen) Strukturierungsprozesse unterstützt werden und so neben anderen Effekten (u.a. auf Ertragsquantität und -qualität, Nährstoffdynamik, Ungras- und Unkrautdruck) eine stabile sowie funktionale Bodenstruktur entsteht. Auf Grund des reduzierten mechanischen Eingriffs werden bodeninterne Gefügebildungsprozesse weniger häufig unterbrochen: mehrere Quellungs- und Schrumpfungszyklen können durchlaufen werden und durch biologische Prozesse entstandene Hohlräume bzw. Aggregate bleiben teilweise langfristig erhalten. Wiermann et al. (2000) konnten in ihren Untersuchungen zeigen, dass im Unterboden eines lößbürtigen Ackerstandortes mit der permanenten Anwendung (> 25 Jahre) pflugloser Bearbeitungssysteme das als Luftkapazität bezeichnete weite Grobporenvolumen (> 50 µm) sowie die gesättigte Wasserleitfähigkeit signifikant im Vergleich zur jährlich gepflügten Variante zugenommen hat. Hierfür sind neben physikalischen Prozessen hauptsächlich die Tätigkeit von u.a. Regenwürmern und anderen grabenden Bodenlebewesen verantwortlich. In diesem Zusammenhang konnten Rasmussen (1999), Teebrügge und Düring (1999), Schlüter (2002) und van Capelle et al. (2012) feststellen, dass sich bei pflugloser Boden-

bearbeitung mit der Anzahl der Regenwurmindividuen auch die Anzahl von kontinuierlichen Bioporen, die Ober- und Unterboden miteinander verbinden, deutlich erhöht. Auch die mikrobielle Biomasse wird durch den permanenten Pflugverzicht besonders im Oberboden erhöht (van Capelle et al., 2012), so dass Umsetzungsprozesse der organischen Substanz beschleunigt und die Nährstoffverfügbarkeit bzw. -nachlieferung verbessert wird. Mit der fortschreitenden Strukturbildung bei langfristiger Anwendung pflugloser Bearbeitungsverfahren nimmt die Bodenstabilität zu. Wiermann et al. (2000) konnten in ihren Untersuchungen feststellen, dass Lastimpulse durch Befahrungseignisse auf konservierend bearbeiteten Varianten deutlich besser kompensiert, d.h. deutlich geringere plastische Verformungen hervorgerufen wurden. Aber nicht nur der Gesamtboden weist eine höhere Stabilität gegenüber mechanischen Beanspruchungen auf, auch die einzelnen Strukturelemente bzw. Aggregate weisen ein deutlich erhöhtes Kompensationsvermögen im sogenannten Crushing-Test auf, wie Ergebnisse von Mordhorst et al. (2014) belegen. Die Ausführungen zeigen, dass sich pfluglose Bearbeitungsverfahren auf zahlreiche Bodeneigenschaften positiv auswirken, da Strukturierungsprozesse nicht regelmäßig durch tiefgreifende mechanische Eingriffe unterbrochen bzw. verhindert werden. Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen, dass die beschriebenen Entwicklungen und Prozesse zu einer multifunktionalen Bodenstruktur führen, die besonders im Hinblick auf die Entwicklung resilienter Landnutzungssysteme zukünftig noch bedeutsamer wird.

3.2 Methoden zur Beurteilung der Bodenstruktur

Die multifunktionale Bedeutung der Bodenstruktur für das Pflanzenwachstum und andere Umweltdienstleistungen wird mittlerweile durch zahlreiche Forschungsarbeiten (u.a. Görbing, J., 1948; Dexter, 1988; Bronick und Lal, 2005; Ball et al., 2017), der vergangenen Jahrzehnte belegt. Deshalb wurden zahlreiche Methoden zur Beurteilung der Bodenstruktur im Feld oder Labor entwickelt. Hierbei sind Beurteilungsmethoden auf verschiedenen Skalenebenen zu unterscheiden. Peng et al. (2015) unterscheiden in diesem Zusammenhang zwischen der Profilebene, der Ebene eines dem Gesamtboden entnommenen Bodenmonolithen, der Makroaggregatstruktur, der Mikroaggregatstruktur und am Ende der hierarchischen Skalenebenen dem organo-mineralische Komplex. Für all diese verschiedenen Skalenebenen

sind optische Beurteilungsmethoden entwickelt worden, die in den folgenden Kapiteln kurz vorgestellt werden und gleichzeitig als Grundlage für die in diesem Projekt entwickelten Beurteilungsmethode diente. Der technische Aufwand und die erforderlichen für die verschiedenen Diagnosemethoden werden umso größer, je kleiner die beurteilten Struktureinheiten sind. Emmet-Booth et al. (2016) geben allein für die Anwendung von Feldmethoden eine Spanne von im Minimum 10 Minuten und längstens bis zu 3 Stunden an. Bei vermeintlich komplexeren Methoden wie der Röntgentomographie kann es vor allem im Zusammenhang mit der 3D-Bildauswertung unter Umständen mehrere Tage dauern bis ein Ergebnis vorliegt. Die Stärke dieser Verfahren liegt aber darin begründet, dass sich der Porenraum, also der Bereich zwischen den Aggregaten und Organo-Mineral-Komplexen beurteilen und quantifizieren lässt. Das ist mit keiner anderen Methode möglich und erlaubt vor allem die Bewertung von Funktionen wie Gas- und Wasserleitfähigkeit.

3.2.1 Spatendiagnose

Bereits Görbing (1948) hat durch seine umfangreichen Arbeiten zum Garezustand ackerbaulich genutzter Böden festgestellt: „Vollkommen gesunde Böden bilden eine Ausnahme. Der Anteil schwer geschädigter Böden ist beträchtlich. Die meisten Äcker leiden an Garemangel und ein hoher Anteil ist untergrundkrank.“ Auf Grundlage dieser Erkenntnis trug er zahlreiche Merkmale unterschiedlicher Garezustände (= Strukturzustände) zusammen und konzipierte daraus die sogenannte Spatendiagnose. Mit umfassendem Bildmaterial und festgelegter Handlungsanweisungen unter Verwendung spezieller Gerätschaften (u.a. Diagnosespaten nach Görbing, Kratze und Probelöffel) lässt sich der aktuelle Gefügestand des Oberbodens bewerten. Diese grundlegenden Arbeiten von Görbing (1948) wurden durch verschiedene Autoren weiterentwickelt und für bestimmte Anlässe und Standorte angepasst. Durch Hampl und Kussel (1994, zitiert in: Beste, 2002) wurde die Spatendiagnose nach Görbing (1948) um eine Gefügebönetur, einen einfachen Aggregatstabilitätstest, die Zählung der Wurzeldichte im Unterboden mittels Schablone, die Ermittlung der Bodenfeuchte, des Porenvolumens bzw. der Lagerungsdichte mit Hilfe von Stechzylindern sowie durch Messungen des Abscherwiderstands erweitert. Mit diesem Ansatz werden somit optisch wahrnehmbare und qualitativ beurteilte Gefügestände mit bodenphysikalischen Kennwerten kombiniert. Weitere Abwandlungen der Spatendiagnose wurden u.a. durch das LfL (2012) und in Zusammenarbeit von

vTI und GKB (2012) veröffentlicht. Die Autoren dieser Ansätze versuchten die umfangreichen Anforderungen von Görbing (1948) und erweitert durch Hampl und Kusel (1994, zitiert in Beste, 2002) für den Anwender im Feld zu vereinfachen und durch handliche Formate besser anwendbar zu gestalten. Weyer und Boeddinghaus (2016) haben in ihrer Anleitung zur Felddiagnose versucht über Boniturnoten, die im Feld durch verschiedene Diagnosen (u.a. Abschätzung des Makroporenanteils, Verfestigungsgrad, Beurteilung des Wurzelwachstums) erhoben und anschließend unterschiedlich stark gewichtet werden, den Strukturzustand in drei abschließenden Kategorien zu bewerten. Hierbei unterscheiden Sie entsprechend des Ampelschemas zwischen a) „nachhaltige Fruchtbarkeit des Bodens gewährleistet“ (= grün) b) „beginnende bewirtschaftungsbedingte Verdichtung“ (= gelb) und c) „fortgeschrittene Bodenschadverdichtung“ (= rot).

3.2.2 Profilmethode (“Profil Cultural”-Methode)

Die sogenannte “Profil Cultural”-Methode wurde in Frankreich durch Gautronneau und Manichon (1987) erstmalig veröffentlicht. Mit dieser Methode wird der Strukturzustand des Oberbodens, der a) durch Bodenbearbeitungswerkzeuge und b) durch Pflanzenwurzeln und Bodenorganismen stark beeinflusst wird und c) in dem sich die organische Substanz konzentriert, beschrieben. Die Bodenstruktur dieses Bereiches, der in Abhängigkeit zu den oben genannten Kriterien unterschiedlich mächtig sein kann, wird an einer Profilwand, die sich senkrecht zur Bearbeitungsrichtung befindet, beurteilt. Hierbei werden Bodenkompimente sichtbarer Strukturunterschiede durch horizontale und vertikale Markierungen abgegrenzt. Anschließend wird die Anordnung der Kompimente auf einer Breite von bis zu 200 cm zeichnerisch erfasst und die Struktureigenschaften in den einzelnen Kompimenten durch vorgegebene Kriterien beschrieben und in ihrer Ausprägung quantifiziert. Als Struktureigenschaften wird zunächst die Form, Stabilität und Größe der Aggregateinheiten beurteilt bzw. quantifiziert. In einem weiteren Schritt wird zusätzlich die Porosität der einzelnen Bodenkompimente bewertet. Im Ergebnis ergibt sich so ein umfassendes Bild der Struktureigenschaften über ein relativ großes Bodenvolumen und lässt Vergleiche von unterschiedlichen Feldbereichen bzw. Bearbeitungsvarianten über beispielsweise die Flächenanteile schadverdichteter Bodenkompimente zu. Guimaraes et al. (2017) beschreiben diese Methode als besonders geeignet, um

Grenz- und Verdichtungsschichten (u.a. Pflugsohlenverdichtungen) zu identifizieren, aber auch, um den Verlauf bzw. das Ausmaß von Regenerationsprozessen nach Strukturschädigungen bewerten zu können. Das ursprünglich von Gautronneau und Manichon (1987) veröffentlichte Konzept wurde mittlerweile durch zusätzliche Kriterien erweitert (Boizard et al., 2017): a) zusätzliche Porositätseigenschaften, b) zusätzliche Kriterien, um das Ausmaß biologischer Aktivität beschreiben zu können und c) eine zusätzliche Einordnung der maßgeblichen Strukturentwicklung in den separaten Bodenkompartmenten.

3.2.3 VESS = Visual Evaluation of Soil Structure

Die Beurteilung der Oberbodenstruktur von ackerbaulich genutzten Böden in 5 Kategorien geht auf die Methode von Peerlkamp (1959) zurück. Seitdem sind einige Ergänzungen und Präzisierungen dieser Methode vorgenommen worden. Das aktuell auf internationaler Ebene diskutierte und angewendete Bewertungsschema (VESS = Visual Evaluation of Soil Structure) für die Oberbodenstruktur (vgl. Abb. 1) geht auf Ball et al. (2007) zurück. Dieses Schema sieht eine Einordnung des Strukturzustandes in 5 Kategorien vor, wobei die Bewertung 1 für eine optimale Struktur steht und ein stark verdichteter Oberboden mit „Score“ 5 beurteilt wird. Die Methode ist leicht anwendbar bzw. umsetzbar und schnell wiederholbar, so dass der Strukturzustand einer auch größeren Ackerfläche relativ schnell quantifiziert werden kann. In zahlreichen Forschungsvorhaben ist diese Methode deshalb genutzt worden, um die Einwirkungen verschiedener Bodenbewirtschaftungsverfahren (u.a. Bearbeitungssysteme, Landnutzungsänderungen) auf den Strukturzustand zu erfassen (Munkholm und Holden (2015)).

Structure quality	Ease of break up (moist soil)	Size and appearance of aggregates	Visible porosity	Roots	Appearance after break-up: various soils	Appearance after break-up: same soil different tillage	Distinguishing feature
Sq1 Friable (tends to fall off the spade)	Aggregates readily crumble with fingers	Mostly < 6 mm after crumbling	Highly porous	Roots throughout the soil			 Fine aggregates
Sq2 Intact (retained as a block on the spade)	Aggregates easy to break with one hand	A mixture of porous, rounded aggregates from 2-70 mm. No clods present	Most aggregates are porous	Roots throughout the soil			 High aggregate porosity
Sq3 Firm	Not difficult	A mixture of porous aggregates from 2mm -10 cm; less than 30% are <1 cm. Some angular, non-porous aggregates (clods) may be present	Macropores and cracks present. Some porosity within aggregates shown as pores or roots.	Most roots are around aggregates			 Low aggregate porosity
Sq4 Compact	Quite difficult	Mostly large > 10 cm and sub-angular non-porous; horizontal/platy also possible; less than 30% are <7 cm	Few macropores and cracks	All roots are clustered in macropores and around aggregates			 Distinct macropores
Sq5 Very compact	Difficult	Mostly large > 10 cm, very few < 7 cm, angular and non-porous	Very low; macropores may be present; may contain anaerobic zones	Few, if any, restricted to cracks			 Grey-blue colour

Abbildung 1: VESS-Beurteilungsschema nach Ball et al. (2007)

Der Unterboden (= nicht durch regelmäßige Bodenbearbeitungsmaßnahmen beeinflusst) stellt einen bedeutenden Speicher für Wasser-, Nährstoffe und Kohlenstoff dar. Da die Erreichbarkeit und Zugänglichkeit dieses Speichers für den zukünftigen Pflanzenbau im Zuge des Klimawandels immer bedeutsamer wird, werden auch Kenntnisse über den Strukturzustand des Unterbodens zunehmend relevanter. Vor diesem Hintergrund entwickelten Ball et al. (2015) ein Beurteilungsschema für die Unterbodenstruktur, SubVESS genannt. In Anlehnung an das VESS-Schema orientiert sich der Anwender an einem Fließschema, das aus verschiedenen Kriterien aufgebaut ist und in einer abschließenden Kategorisierung (1 = porös, gut zugänglich und 5 = massiv, dicht und strukturlos) endet. Die Aufwendungen für diese Methode sind deutlich größer, da ein Profil (quer zur Bearbeitungs- und Befahrungsrichtung) angelegt werden muss. Anschließend sollten verschiedene Bodenhorizonte identifiziert werden und nach dem oben beschriebenen Schema beurteilt werden. Abschließend ergibt sich ein Tiefenprofil, das Grenz- und Verdichtungsschichten, vergleichbar mit der „Profil Cultural“ Methode (aber mit weniger Detail) erkennen lässt.

3.2.4 Bildanalytische Verfahren

Peng et al. (2015) beschreiben den Aufbau unterschiedenen Skalenebenen. Die der Makro- und Mikroaggregatstruktur sowie der am Ende der hierarchischen Skalenebenen stehende organo-mineralische Komplex lassen sich optisch nur mit Hilfsmitteln wie der Computertomographie oder der mikroskopischen Betrachtung von Dünnschliffen darstellen (Rowell, 1994). Die Methoden zur Ansprache von Bodenstruktur im Feld sind weit verbreitet und mit vergleichsweise geringem Aufwand zu bewerkstelligen. Dies ist bei den beiden optischen Methoden zur Bewertung der Porenstruktur nicht der Fall (Peng et al., 2015, Liu et al, 2022). Anhand der folgenden Unterkapitel werden die beiden Methoden vorgestellt.

3.2.4.1 Mikroskopie

Die mikroskopische Betrachtung von Bodendünnschliffen ist Teil der Bodenmikromorphologie und erfolgt an ungestörten Bodenproben. Die Idee der Mikroskopie von Böden geht mehr als 100 Jahre zurück und befasste sich zunächst mit den Bereichen der Mineralogie (Liu et al., 2022). Neben der Bestimmung von verschiedenen, bodenbildenden Bestandteilen lassen sich hiermit ebenfalls Prozesse visualisieren, die für die Bildung und Umwandlung von Böden im Allgemeinen oder von bestimmten künstlichen oder natürlichen Merkmalen und deren Chronologie verantwortlich sind (Stoops, 2020). Die Mikroskopie von Dünnschliffen wird für Untersuchungen zur Bodengenese, der Klassifizierung oder Bewirtschaftung von Böden herangezogen. Weiterhin wird diese Technik auch in den Bereichen der Archäologie und Paläopedologie angewendet.

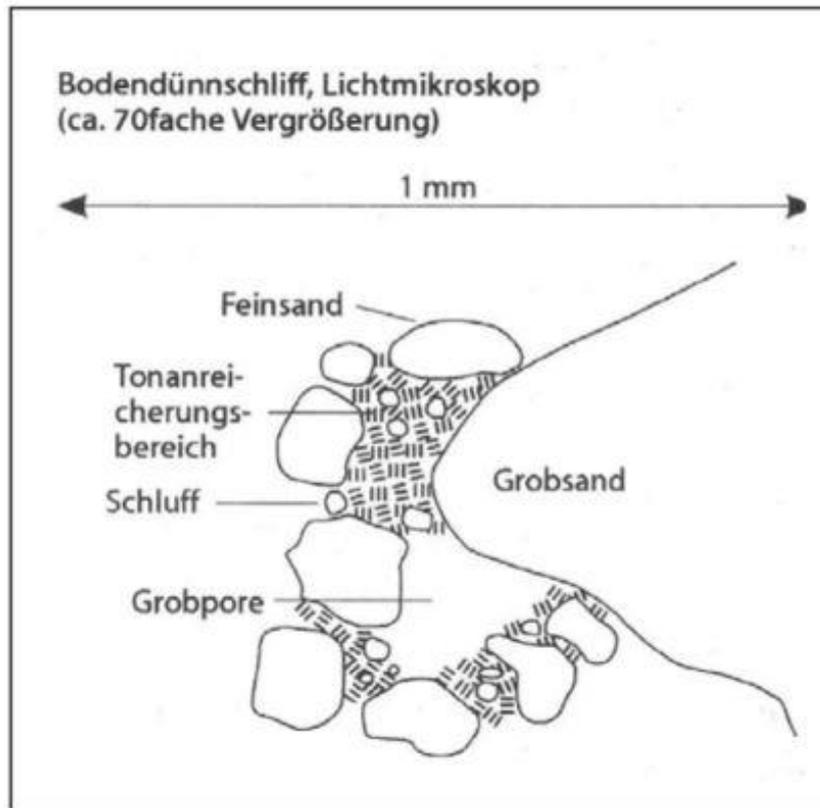


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Mikrogefüges (Rowell, 1994).

Anhand der schematischen Darstellung eines Mikrogefüges (vgl. Abb. 2) nach Rowell (1994) wird die zweitniedrigste Skalenebene, beschrieben von Peng et al. (2015) dargestellt. Die mikroskopische Untersuchung von Dünnschliffen liefert zweidimensionale Darstellungen. Es können somit keine Konnektivitäten oder Leitfähigkeiten aus dieser Analyse berechnet werden. Sehr wohl ist es aber möglich, folgende Kenntnisse aus den Dünnschliffen zu erhalten:

1. Gesamtporenfläche
2. Porendichte (Porenfläche je Einheit)
3. Porengrößenverteilung

Es wird somit eine Verbindung zu Kapazitätsparametern geschaffen, die bereits in unterschiedlicher Intensität in der Literatur beschrieben werden (Virto et al., 2005; Stoops, 2020). Die Innovation dieses Vorhabens liegt in der Bandbreite der grundlegenden bodenkundlichen Untersuchungen mit der Verknüpfung der Bildanalytik.

3.2.4.2 Computertomographische Verfahren

Computertomographische Verfahren können zur Untersuchung der Bodenstruktur eingesetzt werden, indem sie detaillierte 3D-Bilder der inneren Struktur des Bodens liefern (Taina et al., 2008). In diesem Kapitel geht es ausschließlich um die Computertomographie (CT) die auf Röntgenstrahlen basiert. Die Röntgenstrahlen werden durch eine Röntgenröhre erzeugt und durch den Boden gesendet. Abhängig der Strahlungsenergie durchdringen sie den Bodenkörper (z.B. eine ungestörte Bodenprobe) und werden von den verschiedenen Materialien im Boden unterschiedlich stark absorbiert. Die Absorption der Röntgenstrahlen hängt maßgeblich von der Dichte ab, und somit von der Zusammensetzung der Materialien im Boden. Materialien mit höherer Dichte (z.B. Eisenoxide) absorbieren Röntgenstrahlen stärker als Materialien mit geringerer Dichte (z.B. organische Substanz). Die nicht-absorbierten Röntgenstrahlen werden von einem Detektor auf der anderen Seite des Bodenkörpers gemessen, wo ein 2D Bild entsteht (Tomogramm). Durch die Drehung der Probe werden mehrere Tomogramme aus i.d.R. 800-1600 unterschiedlichen Winkeln erzeugt, die zusammen zu 3D-Bilder der Bodenzusammensetzung (oder auch Bodenstruktur) rekonstruiert werden können (Pagenkemper et al., 2013). CT-Scans zeigen also welche Materialien im Boden vorhanden sind und wie sie im Boden verteilt sind. Vor allem gelingt die Visualisierung der vorhandenen Phasen sehr gut wie z.B. die Verteilung von Poren, Bodenwasser und Mineralphase (Pot et al. 2015, Pessoa et al. 2023). Damit eignet sich das Verfahren besonders gut, um die Bodenstruktur zu charakterisieren wie z.B. ob der Boden homogen oder heterogen ist und ob es Schichtungen gibt (Pagenkemper et al., 2014). Des Weiteren kann man die Porengrößenverteilung im Boden messen und Funktionsparameter wie Konnektivität und Tortuosität der Poren ermitteln (Zúñiga et al. (2019), Lucas et al. (2021)). Darüber hinaus wird häufig angestrebt weitere Parameter mittels CT zu quantifizieren wie z.B. die 3D-Verteilung von organischer Substanz (Peth et al., 2014; Arai et al., 2019), oder Eisenoxide wie Jarosit (Pohl et al., 2021), sowie die Charakterisierung der biogeochemischen Schnittstellen wie z.B. das Redoxpotential und mikrobiologisches Millieu (Dorau et al., 2022; Uteau et al., 2022).

3.3 Bodenstruktur und Nährstoffeffizienz

Wie in Kapitel 4.1.4 bereits dargelegt, werden agronomische Maßnahmen (u.a. Düngung, Bodenbearbeitung, Sortenwahl) einerseits durch die Bodenstruktur transformiert. Andererseits wird aber auch die Bodenstruktur durch diese Maßnahmen modifiziert. Das Pflanzenwachstum und damit auch der Ertrag sind deshalb direkt, aber auch indirekt von diesen Bewirtschaftungseingriffen abhängig (Chan, 2011). Im Hinblick auf einen Zusammenhang zwischen Nährstoffeffizienz und Bodenstruktur sind organische und mineralische Düngungsmaßnahmen besonders bedeutsam: zum einen wird die Nährstoffkonzentration der Bodenlösung und auch die Beladung der Austauscher direkt beeinflusst. Für den erforderlichen Nährstofftransport an die Wurzel und die Nährstoffaufnahme ist die Funktionalität der Bodenstruktur maßgeblich. Eine ausreichende und gleichmäßige Nährstoffversorgung kann nur dann gewährleistet werden, wenn ein kontinuierliches Porensystem, das durch eine ausgewogene Porengrößenverteilung gekennzeichnet ist, und eine gute Erreichbarkeit sämtlicher Bodenkompartimente sowie Austauscheroberflächen vorliegt. Dies gilt besonders für den Bereich der Rhizosphäre, die einen bedeutenden Hot-Spot der biologischen Aktivität darstellt (Kuzyakov & Blagodatskaya, 2015.) Durch Wurzelexsudate und dem Boden über organische Düngungsmaßnahmen (u.a. Wirtschaftsdünger, Erntereste, Zwischenfrüchte) zugeführte organische Verbindungen kommt es in diesem Bereich zu einer gegenüber anderen Bereichen des Bodens deutlich erhöhten mikrobiologischen Aktivität. Diese Um- und Zersetzungsprozesse unterstützen ihrerseits wiederum die Strukturierung, so dass besonders organische Düngungsmaßnahmen einen direkten und indirekten Einfluss auf die Nährstoffeffizienz ausüben.

Die Bedeutung der Bodenstruktur im Hinblick auf das Ertragsgeschehen wird in Überlegungen von McKenzie et al. (2015) deutlich: Sie stellen fest, dass Maßnahmen zur Verbesserung der Bodenstruktur, vor allen Dingen Kenntnisse über den aktuellen Strukturzustand, einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung des sogenannten „Yield Gaps“ leisten können. Die Annäherung vom aktuellen an das potenziell mögliche Ertragsniveau eines Standortes ist also immer auch eine Frage des Bodenstrukturzustandes. Sicherlich ist auf vielen Standorten die Niederschlagsmenge der begrenzende Wachstumsfaktor, so dass French und Schultz (1984) sowie Bowman und Scott (2009) eine klare Beziehung zwischen nutzbarem Wasser

und der Ertragshöhe feststellen konnten. McKenzie et al. (2015) fokussieren in diesem Zusammenhang, dass eben die Wasser- und damit auch die Nährstoffverfügbarkeit/-speicherbarkeit im hohen Maße durch die Bodenstruktur beeinflusst wird. Eine solche Beziehung zwischen Ertragsleistung und Bodenstruktureigenschaften wurde von Müller et al. (2009) gezeigt: Sie konnten eine signifikant positive Korrelation zwischen Qualität der Bodenstruktur, bewertet mit der Peerlkamp Methode (1958), und der Ertragsleistung von Mais- und Weizenbeständen nachweisen. Müller et al. (2007) entwickelten in diesem Zusammenhang den sogenannten Müncheberger Bodenqualitätsindex (Müncheberg Soil Quality Rating = MSQR). In diesen Indikator fließen neben einer Bewertung des Bodenstrukturzustandes auch Standort- und Klimaeigenschaften wie Durchwurzelungstiefe, verfügbare Wassermenge im Profil, Bodenart, Neigung und Relief, die unterschiedlich gewichtet werden, ein. Zusätzlich werden standortspezifische Gefahrenpotenziale (u.a. Trockenheit, Versalzung, Versauerung und Überflutung) bei der Berechnung des Müncheberger Bodenqualitätsindex berücksichtigt. Müller et al. (2013) konnten unter Verwendung dieses Indikators eine enge Beziehung zwischen Ertragsleistung und Bodenqualität zeigen. Diese Beziehung ist Ihren Untersuchungen zu Folge auf intensiv genutzten Standorten (Stickstoffdüngung > 100 kg N/ha) mit einer Exponentialfunktion zu beschreiben. Das bedeutet, dass die Nährstoffeffizienz besonders in intensiv geführten Ackerbausystemen im hohen Maße durch die Bodenqualitätseigenschaften beeinflusst wird. Kurz: je schlechter die Bodenstruktureigenschaften, desto schlechter die Transformationseigenschaften des Bodens, desto weniger Nährstoffe können von der Pflanze aufgenommen werden und desto höher ist die Gefahr für negative Umweltwirkungen.

3.4 Zielsetzungen des Forschungsvorhabens

Die bisherigen Ausführungen haben die Bedeutung der Bodenstruktur im Hinblick auf die Ertragsbildung von Kulturpflanzen aufgezeigt. Insbesondere die Nährstoffeffizienz wird grundlegend durch die Qualität der physikalischen, chemischen und biologischen Bodeneigenschaften, die in ihrer Gesamtheit als Bodenfruchtbarkeit definiert sind (Scheffer und Schachtschabel, 1952) und ihrerseits direkt sowie indirekt von der Bodenstruktur abhängen, determiniert. Für den Flächenbewirtschafter sind also möglichst detaillierte Informationen über die Gefügeeigenschaften des

Ober- und Unterbodens von hoher Relevanz. Hierfür sind in der Vergangenheit zahlreiche Bewertungsmethoden (u.a. Ball et al., 2007) auf Grundlage unterschiedlicher Merkmale entwickelt worden. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass diese Beurteilungssysteme teilweise eine hohe Korrelation besonders zwischen physikalischen Bodeneigenschaften (u.a. Johannes et al., 2017) und der Ertragsleistung (u.a. Müller et al., 2013) aufweisen. Allerdings fehlt es bisher an speziell auf Ackerstandorte Norddeutschlands abgestimmte Untersuchungen. In der praktischen Anwendung hat sich immer wieder gezeigt, dass die vorhandenen Bewertungsmethoden für eine erste Einschätzung der Bodenstruktur oder auch der Bodenfruchtbarkeit geeignet sind, aber notwendige Differenzierungen unter Berücksichtigung von u.a. geogenen und pedogenen Besonderheiten norddeutscher Standorte jedoch nicht möglich sind. Aus diesem Grund soll mit diesem Forschungsvorhaben ein auf diese Besonderheiten abgestimmtes Bewertungstool für die Bodenstruktur entwickelt werden. Hierfür wurde folgender Forschungsansatz gewählt: a) Auswahl repräsentativer Ackerstandorte für Schleswig-Holstein, b) Gefügebeurteilung mit Spatendiagnose/VESS im Feld, c) Entnahmen von ungestörten Bodenproben, d) Bestimmung von Funktionsparametern im Labor und bildgebende Verfahren um die Morphologie und Topologie des Porenraums zu beschreiben und schließlich e) Regressionsanalysen zwischen verschiedenen Funktions- und Strukturparametern sowie dem Ertrag. Insgesamt steht also ein Datensatz unterschiedlicher, die Bodenfruchtbarkeit charakterisierender Parameter zur Verfügung, so dass Korrelationen zwischen einzelnen Bodeneigenschaften, der Ertragsleistung und den bildanalytischen Merkmalen berechnet werden können. Dieser bisher noch nicht in der Literatur dokumentierte innovative Ansatz, der in Abbildung 3 schematisch dargestellt ist, ermöglicht die Weiterentwicklung bzw. Präzisierung vorhandener Methoden zur Beurteilung der Bodenstruktur. Ziel ist also die Entwicklung eines für norddeutsche Standortverhältnisse angepassten Strukturbeurteilungsschemata (= Fieldtool).

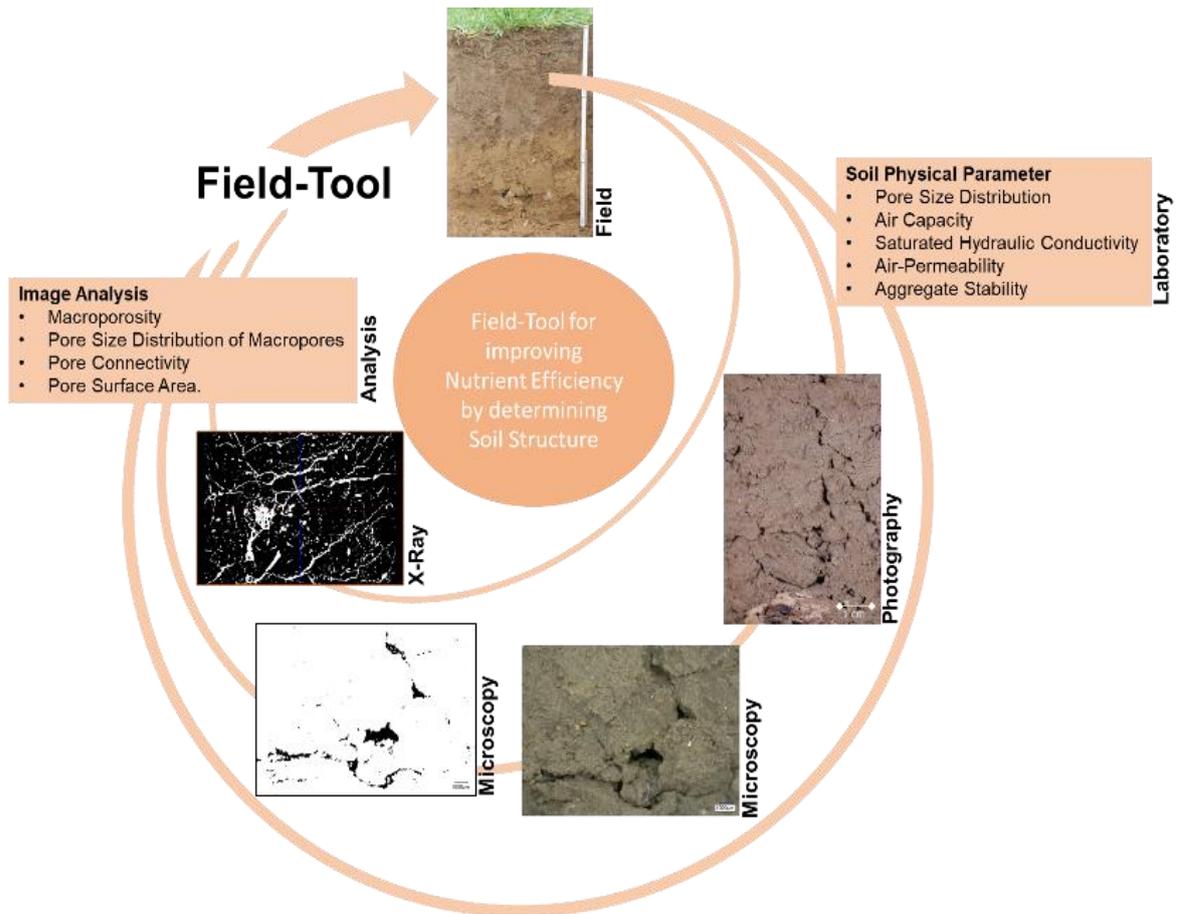


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Grundkonzeption des Forschungsvorhabens.

4 Material und Methoden

4.1 Standorte

Das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) führt seit Anfang der 1970er Jahre bodenphysikalische Untersuchungen an ungestörten Proben (Stechzylinderproben) durch. An diesen Proben werden neben der Trockenroh-dichte sowohl die gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf-Werte) als auch die Kennwerte der Wasserbindung (pF-Werte) ermittelt. Diese Untersuchungen finden im Rahmen von diversen Projekten statt, wovon die bodenkundliche Landesaufnahme das Be-deutendste ist. Für die meisten der über 1.000 Leitprofile der bodenkundlichen Lan-desaufnahme liegen die Ergebnisse von bodenphysikalischen Laboruntersuchun-gen im Fachinformationssystem Boden (FISBO) des LLUR vor. Daneben werden im FISBO auch bodenphysikalische Messwerte aus anderen Projekten gespeichert.

Aus diesen Standorten erfolgte die Aufstockung der gesetzten BDF-Standorte auf die Gesamtzahl von 45 Standorten (vgl. Abb. 4). Der Auswahl liegen folgende Kri-terien zu Grunde:

- Einbeziehung aller Acker-BDF außer BDF 24 (Nutzung und Bewirt-schaftung untypisch)
- Verteilung über die Hauptnaturräume Schleswig-Holsteins entspre-chend der Anteile der bezeichnenden Bodentypen der Hauptnatur-räume an der Landesfläche unter Berücksichtigung der Ackeranteile an der Landnutzung:
 - Östliches Hügelland (ÖH):
 - 6 x Pseudogley-Parabraunerde (SS-LL)
 - 3 x Pseudogley (SS)
 - 1 x Braunerde-Pseudogley (BB-SS)
 - 3 x Kolluvisol (YK) (diverse Kolluvisol-Subtypen)
 - 3 x Parabraunerde (LL)
 - 3 x Braunerde (BB)
 - Vorgeest (VG):

- 2 x Gley-Podsol (GG-PP)
- 1 x Podsol (PP)
- 1 x Braunerde-Podsol (BB-PP)
- 3 x Braunerde (BB)
- Hohe Geest (HG):
 - 1 x Pseudogley (SS)
 - 1 x Pseudogley-Parabraunerde (SS-LL)
 - 2 x Pseudogley-Podsol (SS-PP)
 - 3 x Pseudogley-Braunerde (SS-BB)
 - 3 x Braunerde (BB)
 - 2 x Braunerde-Podsol (BB-PP)
- Marsch (MA):
 - 4 x Kalkmarsch (MCn)
 - 2 x Kleimarsch (MNn)
 - 1 x Dwogmarsch (MDn)
- Auffüllen der nicht durch Acker-BDF abgedeckten Fälle unter Berücksichtigung von Bodentyp und Hauptnaturraum nach folgenden Kriterien:
 - Nutzung zum Zeitpunkt der Aufnahme: Acker
 - Bodenphysik-Daten im FISBO enthalten
 - Differenzierung nach typischen (Ober-)Bodenarten
 - Verteilung über die Landesfläche
 - Alter der Untersuchung (Priorität auf die Zeit nach 1989)

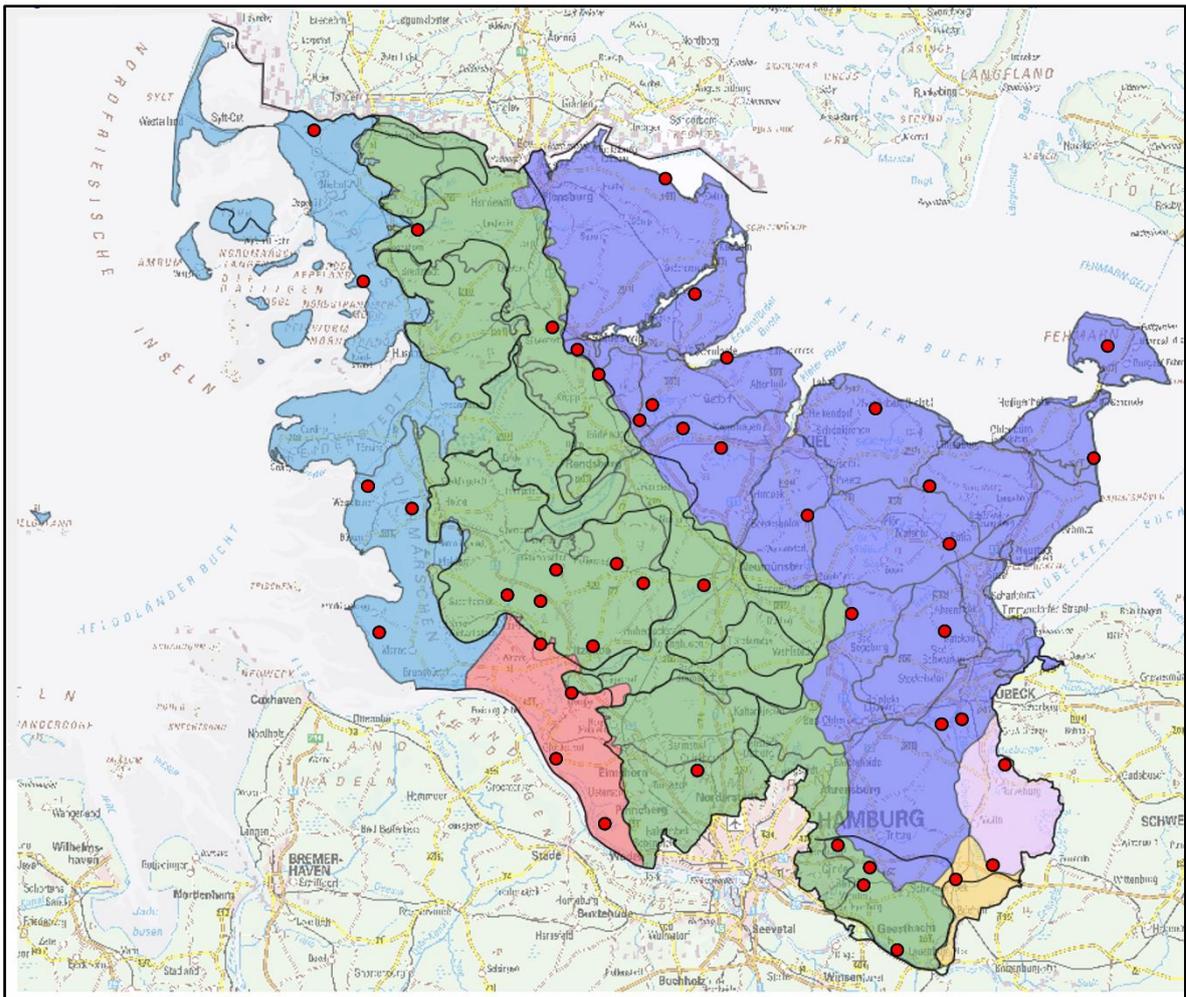


Abbildung 4: Übersichtskarte der für das DBU-Projekt untersuchten Standorte (verändert nach LLUR, 2021).

Mit der abgeschlossenen Probennahme verteilen sich die Standorte wie folgt auf die schleswig-holsteinischen Naturräume:

- Östl. Hügelland: 19
- Vorgeest: 7
- Hohe Geest: 12
- Marsch: 7

4.2 Bodenuntersuchungen

Die Bodenuntersuchungen, welche im Folgenden beschrieben werden, wurden für alle beprobten Standorte durchgeführt. Anhand der Ergebnisse lassen sich zunächst alleinstehende Merkmale der jeweiligen Probe, der untersuchten Horizonte aber auch der Standorte selbst identifizieren. Ein Teil der Eigenschaften wird im Rahmen der Bodengenese festgelegt, andere unterliegen Veränderungen, die durch anthropogene Einflüsse bestimmt werden.

4.2.1 Chemische Bodenuntersuchung

Zu den chemischen Bodenuntersuchungen zählen die Messung des pH-Wertes sowie die Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes der Ackerböden. Die Untersuchungen erfolgten an gestörtem Bodenmaterial.

- pH-Wert: Dieser Wert beschreibt den Säuregrad des Bodens. Gemessen wird dies anhand des Gehaltes an H^+ -Ionen im Boden. Die Messung wird an feldfrischem Bodenmaterial durchgeführt, welcher mit einer 0,01 molaren $CaCl_2$ -Lösung versetzt wird. Die Messung des pH-Wertes erfolgt anschließend elektrochemisch mit einer pH-Elektrode (Blume et al., 2011).
- Kohlenstoffgehalt: Die Messung des Kohlenstoffgehaltes erfolgt an getrocknetem Bodenmaterial. Die Messung ist für die Festlegung des Humusgehaltes bedeutsam, da sich dieser nicht direkt bestimmen lässt. Lediglich über den Kohlenstoffgehalt, welcher 58% des Humus ausmacht, ist Rückschluss auf den Humusgehalt möglich. Über die Verbrennung des Bodenmaterials und die anschließende CO_2 -Detektion wird der Kohlenstoffgehalt bestimmt (Blume et al., 2011).

4.2.2 Physikalische Bodenuntersuchungen

Für die 45 Standorte wurden für die 3 Tiefen (Oberboden, Krumenbasis, Unterboden) sowohl die Porengrößenverteilung als auch die gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) gemessen. Dazu wurden ungestörte Stechzylinderproben (100 cm^3) zur Bestimmung der kf (in vertikaler Richtung (n=5) und horizontaler Richtung (n=5)) sowie der Porengrößenverteilung (pF/WG, n=5) und Trockenrohddichte entnommen und im Labor untersucht:

- Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f [cm/d]): Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit wird mit einem Haubenpermeameter nach dem instationären Verfahren bzw. in Anlehnung daran bestimmt (De Boodt, 1967, in Hartge und Horn, 2009; DIN 19683).
- Wasserspannungskurve / Porengrößenverteilung: Die Wasserretentionsfunktionen pF/WG ungestörter Bodenproben werden mittels definierter Entwässerungsstufen -60, und -300 hPa auf keramischen Platten und in einem Drucktopf (Überdruck +15000 hPa) bestimmt (Hartge und Horn, 2009; DIN ISO 11274).
- Trockenrohddichte (ρ_t [g/cm³]): Die Bestimmung der Trockenrohddichte des Bodens erfolgt mittels Gravimetrie an Stechzylinderproben. Bestimmt wird der Quotient aus der nach Trocknung der Proben durch Wägung ermittelten Masse der Proben und ihrem Volumen (Hartge und Horn, 2009; DIN ISO 11272). Die effektive Lagerungsdichte wird aus der Trockenrohddichte und dem Tongehalt ermittelt (Ad-Hoc AG Boden, 2005)

4.3 Untersuchungen zur Aggregatstabilität:

Die Aggregatstabilität wurde mit zwei unterschiedlichen Methoden untersucht, die die Stabilität gegenüber der Einwirkung von Wasser (Nasssiebung) und mechanischer Belastungen (Crushing-Test) charakterisiert. Zu den hydraulischen Einwirkungen gehören beispielsweise Regentropfenschlag, Wasserfluss oder Verschlammung. Mechanische Belastungen können bei der Bodenbearbeitung durch die Werkzeug-Boden-Interaktion oder bei Befahrung durch den Bodendruck entstehen. Bei der Nasssiebung nach KEMPER und ROSENAU (1986) wird die dynamische Stabilität untersucht. Durch die Einwirkung von Wasser lässt sich die Verschlammungsneigung bzw. Disaggregierungsneigung der Aggregate messen. Für die Nasssiebung wird ein Siebturm mit den Siebdurchmessern 0,25 – 0,5 – 1 – 2 – 4 und 8 mm übereinandergestapelt und lufttrockene Bodenaggregate 8–16 mm mit einer Gesamtmasse von ca. 20 g in dem obersten Sieb gelegt und für 30 Minuten mit Leitungswasser kapillar aufgesättigt. Anschließend wird der Siebturm mit den Aggregaten mit einem Tauchexzenter für 10 Minuten langsam bei einer standardisierten Geschwindigkeit in einem Wasserbad auf- und abgetaucht. Nach dieser Zeit hat sich eine stabile Aggregatgrößenverteilung eingestellt. Die Mengen der verschiedenen Größenfraktionen werden anschließend im Trockenschrank getrocknet und gewogen. Aus den Gewichten der einzelnen Aggregatfraktionen lassen sich

Indizes wie der sogenannte Mean Weight Diameter (MWD) berechnen, der die mittlere Aggregatgröße wasserstabiler Aggregate darstellt. Je größer der MWD, desto stabiler sind die Aggregate gegenüber Wassereinwirkung und desto geringer ist z.B. die Verschlammungsneigung (vgl. Tab. 1). Da insbesondere bei sandigen Standorten auch mineralische Festpartikel in den Sieben aufgefangen werden, wurde der MWD um die Sandfraktion korrigiert.

Tabelle 1: Richtwerte zur Bewertung der mittleren gewichteten Durchmesser bei Nasssiebverfahren (adaptiert von DIN EN-ISO 10930).

Mittlerer gewichteter Durchmesser MWD (mm)	Bewertung
<1,1	Sehr instabil
1,1–1,8	Instabil
1,8–2,5	Mäßig stabil
2,5–3,4	Stabil
>3,4	Sehr stabil

Des Weiteren wurden auch sog. Crushing-Tests nach der Methode von Dexter und Kroesbergen (1985) durchgeführt. Bei dieser Messung wird die Widerstandskraft luftgetrockneter Aggregate gegenüber statischer Belastung in einem Lastrahmen geprüft. Für die Methode werden Aggregate dreier Größenklassen herangezogen (2-4 mm, 4-8 mm und 8-16 mm). Aus der Messung wird eine Zugfestigkeit (Tensile Strength) berechnet die der Charakterisierung der Bodenstabilität bei Einwirkung gerichteter Drücke dienen. Sie sind somit ein Maß für die Bodenstrukturstabilität gegenüber mechanischen Auflasten, wie sie bei Befahrung durch Maschinen auftreten. Es wurden je Aggregatgrößenklasse mindestens 30 Replikate gemessen.

4.4 Mikroskopie

Für die Erstellung der Dünnschliffe wurden ungestörte Bodenproben aus den Profilen der untersuchten Standorte (vgl. Kap. 4.1) herangezogen. Für die Mikroskopie erfolgte die Entnahme von Proben aus dem Oberboden (8-15 cm) und aus dem Bereich der Krumbasis in vertikaler Richtung. Die Probennahme wurde mit Stechschienen, die Fitzpatrick (1993) nachempfunden sind, durchgeführt. Die Herstellung

der Dünnschliffe erfolgt auf Grundlage der Verfahren von Murphy (1986) und Fitzpatrick (1993). Hierbei wird das Bodenmaterial nach einem Wasseraustausch mit Aceton, der zwischen einem und sechs Monate in Anspruch nimmt, mit einem Epoxidharz ausgegossen. Dadurch wird die natürliche Lagerung des Bodens konserviert und eine nachträgliche Schädigung des Gefüges durch den mechanischen Bearbeitungsprozess ist ausgeschlossen. Für die spätere Analyse des Dünnschliffs ist bei der Auswahl des Harzes nicht nur auf ein besonders dünnflüssiges und langsam härtendes Harz zu achten, auch der relative Brechungsindex muss berücksichtigt werden, da dieser in der späteren Analyse die Intensitätswerte der Pixel beeinflussen kann. Nach Fitzpatrick (1993) ist ein Brechungsindex von 1,54 anzustreben.

Die Probe, bestehend aus Bodenmaterial und Epoxidharz, durchläuft während der Bearbeitung mehrere Schnitt- und Schleifprozesse. Dabei werden zunächst die Ränder der Probe abgetrennt, um Artefakte, die im Rahmen der Probennahme entstehen, zu entfernen. Anschließend wird die Probe mittig aufgeschnitten und mit Epoxidharz auf einem Objektträger (28 mm x 48 mm) verklebt. Anschließend erfolgen weitere Schleif- und Polierprozesse, bis die angestrebte Dicke von 30 µm erreicht ist.

Sämtliche Dünnschliffe wurden nach dem Bearbeitungsprozess unter der Zuhilfenahme des KEYENCE VHX-2000 Digitalmikroskops mit dem Zoomobjektiv VH-Z20R/Z20T untersucht. Das Mikroskop verfügt über eine Software, die einzelne Bilder zusammensetzen kann. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, Dünnschliffe auch bei einer 50-fachen Vergrößerung in einem einzigen Bild darzustellen und trotzdem den genauen Einblick in das Mikrogefüge beizubehalten. Ein einzelnes, zusammengefügtes Bild besteht aus 56 Einzelbildern. Für die spätere Porenflächenanalyse der Dünnschliffe wurden drei separate, zusammengesetzte Bilder erzeugt:

1. unpolarisierte Aufnahme,
2. polarisierte Aufnahme,
3. polarisierte Aufnahme nach 60° Drehung.

Die Porenflächenanalyse erfolgt anhand der drei Bilder, die von jedem Dünnschliff erzeugt wurden. Die Aufnahmen werden übereinandergelegt und anschließend mit der Bildanalysesoftware ImageJ (Version 1.54b) ausgewertet. In der zweidimensionalen Bildanalyse werden die Unterschiede der einzelnen Pixel zueinander herausgearbeitet. Ein Bild aus Graustufen enthält 256 Intensitätswerte. Die Differenzierung

innerhalb der Aufnahme erfolgt auf Basis der verschiedenen Intensitätswerte. Weiterhin wird die Pixelkantenlänge anhand der Skala ermittelt, die das Digitalmikroskop nach vorheriger Kalibrierung berechnet. Mit Kenntnis der Größeneinheiten können die Porenflächen nicht nur anteilig bestimmt, sondern auch in Kategorien eingeteilt und mit anderen Ergebnissen verglichen werden.

In der Literatur sind mehrere Verfahren beschrieben, anhand derer die Untersuchung von Dünnschliffen für die verschiedenen Disziplinen erfolgen kann (Baveye et al., 2010; Berrezueta et al., 2016; Costantini et al., 2018; Ismail, 1975; Stoops, 2020). Unter Abwägung der verschiedenen Methoden haben sich insbesondere auf Grund der organischen Substanz deutliche Ungenauigkeiten bei der Segmentierung von Porenflächen zu Bodenmatrix ergeben.

Sowohl Porenflächen als auch organische Substanz sind in der Polarisationsmikroskopie mit niedrigen Intensitätswerten der Pixel (dunkle Farbe) dargestellt. Um eine korrekte Abgrenzung der Porenräume zu Bodenmineralen und organischer Substanz zu ermöglichen, ist es erforderlich, die Intensitätswerte der ihnen zugeordneten Pixel zu kennen. Ausgangspunkt bilden auch hier die Aufnahmen linear polarisierter Dünnschliffe. Es können Bereiche, in denen sich organisches Material befindet/eingebaut ist, identifiziert werden. Durch den Abgleich mit den polarisierten Aufnahmen lassen sich die Intensitätswerte der Pixel aus den jeweiligen Bereichen bestimmen.

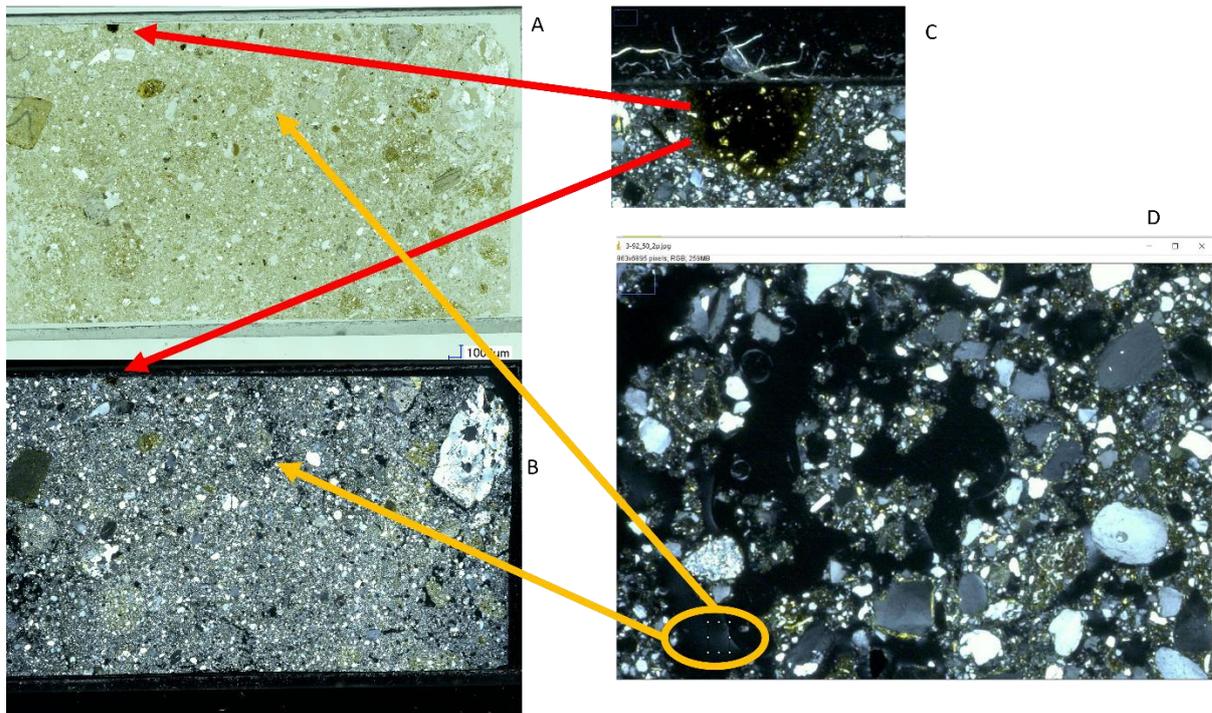


Abbildung 5: Darstellung ausgewählter Porenflächen und Bereiche organischer Substanz eines Dünnschliffs. A= linear polarisiertes Bild, B= Bild A unter Kreuzpolarisation, C= Bereich mit hohem Anteil organischer Substanz mit dem Verweis (rot) auf Bild A und B, D= Bereichsauswahl einer Porenfläche mit hellen Reflektionen mit dem dazugehörigen Verweis (gelb).

Nach Baveye et al. (2010) kann die manuelle Segmentierung zu einer großen Streuung führen, wenn diese wiederholt oder von verschiedenen Personen durchgeführt wird. Aus diesem Grund erfolgt die Segmentierung erst nach der Bestimmung von Intensitätswerten der organischen Substanz sowie der Porenflächen. Durch die Polarisationsmikroskopie war es möglich aufgrund der Grauwerte falsch als Porenraum klassifizierte Bildbereiche (z.B. org. Substanz, transparente Minerale) zu identifizieren und die Segmentierung entsprechend zu korrigieren

Neben der Differenzierung zwischen Bodenmatrix und Porenfläche wurden die Ergebnisse der Porenflächenanalyse weiterhin in Größenklassen unterteilt. Hierzu wurden drei weitere Bilder eines jeden Dünnschliffs erstellt, die über eine Maßstabsangabe verfügen. Anhand dieser Maßstabsangabe ist es möglich, die Größe eines Pixels zu ermitteln. Da Bilder mit der Maßstabsangabe lediglich mit einer Auflösung von 6.100 x 4.300 ausgegeben werden, war es erforderlich, zunächst die Bilder mit der Maßstabsangabe zu analysieren und die daraus gewonnenen Daten auf die Bilder ohne Maßstabsangabe zu übertragen.

Bilder ohne Maßstabsangabe haben eine Auflösung von $\sim 10.500 \times 6.500$ Pixel. Damit ist die Auflösung bei diesen Bildern um das Dreifache höher. Ziel dieser intensiven Untersuchung ist, eine möglichst präzise Identifikation von Poren bis zu einer Größe von $10 \mu\text{m}$ durchzuführen, welches den engen Grobporenraum entspricht. Anhand der daraus gewonnenen Informationen ist ein Abgleich zu einem Teil der Daten möglich, die anhand der pf/WG-Analyse erhoben wurden.

4.5 Computertomographie

In allen drei Probennahmetiefen der einzelnen Standorte wurden ungestörte Bodenproben in speziellen Kunststoffzylindern (100 cm^3), die mit einer Hülse eingeschlagen werden, entnommen. Die Proben Computer Tomographie System (Phoenix-Xray, Waygate Technologies) gescannt. Die Auflösung eines Voxels liegt bei $50 \mu\text{m}$.

Die Bilddaten wurden mit ToolIP® segmentiert und anschließend auf ihre morphologischen und topologischen Eigenschaften hin analysiert. Vor der Segmentierung wurden die Tomogramme zunächst mittels 3D-Medianfilter bearbeitet, um Bildrauschen zu entfernen. Die Segmentierung erfolgte über ein automatisiertes Thresholding-Verfahren nach Otsu (1979). Der Grenzwert für die Grauwerte, die Porenvoxel von Festphasevoxeln trennen wird dabei durch eine Varianzanalyse vom Algorithmus selbst bestimmt, so dass kein systematischer Fehler (bias) durch die Grenzwertwahl entsteht. Die Methode ist vielfach an ähnlichen Bilddatensätzen erprobt und liefert eine robuste Klassifikation von Porenraum und Bodenmatrix. Aus den segmentierten 3D-Bilddatensätzen wurden Kapazitätsparameter wie Makroporosität, Volumen der größten zusammenhängenden Pore und das Verhältnis der größten Pore zum Makroporenvolumen errechnet. Dazu wurden auch Intensitätsparameter wie die Porenkonnektivität (Euler-Poincaré Charakteristik) der größten Pore und der Gesamtprobe quantifiziert. Negativere Eulerzahlen deuten auf komplexere Porenetzwerke mit höherer Porenkonnektivität hin. Im Gegensatz dazu, deuten höhere (positivere) Eulerzahlen auf eine erhöhte Menge an isolierten Poren hin. Porenräume unterhalb der Auflösungsgrenze von $50 \mu\text{m}$ Porendurchmesser können mit diesem Verfahren bei der gewählten Porengröße nicht erfasst werden. Da es sich dabei aber eher um primäre, d.h. texturbedingte Porenräume handelt, und der Grobporenraum ($> 50 \mu\text{m}$ Porendurchmesser) vor allem zu den Strukturporen

gehört, lassen sich hierrüber sehr gut die Porenräume, die durch bodeninterne Strukturierungsprozesse bedingt sind, charakterisieren.

4.6 Ertragserhebungen

Damit Auswirkungen von der Bodenstruktur bzw. Bodenfruchtbarkeit quantifiziert werden können, erfolgte in Absprache mit den Landwirten eine Ertragserhebung. Die Beerntung erfolgte durch Handproben. An jedem Standort wurden in Verbindung mit den bodenkundlich aufgenommenen Profilgruben, Pflanzenproben in fünf-facher Wiederholung (jeweils 2 Saatzeilen à 1 m) entnommen, getrocknet, aufbereitet, vermahlen und anschließend durch Nahinfrarotspektroskopische (NIRS) Untersuchungen auf ihre Inhaltsstoffe untersucht. Die Bestimmung der Inhaltsstoffe ist notwendig, damit die aufgenommenen Nährstoffmengen bestimmt werden können. Ungeachtet jahresbedingter Effekte wird der Vergleich mit den Landessortenversuchen (LSV) der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein ermöglicht. Die LSV repräsentieren in diesem Zusammenhang den Ertrag, der durch eine ausgeprägte Struktur erreicht werden kann.

4.7 Statistik

Zur Auswertung und Interpretation wurden statistische Methoden herangezogen. Hierunter fallen F- und T-Tests, Korrelationen und Regressionen sowie Tests auf Signifikanzen. Zur Datenanalyse wurden die Programme Excel, OriginPro 2022 (Version 9.9.0.220) sowie RStudio (Version 4.1.0.) herangezogen.

5 Ergebnisse

Die Ergebnisse für die Feld- und Laboruntersuchungen sind im Anhang (Tabellen 5 – 21) zusammenfassend dargestellt. Ergänzt werden diese Tabellen durch eine Auswahl des umfangreichen Fotomaterials (u.a. Profilaufnahmen, Detailaufnahmen, Strukturaufnahmen) (vgl. Tab. 21 – 67).

5.1 VESS

Im Rahmen der Probenahme in den Jahren 2019 bis 2021 wurden auf sämtlichen Standorten Spatendiagnosen und eine Strukturbeurteilung unter Verwendung des Beurteilungsschemas nach Ball et al. (2007) durchgeführt. Die Abbildungen 6 und 7 zeigen zusammenfassend die Ergebnisse, gruppiert nach Naturräumen (Abb. 6) und Tongehalt (Abb. 7).

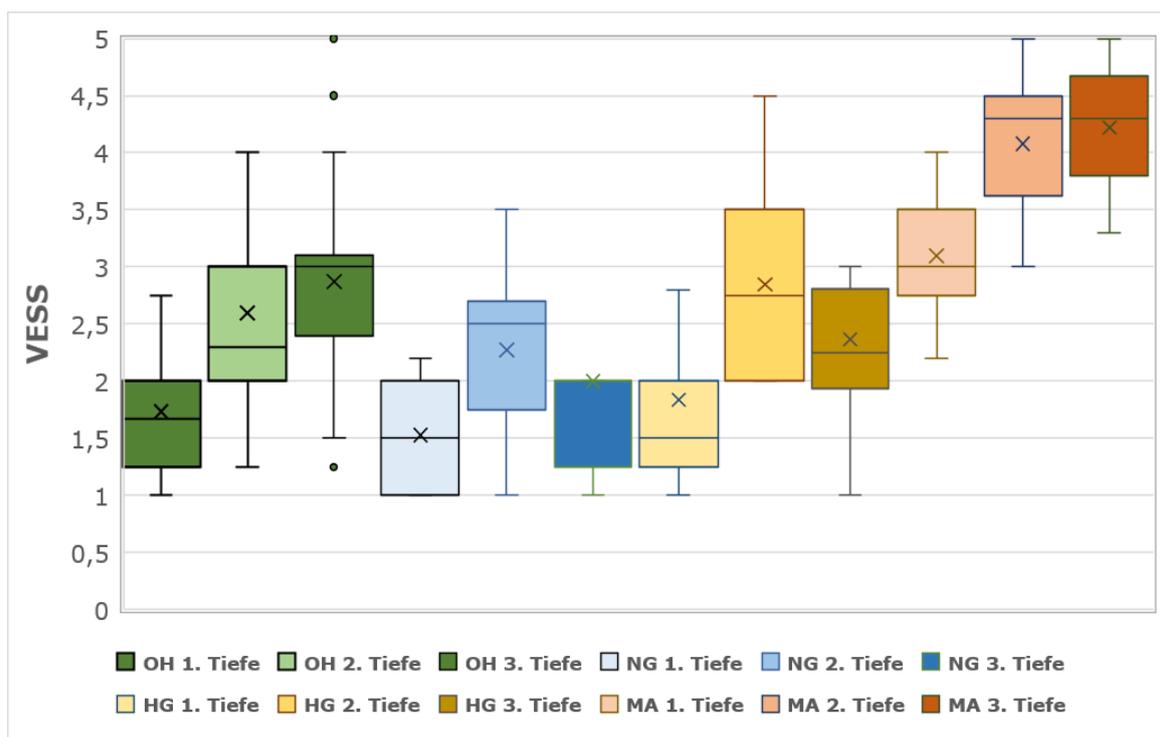


Abbildung 6: Ergebnisse der Strukturbeurteilung (Visual Estimation of Soil Structure = VESS) nach Ball et al. (2007) in Abhängigkeit vom Naturraum (OH = Östliches Hügel-land, NG = Niedere Geest, HG = Hohe Geest, MA = Marsch) und der Tiefe (1 = bearbeiteter Oberboden, 2 = Übergang bearbeitet/unbearbeitet, 3 = Unterboden).

Wesentliche Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Im Oberboden mit Ausnahme der Marschen guter bis sehr guter Strukturzustand
- Strukturzustand wird mit zunehmender Tiefe schlechter
- Marschen weisen insgesamt einen im Vergleich zu den anderen naturräumen schlechteren Strukturzustand auf.

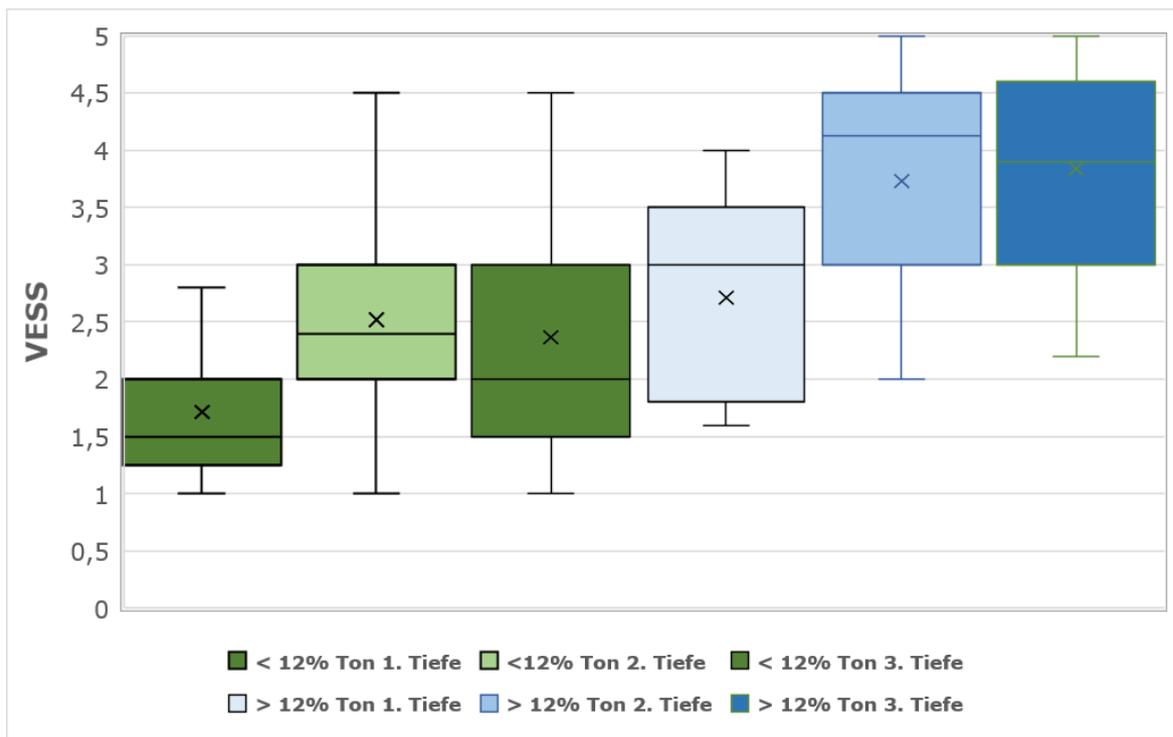


Abbildung 7: Ergebnisse der Strukturbeurteilung (Visual Estimation of Soil Structure = VESS) nach Ball et al. (2007) in Abhängigkeit vom Tongehalt (über/unter 12 %) und der Tiefe (1 = bearbeiteter Oberboden, 2 = Übergang bearbeitet/unbearbeitet, 3 = Unterboden).

- Böden unter 12 % Ton weisen grundsätzlich eine bessere Struktur auf.
- Besonders Böden mit über 12 % Ton weisen im Unterboden schlechte Strukturzustände auf.

5.2 Bodenchemische Untersuchungen

Böden besitzen eine Reihe verschiedener Funktionen, die durch chemische Eigenschaften beeinflusst werden. Der pH-Wert stellt neben Farbe, Textur und dem Gehalt organischer Substanz eine der wichtigsten und aussagekräftigsten Kenngröße zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit dar (Scheffer und Schachtschabel, 2010).

Die in der Abbildung 8 dargestellten Daten zeigen die pH-Werte an jenen Standorten und Tiefen an, die einen Tongehalt von mehr als 12 % aufweisen.

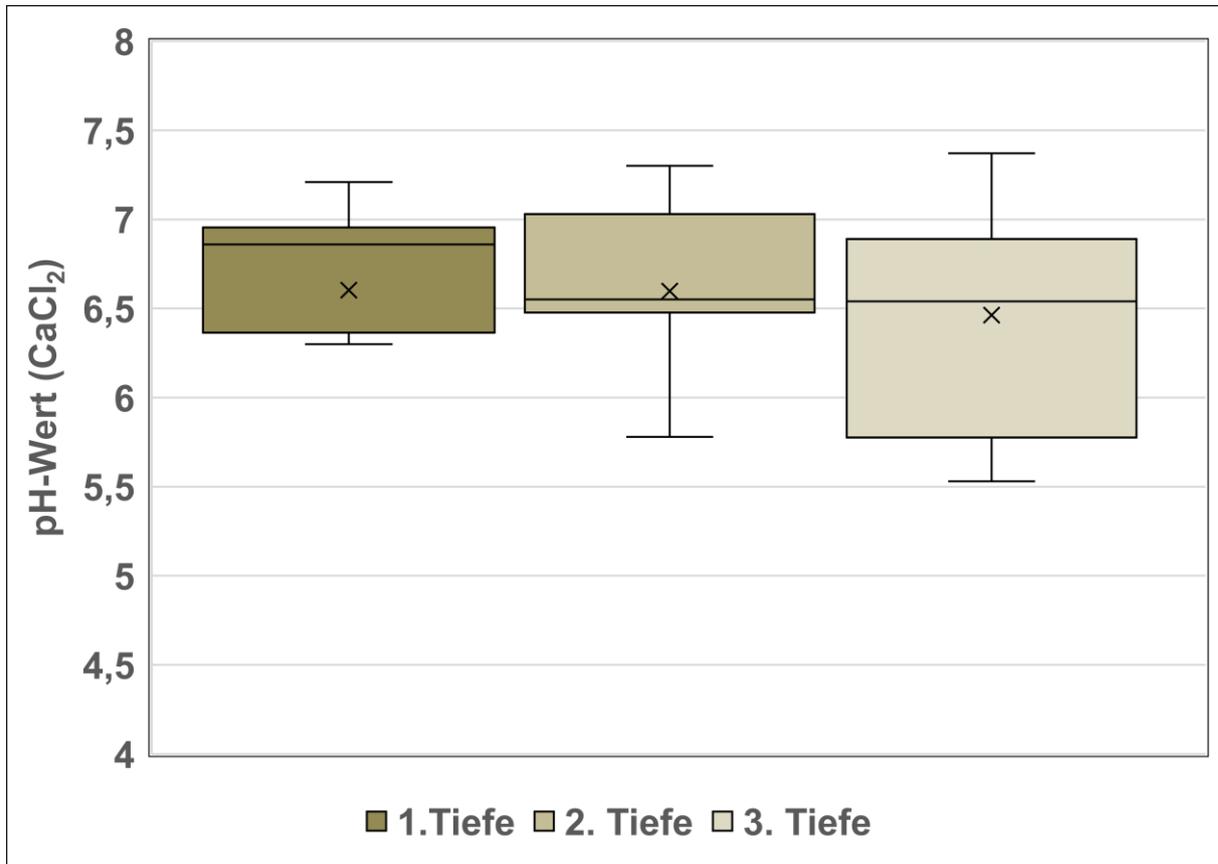


Abbildung 8: pH-Werte an Standorten und Tiefen mit > 12 % Tongehalt (135 Mittelwerte, n=180 je Tiefe).

Es zeigt sich, dass auf den Böden mit hohen Tongehalten grundsätzlich ein pH-Wert im schwach alkalischen bis leicht sauren Bereich vorzufinden ist. Die pH-Werte sind, im Hinblick auf die gruppierte Darstellung der Werte, auf einem für die Standorte angepassten Niveau. Mit zunehmender Probennahmetiefe erhöht sich ebenfalls die Streuung der Werte.

In der Abbildung 9 sind die pH-Werte der verbleibenden Standorte (< 12 % Ton) dargestellt, die nicht in der Abbildung 8 aufgeführt sind. Bereits auf den ersten Blick ist ein im Schnitt über alle Werte mäßig saurer pH-Wert vorzufinden. Bei den Standorten, deren Tongehalt niedriger als 12 % liegt, ist zur Einstellung des pH-Wertes auch der Humusgehalt zu berücksichtigen. Entsprechend der typischen ackerbaulichen Kennzeichnung weist die Krume (1. Tiefe) in der Regel den höchsten pH-Wert auf. Natürliche Kalkvorkommen sind im Unterboden nur noch selten zu

finden, weshalb eine Versauerung der Böden mit zunehmender Tiefe zu beobachten ist.

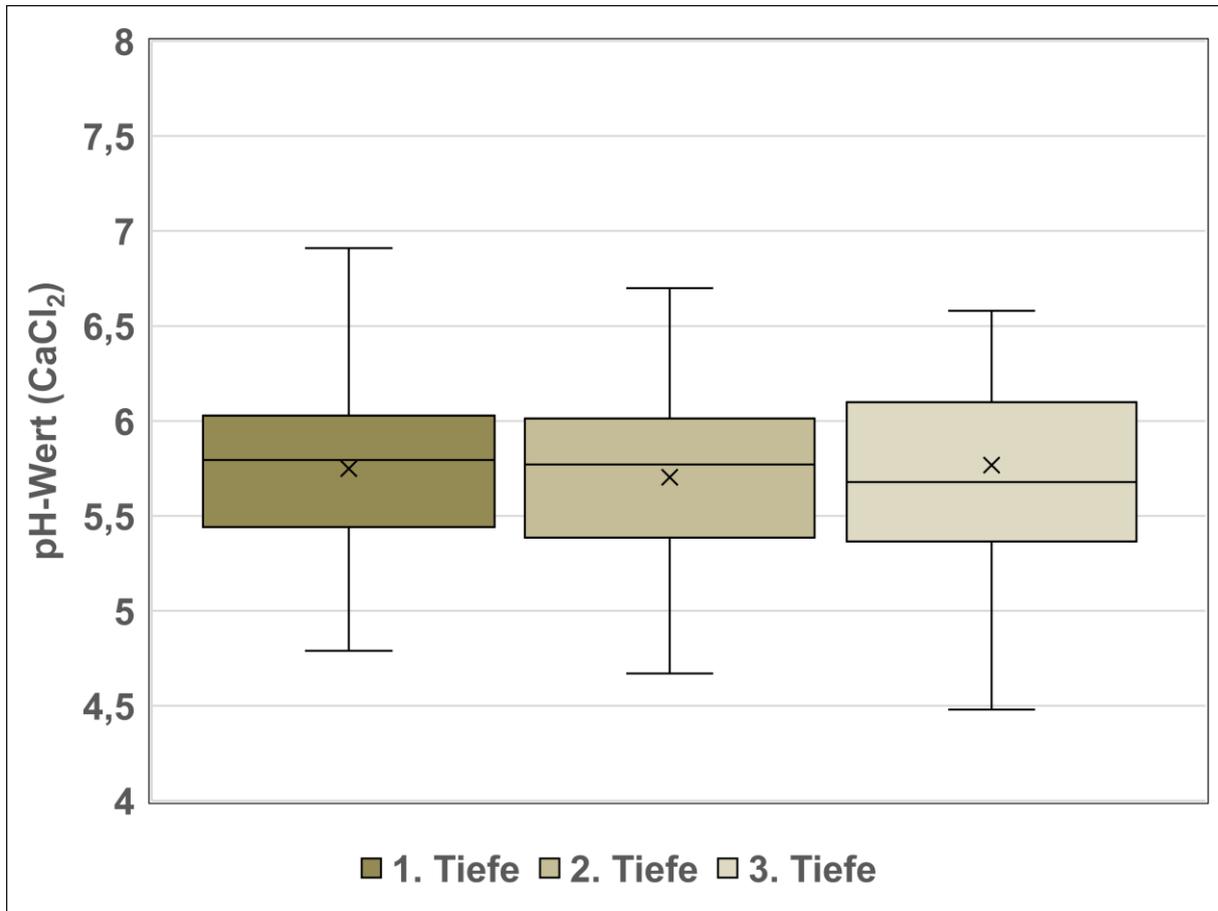


Abbildung 9: pH-Werte an Standorten und Tiefen mit < 12 % Tongehalt (135 Mittelwerte, n=180 je Tiefe).

Die landwirtschaftliche Nutzung von Böden führt im Rahmen der Kalkungen zu einer dem Standort, Bodentyp und der Nutzung angepassten pH-Wert. Natürliche Änderungen werden dadurch stark überprägt. Im Rahmen der weiteren Auswertung stellt dieser Wert lediglich einen Begleitparameter dar.

5.3 Kohlenstoffgehalte und Körnung

Die Ergebnisse der Körnungs- und Humusanalyse sind in der Tabellen 2 bis 4 zusammengefasst. Insgesamt weisen 33 Standorte einen Tongehalt unter 12 % auf, 12 Standorte liegen in den überwiegenden Entnahmetiefen über einem Tongehalt von 12 %. Die Humusgehalte (C_{org} – Messwert multipliziert mit 1,724 nach LfULG, 2015) der untersuchten Standorte schwanken zwischen 0,84 und 5,88 % im

Oberboden. Nach Naturräumen gegliedert, weisen die Standorte des östlichen Hügellandes mit im Mittel 2,09 % die geringsten Humusgehalte, die Standorte der Vorgeest bzw. Hohen Geest mit im Mittel 3,00 bzw. 3,55 % deutlich höhere Humusgehalte im Oberboden auf. Ein positiver Zusammenhang zwischen Humus- und Tongehalt, wie in der Literatur (u.a. Rogasik, 2005) an verschiedenen Stellen dokumentiert, kann für den vorliegenden Datensatz nicht bestätigt werden

Tabelle 2: Ergebnisse der Untersuchungen zum Kohlenstoffgehalt (verrechnet als Humusgehalt) und der Körnungsanalyse für die im Jahr 2019 beprobten Standorte.

Kennung	Standort	Naturraum	Bodentyp	Tiefe	Humusgehalt	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)
BDF 4	Goldelund	VG	GG-PP	1	3,19	90,70	7,98	1,32
				2	1,36	92,94	4,85	2,21
				3	0,74	95,96	1,63	2,41
BDF 5	Gintoft	OH	SS-LL	1	2,17	51,79	38,52	9,68
				2	0,50	50,11	38,85	11,04
				3	0,33	50,73	38,76	10,51
BDF 6	SNK	MA	MCn	1	3,20	22,41	62,73	14,86
				2	1,52	45,82	48,62	5,56
				3	1,13	46,50	49,83	3,67
BDF 9	Schuby	VG	GG-PP	1	4,48	89,42	5,62	4,96
				2	5,66	81,28	15,76	2,96
				3	2,71	90,31	8,25	1,44
BDF 10	Lehmsiek	OH	SS-LL	1	2,14	56,43	40,28	3,29
				2	0,45	47,54	34,47	18,28
				3	0,56	64,04	24,49	11,47
BDF 12	Vadersdorf	OH	SSn	1	3,14	54,92	31,83	13,26
				2	0,93	55,29	26,73	17,98
				3	0,61	59,04	32,69	8,27
BDF 15	Hohenschulen	OH	YK-SS	1	1,49	59,22	28,85	11,93
				2	0,76	53,67	29,93	16,39
				3	0,48	55,14	29,35	15,51
BDF 16	Schwartbuck	OH	SS-LL	1	2,24	53,17	34,45	12,38
				2	0,60	55,26	33,61	11,13
				3	0,57	63,80	23,43	12,77
BDF 17	Dannau	OH	SS-LL	1	0,84	56,11	36,60	7,29
				2	2,52	53,92	36,96	9,13
				3	0,53	49,97	30,83	19,21
BDF 18	Siggen	OH	SS-LL	1	1,78	46,03	40,02	13,96
				2	0,57	41,34	32,44	26,22
				3	0,46	41,63	32,41	25,97
BDF 19	Mörel/Nindorf	HG	SS-LL	1	2,05	70,16	25,17	4,67
				2	1,03	69,54	22,80	7,66
				3	0,61	71,38	20,53	8,08
BDF 23	Bokhorst	HG	BBn	1	3,63	80,82	17,47	1,72
				2	0,70	89,07	8,86	2,07
				3	0,32	95,38	3,04	1,58
BDF 27	Lebatz/Tankenrade	OH	SS-LL	1	2,10	49,42	41,77	8,82
				2	0,66	47,82	32,48	19,70
				3	1,02	42,58	43,47	13,95
BDF 29	Hamberge	OH	BB-SS	1	1,02	40,01	49,47	10,52
				2	2,14	42,77	46,00	11,23
				3	2,34	38,37	44,18	17,46
BDF 36	Lindhof	OH	LLn	1	1,18	63,65	34,38	1,98
				2	1,63	66,17	22,05	11,78
				3	0,46	61,95	31,33	6,72

Tabelle 3: Ergebnisse der Untersuchungen zum Kohlenstoffgehalt (verrechnet als Humusgehalt) und der Körnungsanalyse für die im Jahr 2020 beprobten Standorte.

Kennung	Standort	Naturraum	Bodentyp	Tiefe	Humusgehalt	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)
DBU FH 01	Bovenau	OH	SS-YK	1	2,40	60,22	34,12	5,66
				2	2,01	59,91	32,34	7,75
				3	1,36	58,41	33,22	8,37
DBU FH 02	Danneverk	VG	BB-PP	1	2,99	85,27	11,02	3,71
				2	2,27	85,86	11,92	2,23
				3	1,06	90,63	5,90	3,47
DBU FH 03	Rodenäs	MA	MDn	1	3,07	15,41	58,51	26,08
				2	1,22	19,47	45,34	35,18
				3	3,45	22,22	54,21	23,58
DBU FH 04	Klein Wittensee	OH	BBn	1	1,67	74,3	20,31	5,39
				2	1,04	68,1	24,67	7,23
				3	0,26	81,62	14,62	3,77
DBU FH 05	Gokels	HG	SS-BB	1	1,84	70,86	25,49	3,65
				2	1,53	71,31	24,35	4,34
				3	0,68	70,17	27,26	2,57
DBU FH 06	Bendorf	HG	BB-PP	1	5,66	71,77	25,12	3,11
				2	4,38	72,97	23,57	3,46
				3	0,54	87,27	10,94	1,79
DBU FH 07	Schülp bei Wesselburen	MA	MCn	1	2,63	25,24	64,68	10,08
				2	1,38	11,02	73,61	15,38
				3	0,65	22,56	61,48	15,97
DBU FH 09	Glückstadt	MA	MCn	1	2,44	16,6	66,29	17,11
				2	1,84	10,24	72,93	16,83
				3	1,90	14,51	68,1	17,39
DBU FH 10	Plön	OH	BBn	1	2,36	73,16	23,58	3,26
				2	0,70	76,16	20,53	3,31
				3	0,14	77,12	20,81	2,08
DBU FH 11	Holzbunge	OH	sLLn	1	2,91	63,12	31,01	5,87
				2	2,06	63,14	30,85	6,01
				3	0,63	70,22	22,27	7,52
DBU FH 12	Groß Buchwald	OH	sYK	1	2,74	49,17	45,17	5,67
				2	2,40	53,7	37,5	8,8
				3	1,56	50,8	39,63	9,57
DBU FH 13	Meezen	HG	GG-PP	1	1,89	79,95	16,13	3,93
				2	1,35	85,82	12,18	2,00
				3	0,53	81,12	16,94	1,93
DBU FH 14	Kronprinzenkoog	MA	MCn	1	2,36	16,75	65,77	17,48
				2	2,18	15,63	66,37	18
				3	1,88	24,06	59,75	16,19
DBU FH 15	Wörden	MA	MNn	1	2,14	14,10	73,03	12,87
				2	1,93	16,17	69,74	14,08
				3	0,62	17,53	67,4	15,07
DBU FH 16	Haseldorf	MA	MNn	1	2,02	8,82	67,06	24,12
				2	1,45	7,72	63,2	29,08
				3	1,24	8,82	67,48	23,71

Tabelle 4: Ergebnisse der Untersuchungen zum Kohlenstoffgehalt (verrechnet als Humusgehalt) und der Körnungsanalyse für die im Jahr 2021 beprobten Standorte.

Kennung	Standort	Naturraum	Bodentyp	Tiefe	Humusgehalt	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)
DBU UK 01	Lägerdorf	HG	SS-PP	1	5,88	75,65	22,01	2,34
				2	3,01	76,97	19,75	3,28
				3	0,57	73,30	19,51	7,19
DBU UK 02	Rausdorf	HG	SS-BB	1	2,39	72,31	26,24	1,45
				2	1,23	72,12	24,83	3,04
				3	0,59	73,88	23,38	2,73
DBU UK 03	Siek	OH	SSn	1	2,33	69,21	29,20	1,59
				2	1,14	66,21	31,18	2,61
				3	0,19	75,84	20,23	3,93
DBU UK 04	Lottorf	VG	BBn	1	2,13	84,49	14,12	1,39
				2	2,00	81,87	17,64	0,48
				3	0,53	80,02	17,73	2,26
DBU UK 05	Gudow	VG	BBn	1	1,88	83,30	14,18	2,52
				2	1,84	84,46	13,36	2,18
				3	0,19	95,70	2,97	1,33
DBU UK 06	Siebeneichen	VG	BB	1	2,36	87,23	10,61	2,16
				2	1,67	86,30	10,74	2,96
				3	0,30	94,40	4,05	1,55
DBU UK 07	Nutteln	HG	BB-PP	1	3,98	85,43	11,86	2,71
				2	3,97	84,58	12,73	2,69
				3	0,85	80,99	15,18	3,83
DBU UK 08	Groß Rönnau	OH	SS	1	2,63	52,44	40,94	6,62
				2	2,29	54,25	37,82	7,93
				3	0,23	62,49	21,78	15,73
DBU UK 09	Kronsforde	OH	BB	1	2,07	64,93	32,52	2,54
				2	1,54	62,68	34,36	2,96
				3	0,81	59,68	36,87	3,45
DBU UK 10	Mechow	OH	LL	1	2,55	54,80	42,86	2,34
				2	1,67	58,57	37,96	3,48
				3	0,91	52,96	44,29	2,75
DBU UK 11	Ehndorf	VG	PP	1	3,99	88,23	9,88	1,88
				2	3,67	87,51	7,58	4,91
				3	0,83	91,05	5,79	3,16
DBU UK 12	Burgstall	HG	BB	1	4,65	73,81	22,66	3,53
				2	4,34	75,11	21,73	3,17
				3	0,44	89,36	8,38	2,27
DBU UK 13	Quickborn	HG	SSn	1	4,44	52,48	41,66	5,86
				2	3,26	51,41	42,00	6,59
				3	1,63	44,75	45,96	9,29
DBU UK 14	Schnakenbek	HG	SS-BB	1	1,91	65,83	30,69	3,48
				2	1,33	67,22	29,87	2,91
				3	0,48	63,02	30,76	6,23
DBU UK 15	Hohenlockstedt	HG	BB	1	2,93	66,27	30,36	3,37
				2	2,74	66,06	31,69	2,25
				3	0,62	67,35	27,02	5,63

5.4 Bodenphysikalische Untersuchungen

5.4.1 Aggregatstabilität

Die Aggregatstabilität wurde mit zwei Methoden untersucht: mit dem so genannten Crushing-Test im Lastrahmen, mit dem die Zugfestigkeit ermittelt wird, und mit Hilfe des Naßsiebungsverfahrens, das als Maß für die Verschlammungsneigung dient. Die Gesamtheit der Daten zusammenfassend im Anhang, in den Abbildungen 39 bis 41 für den Crushing-Test und den Tabellen 5 bis 7 für die Nasssiegung dargestellt.

Crushing – Test (Tensile Strength):

Abbildung 10 zeigt die gemessenen Aggregatstabilitäten in den verschiedenen Aggregatgrößenklassen und in Abbildung 11 ist die Aggregatstabilität als Funktion des Tongehaltes dargestellt.

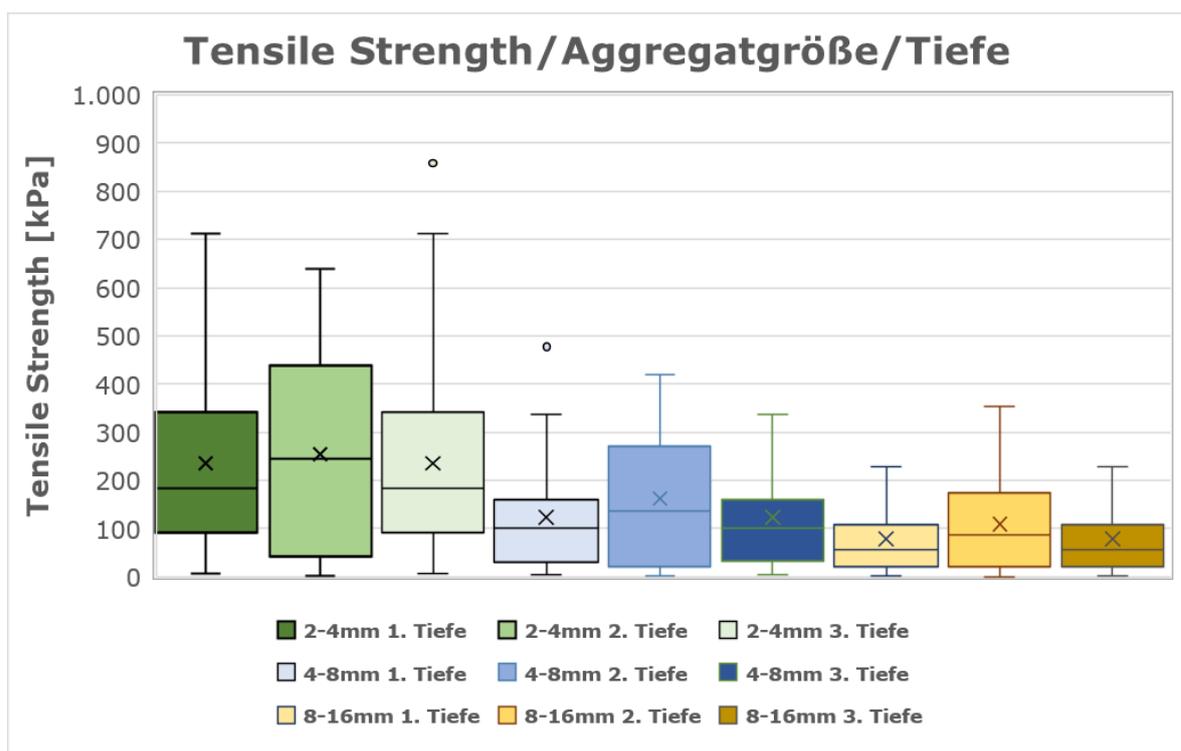


Abbildung 10: Aggregatstabilität (Crushing-Test) für n = 36 Standorte in Abhängigkeit von der Aggregatgrößenfraktion (2 – 4 mm; 4 – 8 mm, 8 – 16 mm) und der Tiefe (1 = bearbeiteter Oberboden, 2 = Übergang bearbeitet/unbearbeitet, 3 = Unterboden).

- Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse des Crushing-Tests, dass erwartungsgemäß die Aggregatstabilität mit abnehmender Aggregatgröße ansteigt.

- Die Aggregatstabilität gegenüber mechanischer Belastung ist tendenziell der Tiefe 2 (Übergang bearbeitet/unbearbeitet) höher als in den anderen Entnahmetiefen.

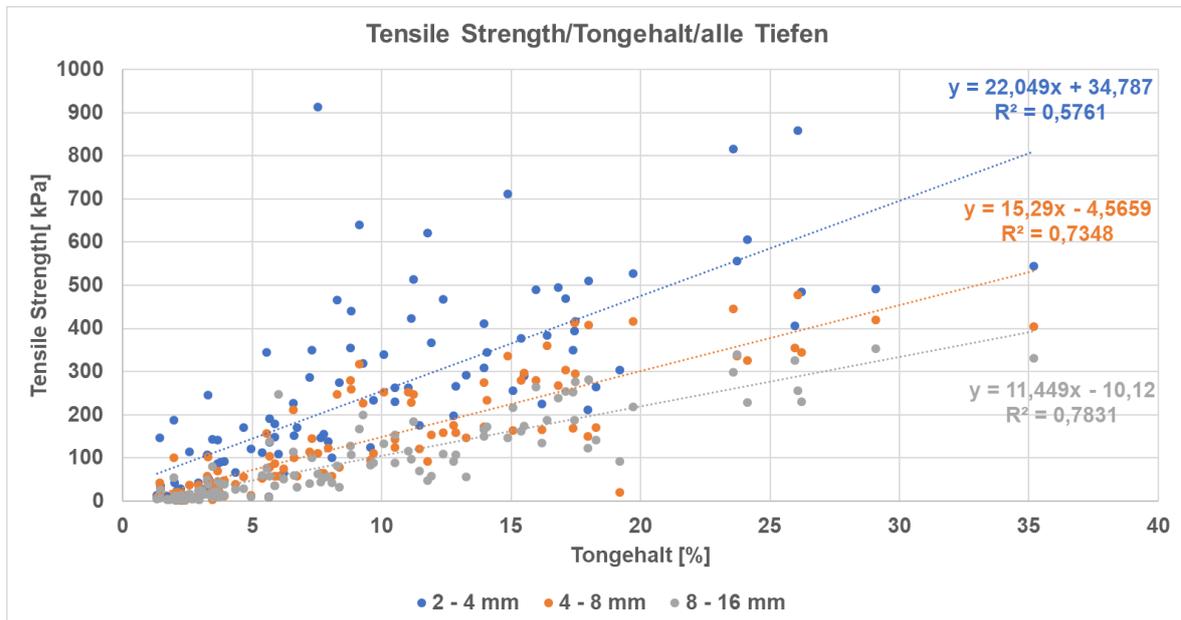


Abbildung 11: Aggregatstabilität (Crushing-Test) für n = 36 Standorte in Abhängigkeit vom Tongehalt für die Aggregatgrößenfraktionen (2 – 4 mm; 4 – 8 mm, 8 – 16 mm) über alle Tiefen.

- Die Aggregatstabilität steigt mit zunehmendem Tongehalt an.
- Dieser Zusammenhang ist für die Aggregatgröße 2 – 4 mm etwas schwächer als für die Aggregatgrößenfraktionen 4 - 8 mm und 8 - 16 mm ausgeprägt.

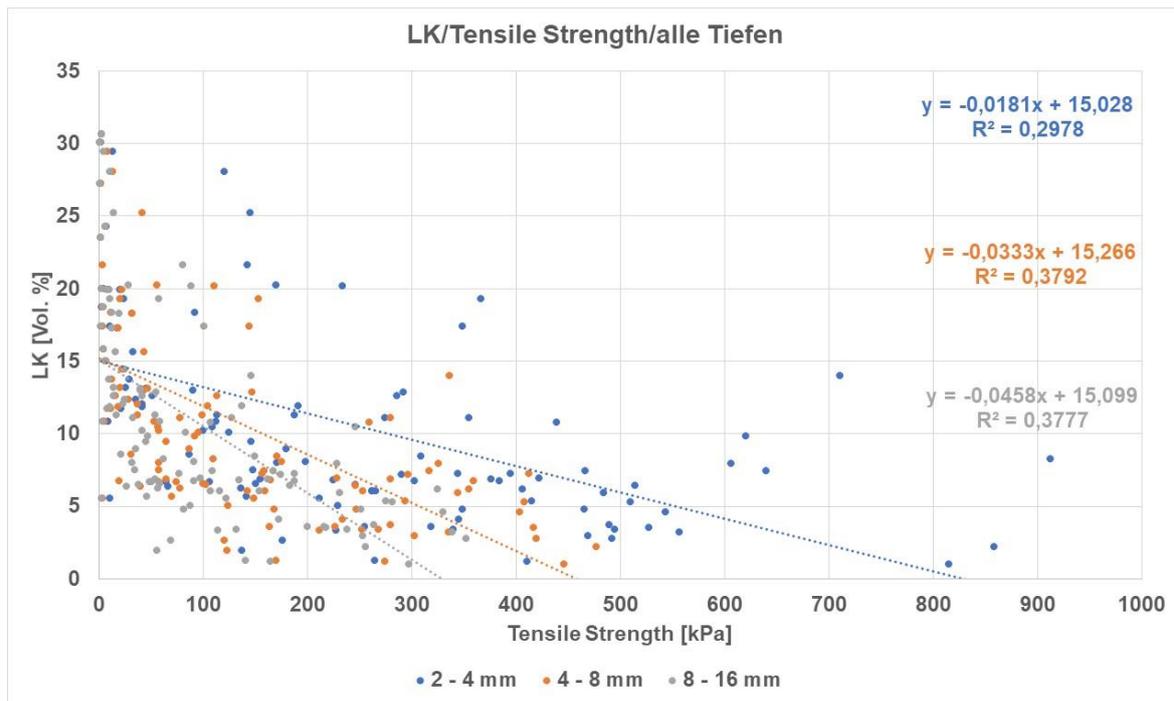


Abbildung 12: Luftkapazität in Abhängigkeit von der Aggregatstabilität (Crushing-Test) für die Aggregatgrößenfraktionen (2 – 4 mm; 4 – 8 mm, 8 – 16 mm) über alle Tiefen (n= 36 Standorte).

Abbildung 12 zeigt einen schwachen Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit und der Luftkapazität: Für alle drei Aggregatgrößenfraktionen nimmt die Luftkapazität mit steigender mechanischen Aggregatstabilität tendenziell zu.

Zwischen folgenden Parametern und den mit Hilfe des Crushing-Testes_ermittelten Aggregatstabilitäten konnten keine oder nur sehr schwach ausgeprägte Korrelationen festgestellt werden:

- Organisch gebundener Kohlenstoff (C_{org})
- Lagerungsdichte (dB)

Ein schwacher Zusammenhang konnte auch zwischen den Ergebnissen der visuellen Strukturbeurteilung auf Grundlage der VESS-Methode nach Ball et al. (2007) festgestellt werden: je größer die Aggregatfraktion, desto enger wird der Zusammenhang.

Nasssiebung (Mean Weight Diameter = MWD):

Die Ergebnisse der Nasssiebung sind als Mean Weight Diameter (MWD) in Abbildung 13 dargestellt.

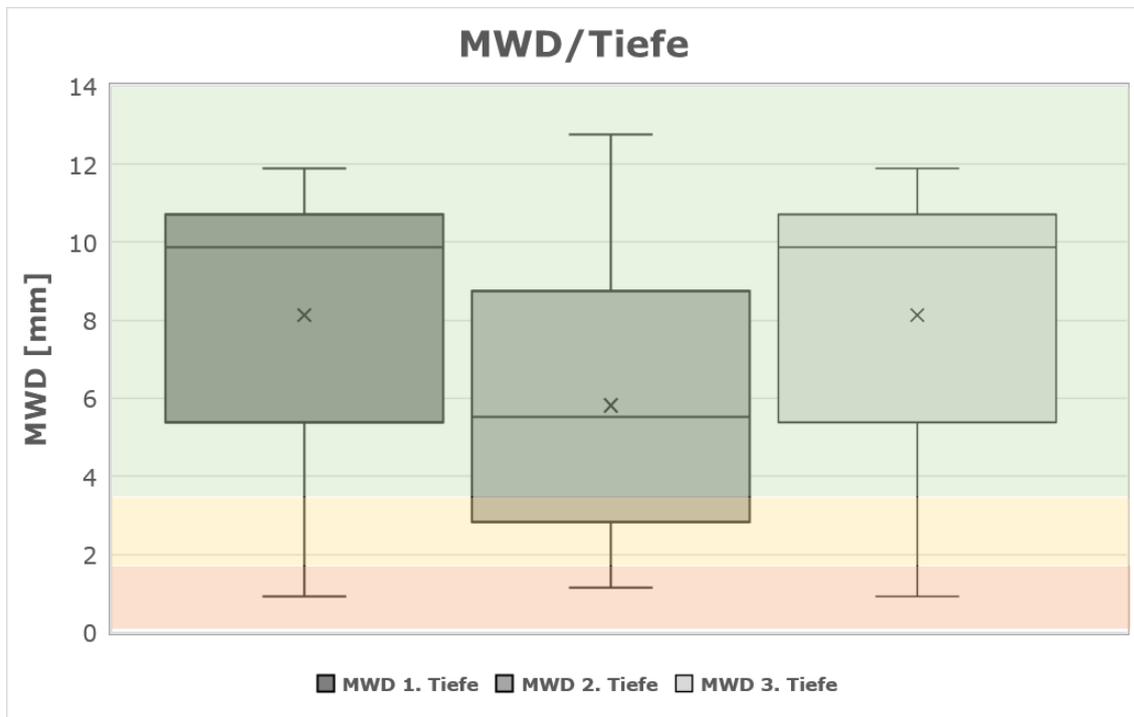


Abbildung 13: Mean Weight Diameter (MWD) (n = 36 je Tiefe) für die Entnahmetiefen (1 = bearbeiteter Oberboden, 2 = Übergang bearbeitet/unbearbeitet, 3 = Unterboden) unter Berücksichtigung der Bewertung des MWD gemäß DIN-EN-ISO 10930 (rot = instabil, gelb = mäßig stabil – stabil, grün = sehr stabil).

- Die Aggregate weisen grundsätzlich unter Berücksichtigung der DIN-EN-ISO 10930 (vgl. Tab. 1) eine nur geringe Verschlammungsneigung auf.
- Tendenziell weisen die Aggregate der 2. Tiefe eine höhere Verschlammungsneigung als die Aggregate der beiden anderen Entnahmetiefen auf.

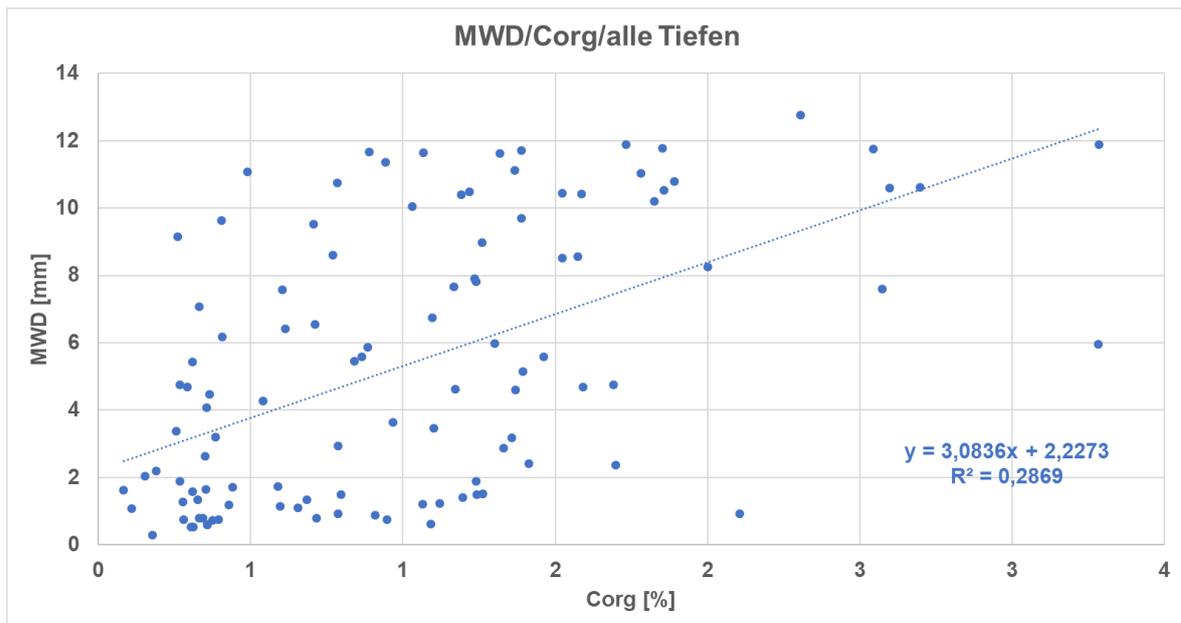


Abbildung 14: Mean Weight Diameter (MWD) (n = 108) in Abhängigkeit vom organischen Kohlenstoffgehalt (Corg) für alle Entnahmetiefen.

Der in der Literatur häufig dokumentierte enge Zusammenhang, dass mit zunehmendem organisch gebundenem Kohlenstoffgehalt die Aggregatstabilität steigt, wird durch die Ergebnisse der Nasssiebung nur tendenziell bestätigt. Eine Abhängigkeit der Aggregatstabilität im Nasssiebungsverfahren vom Tongehalt konnte nicht festgestellt werden. Auch besteht kein Zusammenhang zwischen der visuellen Strukturbeurteilung (VESS) und dem mittleren gewichteten Durchmesser (MWD). Gleiches gilt hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen MWD und der Luftkapazität (LK), lediglich für die erste Tief konnte für Standorte über 12 % Ton ein schwacher Zusammenhang nachgewiesen werden: mit zunehmender Aggregatstabilität im Nasssiebungstest steigt die LK an. Auch die gesättigte Wasserleitfähigkeit in vertikaler Ausrichtung ($k_{f_{vert}}$) wird mit zunehmendem MWD bei diesen Standorten verbessert (vgl. Tabellen 7 – 9 im Anhang). Der Korrelationskoeffizient für diese Beziehung liegt in allen drei Entnahmetiefen bei immerhin 0,50.

Im Hinblick auf die Ergebnisse der Aggregatstabilität bleibt zum aktuellen Auswertungsstand festzuhalten, dass eindeutige Zusammenhänge zwischen Zugfestigkeit (= Tensile Strength) und Tongehalt festgestellt werden konnten. Die Verschlämmungsneigung (= MWD) hingegen stärker durch den Gehalt an organisch gebundenen Kohlenstoff determiniert wird. Ein Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit und Verschlämmungsneigung konnte anhand des Datensatzes nicht nachgewiesen werden.

5.4.2 Bewertung des Verdichtungszustandes

Die Bewertung des Verdichtungszustandes der 45 untersuchten Standorte erfolgte über kritische Grenzwerte für $LK = < 5 \text{ Vol.}\%$ (=weite Grobporen) und $k_f = < 10 \text{ cm/d}$ (vgl. UBA, 2004; Horn und Fleige, 2009; Zink et al., 2011).

- Klasse I: LK und k_f unterschreiten nicht ihren kritischen Grenzwert
- Klasse II und III: k_f oder LK unterschreitet den kritischen Grenzwert
- Klasse IV: LK und k_f unterschreiten ihren kritischen Grenzwert (potenzielle Bodenschadverdichtung)

Abbildung 15 gibt einen Überblick über den Verdichtungszustand in Abhängigkeit von der Bodenarten-Hauptgruppe und der Bodentiefe. Es wird unterschieden zwischen 1. Sanden, 2. Lehmen und 3. Schluffen/Tonen.

Insbesondere die Schluffe/Tone weisen problematische Werte auf, in der Pflugsohle wird immer mindestens ein Grenzwert (Klasse II oder III) unterschritten, bzw. zu meist beide Grenzwerte (Klasse IV). Auch im Unterboden dominiert die Klasse IV bei 4 der 6 untersuchten Standorte. Auch die Lehme zeigen in der Pflugsohle einen kritischen Verdichtungsstatus auf, 4 von 6 Standorten liegen im Bereich der Klasse IV, bei den anderen 2 untersuchten Standorten wird mindestens ein kritischer Grenzwert unterschritten. Der Verdichtungsstatus der sandigen Böden erscheint weitgehend unproblematisch. Eine weitere Differenzierung im Hinblick auf Bodenarten-Gruppen (Reinsande versus Lehmsande, Schluffsande) ergab, dass die Reinsande immer in Klasse I liegen, also in keinem Fall den kritischen Grenzwert für LK und k_f unterschreiten.

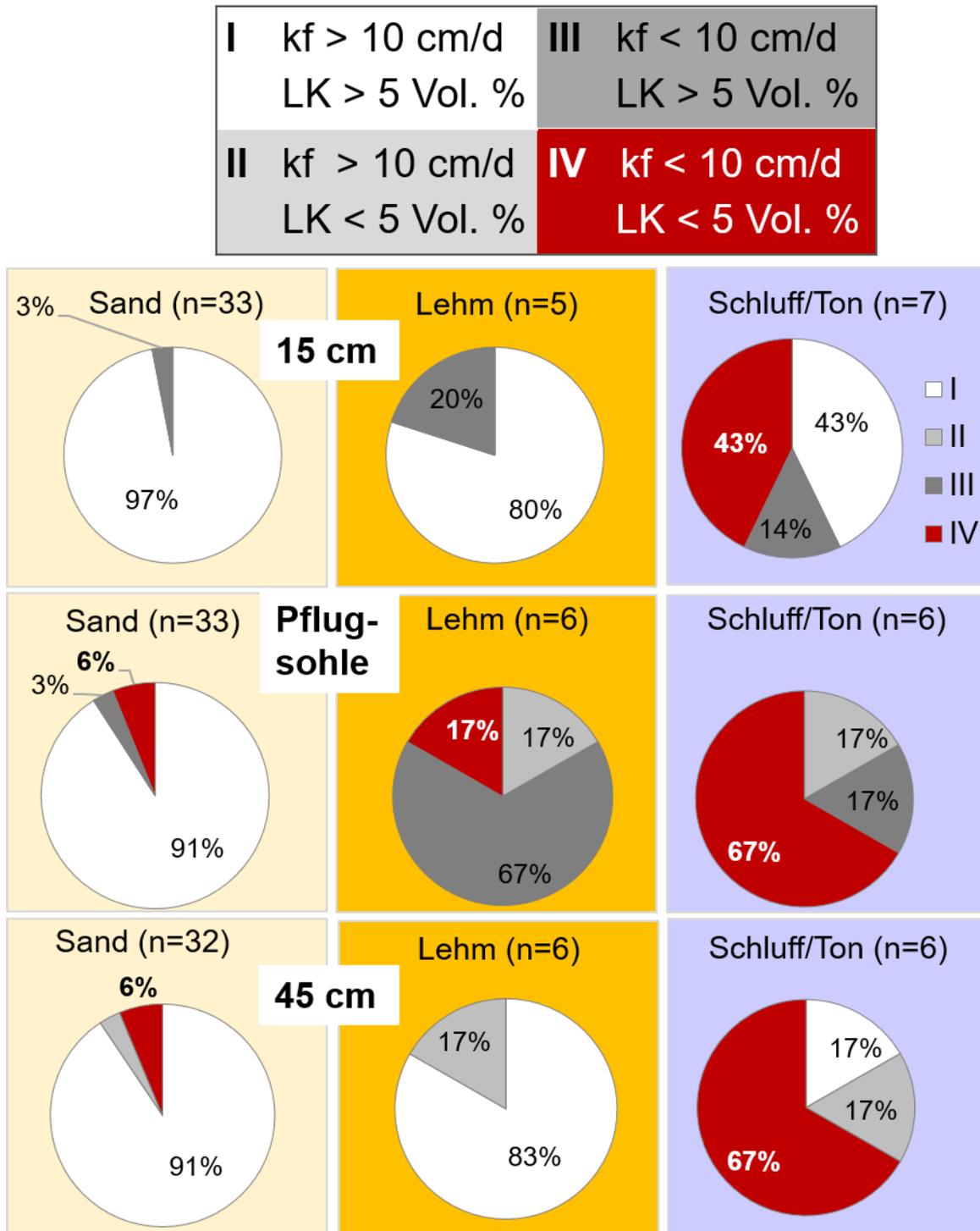


Abbildung 15: Bewertung des Verdichtungsstatus nach CVT anhand kritischer Grenzwerte der vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) und Luftkapazität (LK) unterteilt nach Tiefe und Bodenarten-Hauptgruppe

5.4.3 Anisotropie der gesättigten Wasserleitfähigkeit

Um Aussagen über die Richtungsabhängigkeit der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_f) und damit Struktureffekte von Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung zu quantifizieren, wurde die Anisotropie berechnet. Höhere k_f -Werte in horizontaler Richtung lassen (unter Berücksichtigung der natürlichen Bodenstruktur) auf ein plattiges Gefüge schließen - als typisches Merkmal einer Bodenverdichtung.

Die sandigen Böden (insbes. Geest) liegen im Mittel in allen Tiefen oberhalb des kritischen k_f -Grenzwertes (keine/geringe Anisotropie). Die lehmigen Böden (insbes. Jungmoränenlandschaft) zeigen kritische k_f -Werte in der Pflugsohle (horizontale Anisotropie, Plattengefüge), im Unterboden dagegen vertikale Anisotropie. Die schluffigen/tonige Marschböden zeigen kritische k_f -Werte in allen Tiefen (horizontale Anisotropie).

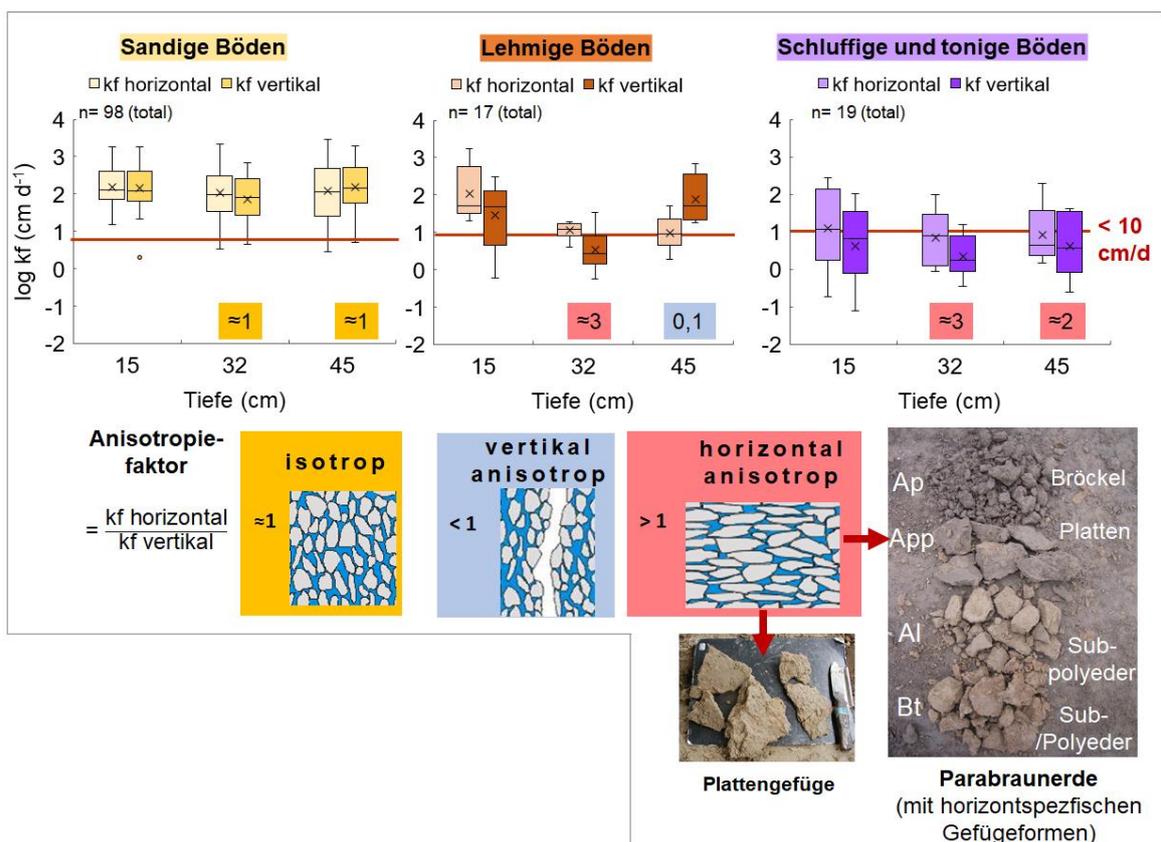


Abbildung 16: Horizontale und vertikale k_f -Werte sowie daraus berechnete Anisotropiefaktoren unterteilt nach Tiefe und Bodenarten-Hauptgruppe

5.4.4 Effektive Lagerungsdichte

Das Indikatorsystem erscheint für sehr sandige Böden wenig bis nicht geeignet, da die LK und k_f selbst bei starker Bodenverdichtung häufig nicht die Schadensschwelle erreichen und damit keine schädlichen Bodenveränderungen vorliegen, wie z.B. Auswertungen von Mordhorst et al. (2020) zum Verdichtungsstatus von Bodentypen aus u.a. sandigen Ausgangssubstraten in Schleswig-Holstein bzw. Verdichtungsversuche in Drucksetzungsanlagen von Gebhardt et al. (2006) zeigen. Eine Auswertung der effektiven Lagerungsdichte im Hinblick auf einen in der Literatur genannten Grenzwert von $>1,7$ (Horn et al. 2009, Wilke et al. 2009) zeigt Abbildung 17. Viele Standorte liegen unterhalb der kritischen Lagerungsdichte. Es wird allerdings deutlich, dass einige Standorte insbesondere in der Pflugsohle und im Unterboden den Wert auch überschreiten können. Zwischen Lagerungsdichte und der die Porenkontinuität berücksichtigenden Wasserleitfähigkeit liegt in allen drei Tiefen keine Korrelation vor. Damit kann auch aus dem Wert der Lagerungsdichte nicht unmittelbar auf eine Bodenleitfunktion bei strukturierten Böden geschlossen werden.

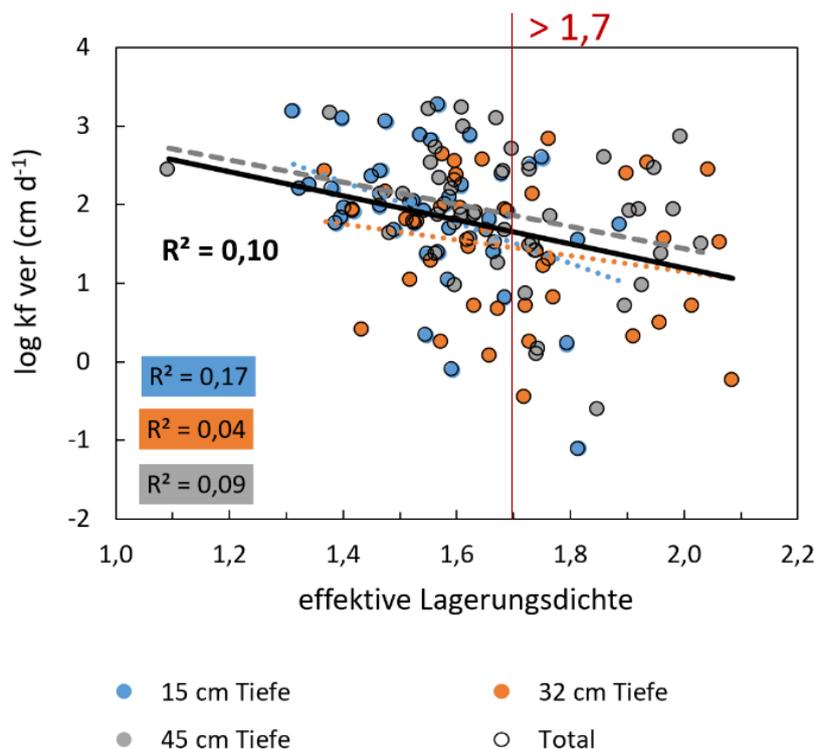


Abbildung 17: Bewertung der effektiven Lagerungsdichte (Grenzwert $> 1,7$) und Korrelation mit der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_f -vertikal) von 45 Standorten in Schleswig-Holstein in Abhängigkeit von der Tiefe ($n=135$)

5.5 Bildanalytische Untersuchungen

Neben den Untersuchungen an gestörten und ungestörten Bodenproben mittels klassischer bodenkundlicher Untersuchungsmethoden im Labor bilden die bildanalytischen Untersuchungen einen elementaren Baustein in der Gefügeanalyse. Folgend werden die einzelnen Ergebnisse der Dünnschliff-Mikroskopischen und Röntgentomographischen Untersuchungen dargestellt.

5.5.1 Mikroskopie

In der Abbildung 18 ist deutlich zu erkennen, dass die Porenfläche in der zweiten gegenüber der ersten Tiefe deutlich abnimmt. Bestätigt wird somit, dass in Tiefe 2 durch anthropogene Einflüsse (u.a. Befahrung, Bearbeitung) eine dichtere „Packung“ der Bodenmatrix vorhanden ist. Weiter zeigt sich, dass die Variabilität in beiden Tiefen deutlich ausgeprägt ist.

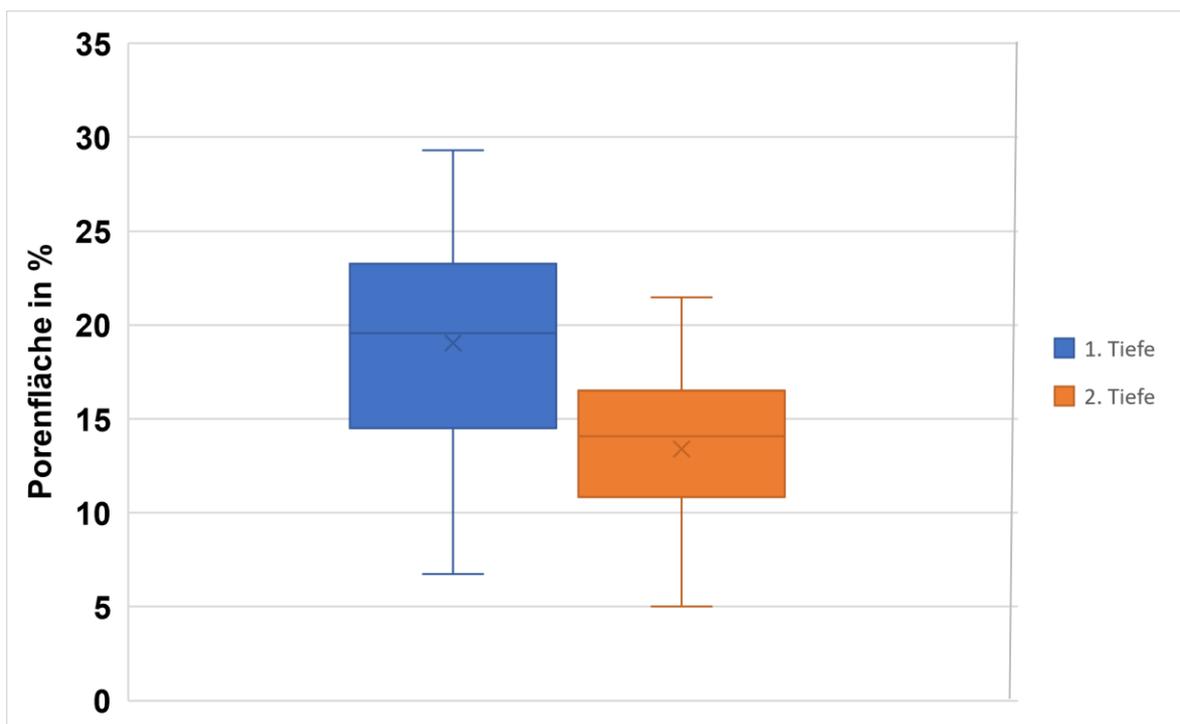


Abbildung 18: Darstellung der Ergebnisse zum Anteil der Porenfläche (> 10 µm) zur gesamten Bodenmatrix eines Dünnschliffs aus der Mikroskopie für die beiden beprobten Tiefen (n=98).

Die Abbildungen 19 und 20 zeigen die gesamte Porenflächen sowie die Differenzierung in die Größenkategorien > 50 µm und 50 – 10 µm für Standorte mit mehr als 8 % Ton auf. Es werden somit die engen und weiten Grobporenflächen mit diesem Verfahren erfasst.

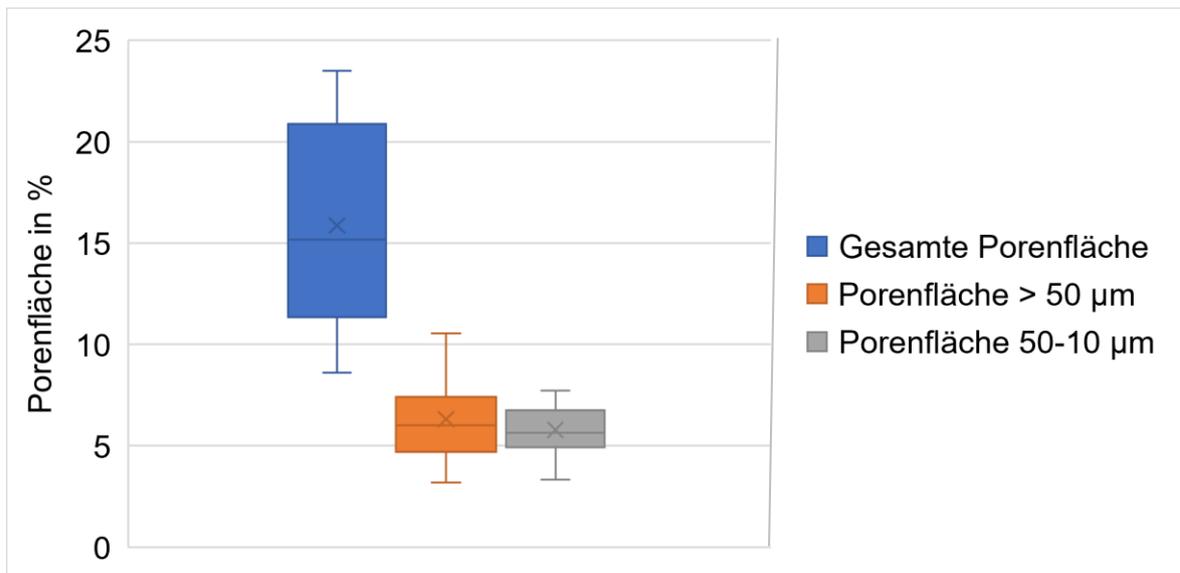


Abbildung 19: Darstellung der Ergebnisse aus den mikroskopischen Untersuchungen für Standorte mit > 8 % Ton und der ersten Tiefe (n=14). Abgebildet ist die gesamte Porenfläche der Dünnschliffe, sowie die Untergliederung in den Flächenanteil der Poren in den Bereich > 50 µm und 50-10 µm.

Anhand der in Abbildung 19 dargestellten Ergebnisse wird die Übersicht der Ergebnisse aus Abbildung 18 weiter nach Porengrößen differenziert. Das Porenvolumen geht an Standorten > 8 % Ton zurück. Der Anteil der Porenfläche > 50 µm und dem der Porenfläche 50-10 µm liegt auf einem vergleichbaren Niveau. Poren < 10 µm können mit diesem Verfahren nicht erfasst werden.

In Abbildung 20 die Ergebnisse für die zweite Tiefe aufgezeigt. Die gesamte Porenfläche ist leicht gegenüber der ersten Tiefe zurückgegangen. Dies gilt sowohl für die Gesamtporenfläche, als auch für die in weite und enge Grobporen differenzierte Porenfläche.

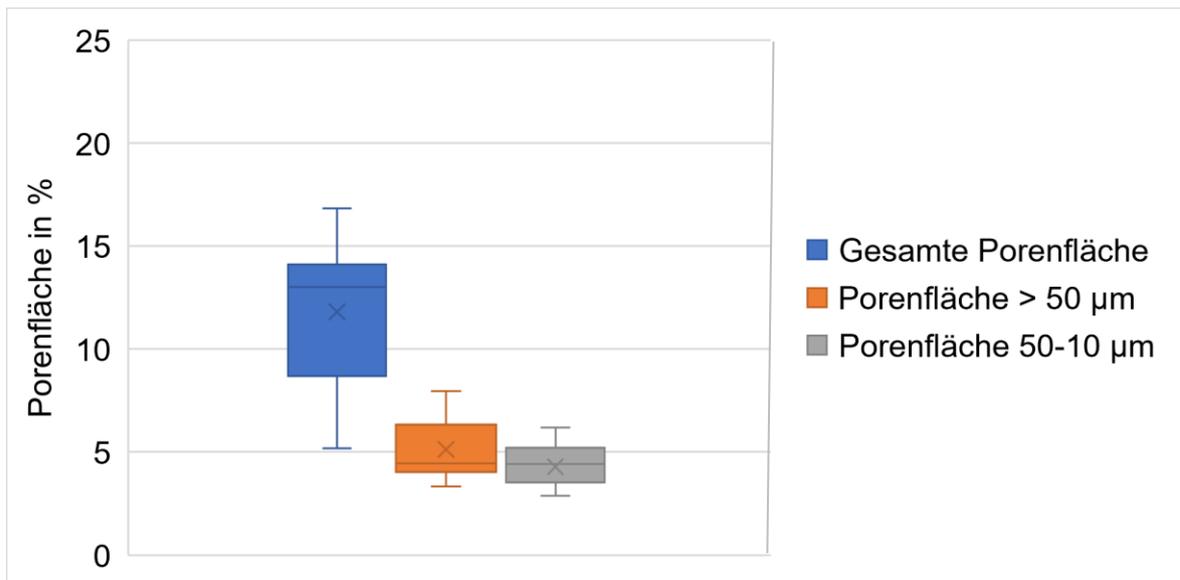


Abbildung 20: Darstellung der Ergebnisse aus den mikroskopischen Untersuchungen für Standorte mit > 8 % Ton und der zweiten Tiefe (n=17). Abgebildet ist die gesamte Porenfläche der Dünnschliffe, sowie die Untergliederung in den Flächenanteil der Poren in den Bereich > 50 µm und 50-10 µm.

5.5.2 Computertomographie

In der Abbildung 21 ist die Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore gezeigt. Sie setzt sich aus der Summe aller redundanten Verbindungen zusammen. Je negativer diese Zahl ist, desto größer ist die Konnektivität des Porenraumes. Die Ergebnisse zeigen, dass die Konnektivitäten der ersten Tiefe höher ausfallen als die der anderen Tiefen. Dies spricht dafür, dass im Oberboden der Porenraum stärker vernetzt ist als im Unterboden.

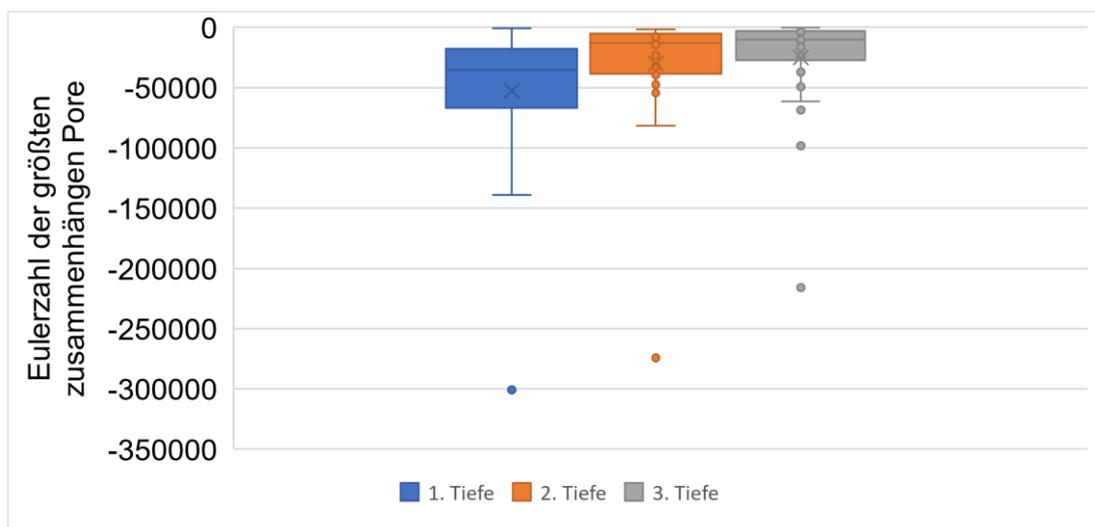


Abbildung 21: Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore für alle Standorte der ersten beiden Probenahmejahre und Tiefen (n=90).

In Abbildung 22 ist die Makroporosität dargestellt. Sie stellt ein Verhältnis zwischen Hohlräumen und dem Gesamtvolumen des Bodens her. Erwartungsgemäß ist auch bei diesem Kennwert das Ergebnis in der ersten Tiefe, welche durch die anthropogenen Einflüsse unter Ackernutzung ständig neu durchmischt wird, am höchsten. Die Ergebnisse der zweiten und dritten Tiefe befinden sich auf einem vergleichbaren Niveau, weshalb an dieser Stelle keine weitere Unterscheidung möglich ist. Insgesamt ist die Makroporosität im Mittel im Unterboden schon in einem kritisch niedrigen Bereich.

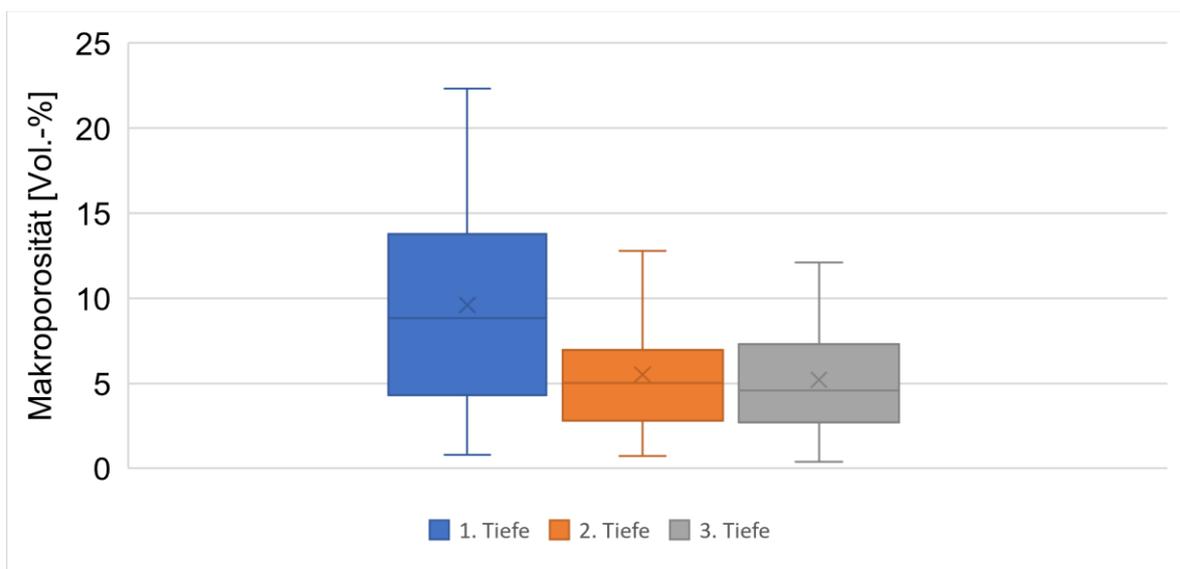


Abbildung 22: Ergebnisse zur Makroporosität [Vol. %] für alle Standorte der ersten beiden Probennahmejahre und Tiefen (n=90).

5.6 Ertragserhebungen

Verschiedene Bodeneigenschaften und Nährstoffgehalte können durch analytische und messbare Verfahren erhoben werden. Über den Projektverlauf konnten 64 Ertragsergebnisse erhoben werden. Das Zusammenspiel der einzelnen Eigenschaften und Gehalte münden auf landwirtschaftlich genutzten Böden in der Ertragsleistung. Diese werden kulturartspezifisch und nach Hauptnaturräumen mit den Daten der Landessortenversuche (LSV) verglichen. Somit ist eine kulturartübergreifende Vergleichbarkeit der Erträge möglich. Die LSV werden von den Landwirtschaftskammern durchgeführt. Hierbei handelt es sich um Parzellenversuche, anhand derer eine Sortenprüfung erfolgt. Die Böden, auf denen die LSV durchgeführt werden,

weisen grundsätzlich eine hohe Bodenfruchtbarkeit auf, weshalb diese als Referenz für besonders hohe Ertragsleistungen gelten.

Nach Richter et al. (2009) haben schleswig-holsteinische Böden im internationalen Vergleich ein sehr hohes Ertragspotential, insbesondere für Getreide. Die Autoren beschreiben vor allem die Trockenheitsgefährdung sowie die Flachgründigkeit als limitierende Faktoren im Sinne der Ertragsfähigkeit.

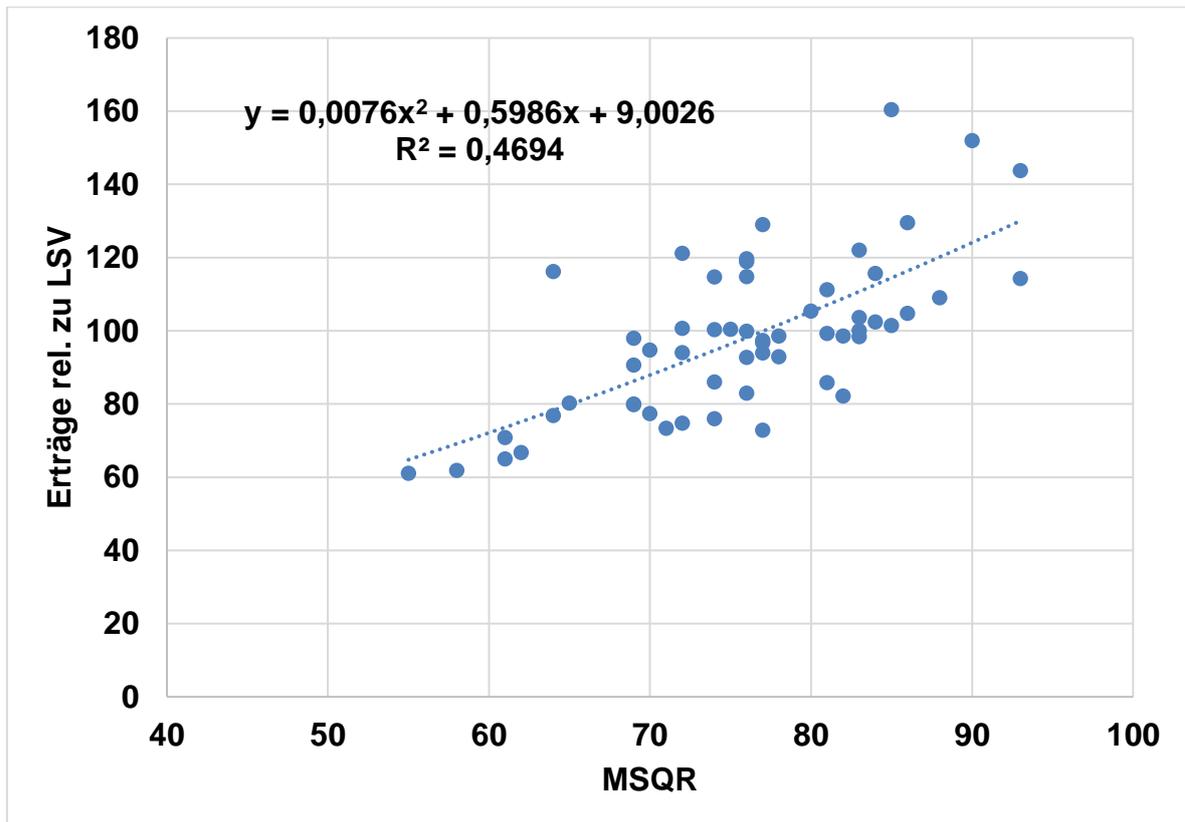


Abbildung 23: Übersicht der mehrjährigen Ertragsdaten, verrechnet als Relativerträge zu den Ergebnissen der Landessortenversuche (LSV) für den nächst vergleichbaren Standort, für die untersuchten Böden in Schleswig-Holstein und der Einschätzung des Standortpotenzials anhand des Müncheberger Soil Quality Ratings (MSQR) (n=64).

In der Abbildung 23 sind die Erträge der bodenkundlich beurteilten Standorte, relativ zur Ertragsleistung der Landessortenversuche (LSV), in Korrelation zum Müncheberger Soil Quality Rating (MSQR) dargestellt. Das MSQR bezieht neben der reinen Bodenstrukturbeurteilung, wie es bei VESS der Fall ist, auch die Nährstoffgehalte der Böden, die Grundwassernähe und Wasserverfügbarkeit mit in die Beurteilung ein. Dadurch ergibt sich mit einem R^2 von 0,4694 ein relativ enger Zusammenhang. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Datenerhebungen für das MSQR einmalig zum

Zeitpunkt der bodenkundlichen Probennahme durchgeführt wurde. Bei der mehrjährigen Probennahme von Pflanzenmaterial (Ernteproben) haben sich teils erhebliche Abweichungen ergeben. Standorte, die in Relation zum LSV im ersten Jahr der Probennahme Minder- oder Mehrerträge hervorgebracht haben, wiesen im nachfolgenden Jahr teils Erträge auf, die wesentlich höher oder niedriger lagen. Dies kann durch den zeitlichen Versatz zwischen der einjährig durchgeführten Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit über das Müncheberger Soil Quality Rating (MSQR) und der überjährig durchgeführten Beerntung erklärt werden. Maßnahmen, die in der Zwischenzeit im Rahmen der Bewirtschaftung durchgeführt wurden, die zu überjährigen Schwankungen geführt haben, lassen sich nicht mit der einmalig erhobenen Beurteilung der Bodenstruktur erklären.

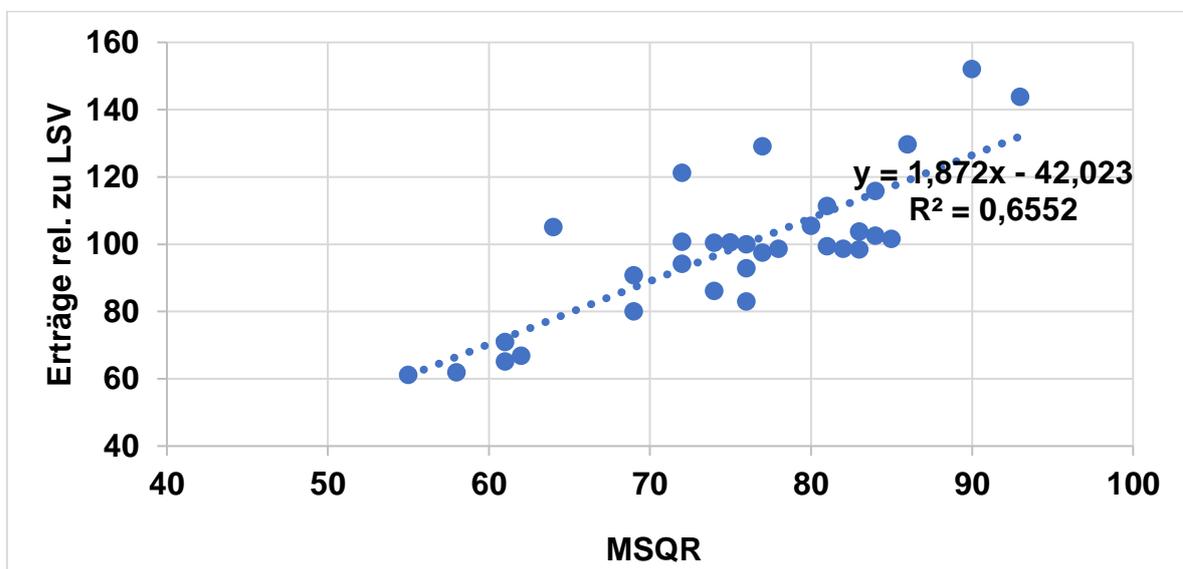


Abbildung 24: Übersicht Ertragsdaten, die jeweils im Jahr der Bodenprobennahme genommen wurde, verrechnet als Relativerträge zu den Ergebnissen der Landessortenversuche (LSV) für den nächst vergleichbaren Standort, für die untersuchten Böden in Schleswig-Holstein und der Einschätzung des Standortpotenzials anhand des Müncheberger Soil Quality Ratings (MSQR) (n=32).

Die genannten Unterschiede erklären sich aus der Betrachtung der Abbildung 24. Dargestellt sind hier die Ergebnisse aus der Ernte mit dem dazugehörigen MSQR. Die Daten stehen in einem direkten Verhältnis zueinander, da überjährige Ereignisse wie Bodenbearbeitung, Bodenschadverdichtungen durch Befahrung oder witterungsbedingte Jahresunterschiede ausgeschlossen werden können. Das Bestimmtheitsmaß hat sich in dieser Darstellung auf 0,6552 erhöht und zeigt eine deutlich engere Beziehung auf als dies in Abbildung 24 der Fall ist. Weiterhin lässt sich

daraus bereits ableiten, dass es Unterschiede in der Ertragsleistung gibt, die durch standortbedingte Faktoren hervorgerufen werden können. Ein Hinweis auf den überjährigen Einfluss von Bodenstruktur kann an dieser Stelle nicht gegeben werden, da keine weitere bodenkundliche Beurteilung vorgenommen wurde.

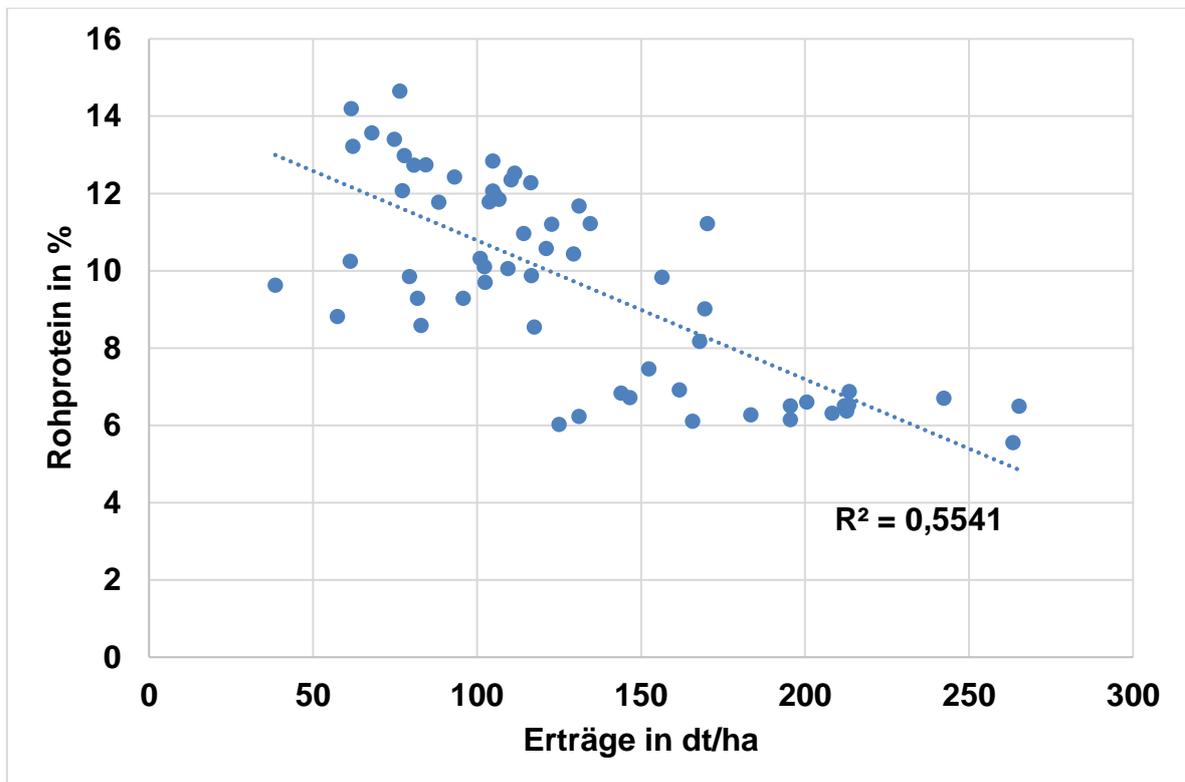


Abbildung 25: Darstellung des negativen Zusammenhangs von Ertrag und Proteingehalt (n=61).

Neben dem Vergleich von Ernteerträgen und der Bodenfruchtbarkeit konnten mit Hilfe der Daten bereits bekannte Zusammenhänge, die den Rückgang von Rohproteingehalten bei steigendem Ertrag beschreiben, bestätigt werden (Roeb, 2022). Abbildung 25 stellt die negative Korrelation von Ertrag zu Proteingehalten dar. Rohprotein stellt für Landwirte und verarbeitende Betriebe eine entscheidende Grundlage für die Qualität der geernteten Ware dar. Nach Roeb (2022) ist die Sortenwahl eine direkte Einflussnahme auf die Ertrags-, aber auch die Proteinleistung der Kultur.

6 Zusammenhang verschiedener Parameter

Im Mittelpunkt der Projektarbeiten stand die Analyse eines Zusammenhanges zwischen im Labor erfassten bodenphysikalischen Parametern auf der einen und durch bildanalytische Methoden gewonnenen Messgrößen auf der anderen Seite. In den folgenden Kapiteln werden zunächst Korrelationen zwischen einzelnen bodenphysikalischen Parametern, dann zwischen den Ergebnissen der Bodenstrukturanalyse im Feld (VESS) und den Laborparametern geprüft. Abschließend werden Zusammenhänge zwischen den bildanalytischen Verfahren (Mikroskopie und Computertomographie) und ausgewählten bodenphysikalischen Parametern überprüft.

6.1 Korrelation einzelner Laborparameter

Dieses Unterkapitel beginnt mit der Darstellung und den Zusammenhängen der Ergebnisse aus dem Bereich der bodenkundlichen Grundanalytik. Die Methoden aus dem Kapitel 4 bilden hierfür die Grundlage. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist im Anhang (Tabellen 4 bis 9) zu finden. An dieser Stelle wird nur auf die für die Projektfrage relevanten Zusammenhänge eingegangen.

Aus den Ergebnissen der Regressionsanalysen wird deutlich, dass Körnung, insbesondere der Tongehalt einen wesentlichen Einfluss auf die untersuchten bodenphysikalischen Parameter ausüben. Allerdings sind die Beziehungen zwischen den ausgewählten Parametern für die in diesem Projekt untersuchten Standorte oft im Vergleich zu Literaturangaben, wie am Beispiel der organischen Substanz zu erkennen, weniger deutlich oder nicht nachweisbar sind. So konnten aus der Literatur bekannte positive Zusammenhänge zwischen beispielsweise der Luftkapazität und der vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeit nachgewiesen werden. Die Stärke der Korrelation schwankt allerdings zwischen den Bodenartengruppen (größer/kleiner 12 % Ton) und den Entnahmetiefen. Für den Oberboden ist diese Beziehung am engsten. Auf der anderen Seite konnten für den Parameter „nutzbare Feldkapazität“ (nFK), der für die Wasserversorgung der Pflanzen maßgeblich ist, keine gesicherten Zusammenhänge zu anderen relevanten Parametern hergestellt werden. Lediglich negative Korrelationen zur vertikalen und horizontalen Wasserleitfähigkeit in der 2. Beprobungstiefe auf Standorten mit < 12 % Ton können beobachtet werden. Weiterhin ist den Daten zu entnehmen, dass auf den Standorten < 12 % Ton der Sand-

gehalt und damit die Körnung für die Ausprägung der bodenphysikalischen Parameter (u.a. LK, nFK, kf) verantwortlich ist. Somit ist abzuleiten, dass auf den leichteren Böden weniger die Struktur als vielmehr die Körnung für die physikalischen Bodeneigenschaften ursächlich ist. Dies impliziert zeitgleich die Möglichkeit, dass auf Standorten, an denen die Körnung den maßgeblichen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften des Bodens hat, die Bodenstruktur nur schwach bzw. gar nicht vorhanden ist oder keine strukturbildenden Maßnahmen aus bodeninternen Prozessen vorliegen.

Der Zusammenhang zwischen Körnung bzw. Tongehalt und Strukturstabilität wird besonders in der Aggregatgrößenklasse 8 – 16 mm deutlich: Abbildung 26 zeigt den deutlichen Zusammenhang von Aggregatstabilität dieser Aggregate zum Tongehalt auf ($R^2=0,7894$). Anzumerken ist allerdings, dass die Aggregatstabilität bei niedrigen Tongehalten teils stark schwankt. Hierfür sind eine Reihe verschiedener Faktoren verantwortlich, die in Summe zu Schwankungen führen. Zu diesen Faktoren gehören neben Humusgehalt, Austauschbelegung und Porosität (Amézketa, 1999) auch die Art der Bodenbearbeitung (Wiermann, 1998).

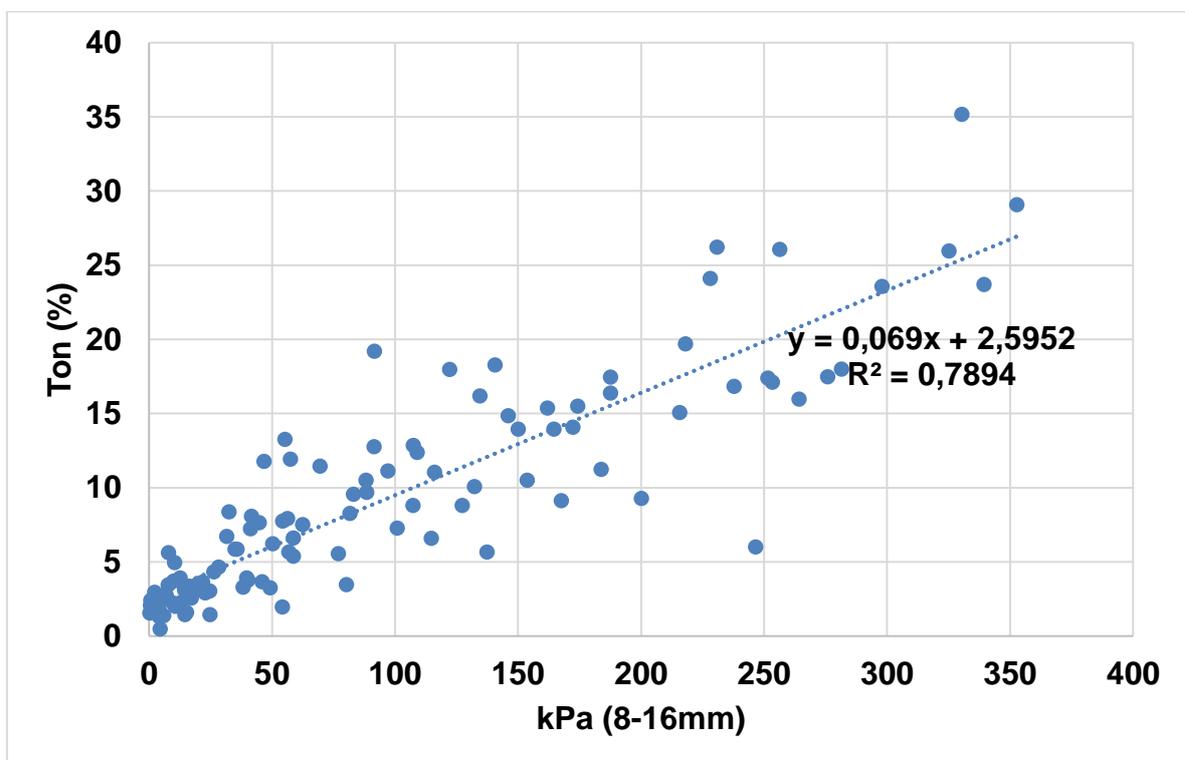


Abbildung 246: Vergleich der Ergebnisse des Crushing-Tests für die Aggregatgröße 8-16 mm (gemessen in kPa) über alle drei Beprobungstiefen der 45 Standorte und dem Tongehalt der Proben in % (n= 135).

Neben dem deutlich hervorzuhebenden Einfluss des Tongehaltes auf die Aggregatstabilität ist der Tongehalt auch im Zusammenhang mit dem Funktionalitätsparameter der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) zu betrachten. In der Abbildung 27 ist die Ordinate mit den Tongehalten der 45 Standorte aus der zweiten Tiefe versehen. Die Abszisse stellt den Quotienten aus der horizontalen zur vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) dar. Weist der Quotient einen Wert von eins auf, so wird dies als Isotropie – ein in alle Richtungen gleichermaßen ausgerichtetes Porensystem – bezeichnet. Liegt der Wert unterhalb von eins, so liegt eine vertikale Anisotropie vor. In diesem Fall ist das Porensystem stärker in vertikaler Richtung ausgeprägt. Oberhalb dieses Wertes liegt eine horizontale Anisotropie vor.

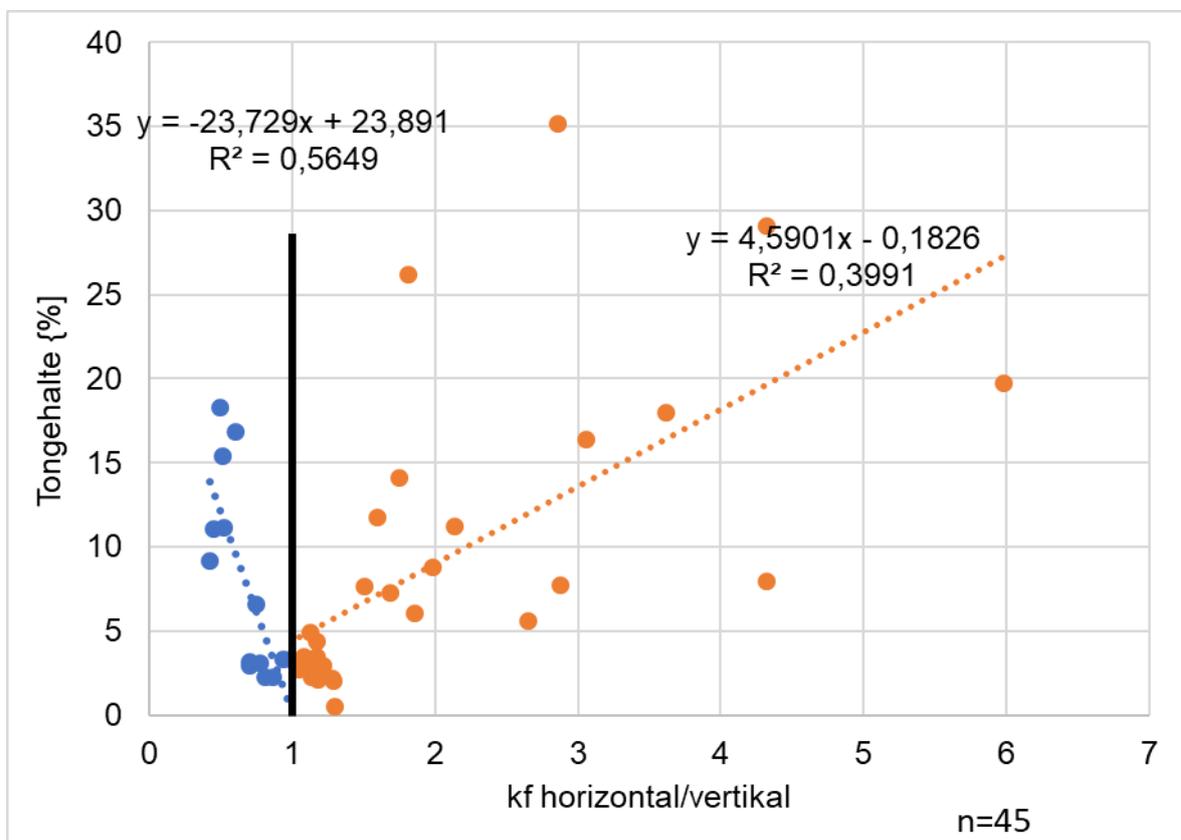


Abbildung 7: Einfluss des Tongehaltes auf die Ausrichtung des Porensystems, verglichen anhand des Quotienten aus horizontaler zu vertikaler gesättigter Wasserleitfähigkeit in der zweiten Beprobungstiefe (n=45).

Die Abbildung 28 zeigt insbesondere bei niedrigen Tongehalten in der zweiten Tiefe eine enge Punktwolke um den Wert eins herum auf. Steigt der Tongehalt an, so ist eine zunehmende Ausprägung des Porensystems zu einer horizontalen bzw. vertikalen Anisotropie zu verzeichnen. Es zeigt sich, dass sich die Einzelwerte mit

zunehmenden Tongehalten stärker von dem Zustand der Isotropie entfernen. Hinzufügen ist bei dieser Abbildung, dass insbesondere in der zweiten Tiefe, der Krumbasis, in der Regel ein starker anthropogener Einfluss vorliegt. Dies wird in der Praxis als „Pflugsohle“ bezeichnet und ist in der Regel mit einer ausgeprägten Plattenstruktur verbunden. Auch wenn die Abbildung 28 keine Aussage zur Unterschreitung kritischer Grenzwerte in Bezug auf die gesättigte Wasserleitfähigkeit zulässt, zeigt sich dennoch, dass sowohl horizontal als auch vertikal ausgerichtete Porensysteme vorliegen können und der Einfluss einer „Pflugsohle“ nicht auf jedem Standort in gleicher Intensität nachvollziehbar ist.

6.1.1 Korrelation bodenphysikalischer Parameter und VESS

Dieses Kapitel stellt den Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Bodenphysik und der visuellen Bodenstrukturbeurteilung VESS heraus. Wie in Kap. 2.2.3 beschrieben, beruht die visuelle Beurteilung der Bodenstruktur nach Ball et al. (2007) auf verschiedenen visuellen Merkmalsausprägungen. Daher wird ein Zusammenhang zwischen VESS-Score und der Ausprägung von bodenphysikalischen Parametern vermutet. Besonders zwischen dem VESS Score und der Zugspannung sollten Zusammenhänge bestehen.

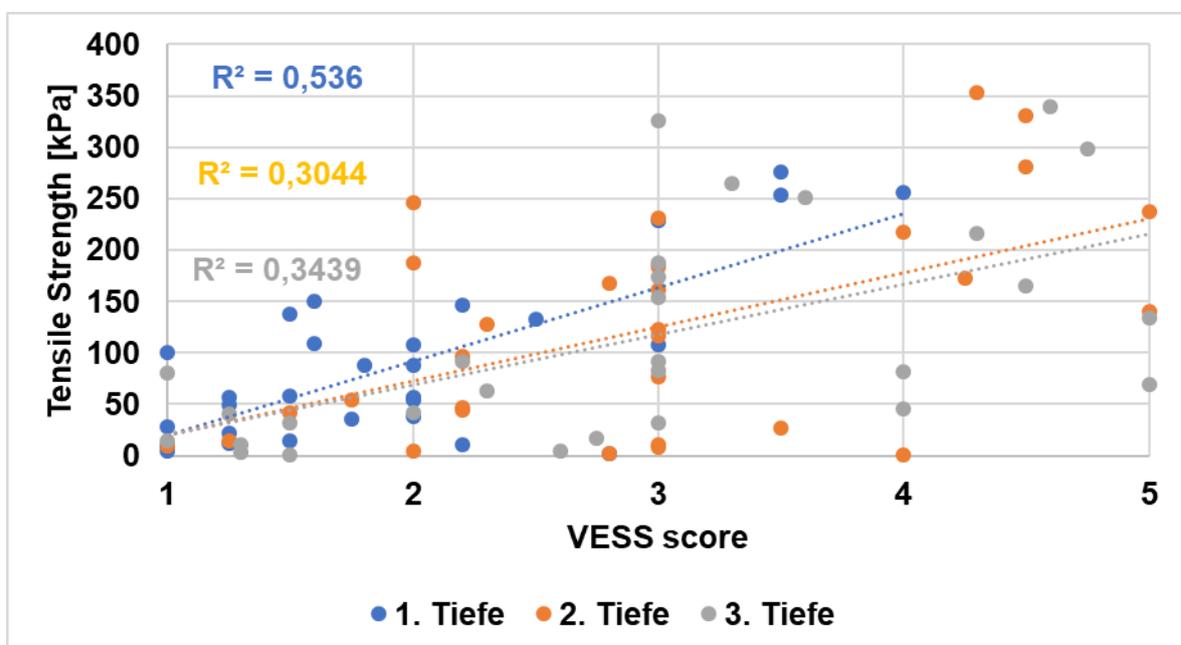


Abbildung 28: Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit (Tensile Strength) und Bodenstrukturzustand nach VESS für die Aggregatgrößenklasse 8 – 16 mm in den Entnahmetiefen (1 = bearbeiteter Oberboden, 2 = Übergang bearbeitet/unbearbeitet, 3 = Unterboden).

Abbildung 28 zeigt die Ergebnisse des sogenannten Crushing-Tests in Verbindung mit VESS auf. Insbesondere in der ersten Tiefe ist dieser Zusammenhang mit einem R^2 von 0,536 nachzuweisen. In den beiden anderen Tiefen ist das Bestimmtheitsmaß deutlich geringer und zeigt damit für die Aggregatgrößenklasse 8 – 16 mm einen deutlich schwächeren Zusammenhang zwischen Aggregatstabilität und Bodenstrukturzustand auf.

6.1.2 Korrelation bodenphysikalischer Parameter und quantitativer Mikroskopie

Neben der Korrelation bodenphysikalischer Eigenschaften zur visuellen Bodenstrukturbeurteilung VESS sollen im Folgenden die Ergebnisse der quantitativen Auswertung der Dünnschliffe im Zusammenhang mit den bodenphysikalischen Parametern vorgestellt werden. Die optische Untersuchung der Dünnschliffe lässt eine Aussage zur Porenfläche zu, die in % des Bildausschnittes/des Dünnschliffes angegeben ist.

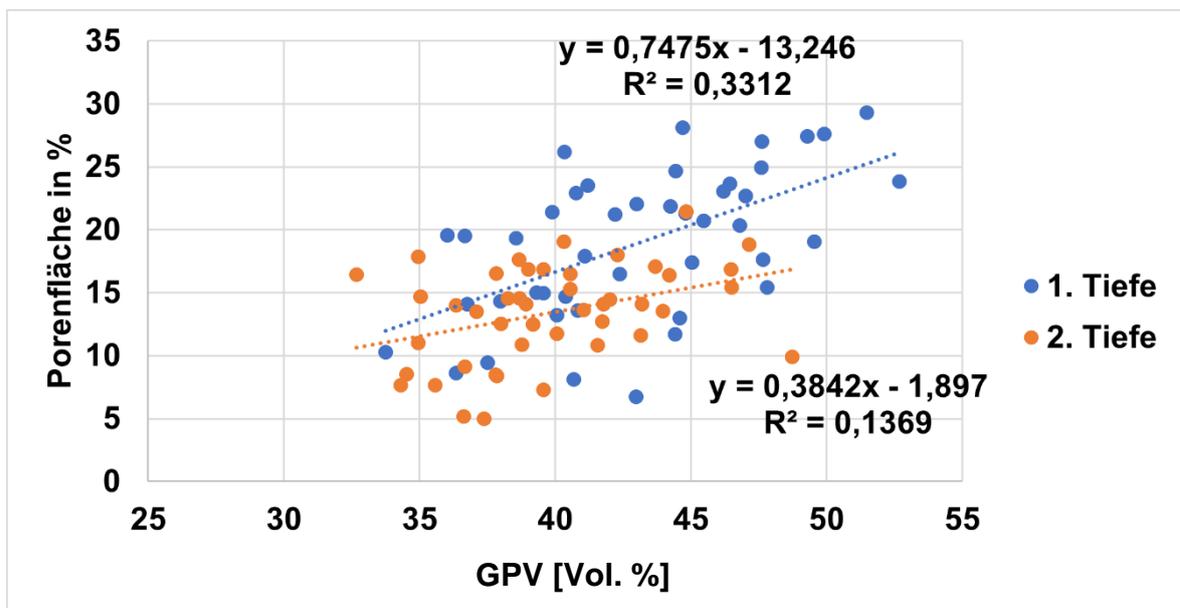


Abbildung 29: Darstellung der gesamten Porenfläche in % im Verhältnis zum GPV = Gesamtporenvolumen [Vol. %] (n=90).

In der Abbildung 29 ist die gesamte Porenfläche in % in Korrelation zur gesamten Porenvolumen, abgeleitet aus der Wasserretentionsbeziehung, für die beiden ersten Beprobungstiefen dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß ist mit 0,33 in der ersten Tiefe deutlich höher, als in der zweiten Tiefe. In der Abbildung 30 ist der Vergleich

zwischen der Luftkapazität (weite Grobporen), abgeleitet aus der Wasserretentionsbeziehung und der Porenfläche > 50 µm in %, errechnet aus den Dünnschliffen, dargestellt. Beide Parameter betrachten also den gleichen Porenraum bzw. -fläche.

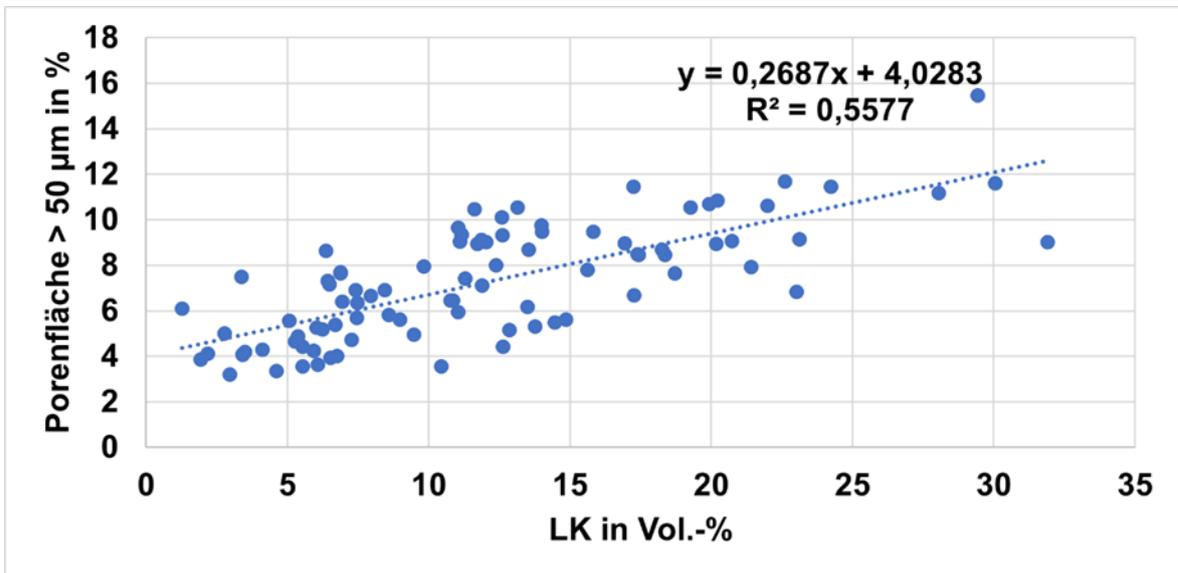


Abbildung 30: Zusammenhang der Porenfläche > 50 µm in % und der Luftkapazität [Vol.-%] (n=90).

Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,5577 zeigt der Abgleich der Luftkapazität mit der Porenfläche > 50 µm einen deutlichen Zusammenhang auf. Noch enger wird die Beziehung, wenn nur die Horizonte mit einem Tongehalt über 8 % betrachtet werden (vgl. Abb. 31)

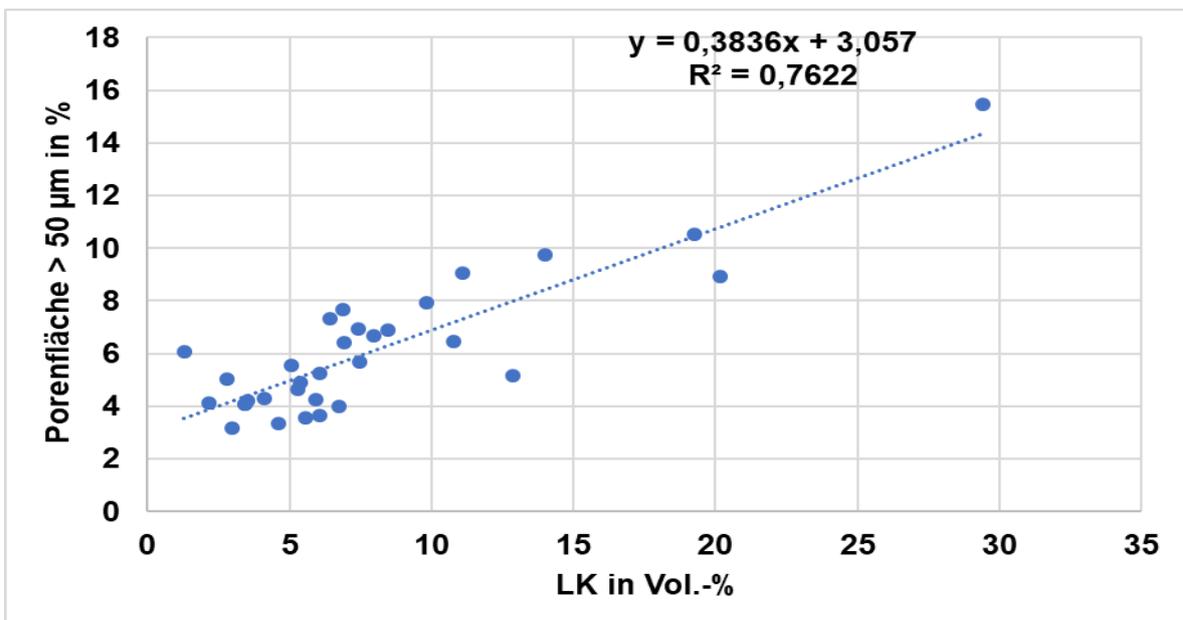


Abbildung 31: Zusammenhang von Porenfläche > 50 µm in % und Luftkapazität [Vol.-%] für Horizonte mit Tongehalten > 8 % (n=31).

Ein Abgleich zwischen nutzbarer Feldkapazität (nFK) und der Porenfläche zwischen 50 und 10 µm ist in Abbildung 32 dargestellt. Hier wird also nur ein Teil, des die nFK bestimmenden Porenraums betrachtet, denn die nFK umfasst sowohl die engen Grobporen (10 bis 50 µm) als auch die Mittelporen (2 – 10 µm). Das Bestimmtheitsmaß fällt mit 0,2607 deutlich geringer aus, da mit der quantitativen Analyse der Dünnschliffe die Porenflächen kleiner 10 µm nicht erfasst werden können.

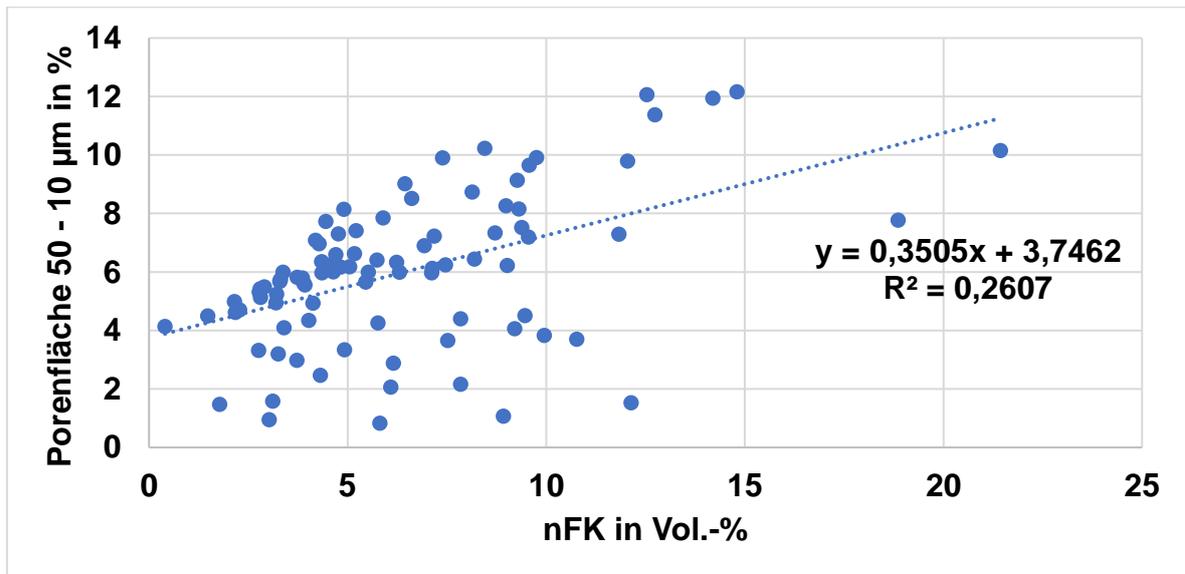


Abbildung 32: Darstellung der Porenfläche 50 - 10 µm in % in Darstellung zur nutzbaren Feldkapazität in Volumenprozent (n=90).

Diese Untersuchungen zeigen, dass zwischen den über die quantitative Analyse der Dünnschliffe ermittelten Porenflächen und den Kapazitätsgrößen, wie Gesamtporenvolumen, Luftkapazität und in Teilen auch der nutzbaren Feldkapazität Zusammenhänge nachgewiesen werden können bzw. die Mikroskopie Möglichkeiten zur Erfassung von Porensystemen bietet. Mit Funktionalitätsgrößen, die die Konnektivität des betrachteten Porenraums erfassen, können hingegen keine Zusammenhänge hergestellt werden: Analysen der gesättigten Wasserleitfähigkeit in vertikaler und horizontaler Fließrichtung zeigen keinerlei Zusammenhang zu den ermittelten Porenflächen.

6.1.3 Korrelation bodenphysikalischer Parameter und quantitativer Computertomographie

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, bietet die dreidimensionale Untersuchung mittels Röntgentomographie das Potential auch die Konnektivität der Poren zu untersuchen und damit die Funktionalität des Porensystems zu beurteilen.

Die Abbildung 33 untersucht den Zusammenhang zwischen der gesättigten Wasserleitfähigkeit in sowohl horizontaler als auch vertikaler Richtung der quantitativen und der aus der Auswertung computertomographischem Bildmaterials errechneten Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore.

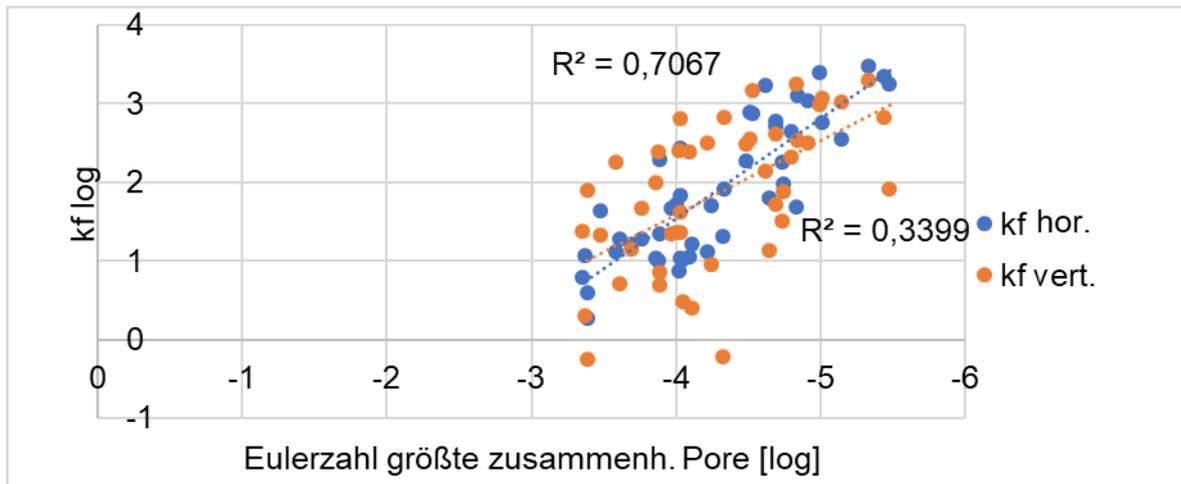


Abbildung 33: Zusammenhang zwischen horizontaler und vertikaler kf-Werte (n = 45) sowie der Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore drei Beprobungstiefen der in 2019 beprobten BDF-Standorte.

Es sind deutliche Zusammenhänge zwischen den kf-Werten und der logarithmisch dargestellten Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore erkennbar. Bei den hier dargestellten Werten handelt es sich um die Ergebnisse aus dem ersten Probenahmejahr, welche auf den Standorten der Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF) erhoben wurden. Insbesondere das Bestimmtheitsmaß zwischen den horizontal gemessenen kf-Werten zeigt mit 0,7067 sehr enge Zusammenhänge zur Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore auf.

Neben der Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore bildet die Makroporosität eine wichtige Kenngröße im Rahmen der computertomographischen Untersuchung. In Abbildung 34 wird der Zusammenhang zwischen Makroporosität, berechnet aus computertomographischen Bildmaterial, und der Luftkapazität, abgeleitet aus der Wasserretentionsbeziehung, dargestellt. Ein Bestimmtheitsmaß von 0,1803 deutet an, dass zwischen den Ergebnissen der Wasserretentionsuntersuchungen (pF/WG-Beziehung) aufgrund der hohen Variabilität der Struktur kein Zusammenhang zu den Röntgentomographischen Untersuchungen besteht. (Hinweis: in diesem Fall wurden Ergebnisse unterschiedlicher Stechzylinder betrachtet). Abzuwarten bleibt in diesem Zusammenhang, ob dies auch gilt, wenn Werte der pF/WG-

Beziehung und der Röntgentomographie an den gleichen Stechzylindern untersucht wurden.

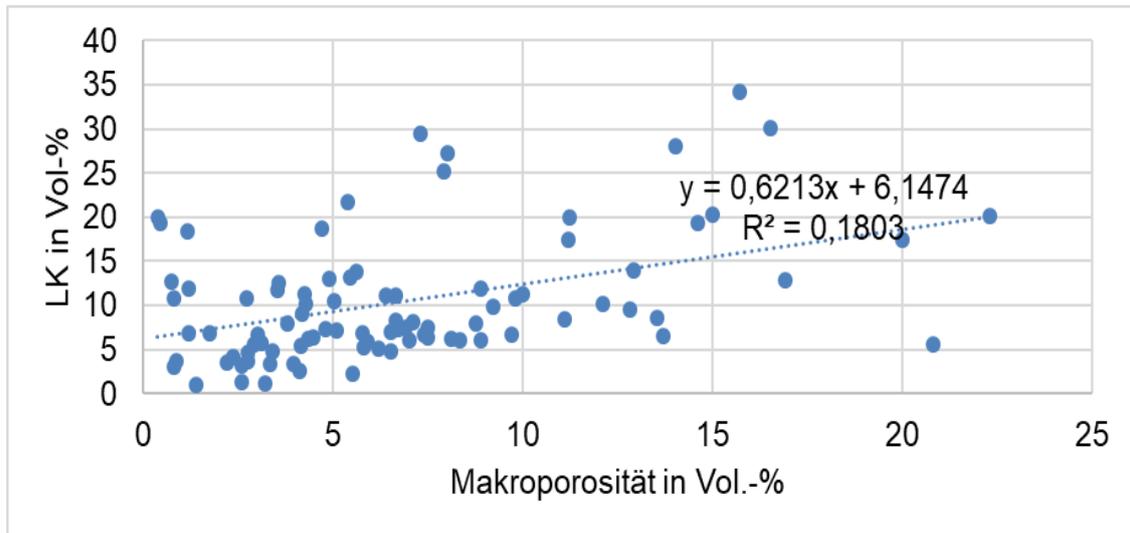


Abbildung 34: Zusammenhang zwischen Makroporosität [Vol. %] und Luftkapazität [Vol. %] für die 2019 beprobten BDF-Standorte in drei Entnahmetiefen Vol.-% (n=90).

Werden weiterführend nur die Standorte mit Tongehalten > 8 % betrachtet, ergibt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Luftkapazität und der Makroporosität, wie Abbildung 35 zeigt. Es wird damit deutlich, dass die wesentlich ausgeprägtere Struktur auf Böden mit Tongehalten > 8 % einen deutlich engeren Zusammenhang zwischen Makroporosität (aus den computertomographischen Untersuchungen) und Luftkapazität, abgeleitet aus der Wasserretentionsbeziehung, bewirkt.

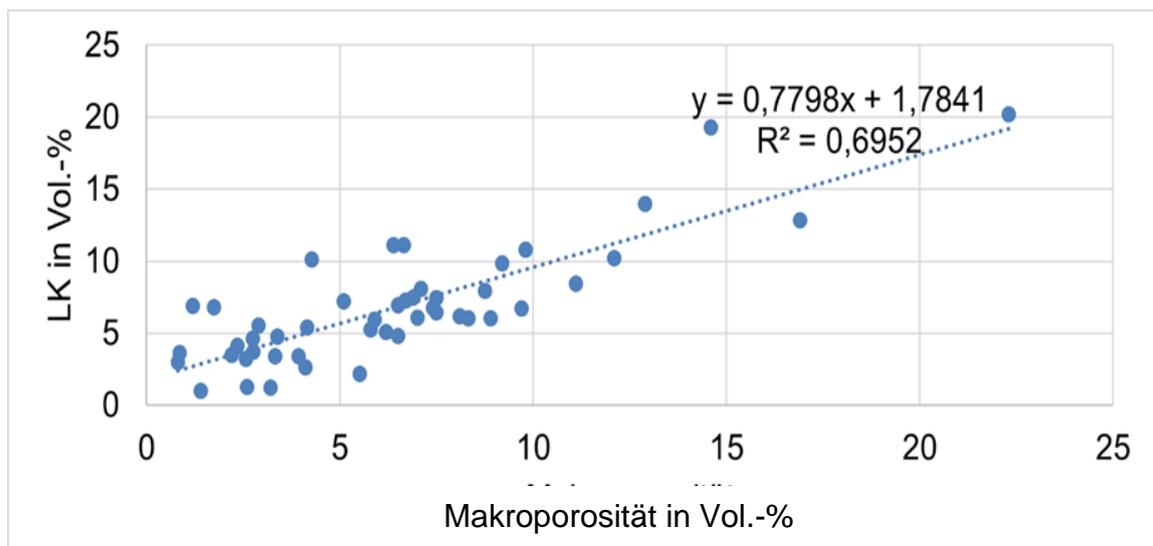


Abbildung 35: Zusammenhang zwischen Makroporosität [Vol. %] und Luftkapazität [Vol. %] für die in 2019 beprobten BDF-Standorte. Nur Horizonte > 8 % Ton (n=31).

6.1.4 Korrelation quantitative Mikroskopie und quantitative Computertomographie

Die bildanalytischen Methoden haben in einzelnen Bereichen Korrelationen zu bodenphysikalischen Parametern aufzeigen können. Im Folgenden wird untersucht, inwieweit die Ergebnisse der beiden Methoden übereinstimmen. Aufgrund der unterschiedlichen Größen in der Skalierung der bildanalytischen Methoden wird die gemeinsame Darstellung für Pixel-/Voxelkantlängen $> 50 \mu\text{m}$ getroffen. Anhand der Abbildung 36 zeigt sich, dass zwischen Porenfläche ($> 50 \mu\text{m}$) und der aus den computertomographischen Scans berechneten Makroporosität kein Zusammenhang besteht. Die Methoden führen also hinsichtlich der Abschätzung des weiten Grobporenanteils ($> 50 \mu\text{m}$) zu unterschiedlichen Ergebnissen. Auch in diesem Zusammenhang ist die große Variabilität der Bodenstruktur auf engstem Raum als Ursache zu vermuten. Zudem ist zu berücksichtigen, dass Poren nicht immer sphärisch sind, so dass die 2D-Abschätzung umso ungenauer wird, je stärker sich die Porenformen hin zu Rissen oder Röhren entwickeln.

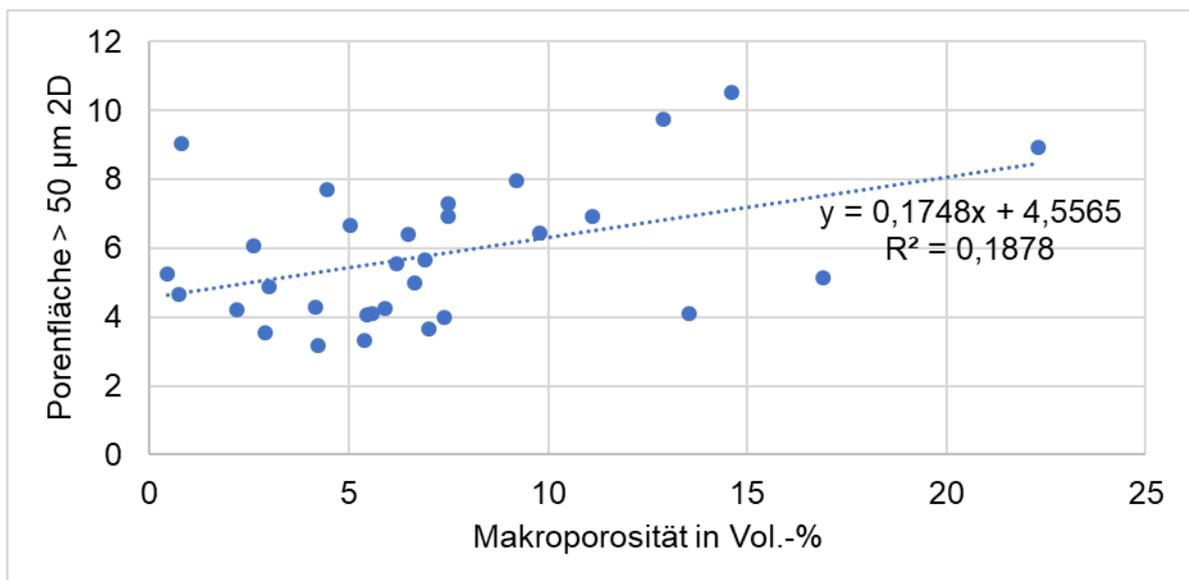


Abbildung 36: Vergleich der Porenfläche [%] $> 50 \mu\text{m}$ (Dünnschliffe) und Makroporosität [Vol. %] (CT-Scans) der 2019 beprobten BDF-Standorte aus der ersten und zweiten Entnahmetiefe. Nur Horizonte $> 8 \%$ Ton ($n=31$).

6.1.5 Korrelation bodenphysikalischer Eigenschaften und Ertragsparameter

Die bisherigen Untersuchungen lassen vermuten, dass Ertragsunterschiede in Teilen direkt auf die Ausprägung physikalischer Bodeneigenschaften zurückzuführen

sind. Mit Abbildung 37 wird der Versuch unternommen eine direkte Beziehung zwischen Ertragsgeschehen und der Funktionalität des Porensystems, quantifiziert durch die gesättigte Wasserleitfähigkeit, herzustellen. Auf der Ordinate ist die Ertragsdifferenz dargestellt. Sie ergibt sich aus den mehrjährig erhobenen Ertragsdaten eines Standortes. Wurde an einem Standort im ersten Jahr ein Ertrag gemessen, der im zweiten Jahr (jeweils verrechnet zu den Ergebnissen des Landessortenversuches) niedriger ausgefallen ist, so ergibt sich für diesen Standort im zweiten Jahr ein Ertragsdefizit und das Standortpotenzial des ersten Jahres (relativ = 100) wird unterschritten. Auf der Abszisse ist wiederum der Quotient des horizontalen zum vertikalen kf-Wert dargestellt.

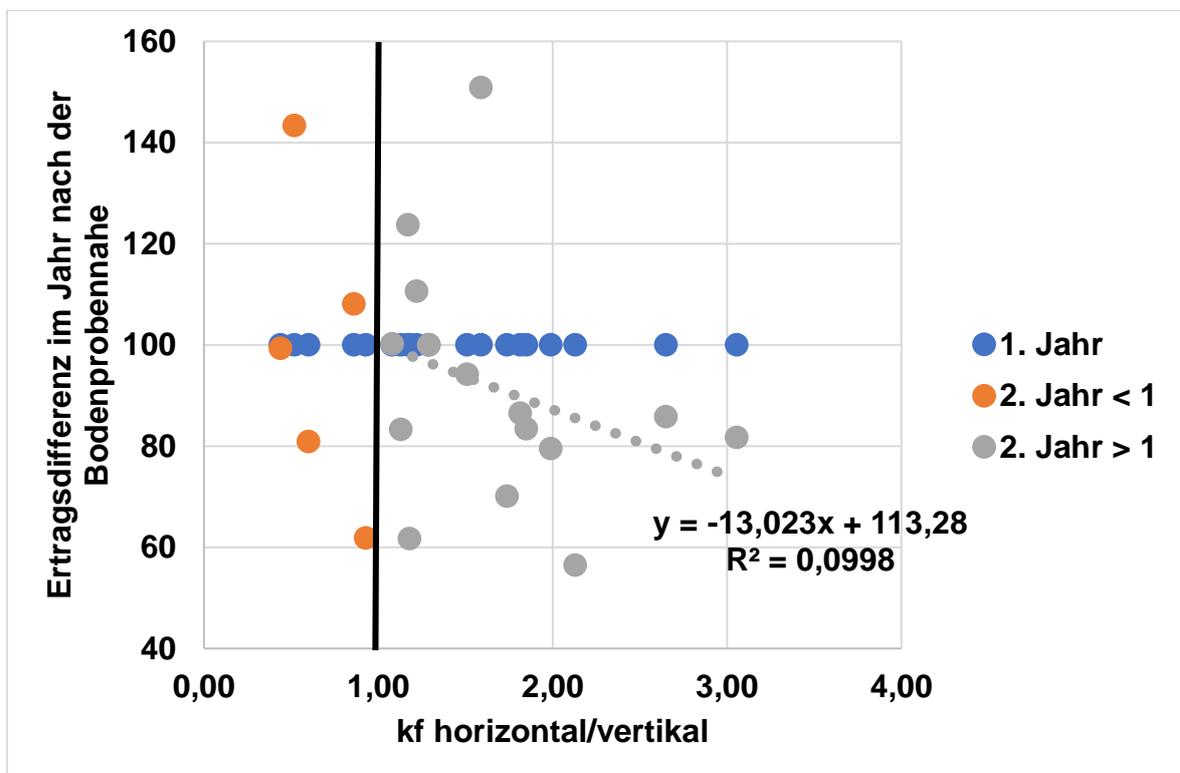


Abbildung 37: Einfluss der Ausrichtung des Porensystems auf die Ertragsbildung im Verlauf des untersuchten Zeitraums (n=45).

Die Abbildung 37 lässt keine generelle Aussage zu einem direkten Zusammenhang zwischen der Ausrichtung des Porensystems und dem Ertrag zu. Grundsätzlich zeigt sich jedoch, dass je stärker die horizontale Anisotropie ausgeprägt ist, desto eher ist im zweiten Jahr mit einem Rückgang der Erträge zu rechnen. Eine einfache Herleitung des Ertragsgeschehens an den untersuchten Standorten durch rein bodenphysikalische Parameter ist offensichtlich nicht möglich. Die teils sehr engen

Zusammenhänge zwischen den Erträgen und dem Müncheberger Soil Quality Rating (vgl. Kap. 5.6) sind neben der Bodenstruktur auch auf die Standortverhältnisse, Niederschlag, Nährstoffgehalte und -verfügbarkeiten sowie der Bewertung für standortspezifische Gefährdungspotenziale zurückzuführen.

7 Diskussion

7.1 Strukturzustand der Ackerböden in Schleswig-Holstein

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden Standorte auf Grundlage repräsentativer Bodentypen und deren Anteilen in den verschiedenen Naturräumen Schleswig-Holsteins ausgewählt. Für die Bewertung der Ergebnisse sind folgende Aspekte bedeutsam: a) Die Bewirtschaftungshistorie ist nur für einen Teil (BDF-Flächen) bekannt. Veränderungen der Bodenbearbeitung, Fruchtfolge und Düngung (mineralisch/organisch), die maßgeblichen Einfluss auf die Bodenstruktur haben (u.a. Teebrügge und Düring (1999), Wiermann et al. (2000), Chan (2011), Pöhlitz et al. (2018)) können somit nur begrenzt berücksichtigt werden. b) Mit der Probenahme wird nur ein sehr begrenzter Bereich der jeweiligen Fläche repräsentiert. Dies ist gerade im Hinblick auf die enorme Heterogenität der Bodenverhältnisse, die in Schleswig-Holstein auf engstem Raum anzutreffen sind, wichtig für die Einschätzung der Gesamtsituation. Zusätzlich ist in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen, dass besonders durch Bewirtschaftung beanspruchte Bereiche der beprobten Flächen (u.a. Vorgewende, Fahrspuren) bewusst von der Probenahme ausgeschlossen wurden. Somit kann sich aus den Ergebnissen kein vollständiges Bild für die Beurteilung des Bodenfruchtbarkeitszustandes der Testflächen ergeben. Dennoch ermöglicht der generierte Datensatz eine erste Einschätzung besonders des Strukturzustandes der Ackerböden in Schleswig-Holstein.

Die Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen zeigen zunächst, dass zwischen den sandigen Standorten der Geest auf der einen und den lehmigen bzw. schluffig-tonigen Standorten des östlichen Hügellandes sowie der Marsch differenziert werden muss. Während für die sandigen Standorte auf Grundlage der CVT-Methode nach Zink et al. (2011) nur auf wenigen Standorten (ca. 6%) in der 2. und 3. Tiefe eindeutige Anzeichen des Vorhandenseins von Schadverdichtungen festgestellt werden konnten, lagen auf den lehmigen (ca. 17 %) in der 2. Tiefe und besonders auf den schluffig-tonigen (ca. 67 %) Standorten in der 2. und 3. Tiefe diese Anteile deutlich höher. Auch die Analysen hinsichtlich der primären Ausrichtung des Porensystems zeigen, dass auf den schweren Standorten in der 2. Entnahmetiefe eine überwiegend horizontal ausgerichtete Anisotropie des Porensystems vorliegt. Für die schluffig-tonigen Standorte (überwiegend Marschen) konnte dies auch in

der 3. Tiefe nachgewiesen werden. Ein weiteres, in der Literatur (u.a. Horn et al. 2009, Wilke et al. 2009) häufig verwendetes Kriterium zur Einordnung des Bodenstrukturzustandes stellt der Grenzwert von $1,7 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ für die effektive Lagerungsdichte dar. Auch mit diesem Parameter konnten schädliche Strukturzustände in allen drei Entnahmetiefen für die untersuchten Standorte identifiziert werden. Zudem bestätigte diese Auswertung den bereits von Gebhardt et al. (2006) für Böden in Schleswig-Holstein publizierten Sachverhalt, dass die Lagerungsdichte nicht geeignet ist, um Schadverdichtungen (= Einschränkungen der Funktionalität der Bodenstruktur) eindeutig zu erkennen.

Neben der bodenphysikalischen Grundanalytik wurde sowohl im so genannten „Crushing-Test“ durch den Lastrahmen als auch im Nasssiebungsverfahren die Aggregatstabilität sämtlicher Standorte in drei Tiefen ermittelt. Für die Interpretation ist es bedeutsam, dass beide Methoden unterschiedliche Zielsetzungen verfolgen: Während der „Crushing-Test“ die mechanische Belastbarkeit von luftgetrockneten Aggregaten unterschiedlicher Größenfraktionen (2 – 4 mm, 4 – 8 mm, 8 – 16 mm) untersucht, wird mit Hilfe der Nasssiebung die Verschlammungsneigung überprüft, also unter feuchten Bedingungen gearbeitet. Das heißt, bei gleichzeitiger Anwendung beider Methoden können durchaus unterschiedliche Beurteilungen der Aggregatstabilität erfolgen.

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse des „Crushing-Tests“, dass kleine Aggregate stabiler als große Aggregate sind, zudem steigt die Aggregatstabilität mit dem Tongehalt deutlich an. Hinsichtlich der Strukturbeurteilung der untersuchten Standorte ist festzustellen, dass die Aggregatstabilität gegenüber mechanischen Belastungen in der 2. Entnahmetiefe tendenziell höher als in der 1. und 3. Tiefe ist. Diese Tendenz wird bei einer Differenzierung zwischen Standorten über bzw. unter 12 % Ton deutlicher, d.h. bei Standorte > 12 % Ton sind die Aggregate der 2. Entnahmetiefe stabiler bei mechanischer Belastung als diejenigen der 1. und insbesondere der 3. Tiefe.

Die Ergebnisse der Nasssiebung zeigen ein komplett anderes Bild, hier weisen die Aggregate der 2. Beprobungstiefe die höchste Verschlammungsneigung, das heißt die geringste Stabilität auf. Dieser Unterschied wird bei einer Differenzierung der Standorte in solche über bzw. unter 12 % noch deutlicher.

Gerade die ausgeprägte Differenzierung der Aggregatstabilität zwischen 1. und 3. Entnahmetiefe auf der einen und den Ergebnissen für die 2. Tiefe bei Tongehalten > 12 % deuten darauf hin, dass sich diese Bodenschichten im so genannten „Erstschrumpfungszustand“ befinden. Das bedeutet, dass durch mechanische Belastungen (u.a. Befahrung, Bearbeitung) kontinuierliche Aggregierungsprozesse durch Quellung und Schrumpfung, aber auch durch biologische Aktivität (u.a. Regenwurmtätigkeit, Wurzelwachstum), regelmäßig unterbrochen werden. Es ist bekannt, dass Struktureinheiten bei höheren Tongehalten im trockenen Zustand generell gegenüber mechanischer Belastung sehr stabil sein können, bei Wasseraufnahme aber durch den entstehenden Quellungsdruck leicht zerfallen. Dies gilt gerade für Aggregate im „Erstschrumpfungszustand“. Die höhere Belastbarkeit der Aggregate der 2. Tiefe ist durch die wiederholte mechanische Belastung dieser Bodenhorizonte durch direkte Überrollungen (u.a. Fahren in der Pflugfurche) und das Einwirken von Bearbeitungswerkzeugen zu erklären. Dies wird durch deutlich höhere Lagerungsdichten der 2. gegenüber der 1. Entnahmetiefe bestätigt.

Aus den bisher diskutierten Ergebnissen lässt sich zusammenfassend ableiten, dass besonders bei Böden mit über 12 % Ton eindeutige Anzeichen von Bodenschadverdichtungen im Übergang zwischen bearbeiteten und unbearbeiteten Bodenhorizonten nachgewiesen werden konnten. Diese wirken sich offensichtlich auch auf die Ertragsleistung der Standorte aus: Mit Hilfe des Müncheberger Soil Quality Ratings (MSQR) nach Müller et al. (2007) wird gezeigt, dass die Erträge auf den untersuchten Standorten mit abnehmendem MSQR sinken. Die auf globaler Ebene durch Müller et al. (2009) nachgewiesene positive Korrelation zwischen MSQR und Ertragspotenzial wird somit auf regionaler Ebene bestätigt. Wesentliche Grundlage dieses Indizes sind neben Standorteigenschaften (u.a. Grundwasserstand) und chemischen Bodeneigenschaften (u.a. pH-Wert, Nährstoffstatus) besonders Struktureigenschaften. Anhand von bodenphysikalischen Parametern nachgewiesene Schadverdichtungen in der 2. Entnahmetiefe wirken sich also im Untersuchungszeitraum (2019 – 2021) direkt auf das Ertragsgeschehen der untersuchten Standorte aus.

Kalkulationen von Latacz-Lohmann et al. (2021) gehen davon aus, dass im östlichen Hügelland zwischen 50.000 und 65.000 ha, das sind ca. 17 – 19 % der Acker-

fläche, schadverdichtet sind. Bei der Annahme, dass im östlichen Hügelland ausschließlich die Kulturarten Raps, Weizen und Gerste (nach Angaben der Kulturartenanteile des Statistikamtes Nord) angebaut werden, einer Ertragsdepression von 5 – 10 % auf den schadverdichteten Flächenanteilen und der in 2021 geltenden Preise für die Ernteprodukte dieser Feldfrüchte, kommen Sie auf jährliche Verluste zwischen 2,8 und 15 Mio €. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse des hier berichteten Forschungsvorhabens, ist davon auszugehen, dass die jährlichen Verluste in dieser Region durchaus im oberen Bereich der genannten Verlustspanne einzuschätzen sind, da die Probeentnahme, wie bereits oben angemerkt auf weniger belasteten Flächenbereichen durchgeführt wurde.

7.2 Anwendung von bildanalytischen Verfahren zur Beurteilung der Bodenstruktur

Methoden zur bildhaften Analyse von Bodenmaterial werden bereits seit vielen Jahrzehnten angewendet (Stoops, 2020). Hierbei haben sich zwei Methoden etabliert, anhand derer Zusammenhänge zu physikalischen Bodeneigenschaften untersucht werden. Munkholm et al. (2012) haben deutliche Korrelationen zwischen Ergebnissen der computertomographischen Untersuchungen und bodenphysikalischen Parametern feststellen können. Besonders starke Zusammenhänge ergaben sich zwischen dem Porenvolumen und der Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore. Nach Peth et al. (2010) ist die Methode der bildhaften Analyse von computertomographischen Aufnahmen in der Lage, den Einfluss von hydraulischen und mechanischen Belastungen in einem dynamischen Umfeld, welches durch Quellung und Schrumpfung geprägt ist, durch die Porenanalyse abzubilden. Aber auch in dem Bereich der Mikroskopie konnte anhand der Untersuchung von Bodendünnschliffen deutliche Zusammenhänge zu physikalischen Bodeneigenschaften hergestellt werden (u.a. Virto et al., 2005; Stoops, 2020). Nach Virto et al. (2005) bestehen enge Zusammenhänge zwischen der Porengrößenverteilung nach pf/WG und der Porosität aus mikroskopisch untersuchten Dünnschliffen.

Die im Rahmen der hier dargestellten Untersuchungen zur Erfassung der Bodenfruchtbarkeit auf Ackerböden in Schleswig-Holstein brachten einen starken Zusammenhang zwischen den bildanalytischen Methoden und der Porengrößenverteilung (vgl. Kap. 6.1.2 und 6.1.3) hervor, die die Erkenntnisse von Virto et al. (2005), Munkholm (2012) und Stoops (2020) in Verbindung zu diesen Kenngrößen untermauern.

Jedoch hat die große Bandbreite der Standorte und Bewirtschaftungsweisen auch gezeigt, dass ein allgemeiner Rückschluss von bodenphysikalischen Eigenschaften auf bildhaft erfasste Daten nicht über alle hier erhobenen Daten möglich ist. Enge Zusammenhänge zwischen visuellen Bodenstrukturmerkmalen (VESS) oder Aggregatstabilitätsparametern mit bildanalytischen Ergebnissen konnten nicht nachgewiesen werden. Auch Zusammenhänge zu Funktionalitätsparametern, wie der gesättigten Wasserleitfähigkeit, konnten nicht identifiziert werden. Die schwachen Zusammenhänge können u.a. damit begründet werden, dass die verschiedenen Parameter an unterschiedlichen Proben erhoben wurden und die Bodenstruktur von Natur aus sehr heterogen ausgeprägt ist.

Ein Vergleich der über die Dünnschliffe ermittelten Porenfläche $> 50 \mu\text{m}$ und der durch Auswertungen computertomographischer Scans berechneten Makroporosität zeigt unterschiedliche Ergebnisse. Zwar befinden sich die Werte auf einem vergleichbaren Niveau hinsichtlich des Anteils der Porenfläche an der Bodenmatrix, es zeigt sich jedoch, dass die Methoden an Standorten zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen und damit kein direkter Zusammenhang festgestellt werden konnte. Dies ist einerseits auf den bisher noch relativ geringen Stichprobenumfang je Standort zurückzuführen. Andererseits ist auch zu berücksichtigen, dass der Ausschnitt einer zweidimensionalen Betrachtung von Bodenmaterial auf einem $28 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$ großen Objektträger nicht die gleiche Repräsentativität aufweist, wie ein dreidimensionales Bild einer ungestörten Bodenprobe aus einem 100 cm^3 Stechzylinder

Die in der Literatur beschriebenen Untersuchungen (Virto et al. ,2005; Munkholm, 2012) wurden an einzelnen, bodenkundlich intensiv untersuchten Standorten durchgeführt, bei denen Bewirtschaftungsmaßnahmen im Detail dokumentiert sind und ebenfalls relativ homogene Bodenverhältnisse vorliegen. Dies gilt für die in diesem Vorhaben untersuchten Standorte nicht, da Bewirtschaftungsmaßnahmen, welche länger als 5 Jahre zurückliegen, unbekannt sind. Auch jahresbedingte Unterschiede scheinen Einfluss auf die Ergebnisse zu nehmen. Peth et al. (2010) hat den Einfluss von Quellung und Schrumpfung in der computertomographischen Untersuchung beschrieben. Nicht jeder Bodentyp ist in gleichem Maße zu dieser strukturbildenden Maßnahme fähig, da hierfür der Ton-, Humus- und Wassergehalt eine entscheidende Rolle spielen. Die verschiedenen Bodentypen sowie der jahreszeitliche Ef-

fekt sind in diesem Zusammenhang sehr entscheidend für die nur gering ausgeprägten Zusammenhänge zwischen den physikalischen Labormethoden und den bildanalytischen Verfahren.

7.3 Entwicklung eines Beratungstools

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Beratungstools zur schnellen Beurteilung des Bodenstrukturzustandes im Feld. Grundlage hierfür sollten Korrelationsanalysen zwischen sichtbaren Strukturmerkmalen auf verschiedenen Skalenebenen und der Ausprägung bodenphysikalischer Parameter sein. Die Überprüfung der Zusammenhänge zwischen einzelnen bodenphysikalischen Parametern hat ergeben, dass, auch nach Gruppierung der Daten in Standorte über bzw. unter 12 % Ton, nur wenige eindeutige Korrelationen auf Grundlage des vorliegenden Datensatzes nachgewiesen werden konnten. Lediglich für die Beziehung Luftkapazität und vertikaler gesättigter Wasserleitfähigkeit oder für den Zusammenhang Verschlammungsneigung (MWD) und vertikaler gesättigter Wasserleitfähigkeit für Standorte über 12 % Ton zeigen einen plausiblen positiven Korrelationskoeffizienten. Viele andere, aus der Literatur bekannte Zusammenhänge konnten nicht oder nur schwach nachgewiesen werden. Dies ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen: a) unterschiedliche, oft nicht bekannte Bewirtschaftung (u.a. Bodenbearbeitung, Fruchtfolge) b) die Probenahme erfolgte über einen Zeitraum von drei Jahren, so dass der Witterungseinfluss zu berücksichtigen ist c) Heterogenität der Standorte, dies gilt besonders für das östliche Hügelland d) während 33 Standorte einen Tongehalt unter 12 % Ton aufwiesen, gingen nur 12 Standorte mit höheren Tongehalten in die Grundgesamtheit ein. Ziel muss es daher sein, die Grundgesamtheit der Standorte sukzessive und möglichst über einen längeren Zeitraum zu erhöhen.

Als Grundlage der Strukturbeurteilung im Feld und auch Ausgangsmaterial für die Entwicklung eines erweiterten Beratungstools für die Ackerstandorte Schleswig-Holsteins/Norddeutschlands sollte das Bewertungsschema Visual Estimation of Soil Structure VESS nach Ball et al. (2007) für den Oberboden bzw. für den Unterboden das SubVESS Schema nach Ball et al. (2015) herangezogen werden. Die Hypothese in diesem Zusammenhang war, dass zwischen dem jeweiligen VESS-Score und der Ausprägung ausgewählter bodenphysikalischer Parameter ein direkter Zu-

sammenhang besteht und so mit Unterstützung weiterer quantitativer bildanalytischer Verfahren (2D Mikroskopie und 3D Computertomographie) von sichtbaren Strukturmerkmalen bzw. -formen bodenphysikalische Eigenschaften abgeleitet werden können. Die bisherige Auswertung lässt für Böden < 12 % Ton keinen bzw. nur schwach ausgeprägte Zusammenhang zu bodenphysikalischen Parametern erkennen. Für Böden > 12 % Ton konnte eine negative Korrelation zwischen VESS-Score und der Luftkapazität bzw. der vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeit nachwiesen werden. Das heißt für diese Böden ist ein hoher VESS-Score (schlechter Strukturzustand) mit abnehmender Luftkapazität bzw. gesättigter Wasserleitfähigkeit in vertikaler Richtung verbunden. Johannes et al. (2017) sind zu vergleichbaren Erkenntnissen gekommen: Im Freiland konnten sie keine engen Beziehungen zwischen VESS-Score und physikalischen Eigenschaften nachweisen. Lediglich mit der Beurteilung der Bodenstruktur an natürlich gelagerten Bodensäulen unter standardisierten Bedingungen (u.a. einheitlicher Wassergehalt) mit Hilfe der von ihnen entwickelten Core-VESS konnten engere Beziehungen erzielt werden. Somit wird deutlich, dass die von Ball et al. (2007, 2015) entwickelten VESS bzw. SubVESS Schemata nicht ausreichen, um von sichtbaren Merkmalen im Feld direkt auf konkrete Bodeneigenschaften zu schließen, bzw. diese ableiten und quantifizieren zu können.

8 Öffentlichkeitsarbeit

Tagungsbeiträge

Eurosoil 2021 (Online)

Müller, G., Wiermann, C., Peth, S., Fleige, H., Cordsen, E., Ormeno, J.: Evaluation Tool to determine soil structure effects on nutrient use efficiency (Posterbeitrag)

ISTRO 2022 (Tagung abgesagt)

Müller, G., Peth, S., Uteau, D., Ormeno, J., Fleige, H., Cordsen, E., Wiermann, C.: Correlation of visual soil evaluation characteristics with yield data and physical soil parameters (Posterbeitrag)

DBG Trier 2022

Cordsen, E., Müller, G., Fleige, H., Peth, S., Uteau, D., Wiermann, C.: Entwicklung eines Beratungstools zur Beurteilung der Bodenstruktur und Verbesserung der Nährstoffverfügbarkeit (Posterbeitrag)

Müller, G., Wiermann, C., Fleige, H., Peth, S., Uteau, D., Cordsen, E.: Abgleich physikalischer Bodenparameter mit der visuellen Bewertung der Bodenstruktur (VESS) auf schleswig-holsteinischen Ackerflächen zur Entwicklung eines Beratungs-Tools (Posterbeitrag)

Fleige, H., Mordhorst, A., Horn, R., Uteau, D., Peth, S., Cordsen, E., Müller, G., Wiermann, C.: Anisotropie der gesättigten Wasserleitfähigkeit verschiedener Bodentypen Schleswig-Holsteins (Posterbeitrag)

Uteau, D., Ormeno, J., Wiermann, C., Cordsen, E., Müller, G., Fleige, H., Peth, S.: Ableitung bodenphysikalischer Parameter von Dauerbeobachtungsflächen in Schleswig-Holstein anhand dreidimensionaler bildanalytischer Verfahren. (Posterbeitrag)

DBG Halle 2023

Wiermann, C., Müller, G., Peth, S., Fleige, H., Mordhorst, A., Uteau, D., Cordsen, E.: Untersuchungen zur Funktionalität der Bodenstruktur von Ackerstandorten in Schleswig-Holstein (Vortrag)

Praxistage

Praxistag Boden am 29.05.2022

Gemeinsame Veranstaltung von Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes SH, Christian-Albrechts- Universität zu Kiel und Fachhochschule Kiel

Teilnehmer: ca. 60 Personen (Berater:in, Praktiker:in, Lehrkräfte, Verwaltung).

Schwerpunkte:

- Bodenstruktur und Bodenwasserhaushalt
- Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit
- Praktische Bodenansprache

Vortrags- und Praxistag am 20.04.2023

Thema: Bodenstruktur: Erkennen – Beurteilen – Fördern

Das Programm (vgl. Anlage) ist am 8.04.2023 im Bauernblatt angekündigt worden.

Ein Bericht über die Veranstaltung ist im Bauernblatt am 20.05.2023 erschienen. (vgl. Anlage)

Teilnehmer: ca. 100 Personen (Praktiker:in, Berater:in, Wissenschaftler:innen)

Praxistag Boden am 10.05.2023

Gemeinsame Veranstaltung von Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes SH, Christian-Albrechts- Universität zu Kiel und Fachhochschule Kiel

Teilnehmer: ca. 60 Personen (Berater:in, Praktiker:in, Verwaltung)

Schwerpunkte:

- Ökologische Landbewirtschaftung
- Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit
- Anwendung/Demonstration von Feldmethoden
- Praktische Bodenansprache

Veröffentlichungen in Vorbereitung

Entwicklung eines Verfahrens zur quantitativen Porenanalyse mikroskopischer Untersuchungen an Bodendünnschliffen.

Untersuchungen zum Bodenstrukturzustand repräsentativer Ackerstandorte in Schleswig-Holstein und deren Ertragswirkung

Röntgentomographische Untersuchung von Bodenstrukturparametern und deren Bedeutung für physikalische Bodenfunktionen am Beispiel von Dauerbeobachtungsflächen in Schleswig-Holstein

9 Ausblick und weiteres Vorgehen

Die vorgestellten Untersuchungen von 45 repräsentativen Ackerstandorten in Schleswig-Holstein haben weiterführende Erkenntnisse hinsichtlich des Struktur- bzw. Fruchtbarkeitszustandes dieser Böden ergeben. Es konnten eindeutige Anzeichen von Bodenschadverdichtungen besonders im Übergang von bearbeiteten zu unbearbeiteten Bodenhorizonten nachgewiesen werden. Neben den, besonders für das östliche Hügelland typischen geogen und pedogen bedingten Verdichtungen des Unterbodens konnten zusätzliche, anthropogen verursachte Schadverdichtungen identifiziert werden. Somit konnten Untersuchungen von Mordhorst et al. (2020) sowie Schröder et al. (2023) in ihrer Aussage bestätigt und erweitert werden. Neben der Erkenntnis, dass Bodenschadverdichtungen in ackerbaulich genutzten Böden Schleswig-Holsteins offensichtlich verbreitet sind und besonders in Jahren mit extremen Witterungsverläufen teilweise enorme Ertragseinbußen bewirken können, zeigen die Ergebnisse, dass weiterführende Maßnahmen zur bodenschonenden Bodenbewirtschaftung erforderlich sind, um zusätzliche Schäden zu vermeiden. Dies gilt insbesondere mit Blick auf die Anpassung an den Klimawandel (u.a. Wasserverfügbarkeit), aktuelle sowie zukünftige Anforderungen an die Ressourcen-/Nährstoffeffizienz und nicht zuletzt auch im Hinblick auf die langfristige, in Teilen irreversible Wirkung von besonders Schadverdichtungen im Unterboden, wie von u.a. Hakansson und Reeder bereits 1994 publiziert.

Die Anwendung von quantitativen bildanalytischen Verfahren hat erneut gezeigt, dass diese Methoden in Ergänzung zur bodenphysikalischen Grundanalytik wertvolle weiterführende Erkenntnisse über den Strukturzustand von Böden liefern können. Während mit der Mikroskopie neben der bildhaften Darstellung und dem „Blick ins Detail“ lediglich Kapazitätsgrößen berechnet werden können, bietet die Computertomographie über Konnektivitätsanalysen die Möglichkeit, die Funktionalität der Bodenstruktur zu untersuchen. Neben der quantitativen Analytik sind diese Verfahren geeignet, um „Struktur“ sichtbar zu machen und damit ein neues sowie ergänzendes Verständnis für diesen wichtigen Baustein der Bodenfruchtbarkeit zu generieren.

Für die zukünftige Weiterentwicklung bzw. Anpassung bestehender Feldmethoden zur Beurteilung des Strukturzustandes von Böden in Schleswig-Holstein/Norddeutschland müssen folgende Erkenntnisse aus der bisherigen Auswertung der Projektdaten berücksichtigt werden: a) Eine Differenzierung der Standorte über den Tongehalt (unter/über 12 % Ton) ist notwendig. b) Der Wassergehalt des Bodens zum Zeitpunkt der Beurteilung muss in die Beurteilung besonders der tonreichen Standorte einfließen. c) Die optischen Feldbeurteilungen sollten auf den untersuchten Flächen über einen längeren Zeitraum wiederholt werden, um den Bewirtschaftungseinfluss berücksichtigen zu können. d) Die Grundgesamtheit der Standorte, besonders derjenigen > 12 % Ton sollte erweitert werden. e) Das umfangreiche Bildmaterial sollte bei der Ausgestaltung des Beratungstools genutzt werden, um möglichst viele Strukturzustände für den Anwender zugänglich zu machen. Das Grundschema des Beratungstools könnte, wie in Abbildung 42 dargestellt, aussehen.

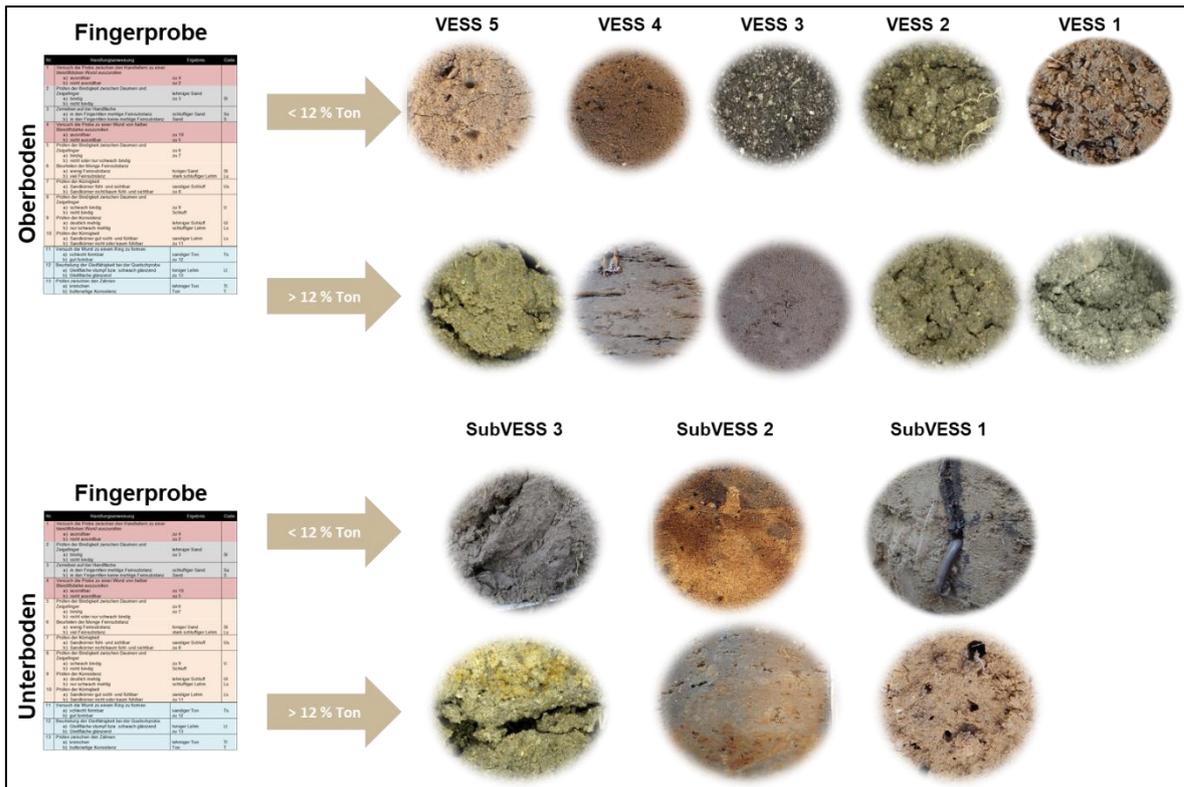


Abbildung 38: Entwurf eines Grundschemas für die Entwicklung eines erweiterten Beratungstools zur Beurteilung der Bodenstruktur im Feld für norddeutsche Böden.

Die im vorgestellten Forschungsvorhaben generierten Daten bieten einerseits die Möglichkeit, nach Abschluss der Auswertungen weiterführende Publikationen (vgl. Kapitel 8) in wissenschaftlichen Zeitschriften zu veröffentlichen. Andererseits werden die Erkenntnisse und Zusammenhänge auf Feldtagen mit Praktikern und Beratern weiterhin demonstriert und diskutiert. Wie in den vergangenen Jahren sind hierfür kombinierte Vortrags- und Praxistage in regelmäßigen Abständen vorgesehen. Ziel ist es das Beratungstool laufend zu ergänzen und weiterzuentwickeln.

10 Literatur

Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Alakukku, L., Elonen, P. (1995): Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. *Soil and Tillage Research*, 36, 141-152.

Alblas, J., Wanink, F., van den Akker, J., van der Werf, H.M.G. (1994): Impact of traffic-induced compaction of sandy soils on the yield of silage maize in The Netherlands. *Soil and Tillage Research*, 29, 157-165.

Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M. (2018): Scheffer/Schachtschabel – Lehrbuch der Bodenkunde. 17. Auflage, Springer Verlag.

Amézketa, E. (1999): Soil Aggregate Stability: A Review, *Journal of Sustainable Agriculture*, 14:2-3, 83-151, DOI: 10.1300/J064v14n02_08.

Arai, M., Uramoto, G.-I., Asano, M., Uematsu, K., Uesugi, K., Takeuchi, A., Morono, Y., & Wagai, R. (2019): An improved method to identify osmium-stained organic matter within soil aggregate structure by electron microscopy and synchrotron X-ray micro-computed tomography. *Soil and Tillage Research*, 191, 275-281. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.010>.

Arvidsson, J., Hakansson, I. (1991): A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 20, 319 – 332.

Arvidsson J., Håkansson, I. (2014): Response of different crops to soil compaction – Short-term effects in Swedish field experiments. *Soil and Tillage Research*, 138, 56-63.

Ball, B.C., Campbell, D.J., Douglas, J.T., Henshall, J.K., O'Sullivan, M.F. (1997): Soil structural quality, compaction and land management. *European Journal of Soil Science*, 593-601.

Ball, B.C., Batey, T., Munkholm, L.J. (2007): Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. *Soil Use and Management*, 23, 329 – 337.

Ball, B.C., Batey, T., Munkholm, L.J., Guimaraes, R.M.L., Boizard, H., McKenzie, D.C., Peigne, J., Tormena, C.A., Hargreaves, P. (2015): The numeric visual evaluation of soil structure (SubVESS) under agricultural production. *Soil and Tillage Research*, 148, 85 – 96.

Ball, B.C., Guimaraes, R.M.L., Cloy, J.M., Hargreaves, P.R., Shepherd, T.G., McKenzie, B.M. (2017): Visual soil evaluation: A summary of some applications and potential developments for agriculture. *Soil and Tillage Research*, 173, 114 – 124.

Batey, T., Guimaraes, R.M.L., Peigne, J., Boizard, H. (2015): Assessing Structural Quality for Crop Performance and Agronomy (VES, VSA, SOILpak, Profil Cultural, SubVESS). In: Ball, B.C., Munkholm, L.J. (eds.) (2015): *Visual Soil Evaluation: Realizing Potential Crop Production with Minimum Environmental Impact*. 15 – 30.

Baveye, P.C., Laba, M., Otten, W., Bouckaert, L., Dello, Sterpaio P., Goswami, R.R., Grinev, D., Houston, A., Hu, Y., Liu, J., Mooney, S., Pajor, R., Sleutel, S., Tarquis, A., Wang, W., Wei, Q., Sezgin, M. (2010): Observer-dependent variability of the thresholding step in the quantitative analysis of soil images and X-ray microtomography data. *Geoderma* 157, 51–63.

Berrezueta, E., Domínguez-Cuesta, M. J., Ordóñez-Casado, B., Medina, C., Molinero, R. (2016): Pore space quantification of sedimentary rocks before-after supercritical CO₂ interaction by optical image analysis. *Energy Procedia* 114 (2017) 4382-4393.

Beste, A. (2002): Weiterentwicklung und Erprobung der Spatendiagnose als Feldmethode zur Bestimmung ökologisch wichtiger Gefügeeigenschaften landwirtschaftlich genutzter Böden. Dissertation Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität Gießen.

Blume, H.-P., Brümmer, G. W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M., Thiele-Bruhn, S., Welp, G. (2010): Scheffer/Schachtschabel. *Lehrbuch Der Bodenkunde*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30942-7>.

Blume, H.-P., Stahr, K., Leinweber, P. (2011): *Bodenkundliches Praktikum*. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 3. Auflage.

- Blumenthal, B., Kirchmeier, H., Marx, M., Brandhuber, R., Demmel, M. (2016):** Regelspurverfahren im Ackerbau; LfL: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 9-51.
- Boizard, H., Peigne, J., Sasal, M.C., de Fatima Guimaraes, M., Piron, D., Tomis, V., Vian, J.-F., Cadoux, S., Ralisch, R., Filho, J.T., Heddadj, D., De Battista, J., Duparque, A., Franchini, J.C., Roger-Estrade, J. (2017):** Developments in the “profil cultural” method for an improved assessment of soil structure under no-till. *Soil and Tillage Research*, 173, 92 – 103.
- Bowman, A., Scott, B. (2009):** Water Use by Crops and Pastures in Southern NSW. NSW Industry and Investment Primefact 958. NSW Government, Orange, Australia.
- Bronick, C.J., Lal, R. (2005):** Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, 3 22.
- Chamen, W.C.T., Vermeulen, G.D., Campbell, D.J., Sommer, C. (1992):** Reduction of traffic-induced soil compaction: a synthesis. *Soil and Tillage Research*, 24, 303-318.
- Chan, K.Y. (2011):** Climate Change on Soil Structure and Soil Health: Impacts and Adaptation. In: Singh, B.P., Cowie, A.L., Chan, K.Y. (2011): *Soil Health and Climate Change*, Chapter 3, 49-67.
- Costantini, E. A. C., Carnicelli, S., Sauer, D., Priori, S. (2018):** Loess in Italy: Genesis, characteristics and occurrence. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.002>.
- Dexter, A.R. (1988):** Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*, 11, 299 – 238.
- DIN-EN-ISO 10930 (2015):** Bodenbeschaffenheit - Messung der Stabilität von Bodenaggregaten gegen Wasserbewegung (ISO 10930:2012); Deutsche Fassung EN ISO 10930:2013.
- Dorau, K., Uteau, D., Hövels, M. P., Peth, S., & Mansfeldt, T. (2022):** Soil aeration and redox potential as function of pore connectivity unravelled by X-ray microtomography imaging. *European Journal of Soil Science*, 73(1). <https://doi.org/10.1111/ejss.13165>

- Elliot, E.T., Coleman, D.C. (1988):** Let the soil work for us. *Ecol. Bull.*, 39, 23 – 32.
- Emmet-Booth, J.P., Forristal, P.D., Fenton, O., Ball, B.C., Holden, N.M. (2016):** A review of visual soil evaluation techniques for soil structure. *Soil Use and Management*, doi:10.1111/sum.12300.
- Emmet-Booth, J.P., Forristal, P.D., Fenton, O., Wall, D.P., Creamer, R.E., Holden, N.M. (2018):** Soil Structure A B C – A practical guide to managing soil structure. <https://www.teagasc.ie/>.
- FitzPatrick, E. A. (1993):** *Micromorphology of Soils*. Chichester. French, R.J., Schultz, J.E. (1984): Water use efficiency of wheat in a Mediterranean environment. II. Some limitations to efficiency. *Australian Journal of Agricultural Research*, 35, 765 – 775.
- Gautronneau, Y, Manichon, H. (1987):** *Guide Methodique du Profil Cultural*. <http://profilcultural.isara.fr/>.
- Gebhardt, S., Fleige, H., Horn, R. (2006):** Stress-deformation behavior of different soil horizons and their change in saturated hydraulic conductivity as a function of load. In: Horn, R.; Fleige, H.; Peth, S.; Peng, X. (Ed.): *Soil Management for Sustainability - Advances in Geoecology*. Vol. 38. Reiskirchen: Catena Verlag, 2006, pp 86-92. - ISBN 3-923381-52-2.
- Görbing, J. (1948):** *Die Grundlagen der gare im praktischen Ackerbau*. Band 1 und 2, Landbuch Verlag GmbH Hannover.
- Guimaraes, R.M.L., Lamande, M., Munkholm, L.J., Ball, B.C. (2017):** Opportunities and future directions for visual soil evaluation methods in soil structure research. *Soil and Tillage Research*, 173, 104 – 113.
- Håkansson, I., Voorhees, W.B., Elonen, P., Raghavan, G.S.V., Lowery, B., van Wijk, A.L.M., Rasmussen, K., Riley, H. (1987):** Effect of High Axle-Load Traffic on Subsoil Compaction and Crop Yield in Humid Regions with Annual Freezing. *Soil and Tillage Research*, 10, 259-268.
- Håkansson, I., Reeder, R.C. (1994):** Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. *Soil and Tillage Research*, 29, 277-304.

Hartge, K.H., Horn, R. (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. 4th Edition, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Ismail, S. N. A. (1975): Micromorphometric soil-porosity characterisation by means of electro-optical image analysis (Quantimet 720). Soil Survey Papers, No. 9, Netherlands Soil Survey Institute, Wageningen.

Johannes, A., Weisskopf, P., Schulin, R., Boivin, P. (2017): To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure? Soil and Tillage Research, 173, 24 – 32.

Kemper WD, Rosenau RC. (1986): Aggregate stability and size distribution. In: Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Agronomy Monograph 1986:425-442. Accessed February 3, 2013. <http://eprints.nwisrl.ars.usda.gov/732/>.

Kuzyakov, Y., Blagodatskaya, E. (2015): Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review. Soil Biology and Biochemistry, 83, 184 – 199.

Lal, R. (1991): Soil structure and sustainability. J. Sustain. Agric. 1, 67 – 92.

Latacz-Lohmann, U., Tietjens, F., Wiermann, C., Hartung, E., Winter, J.-P. (2021): Ökonomische Betrachtung der Vermeidung von Bodenverdichtungen durch landwirtschaftliche Nutzung. Abschlussbericht im Auftrag des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein.

Letey, J. (1991): The study of soil science or art. Aust. J. Soil Res., 29, 699 – 707.

LfL - Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2012): Bodenstruktur erkennen und beurteilen – Anleitung zur Bodenuntersuchung mit dem Spaten. Hrsg. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 6. Auflage.

LfULG - Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (2015): Leitfaden zur Humusversorgung – Informationen für Praxis, Beratung und Schulung.

Lucas, M., Vetterlein, D., Vogel, H., & Schlüter, S. (2021): Revealing pore connectivity across scales and resolutions with X-ray CT. European Journal of Soil Science, 72(2), 546-560. <https://doi.org/10.1111/ejss.12961>

McKenzie, D.C., Pulido Moncada, M.A., Ball, B.C. (2015): Reduction of Yield Gaps and Improvement of Ecological Function Through Local-to-Global Applications of Visual Soil Assessment. In: Ball, B.C., Munkholm, L.J. (eds.) (2015): Visual Soil Evaluation: Realizing Potential Crop Production with Minimum Environmental Impact. 31 – 48.

Mordhorst, A., Peth, S., Horn, R. (2014): Influence of mechanical loading on static and dynamic CO₂ efflux on differently textured and managed Luvisols. *Geoderma*, 2019 – 220, 1 -13.

Mordhorst, A., Fleige, H., Horn, R. (2016): Auswertung von Digitalen Datensätzen zu bodenphysikalischen Messungen an gestörten und ungestörten Bodenmaterialproben hinsichtlich des Status und Veränderungen der Bodenverdichtung durch landwirtschaftliche Nutzung in Schleswig-Holstein. Abschlussbericht im Auftrag des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (LLUR).

Mordhorst, A., Fleige, H., Burbaum, B., Filipinski, M., Horn, R. (2020): Natural and anthropogenic compaction in North Germany (Schleswig-Holstein): Verification of harmful subsoil compactions. *Soil Use Management* 2020, 00:1–14. <https://doi.org/10.1111/sum.12631>.

Mueller, L., Schindler, U., Behrendt, A., Eulenstein, F., Dannowski, R. (2007): Das Müncheberger Soil Quality Rating (SQR): ein einfaches Verfahren zur Bewertung der Eignung von Böden als Farmland. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 110 (2), 515–516.

Mueller, L., Kay, B.D., Hu, C., Li, Y., Schindler, U., Behrendt, A., Shepherd, T.G., Ball, B.C. (2009): Visual assessment of soil structure: Evaluation of methodologies on sites in Canada, China and Germany – Part 1: Comparing visual methods and linking them with soil physical data and grain yield of cereals. *Soil and Tillage Research*, 103, 178 – 187.

Mueller, L., Shepherd, G., Schindler, U., Ball, B.C., Munkholm, L.J., Hennings, V., Smolentseva, E., Rukhovic, O., Lukin, S., Hu, C. (2013): Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating. *Soil and Tillage Research*, 127, 74 – 84.

Munkholm, L. J., Heck, R. J., Deen, B. (2012): Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. *Geoderma* Vols 181-182.

Munkholm, L.J., Holden, N.M. (2015): Visual Evaluation of Grassland and Arable Management Impacts on Soil Quality. In: Ball, B.C., Munkholm, L.J. (eds.) (2015): *Visual Soil Evaluation: Realizing Potential Crop Production with Minimum Environmental Impact*. 49 – 65.

Otsu N. (1979): A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 9(1):62-66.

Pagenkemper, S. K., Peth, S., Uteau Puschmann, D., & Horn, R. (2013): Effects of root-induced biopores on pore space architecture investigated with industrial X-Ray computed tomography. In S. H. Anderson & J. W. Hopmans (Eds.), *Soil-water-root processes: Advances in tomography and imaging* (pp. 69-96). American Society of Agronomy.

Pagenkemper, S. K., Uteau, D., Peth, S., & Horn, R. (2014): Investigation of time dependent development of soil structure and formation of macropore networks as affected by various precrop species. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(2), 51-66. [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30006-X](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30006-X).

Peng, X., Horn, R., Hallett, P. (2015): Soil Structure and its function in ecosystems: Phase matter & scale. *Soil and Tillage Research*, 146, 1 -3.

Pessoa, T. N., Ferreira, T. R., Pires, L. F., Cooper, M., Uteau, D., Peth, S., Vaz, C. M. P., & Libardi, P. L. (2023): X-ray Microtomography for Investigating Pore Space and Its Relation to Water Retention and Conduction in Highly Weathered Soils. *Agriculture*, 13(1), Art. 1. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010028>.

Peth, S., Nellesen, J., Fischer, G., Beckmann, F., Horn, R. (2010): Dynamics of soil pore space structure investigated by X-ray microtomography. Conference: International Annual Meeting American Society of Agronomy/ Crop Science Society of America/ Soil Science Society of America 2009.

Peth, S., Chenu, C., Leblond, N., Mordhorst, A., Garnier, P., Nunan, N., Pot, V., Ogurreck, M., & Beckmann, F. (2014): Localization of soil organic matter in soil

aggregates using synchrotron-based X-ray microtomography. *Soil Biology and Biochemistry*, 78, 189-194. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.07.024>.

Pöhlitz, J., Rücknagel, J., Koblenz, B., Schlüter, S., Vogel, H.-J., Christen, O. (2018): Computed tomography and soil physical measurements of compaction behaviour under strip tillage, mulch tillage, no tillage. *Soil and Tillage Research*, 175, 205 – 2016.

Pohl, L., Kölbl, A., Uteau, D., Peth, S., Häusler, W., Mosley, L., Marschner, P., Fitzpatrick, R., & Kögel-Knabner, I. (2021): Porosity and organic matter distribution in jarositic phyto tubules of sulfuric soils assessed by combined μ CT and NanoSIMS analysis. *Geoderma*, 399, 115124. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115124>.

Pot, V., Peth, S., Monga, O., Vogel, L. E., Genty, A., Garnier, P., Vieublé-Gonod, L., Ogurreck, M., Beckmann, F., & Baveye, P. C. (2015): Three-dimensional distribution of water and air in soil pores: Comparison of two-phase two-relaxation-times lattice-Boltzmann and morphological model outputs with synchrotron X-ray computed tomography data. *Advances in Water Resources*, 84, 87-102. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.08.006>.

Rasmussen, K.J. (1999): Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil and Tillage Research*, 53, 3 – 14.

Richter, A., Hennings, V., Müller, L. (2009): Anwendung des Müncheberger Soil Quality Rationgs (SQR) auf bodenkundliche Grundlagenkarten. Tagungsbeitrag der DBG, Kommission V. DBG, September 2009, Bonn.

Riley, H. (1994): The effect of traffic at high axle load on crop yields on a loam soil in Norway. *Soil and Tillage Research*, 29, 211-214.

Roeb, J. (2022): Landessortenversuche Winterweizen 2022. Landwirtschaftskammer NRW, <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/getreide/winterweizen/winterweizen-sv-2022-protein.htm>.

Rogasik, J. (2005): Humusbilanz und Maßnahmen für optimale Humusgehalte. In: *Humus: Stoff zwischen Leben und Tod*. Vortrag. FAL, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Braunschweig.

- Scheffer, F., Schachtschabel, P. (1952):** Lehrbuch der Agrikulturchemie und Bodenkunde – 1. Teil Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart.
- Schröder, R., Fleige, H., Hasler, M., Horn, R. (2023):** Mechanical Soil Database – Part II: Dependence of air conductivity on soil texture, type, structure, and cohesion: Results from a database obtained over three decades. *Soil and Tillage Research* 231, <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105731>.
- Schüter, K. (2002):** Vergleich von Fruchtfolge- und Bodenbearbeitungssystemen im schleswig-holsteinischen Ackerbau auf dem Versuchsstandort Ostfeld der FH-Kiel. Endbericht eines Forschungsvorhabens von 1996 – 2002.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Denef, K. (2004):** A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79, 7 – 31.
- Stoops, G. (2020):** Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. 2. Edition. John Wiley & Sons, Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA. doi:10.2136/guidelinesforanalysis2.
- Taina, I. A., Heck, R. J., & Elliot, T. R. (2008):** Application of X-ray computed tomography to soil science: A literature review. *Canadian Journal of Soil Science*, 88(1), 1-19. <https://doi.org/10.4141/CJSS06027>.
- Teebrügge, F., Düring, R.A. (1999):** Reducing tillage intensity – a review of results from long-term study in Germany. *Soil and Tillage Research*, 53, 15 – 28.
- Tosche, K.U., Amelung, W., Gerzabek, M.H., Guggenberger, G., Klumpp, E., Knief, C., Lehndorff, E., Mikutta, R., Peth, S., Prechtel, A., Ray, N., Kögel-Knabner, I. (2018):** Microaggregates in soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 181, 104 - 136.
- Uteau, D., Horn, R., Peth, S. (2022):** Millimetre scale aeration of the rhizosphere and drilosphere. *European Journal of Soil Science*, 73(4). <https://doi.org/10.1111/ejss.13269>
- van Capelle, C., Schrader, S., Brunotte, J. (2012):** Bodenbearbeitung steuert phytopathogene Bodenorganismen und ihre Antagonisten. *Bodenschutz*, 7, 120 – 126.
- Virto, I., Imaz, M.J., Bescansa, P., Enrique, A. (2005):** Pore size distribution in relation to soil physical properties in two irrigated semiarid Mediterranean soils as affected by management. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, 03223, 2005.

VTI (von Thünen-Institut) und GKB (Gesellschaft für Konservierende Bodenbearbeitung) (2012): Einfache Feldgefügeansprache für den Praktiker. 3. Auflage.

Weyer, T., Boeddinghaus, R. (2016): Bestimmungsschlüssel zur Erkennung und Bewertung von Bodenschadverdichtungen im Feld. Hrsg.: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen und Fachhochschule Südwestfalen (Agrarwirtschaft Soest).

Wiermann, C (1998): Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lößbürtiger Ackerstandorte. Dissertation, Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Universität Kiel, Nr. 45, ISSN 0933-980 X.

Wiermann, C., Werner, D., Horn, R., Rostek, J., Werner, B. (2000): Stress/Strain Processes in structured unsaturated Luvisols under different tillage Treatments. Soil and Tillage Research, 53, 177 – 128.

Zink, A., Fleige, H., Horn, R., (2011): Verification of harmful subsoil compaction in loess soils. Soil and Tillage Research, 114, 127 – 134.

Zúñiga, F., Horn, R., Rostek, J., Peth, S., Uteau, D., & Dörner, J. (2019): Anisotropy of intensity–capacity parameters on Aquands with contrasting swelling–shrinkage cycles. Soil and Tillage Research, 193, 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.019>.

11 Anhang

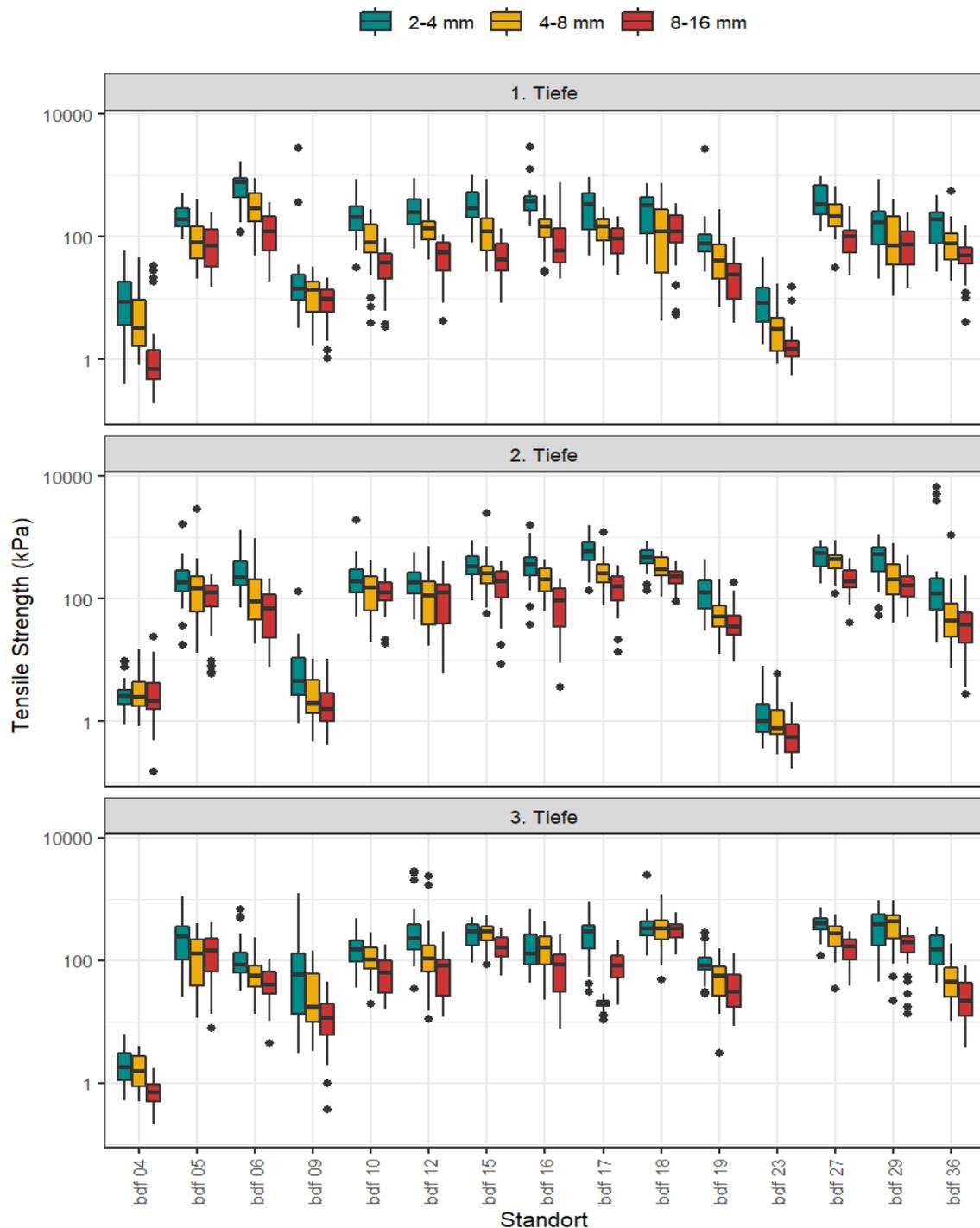


Abbildung 39: Zugfestigkeit (tensile strength) gemessen anhand von Crushing-Tests an luftgetrockneten Bodenaggregaten bei drei Größenklassen in 3 Tiefen der BDF-Standorte im Jahr 2019. Jede Kachel repräsentiert ca. 30 bis 35 Aggregate.

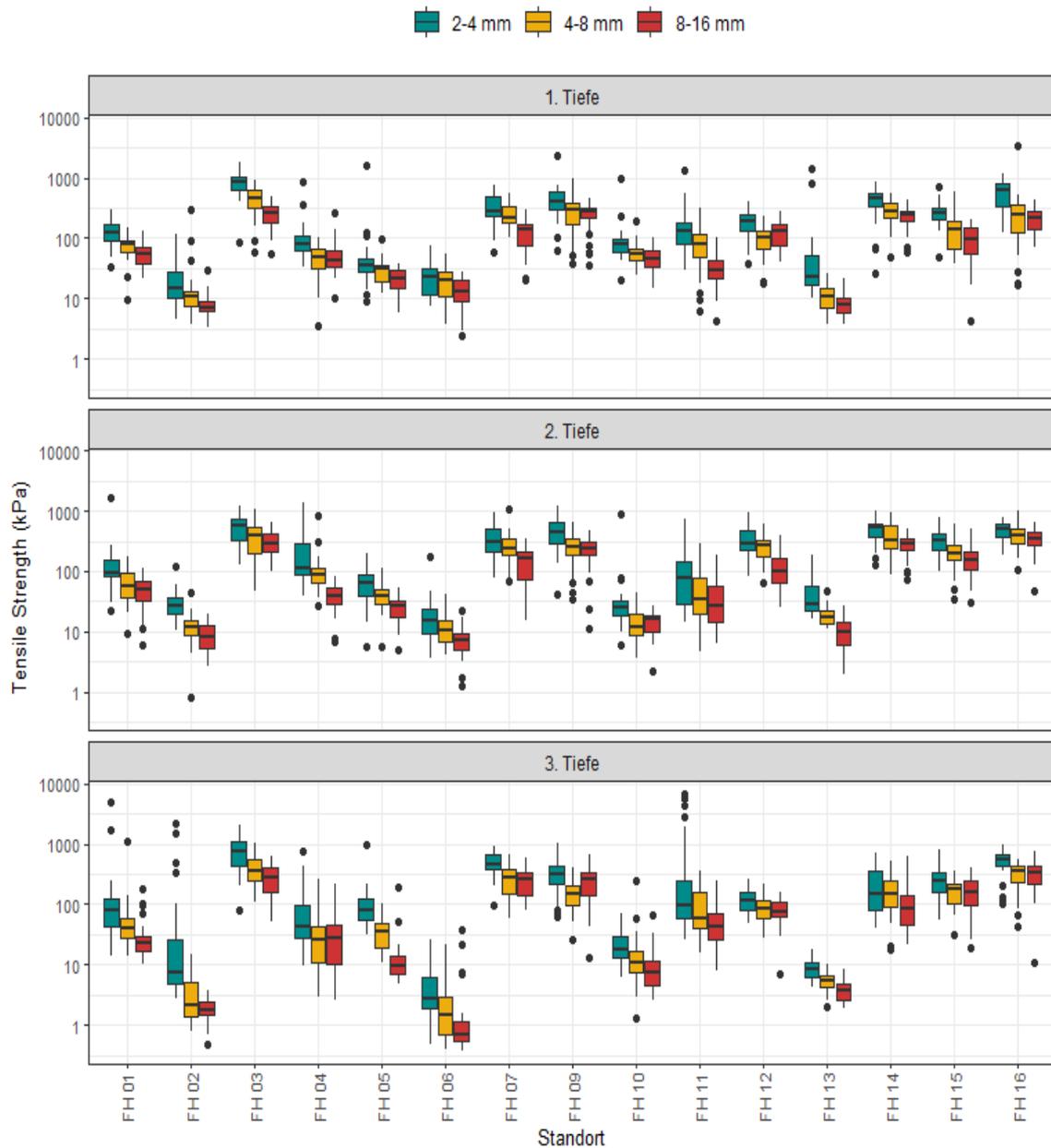


Abbildung 40: Zugfestigkeit (tensile strength) gemessen anhand von Crushing-Tests an luftgetrockneten Bodenaggregaten bei drei Größenklassen in 3 Tiefen der Probenahmestandorte im Jahr 2020. Jede Kachel entstand aus ca. 30 bis 35 Aggregate.

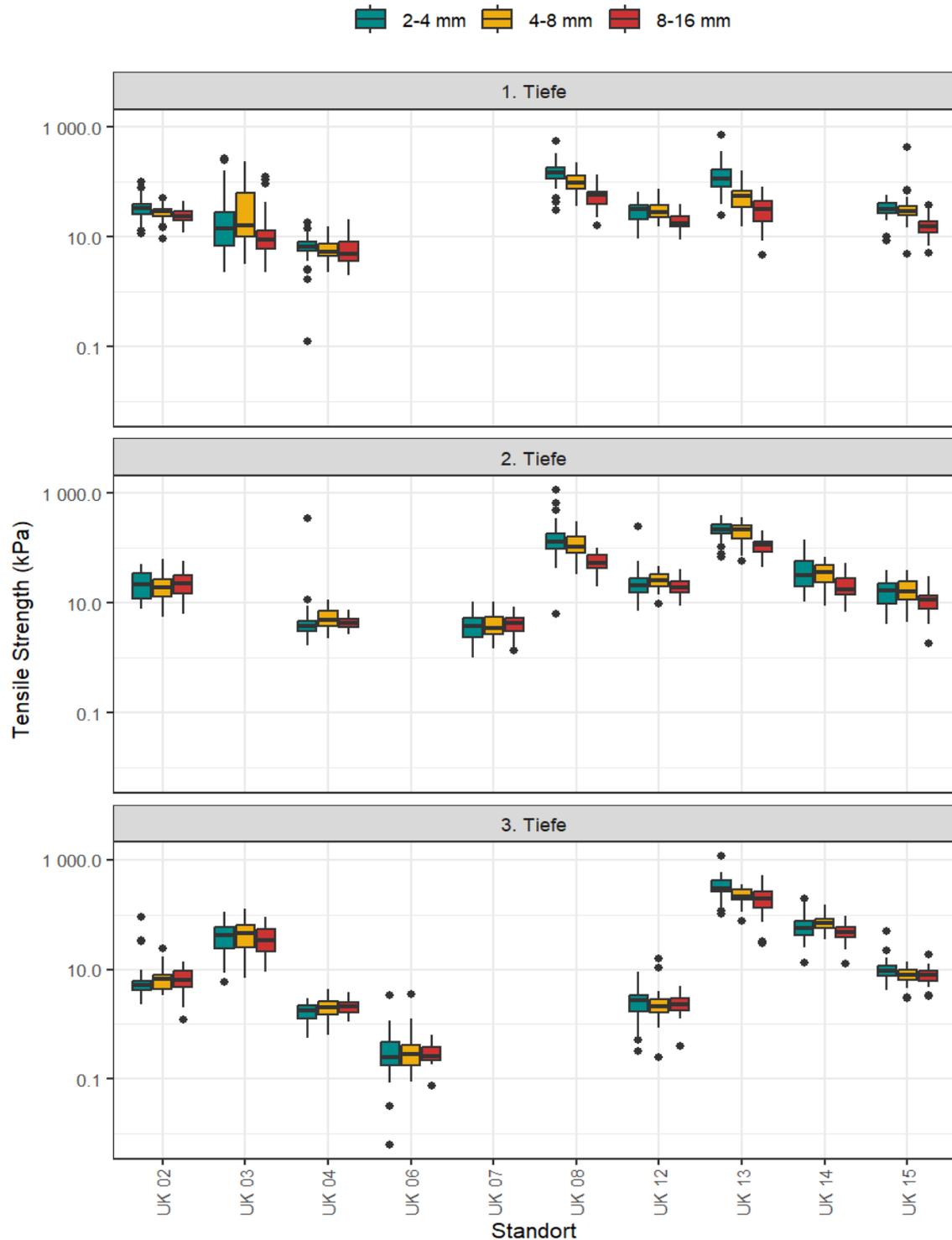


Abbildung 41: Zugfestigkeit (tensile strength) gemessen anhand von Crushing-Tests an luftgetrockneten Bodenaggregaten bei drei Größenklassen in 3 Tiefen der Probenstandorte im Jahr 2021. Jede Kachel repräsentiert aus ca. 30 bis 35 Aggregate.

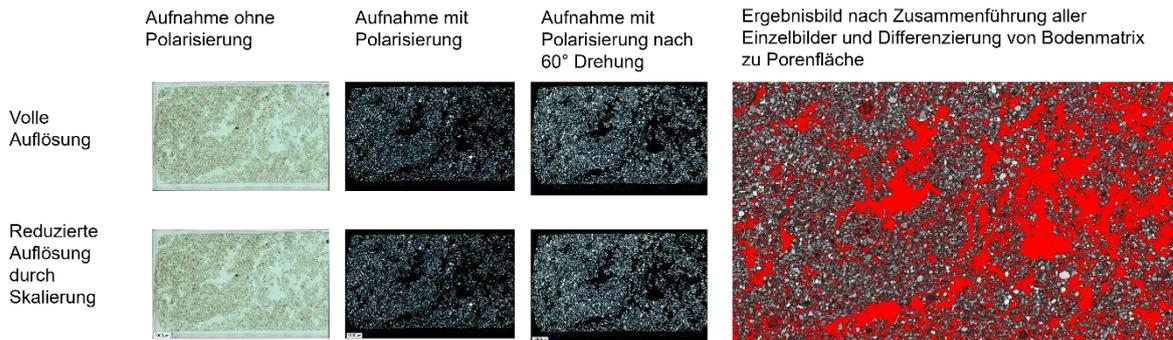


Abbildung 25: Visualisierung und Prozess der mikroskopischen Aufnahme von einem Dünnschliff aus der ersten Tiefe eines Standortes der Vorgeest, Bodentyp GG-PP. Im Ergebnisbild kennzeichnet die rote Farbe die Porenfläche.

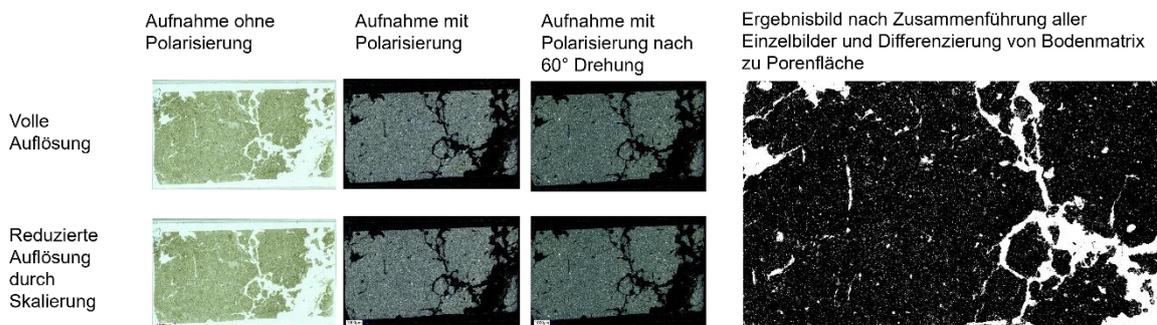


Abbildung 26: Visualisierung und Prozess der mikroskopischen Aufnahme von einem Dünnschliff aus der ersten Tiefe eines Standortes der Marsch, Bodentyp MCn. Im Ergebnisbild kennzeichnet die weiße Farbe die Porenfläche.

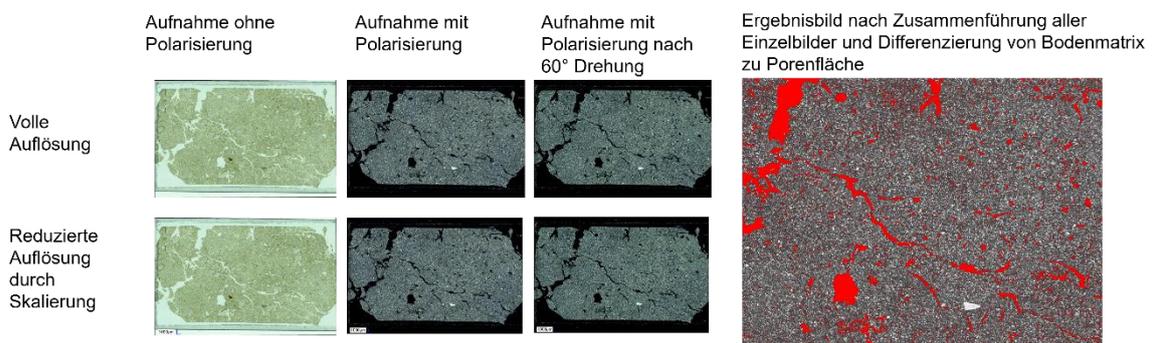


Abbildung 27: Visualisierung und Prozess der mikroskopischen Aufnahme von einem Dünnschliff aus der ersten Tiefe eines Standortes des östlichen Hügellandes, Bodentyp SS-LL. Im Ergebnisbild kennzeichnet die rote Farbe die Porenfläche.

Tabelle 5: Mittlere gewichtete Durchmesser (MWD) bei Nasssiebverfahren an den BDF-Standorte 2019.

Standort	Tiefe1	Tiefe2	Tiefe3
BDF 04	11,78	2,94	1,19
BDF 05	8,97	4,69	2,20
BDF 06	10,52	5,86	5,86
BDF 09	10,60	5,95	8,55
BDF 10	1,89	9,15	1,33
BDF 12	10,20	4,28	4,08
BDF 15	5,59	1,72	1,27
BDF 16	5,97	2,64	0,80
BDF 17	11,07	5,58	1,58
BDF 18	10,04	7,08	4,75
BDF 19	10,39	1,15	1,64
BDF 23	0,92	9,64	2,40
BDF 27	10,49	3,20	1,73
BDF 29	1,50	3,17	1,33
BDF 36	11,35	1,88	0,30

Tabelle 6: Mittlere gewichtete Durchmesser (MWD) bei Nasssiebverfahren an den Probennahmestandorten aus 2020.

Standort	Tiefe 1	Tiefe 2	Tiefe 3
FH 01	9,53	7,46	0,85
FH 02	11,85	11,53	5,90
FH 03	10,97	9,37	8,11
FH 04	3,31	7,09	1,63
FH 05	11,53	11,49	0,66
FH 06	11,81	11,62	0,36
FH 07	10,28	1,32	0,61
FH 09	2,31	1,13	3,23
FH 10	10,91	5,25	0,91
FH 11	4,35	1,22	4,01
FH 12	10,28	4,84	0,82
FH 13	5,62	8,47	3,86
FH 14	4,24	1,41	0,52
FH 15	7,68	1,18	0,51
FH 16	4,57	5,40	0,78

Tabelle 7: Mittlere gewichtete Durchmesser (MWD) bei Nasssiebverfahren an den Probennahmestandorte aus 2021.

Standort	Tiefe1	Tiefe2	Tiefe3
UK 01	8,16	11,80	0,53
UK 02	11,71	6,54	0,80
UK 03	4,34	NA	1,07
UK 04	7,90	NA	0,54
UK 05	4,79	9,46	0,40
UK 06	9,82	6,01	NA
UK 07	11,99	12,75	10,43
UK 08	8,51	2,88	0,46
UK 09	12,26	11,00	0,82
UK 10	9,35	11,46	0,83
UK 11	11,56	9,40	NA
UK 12	10,62	NA	3,38
UK 13	7,59	10,80	0,76
UK 14	9,23	8,60	0,74
UK 15	2,36	4,69	0,60

* bei den mit NA markierten Bereiche handelt es sich um Proben, die bedingt durch ihr äußerst geringe Stabilität (z.B. durch sehr hoher Sandanteil) nicht messbar waren.

Tabelle 8: Korrelationskoeffizient für Laborparameter der Standorte < 12 % in der 1. Tiefe (n= 45).

	Ton [%]	Sand [%]	Humus [%]	dB [g/cm ³]	GPV [Vol. %]	LK [Vol. %]	nFK [Vol. %]	kf vert. [cm/d]	kf hor. [cm/d]	MWD [mm]
Ton [%]	-									
Sand [%]	-	-								
Humus [%]	-0,27	0,28	-							
dB [g/cm ³]	-0,01	0,00	-0,43	-						
GPV [Vol. %]	0,04	0,13	0,35	-0,79	-					
LK [Vol. %]	-0,25	0,65	0,07	-0,25	0,42	-				
nFK [Vol. %]	-0,30	0,01	0,17	-0,27	0,18	-0,47	-			
kf vert. [cm/d]	0,26	0,12	-0,21	-0,30	0,35	0,47	-0,30	-		
kf hor. [cm/d]	-0,12	0,41	0,16	-0,11	0,01	0,25	0,18	0,20	-	
MWD [mm]	-0,16	0,13	0,14	-0,25	0,36	0,16	-0,22	0,11	-0,35	-

Tabelle 9: Korrelationskoeffizient für Laborparameter der Standorte < 12 % in der 2. Tiefe (n= 45).

	Ton [%]	Sand [%]	Humus [%]	dB [g/cm ³]	GPV [Vol. %]	LK [Vol. %]	nFK [Vol. %]	kf vert. [cm/d]	kf hor. [cm/d]	MWD [mm]
Ton [%]	-									
Sand [%]	-	-								
Humus [%]	-0,24	0,16	-							
dB [g/cm ³]	0,51	-0,35	-0,54	-						
GPV [Vol. %]	-0,33	0,15	0,46	-0,81	-					
LK [Vol. %]	-0,60	0,75	0,12	-0,29	0,19	-				
nFK [Vol. %]	0,64	-0,78	0,02	0,18	0,00	-0,95	-			
kf vert. [cm/d]	-0,39	0,60	0,01	-0,11	0,17	0,66	-0,63	-		
kf hor. [cm/d]	-0,40	0,58	0,00	-0,18	0,21	0,68	-0,63	0,83	-	
MWD [mm]	-0,61	0,42	0,25	-0,31	0,22	0,23	-0,25	0,24	0,20	-

Tabelle 12: Korrelationskoeffizient für Laborparameter der Standorte > 12 % in der 2. Tiefe (n= 45).

	Ton [%]	Sand [%]	Humus [%]	dB [g/cm ³]	GPV [Vol. %]	LK [Vol. %]	nFK [Vol. %]	kf vert. [cm/d]	kf hor. [cm/d]	MWD [mm]
Ton [%]	-									
Sand [%]	-	-								
Humus [%]	-0,18	-0,81	-							
dB [g/cm ³]	0,53	-0,46	0,28	-						
GPV [Vol. %]	0,06	-0,50	0,39	-0,55	-					
LK [Vol. %]	-0,15	0,09	0,06	0,05	-0,23	-				
nFK [Vol. %]	-0,26	0,26	-0,16	0,22	0,27	0,01	-			
kf vert. [cm/d]	-0,06	0,18	-0,33	0,19	-0,03	-0,65	0,15	-		
kf hor. [cm/d]	0,02	-0,13	0,40	-0,07	0,30	0,16	0,08	-0,15	-	
MWD [mm]	0,74	0,25	-0,57	0,03	0,05	-0,40	0,07	0,49	-0,10	-

Tabelle 14: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes Marsch in der 1. Tiefe (n=7).

	Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	Volumen größte Pore	Eulerzahldichte der Gesamtpore	Makroporosität	VESS	Log Eulerzahl	Porenfläche gesamt	Porenanteil > 50 µm	Porenanteil 50-10 µm	Porenanteil > 10 µm	Porenanteil < 10 µm
Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	-										
Volumen größte Pore	-0,48	-									
Eulerzahldichte der Gesamtpore	0,09	-0,44	-								
Makroporosität	-0,27	0,77	-0,65	-							
VESS	0,20	-0,24	0,02	-0,59	-						
Log Eulerzahl	0,39	-0,56	0,66	-0,71	0,27	-					
Porenfläche gesamt	-0,31	0,11	0,71	-0,30	0,15	0,51	-				
Porenanteil > 50 µm	-0,54	0,19	0,70	-0,12	-0,32	0,31	0,83	-			
Porenanteil 50-10 µm	-0,12	0,10	0,33	-0,31	0,45	0,65	0,79	0,44	-		
Porenanteil > 10 µm	-0,46	0,18	0,67	-0,21	-0,08	0,48	0,94	0,94	0,72	-	
Porenanteil < 10 µm	0,01	-0,03	0,59	-0,36	0,48	0,42	0,84	0,44	0,70	0,60	-

Tabelle 15: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes Marsch in der 2. Tiefe (n=7).

	Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	Volumen größte Pore	Eulerzahldichte der Gesamtpore	Makroporosität	VESS	Log Eulerzahl	Porenfläche gesamt	Porenanteil > 50 µm	Porenanteil 50-10 µm	Porenanteil > 10 µm	Porenanteil < 10 µm
Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	-										
Volumen größte Pore	-0,58	-									
Eulerzahldichte der Gesamtpore	0,36	-0,06	-								
Makroporosität	-0,71	0,77	0,13	-							
VESS	-0,43	-0,06	-0,05	0,19	-						
Log Eulerzahl	-0,37	0,20	0,59	0,49	-0,12	-					
Porenfläche gesamt	-0,36	0,43	-0,58	-0,10	0,02	0,32	-				
Porenanteil > 50 µm	0,36	-0,46	-0,39	-0,59	-0,67	0,25	0,29	-			
Porenanteil 50-10 µm	-0,11	0,65	-0,16	0,17	-0,01	0,40	0,85	0,10	-		
Porenanteil > 10 µm	0,28	0,09	-0,55	-0,48	-0,42	0,45	0,79	0,70	0,78	-	
Porenanteil < 10 µm	-0,56	0,47	-0,44	0,10	0,38	0,11	0,86	-0,13	0,64	0,37	-

Tabelle 16: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes Hohe Geest in der 1. Tiefe (n=12).

	Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	Volumen größte Pore	Eulerzahldichte der Gesamtpore	Makroporosität	VESS	Log Eulerzahl	Porenfläche gesamt	Porenanteil > 50 µm	Porenanteil 50-10 µm	Porenanteil > 10 µm	Porenanteil < 10 µm
Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	-										
Volumen größte Pore	-0,71	-									
Eulerzahldichte der Gesamtpore	0,96	-0,74	-								
Makroporosität	-0,89	0,86	-0,90	-							
VESS	-0,87	0,34	-0,78	0,56	-						
Log Eulerzahl	-0,14	0,14	-0,38	0,31	-0,10	-					
Porenfläche gesamt	0,51	-0,81	0,67	-0,79	0,14	-0,56	-				
Porenanteil > 50 µm	0,83	-0,65	0,73	-0,91	-0,27	0,01	0,48	-			
Porenanteil 50-10 µm	0,74	-0,54	0,73	-0,87	-0,15	-0,15	0,63	0,85	-		
Porenanteil > 10 µm	0,80	-0,61	0,75	-0,91	-0,23	-0,08	0,58	0,96	0,96	-	
Porenanteil < 10 µm	-0,46	-0,09	-0,23	0,31	0,38	-0,43	0,28	-0,67	-0,53	-0,62	-

Tabelle 17: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes Hohe Geest in der 2. Tiefe (n=12).

	Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	Volumen größte Pore	Eulerzahldichte der Gesamtpore	Makroporosität	VESS	Log Eulerzahl	Porenfläche gesamt	Porenanteil > 50 µm	Porenanteil 50-10 µm	Porenanteil > 10 µm	Porenanteil < 10 µm
Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	-										
Volumen größte Pore	-0,62	-									
Eulerzahldichte der Gesamtpore	0,96	-0,70	-								
Makroporosität	-0,83	0,86	-0,92	-							
VESS	-0,66	0,08	-0,43	0,18	-						
Log Eulerzahl	-0,40	0,83	-0,42	0,71	0,03	-					
Porenfläche gesamt	0,25	0,05	0,08	-0,16	-0,26	-0,13	-				
Porenanteil > 50 µm	-0,75	0,29	-0,84	0,63	0,09	0,23	0,43	-			
Porenanteil 50-10 µm	0,35	0,24	0,23	-0,19	-0,04	-0,06	0,72	-0,19	-		
Porenanteil > 10 µm	0,03	0,37	-0,12	0,07	0,02	0,07	0,92	0,37	0,84	-	
Porenanteil < 10 µm	0,42	-0,84	0,47	-0,51	-0,37	-0,45	-0,22	-0,03	-0,60	-0,59	-

Tabelle 18: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes Vorgeest in der 1. Tiefe (n=7).

	Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	Volumen größte Pore	Eulerzahldichte der Gesamtpore	Makroporosität	VESS	Log Eulerzahl	Porenfläche gesamt	Porenanteil > 50 µm	Porenanteil 50-10 µm	Porenanteil > 10 µm	Porenanteil < 10 µm
Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	-										
Volumen größte Pore	-0,23	-									
Eulerzahldichte der Gesamtpore	0,61	-0,91	-								
Makroporosität	-1,00	0,26	-0,63	-							
VESS	-0,79	0,77	-0,97	0,81	-						
Log Eulerzahl	-0,98	0,03	-0,44	0,97	0,47	-					
Porenfläche gesamt	0,33	0,84	-0,55	-0,30	0,21	-0,60	-				
Porenanteil > 50 µm	0,57	0,67	-0,30	-0,55	0,03	-0,50	0,62	-			
Porenanteil 50-10 µm	0,54	0,70	-0,34	-0,51	0,02	-0,29	0,77	0,28	-		
Porenanteil > 10 µm	0,56	0,68	-0,31	-0,54	0,03	-0,48	0,88	0,76	0,84	-	
Porenanteil < 10 µm	-0,47	0,97	-0,99	0,50	0,36	-0,50	0,72	0,15	0,33	0,30	-

Tabelle 19: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes Vorgeest in der 2. Tiefe (n=7).

	Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	Volumen größte Pore	Eulerzahldichte der Gesamtpore	Makroporosität	VESS	Log Eulerzahl	Porenfläche gesamt	Porenanteil > 50 µm	Porenanteil 50-10 µm	Porenanteil > 10 µm	Porenanteil < 10 µm
Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	-										
Volumen größte Pore	-0,30	-									
Eulerzahldichte der Gesamtpore	0,43	-0,99	-								
Makroporosität	-0,95	0,59	-0,69	-							
VESS	-0,51	0,97	-1,00	0,76	-						
Log Eulerzahl	0,37	0,77	-0,68	-0,06	0,06	-					
Porenfläche gesamt	0,29	0,83	-0,74	0,03	-0,09	0,74	-				
Porenanteil > 50 µm	-0,81	0,80	-0,87	0,96	0,30	0,73	0,29	-			
Porenanteil 50-10 µm	0,65	0,53	-0,41	-0,37	-0,08	0,38	0,82	-0,24	-		
Porenanteil > 10 µm	0,31	0,82	-0,73	0,01	0,07	0,74	0,96	0,26	0,88	-	
Porenanteil < 10 µm	-0,35	-0,79	0,69	0,04	-0,49	0,43	0,69	0,28	0,34	0,48	-

Tabelle 20: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes östliches Hügelland in der 1. Tiefe (n=19).

	Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	Volumen größte Pore	Eulerzahldichte der Gesamtpore	Makroporosität	VESS	Log Eulerzahl	Porenfläche gesamt	Porenanteil > 50 µm	Porenanteil 50-10 µm	Porenanteil > 10 µm	Porenanteil < 10 µm
Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	-										
Volumen größte Pore	-0,40	-									
Eulerzahldichte der Gesamtpore	0,44	-0,96	-								
Makroporosität	-0,58	0,79	-0,83	-							
VESS	0,06	0,36	-0,31	0,17	-						
Log Eulerzahl	-0,29	0,22	-0,28	0,54	0,14	-					
Porenfläche gesamt	-0,09	-0,04	-0,10	0,14	0,02	0,21	-				
Porenanteil > 50 µm	0,00	-0,08	0,04	0,19	0,15	0,33	0,49	-			
Porenanteil 50-10 µm	-0,04	0,19	-0,24	0,34	0,10	0,41	0,80	0,58	-		
Porenanteil > 10 µm	-0,02	0,09	-0,14	0,30	0,13	0,42	0,74	0,85	0,92	-	
Porenanteil < 10 µm	-0,11	-0,15	0,01	-0,13	-0,11	-0,14	0,69	-0,20	0,19	0,02	-

Tabelle 21: Korrelationskoeffizient für den Vergleich der bildanalytischen Methoden der Standorte des Naturraumes östliches Hügelland in der 2. Tiefe (n=19).

	Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	Volumen größte Pore	Eulerzahldichte der Gesamtpore	Makroporosität	VESS	Log Eulerzahl	Porenfläche gesamt	Porenanteil > 50 µm	Porenanteil 50-10 µm	Porenanteil > 10 µm	Porenanteil < 10 µm
Eulerzahl der größten zusammenhängenden Pore	-										
Volumen größte Pore	-0,39	-									
Eulerzahldichte der Gesamtpore	-0,02	-0,63	-								
Makroporosität	-0,51	0,91	-0,51	-							
VESS	0,40	-0,05	0,13	-0,17	-						
Log Eulerzahl	-0,31	0,47	-0,43	0,47	-0,16	-					
Porenfläche gesamt	0,13	0,03	-0,16	0,10	0,21	0,33	-				
Porenanteil > 50 µm	0,25	0,04	-0,18	0,06	0,33	0,40	0,83	-			
Porenanteil 50-10 µm	0,09	0,07	-0,09	0,12	0,32	0,13	0,88	0,70	-		
Porenanteil > 10 µm	0,19	0,06	-0,14	0,09	0,35	0,31	0,92	0,95	0,90	-	
Porenanteil < 10 µm	-0,17	-0,09	-0,13	0,10	-0,27	0,12	0,44	-0,05	0,18	0,05	-

Beitrag Bauernblatt 26.08.2021:

Bodenstruktur im Fokus

Definiert sich Bodenfruchtbarkeit über den Bodenstrukturzustand?

Schleswig-Holstein hat in diesem Jahr einen verregneten August erlebt. Viele Flächen sind bereits mit Winterraps bestellt und Vorbereitungen zur Getreideaussaat laufen. Wieso sollte sich in diesem Zusammenhang eine Diskussion zur Bodenstruktur entwickeln? Gerade bei Arbeiten unter feuchten Bodenverhältnissen besteht die Gefahr der Schädigung des Bodengefüges, die aus der geringen Tragfähigkeit des Bodens hervorgeht.

Landwirtschaftlich nutzbare Böden sind eine knappe Ressource, ihr Erhalt und Entwicklung hat die oberste Priorität in der Landwirtschaft. Schon lange wissen wir, dass sie nicht nur als Grundlage zur Nahrungsmittelproduktion dienen, sondern auch Lebensräume für die Artenvielfalt bieten. Weiterhin wird die Rolle der Böden zum Klimaschutz deutlich stärker in den Vordergrund gerückt.

Einfluss Bodengefüge

Für ein optimales Pflanzenwachstum stellt das Bodengefüge die Grundvoraussetzung dar. Dies lässt sich über viele Wege begründen. Zunächst gilt es, eine optimale Durchwurzelung des Bodens zu erreichen. Allerdings ist das nur in gut strukturierten Böden möglich. Wie lässt sich eine gute Bodenstruktur erkennen und ist es überhaupt möglich, schon im Herbst einen Anhaltspunkt zur Durchwurzelung zu bekommen, wenn die Pflanzen noch nicht weit entwickelt sind oder noch gar keine Aussaat stattgefunden hat?

Die Abbildung 1 zeigt einen Boden mit hohem Schluff- und Tongehalten einer Flussmarsch. Auf jeder Seite sind zwei Bilder dargestellt, die jeweils eine gute und eine schlechte Bodenstruktur für den „schweren“ Boden repräsentieren. Links sind Aufnahmen zu erkennen, welche nach der ersten Stoppelbearbeitung gemacht wurden. Die rechte Seite zeigt Bilder aus dem darauffolgenden Frühjahr von den gleichen Feldern. Ein erster offensichtlicher Unterschied bildet die Bodenfeuchte. Sie mindert die Stabilität der einzelnen Aggregate deutlich, weshalb sich der Boden leicht verformen und brechen lässt als dies in den meisten Sommermonaten der Fall ist. Die

Abbildung 1 verweist auf weitere, teils auch offensichtliche Parameter hin, die eine gute von einer schlechten Bodenstruktur unterscheiden lässt. Im Rahmen der Bodenbearbeitung kann ebenfalls auf eine gute fachliche Praxis verwiesen werden. Sofern diese beachtet wird, ist mit keiner negativen Beeinträchtigung der Bodenstruktur zu rechnen. Zeigen sich im Sommer bereits Merkmale, die auf einen schlechten Bodenzustand hindeuten, so ist es hier mit einer intensiveren Bearbeitung nicht getan.

Folgen einer zeitlich unangepassten Bodenbearbeitung

Ein typischer Begriff, der vermutlich jedem geläufig ist, ist der der Pflugsohle. Es handelt sich um eine Verdichtung des Bodens, die unterhalb der Bearbeitungstiefe des Pfluges liegt. Doch auch bei reduzierten Bearbeitungsverfahren können Verdichtungen in diesen Grenzschichten auftreten. Im Rahmen eines Verbundprojektes erfolgte die bodenphysikalische Untersuchung von 45 Standorten in Schleswig-Holstein. Ziel ist es dabei, ein Beratungstool zu entwickeln, das dem Anwender eine schnelle Einschätzung der Bodenstruktur im Feld ermöglicht und gleichzeitig wertvolle Hinweise zum Erhalt oder der Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit gibt. Auf einer Vielzahl verschiedener Böden wurden Profilgruben angelegt und in mehreren Tiefen Bodenproben entnommen. Berücksichtigung fanden auch die verschiedenen Bewirtschaftungssysteme der jeweiligen Ackerflächen.

Die Abbildung 2 zeigt Messwerte der Wasserleitfähigkeit in horizontaler (Abszisse) sowie vertikaler Richtung (Ordinate) für verschiedene Probennahmetiefen auf. Die lineare Funktion in dem Koordinatensystem stellt eine gleichmäßige Ausrichtung des Porensystems dar. Alle Werte darüber weisen ein vertikal ausgerichtetes Porensystem auf. Die Werte unterhalb repräsentieren Proben mit einem stärker horizontal ausgerichtetem Porensystem.

Handelt es sich automatisch um Bodenschadverdichtungen?

Nicht jede Verdichtung ist dabei gleich als schädlich zu interpretieren. Dies ist erst dann der Fall, wenn kritische Werte der Wasserleitfähigkeit und Luftkapazität unterschritten werden. Weiterhin ist auch der jeweilige Bodentyp zu berücksichtigen, da in manchen Fällen keine kritischen Werte erreicht werden, obwohl der Boden bereits stark verdichtet ist.

Welche Bedeutung hat eine ungleichmäßige Porenausrichtung/Verdichtung

Pflanzen benötigen Licht, Wasser und Nährstoffe zum Wachstum. Die Versorgung erfolgt insbesondere bei Nährstoffen und Wasser über den Boden. Verschiedene Aufnahmemechanismen der Pflanze ermöglichen die Aufnahme über das Wurzelwerk. Um das Potential vollumfänglich ausschöpfen zu können, muss der Boden so strukturiert sein, dass er intensiv von Wurzeln erschlossen werden kann. Die horizontale Ausrichtung des Porensystems führt bereits zu einer Unterbindung, die den Wassertransport behindert. Weiterhin nimmt die Durchwurzelungsintensität ab. Zwar werden im vorliegenden Fall häufig die Unterböden über Regenwurmgänge durchwurzelt, nicht jedoch der Zwischenraum, in dem noch pflanzenverfügbares Wasser und Nährstoffe gehalten werden.

Bodenbearbeitung an Standortverhältnisse anpassen

Bodenbearbeitungsverfahren unterscheiden sich in der Stärke und Intensität der Durchmischung. Nicht zuletzt werden aber auch phytosanitäre Gesichtspunkte stärker in den Fokus einer standortangepassten Bodenbearbeitung gerichtet. Nach der Ernte muss flächenspezifisch festgestellt werden, welche Form der Bodenbearbeitung nötig ist und welches Ziel dabei verfolgt wird. Spielen Bodenschadverdichtungen eine Rolle? Welche Beikräuter müssen mit der Bodenbearbeitung reguliert werden und ist hier der Einsatz des Pfluges wirklich erforderlich? Abschließend sollte jedoch die Frage darauf abzielen, mit welcher Form des Eingriffs eine optimale Bodenstruktur, auch in Grenzschichten, erreicht werden kann. Nutzen Sie Trockenphase zur Vorbereitung der Ackerflächen für die kommende Aussaat.

Fazit

Nutzen Sie die Möglichkeit, ihren Standort angepasst zu bearbeiten. Vergewissern Sie sich vorher über den Bodenstrukturzustand und legen Sie Ziele fest, die sich im Rahmen einer Bodenbearbeitung erreichen lassen. Zur praktischen Beurteilung von Bodenstruktur wird am 21.09.2021 ein Feldtag angeboten. Nähere Informationen entnehmen Sie der Veranstaltungsankündigung. Erste Ergebnisse des Projektes und Verfahren zur Beurteilung der Bodenstruktur werden am 21.09.2021 bei einem Feldtag auf der Versuchsstation „Lindenhof“ der FH-Kiel in Ostfeld vorgestellt.

Kontakt:

M.Sc. Gerrit Müller

Fachhochschule Kiel

Tel: 04331-845164

E-Mail: gerrit.mueller@fh-kiel.de

Abbildung 1: Visuelle Beurteilungen helfen um eine erste Einschätzung des Bodenzustandes vornehmen zu können.

Sommer



- hohe Durchwurzelung
- biologische Aktivität
- schnelle Rotte org. Erntereste
- erdiger Geruch
- keine „scharfen“ Kanten der einzelnen Aggregate

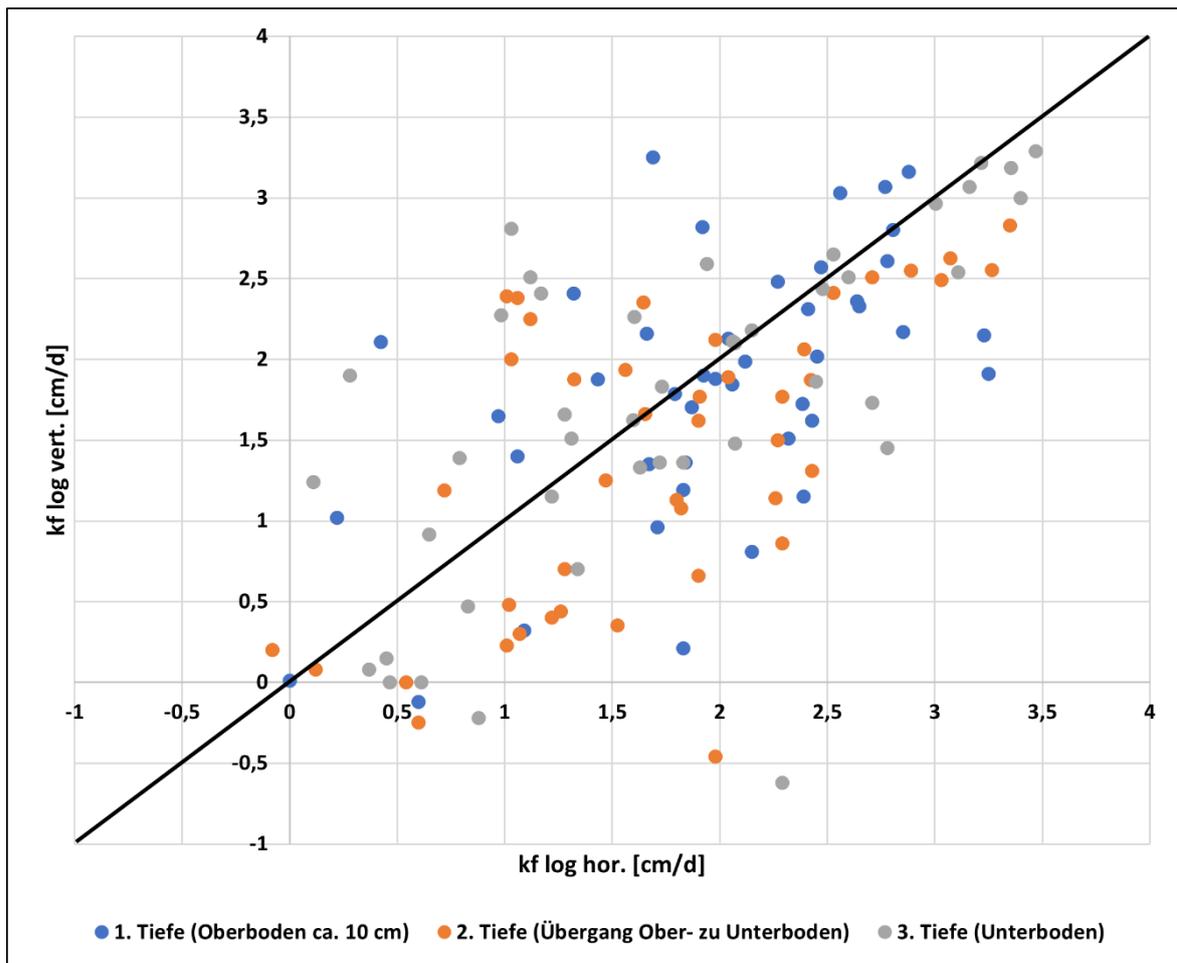


- geringe Durchwurzelung
- kaum Biologische Aktivität
- hoher Anteil org. Erntereste durch das Frühjahr hindurch
- modriger Geruch
- „scharfe“ Abbruchkanten der Aggregate

Frühjahr



Abbildung 2: Eine höhere Wasserleifähigkeit in horizontaler Richtung direkt unterhalb des Bearbeitungstiefe (Tiefe 2) deutet auf eine Störschicht hin.



Veranstaltungsankündigung:

Bodenstruktur im Fokus Feldtag auf der Versuchsstation „Lindenhof“ der Fachhochschule Kiel

Bodenstruktur ist einer der Schlüssel für den erfolgreichen Ackerbau. Hier kann man erfahren, welche Anpassungsstrategien im Rahmen der Bewirtschaftung nötig sind, um sowohl ein optimales Pflanzenwachstum zu garantieren als auch den gesellschaftlichen und umwelttechnischen Gesichtspunkten gerecht zu werden.

Vorträge:

1. „Vorhersage und Nachweis von Bodenverdichtungen in Schleswig-Holstein“ Dr. Heiner Fleige, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde
2. „Die Rolle von Wurzeln für die Strukturbildung und Erschließung von Nährstoffen im Boden“ Prof. Dr. Stephan Peth, Leibniz Universität Hannover, Institut für Bodenkunde
3. „Effekte von Bodenschadverdichtungen sowie die Beurteilung von Bodenstruktur unter Berücksichtigung diverser Laborparameter“ Gerit Müller, Fachhochschule Kiel, Fachbereich Agrarwirtschaft

Die inhaltliche Führung und anschließende Diskussion wird von Herrn Prof. Dr. Conrad Wiermann geleitet.

Im Anschluss an die Vorträge erfolgt ein vom LLUR geführter Praxisteil, bei dem die Beurteilung von Bodenstruktur anhand verschiedener Feldmethoden dargestellt wird.

Wann? 21.09.2021, 14:00 bis ca. 17:00 Uhr

Wo? Versuchsfeld „Lindenhof“,
24790 Ostenfeld

Bodenstruktur im Fokus

Was? Vorträge mit Praxisteil im Feld zur Einschätzung der Bodenstruktur

Wann? 21.09.2021, 14:00 bis ca. 17:00 Uhr

Wo? Versuchsfeld „Lindenhof“,
24790 Ostenfeld

Die Veranstaltung ist kostenlos!

Im Rahmen der Einhaltung nötiger Maßnahmen zur Eindämmung der Corona-Pandemie bedarf die Teilnahme an der Veranstaltung einer Anmeldung. Die Teilnehmerzahl ist auf 50 Personen begrenzt.

Anmeldung bei Herrn Gerrit Müller (Tel.: 04331 845-164 oder E-Mail: gerrit.mueller@fh-kiel.de)

FACHHOCHSCHULE KIEL
University of Applied Sciences

CAU
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

UNI KASSEL
VERSITÄT

SH
Schleswig-Holsteinische
Landesanstalt für
Landwirtschaft, Umwelt
und ländliche Räume

DBU
Deutsche Bundesanstalt für
Umwelt

Beitrag Bauernblatt 17.03.2022:

Regelmäßige Bodenstrukturbeurteilung im Frühjahr vornehmen

Bodenstruktur jetzt beurteilen!

Die zentrale Rolle für fruchtbare und ertragsfähige Böden geht von der Bodenstruktur aus. Mit den zahlreichen Einflüssen auf Luft-, Wasser-, Wärme- und Nährstoffhaushalte ist die Beurteilung ihres Zustands von besonderer Bedeutung. Um konkrete Aussagen zur Bodenstruktur tätigen zu können, ist der Zeitpunkt, der für die Beurteilung der Bodenstruktur gewählt wird, entscheidend.

Eingeschränktes Pflanzenwachstum, eine verminderte Durchwurzelung, reduzierte Drainage und Erosion oder ausbleibende kapillare Nachlieferungen können durch eine beeinträchtigte, nicht funktionale Bodenstruktur hervorgerufen werden. Daher müssen sich Landwirte sowie Berater kritisch und regelmäßig mit dem Zustand auseinandersetzen.

Bodenstrukturbeurteilung im Frühjahr

Der Boden ist sowohl Witterungseinflüssen als auch der Bodenbearbeitung ausgesetzt, weshalb sich die Struktur im Verlauf eines Jahres mehrmals ändert. Besonders in der Krume treten diese Veränderungen häufig in Erscheinung, aber auch im Unterboden lassen sich Transformationsprozesse beobachten. Als besonders geeignet für eine Untersuchung der Bodenstruktur gilt das Frühjahr. Die herbstlich-, winterliche Niederschlagsperiode ist überwunden und der über diesen Zeitraum abgesetzte Boden konnte, insbesondere in den vergangenen zwei Monate, einige Wasserreserven auffüllen. Die Beurteilung sollte bei Feldkapazität durchgeführt werden. Im Fachjargon beschreibt dies denjenigen Zustand, bei dem der Boden noch leicht feucht, aber nicht zu trocken ist. Neben den Niederschlägen wird dieser Zustand aber auch vom Bedeckungsgrad des Bodens durch pflanzlichen Aufwuchs und dem Bodentyp beeinflusst, weshalb Regionen individuell betrachtet werden müssen, um den passenden Zeitpunkt für eine Beurteilung zu treffen. Von Ende März bis in den April hinein ist die Feldkapazität in der Regel auf allen schleswig-holsteinischen Böden vorzufinden.

Rückschlüsse auf Bodenbearbeitung

Die Bodenruhe, die der Beurteilung im Frühjahr vorausgeht, hat dazu geführt, dass sich der Boden setzen konnte und bodeninterne Strukturierungsprozesse eingeläutet wurden. In dieser Zeit erfolgte keine Form der Bodenbearbeitung, weshalb die Beurteilung mehrere Zwecke erfüllen und Fragestellungen beantworten kann:

- Status quo des Bodens vor der Frühjahrsaussaat
- Erfolg der Bodenbearbeitung im Herbst
- Identifikation von Bodenschadverdichtungen

Beurteilungskriterien

Für eine objektive Beurteilung von Bodenstruktur sind Beurteilungskriterien erforderlich, anhand derer auch eine abschließende Klassifizierung erfolgen kann. Hierzu sollte das einfach anzuwendende, international anerkannte System zur visuellen Bodenstrukturbeurteilung (VESS) herangezogen werden, welches in der Abb. 1 dargestellt ist. Bereits seit 2007 ist die Beurteilung nach VESS, die von renommierten, weltweit forschenden Wissenschaftlern erstellt wurde, verfügbar und kann sowohl auf den Unterboden (SubVESS) als auch auf Grünland (GrassVESS) angewendet werden. Die im „App Store“ und im „Google Play Store“ verfügbare App hilft bei der Beurteilung der Bodenstruktur und leitet den Anwender durch die aufeinander aufbauenden Schritte zu einer objektiven Beurteilung. Diese erfolgt nach dem Schulnotensystem (1-sehr gut; 5-ungenügend). Die in der Abb. 2 dargestellte Grafik stellt die Korrelation zwischen der Bodenstrukturbeurteilung (VESS-Score) und der Luftkapazität an ausgewählten Standorten in Schleswig-Holstein dar. Die Luftkapazität ist ein wichtiger Funktionsparameter, der den Anteil der Grobporen eines Bo-

dens bestimmt, über die der Luftaustausch und die schnelle Wasserleitung (Drainung) erfolgt. Sobald der kritische Grenzwert von < 5 Vol.-% unterschritten wird, gilt die Porenfunktion und damit auch die Bodenstruktur als gestört. Ab einem VESS-Score von $\sim 3,4$ besteht anhand der Ergebnisse ein möglicher Hinweis auf gestörte Bodenfunktionen.

Fazit:

Die regelmäßige Bodenstrukturbeurteilung erleichtert die Entscheidung über die Notwendigkeit nachfolgender Bearbeitungsschritte und mögliche Potentiale zur Verbesserung der Bodenstruktur. Wiederkehrende Überprüfungen im Zusammenhang mit Standortkenntnissen erleichtern die Einordnung der Ergebnisse und zeigen individuelle Chancen zu Verbesserung und Entwicklung der Standorteigenschaften auf.

Kontakt:

M.Sc. Gerrit Müller

Fachhochschule Kiel

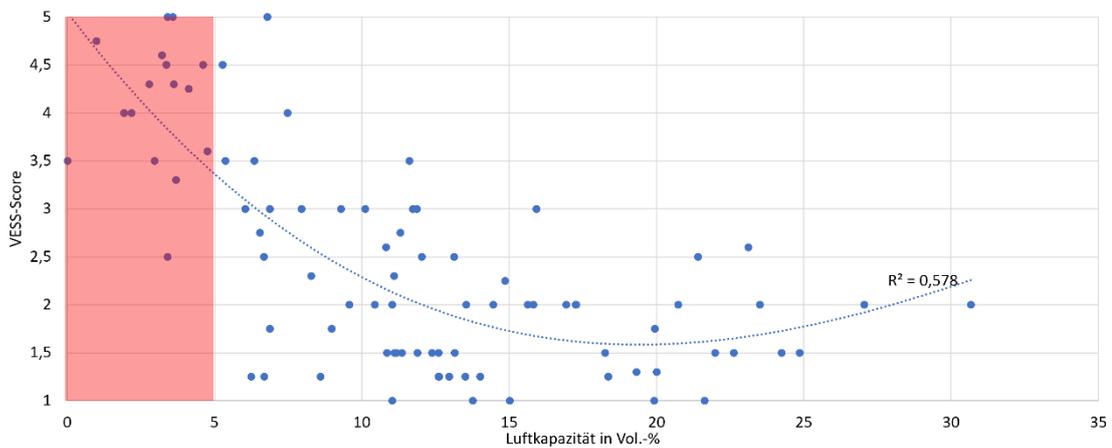
Tel: 04331-845164

E-Mail: gerrit.mueller@fh-kiel.de

Abbildung 1: VESS nach JOHANNES et al. (2020).

VESS ₂₀₂₀ Version 06.08.2020	in der ganzen Schicht: Grösse und Form der Aggregate	ganze Aggregate bzw. Klumpen		Festigkeit nur bei günstiger Bodenfeuchte beurteilbar; sonst weiter mit "Aufbrechen"-	Aufbrechen der Aggregate bzw. Klumpen	Aufbau und Porosität der aufgebrochenen Aggregate bzw. Klumpen	Eigenschaften der aufgebrochenen		Wurzeln, Bodenfarbe [Wurzeln kann man nur bei etablierten Kulturen beobachten]	cm
		Grösse	Form				Aggregate bzw. Bruchflächen	Porosität		
Sq1 sehr gut (bröckelig)		meistens < 6 mm	Krümelig. Kleine rundliche Aggregate	mit Fingern einfach zu zerdrücken	offene Struktur; die Probe bricht entlang von Aggregatgrenzen; Wurzeln wachsen uneingeschränkt. Proben mit Sq1 und Sq2 bestehen nur aus kleineren Aggregaten.		grössere Aggregate bestehen aus kleineren Aggregaten, die oft von Wurzeln zusammengehalten werden	Sehr porös	Wurzeln bis in Aggregate wachsend	0
Sq2 gut (intakt)		meistens 2 mm bis 7 cm	rundliche Aggregate, teilweise abgerundete Kanten; keine kohärenten Klumpen	Aggregate können mit einer Hand einfach zerdrückt werden			beim Aufbrechen werden raue, poröse Bruchflächen sichtbar	Porös	Wurzeln bis in Aggregate wachsend	1
Sq3 mittelmässig (fest)		2 mm bis 10 cm weniger als 30% sind < 1 cm	verschiedene Formen von eher rundlich bis leicht kantig; einige kohärente Klumpen sind möglich	die meisten Aggregate können mit einer Hand zerdrückt werden			beim Aufbrechen werden raue, poröse, teilweise aber auch glatte Bruchflächen sichtbar	Wenig porös. Makroporen und Risse möglich	nur noch einzelne Wurzeln in Aggregaten	5
Sq4 schlecht (dicht)		meistens > 10 cm weniger als 30% sind < 7 cm	meist kohärente Klumpen; scharfe Kanten, Risse und Lamellenbildung möglich	Klumpen können nur mit viel Kraft zerbrochen werden			beim Aufbrechen werden meist glatte, wenig poröse Bruchflächen sichtbar	sehr wenig porös; wenige erkennbare Makroporen	Wurzeln wachsen meist nur noch in Makroporen und Rissen und auf der Oberfläche von Klumpen	10
Sq5 sehr schlecht (sehr dicht)		meistens > 10 cm	kohärente, scharfkantige Klumpen	Klumpen sind kaum aufzubrechen			beim Aufbrechen werden glatte, porenfreie Bruchflächen sichtbar; kleine scharfkantige Würfel können herausgebrochen werden	nicht porös; wenn Poren vorhanden, dann als einzelne Makroporen oder Risse	Wurzeln nur noch in Rissen und auf der Oberfläche von Klumpen; anaerobe Zonen mit blaugrauer Färbung möglich	

Abbildung 2: Beurteilung von Ackerböden in SH mit dem VESS-Schema (p<0,05; n=90).



Beitrag Bauernblatt 08.04.2023:

Bodenstruktur verbessern – Unterbodenressourcen nutzen

Ergebnisse eines Forschungsvorhabens der Fachhochschule Kiel

Viele Landwirt*innen beschäftigen sich seit einigen Jahren mit der Frage, welche Möglichkeiten im Ackerbau zur Anpassung an den Klimawandel bestehen und wie diese sinnvoll umzusetzen sind. Hierbei stehen oft Überlegungen zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit im Mittelpunkt der Überlegungen. In diesem Zusammenhang wird über verschiedene Bodenbearbeitungssysteme, angepasste Fruchtfolgen, Zwischenfrüchte und Untersaaten, dem Einsatz von effektiven Mikroorganismen und alternative Dünge- und Pflanzenschutzstrategien diskutiert. Die Bedeutung der Bodenstruktur, als wesentliche Komponente der Bodenfruchtbarkeit, bleibt in dieser Diskussion oft unberücksichtigt bzw. es fehlt an konkreten Anhaltspunkten zur Einschätzung des Strukturzustandes. Deshalb ist es wichtig zu verstehen, was ist Bodenstruktur, warum ist Bodenstruktur für den zukünftigen Ackerbau von Bedeutung und an welchen Merkmalen ist eine „gute“, also funktionale Bodenstruktur zu erkennen? Diese Fragen sollen anhand erster Ergebnisse eines in Schleswig-Holstein von der Fachhochschule-Kiel federführend durchgeführten Forschungsvorhabens, dass durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) und dem ehemaligen Land- und Umweltministerium des Landes Schleswig-Holstein (MELUND) gefördert wurde, beantwortet werden.

Was ist Bodenstruktur?

Die räumliche Anordnung der festen Bodenbestandteile, also der mineralischen und organischen Elemente, wird als Bodengefüge oder Bodenstruktur bezeichnet. Mit der räumlichen Anordnung der festen Bestandteile des Bodens ergibt sich die Ausgestaltung des Porensystems, in dem sich die Bodenlösung und verschiedene Gase befinden. Im Hinblick auf die landwirtschaftliche Nutzung ist die Bodenstruktur von zentraler Bedeutung für den Wasser-, Gas-, Wärme- und Nährstoffhaushalt des Bodens. Zusätzlich wird die Durchwurzelbarkeit des Bodens und damit die Erreichbarkeit von Wasser- und Nährstoffressourcen bestimmt. Für die Gefügeentwicklung sind verschiedene bodeninterne und –externe Prozesse verantwortlich: insbesondere Quellung und Schrumpfungsprozesse, Frost- und Tauzyklen sowie biologische Aktivität (u.a. Regenwürmer, Pilze und Bakterien) führen in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial, der Witterung und dem Relief zu einer natürlichen Strukturentwicklung. Überprägt wird diese natürliche Struktur besonders auf Ackerstandorten durch anthropogene, mechanische Beanspruchungen des Bodens, wie beispielsweise durch Bodenbearbeitung und Befahrung. Die Bodenstrukturentwicklung ist somit ein dynamischer Prozess, so dass sich der aktuelle Strukturzustand ständig verändert, also auch regelmäßig durch geeignete Methoden beurteilt werden sollte.

Warum ist Bodenstruktur bedeutsam?

Für ein optimales Pflanzenwachstum ist eine ausreichende und ausgewogene Nährstoff- und Wasserversorgung sowie ein kontinuierlicher Gasaustausch mit der Atmosphäre Voraussetzung. Hierfür ist die Ausprägung der Poren bedeutsam, denn diese sind, gleichbedeutend mit dem Blutkreislauf oder dem Nervensystem des menschlichen Körpers, die Lebensadern des Bodens: sie speichern und leiten Wasser mit den darin befindlichen Nährstoffen, sie sorgen für eine ausreichende Sauerstoffversorgung der Pflanzenwurzel sowie der Mikroorganismen und sie dienen als Lebensraum für die verschiedenen, oft in großer Zahl auftretenden Lebewesen des Bodens. Um diese Prozesse zu optimieren, reicht es nicht aus lediglich über das Porenvolumen insgesamt zu sprechen, sondern es sind Kennt-

nisse der Porengrößenverteilung (Anteile der einzelnen Porenklassen) und der Porenkontinuität sowohl im Ober- als auch im Unterboden von erheblicher Bedeutung. Während bei Starkregenereignissen kontinuierlich den Ober- und Unterboden verbindende Makroporen (u.a. Regenwurm- und Wurzelgänge, Schrumpfungsrisse) bedeutsam sind, kommt den groben bis mittleren Poren, die Wasser pflanzenverfügbar speichern und nachliefern können, bei langanhaltender Trockenheit eine große Bedeutung zu. Deshalb ist in jeder Situation wichtig, dass das Porensystem durchgängig ist, dass Ober- und Unterboden nicht durch Grenzschichten, die im Zuge von Bodenbearbeitung oder Befahrung entstanden sind, getrennt werden. Aktuelle Untersuchungen belegen, dass auf zahlreichen Ackerstandorten in Schleswig-Holstein in der Krummenbasis so genannte Pflugsohlenverdichtungen vorhanden sind. Diese Grenzschichten führen zu einer physischen Trennung von Ober- und Unterboden, die dazu führt, dass Wasser- und Nährstoffressourcen im Unterboden für die Pflanzenwurzel nicht erreichbar sind. Zukünftige Ackerbausysteme müssen also draufabzielen, Verdichtungshorizonte zu vermeiden und gleichzeitig bodeninterne Strukturierungsprozesse zu initiieren, um durchgängige, funktionale Porensysteme zu generieren.

Welche Maßnahmen fördern die Bodenstruktur?

Um bodeninterne Strukturierungsprozesse zu fördern, sollte die Bodenbearbeitungsintensität grundsätzlich reduziert werden. In intensiven Bodenbearbeitungssystemen werden strukturbildende Prozesse regelmäßig unterbrochen bzw. rückgängig gemacht: Röhrensysteme der Regenwürmer werden zerstört bzw. gekappt. Quellungs- und Schrumpfungszyklen werden unterbrochen, so dass besonders im Oberboden instabile Struktureinheiten entstehen, die beispielsweise zur Verschlämmung neigen. Eine zweite bedeutende Maßnahme zur Stabilisierung und zur Erhöhung der Funktionalität des Bodengefüges stellt die organische Düngung über Wirtschaftsdünger, Zwischenfrüchte oder ausreichend Stoppelreste dar: mit der Zufuhr organischer Substanz wird die biologische Aktivität im Boden und damit die sogenannte Lebendverbauung angeregt. Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass mit einer regelmäßigen organischen Düngung u.a. die Aggregatstabilität grundsätzlich zunimmt. Auch die Anzahl der Regenwurmgänge, die durch Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen besiedelt werden, nimmt durch die Zufuhr organischer Stoffe deutlich zu und unterstützt somit die Entwicklung eines weitverzweigten, bis in größere Bodentiefen reichendes Porensystem.

Welche Merkmale kennzeichnen eine „gute“ Bodenstruktur?

Um die Bodenstruktur im Feld beurteilen zu können sind verschiedene Methoden entwickelt worden. Die wohl bekannteste Methode ist die sogenannte Spatendiagnose, mit der der Strukturzustand der Ackerkrume nach Ausprägung verschiedener Kriterien beurteilt wird. Wichtige Kriterien sind in diesem Zusammenhang die Größe und Form der Struktureinheiten, die Durchwurzelung des ausgestochenen Bodenmonolithen, das Vorhandensein von Bodenlebewesen, das Aussehen der Stoppelreste sowie Farbe und Geruch. Dieses Verfahren sollte regelmäßig, möglichst im Frühjahr nach dem Abtrocknen der Felder durchgeführt werden. Auf internationaler Ebene ist diese Methode ergänzt und erweitert worden. Das wohl gängigste Verfahren ist das Beurteilungsschema von Ball et al. (2007): dieses Schema beschreibt anhand verschiedener Merkmale fünf verschiedene Bodenstrukturzustände von sehr gut (bröckelig) bis sehr schlecht (verdichtet). Dieses Verfahren wurde durch Johannes (2020) um weitere Kriterien ergänzt (vgl. Abb. 1). Eine gute Struktur ist entsprechend der genannten Verfahren an zahlreichen kleineren (< 6 mm), porösen und eher rundlichen Struktureinheiten, die von Wurzeln durchzogen sind, gekennzeichnet. Im Vergleich dazu sind die Struktureinheiten bei schlechtem Gefügezustand in der Regel massiv, kompakt sowie scharfkantig und weisen kaum Wurzelmaterial auf. Die Stoppelreste

sind in diesem Fall mikrobiell kaum angegriffen und es sind horizontal ausgerichtete Plattenstrukturen besonders im unteren Bereich des ausgestochenen Bodenmonolithen zu erkennen.

Fazit

Dem Erhalt und die Entwicklung einer funktionalen Bodenstruktur wird in zukünftigen Ackerbausystemen eine bedeutende Rolle zukommen. Hierbei ist es wichtig, dass als begleitende Maßnahme der Strukturzustand in regelmäßigen Intervallen beurteilt wird, um so Entwicklungstendenzen und die Wirksamkeit von eingeleiteten Maßnahmen einschätzen zu können. Mit einem Forschungsvorhaben konnten aus Untersuchungen von 45 typischen Ackerstandorten in Schleswig-Holstein weitere, für die Beurteilung des Bodengefüges relevante Merkmale und Zusammenhänge erarbeitet werden. Diese Ergebnisse werden in einer kombinierten Vortrags- und Praxisveranstaltung am Fachbereich Agrarwirtschaft der Fachhochschule Kiel am 20 April 2023 vorgestellt. Das Programm dieser Veranstaltung ist seitlich abgedruckt, die Veranstaltung ist kostenlos und um Anmeldung unter der dort angegebenen E-Mail-Adresse wird gebeten.

Prof. Conrad Wiermann
 Fachhochschule Kiel
 Fachbereich Agrarwirtschaft
 E-Mail: conrad.wiermann@fh-kiel.de

Abbildung 1: Schema zur Beurteilung der Bodenstruktur nach Johannes (2020)

VESS ₂₀₂₀ Version 06.06.2020	in der ganzen Schicht: Grösse und Form der Aggregate	ganze Aggregate bzw. Klumpen		Festigkeit nur bei günstiger Bodenfeuchte beurteilbar; sonst weiter mit "Aufbrechen":	Aufbrechen der Aggregate bzw. Klumpen	Aufbau und Porosität der aufgetrennten Aggregate bzw. Klumpen	Eigenschaften der aufgetrennten Aggregate bzw. Klumpen		Wurzeln, Bodenfarbe [Wurzeln kann man nur bei etablierten Kulturen beobachten]	cm
		Grösse kurz nach Bodenbearbeitung nicht beurteilen (inkl. Aggregatform).	Form				Bruchflächen	Porosität		
Sq1 sehr gut (bröckelig)		meistens < 6 mm	Krümelig. Kleine rundliche Aggregate	mit Fingern einfach zu zerdrücken	offene Struktur, die Probe bricht entlang von Aggregatgrenzen; Wurzeln wachsen uneingeschränkt. Proben mit Sq1 und Sq2 bestehen nur aus kleineren Aggregaten.		grössere Aggregate bestehen aus kleineren Aggregaten, die oft von Wurzeln zusammengehalten werden	Sehr porös	Wurzeln bis in Aggregate wachsend	0-1
Sq2 gut (intakt)		meistens 2 mm bis 7 cm	rundliche Aggregate, teilweise abgerundete Kanten; keine kohärenten Klumpen	Aggregate können mit einer Hand einfach zerdrückt werden			beim Aufbrechen werden raue, poröse Bruchflächen sichtbar	Porös	Wurzeln bis in Aggregate wachsend	5
Sq3 mittelmässig (fest)		2 mm bis 10 cm weniger als 30% sind < 1 cm	verschiedene Formen von eher rundlich bis leicht kantig; einige kohärente Klumpen sind möglich	die meisten Aggregate können mit einer Hand zerdrückt werden			beim Aufbrechen werden raue, poröse, teilweise aber auch glatte Bruchflächen sichtbar	Wenig porös. Makroporen und Risse möglich	nur noch einzelne Wurzeln in Aggregaten	10
Sq4 schlecht (dicht)		meistens > 10 cm weniger als 30% sind < 7 cm	meist kohärente Klumpen; scharfe Kanten, Risse und Lamellenbildung möglich	Klumpen können nur mit viel Kraft zerbrochen werden			beim Aufbrechen werden meist glatte, wenig poröse Bruchflächen sichtbar	sehr wenig porös; wenige erkennbare Makroporen	Wurzeln wachsen meist nur noch in Makroporen und Rissen oder auf der Oberfläche von Klumpen	
Sq5 sehr schlecht (sehr dicht)		meistens > 10 cm	kohärente, scharfkantige Klumpen	Klumpen sind kaum aufzubrechen			beim Aufbrechen werden glatte, porenfreie Bruchflächen sichtbar; kleine scharfkantige Würfel können herausgebrochen werden	nicht porös; wenn Poren vorhanden, dann als einzelne Makroporen oder Risse	Wurzeln nur noch in Rissen oder auf der Oberfläche von Klumpen; anaerobe Zonen mit blaugrauer Färbung möglich	

Fotos: Beurteilung einer guten Bodenstruktur anhand eines Bodenmonolithen (rechts), einzelner Struktureinheiten (mitte) und nach dem Abwurf aus ca. 1m Höhe (links) (Fotos: Conrad Wiermann)



Das Programm:

20. April 2023, um 09:00 Uhr

Vorträge: Claus-Heller-Haus, Fachhochschule Kiel, Fachbereich Agrarwirtschaft, Grüner Kamp 11, 24783 Osterrönfeld

Praxisteil: Versuchsstation „Lindenhof“ der Fachhochschule Kiel in 24790 Ostenfeld (s. Anfahrtsskizze)

- | | |
|-----------|---|
| 9:00 Uhr | „Bedeutung der Bodenstruktur auf Ackerstandorten“
(Prof. Dr. Conrad Wiermann, Fachhochschule Kiel) |
| 9:15 Uhr | „Die Bedeutung von Bioporen für die Ertragsicherung in Trockenjahren“
(Prof. Dr. Miriam Athmann, Universität Kassel) |
| 10:00 Uhr | „Die Rolle von Wurzeln für die Strukturbildung und Erschließung von Nährstoffen im Boden“ (Prof. Dr. Stephan Peth, Leibniz Universität Hannover) |
| 10:45 Uhr | Kaffeepause (Kaffee, Tee und Kaltgetränke) |
| 11:15 Uhr | „Durchwurzelung von Zwischenfruchtbeständen“
(Roman Kemper, Universität Bonn) |
| 12:00 Uhr | „Erweiterte Methode zur Bestimmung der Bodenstruktur im Feld“
(Gerrit Müller, Fachhochschule Kiel) |
| 12:45 Uhr | Mittagspause (u.a. Suppe) anschließend Fahrt zum Versuchsfeld (Lindenhof) der Fachhochschule Kiel (s. Anfahrtsskizze) |
| 14:00 Uhr | Demonstration von Feldmethoden zur Beurteilung der Bodeneigenschaften und Bodenstruktur im Feld:
Profilmethode (Bernd Burbaum, LfU-SH)
Mini-Profil Methode
Spatenmethoden (u.a. internationale VESS-Methodik)
Erweiterte Methode zur Beurteilung der Bodenstruktur (Gerrit Müller, Fachhochschule Kiel) |
| 16:00 Uhr | Ende der Veranstaltung |

Anmeldung unter: anmeldung.boden@fh-kiel.de

Beitrag Bauernblatt 20.05.2023:

Makroporen sind biologische Hotspots

Bericht von der Vortrags- und Praxisveranstaltung der FH-Kiel

Am 20. April hat am Fachbereich Agrarwirtschaft der Fachhochschule Kiel eine kombinierte Vortrags- und Praxisveranstaltung zum Thema „Bodenstruktur: erkennen – beurteilen – fördern“ stattgefunden. Vor ca. 100 Besuchern aus Praxis und Beratung wurden Ergebnisse eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (BDU) und dem ehemaligen schleswig-holsteinischen Land- und Umweltministerium (MELUND) geförderten Forschungsvorhaben vorgestellt und diskutiert. Im Mittelpunkt standen hierbei verschiedene Aspekte der Bodenfruchtbarkeit im Kontext von zukünftigen, resilienten Landnutzungssystemen und geeignete Möglichkeiten zu ihrer Förderung.

Bodenstruktur verbessert die Ressourcennutzung

Im Einführungsreferat skizzierte Prof. Conrad Wiermann (Fachhochschule Kiel) zunächst die Herausforderungen, die zukünftige Ackerbausysteme besonders im Zusammenhang mit den Folgen des Klimawandels bewältigen müssen. Ein wesentlicher Baustein ist seiner Auffassung nach eine funktionsfähige Bodenstruktur: nur so wird es möglich sein einerseits die Auswirkungen von Extremwettereinflüssen (u.a. Dürreperioden und Starkregeneignisse) langfristig zu kompensieren andererseits aber auch Treibhausgasemissionen zu minimieren. Der Bodenstruktur kommt insofern hohe Bedeutung zu, als sie agronomische Inputs transformiert und somit die Ertragsleistung maßgeblich beeinflusst wird (vgl. Abbildung 1). Gute Strukturzustände fördern dieses Transformationsvermögen des Bodens und erhöhen somit die Ressourceneffizienz insgesamt.

Makroporen fördern die Nutzung des Unterbodens

In ihrem Vortrag konnte Prof. Miriam Athmann von der Universität Kassel anhand von Untersuchungen zeigen, wie bedeutsam ein weitverzweigtes und bis in den Unterboden reichendes, durch biologische Aktivität entstandenes Makroporensystem ist. Diese „Hauptverkehrsadern“ des Bodens stellen ihrer Meinung nach bedeutsame „Hot-Spots“ als Lebensraum für Wurzeln und Regenwürmer, aber auch als Ort mikrobieller Umsetzungsprozesse dar. Sie sind somit von wesentlicher Bedeutung für die Nutzung von Wasser- und Nährstoffspeichern des Unterbodens durch Kulturpflanzenbestände. Mit atemberaubenden endoskopischen Videosequenzen demonstrierte Prof. Athmann sehr anschaulich die enge Verknüpfung von Wurzelhaaren und Porenwandungen.

Wurzeln nutzen und stabilisieren das Makroporensystem

Prof. Stephan Peth von der Universität Hannover unterstrich in seinem Vortrag die Bedeutung der Makroporen für die Nutzung von Nährstoff- und Wasserressourcen des Unterbodens. Mit seinen Untersuchungen konnte er zeigen, dass besonders die Wiederbesiedlung von biogen generierten Makroporen durch Wurzeln von Kulturpflanzenbeständen zu einer weiteren Verzweigung des Porensystems und damit zu einer besseren Erreichbarkeit von der Austauscheroberflächen des Bodens führen. Sämtliche Bewirtschaftungsmaßnahmen müssen deshalb darauf abzielen dieses weit verzweigte Porensystem zu stabilisieren, zu erhalten und weiter zu entwickeln, um langfristig die Ressource „Boden“ effizienter und nachhaltiger nutzen zu können.

Zwischenfrüchte: Wurzelmasse oft überschätzt

Dem Zwischenfruchtanbau wird in zukünftigen Ackerbausystemen eine hohe Bedeutung beigemessen. Umfangreiche Untersuchungen zur Wirkung von Zwischenfrüchten auf Bodenfruchtbarkeitsparameter und die Ertragsleistung der nachfolgenden Hauptfrüchte im ökologischen Landbau wurden von Roman Kemper (Universität Bonn) vorgestellt. Seine Ergebnisse zeigen, dass Rettich, Rübsen und Phacelia vorhandene Bioporen nutzen und damit stabilisieren. Einen zusätzlichen Beitrag dieser Zwischenfrüchte zur weiteren Genese von Bioporen konnte er allerdings nicht feststellen. Überraschend zeigten die Ergebnisse von Kemper je nach Zwischenfrucht und Mischung nur ein Wurzel-Spross-Verhältnis zwischen 0,11 bis 0,32 an. Also eine nur geringe Wurzeltrockenmasseentwicklung im Vergleich zur oberirdisch sichtbaren Sprossentwicklung. Nach seinen Erfahrungen werden Wurzel-Spross-Verhältnisse nahe 1 nur bei mehrjährigem Anbau von beispielsweise Luzerne erreicht. Damit werden auch in der Wurzel im Vergleich zum Spross nur geringe Nährstoffmengen gespeichert.

Enger Zusammenhang zwischen Ertrag und Bodenzustand

Im abschließenden Referat stellte Gerrit Müller die Struktur- und Ertragsuntersuchungen der Fachhochschule Kiel auf 45 repräsentativen Ackerstandorten in Schleswig-Holstein vor. Besonders im Übergang zwischen den regelmäßig bearbeiteten Bodenhorizonten und dem Unterboden, der Krumbasis, konnten an zahlreichen Standorten Strukturschäden nachgewiesen werden. Anhand von Wasserleitfähigkeitsuntersuchungen konnte er zeigen, dass in diesem Bereich sogenannte Plattenstrukturen vorliegen, die Infiltrations- und Wassernachlieferungsprozesse aus dem Unterboden verlangsamen können. Dies hat offensichtlich auch Auswirkungen auf die Ertragsleistung einzelner Standorte, denn parallel durchgeführte Ertragserhebungen ließen einen engen Zusammenhang zwischen Bodenfruchtbarkeitszustand (quantifiziert über den Müncheberger Bodenqualitätsindex) und Ertragsleistung erkennen.

Demonstration von Feldmethoden zur Beurteilung der Bodenstruktur

Im Anschluss an die Vortragsveranstaltung wurden auf dem Lindenhof, dem Versuchstandort des Fachbereichs Agrarwirtschaft der Fachhochschule Kiel, Methoden zur Beurteilung der Bodenstruktureigenschaften demonstriert. Neben der bekannten Spatendiagnose wurden weitere Methoden, wie die VESS (Visual Estimation of Soil Structure) und die Mini-Profil Methode vorgestellt und mit den Besuchern diskutiert. Gerade die Mini-Profil Methode, bei der mit Hilfe einer Palettengabel, die in einem Winkel von ca. 45° in den Boden eingeführt wird, ein Bodenmonolith gewonnen wird, der auch eine Beurteilung Krumbasis erlaubt, fand reges Interesse. An einem fachgerecht angelegten Bodenprofil, das von Bernd Burbaum (Landesamt für Umwelt SH) vorgestellt wurde, konnten weitere Merkmale der Bodengenese und der Eigenschaften für den Standort diskutiert bzw. beurteilt werden.

Fazit

Das große Interesse an der kombinierten Vortrags- und Praxisveranstaltung hat gezeigt, dass in der landwirtschaftlichen Praxis ein zunehmendes Interesse an einer Verbesserung von Bodenfruchtbarkeits-eigenschaften, zu dem die Bodenstruktur maßgeblich beiträgt, besteht. Die Fachvorträge lieferten wichtige Hinweise für die nachhaltige Entwicklung und Unterstützung eines funktionalen, durch biogen entstandene Makroporen geprägtes, den Ober- und Unterboden kontinuierlich verbindendes Porensystem.

Prof. Conrad Wiermann
Fachhochschule Kiel