



HOCHSCHULE
NEUBRANDENBURG

University of Applied Sciences

Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften

Fachgebiet Bodenkunde

Studiengang Nachhaltiges Agrarmanagement

**Bodenkundlicher Vergleich zweier
Bodenbearbeitungssysteme in Mecklenburg-
Vorpommern – physikalische und chemische Parameter
im Tiefenverlauf**

Masterthesis

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science (M.Sc.)

Vorgelegt von:

Julian Cochius

Erstprüfer*in:

Prof'in Dr. Silvia Bachmann-Pfabe

Zweitprüfer*in:

Dipl.-Geol. Mischel Eismann

Tag der Einreichung:

Ochsenfurt, 20.11.2025

URN:

urn:nbn:de:gbv:519-thesis-2025-0169-7

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	iv
Tabellenverzeichnis.....	vi
Abkürzungsverzeichnis	viii
1 Einleitung.....	1
2 Literaturübersicht.....	3
2.1 Historische Entwicklung der <i>conservation agriculture</i>	3
2.2 Trockenrohdichte	6
2.3 Proctorverdichtungstest	9
2.4 Eindringwiderstand	10
2.5 Humus und Humusbildung.....	11
2.6 Boden pH-Wert	14
2.7 Kationenaustauschkapazität	17
2.8 Poren und Kennwerte der Wasserbindung.....	17
2.8.1 Porengrößen nach KA5 und deren Funktionen	18
2.8.2 Einfluss der Bewirtschaftungssysteme auf die Porengrößenverteilung.....	20
2.8.3 Saugspannungskurve nach van Genuchten	23
3 Methodik.....	25
3.1 Untersuchungsprogramm.....	25
3.2 Standort.....	25
3.3 Probennahme	27
3.4 Trockenrohdichte (DIN 18125).....	28
3.5 Proctorverdichtungstest (DIN 18127)	29
3.6 Penetrometer	30
3.7 Humusgehalt Bestimmung (DIN 18128).....	30
3.8 pH(CaCl ₂)-Wert (DIN 10390).....	31
3.9 Kationenaustauschkapazität	31
3.10 Porengrößenverteilungsbestimmung.....	31
3.11 Befragung	32
3.12 Statistische Analyse.....	33

3.13	Bewirtschaftung	34
3.14	Bodenprofile.....	35
4	Ergebnisse	40
4.1	Kurzübersicht Probenahmepunkte	40
4.2	Trockenrohdichte	40
4.3	Eindringwiderstand	43
4.4	Humus	44
4.5	pH(CaCl ₂)	46
4.6	Effektive Kationenaustauschkapazität.....	47
4.7	Porenvolumen, Porengrößenverteilung und Kapazitäten	48
4.7.1	Gesamtporenvolumen.....	48
4.7.2	Weite Grobporen.....	49
4.7.3	Enge Grobporen.....	50
4.7.4	Mittelporen und Feinporen	52
4.7.5	Saugspannungskurven der ermittelten Bodenarten	54
4.7.6	Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität und relativer Porenanteil.....	57
5	Diskussion	61
6	Zusammenfassung	68
7	Quellenverzeichnis	ix
8	Anhang.....	xiv
	Eidesstattliche Erklärung.....	xx

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Auflaufender NT-Weizen in den letztjährigen Stoppeln (eigene Darstellung)	5
Abbildung 2: Durch Wurzeln ausgekleideter Regenwurmgang (eigene Darstellung)	7
Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung einer Proctorverdichtungskurve für die Ermittlung der höchstmöglichen Trockendichte ρ_{ppr} und des optimalen Wassergehaltes (CWC) (eigene Darstellung)	9
Abbildung 4: Röntgentomografie Aufnahme einer CT und NT-Probe aus 10 – 20 cm Tiefe am Standort Lüttewitz (Schlüter et al., 2020)	21
Abbildung 5: Saugspannungskurven eines Sandbodens, eines tonigen Schluffbodens und von einem Tonboden (Amelung et al., 2018)	24
Abbildung 6: Topographische Karte des Standortes (Landesamt für Umwelt Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 2017)	26
Abbildung 7: Bodenprofil BP-SI-52 (NT), für geogene und pedogene Zusatzmerkmale siehe Tabelle 25 und 26 (nach Vorlage von Mischel Eismann)	36
Abbildung 8: Bodenprofil BP-SI-01 (CT), für pedogene Zusatzsymbole siehe Tabelle 26 (nach Vorlage von Mischel Eismann)	37
Abbildung 9: Bodenartendreieck mit den im Labor ermittelten Bodenarten der einzelnen Proben	38
Abbildung 10: Bioporung durch Regenwürmer in den Bodenprofilen (Aufnahmen von Felix Krause)	39
Abbildung 11: Trockenrohdichten (TRD) in natürlicher Lagerung im Tiefenverlauf unter NT und CT im Jahresvergleich	41
Abbildung 12: Trockenrohdichten im Tiefenverlauf nach der Proctorverdichtung unter NT und CT im Jahr 2022	42
Abbildung 13: Eindringwiderstand im Tiefenverlauf unter NT und CT im Jahresvergleich	43
Abbildung 14: Volumetrischer Bodenwassergehalt im Tiefenverlauf unter NT und CT im Jahresvergleich	44
Abbildung 15: Humusgehalt im Tiefenverlauf unter NT und CT im Jahresvergleich. Unterschiedliche Buchstaben (a, b) kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Bewirtschaftungssystemen	44
Abbildung 16: pH-Wert (CaCl_2) im Tiefenverlauf unter NT und CT im Jahr 2022 und 2025	46
Abbildung 17: Gesamtporenvolumen von NT und CT im Jahr 2022 in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung. Unterschiedliche Buchstaben (a, b) kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Bewirtschaftungssystemen	48

Abbildung 18: Vergleich des Porenvolumens verschiedener Porengrößenklassen (weite Grobporen, enge Grobporen, Mittelporen, Feinporen) unter NT und CT in natürlicher Lagerung über die gesamte Tiefe.....	50
Abbildung 19: Vergleich des Porenvolumens verschiedener Porengrößenklassen (weite Grobporen, enge Grobporen, Mittelporen, Feinporen) unter NT und CT nach der Proctorverdichtung über die gesamte Tiefe	53
Abbildung 20: Saugspannungskurven für NT und CT, gegliedert nach den vorliegenden Bodenarten in natürlicher Lagerung (SSD = Sum of Squared Difference)	55
Abbildung 21: Saugspannungskurven für NT und CT, gegliedert nach den vorliegenden Bodenarten nach der Proctorverdichtung (SSD = Sum of Squared Difference)	56
Abbildung 22: Feldkapazität (FK), Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK) nach Tiefenstufen in natürlicher Lagerung . Unterschiedliche Buchstaben (a, b) kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Bewirtschaftungssystemen. Hochkommas (', ') wurden für einfachere Zuordnung zwischen den Abbildungen an die Buchstaben angefügt.	57
Abbildung 23: Feldkapazität (FK), Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK) nach Tiefenstufen nach der Proctorverdichtung . Unterschiedliche Buchstaben (a, b) kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Bewirtschaftungssystemen. Hochkommas (', ') wurden für einfachere Zuordnung zwischen den Abbildungen an die Buchstaben angefügt.	59
Abbildung 24: prozentualer Anteil der enge Grobporen (eGrP) und Mittelporen (mP) an der nFK	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einfluss des Bewirtschaftungssystems auf die Trockenrohdichte (TRD) im Tiefenverlauf bei verschiedenen Bodenarten.....	8
Tabelle 2: Einfluss des Bewirtschaftungssystems auf den Humusgehalt im Tiefenverlauf bei verschiedenen Bodenarten (*Mischprobe des insgesamt gemessenen Horizontes).....	13
Tabelle 3: Optimale pH-Werte für landwirtschaftliche Böden in Abhängigkeit vom Tongehalt und <4 % Humusgehalt (Amelung et al., 2018)	15
Tabelle 4: Einfluss des Bewirtschaftungssystems auf den pH-Wert im Tiefenverlauf bei verschiedenen Bodenarten (*Mischprobe des insgesamt gemessenen Horizontes).....	16
Tabelle 5: Porengrößenbereiche mit den zugehörigen Saugspannungsbereichen (Sponagel et al., 2005)	18
Tabelle 6: bodenphysikalische und bodenchemische Parameter des Untersuchungsprogramms	25
Tabelle 7: Codierung der Probenahmepunkte mit Entnahmezeitpunkten	28
Tabelle 8: Mittlerer Schichtwert nach Entnahmetiefe	33
Tabelle 9: Anzahl durchgeführter Messungen je Tiefenstufe	34
Tabelle 10: Eigenschaften der Probenahmepunkte BP-SI-52 (NT) und BP-SI-01 (CT) nach Tiefenstufen	40
Tabelle 11: Ergebnisse der ANOVA zur Trockenrohdichte (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$).....	41
Tabelle 12: Ergebnisse der contrasts zur Trockenrohdichte zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$).....	42
Tabelle 13: Ergebnisse der ANOVA zum Humusgehalt (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$).....	45
Tabelle 14: Auswirkung einer pH-Wert Erhöhung auf die effektive Kationenaustauschkapazität (KAKeff) an den Probenentnahmepunkten für das Jahr 2022	47
Tabelle 15: Ergebnisse der ANOVA zum Gesamtporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$).....	49
Tabelle 16: Ergebnisse der ANOVA zum weite Grobporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$).....	49
Tabelle 17: Ergebnisse der contrasts zum weite Grobporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$).....	50

Tabelle 18: Ergebnisse der ANOVA zum enge Grobporenvolumen in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$)	51
Tabelle 19: Ergebnisse der contrasts zum enge Grobporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung im Tiefenverlauf (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$)	51
Tabelle 20: Ergebnisse der contrasts zum enge Grobporenvolumen in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung innerhalb von NT und CT (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$).....	52
Tabelle 21: Ergebnisse der ANOVA zum Mittelporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$).....	52
Tabelle 22: Ergebnisse der contrasts zum Mittelporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung im Tiefenverlauf (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$).....	53
Tabelle 23: Ergebnisse der contrasts zum Mittelporenvolumen in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung innerhalb von NT und CT (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$).....	54
Tabelle 24: vorangestellte Zusatzsymbole für geogene Merkmale (Sponagel et al., 2005) - Anhang.....	xiv
Tabelle 25: nachgestellte Zusatzsymbole für pedogene Merkmale (Sponagel et al., 2005) - Anhang.....	xiv
Tabelle 26: Ergebnisse der ANOVA für die Unterschiede in der Korngrößenverteilung zwischen den beiden Standorten bezogen auf die gesamte Tiefe (* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$) - Anhang	xiv
Tabelle 27: Ergebnisse der contrasts zum Gesamtporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang	xiv
Tabelle 28: Ergebnisse der ANOVA zu den Unterschieden des enge Grobporenvolumens zwischen natürlicher Lagerung und Proctorverdichtung innerhalb von NT und CT (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang	xv
Tabelle 29: Ergebnisse der ANOVA zu den Unterschieden des Mittelporenvolumens zwischen natürlicher Lagerung und Proctorverdichtung innerhalb von NT und CT (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang	xv
Tabelle 30: Ergebnisse der ANOVA zum Feinporenvolumen in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang.....	xv

Tabelle 31: Ergebnisse der contrasts zum Feinporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung im Tiefenverlauf (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang.....xvi

Tabelle 32: Ergebnisse der ANOVA zu den Unterschieden der Feldkapazität zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang.....xvi

Tabelle 33: Ergebnisse der contrasts zur Feldkapazität zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung im Tiefenverlauf (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang.....xvi

Tabelle 34: Ergebnisse der ANOVA zu den Unterschieden der nutzbaren Feldkapazität zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang.....xvi

Tabelle 35: Ergebnisse der contrasts zur nutzbaren Feldkapazität zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung im Tiefenverlauf (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang..... xvii

Abkürzungsverzeichnis

CaCl ₂	Calciumchlorid
CT	Konventionelle Bodenbearbeitung
CWC	Optimaler Wassergehalt
eGrP	enge Grobporen
FK	Feldkapazität
GOK	Geländeoberkante
LK	Luftkapazität
KAK	Kationenaustauschkapazität
KAK _{eff}	Effektive Kationenaustauschkapazität
KAK _{pot}	Potenzielle Kationenaustauschkapazität
KCl	Kaliumchlorid
mP	Mittelporen
nFK	Nutzbare Feldkapazität
NT	no-tillage
SSD	Sum of Squared Difference

1 Einleitung

Die deutsche Landwirtschaft steht zunehmend im Spannungsfeld zwischen ökonomischem Druck, gesellschaftlichen Erwartungen und den Auswirkungen der Klimaerwärmung. Abnehmende Jahresniederschläge, steigende Jahresmitteltemperaturen, ungleichmäßigere Niederschlagsverteilung mit ausgeprägten Trockenperioden im Frühjahr und Frühsommer sowie Starkniederschläge sorgen für zunehmende Probleme im Pflanzenbau. Zeitgleich sind Umweltprobleme, wie Bodenerosion durch Wasser und Wind oder Nährstoff- und Pflanzenschutzmitteleinträge in Gewässer, stärker im Fokus der Öffentlichkeit. Aus diesen gesellschaftlichen Interessen heraus besteht der Druck die Umweltauswirkungen der landwirtschaftlichen Produktion zu minimieren. Zudem stehen die landwirtschaftlichen Betriebe unter wirtschaftlichem Druck. Zum einen sind die Marktpreise gering bei zeitgleich steigenden Produktionskosten, zum anderen sind nicht ausreichend qualifizierte Arbeitskräfte verfügbar. Weiterhin führen die abnehmenden oder stark schwankenden Erträge dazu, dass es zunehmend riskant wird hohe Vorleistungen für die Produktion im Marktfruchtanbau zu leisten. Diese Rahmenbedingungen sorgen für ein Überdenken der konventionellen Bodenbearbeitung (CT) hin zu Systemen mit stark abnehmender Bodenbearbeitungsintensität. Besonders seit dem Dürresommer 2018 ist im deutschsprachigen Raum ein wachsendes Interesse der Landwirtinnen und Landwirte an no-tillage (NT) zu beobachten. Dies geschieht vorrangig aus dem Gedanken heraus Wasser und Kosten zu sparen, sowie die Böden mit der bei NT vorhandene Mulchauflage gegen Erosion zu schützen. Das NT kein Nischenphänomen mehr ist, lässt sich auch daran erkennen, dass mittlerweile alle großen deutschen Landmaschinenhersteller NT-Sämaschinen im Angebot haben und diese auch aktiv bewerben. Jedoch bringt der Umstieg auf NT nicht nur Änderungen in der eingesetzten Landtechnik mit sich, sondern verändert auch den Boden. Während CT das Bodengefüge durch intensive mechanische Eingriffe formt und verändert, wird bei NT diese Funktion weitgehend von Pflanzen, Bodenorganismen und natürlichen Witterungsprozessen übernommen. Dadurch verändern sich sowohl bodenphysikalische Parameter wie Trockenrohdichte und Porenvolumina als auch bodenchemische Eigenschaften wie pH-Wert und Humusverteilung im Bodenprofil, da eine aktive mechanische Durchmischung ausbleibt.

Trotz der wachsenden Relevanz von NT in der deutschen Landwirtschaft und der von internationalen Studien beschriebenen Effekte auf den Boden, ist die Forschung unter deutschen Standortbedingungen bislang noch unzureichend und weist erhebliches Potenzial auf.

Daher hat diese Arbeit das Ziel, an zwei geografisch nah beieinanderliegenden Standorten in der Nähe von Stralsund zu untersuchen, wie sich CT und NT auf die Trockenrohdichte in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung, den Eindringwiderstand, den Humusgehalt, pH-Wert und die Porengrößenverteilung im Tiefenverlauf auswirkt. Ausgehend von der Annahme, dass Veränderungen durch das Ausbleiben mechanischer Lockerung im Boden geschehen, wurden folgende Thesen formuliert.

Es wird erwartet, dass die Veränderung des Bodengefüges unter NT zu einer verbesserten Wasserhaltefähigkeit des Bodens im Vergleich zu CT führt. Das Ausbleiben regelmäßiger Lockerung unter NT führt dabei zu höheren Trockenrohdichten in den oberen Bodenhorizonten. Infolge der höheren Trockenrohdichte ist mit einem insgesamt geringeren Gesamtporenvolumen zu rechnen, wobei besonders der Anteil weiter Grobporen abnimmt, während sich das Porengrößenspektrum in Richtung enger Grobporen und Mittelporen verschiebt. Weiterhin wird angenommen, dass sich ein NT-Boden durch den Proctorverdichtungstest weniger stark verdichten lässt als ein CT-Boden und daraus eine geringere Porenvolumenabnahme im Vergleich zur natürlichen Lagerung resultiert. Gleichzeitig führt die fehlende mechanische Lockerung bei NT zu höheren Eindringwiderständen im Vergleich zu CT. Darüber hinaus wird erwartet, dass die fortlaufende Bodenbearbeitung bei CT zur Bildung einer messbaren Pflugsohle führt. Auch die chemischen Bodeneigenschaften werden durch die unterschiedlichen Bewirtschaftungssysteme beeinflusst. Der Verzicht auf mechanische Durchmischung des Bodens bei NT führt zu einer Akkumulation der aufgetragenen Kalke nahe der Oberfläche, was zu niedrigeren pH-Werten und einer ausgeprägten pH-Stratifikation im Tiefenverlauf führt. Die intensive Durchmischung des Bodens bei CT hingegen bewirkt eine gleichmäßigere Verteilung des Humus im Bearbeitungshorizont, während bei NT eine vertikale Stratifikation auftritt, bei der die höchsten Humusgehalte in den obersten Bodenschichten zu finden sind.

2 Literaturübersicht

2.1 Historische Entwicklung der *conservation agriculture*

Bereits in der Bibel finden sich Verweise auf den Pflug als Bodenbearbeitungsgerät. Das als Pflug bezeichnete Gerät hatte jedoch wenig mit dem heute bekannten Gerät zu tun, sondern entsprach eher einem Hacken, der den Boden anritzte, ohne Bodenschichten zu mischen oder zu invertieren. Mit Beginn der industriellen Revolution, begann die Entwicklung des modernen Eisenpfluges in England, Deutschland und den Niederlanden, der den abgeschnittenen Bodenbalken um bis zu 135° dreht (Derpsch, 1998). Die Mechanisierung der Feldarbeit mit dem Aufkommen von ersten Traktoren auf den landwirtschaftlichen Betrieben ab dem frühen 20. Jahrhundert ermöglichte eine Ausweitung des Pflugeinsatzes mit zunehmender Bearbeitungsintensität (Lal et al., 2007).

Albrecht Thaer schrieb 1810, dass der Boden mechanisch gelockert werden muss, da Böden durch innere Anziehungskräfte und den atmosphärischen Druck dichtlagern würden. Dadurch ist laut Thaer die Kulturpflanze nicht mehr in der Lage den Boden zu durchwurzeln und Nährstoffe aufzunehmen. Weiterhin findet laut Thaer durch die Bearbeitung, insbesondere durch den Pflug, eine Homogenisierung der Bodenschichten sowie eine Belüftung tieferer Bodenschichten und des an die Erdoberfläche gebrachten Humus statt, welcher durch den Sauerstoffzutritt erst ackerbaulich wirksam wird (Thaer, 1810). Glanz (1922) schließt sich Thaers grundsätzlichem Denken an, dass ein Boden für die Erhaltung der Bodengare und der daraus resultierenden Ertragsfähigkeit mechanisch gelockert werden muss. Er gesteht jedoch ein, dass „die Garebildung jedenfalls ein kombinierter Vorgang ist, bei dem chemische, physikalische und vor allem biologische Vorgänge eine Hauptrolle spielen“ und nicht singulär die mechanische Bodenbearbeitung für die Bildung einer Krümelstruktur verantwortlich ist. Weiterhin beschreibt er bereits 1922 eine Bodenbewirtschaftung ohne wendende Bodenbearbeitung, aufgrund des seinen Worten folgend „abnehmenden Garezustandes der Böden“, welche man aus heutiger Sicht als einen frühen Vorläufer, der heute weit verbreiteten konservierenden Bodenbearbeitung sehen kann. Die grundlegende Denkweise und der primäre Bezug auf die Schaffung und Erhalt der Bodenstruktur durch den mechanischen Bodeneingriff mit nachrangiger Betrachtung von z.B. der Unkrautbekämpfung bezeichnet Kuipers (1970) als die „Deutsche Schule“. Dem entgegen steht die „Englische Schule“, welche primär die Unkrautkonkurrenz und der damit einhergehenden Nährstoffkonkurrenz mit den Kulturpflanzen als Hauptursache für schlechte Erträge sieht. Daraus folgt bis in die 1950er Jahre, dass Bodenbearbeitung im angelsächsischen/angloamerikanischen Raum primär als eine Methode der Unkrautbekämpfung gesehen wurde und nicht zur Schaffung einer Bodenstruktur.

Auf Basis dieser Denkschule ist es naheliegend, dass Anhänger der „Deutschen Schule“ das Unterlassen von Bodenbearbeitung als abwegig betrachten (Kuipers, 1970).

Aufgrund der Prägung und der unter europäischen Bedingungen guten herbiziden Wirkung des Pfluges, exportierten europäische Siedler im Rahmen der Kolonialisierung das Konzept der wendenden Bodenbearbeitung weltweit, was zu großflächiger Bodenerosion und Bodenunfruchtbarkeit in den Siedlungs- und Kolonialgebieten führte (Derpsch, 1998). Basierend auf der *Dust Bowl* in den Great Plains, USA, ausgelöst durch intensive Bodenbearbeitung mit dem Pflug und Dürren im Jahr 1934 – 1936, wuchs das Interesse der amerikanischen Regierung und den amerikanischen Landwirten an ackerbaulichen Methoden, welche das Risiko von Wind- und Wassererosion senken. Das Regierungsinteresse führte zur Gründung des *Soil Conservation Services* mit dem obersten Ziel des Bodenschutzes. Die Veröffentlichung des Buches *Plowman's Folly* von Edward Faulkner 1942 führte die Ideen vom Unterlassen der Bodenbearbeitung das erste Mal in die breitere Öffentlichkeit ein. Aufgrund der schwierigen Unkrautbekämpfung und der Stickstoffverfügbarkeit aus Düngern blieben die konservierende Bodenbearbeitung und NT zunächst Randthemen, die an verschiedenen Universitäten untersucht wurden, jedoch keinen breiteren Eingang in die praktische Landwirtschaft fanden. Dies änderte sich mit der Einführung der Herbizide *2,4-D* und *Paraquat* in den 1960er Jahren (Lal et al., 2007). Die Herbizide ermöglichten das erste Mal eine Aussaat in die Ernterückstände der letzten Kultur ohne zusätzliche Bodenbearbeitung. Dies führte 1962 zur ersten NT-Aussaat auf einem kommerziell betriebenen landwirtschaftlichen Betrieb in Kentucky. Von dieser Farm ausgehend fand NT weitere Verbreitung außerhalb der amerikanischen Universitäten mit bereits 2,2 Millionen ha NT bewirtschafteter Fläche in 1973/74. Im Zuge der Verbreitung von chemischen Herbiziden begann jedoch auch die Entwicklung und Verbreitung anderer Formen der reduzierten Bodenbearbeitung (z.B. Striptill) bis zur Minimalbodenbearbeitung (z.B. ultraflache Bodenbearbeitung mit folgender Einsaat). Basierend auf den amerikanischen Erfahrungen, fanden ab 1962 in den Niederlanden und in Deutschland erste Untersuchungen zur Anwendung von Minimalbodenbearbeitung und NT mit durchwachsenen Ergebnissen statt, was zu keiner weiteren Verbreitung der Bewirtschaftungssysteme führte. In England wurde das System durch die Landwirte stärker angenommen mit der Folge, dass bereits 1973/74 200000 ha im NT-System bewirtschaftet wurden. Aufgrund des Verbotes der Strohverbrennung und der daraus resultierenden Unkraut- und Durchwuchsproblematik kehrten viele Landwirte bis 1994 in die CT zurück (Derpsch, 1998). Als Dachbegriff für die reduzierte Bodenbearbeitung/NT bildete sich ab den 1960er Jahren der Begriff *conservation agriculture* heraus. Dieser führte weitere Bewirtschaftungsprinzipien neben der reinen Bodenbearbeitungsform für den Erhalt des Bodens ein. Per Definition müssen mindestens 30 % der Bodenoberfläche mit Pflanzen- und

Ernteresten bedeckt sein (siehe Abbildung 1), um Wassererosion zu minimieren, sowie mindestens 2500 kg/ha Pflanzen- und Ernterückstände auf der Bodenoberfläche für die Reduktion von Winderosion vorhanden sein. Hinzu kommen komplementäre Praktiken wie der Zwischenfruchtanbau, die permanente Bodenbedeckung, minimale Bodenstörung, Fruchtfolge, integrierter Pflanzenschutz und die standortangepasste Düngung (Bergtold et al., 2020).



Abbildung 1: Auflaufender NT-Weizen in den letztjährigen Stoppeln (eigene Darstellung)

Basierend auf den US-amerikanischen Entwicklungen in der Bodenbearbeitung wurden ab 1979 in Deutschland konservierende Bodenbearbeitungssysteme mit abnehmender Intensität bis hin zu NT an der Justus-von-Liebig Universität (Gießen) untersucht. Der Verlust der Bodenfruchtbarkeit in Form von Bodenerosion, Schadverdichtungen, Humusverarmung sowie off-site Schäden durch den Austrag von Nährstoffen und Pflanzenschutzmitteln aus den Flächen, stellen Gründe für die wissenschaftlichen Untersuchungen dar. Neben den Umweltproblemen zwingen niedrige Verkaufserlöse die Landwirte rationellere Arbeitsmethoden anzuwenden, um Kosten in der Bodenbearbeitung einzusparen. Da die europäischen Landwirte im Vergleich zu US-amerikanischen Kollegen jedoch den Pflanzenertrag in den Vordergrund stellen, bewegt eine rein monetäre Betrachtung der Verfahren die Landwirte nicht zu einem Umstieg auf konservierende Bodenbearbeitung/NT (Tebrügge, 2003). Bei einer Befragung und anschließenden Auswertung von deutschen Landwirten im Jahr 2024 gaben 45 % der Befragten an, dass die Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung durch technische Hürden bedingt ist, weil passende und

bezahlbare Maschinen fehlen und 29 % der Befragten das Wissen fehlt, um die Praktiken adäquat umzusetzen (Aghabeygi et al., 2024). Es lässt sich festhalten, dass die Entwicklung von *conservation agriculture* kein linearer Prozess war. Es entstand aus dem Problem der großflächigen Bodenerosion durch intensive Bodenbearbeitung, wird bis heute durch alte Paradigmen gebremst und erscheint vor dem Hintergrund heutiger Umweltbedingungen zunehmend notwendig.

2.2 Trockenrohdichte

Die Trockenrohdichte ist definiert als die Masse einer getrockneten ungestörten Bodenprobe pro Volumen, das die Probe einnimmt. Aus diesem Wert lassen sich verschiedene Parameter, wie Gesamtporenvolumen, Wasserhaltefähigkeit oder Verdichtbarkeit eines Bodens ableiten oder errechnen (Ruehlmann et al., 2009). Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Trockenrohdichte und das Gesamtporenvolumen eines Bodens zusammenhängen. Nimmt die Trockenrohdichte zu, nimmt das Gesamtporenvolumen ab und umgekehrt (Wardak et al., 2022). Da für die Berechnung des Gesamtporenvolumens aus der Trockenrohdichte die Partikeldichte des Bodens notwendig ist, wird in wissenschaftlichen Papern gemeinhin der Wert von $2,65 \text{ g/cm}^3$ für die Partikeldichte angenommen (Castellini et al., 2019; Chaplain et al., 2011; Chen et al., 2014). Neben dem Einfluss auf das Gesamtporenvolumen führen steigende Trockenrohdichten zu einer Veränderung der Porengrößenverteilungen hin zu den kleineren Porenfraktionen, sowie abnehmender Luftkapazität und ein damit einhergehender gestörter Gasaustausch im Boden (Vomocil, 1957). Der gestörte Gasaustausch kann eine erhöhte Denitrifikationsrate und den Verlust von mykorrhizierenden Pilzen zur Folge haben. Auf Nutzpflanzen bezogen führt eine erhöhte Trockenrohdichte ab einem gewissen Wert zu einer negativen Beeinflussung des Wurzelwachstums die im Folgenden als kritische Trockenrohdichte bezeichnet wird. Die Höhe der kritische Trockenrohdichte, ist abhängig von Ausgangsgestein, Bodenart, angebauter Kultur und Bewirtschaftungssystem (Logsdon et al., 2004). In Bezug auf die Bodenart bestimmen hauptsächlich die Korngrößenfraktionen Schluff und Ton die Höhe der kritische Trockenrohdichte, wobei zunehmende Schluff- und Tongehalte ein Absinken der kritischen Trockenrohdichte bewirken (Jones, 1983). Höhere Schluff- und Tongehalte führen in Böden zu höheren Mittel- und Feinporenanteilen. Des Weiteren führen die physikalischen Kräfte, die Schluff- und Tonteilchen ausüben, zu einem höheren mechanischen Widerstand gegen wachsende Wurzeln bis zu dem Punkt, an dem die Pflanze das Wachstum an den Wurzelspitzen einstellt, da nicht ausreichend Wurzeldruck aufgebracht werden kann, um den Widerstand zu überwinden. Aufgrund dieses Zusammenhangs weisen sandige Böden mit einem größeren körnungsbedingten Grobporenanteil eine höhere kritische Trockenrohdichte auf als Schluff- oder Tonböden (Daddow et al., 1983). Durch die vor allem unter

NT-Bewirtschaftung vorkommende Bioporung wird der direkte Zusammenhang zwischen kritischer Trockenrohdichte und Wurzelwachstum reduziert. Die Wurzeln wachsen aufgrund des niedrigeren Widerstandes in die Bioporen ein (siehe Abbildung 2) und überwinden somit Orte mit zu hoher Trockenrohdichte.



Abbildung 2: Durch Wurzeln ausgekleideter Regenwurmengang (eigene Darstellung)

Weiterhin weisen Bioporen andere chemische und mikrobiologische Zusammensetzungen auf als normale Poren, was zu einem vorrangigen Einwuchs der Wurzeln in die Bioporen zur Folge hat (Stirzaker et al., 1996).

Der Einfluss von CT und NT auf die Trockenrohdichte variiert basierend auf dem Standort, der Bodenart, der Dauer seit der Anwendung des jeweiligen Bewirtschaftungssystems sowie der Probennahmetiefe. Meistens sorgt NT nach der Adaption des Systems für eine Erhöhung der Trockenrohdichte in den oberen Bodenschichten durch das Ausbleiben von mechanischer Lockerung (Schlüter et al., 2020; Tebrügge et al., 1999). Dieser Effekt kann sich jedoch im Zeitverlauf (>6 Jahre) durch eine Zunahme von Bioturbation und der Akkumulation von Humus in den oberflächennahen Schichten umkehren (Li et al., 2020).

In Vergleichsstudien weist CT in den bearbeiteten Schichten eine niedrigere Trockenrohdichte auf, gefolgt von einer stark erhöhten Trockenrohdichte durch die Pflugsohle und einer leicht niedrigeren Trockenrohdichte unter der Pflugsohle. NT-Böden weisen in der Regel eine homogenere Trockenrohdichte über den gesamten Horizont auf mit einer höheren Trockenrohdichte im Vergleich zu CT (siehe Tabelle 1). Wie im Fall von Chaplain et al. (2011) kann es jedoch vorkommen, dass die Trockenrohdichte im Oberboden unter NT niedriger ist.

Tabelle 1: Einfluss des Bewirtschaftungssystems auf die Trockenrohdichte (TRD) im Tiefenverlauf bei verschiedenen Bodenarten

Paper	Bodenart	Bewirtschaftung	Probetiefe	TRD (g/cm ³)
Martinez et al. (2016)	Ls4	CT	-10 cm	1,35 (±0,02)
			-40 cm	1,54 (±0,02)
	Sl4	NT	-10 cm	1,47 (±0,02)
			-40 cm	1,49 (±0,02)
Jacobs et al. (2015)	Ut3	CT	0 – 10 cm	1,35
			10 – 20 cm	1,41
			20 – 30 cm	1,46
			30 – 40 cm	1,55
		NT	0 – 10 cm	1,44
			10 – 20 cm	1,52
			20 – 30 cm	1,52
			30 – 40 cm	1,53
Carter (1990)	Sl3	CT	0 – 10 cm	1,34 (±0,06)
			10 – 20 cm	1,46 (±0,05)
			20 – 30 cm	1,48 (±0,03)
		NT	0 – 10 cm	1,40 (±0,03)
			10 – 20 cm	1,49 (±0,01)
			20 – 30 cm	1,45 (±0,09)
Chaplain et al. (2011)	Ut4	CT	0 – 20cm	1,55 (±0,15)
		NT	0 – 20cm	1,26 (±0,17)
	Lu	CT	0 – 20cm	1,2 (± 0,15)
		NT	0 – 20cm	1,4 (±0,13)
Tebrügge et al. (1999)	Lu	CT	4 – 8 cm	1,36 (1,21 – 1,45)
			20 – 24 cm	1,42 (1,33 – 1,49)
		NT	4 – 8 cm	1,4 (1,15 – 1,61)
			20 – 24 cm	1,52 (1,47 – 1,59)

Blanco-Canqui et al. (2018) kommen in einer Metastudie zu dem Ergebnis, dass sich die größten Unterschiede in 0 bis -10 cm Tiefe finden lassen, was auch in Tabelle 1 ersichtlich ist und die Auswirkungen von NT auf die Trockenrohdichte standortabhängig sind. Bei 24 von 62 untersuchten Studien führte NT zu einer Zunahme der Trockenrohdichte um 0,6 bis 42 %, in 26 Studien hatte NT keinen Einfluss auf die Trockenrohdichte und in 12 Studien nahm die TRD um 0,6 bis 11 % ab. Die Metastudie von Mondal et al. (2022) zeigt keine signifikanten Unterschiede der Trockenrohdichte zwischen CT und NT im Tiefenverlauf.

2.3 Proctorverdichtungstest

Nach der DIN 18127 ist der Anwendungsbereich des Proctorverdichtungstest wie folgt definiert: „Zweck des Proctorversuches ist es, die Trockendichte eines Bodens nach Verdichtung unter festgelegten Versuchsbedingungen als Funktion des Wassergehaltes festzustellen. Der Versuch dient der Abschätzung der auf Baustellen erreichbaren Dichte des Bodens und liefert eine Bezugsgröße für die Beurteilung der im Baugrund vorhandenen oder auf Baustellen erreichten Dichte des Bodens. Sein Ergebnis lässt auch erkennen, bei welchem Wassergehalt ein Boden sich günstig verdichten lässt, um bestimmte Trockendichten zu erreichen.“

Während des Tests wird mit einem definierten Gewicht, Bodenmaterial bei unterschiedlichen Wassergehalten in einem Zylinder verdichtet. Anschließend wird aus den gemessenen Trockendichten des verdichteten Bodenmaterials und dem Wassergehalt für diese Dichte der optimale Wassergehalt (CWC) für die höchstmögliche Trockendichte die sogenannte Proctordichte (ρ_{pr}) errechnet (siehe Abbildung 3) (Deutsches Institut für Normung, 2012).

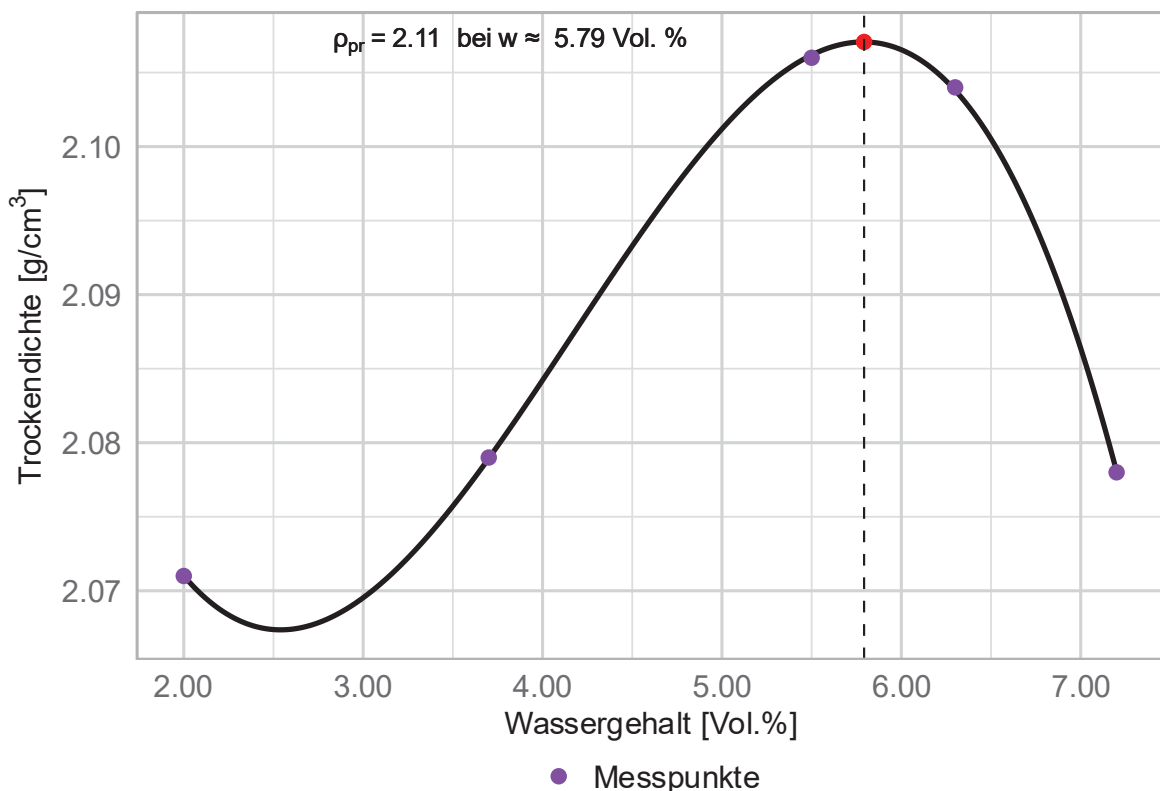


Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung einer Proctorverdichtungskurve für die Ermittlung der höchstmöglichen Trockendichte (ρ_{pr}) und des optimalen Wassergehaltes (CWC) (eigene Darstellung)

Im landwirtschaftlichen Kontext kann der Proctorverdichtungstest genutzt werden, um standardisiert die Verdichtbarkeit von Böden zu bestimmen, sowie den Wassergehalt, unter welchem der Boden durch Befahrung mit Maschinen am verdichtungsanfälligsten ist. Neben dem Wassergehalt beeinflusst der Humusgehalt und die Korngrößenzusammensetzung des

Bodens die Verdichtbarkeit. Limitationen für die vollständige Darstellung der realen Verhältnisse durch den Proctorverdichtungstest ergeben sich durch die Siebung und Homogenisierung des Probematerials, wodurch wichtige Parameter landwirtschaftlicher Böden wie Aggregatstabilität, Bodenstruktur und Porosität nicht mitberücksichtigt werden (Blanco-Canqui et al., 2022).

Weltweit wird der Proctorverdichtungstest hauptsächlich in Systemvergleichen von CT und NT herangezogen. Hierbei zeigt sich, dass bei NT die erreichbaren Proctordichten um 6 bis 13 % in den oberen Bodenschichten gegenüber CT abnehmen. Hauptsächlich verantwortlich ist hierfür der höhere Humusgehalt in diesen Bodenschichten unter NT (Blanco-Canqui et al., 2010). Insgesamt ermöglicht der Proctorverdichtungstest den Vergleich der Bodenverdichtbarkeit zwischen Bewirtschaftungssystemen, wobei die natürlichen Bodeneigenschaften nur eingeschränkt abgebildet werden.

2.4 Eindringwiderstand

Der Eindringwiderstand beschreibt die Kraft der Bindungen zwischen den Bodenpartikeln. Im landwirtschaftlichen Kontext können über diesen Parameter Rückschlüsse auf die Wachstumsbedingungen in verschiedenen Bodenschichten für die Pflanzenwurzel geschlossen werden und somit auf die Entwicklung der Pflanze. Des Weiteren können in Echtzeit Aussagen über die Befahrbarkeit des Bodens, die Auswirkungen durch Befahrung und den potenziellen Energiebedarf bei der Bewirtschaftung ermittelt werden (Klonowski et al., 2024). Der Eindringwiderstand ist eine physikalische Summengröße, die von der Bodenart, Trockenrohdichte, Bodenfeuchtigkeit, Scherfestigkeit und dem Gehalt von Humus abhängt. Aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren kann jedoch kein einzelner Faktor als Haupteinflussgröße auf den Widerstand isoliert werden (Schrey, 1987). In der Praxis findet die Messung des Widerstandes häufig mit einem Kegelpenetrometer statt, welches eine statische vertikale Eindringwiderstandsmessung darstellt. Ursprünglich wurde dieses Messinstrument von der U.S. Army für die Messung der Tragfähigkeit von Böden vor der Befahrung mit schwerem militärischem Gerät entwickelt. Für die Messung des Widerstandes befindet sich an der Spitze des Penetrometers ein Kegel, welcher typischerweise einen 60°-Winkel besitzt und im Durchmesser je nach Einsatzbedingungen variiert. Aus der aufgewendeten Kraft für das Eindringen in den Boden im Verhältnis zur Kegeloberfläche ergibt sich der Eindringwiderstand, welcher typischerweise in N/cm² angegeben wird. In der wissenschaftlichen Literatur wird weiterhin die Einheit Megapascal (MPa) benutzt, wobei 1 Pascal = 100 N/cm² entspricht. Limitierend auf die Aussagekraft und Vergleichbarkeit von Messungen wirken unterschiedliche Bodenwassergehalte bei der Messung, Skelettanteile im Boden sowie kleinräumige Bodenheterogenität (Kirkham, 2005b).

Im pflanzenbaulichen Kontext wird in der wissenschaftlichen Literatur ein Widerstand von $>2\text{MPa}$ über alle Bodenarten hinweg, als Wurzelwachstums hemmend beschrieben (Benjamin et al., 2003; da Silva et al., 1994; Taylor et al., 1966). Weiterhin können bei Tonböden niedrigere Widerstände ($1,0\text{ MPa}$) bereits wurzelwachstumshemmend wirken (Klonowski et al., 2024). Außerdem ist festzuhalten, dass der gemessene Penetrationswiderstand, den von den Wurzeln ausgeübten Wurzeldruck je nach Kultur um das 1,8 – 7,5-fache übersteigt. Wurzeln sind nicht gezwungen gradlinig durch den Boden zu wachsen und können Orten erhöhten Widerstands ausweichen im Vergleich zum Penetrometer (Clark et al., 2003). Aufgrund dessen können Wurzeln in Böden mit ausgeprägter Bioporus, Widerstände umgehen, indem die Wurzeln im inter-aggregat Raum weiterwachsen, wodurch der negative Einfluss vermindert wird (Ehlers et al., 1983). Im internationalen Vergleich fanden Blanco-Canqui et al. (2018), dass NT in 50 % der untersuchten Studien (17 von 34 Studien) den Eindringwiderstand in den oberen 30 cm erhöhte und hier vorrangig in den oberen 10 cm. In 14 Studien gab es keinen Unterschied im Eindringwiderstand zwischen NT und CT und bei 3 war der Widerstand bei NT niedriger.

2.5 Humus und Humusbildung

Der Begriff Humus bezeichnet die Gesamtheit aller im Boden enthaltenen abgestorbenen und in Umsetzung befindlichen organischen Stoffe, sowie deren Umwandlungsprodukte. Die organischen Stoffe befinden sich in einem stetigen Aufbau, Abbau und Umbau durch Prozesse der Zersetzung, Mineralisierung und Humifizierung. Angegeben wird der Humusgehalt als prozentualer Masseanteil am Gesamtboden (Beyer, 2014). Weltweit betrachtet stellt Humus die größte Kohlenstoffsенke dar. Ungefähr 3500 – 4000 Gt Kohlenstoff sind in Humus gebunden, während die Atmosphäre lediglich 829 Gt Kohlenstoff in Form von CO_2 und die Vegetation 420 – 620 Gt Kohlenstoff enthält (Lehmann et al., 2015). Der Humus unterteilt sich anhand der Stärke der Zersetzung der organischen Substanz in verschiedene Fraktionen. Die erste Fraktion sind die ober- und unterirdischen Pflanzenreste, welche nicht oder nur wenig zersetzt sind, mit noch klar erkennbarer Gewebestruktur. Die mikrobiellen Reste stellen eine weitere Fraktion dar. Sie entstehen aus den Überresten abgestorbener Bodenorganismen und können auch längerfristig stabil im Boden sein. Die letzte Fraktion ist die mineralgebundene organische Substanz. Diese morphologisch stark umgewandelte organische Substanz weist keine makroskopisch erkennbaren Gewebestrukturen mehr auf und stammt im Ursprung aus Pflanzenresten oder mikrobiellen Quellen. Aufgrund der Verbindung von mineralischer und organischer Substanz sind diese Verbindungen nur schwer durch Mikroben abbaubar und somit sehr stabil. Die bekannteste mineralisch organische Verbindung stellt der Ton-Humus-Komplex dar. Dieser Komplex besteht aus Huminstoffen, Calcium und Tonmineralen und sorgt für die Aggregatbildung im

Boden. Neben diesen im Boden immobil vorliegenden Fraktionen entstehen bei der Zersetzung der organischen Substanz niedermolekulare, lösliche organische Verbindungen wie z.B. Essigsäuren, Ketoglutar säuren, Aldehyde, Polyphenole etc., die im Bodenwasser mobil sind. Im landwirtschaftlichen Kontext sind neben den Pflanzenrückständen organische Dünger in Form von Mist, Gülle, Kompost und Klärschlamm eine weitere primäre Quelle organischer Reststoffe für die Humusbildung.

Die Mineralisation des Humus durch Bodenorganismen führt zu der Freisetzung von CO₂ und der in den organischen Verbindungen enthaltenen Makro- und Mikronährstoffe. Neben der Eigenschaft als Nährstoffspeicher hat der Humus weitere chemische und physikalische Eigenschaften. Humus besitzt Adsorptionsvermögen für Kationen und Anionen und ist somit Teil der Kationen-Anionen-Austauschkapazität (KAK) des Bodens. Aufgrund der hohen KAK des Humus, kann dieser auf Sandböden bis zu 75 % der Gesamt-KAK ausmachen. Weiterhin sorgen die Ton-Humus-Komplexe für ein stabiles Aggregatgefüge des Bodens. Dies führt zu einer geringeren Erosionsneigung des Bodens sowie höherer Stabilität bei Belastung des Bodens. Außerdem besitzt Humus eine hohe Wasserspeicherkapazität, die dem drei bis fünffachen seines Eigengewichts entspricht. Als Nebeneffekt sorgt die aggregierende Wirkung ebenfalls für eine Veränderung der Porengrößenverteilung, was auf Sandböden zu einer Zunahme der Feldkapazität führen kann.

Humusaufbau und Mineralisation befinden sich in einem kontinuierlichen Fluss. Die Umsatzrate wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Aride oder humide Klimabedingungen sorgen für eine Verlangsamung der Zersetzung und Mineralisation, pH-Werte außerhalb des Optimums sorgen ebenfalls für eine Hemmung der an der Umsetzung beteiligten Organismen. Der Tongehalt beeinflusst den Humusumsatz in der Form, dass in tonhaltigen Böden unter gleichen klimatischen Bedingungen mehr Ton-Humus-Komplexe gebildet werden als auf Sandböden, wodurch der Humus besser vor mikrobieller Mineralisation geschützt ist. Engere C/N-Verhältnisse, herbeigeführt durch Düngung sorgen für eine schnellere Umsetzung von organischer Substanz. Schließlich sorgt Bodenbearbeitung für eine Zerstörung von Aggregaten, wodurch die in ihnen enthaltene organische Substanz dem biochemischen Abbau verfügbar gemacht wird. Durch die landwirtschaftliche Bodenbewirtschaftung direkt beeinflusste Parameter für die Humusumsatzrate und -bildung sind die angebauten Kulturfrüchte, Fruchtfolge, der Einsatz von mineralischen und organischen Düngern, Kalkung und Wahl der Bodenbearbeitungsintensität (Amelung et al., 2018).

Im Vergleich der Bewirtschaftungssysteme CT und NT ergeben sich Unterschiede beim Humus. Generell wird NT zugesprochen den Humusgehalt im Oberboden zu erhöhen, was jedoch nicht einheitlich feststellbar ist (siehe Tabelle 2). Grundsätzlich sorgt CT durch die

Einmischung von Pflanzenresten bis auf die Pflugsohle für eine homogenere Verteilung von Humus und Nährstoffen im Bearbeitungshorizont.

Bei NT hingegen kommt es zu einer Akkumulation von Pflanzenresten an der Erdoberfläche. Dies führt zu einer Stratifikation des Humus und von Nährstoffen im Tiefenverlauf, insbesondere von Kalium und Phosphor, mit den höchsten Werten nahe der Oberfläche. Magnesium und Calcium sind hingegen von der Stratifikation nicht im selben Umfang betroffen. Die beschriebene Humusakkumulation in oberflächennahen Schichten führt zu einer höheren Aggregatstabilität, was sich positiv auf Erodierbarkeit und Infiltrationsleistung auswirkt (Martínez et al., 2016; Mühlbachová et al., 2024). In Tabelle 2 ist die beschriebene Stratifikation des Humus unter NT mit den höchsten Gehalten in oberflächennahen Schichten deutlich zu erkennen, während CT geringfügig schwankende Gehalte über den gesamten gemessenen Horizont aufweist.

*Tabelle 2: Einfluss des Bewirtschaftungssystems auf den Humusgehalt im Tiefenverlauf bei verschiedenen Bodenarten (*Mischprobe des insgesamt gemessenen Horizontes)*

Paper	Land	Bodenart	Bewirtschaftung	Probetiefe	Humusgehalt (Masse-%)
Swedrzynska et al. (2013)	Poland	lehmiger Sand	CT	0 – 10 cm	1,55
				0 – 20 cm	1,55
			NT	0 – 10 cm	2,14
				0 – 20 cm	1,52
Šimon et al. (2009)	Czech Republic	toniger Lehm	CT	0 – 10 cm	1,60
				10 – 30 cm	1,54
			NT	0 – 10 cm	1,83
				10 – 30 cm	1,63
Duiker et al. (2006)	USA	schluffiger Lehm	CT	0 – 5 cm	2,18
				5 – 10 cm	2,21
				10 – 15 cm	2,20
				0 – 15 cm	2,20*
			NT	0 – 5 cm	3,75
				5 – 10 cm	2,45
				10 – 15 cm	2,26
				0 – 15 cm	2,82*
Jacobs et al. (2015)	Deutschland, Lütte Witz	Ut3	CT	0 – 10 cm	1,98
				10 – 20 cm	2,08
				20 – 30 cm	2,12
				30 – 45 cm	1,19
			NT	0 – 10 cm	2,77
				10 – 20 cm	2,01
				20 – 30 cm	1,72
				30 – 45 cm	1,08

Die Untersuchungen von Martínez et al. (2016) am Versuchsstandort „Oberacker“ in der Schweiz zeigen nach 20 Jahren die selbe Stratifikation bzw. Homogenisierung im Bearbeitungshorizont. Bei Betrachtung des Gesamtprofils (0 bis -50 cm) zeigt sich, dass in beiden Bewirtschaftungsformen circa 70 t/ha Kohlenstoff gebunden sind. Jacobs et al. (2015) kommen bei der Betrachtung des Gesamthorizontes (0 bis -45 cm) auf einen signifikanten Unterschied von 70,0 t/ha gespeicherten Kohlenstoff bei NT und 66,6 t/ha gespeicherten Kohlenstoff bei CT. Weiterhin zeigen beide Studien unterhalb von 30 cm eine Angleichung der Humusgehalte von CT und NT auf niedrigem Niveau.

2.6 Boden pH-Wert

Der pH-Wert ist der negative dekadische Logarithmus der Konzentration der H^+ -Ionen in einer wässrigen Lösung. Die Ermittlung des pH-Wertes mit Wasser als Pufferlösung stellt eine Möglichkeit dar. Wasser hat jedoch den Nachteil, dass im Bodenprobenmaterial enthaltene lösliche Salze z.B. aus Düngern ebenfalls in Lösung gehen. Dies führt zu starken Schwankungen des gemessenen pH-Wertes, obwohl die Basisacidität gleichbleibt. Aus diesem Grund werden Pufferlösungen mit Calciumchlorid ($CaCl_2$) oder Kaliumchlorid (KCl) verwendet. Die Zugabe von $CaCl_2$ sorgt für eine Hintergrund Elektrolytkonzentration, die die Messvariationen durch lösliche Salze minimiert. Durch die Anlagerung von Ca^{2+} -Ionen an den Austauscherkomplex wird zusätzlich ein Teil der dort gebundenen H^+ -Ionen verdrängt und in die Lösung überführt. Durch diesen Vorgang ist der $pH(CaCl_2)$ circa 0,2 bis 0,5 Einheit niedriger als der $pH(H_2O)$. Durch den Einsatz von KCl Pufferlösung werden sämtliche am Austauscherkomplex gebundenen H^+ -Ionen durch K^+ -Ionen verdrängt und in Lösung überführt. Hierdurch kann die gesamte austauschbare und die aktuelle Acidität gemessen werden. Im Vergleich zu $pH(H_2O)$ ist der gemessene $pH(KCl)$ in der Regel eine Einheit niedriger (Weil et al., 2016). Der pH-Wert des Bodens gibt wichtige Aussagen über verschiedene chemische Bodeneigenschaften. Der pH-Wert beeinflusst die Nährstoffverfügbarkeit, Redoxreaktion, biologische Aktivität, Gefügebildung im Boden und daraus folgend das Pflanzenwachstum. Bodenorganismen werden direkt oder indirekt durch den pH-Wert beeinflusst. Unterschiedliche pH-Werte führen zu unterschiedlichen Enzymaktivitäten und Ionenlöslichkeiten für Bodenmikroorganismen, wodurch diese in Abhängigkeit vom pH-Wert gehemmt oder gefördert werden. Bodentiere tolerieren einen weiteren Bereich des pH-Wertes. Lediglich für den stark sauren pH-Bereich ist bekannt, dass die Anzahl der Regenwürmer abnimmt und sich das Artenspektrum zu den als Streubewohnern klassifizierten Regenwürmern hin verschiebt.

In der landwirtschaftlichen Bodennutzung ist der optimale pH-Wert abhängig von Bodenart und den angebauten Kulturen. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass für das Pflanzenwachstum wichtige Makro- und Mikronährstoffe unterschiedlich gut

pflanzenverfügbar sind. Die Mikronährstoffe Eisen, Mangan, Zink, Kupfer und Bor sind im pH-Bereich von 4 bis 5 am besten löslich mit abnehmender Löslichkeit bei steigendem pH-Wert. Die Makronährstoffe Stickstoff, Phosphor, Schwefel, Calcium, Magnesium und Kalium sind am besten löslich bei pH 6 mit abnehmender Löslichkeit bei niedrigerem oder höherem pH-Wert. Einzig Molybdän ist bei pH-Werten >7 am besten löslich. Zusätzlich gehen bei pH-Werten <5, Al³⁺ - Ionen in Lösung, welche toxisch auf Pflanzen wirken. Neben der optimalen Nährstoffverfügbarkeit für die Pflanzen beeinflusst auch die Bodenart den landwirtschaftlich notwendigen pH-Wert (siehe Tabelle 3). Durch die Eigenschaft von Calcium, in Verbindung mit Tonteilchen und Humus stabile Aggregate zu bilden, wird das Bodengefüge stabilisiert (Amelung et al., 2018).

Tabelle 3: Optimale pH-Werte für landwirtschaftliche Böden in Abhängigkeit vom Tongehalt und <4 % Humusgehalt (Amelung et al., 2018)

Tongehalt	pH-Wert
<5 %	5,0 – 5,5
5 – 12 %	5,4 – 6,0
>13 %	6,0 – 6,5

Die Bewirtschaftungssysteme haben unterschiedliche Einflüsse auf den pH-Wert. Wie in Tabelle 4 zu erkennen ist kommt es, wie beim Humus zu einer Stratifikation der pH-Werte bei NT, mit den niedrigsten Werten nahe der Oberfläche und einer Zunahme in der Tiefe, während CT einen homogenen pH-Wert über den Bearbeitungshorizont aufweist. Unterhalb des Bearbeitungshorizonts nähern sich die pH-Werte bei beiden Bewirtschaftungsverfahren an (Limousin et al., 2007; Martínez et al., 2016). Eine Ausnahme bildet die Untersuchung von Neugschwandtner et al. (2014). Der Bodentyp am Versuchsstandort ist ein Tschernosem auf stark kalkhaltigem alluvialem Sediment, weshalb kein Unterschied zwischen Bewirtschaftungsweisen beobachtet werden konnte.

Tabelle 4: Einfluss des Bewirtschaftungssystems auf den pH-Wert im Tiefenverlauf bei verschiedenen Bodenarten (*Mischprobe des insgesamt gemessenen Horizontes)

Paper	Land	Bodenart	pH-Messung	Bewirtschaftung	Probetiefe	pH-Wert
Swedrzynska et al. (2013)	Poland	lehmiger Sand	KCl	CT	0 – 10 cm	6,69
					0 – 20 cm	6,71
				NT	0 – 10 cm	6,23
					0 – 20 cm	6,74
Mühlbachová et al. (2024)	Czech Republic	toniger Lehm	CaCl ₂	CT	0 – 10 cm	6,9
					10 – 20 cm	7,1
					20 – 30 cm	7,3
				NT	0 – 10 cm	6,8
					10 – 20 cm	7,1
					20 – 30 cm	7,2
Duiker et al. (2006)	USA	schluffiger Lehm	H ₂ O	CT	0 – 5 cm	6,3
					5 – 10 cm	6,58
					10 – 15 cm	6,58
					0 – 15 cm	6,48*
				NT	0 – 5 cm	6,48
					5 – 10 cm	6,5
					10 – 15 cm	6,72
					0 – 15 cm	6,57*
Neugschwandtner et al. (2014)	Austria	schluffiger Lehm	CaCl ₂	CT	0 – 10 cm	7,56
					10 – 20 cm	7,58
					20 – 30 cm	7,59
					30 – 40 cm	7,60
					0 – 40 cm	7,58*
				NT	0 – 10 cm	7,54
					10 – 20 cm	7,58
					20 – 30 cm	7,60
					30 – 40 cm	7,61
					0 – 40 cm	7,58*

Als Grund für die Zunahme des pH-Wertes im Tiefenverlauf kann die Auswaschung von Calcium in tiefere Schichten gesehen werden (Duiker et al., 2006; Mühlbachová et al., 2024). Duiker et al. (2006) schränken jedoch ein, dass bei Böden mit basischem Unterboden keine größeren Unterschiede im pH-Wert des Oberbodens zwischen NT und CT zu erwarten sind, solange regelmäßig gekalkt wird. Weitere Gründe für die oberflächennahe Versauerung bei NT können die Mineralisation von Humus, Ausbringung sauer wirkender Dünger, sowie Wurzelexsudate sein (Limousin et al., 2007). Außerdem fanden Limousin et al. (2007) und Martínez et al. (2016) eine negative Korrelation von Humusgehalt und pH-Wert bei NT.

2.7 Kationenaustauschkapazität

Die Kationenaustauschkapazität (KAK) beschreibt die Menge der austauschbar gebundenen Kationen in einem Boden. Vorrangig sind dies die Kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , H^+ und Al^{3+}). Die KAK der mineralischen Bodensubstanz wird durch die Tonfraktion und zu einem kleinen Teil durch die Schlufffraktion gebildet. Der Humus besitzt ebenfalls eine KAK, welche jedoch variabel ist. Mit abnehmendem pH-Wert sinkt die KAK des Humus. Daraus folgt die Unterscheidung beim Humus zwischen potenzieller KAK (KAKpot) und der effektiven KAK (KAKeff). Die KAKpot des Humus ist bei einem pH-Wert von 8,2 festgeschrieben. Bei diesem pH-Wert wird davon ausgegangen, dass die Protonen aller Säuregruppen der Huminstoffe ausgetauscht werden können. Unter realen Bedingungen mit niedrigeren pH-Werten sind weniger Protonen an den Säuregruppen austauschbar und die KAK des Humus sinkt. Diese KAK wird KAKeff des Humus bezeichnet. Die Summe aus KAKpot der mineralischen Substanz und der KAKeff des Humus ergibt die KAK eines Bodens (Sponagel et al., 2005).

2.8 Poren und Kennwerte der Wasserbindung

In einem Boden entstehen Zwischenräume zwischen den Bodenpartikeln, aufgrund der verschiedenen Korngrößen, Formen der Körner und der Aggregation von Körnern (Aggregate) die als Poren bezeichnet werden. Sie stellen die Basis für den Wasserhaushalt, den Gasaustausch sowie für sämtliche chemische und biologische Vorgänge dar (Amelung et al., 2018). Weiterhin kann zwischen intra-aggregat Porenraum und inter-aggregat Porenraum unterschieden werden. Der intra-aggregat Porenraum befindet sich innerhalb der Aggregate. Der inter-aggregat Porenraum befindet sich zwischen den Aggregaten. Der Porenraum wird beeinflusst durch biologische Aktivität, Wurzelwachstum, Schrumpfung und Quellung von Böden sowie durch Bearbeitung und Befahrung (Lal, 2005). Aufgrund der Vielfalt der Porengrößen und daraus resultierende Funktionen im System Boden wurden verschiedene Porengrößenbereiche definiert (siehe Tabelle 5). In Abhängigkeit von den Porengrößen wirken unterschiedliche Kräfte auf das in den Poren enthaltene Wasser (siehe folgendes Unterkapitel), welche mit der negativen Saugspannung (angegeben in hPa) gleichgesetzt und gemessen werden. Aus der Saugspannung wird mit dem dekadischen Logarithmus der pF-Wert errechnet (Sponagel et al., 2005). Der pF-Wert wurde von Schofield im Jahr 1935 eingeführt, um die Darstellung der negativen Saugspannungen in einfachen kurzen Zahlen zu ermöglichen, da z.B. im Bereich der Mittelporen bereits fünfstellige Saugspannungswerte erreicht werden (Hillel, 1980).

2.8.1 Porengrößen nach KA5 und deren Funktionen

Als weite Grobporen werden Poren mit $>50 \mu\text{m}$ Porendurchmesser bezeichnet. Sie weisen eine Saugspannung von $pF < 1,8$ auf. Aufgrund dieser Eigenschaften befindet sich in den weiten Grobporen schnell bewegliches Sickerwasser, welches nach 2 bis 3 Tagen abgeflossen ist. Eine permanente Füllung der weiten Grobporen tritt lediglich bei totaler Wassersättigung des Bodens auf. Nach dem Abfluss des Wassers stellen die weiten Grobporen vorrangig die Luftkapazität dar und sorgen somit für den Gasaustausch innerhalb des Bodens (Amelung et al., 2018). Gemeinhin wird in der wissenschaftlichen Literatur angenommen, dass der Anteil der luftgefüllten Poren mindestens 10 Vol. % in einem landwirtschaftlich genutzten Boden betragen muss, um den Gasaustausch an der Wurzel und für die Bodenorganismen sicher zu stellen (da Silva et al., 1994; Lal, 2005).

Die engen Grobporen besitzen einen Porendurchmesser von $50 - 10 \mu\text{m}$ und weisen eine Saugspannung von $pF 1,8 - 2,5$ auf. In den engen Grobporen befindet sich langsam bewegliches Sickerwasser, welches pflanzenverfügbar ist. Aufgrund der Porengröße kann das Wasser jedoch nicht gegen die Schwerkraft gehalten werden. Die Grobporen stellen den Hauptanteil des durchwurzelbaren Raums. Weiterhin kann ein durch Nutzung herbeigeführter, höherer Anteil an Grobporen für eine höhere CO_2 -Freisetzung sorgen, da umsetzbare organische Masse für die Mikroorganismen einfacher zugänglich ist. Aufgrund der vorherrschenden Korngrößenverteilung in Sandböden, weisen diese Böden generell höhere Grobporenanteile mit besserer Durchlüftung auf als Schluff- oder Ton dominierte Böden.

Tabelle 5: Porengrößenbereiche mit den zugehörigen Saugspannungsbereichen (Sponagel et al., 2005)

Porengrößenbereich	Porendurchmesser (μm)	Saugspannung (hPa)	pF	Bodenwasser
Weite Grobporen	>50	>-60	$<1,8$	Schnell bewegliches Sickerwasser
Enge Grobporen	$50 - 10$	$-60 \text{ bis } -300$	$1,8 - 2,5$	Langsam bewegliches Sickerwasser
Mittelporen	$50 - 0,2$	$-300 \text{ bis } -15000$	$2,5 - 4,2$	Pflanzenverfügbares Haftwasser
Feinporen	$<0,2$	<-15000	$>4,2$	Nicht Pflanzenverfügbares Haftwasser

Die Mittelporen weisen einen Porendurchmesser von $10 - 0,2 \mu\text{m}$ auf, bei einem pF von $2,5 - 4,2$. In den Mittelporen wird pflanzenverfügbares Wasser gespeichert, welches aufgrund der Porengröße jedoch nur durch feine Wurzelhaare extrahiert werden kann. Im Gegensatz zu den engen Grobporen befindet sich in den Mittelporen kein Sickerwasser, sondern sogenanntes Haftwasser, welches aufgrund der Adhäsions- und Kohäsionskräfte innerhalb der Mittelporen gegen die Schwerkraft festgehalten wird. Die wirkenden Kräfte ermöglichen eine langfristige Speicherung des Wassers, weshalb in ariden Klimaten und trockenen topographischen Lagen mit limitierter Wasserverfügbarkeit ein Bodengefüge mit einem höheren Anteil an Mittelporen vorteilhaft ist. Weiterhin stellen die Mittelporen Lebensraum für Bakterien und Pilzmycel dar.

Die Feinporen, welche zugleich die Untergrenze des permanenten Welkepunktes darstellen, weisen einen Porendurchmesser von $<0,2 \mu\text{m}$ auf, mit einem pF von $>4,2$. Aufgrund der wirkenden physikalischen Kräfte kann das enthaltene Wasser lediglich durch Diffusionsprozesse zu den Pflanzenwurzeln gelangen (Amelung et al., 2018). Kirkham (2005a) präzisiert dies durch die Beschreibung, dass an der Grenze von pF 4,2 vorrangig, in sandigen grob texturierten Böden der Fluss von flüssigem Wasser stoppt, jedoch weiterhin Wasserverlagerung durch Wasserdampf aus den Feinporen heraus möglich ist. Aufgrund des charakteristisch niedrigen Feinporenanteil von Sandböden ist jedoch anzunehmen, dass dieser Wasserdampf keinen großen Beitrag für den Wasserhaushalt der Pflanze leistet. Aufgrund der Porengröße ist der Feinporenanteil eines Bodens vorrangig mit dem vorliegenden Tongehalt verknüpft mit geringem Einfluss von Gefüge und Trockenrohdichte. Durch die Addition der Volumina verschiedener Porengrößenbereiche ergeben sich Kennwerte des Bodenwasserhaushaltes, die als Kapazitäten bezeichnet werden.

Die Feldkapazität (FK) eines Bodens umfasst die Porengrößen der engen Grobporen, Mittelporen und Feinporen und beschreibt somit den volumetrischen Wassergehalt eines Bodens, nach ein bis zwei Tage andauernder Drainage nach Vollauffüllung. Die Feldkapazität repräsentiert somit die maximale Menge an Wasser, die gegen die Schwerkraft 2 – 3 Tage nach Vollauffüllung im Boden zurückgehalten werden kann.

Die nutzbare Feldkapazität (nFK) umfasst das Volumen der engen Grobporen und Mittelporen und beschreibt somit die pflanzenverfügbare Wassermenge. Die Ausnutzbarkeit des vorhandenen Wassers durch die Pflanze ergibt sich aus der Kulturart, der Durchwurzelungstiefe und der Durchwurzelungsintensität (Amelung et al., 2018). Festzuhalten ist, dass die Menge des Wassers, welche durch die FK und die nFK ausgewiesen wird, keine statischen Werte sind. Dies liegt vorrangig an dem sich langsam bewegenden Sickerwasser in den engen Grobporen. Hierdurch stellt sich, in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung, vorrangig mit zunehmendem Tonanteil des Bodens, nie ein absolutes Gleichgewicht des Wassers an den pF -Grenzen ein, weshalb beide Kapazitäten

überschätzt werden. Andererseits sind verschiedene Feldkulturen unterschiedlich gut in der Lage Wasser bis an die Grenze von pF 4,2 zu entziehen und reagieren schon bei niedrigeren pF - Werten mit starken Ertragsverlusten, wodurch die nutzbare Feldkapazität kulturindividuell betrachtet werden muss (Kirkham, 2005a).

2.8.2 Einfluss der Bewirtschaftungssysteme auf die Porengrößenverteilung

Die Bodenbewirtschaftungssysteme beeinflussen die Größenverteilung und Architektur der Poren. Bei CT führt die mechanische Lockerung zu einer Bildung loser Matrix und dichter Klumpen, die in der losen Matrix eingebettet sind. Dieser Vorgang bewirkt eine Zunahme der weiten Grobporen und eine Homogenisierung der Porenverteilung im Bearbeitungshorizont mit Strukturbrüchen an Bearbeitungsgrenzen, wie beispielsweise der Pflugsohle. Gleichzeitig werden kontinuierliche, meist vertikal verlaufende Bioporen unterbrochen. Dies verringert die strukturelle Widerstandskraft des Bodens gegenüber mechanischer Belastung. Im Gegensatz dazu weist NT eine dichtere Matrix auf, die überwiegend von vertikal verlaufenden, langfristig stabilen Bioporen (Regenwurmgänge, alte Wurzelkanäle etc.) durchzogen ist (Schlüter et al., 2020).

Bezüglich des Gesamtporenvolumens zeigt sich, dass unter NT dieses im Vergleich zu CT abnimmt, wobei die Unterschiede mit zunehmender Tiefe geringer ausfallen. Mondal et al. (2022) zeigen in ihrer Metastudie, dass im gemäßigten Klima vorrangig im Oberboden (0 – 20 cm) signifikant niedrigere Porenvolumina bei NT auftreten, während die Unterschiede im weiteren Tiefenverlauf abnehmen und NT ab -30 cm CT übersteigt (Mondal et al., 2022). Die Abnahme des Gesamtporenvolumens ist vorrangig durch eine Abnahme des weiten Grobporenvolumens im Oberboden (0 – 20 cm) bei NT im Vergleich zu CT begründet. Gleichzeitig nimmt jedoch die vertikale Porenkonnektivität mit der Oberfläche und Kontinuität der weiten Grobporen im gesamten Horizont zu. Zudem werden verstärkt Grobporen (>500 µm) gebildet, während der Anteil an Grobporen mit einem Durchmesser von 500 – 100 µm abnimmt. Dies führt zu einer heterogeneren Porenstruktur mit verminderter horizontaler Konnektivität (Wardak et al., 2022). Die Befunde von Wardak et al. konnten von Schlüter et al. (2020) am Standort Lüttewitz, Deutschland mittels Röntgentomografie (siehe Abbildung 4) bestätigt werden. Der Boden der NT-Parzelle zeigte ein signifikant geringeres weites Grobporenvolumen bei gleichzeitig höherer Trockenrohdichte.

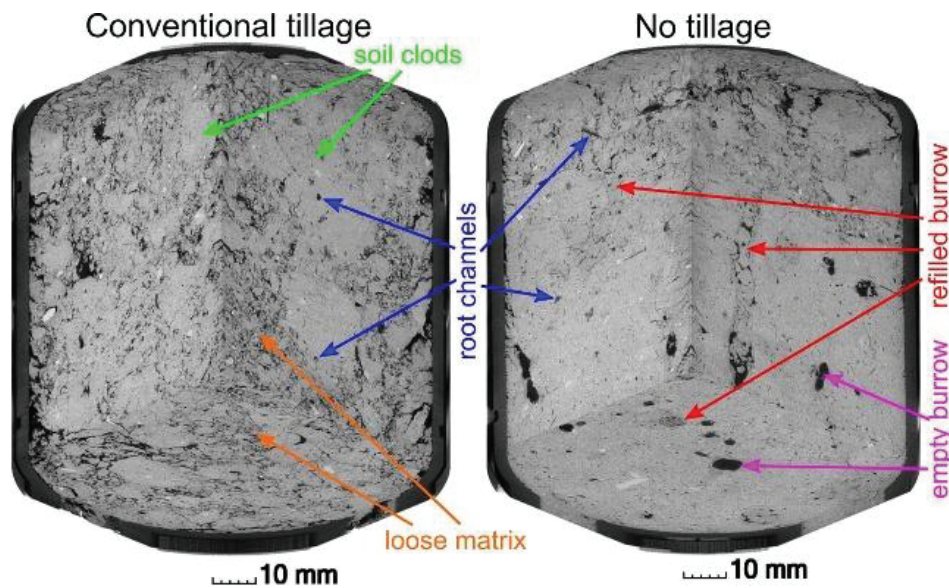


Abbildung 4: Röntgentomografie Aufnahme einer CT und NT-Probe aus 10 – 20 cm Tiefe am Standort Lüttewitz (Schlüter et al., 2020)

Der durchschnittliche Durchmesser der vorhandenen weiten Grobporen war unter NT signifikant größer, während die horizontale Konnektivität geringer ausfiel.

Es konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede im Porenabstand zwischen den Bewirtschaftungssystemen festgestellt werden, was auf eine weitgehend homogene Verteilung der Bioporen bei NT hindeutet, trotz der homogenisierenden Wirkung der Bearbeitung unter CT. Die Autoren schlussfolgern, dass am untersuchten Standort trotz höherer Trockenrohdichte und veränderter Porenarchitektur unter NT keine negativen Effekte auf die Pflanzenproduktion zu erwarten sind.

Martinez et al. (2016) zeigen bei der Untersuchung des CT/NT-Langzeitversuch „Oberacker“, dass CT ein höheres weite Grobporenvolumen im Oberboden (-10 cm), aber niedrigere Werte im Unterboden (-40 cm) aufweist. NT hingegen zeigt niedrigere weite Grobporenvolumina im Oberboden, jedoch deutlich höhere im Unterboden. Dieses Muster wird auf die stärkere Bioporung unter NT zurückgeführt.

Zusätzlich zeigte sich bei der Untersuchung der Gasdiffusivität, dass NT ähnliche Werte im Ober- und Unterboden aufwies, was auf eine höhere Porenkontinuität und -konnektivität hindeutet. Einschränkend muss jedoch erwähnt werden, dass NT bei $pF < 2$ bereits kritische Schwellenwerte für den Gasaustausch erreicht, während CT im Oberboden die höchsten Diffusivitätswerte und unkritische Werte für alle pF -Stufen zeigt. Im Unterboden hingegen weist CT die niedrigsten Diffusivitätswerte auf mit entsprechender Erreichung der kritischen Werte. Die Autoren weisen zusätzlich darauf hin, dass bei CT trotz vorteilhafterer Bedingungen im Oberboden ein erhöhtes Risiko für Oberflächenverkrustung besteht, was den Gasaustausch negativ beeinflussen kann.

Durch die Abnahme des weite Grobporen Volumens sowie durch die veränderte Gefügearchitektur unter NT kommt es zu einer Zunahme des Anteils enger Grobporen und Mittelporen, insbesondere in den oberen 20 cm des Bodens. Hier tritt auch der stärkste Rückgang des weite Grobporen Volumens auf, was laut der Metastudie von Mondal et al. (2022) zu einer Porenvolumenzunahme der engen Grobporen und Mittelporen von 6,7 % in 0 – 20 cm Tiefe in den gemäßigten Klimazonen führt.

In Bezug auf das Mittelporenvolumen sind die Ergebnisse uneinheitlich. Blanco-Canqui et al. (2017) konnten in ihrer Untersuchung keine Vorteile bei NT gegenüber CT finden. Die Metastudie von Blanco-Canqui et al. (2018), die 13 weitere Vergleichsstudien untersucht, kommt zu demselben uneinheitlichen Ergebnis. Weiterhin ist festzuhalten, dass für eine Zunahme der Mittelporen vorrangig die Zunahme des Humusgehaltes unter NT in den untersuchten Studien genannt wird und nicht die beschriebene Gefügeänderung.

Generell ist die internationale Vergleichbarkeit von Porenvolumina und den daraus abgeleiteten Kapazitäten grundsätzlich schwierig, da sowohl die Definition der Saugspannungsbereiche für die einzelnen Porengrößenklassen als auch die Auslegung der FK und nFK variieren. So beschreiben Tan et al. (2025) die Feldkapazität als das gesamte Porenvolumen $pF > 1$ und die nFK als FK abzüglich des permanenten Welkepunktes. Jabro et al. (2022) definieren Makroporen für $pF < 0,48$ und ordnen den Bereich von $pF 0,48$ bis $pF 2,5$ den Mesoporen zu, was in etwa einer Kombination aus den in Deutschland üblichen weiten und engen Grobporen entspricht. Mittel- und Feinporen werden dort zusammengefasst und als Mikroporen $pF > 2,5$ bezeichnet. Selbst innerhalb Europas existieren Unterschiede. Martinez et al. (2016) legen die nutzbare Feldkapazität im Bereich $pF 2,0 - 4,2$ fest, während sie den Bereich der weiten Grobporen zwischen dem vollständig wassergesättigten Zustand und $pF 2$ ansetzen. Für die vorliegende Arbeit ist einzuschränken, dass Martinez et al. (2016) die gemessenen Werte bei den weiten Grobporen in erster Linie auf Poren $> 100 \mu m$ zurückführen. Daher ist anzunehmen, dass die Verschiebung der unteren Grenze von $pF 1,8$ auf $pF 2,0$ keinen maßgeblichen Einfluss auf das hier ausgewiesene weite Grobporenvolumen hat, sodass die Vergleichbarkeit der Ergebnisse innerhalb dieser Arbeit gewährleistet bleibt. Weitere abweichende Definitionen der Porengrößen finden sich u. a. bei Oorts et al. (2006), Iglesias et al. (2014), Pires et al. (2017) und Mady (2022) usw. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Porengrößenklassen und die darauf basierenden Kapazitäten international schwierig bis gar nicht vergleichbar sind, wodurch es leicht zu Fehlinterpretationen kommen kann.

2.8.3 Saugspannungskurve nach van Genuchten

Die Saugspannungskurve nach van Genuchten wurde von van Genuchten erstmals in dem Paper „A closed-form Equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils“ im Jahr 1980 beschrieben. Mit dieser Gleichung kann die Bodenwassergehalt-Saugspannungskurve $\theta(h)$ berechnet werden. Die Gleichung lautet:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |h|)^n]^m}$$

Wobei θ_s den Wassergehalt eines Bodens bei pF 0 und θ_r den Wassergehalt bei pF 4,2 darstellt, α und n sind van Genuchten Skalenparameter. Die Variable m ist eine Nebenbedingung, die sich in folgender Gleichung ausdrückt:

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

Aus diesen Parametern wird die Saugspannungskurve berechnet, welche den Bodenwassergehalt und die Saugspannung in Beziehung setzt. Beim Vorliegen von anderen gemessenen Wassergehalten, welche zwischen pF 0 und pF 4,2 liegen, kann durch nicht-lineare least-square Berechnung die Kurve an die vorhandenen Messwerte angepasst werden (van Genuchten, 1980).

Anhand der Saugspannungskurve lässt sich beispielsweise ermitteln, aus welchem Porengrößenbereichen die Pflanze bei einem im Feld gemessenen Bodenwassergehalt derzeit Wasser entzieht. Für die Anwendung in der Praxis muss jedoch eingeschränkt werden, dass die Saugspannungskurve lediglich empirisch ermittelt wird. In Böden mit Einzelkorngefügen wie z.B. Sandböden sind die vorhergesagten Werte relativ präzise, in sekundärporenenreichen Böden mit Porenkontinuität können die Werte nur näherungsweise bestimmt werden. Trotz dieser Einschränkungen stellt die Saugspannungskurve eine Grundgröße für die Berechnung von Wasserbewegung und anderen Größen des Wasserhaushalts dar. Aufgrund der verschiedenen Porengrößenverteilungen von Bodenarten weisen die Kurven unterschiedliche charakteristische Verläufe auf (siehe Abbildung 5) (Amelung et al., 2018).

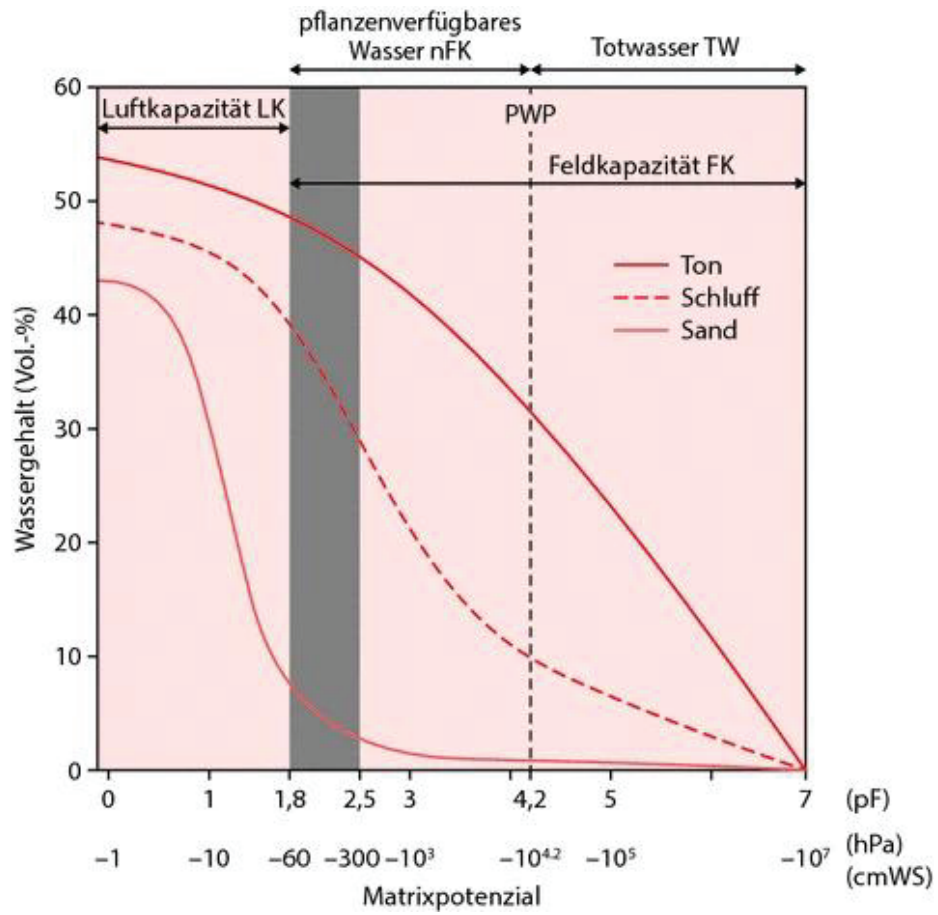


Abbildung 5: Saugspannungskurven eines Sandbodens, eines tonigen Schluffbodens und von einem Tonboden (Amelung et al., 2018)

3 Methodik

3.1 Untersuchungsprogramm

Ziel des Untersuchungsprogramms war es zu untersuchen, in welchem Maß sich CT und NT auf die Wasserhaltefähigkeit des Bodens sowie weitere in Tabelle 6 aufgeführte bodenphysikalische und bodenchemische Parameter auswirken. Die Untersuchung erfolgte an zwei ausgewählten Standorten in der Nähe von Stralsund. Die Auswahl der Probenahmestandorte erfolgte durch Fernerkundung auf Basis des *Bodenschätzwertinformationssystem MV*, der *Digitalen Topographischen Karte MV*, des *Digitalen Oberflächenmodells MV* sowie der *DOP40 MV* (Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 2017). Die Standorte wurden so gewählt, dass an beiden Entnahmestellen Geschiebemergel der Hochflächen als Ausgangssubstrat der Bodenbildung vorliegt und somit eine Vergleichbarkeit in Bezug auf Bodentyp, Bodenart und Relief vorliegt. Die Entnahme der Proben erfolgte in den Tiefenstufen 5 – 10 cm, 15 – 20 cm, 25 – 30 cm, 35 – 40 cm und 45 – 50 cm unter Geländeoberkante (GOK). Die NT-Fläche wird seit sieben Jahren im NT-System bewirtschaftet.

Tabelle 6: bodenphysikalische und bodenchemische Parameter des Untersuchungsprogramms

Parameter	Messverfahren
Trockenrohdichte	DIN 18125
Proctorverdichtung	DIN 18127
Eindringwiderstand	Penetrometer
Humusgehalt	DIN 18128
pH-Wert (CaCl ₂)	DIN 10390
Porengrößenverteilungsbestimmung	pF-Stufen Test
Partikeldichte	Gas Pycnometer
Korngrößenbestimmung	Laser Particle Size Analysis

3.2 Standort

Die Untersuchungsstandorte liegen in der norddeutschen jüngeren Jungmoränenlandschaft auf der Grundmoränenplatte. Das Relief dieses Landschaftsraumes ist geprägt durch die Weichselvereisung (115000 bis 11600 vor heute), welche die letzte große Vereisung des Inlandes darstellt. Insbesondere die Eisvorstöße von Skandinavien aus kommend (24000 bis 11600 vor heute) prägten die heutige Jungmoränenlandschaft. Die Untersuchungsstandorte sind dabei insbesondere durch den jüngsten Weichsel-Hochglazial- Eisvorstoß, den sogenannten Mecklenburger Vorstoß (15000 bis 14000 vor heute) geprägt. Während der Vereisung kam es zur Verwehung von Sanden,

frostgesteuertem Bodenfließen und der Bildung von Frostrissen. Im Spätglazial begann das flächenhafte Abschmelzen der Gletscher, wobei im ältesten Dryas (13780 bis 13910 vor heute) noch Permafrost Bedingungen herrschten, wodurch periglaziale Prozesse wirkten. Diese Prozesse führten z.B. zur Bildung von Rissen im Boden in Herbst und Winter durch sehr große Temperaturgefälle. Durch Erosion wurde in diese Risse Sand eingeweht oder Eiskeile bildeten sich. Beim Auftauen des Permafrostbodens rutschte umliegender Sand an die Stelle des Eiskeils, was zu der Entstehung von Eiskeilpseudomorphosen führte. Weiterhin führte das Auftauen von Toteis im Boden zu der Bildung vieler kleiner Senken (Sölle) und Depressionen (Böse et al., 2018).

Geschiebemergel ist das durch das Ausschmelzen der Grundmoräne vorherrschende Ausgangssubstrat für die örtliche Bodenbildung. Geschiebemergel ist ein wechsellagerndes Substrat mit Tongehalten zwischen 6 und 14 %, mittleren Kalkgehalten und einer hohen Trockenrohdichte von 1,7 – 2,0 g/cm³ (Janetzko et al., 2014). Der Geschiebemergel auf der Grundmoränenplatte wird meistens von 4 bis 5 dm Decksand überdeckt. Je nach Lage haben sich aus diesem Substrat verschiedene Bodentypen gebildet. In Senken und Niederungen herrschen Gleye und Pseudogleye vor, auf Flugsanden sind es vorwiegend Podsole, Braunerde-Podsole und Gley-Podsole. Auf der Grundmoränenplatte haben sich außerdem Braunerde-Fahlerden, sowie Parabraunerden gebildet (Kühn, 2003).

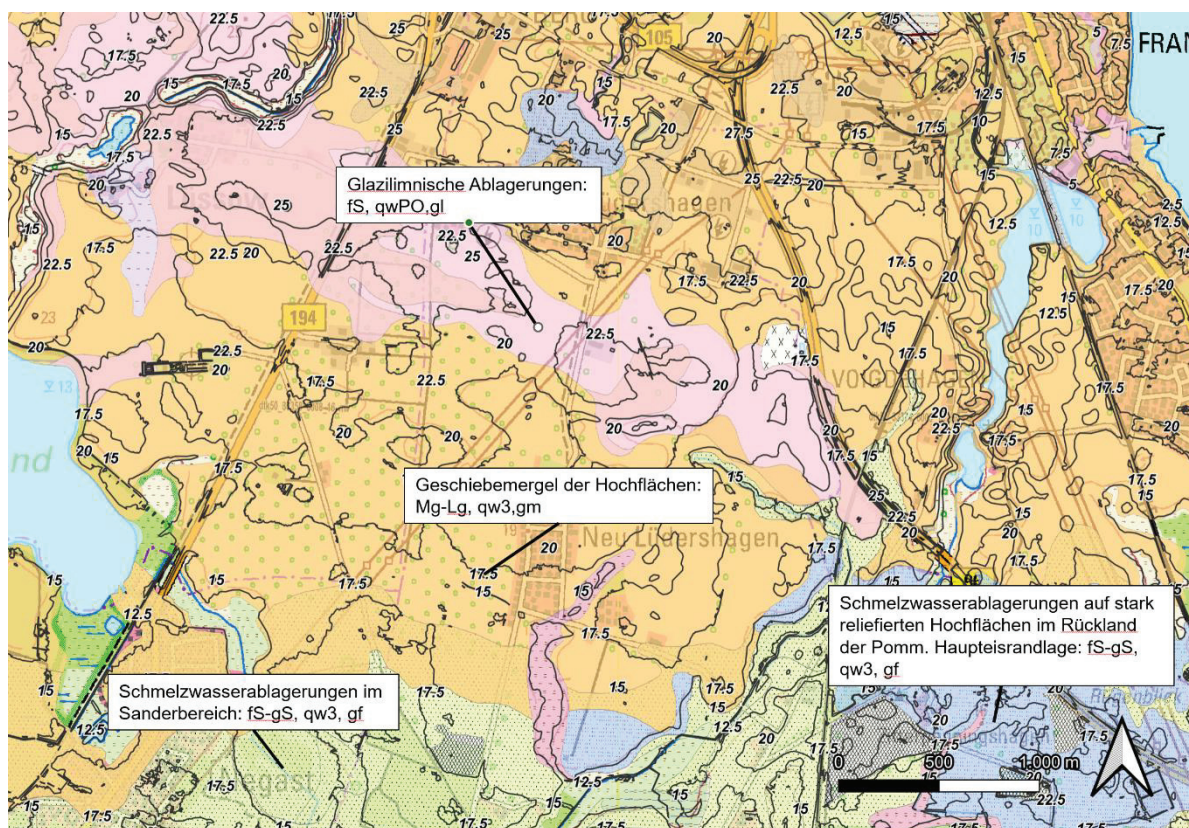


Abbildung 6: Topographische Karte des Standortes (Landesamt für Umwelt Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 2017)

In der unmittelbaren Nähe zu den geplanten Entnahmepunkten befinden sich Grablöcher aus der Bodenschätzung, die zusätzliche Hinweise auf die Standorte liefern. Unweit von BP-SI-52 (Codierung siehe Tabelle 7) liegt das Grabloch 15 (Flur 4). Der Standort ist nach der Reichsbodenschätz als SI 2 D 46/43 eingestuft. Die Krume ist als anlehmiger Sand in der Zustandsstufe 2 beschrieben. Diese Zustandsstufe steht für eine tiefe, humusreiche Krume mit hoher Ertragsfähigkeit. Die Bodenbildung erfolgte während der Eiszeit (siehe Abbildung 6), die Bodenzahl beträgt 46, die Ackerzahl 43. In der Nähe von BP-SI-01 befindet sich das Grabloch 6 (Flur 5) mit dem Klassenbeschrieb IS 5 D 32/32. Der Boden als lehmiger Sand in der Zustandsstufe 5 charakterisiert. Diese weist eine humushaltige Krume mit einer Mächtigkeit von 15 – 25 cm auf, die sich durch eine deutliche Absetzung zum Unterboden infolge einer Bleichzone auszeichnet. Die Boden- und Ackerzahl liegt hier bei 32. Auch dieser Boden entstand während der Eiszeit.

Aufgrund der Nähe zur Ostsee ist das Klima an den Standorten überwiegend maritim geprägt, mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 8,8 °C im Referenzzeitraum (Station Greifswald Jahr 1898 bis 2025) und einem mittleren Jahresniederschlag von rund 600 mm. Im November 2022 lag der Jahresniederschlag bis zur Probeentnahme bei lediglich 445 mm, im Jahr 2025 bei der Probeentnahme Ende März betrug der Niederschlag 75 mm seit Jahresbeginn (Deutscher Wetterdienst, 2025).

3.3 Probennahme

An beiden Standorten wurde zunächst mit einem Pürckhauerbohrstock überprüft, ob die bodenkundlichen Verhältnisse mit den im GIS getroffenen Annahmen übereinstimmen. Anschließend wurde je Standort eine 1 m tiefe Profilgrube angelegt und eine Bodenansprache nach der KA5 (2005) durchgeführt. Die Entnahme ungestörter Bodenproben erfolgte mit Stechringzylindern (100 cm³). Zunächst wurden die obersten 5 cm des Bodens abgetragen. Pro Tiefenstufe wurden jeweils fünf Stechzylinder in die Sohle oberhalb der Tiefenstufe eingeschlagen und später im Labor einzeln ausgewertet. Da die Stechzylinder eine Höhe von 5 cm aufweisen, wurde nach jeder Probeentnahme eine weitere 5 cm dicke Bodenschicht abgetragen. Dies war erforderlich, da das Einschlagen der Zylinder den unmittelbar darunterliegenden Boden mechanisch beeinflusst wodurch keine ungestörte Probenahme direkt darunter möglich war. Zusätzlich wurde Bodenmaterial im Umfeld der Stechzylinder entnommen, dass für den später durchgeführten Proctorverdichtungstest verwendet wurde. Zum Zeitpunkt der Probenahme wuchs auf der NT-Fläche Winterweizen (Vorfrucht Silomais) und auf der CT-Fläche Winterraps (Vorfrucht GPS-Roggen). Alle Proben wurden unmittelbar nach der Entnahme luftdicht verschlossen und bis zur weiteren Untersuchung bei 4 °C im Kühlschrank gelagert.

Tabelle 7: Codierung der Probenahmepunkte mit Entnahmezeitpunkten

Probenahmepunkte	Datum	Jahr	Bewirtschaftung
BP-SI-52	04.11.	2022	NT
BP-SI-52-B2	20.03.	2025	NT
BP-SI-52-C	20.03.	2025	NT
BP-SI-01	01.12.	2022	CT
BP-SI-01-C2	20.03.	2025	CT

Um mögliche Veränderungen der Bodenparameter seit 2022 nachvollziehen zu können, wurde im März 2025 eine Wiederholungsbeprobung an beiden Standorten durchgeführt. Die Nachuntersuchung umfasste die Parameter pH-Wert, Humusgehalt, Trockenrohddichte und Eindringwiderstand.

Die Beprobung erfolgte in unmittelbarer Nähe zu den Profilgruben von 2022. Zunächst wurde mit dem Pürckhauerbohrstock und einer Gefügeansprache nach KA5 kontrolliert, ob der Boden ähnlich aufgebaut ist wie bei der Beprobung 2022. Anschließend wurden die Stechzylinder in den gleichen Tiefenintervallen wie 2022 (5 – 10 cm, 15 – 20 cm, 25 – 30 cm, 35 – 40 cm, 45 – 50 cm unter GOK) entnommen. Am Standort BP-SI-52 wurden an zwei Entnahmepositionen jeweils fünf Stechzylinder eingeschlagen (insgesamt 10 Stechzylinder). Am Standort BP-SI-01 wurden lediglich an einer Entnahmeposition (BP-SI-01-C2) fünf Stechzylindern entnommen. Ziel war es, zu prüfen, ob sich die gewählten Parameter seit 2022 maßgeblich verändert haben. Die genauen Geokoordinaten der Entnahmepunkte sind im externen Anhang zu finden. Die Proben wurden ebenfalls bis zur Untersuchung kühl und luftdicht gelagert.

3.4 Trockenrohddichte (DIN 18125)

Für die Bestimmung der Trockenrohddichte wurden die ungestörten Stechzylinderproben mit einem Volumen von 100 cm³ gemäß DIN 18125 untersucht. Die seit der Entnahme gekühlten feldfeuchten Proben wurden zunächst gewogen und anschließend für 24 Stunden bei 105 °C im Trockenschrank getrocknet. Nach Abschluss der Trocknung erfolgte die Auswaage zur Ermittlung der Trockenmasse (m_d). Die Trockenrohddichte (ρ_d) wurde nach der Gleichung

$$\rho_d = \frac{m_d}{V}$$

berechnet, wobei m_d die Trockensubstanzmasse der Probe darstellt und $V = 100 \text{ cm}^3$ das Volumen des Stechzylinders. Aus der Differenz zwischen feldfeuchter und getrockneter Masse wurde zusätzlich der gravimetrische Wassergehalt (w) bestimmt. Mit Hilfe der Trockenrohddichte wurde anschließend der volumetrische Wassergehalt θ nach folgender Beziehung berechnet werden

$$\theta = \frac{m_w}{V} \cdot 100$$

wobei $V = 100 \text{ cm}^3$ das Stechzylindervolumen darstellt.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden im Jahr 2022 an beiden Standorten je Probentiefe fünf Stechzylinder gezogen und ausgewertet, während im Jahr 2025 pro Probentiefe und Probestellung jeweils ein Stechzylinder ausgewertet wurde.

3.5 Proctorverdichtungstest (DIN 18127)

Für die Proctorversuche wurde der im Feld entnommene Boden nach Tiefenstufen getrennt, zunächst bei 105 °C im Trockenschrank getrocknet und durch ein Sieb mit 2 mm Maschenweite gegeben, um grobkörnige Bestandteile abzuscheiden. Anschließend erfolgte die Homogenisierung der Proben. Die Verdichtung erfolgte nach dem Standard-Proctorverdichtungstest gemäß DIN 18127. Hierzu wurde jede Probe mit unterschiedlichen gravimetrischen Wassergehalten von 10 bis 17 Vol. \% versetzt und lagenweise in einen Proctorzylinder mit einem Volumen von $942,48 \text{ cm}^3$ eingebaut. Jede der drei Schichten wurde mit 25 Schlägen eines $2,5 \text{ kg}$ schweren Fallhammers aus 30 cm Fallhöhe verdichtet, bis der Zylinder vollständig gefüllt war. Anschließend wurde die Gesamtmasse des gefüllten Zylinders bestimmt. Aus dem Zylindervolumen und der Bodenmasse wurde nach der Beziehung

$$\rho = \frac{m}{V}$$

die Feuchtdichte berechnet. Zur Kontrolle des eingestellten Wassergehaltes wurde eine Teilprobe entnommen, eingewogen und erneut bei 105 °C getrocknet. Der Wassergehalt der Teilprobe wurde durch den Massenverlust bestimmt, um potenzielle Verdunstungsverluste während des Verdichtungs Vorgangs zu erfassen. Die Trockendichte (ρ_d) wurde anschließend nach der Formel

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w}$$

berechnet, wobei w den gravimetrisch bestimmten Wassergehalt beschreibt. Der gesamte Versuch wurde für jede Probentiefe viermal mit variierenden Wassergehalten durchgeführt, um die Trockendichte in Abhängigkeit vom Wassergehalt zu bestimmen. Die Ergebnisse wurden mithilfe einer Polynomfunktion interpoliert, wodurch die maximale Trockendichte ($\rho_{d,\text{max}}$) sowie der optimale Wassergehalt (CWC) ermittelt wurde. Mit dem optimalen Wassergehalt wurde der Boden nach erneuter Trocknung und Homogenisierung angesetzt und verdichtet, um im Anschluss die Trockenrohdichten und Porenvolumina zu bestimmen. Aufgrund der Bodeneigenschaften war die Proctordichte bei der erneuten Verdichtung mit CWC nicht erreichbar, weshalb die im folgenden aufgeführten Trockenrohdichten und Porenvolumina nicht dem Zustand bei Proctordichte entsprechen, sondern dem maximal erreichten Trockendichtewert.

3.6 Penetrometer

Der Eindringwiderstand wurde im Jahr 2022 mit einem analogen Penetrometer und im Jahr 2025 mit einem *Eijkelkamp Penetrologger 06.15.0* ermittelt. Die Messungen erfolgten in unmittelbarer Nähe der Stechzylinder-Entnahmestellen. Pro Standort bzw. Probepunkt wurden jeweils drei Einstiche durchgeführt. Der eingesetzte Konus besaß eine Fläche von 2 cm² mit 60° Winkel. Aufgrund der trockenen Bedingungen im Unterboden im November 2022 wurde ab einer Eindringtiefe von >30 cm unter GOK auf Konus 1 mit 1 cm² Bodenfläche gewechselt, um die Messung fortsetzen zu können. Die gemessenen Eindringwiderstände wurden anschließend standardisiert, indem alle Werte auf Konus 1 umgerechnet wurden. Da die Eindringwiderstände im Jahr 2022 mit einem analogen Penetrometer gemessen wurden, wurde der Messwert nur alle 5 cm aufgezeichnet. Anschließend wurden aus drei Messwerten je Tiefe der Median gebildet. Der Penetrologger hingegen misst in 1 cm – Schritten. Um ein detaillierteres Abbild des Tiefenverlaufs zu zeigen, wurde daher der kleinere Messabstand des Penetrologgers in Abbildung 13 beibehalten.

3.7 Humusgehalt Bestimmung (DIN 18128)

Der Humusgehalt wurde nach DIN 18128 zur Bestimmung des Glühverlustes ermittelt. Hierfür wurden aus jedem Stechzylinder circa 30 g Boden entnommen. Diese Proben wurden anschließend bei 105 °C im Trockenschrank für eine Stunde bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend eingewogen. Da die Stechzylinder bereits im Rahmen der Trockenrohddichtebestimmung vollständig getrocknet waren, wurde die Trocknungszeit verkürzt. Nach der Einwaage wurden die Proben für vier Stunden bei 550 °C im Muffelofen geglüht. Da ein Exsikkator nicht zur Verfügung stand, erfolgte nach vollständiger Glühung aller Proben im Anschluss eine zusätzliche Trocknung im Trockenschrank bei 105 °C für eine Stunde, bevor die Proben ausgewogen wurden. Der Humusgehalt (Glühverlust) wurde mit der Gleichung

$$GL = \frac{m_{105} - m_{550}}{m_{105}} \cdot 100$$

berechnet, wobei m_{105} die Trockenmasse der Probe nach Trocknung bei 105 °C und m_{550} die Restmasse nach dem Glühen bei 550 °C bezeichnet. Im Jahr 2022 wurden je Probentiefe und Standort drei Proben geglüht, während im Jahr 2025, analog zur Vorgehensweise bei der Bestimmung der Trockenrohddichte, je Probentiefe und Entnahmeposition eine Probe untersucht wurde.

3.8 pH(CaCl₂)-Wert (DIN 10390)

Die Bestimmung des Boden-pH-Wertes erfolgte mit 0,01 M CaCl₂-Lösung nach DIN 10390. Hierfür wurden jeweils 10 g feldfeuchter Boden in einem Becherglas eingewogen und mit 25 ml CaCl₂-Lösung versetzt. Die Suspension wurde anschließend für 5 Minuten auf einem Laborschüttler geschüttelt und anschließend für 30 Minuten bei Raumtemperatur stehen gelassen. Die pH-Messung erfolgte mit dem Messgerät *WTW pH 3110* und einer *SenTix 81* pH-Elektrode. Das Gerät wurde vor den Messungen mit einer Pufferlösung bei pH 7 kalibriert. Im Jahr 2022 und Jahr 2025 wurde pro Tiefe, Standort und Entnahmeposition jeweils eine Probe analysiert.

3.9 Kationenaustauschkapazität

Die KAK der im November 2022 entnommenen Proben wurde nach der KA5 berechnet. Für die potenzielle KAK der mineralischen Bodensubstanz gilt folgende Beziehung

$$KAK_{\text{pot}} [\text{cmol}_c/\text{kg}] = 0.5 \cdot \text{Tongehalt} + 0.05 \cdot \text{Schluffgehalt}$$

wobei Ton- und Schluffgehalt in Masse-% einzusetzen sind.

Die potenzielle KAK des Humus wird wie folgt berechnet

$$KAK_{\text{pot}} \text{ je Masse} - \% \text{ Humus} = 2 \text{ cmol}_c/\text{kg}$$

Unter Verwendung des in der KA5 angegebenen Korrekturfaktors für die pH-abhängige KAK des Humus wurde die effektive KAK als Summe von mineralischer Bodensubstanz und Humus ermittelt (Sponagel et al., 2005).

3.10 Porengrößenverteilungsbestimmung

Die Bestimmung der Porengrößenverteilung erfolgte nach den Porengrenzen der KA5 (Sponagel et al., 2005). Hierfür wurden die im Feld entnommenen Stechzylinder zunächst mit ihrem feldfeuchten Wassergehalt eingewogen und anschließend auf 100 % Wassersättigung aufgesättigt, um den Wassergehalt bei pF 0 zu bestimmen und die vollständige Porenfüllung für die weiteren pF-Grenzen sicherzustellen. Nach der Einwaage wurden die Proben in einer *ecoTech pF-Laborstation 4251* schrittweise mit definierten Saugspannungen beaufschlagt, zunächst mit -60 hPa (pF 1,8) und anschließend mit -300 hPa (pF 2,4). Die Proben wurden jeweils bis zur Gewichtskonstanz entwässert, bevor sie erneut gewogen und in die nächste Saugspannungsstufe überführt wurden. Für jede Probentiefe wurden die Stufen pF 0, 1,8 und 2,4 mit jeweils fünf Stechzylindern ermittelt. Die Bestimmung des Wassergehaltes bei -15000 hPa (pF 4,2) erfolgte in einer *ecoTech Membranpresse 0803*. Hierfür wurde aus drei Stechringzylindern je Probentiefe ein kleiner Kunststoffstechring ($V = 9,621 \text{ cm}^3$) entnommen und in der Membranpresse auf die definierte Saugspannung eingestellt. Nach Erreichen der Gewichtskonstanz wurden die Proben ausgewogen, bei 105 °C für 24 h getrocknet und erneut gewogen.

Die Wassergehalte wurden zunächst als gravimetrischer Wassergehalt bestimmt und anschließend über die Formel

$$\theta = \frac{m_w}{V} \cdot 100$$

in volumetrische Wassergehalte umgerechnet, wobei $V = 100 \text{ cm}^3$ das Stechzylindervolumen darstellt. Aus den Differenzen zwischen den pF-Stufen ergaben sich die Volumina der verschiedenen Porengrößen, die in Kapitel 2.8.1 beschrieben sind. Da die Bestimmung des Wassergehaltes bei vollständiger Wassersättigung durch Dränverluste während der Verwiegung verfälscht werden kann, wurde das Gesamtporenvolumen und das weite Grobporenvolumen zusätzlich über die Partikeldichte berechnet. Diese wurde bei NT für jede Probe und bei CT nur für eine Probe je Tiefe mit einem *Micrometrics AccuPyc 1330* bestimmt. Das Gesamtporenvolumen wurde mit der Gleichung

$$PV = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$$

berechnet, wobei ρ_d die Trockenrohdichte und ρ_s die Partikeldichte darstellt. Das Volumen der weiten Grobporen ergibt sich aus der Differenz zwischen Wassergehalt bei vollständiger Sättigung und pF 1,8. Die Untersuchungen zur Porengrößenverteilung wurden ausschließlich im Jahr 2022 durchgeführt. Für die Analysen nach Proctorverdichtung wurde das gleiche Verfahren angewendet, wobei aus jedem verdichteten Proctorkern fünf Stechzylinder ausgestanzt und untersucht wurden.

3.11 Befragung

Für die Erfassung der betriebsspezifischen Flächenbewirtschaftung an den Probenahmestandorten wurde im März 2025 ein strukturiertes Experteninterview in Form eines schriftlichen Fragebogens durchgeführt. Der Fragebogen umfasste 16 Fragen mit den Themenbereichen Boden, Fruchtfolge, Düngung, Bodenbearbeitung und Maschineneinsatz. Die schriftliche Form wurde gewählt, um den Ablauf zu standardisieren, den Gesprächsfaden nicht zu verlieren und sicherzustellen, dass mit beiden Betriebsleitern identische Fragestellungen bearbeitet wurden. Die Fragebögen wurden mit den Betriebsleitern ausgefüllt.

Die erhobenen Daten werden in Kapitel 3.13 beschrieben und wurden für die Interpretation der Untersuchungsergebnisse herangezogen.

3.12 Statistische Analyse

Die statistische Auswertung der erhobenen Daten erfolgte mit *R Version 4.5.1* (Posit, 2025). Die Datenaufbereitung wurde zunächst in *Microsoft Excel* durchgeführt. Anschließend wurden sämtliche statistischen Analysen und grafischen Darstellungen in R erstellt. Zum Einsatz kamen die Pakete *emmeans* (emmeans und contrasts), *ggplot2* (Visualisierung), sowie *soiltexture* (Bodenartendreieck, Moeys (2024)).

Zur Darstellung der Ergebnisse wurden Boxplots, Balken- und Säulendiagramme sowie y-Achsen invertierte Liniendiagramme verwendet. In den Boxplots sind Median und Quartil abgebildet. In den Balken-, Säulen- und Liniendiagrammen werden jeweils der Median dargestellt, die Fehlerbalken repräsentieren das 1. Und das 3. Quartil. Bei den Parametern Trockenrohdichte, Bodenwassergehalt und Humus weisen die Diagramme für das Jahr 2025 bei CT keine Fehlerbalken auf, da hier lediglich ein Wert pro Tiefe vorlag. Die Entnahmetiefe wurde für die einfachere Darstellung als mittlerer Schichtwert angegeben (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Mittlerer Schichtwert nach Entnahmetiefe

Mittlerer Schichtwert [cm]	Oberer Schichtwert [cm]	Unterer Schichtwert [cm]
-7,5	-5	-10
-17,5	-15	-20
-27,5	-25	-30
-37,5	-35	-40
-47,5	-45	-50

Für die Parameter Trockenrohdichte, Humusgehalt, Gesamtporenvolumen, weite Grobporen, enge Grobporen, Mittelporen, Feinporen, Feldkapazität wurden für natürliche Lagerung und nach der Proctorverdichtung Varianzanalysen (ANOVA) berechnet. Die Ermittlung von statistischen Unterschieden im Tiefenverlauf innerhalb des jeweiligen Standorts erfolgten über Estimated Marginal Means (emmeans) und contrasts. Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 0,05$ festgelegt. Ein negatives Vorzeichen vor dem $\Delta_{NT - CT}$ - Wert in den contrasts-Tabellen zeigt, dass NT im Vergleich einen niedrigeren Wert aufweist als CT, bei fehlendem Vorzeichen weist NT einen höheren Wert als CT auf.

Die van-Genuchten-Kurven wurden mithilfe des Excel-Tools *Water Retention 10* (Anlauf, 2014) bestimmt und anschließend in R mit *ggplot2* visualisiert.

Auf eine statistische Auswertung der pH-Werte wurde verzichtet, da pro Tiefe und Jahr lediglich ein Messwert vorlag. Ebenso wurde beim Eindringwiderstand keine statistische Analyse durchgeführt, da dieser von zahlreichen externen Einflussfaktoren (Bodenfeuchte, Lagerungsdichte, Durchwurzelung) abhängt und die geringen Messwiederholungen keine belastbaren Aussagen zulassen.

Tabelle 9: Anzahl durchgeführter Messungen je Tiefenstufe

Standort	BP-SI-52	BP-SI-01	BP-SI-52	BP-SI-01	BP-SI-52	BP-SI-01
Lagerungsform	natürliche Lagerung	natürliche Lagerung	Proctor	Proctor	natürliche Lagerung	natürliche Lagerung
Jahr	2022	2022	2022	2022	2025	2025
Trockenrohddichte	5	5	5	5	2	1
Penetrometer (Einstiche)	6	6	-	-	6	3
pH-Wert	1	1	-	-	2	1
Humus	3	3	-	-	2	1
Partikeldichte	5	1	-	-	-	-
Porenvolumen	errechnet	errechnet	errechnet	errechnet	-	-
weite Grobporen	errechnet	errechnet	errechnet	errechnet	-	-
enge Grobporen	5	5	5	5	-	-
Mittelporen	errechnet	errechnet	errechnet	errechnet	-	-
Feinporen	3	3	3	3	-	-
Bodenart	1	1	-	-	-	-

3.13 Bewirtschaftung

Der Acker am Standort BP-SI-52 wird seit 2017 in NT bewirtschaftet. Im Jahr 2016 vor der Umstellung auf NT lag der Humusgehalt auf der gesamten Fläche bei durchschnittlich 1,1 %. Bereits fünf Jahre nach der Umstellung, im Jahr 2021, erreichte dieser 2,1 % laut Betriebsleiter. Die Fruchtfolge auf der Fläche besteht aus Winterweizen – Sommererbse – Winterraps – Winterweizen – Mais. Zwischenfrüchte werden dabei jeweils vor Mais und Erbse etabliert, wobei eine artenreiche Mischung mit bis zu 15 Komponenten zum Einsatz kommt. Auf Kreuzblütler wird verzichtet, um Fruchtfolgeprobleme mit dem Rapsanbau zu vermeiden.

Die Zwischenfrüchte werden im Winter regelmäßig mit Schafen beweidet. Nach der Weizenernte verbleibt das Stroh vollständig auf der Fläche, um die Bodenbedeckung zu erhalten. Die Düngung des Mais erfolgt organisch über die Ausbringung von Gärresten mit einem Strip-Till-Gerät auf 25 cm Tiefe. Die streifenförmige Bearbeitung im Frühjahr sorgt für eine schnellere Bodenerwärmung mit schnellerer Jugendentwicklung des Maises, was im Herbst für eine frühere Abreife sorgt. Dies ist aufgrund der klimatischen Gegebenheiten notwendig und spart dem Betrieb Trocknungskosten ein. Die mineralische Stickstoffdüngung in den Hauptkulturen erfolgt mit dem *CULTAN*-Verfahren und eine regelmäßige Kalkung findet ebenfalls statt. Vor dem Raps werden 2 t/ha Kalk ausgebracht, bei den übrigen Kulturen jeweils 1 t/ha. Es kommt eine Mischung aus Dolomit- und Kreidekalk zum Einsatz. Die Aussaat erfolgt mit einer Scheibendirektsaatsmaschine. Eine tiefere mechanische Bodenbearbeitung unterhalb von 25 cm fand auf der Fläche seit der Umstellung nicht statt.

Außerdem wird mit festen Fahrgassen im Abstand von 30 m gearbeitet, deren Lage jährlich beibehalten wird.

Die Fläche am Standort BP-SI-01 wird seit fünf Jahren konservierend bewirtschaftet.

Zuvor kam bei der Bestellung von Wintergerste regelmäßig der Pflug zum Einsatz, in der Regel mit einer Arbeitstiefe von 25 bis 30 cm. Gefahren wurde dabei in der Furche. Die Fruchtfolge auf der Fläche setzt sich aus GPS-Roggen, Mais und Winterraps zusammen. Vor dem Mais wird eine einfache Zwischenfruchtmischung mit drei Komponenten ausgesät. Die organische Düngung erfolgt über Gärreste. Bei Winterraps werden diese vor der Aussaat mit einer Scheibenegge ausgebracht und im Anschluss mit dem Grubber auf 10 bis 25 cm eingearbeitet. Eine weitere Gärrestgabe erfolgt im Bestand nach dem Winter. Beim Mais werden vor der Aussaat Gärreste ausgebracht. Die Gärrestausbringung im GPS-Roggen erfolgt im Frühjahr direkt in den Bestand. Ergänzend erfolgt eine mineralische Stickstoffdüngung mit Kalkammonsalpeter und schwefelsaures Ammoniak in den Kulturen. Im Jahr 2022 wurde einmalig eine Kalkung mit 2 bis 3 t/ha Konverterkalk durchgeführt. Eine Bodenuntersuchung durch einen Dienstleister aus dem Jahr 2023 ergab einen pH-Wert (CaCl_2) von 6,3. Auf eine Strohabfuhr nach der Ernte wird bei allen Druschfrüchten verzichtet. Nach der Ernte des Winterrapses erfolgt zunächst eine zwei- bis dreifache Bearbeitung mit einem Schwerstriegel. Anschließend wird die Fläche flach mit einem Exaktgrubber auf etwa 10 cm Tiefe bearbeitet. Im nächsten Schritt erfolgt eine tiefere Lockerung mit dem 3-balkigen Schwergrubber auf rund 25 cm Tiefe. Die Aussaat der Hauptkulturen erfolgt mit einer Scheibensämaschine mit vorlaufender Scheibenegge. Bei den anderen Kulturen entfällt das Striegeln. Im Jahr 2021 wurde auf der Fläche einmalig eine Tiefenlockerung auf 45 bis 50 cm durchgeführt. Die Fahrgassen betragen 36 m und bleiben über die Jahre konstant.

3.14 Bodenprofile

Das Profil BP-SI-52 (NT) ist eine Parabraunerde-Braunerde (LL-BB) (siehe Abbildung 7). Der Ap-Horizont ist circa 35 – 38 cm mächtig und weist die Bodenart Us mit Übergang zu Su4 auf. Der Humusgehalt liegt nach KA5 in der Stufe h2 (1 bis <2 Masse-%) bis h3 (2 bis <4 Masse-%). Darunter folgt der verbrauchte und verlehnte B-Horizont mit der Bodenart Su4 und einem Humusgehalt von h1. Unterhalb dieses Horizonts schließt sich der Mischhorizont Ael + Bbt an, der durch starke Aufhellung infolge von Tonverlagerung und Humusverarmung sowie zusätzlicher Sauerbleichung charakterisiert ist. Als Verzahnungshorizont weist er gleichzeitig Tonanreicherungen in Form vertikaler Bänderungen auf. Das pedogene Merkmal e ist eigentlich charakteristisch für den Bodentyp Fahlerde. Im vorliegenden Profil sind Sauerbleichungen vorhanden, jedoch nicht ausreichend homogen im Ael + Bt-Horizont, weshalb der Bodentyp als Parabraunerde und nicht als Fahlerde angesprochen wird. Die

Bodenart entspricht hier Ss, wobei der Sandanteil überwiegend aus Feinsand (0,063 – 0,2 mm) besteht. Die Tonbänderung tritt dabei in Form von Su4-Schlieren auf. Darauf folgt erneut der Bt-Horizont mit der Bodenart Su4, der als Tonreicherungshorizont interpretiert wird. Ab einer Tiefe von etwa 90 cm unter GOK beginnt der C-Horizont, der durch eine lockere, kiesige und silikatische Zusammensetzung gekennzeichnet ist. Als Ausgangsgestein der Bodenbildung wird gemäß *Geologischer Karte 50 MV* Geschiebemergel der Hochflächen angegeben (Landesamt für Umwelt Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 2017).

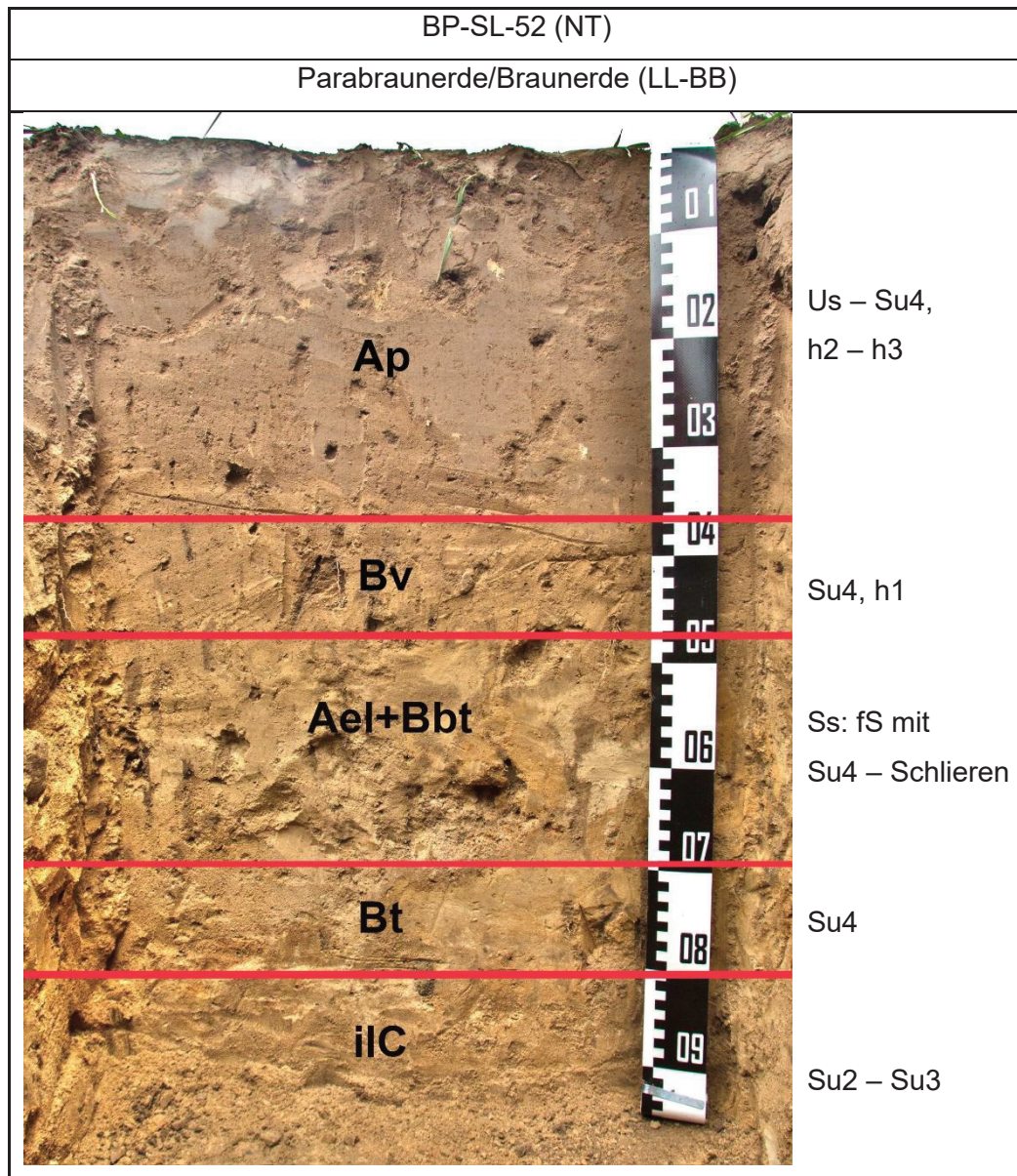


Abbildung 7: Bodenprofil BP-SI-52 (NT), für geogene und pedogene Zusatzmerkmale siehe Tabelle 25 und 26 (nach Vorlage von Mischel Eismann)

Das zweite untersuchte Profil BP-SI-01 (CT) (siehe Abbildung 8) ist als Pseudogley-Bänderparabraunerde (SS-LLd) eingestuft. Der Ap-Horizont ist circa 39 cm mächtig und besteht aus der Bodenart Su4 mit Tendenz zu Su3. Der Humusgehalt ist nach KA5 in die

Stufen h3 bis h4 (4 bis <8 Masse-%) eingeordnet. Direkt darunter folgt ein rund 22 cm mächtiger, stauwasserleitender, ausgebleichter und sauergebleichter Horizont, an dessen Grenze zum Ap eine verstärkte Akkumulation von Eisenoxiden erkennbar ist. Die Bodenart entspricht hier Su3 mit Übergang zu Su4 und enthält Feinsandschlieren. Unterhalb dieses Horizonts findet sich der für Pseudogleye typische dichte S-Horizont, der in Kombination mit einer Tonanreicherung das Zusatzmerkmal Bt aufweist. Zwischen 63 und 83 cm Tiefe tritt eine schlierige Bänderung auf. Die Bodenart in diesem Bereich ist Su4, wodurch dieser Horizont vom darunterliegenden Sd-Horizont abgegrenzt ist, der die Bodenart SI3 aufweist. Beide Horizonte zeigen eine ausgeprägte Rostfleckigkeit, die auf wechselnde Redoxbedingungen hinweist.

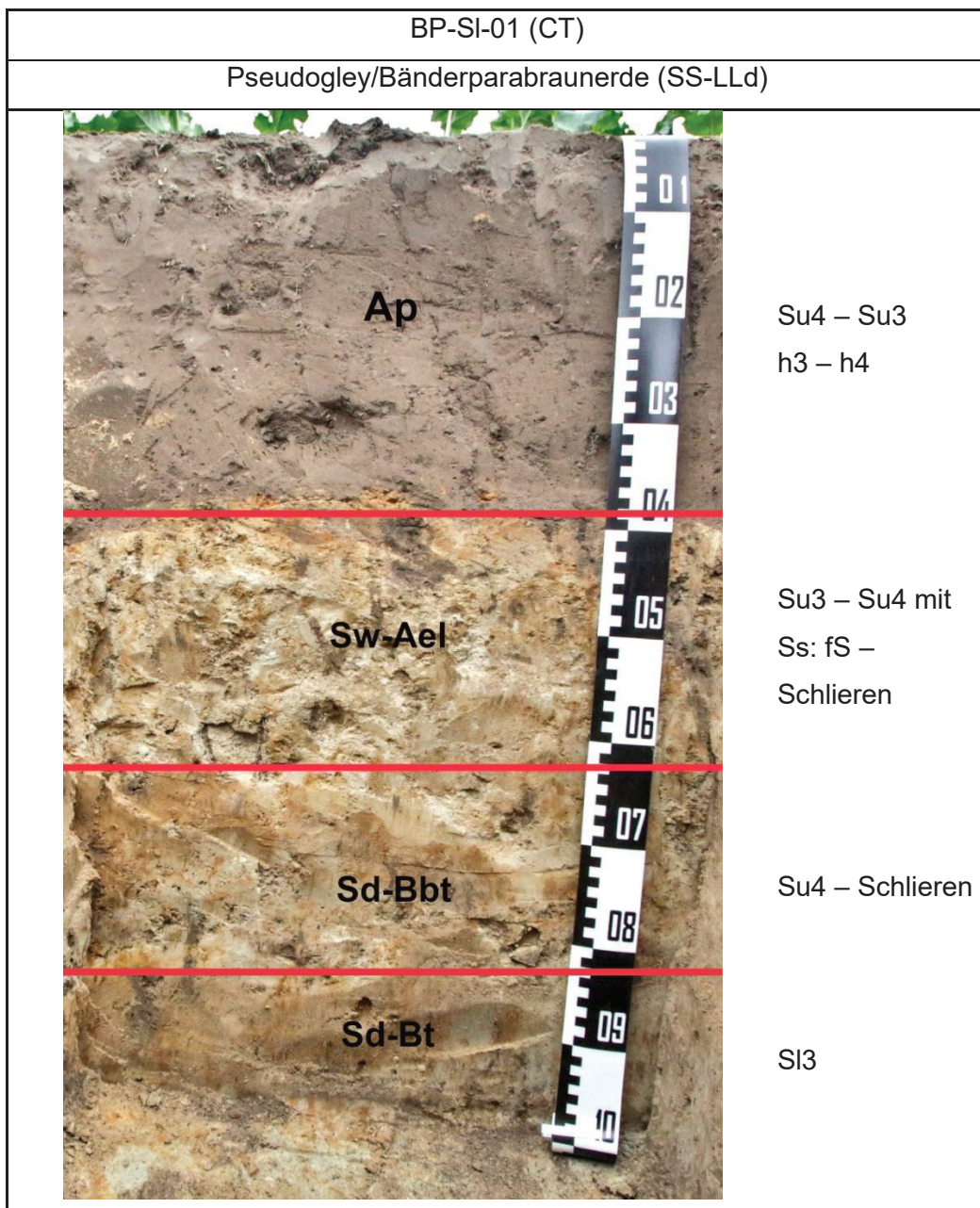


Abbildung 8: Bodenprofil BP-SI-01 (CT), für pedogene Zusatzsymbole siehe Tabelle 26 (nach Vorlage von Mischel Eismann)

Die durch Laser Particle Size Analysis an der Universität Greifswald bestimmte Korngrößenverteilung für die oberen 50 cm zeigt, dass die Standorte innerhalb der Bodenart Su4 eng beieinander liegen und selbst die als Su3 klassifizierte Probe eine deutliche Tendenz in Richtung Su4 aufweist (siehe Abbildung 9). Zudem ist ersichtlich, dass der Tongehalt zwischen beiden Standorten sowie innerhalb der einzelnen Entnahmetiefen vergleichbar ist. Jedoch sind beide Standorte pedogen sehr unterschiedlich.

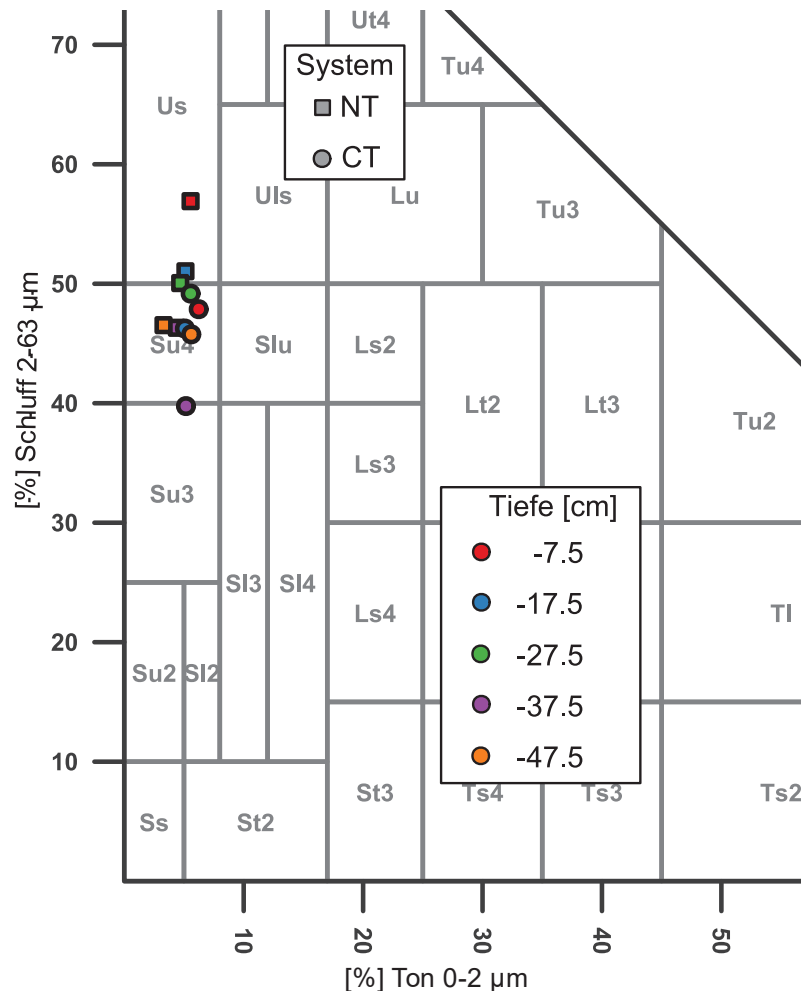


Abbildung 9: Bodenartendreieck mit den im Labor ermittelten Bodenarten der einzelnen Proben

Ein visueller Vergleich der vertikal aufgenommenen Bilder (siehe Abbildung 10) der einzelnen untersuchten Horizonte beider Profile zeigt zusätzlich Unterschiede zwischen beiden Standorten. Beim Profil BP-SI-52 sind Regenwurmgänge mit großem Durchmesser bis in eine Tiefe von etwa 55 cm unter GOK erkennbar. Im Gegensatz dazu sind im Profil BP-SI-01 nur vereinzelte, deutlich schmalere Regenwurmgänge bis etwa 45 cm Tiefe zu erkennen.

BP-SI-52 (NT)

-25 cm unter GOK

-55 cm unter GOK



BP-SI-01 (CT)

-25 cm unter GOK

-45 cm unter GOK



Abbildung 10: Bioporung durch Regenwürmer in den Bodenprofilen (Aufnahmen von Felix Krause)

4 Ergebnisse

4.1 Kurzübersicht Probenahmepunkte

Für eine bessere Verständlichkeit und Übertragbarkeit in andere Arbeiten wird ein Teil der im Labor gemessenen Bodeneigenschaften hier kompakt dargestellt (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Eigenschaften der Probenahmepunkte BP-SI-52 (NT) und BP-SI-01 (CT) nach Tiefenstufen

Bodeneigenschaften	Tiefe				
	-7,5 cm	-17,5 cm	-27,5 cm	-37,5 cm	-47,5 cm
	NT				
Sand (Masse %)	37,54	43,84	45,26	49,28	50,18
Schluff (Masse %)	56,91	51,04	50,06	46,32	46,53
Ton (Masse %)	5,55	5,12	4,69	4,40	3,29
Humus (Masse %)	2,49 (0,05)	2,18 (0,05)	2,17 (0,03)	0,99 (0,05)	1,02 (0,01)
Trockenrohdichte (g/cm ³)	1,63 (0,03)	1,55 (0,03)	1,60 (0,04)	1,52 (0,03)	1,37 (0,08)
Partikeldichte (g/cm ³)	2,61 (0,001)	2,62 (0,002)	2,62 (0,001)	2,63 (0,004)	2,65 (0,002)
	CT				
Sand (Masse %)	45,90	48,67	45,27	55,07	48,62
Schluff (Masse %)	47,87	46,25	49,18	39,76	45,77
Ton (Masse %)	6,23	5,08	5,56	5,17	5,61
Humus (Masse %)	3,96 (0,04)	3,67 (0,07)	3,48 (0,11)	3,11 (0,05)	1,30 (0,13)
Trockenrohdichte (g/cm ³)	1,37 (0,08)	1,38 (0,04)	1,49 (0,08)	1,44 (0,06)	1,67 (0,07)
Partikeldichte (g/cm ³)	2,58	2,60	2,59	2,59	2,64

4.2 Trockenrohdichte

Bereits die grafischen Darstellungen der Trockenrohdichte (siehe Abbildung 11 und 12) zeigen deutliche Unterschiede zwischen den beiden Bewirtschaftungssystemen. CT weist im Oberboden niedrigere Dichten auf als NT. Weiterhin lässt sich anhand der Fehlerbalken erkennen, dass die gemessenen Dichten in NT je Tiefe konstanter sind, während die Dichten in CT deutlich inhomogener sind. Mit zunehmender Tiefe nähern sich beide Bewirtschaftungssysteme an, bis CT NT bei -47,5 cm übersteigt. Um diese bereits visuell erkennbaren Muster statistisch abzusichern, sowie den Einfluss von Tiefe und Jahr mit einzubeziehen, wurde eine ANOVA durchgeführt (siehe Tabelle 11).

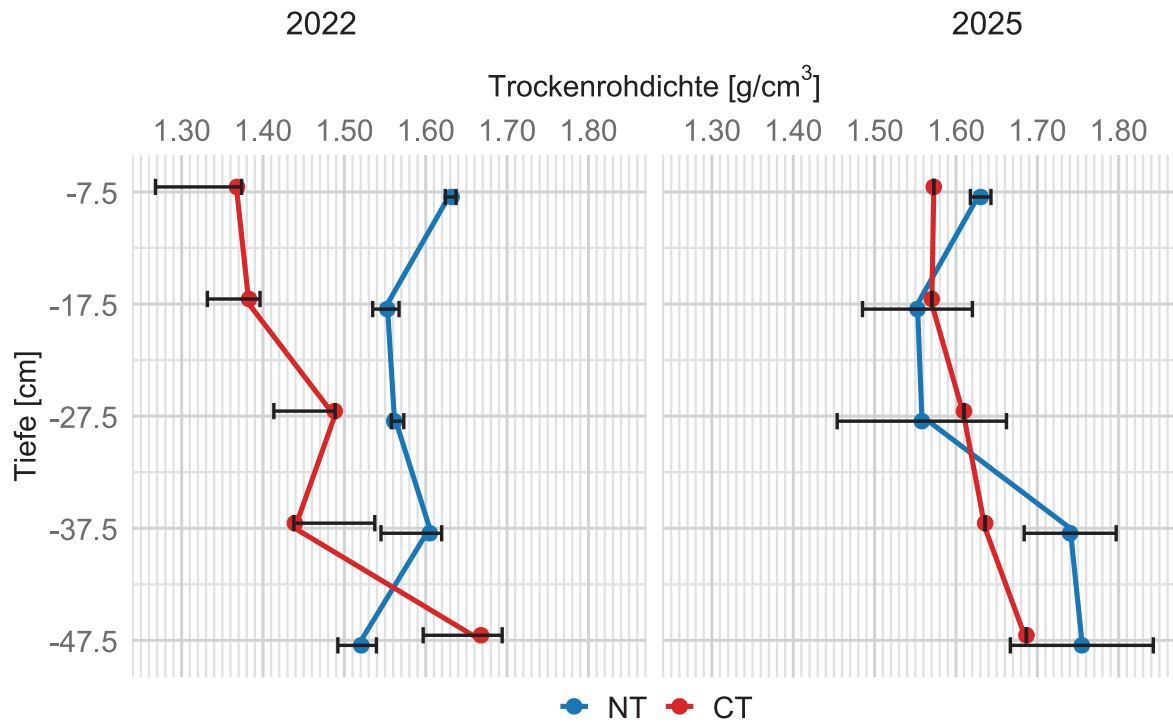


Abbildung 11: Trockenrohdichten (TRD) in natürlicher Lagerung im Tiefenverlauf unter NT und CT im Jahresvergleich

Hierbei zeigt sich, dass es signifikante Unterschiede zwischen den beiden Bewirtschaftungssystemen im Tiefenverlauf und dem Probenahmejahr gibt. Die Interaktion von System und Tiefe ist signifikant, was darauf hindeutet, dass der Trockenrohdichteverlauf über den Tiefenverlauf unterschiedlich zwischen den beiden Systemen ist, während die Interaktion von System und Jahr nicht signifikant ist (siehe Tabelle 11)

Tabelle 11: Ergebnisse der ANOVA zur Trockenrohdichte (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$)

natürliche Lagerung					
	Freiheitsgrade		F-Wert	p-Wert	Signifikanz
System	F(1,53)	=	21,65308	$p < 0,001$	***
Tiefe	F(4,53)	=	4,279919	0,0045	**
Jahr	F(1,53)	=	15,14459	$p < 0,001$	***
System x Tiefe	F(4,53)	=	5,163837	0,0014	**
System x Jahr	F(1,53)	=	1,855636	0,1789	n.s.
Proctor					
System	F(1,40)	=	13,97036	$p < 0,001$	***
Tiefe	F(4,40)	=	74,17752	$p < 0,001$	***
System x Tiefe	F(4,40)	=	42,57287	$p < 0,001$	***

Für eine genauere Betrachtung der Bewirtschaftungseinflüsse im Tiefenverlauf wurden die emmeans und contrasts berechnet. Signifikante Unterschiede in natürlicher Lagerung zwischen NT und CT wurden für das Jahr 2022 über den gesamten Tiefenverlauf festgestellt (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Ergebnisse der contrasts zur Trockenrohdichte zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$)

Tiefe [cm]	Δ NT – CT (nat. Lag.)	p-Wert	Signifikanz	Δ NT – CT (Proctor)	p-Wert	Signifikanz
-7,5	0,281	$p < 0,001$	***	0,049	$p < 0,001$	***
-17,5	0,182	$p < 0,001$	***	0,058	$p < 0,001$	***
-27,5	0,084	0,026302	*	0,061	$p < 0,001$	***
-37,5	0,113	0,0037	**	0,055	$p < 0,001$	***
-47,5	-0,121	0,0019	**	-0,121	$p < 0,001$	***

Bei der ANOVA nach der Proctorverdichtung zeigt sich, dass signifikante Unterschiede zwischen den beiden Systemen existieren. Die signifikanten Unterschiede im Tiefenverlauf sind stärker ausgeprägt als unter natürlicher Lagerung, was durch die contrasts-Analyse nochmal differenzierter dargestellt wird. Vor allem ab -27,5 cm ergeben sich hoch signifikante Unterschiede im Vergleich zur natürlichen Lagerung.

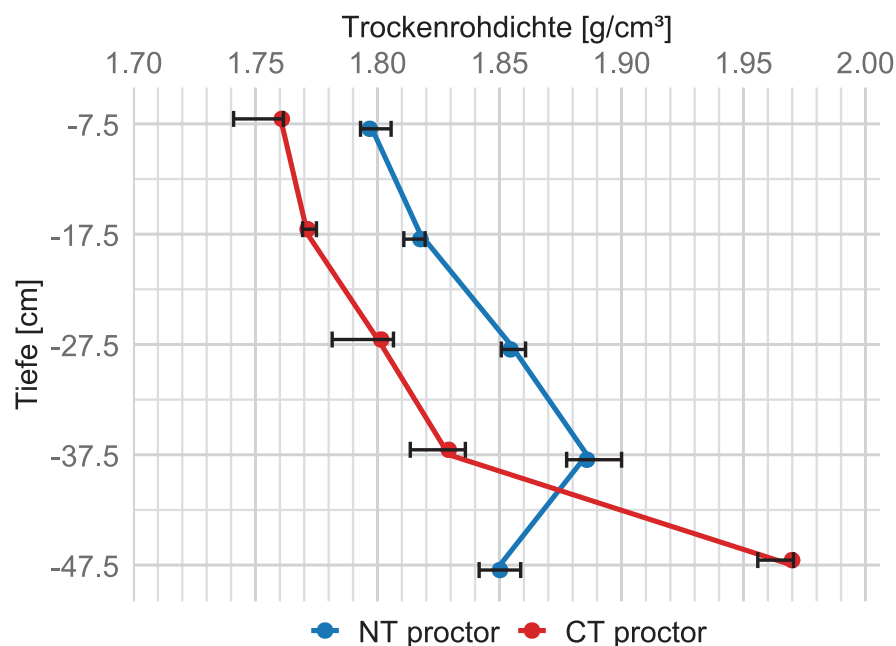


Abbildung 12: Trockenrohdichten im Tiefenverlauf nach der Proctorverdichtung unter NT und CT im Jahr 2022

4.3 Eindringwiderstand

In Abbildung 13 sind die Eindringwiderstände dargestellt. Im Jahr 2022 wies CT bis in eine Tiefe von -17,5 cm trotz geringerer Wassergehalte niedrigere Eindringwiderstände auf als NT. Ab -20 cm überstiegen die Widerstandswerte von CT jedoch die von NT. Auffällig ist der starke Anstieg des Eindringwiderstands bei CT ab -25 cm, mit einem Maximum im Bereich von -35 cm. Auch unterhalb dieser Tiefe bleiben die Werte deutlich über denen des Oberbodens und erreichen bei -55 cm ein Maximum von 950 N. NT zeigt im gleichen Jahr einen Ausschlag auf 250 N in -10 cm Tiefe, der anschließend wieder abnimmt. Ein weiterer Peak ist bei -35 cm zu beobachten, jedoch deutlich geringer ausgeprägt als bei CT. Generell waren die Wassergehalte bei NT über den gesamten Tiefenverlauf höher als bei CT, näherten sich jedoch mit zunehmender Tiefe an (siehe Abbildung 14). Insgesamt verläuft die Kurve von NT gleichmäßiger und weist weniger ausgeprägte Schwankungen auf als bei CT. Im Jahr 2022 erfolgte die Messung in 5 cm Intervallen.

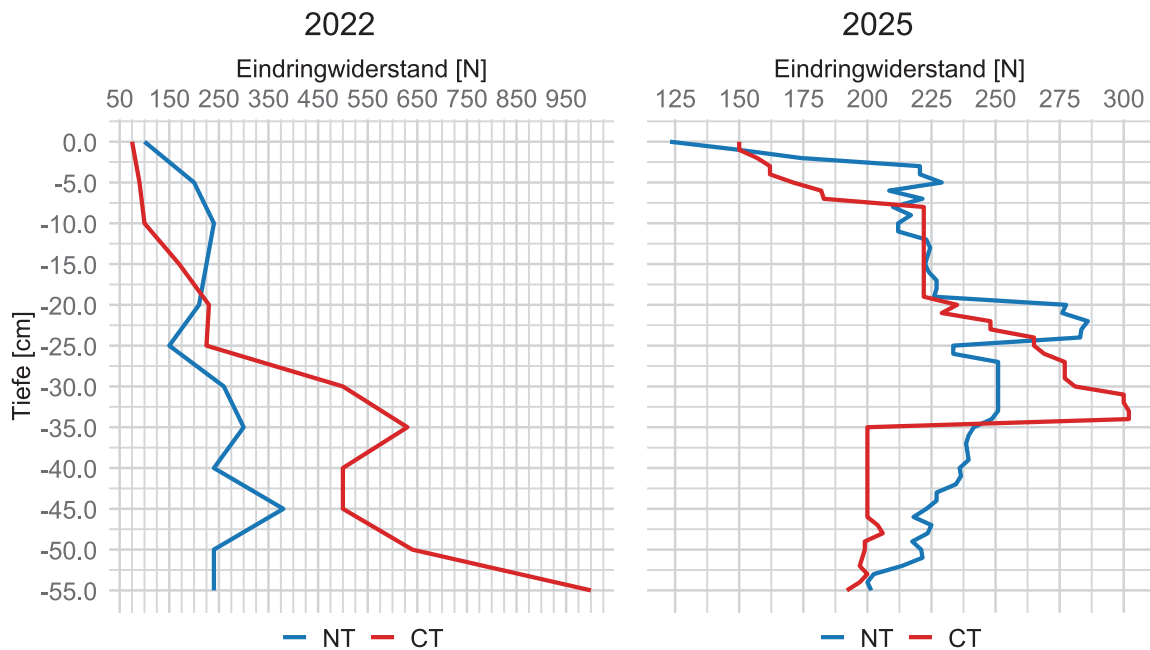


Abbildung 13: Eindringwiderstand im Tiefenverlauf unter NT und CT im Jahresvergleich

Im Jahr 2025 wurde der Eindringwiderstand in 1 cm – Schritten gemessen. Hier liegen die Maximalwerte bei knapp über 300 N. Für NT zeigt sich ein schnellerer Anstieg des Widerstands unmittelbar unterhalb der Bodenoberfläche, der sich bis -18 cm auf etwa 225 N einpendelt. Bei CT steigt der Widerstand zwischen 0 und -7,5 cm langsamer an und erreicht dort ebenfalls etwa 225 N. Ab -18 cm ist bei NT ein Ausschlag auf 280 N erkennbar, gefolgt von einer Abnahme auf etwa 225 N bei -25 cm und einer weiteren, kontinuierlichen Abnahme in größerer Tiefe. Bei CT ist der größte Peak im Bereich von -30 cm bis -35 cm zu

beobachten, bevor der Widerstand auf etwa 200 N zurückgeht. Die Wassergehalte waren 2025 insgesamt höher, wobei CT bis -27,5 cm höhere Werte aufwies als NT.

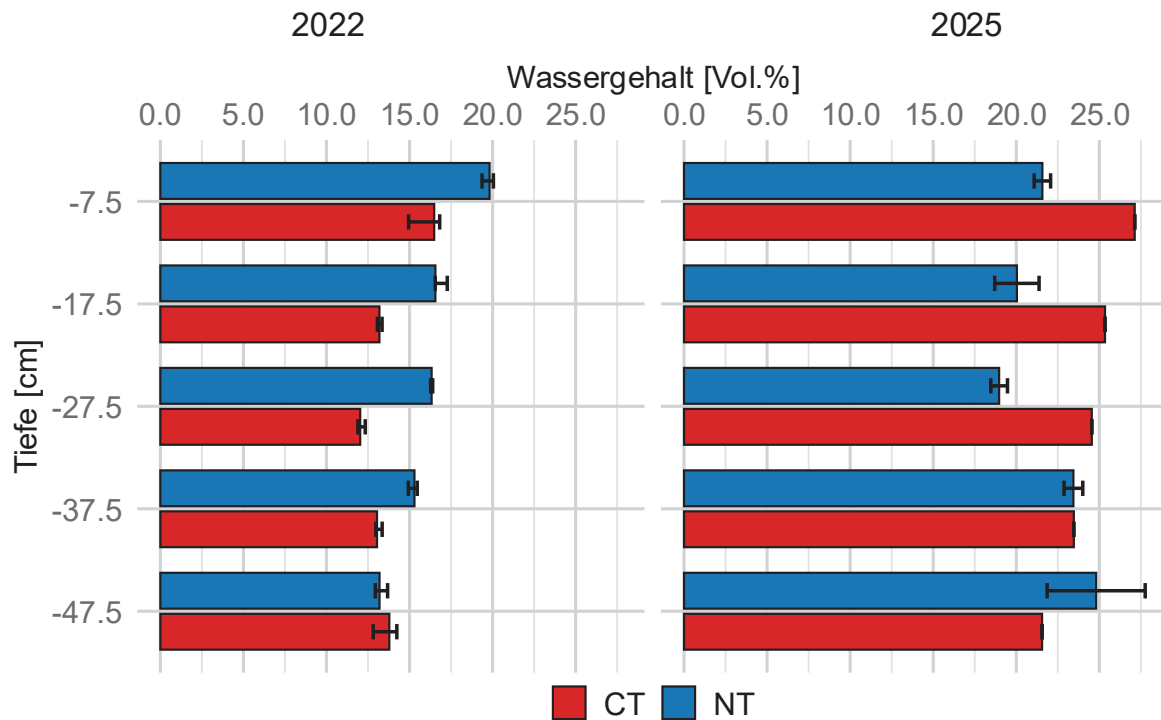


Abbildung 14: Volumetrischer Bodenwassergehalt im Tiefenverlauf unter NT und CT im Jahresvergleich

4.4 Humus

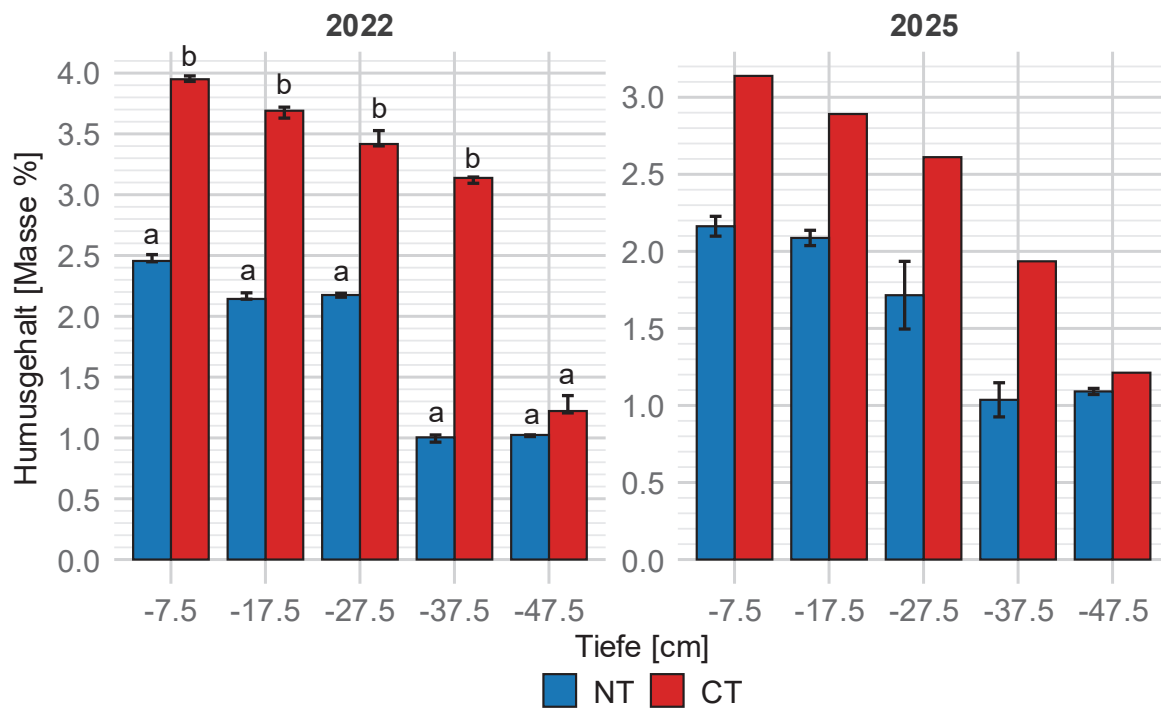


Abbildung 15: Humusgehalt im Tiefenverlauf unter NT und CT im Jahresvergleich. Unterschiedliche Buchstaben (a, b) kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Bewirtschaftungssystemen

Bereits in Abbildung 15 wird deutlich, dass zwischen den beiden Systemen erhebliche Unterschiede im Humusgehalt bestehen und der Humusgehalt zwischen den Jahren deutlich abgenommen hat. Auffällig ist, dass der Rückgang des Humusgehalts bei CT stärker ausgeprägt ist als bei NT. Es ist anzumerken, dass NT und CT gleichzeitig unterschiedliche Standorte repräsentieren (NT= BP-SL-52, CT=BP-SI-01), weshalb die Humusgehalte nicht eindeutig auf das Bewirtschaftungssystem selbst zurückgeführt werden können, sondern möglicherweise stark standortbedingt sind. Zudem liegt für CT im Jahr 2025 nur eine Einzelprobe vor, weshalb kein Fehlerbalken in der Abbildung dargestellt wird. Die ANOVA ergibt signifikante Unterschiede von System (bzw. Standort), Entnahmetiefe und Jahr. Zudem sind signifikante Interaktionen feststellbar, die auf Unterschiede zwischen System und Tiefenverlauf sowie Standort und Jahr hinweisen (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Ergebnisse der ANOVA zum Humusgehalt (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$)

natürliche Lagerung					
	Freiheitsgrade		F-Wert	p-Wert	Signifikanz
System	F(1,33)	=	375,64	$p < 0,001$	***
Tiefe	F(4,33)	=	117,77	$p < 0,001$	***
Jahr	F(1,33)	=	32,39	$p < 0,001$	***
System x Tiefe	F(4,33)	=	17,71	$p < 0,001$	***
System x Jahr	F(1,33)	=	18,94	$p < 0,001$	***

Die contrasts-Analyse zeigt signifikante Unterschiede zwischen den Systemen (bzw. Standorten) in allen Tiefen mit Ausnahme der tiefsten Schicht (-47,5 cm), in der kein signifikanter Unterschied vorliegt.

4.5 pH(CaCl₂)

Im Jahr 2022 zeigt NT über den gesamten Tiefenverlauf hinweg konstante pH-Werte zwischen 6,25 und 6,5. Unter CT hingegen sinkt der pH-Wert deutlich mit zunehmender Tiefe, mit Ausnahme der obersten Schicht bei -7,5 cm, wo ein hoher pH-Wert (pH 6,31) vorliegt (vgl. Abbildung 16). Dieser Verlauf wiederholt sich im Jahr 2025. Bei NT sind erneut konstante Werte oberhalb von pH 6 zu beobachten, während CT die Tendenz zur zunehmenden Versauerung im Tiefenverlauf fortsetzt. Auffällig ist, dass beide Systeme im Jahr 2025 in Tiefe -7,5 cm niedrigere pH-Werte aufweisen als im Jahr 2022. Da bei NT im Jahr 2025 wenige Tage vor der Probenahme die *CULTAN*-Düngung erfolgte, kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese Maßnahme den pH-Wert bei -7,5 cm maßgeblich beeinflusst hat.

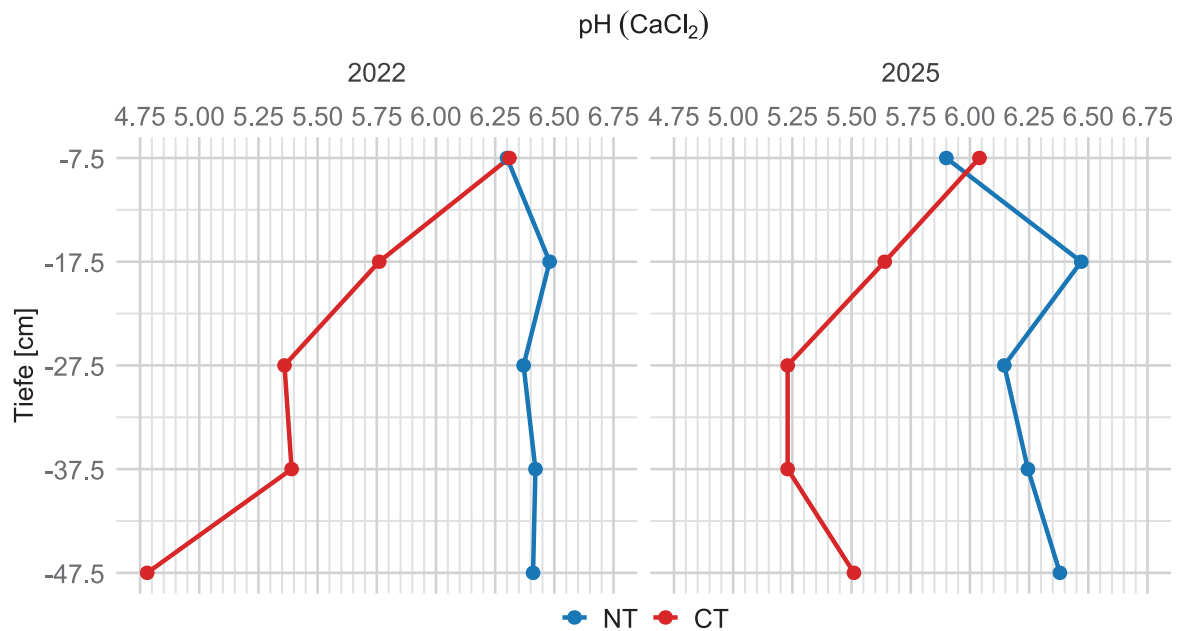


Abbildung 16: pH-Wert (CaCl₂) im Tiefenverlauf unter NT und CT im Jahr 2022 und 2025

4.6 Effektive Kationenaustauschkapazität

Bei der Berechnung der erreichbaren KAKeff-Zunahme (siehe Tabelle 14) zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Standorten, wobei beide Standorte von einer pH-Wert-Anhebung profitieren. Die bei NT gemessenen pH-Werte von 6,3 bis 6,48 liegen bereits nah am optimalen pH-Wert von 6,5 wodurch eine geringe Zunahme von 7 bis 12 % KAKeff je Tiefenstufe zu verzeichnen ist. Auf das gesamte Profil bezogen steigt die KAKeff von 7,45 cmol_e/kg auf 8,32 cmol_e/kg. Bei CT liegen die pH-Werte mit einer Spanne von 4,78 bis 6,31 deutlich niedriger, wobei der annähernd optimale Wert lediglich bei -7,5 cm erreicht wird. Die KAKeff nimmt in den darunterliegenden Schichten bei optimalem pH-Wert zwischen 15 % und 35 % zu, wobei der Anstieg bei -27,5 cm und -37,5 cm besonders ausgeprägt ist. In Bezug auf das gesamte Profil steigt die KAKeff von 8,02 cmol_e/kg auf 10,72 cmol_e/kg.

Tabelle 14: Auswirkung einer pH-Wert Erhöhung auf die effektive Kationenaustauschkapazität (KAKeff) an den Probenentnahmepunkten für das Jahr 2022

NT						
Tiefe [cm]	-7,5	-17,5	-27,5	-37,5	-47,5	0 – (-47,5)
pH-Wert	6,3	6,48	6,37	6,42	6,41	6,41
KAKeff [cmol _e /kg]	8,61	7,73	7,45	5,71	5,19	7,45
KAKeff [cmol _e /kg] pH >6,5	9,61	8,60	8,32	6,10	5,60	8,32
KAKeff Zunahme (%)	12	11	12	7	8	12
CT						
Tiefe [cm]	-7,5	-17,5	-27,5	-37,5	-47,5	0 – (-47,5)
pH-Wert	6,31	5,76	5,36	5,39	4,78	5,39
KAKeff [cmol _e /kg]	10,26	9,25	8,02	7,06	6,13	8,02
KAKeff [cmol _e /kg] pH >6,5	11,85	10,72	10,81	9,55	7,17	10,72
KAKeff Zunahme (%)	15	16	35	35	17	34

4.7 Porenvolumen, Porengrößenverteilung und Kapazitäten

4.7.1 Gesamtporenvolumen

Abbildung 17 zeigt deutliche Unterschiede im Gesamtporenvolumen zwischen den beiden Bewirtschaftungssystemen sowie im Tiefenverlauf. Besonders in natürlicher Lagerung weisen die Proben unter CT in fast allen Tiefen ein höheres Porenvolumen auf als unter NT. Nach der Proctorverdichtung ist ein starker Volumenrückgang zu beobachten, wobei das Porenvolumen von CT tendenziell stärker abnimmt als NT. In -47,5 cm bleibt NT im verdichteten Zustand auf einem höheren Niveau als CT.

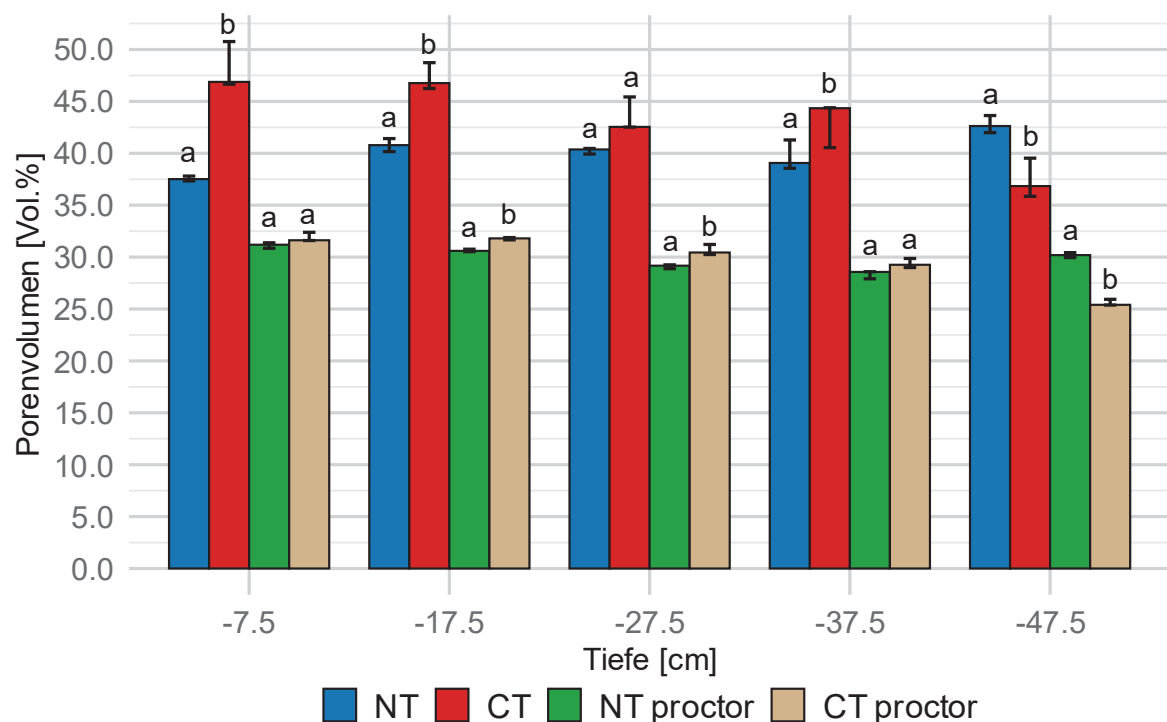


Abbildung 17: Gesamtporenvolumen von NT und CT im Jahr 2022 in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung. Unterschiedliche Buchstaben (a, b) kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Bewirtschaftungssystemen

Die ANOVA ergibt signifikante Unterschiede für System, Tiefe sowie die Interaktion in natürlicher Lagerung (siehe Tabelle 15). Dies deutet auf systemabhängige Unterschiede im Porenvolumen entlang des Tiefenverlaufs hin. Nach der Proctorverdichtung sind lediglich Tiefe und die Interaktion signifikant unterschiedlich.

Tabelle 15: Ergebnisse der ANOVA zum Gesamtporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$)

natürliche Lagerung					
	Freiheitsgrade		F-Wert	p-Wert	Signifikanz
System	F(1,40)	=	31,84	$p < 0,001$	***
Tiefe	F(4,40)	=	4,27	0,006	**
System x Tiefe	F(4,40)	=	15,59	$p < 0,001$	***
Proctor					
System	F(1,40)	=	0,02	0,901	n.s.
Tiefe	F(4,40)	=	43,51	$p < 0,001$	***
System x Tiefe	F(4,40)	=	34,90	$p < 0,001$	***

4.7.2 Weite Grobporen

Die Verteilung des Volumens weiter Grobporen unterscheidet sich deutlich zwischen den Bewirtschaftungssystemen (siehe Abbildung 18). In natürlicher Lagerung weist NT insgesamt ein höheres weite Grobporenvolumen auf als CT, insbesondere ab einer Tiefe von -27,5 cm. Die Streuung ist unter NT dabei leicht größer. Nach der Proctorverdichtung nimmt das Volumen weiter Grobporen in beiden Systemen deutlich ab (siehe Abbildung 19), wobei die Unterschiede zwischen den Systemen geringer ausfallen. In der tiefsten Schicht (-47,5 cm) zeigt sich ein tendenziell höheres Porenvolumen unter NT.

Die ANOVA ergibt in natürlicher Lagerung signifikante Unterschiede für System und Tiefe sowie eine signifikante Interaktion beider Faktoren (alle $p < 0,001$). Unter Proctorbedingungen ist lediglich der Tiefeneffekt signifikant ($p < 0,05$), während für System und Interaktion keine signifikanten Unterschiede feststellbar sind (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Ergebnisse der ANOVA zum weite Grobporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$)

natürliche Lagerung					
	Freiheitsgrade		F-Wert	p-Wert	Signifikanz
System	F(1,40)	=	16,36	$p < 0,001$	***
Tiefe	F(4,40)	=	5,98	$p < 0,001$	***
System x Tiefe	F(4,40)	=	11,57	$p < 0,001$	***
Proctor					
System	F(1,40)	=	1,74	0,195	n.s.
Tiefe	F(4,40)	=	3,65	0,013	*
System x Tiefe	F(4,40)	=	1,44	0,236	n.s.

Die contrasts-Analyse (Tabelle 17) bestätigt die signifikanten Unterschiede zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung für die Tiefen -7,5 cm, -27,5 cm, -37,5 cm und -47,5 cm. Ab -27,5 cm weist NT dabei ein signifikant höheres weite Grobporenvolumen auf. Nach der Proctorverdichtung wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt, jedoch zeichnet sich in -47,5 cm eine Tendenz in Richtung von NT ab ($p = 0,057$).

Tabelle 17: Ergebnisse der contrasts zum weite Grobporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$)

Tiefe [cm]	Δ NT – CT (nat. Lag.)	p-Wert		Δ NT – CT (Proctor)	p-Wert	
-7,5	-4,404	0,013	*	-0,354	0,514	n.s.
-17,5	-1,078	0,530	n.s.	0,359	0,508	n.s.
-27,5	5,514	0,002	**	-0,312	0,565	n.s.
-37,5	5,188	0,004	**	0,836	0,128	n.s.
-47,5	10,177	$p < 0,001$	***	1,053	0,057	n.s.

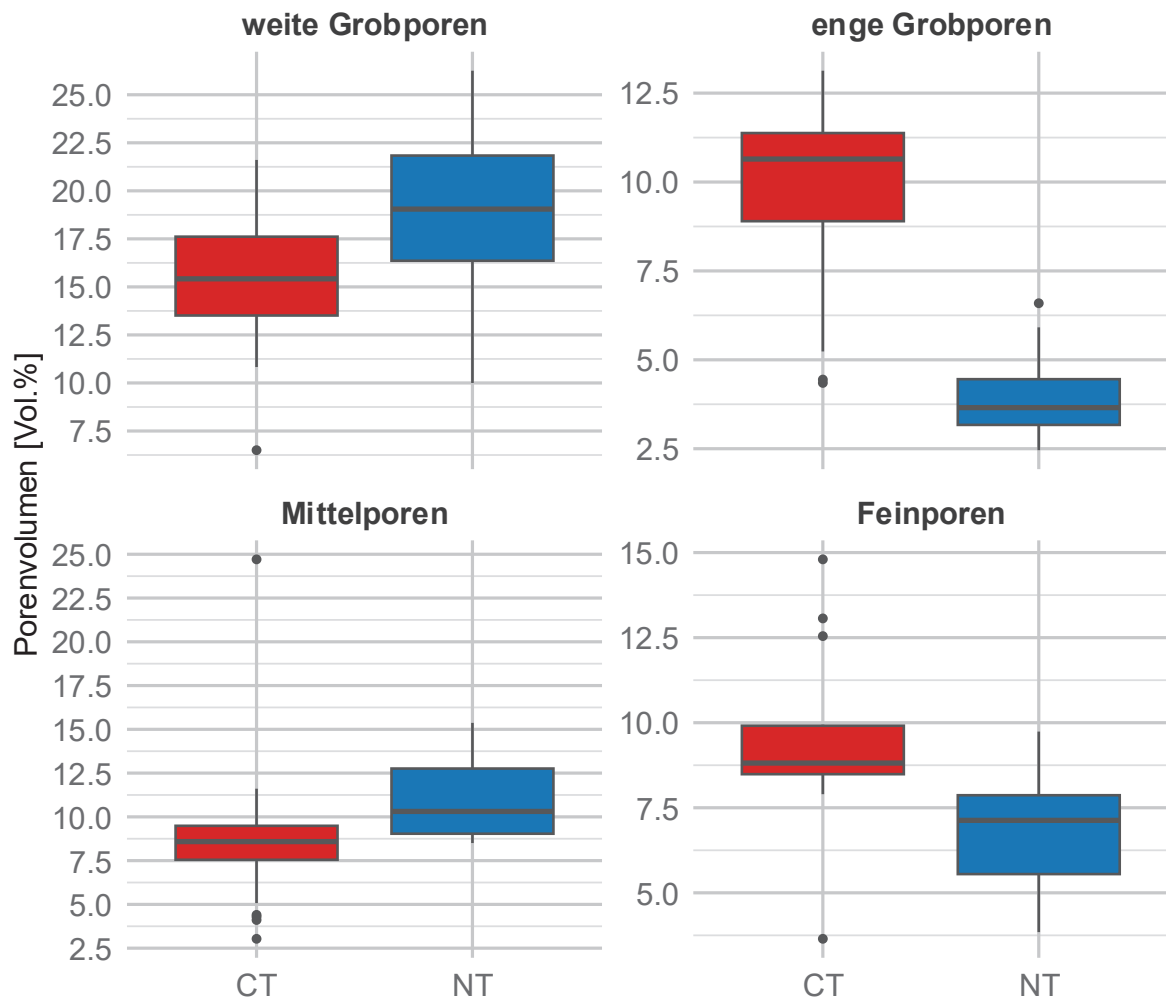


Abbildung 18: Vergleich des Porenvolumens verschiedener Porengrößenklassen (weite Grobporen, enge Grobporen, Mittelporen, Feinporen) unter NT und CT in **natürlicher Lagerung** über die gesamte Tiefe

4.7.3 Enge Grobporen

Deutliche Unterschiede im Volumen der engen Grobporen bestehen zwischen den beiden Bewirtschaftungssystemen sowohl in natürlicher Lagerung als auch nach der Proctorverdichtung. In natürlicher Lagerung weist CT signifikant höhere enge Grobporenvolumina auf als NT. Nach der Proctorverdichtung verringert sich das

enge Grobporenvolumen bei CT deutlich, während es unter NT ansteigt (siehe Abbildung 18 und 19).

Die ANOVA (Tabelle 18) bestätigt diese Beobachtungen. In natürlicher Lagerung sind die Unterschiede von System, Tiefe und deren Interaktion hochsignifikant ($p < 0,001$). Auch nach der Proctorverdichtung bestehen signifikante Unterschiede, insbesondere für die Interaktion zwischen System und Tiefe, was auf systemabhängige Unterschiede in der Reaktion auf die Verdichtung hinweist.

Tabelle 18: Ergebnisse der ANOVA zum enge Grobporenvolumen in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$)

natürliche Lagerung					
	Freiheitsgrade	=	F-Wert	p-Wert	Signifikanz
System	F(1,40)	=	356,36	$p < 0,001$	***
Tiefe	F(4,40)	=	7,84	$p < 0,001$	***
System x Tiefe	F(4,40)	=	18,75	$p < 0,001$	***
Proctor					
System	F(1,40)	=	45,46	$p < 0,001$	***
Tiefe	F(4,40)	=	2,66	0,0462	*
System x Tiefe	F(4,40)	=	80,76	$p < 0,001$	***

Die contrasts-Analyse (Tabelle 19) zeigt, dass NT in natürlicher Lagerung durchgehend niedrigere enge Grobporenvolumina aufweist als CT, mit signifikanten Unterschieden bis einschließlich -37,5 cm. Nach der Proctorverdichtung ändert sich dieses Muster. Während CT in -17,5 cm höhere Werte aufweist, zeigt NT in -37,5 cm und -47,5 cm signifikant höhere Volumina.

Tabelle 19: Ergebnisse der contrasts zum enge Grobporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung im Tiefenverlauf (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$)

Tiefe [cm]	Δ NT – CT (nat. Lag.)	p-Wert	Signifikanz	Δ NT – CT (Proctor)	p-Wert	Signifikanz
-7,5	-7,948	$p < 0,001$	***	-0,675	0,147	n.s.
-17,5	-8,077	$p < 0,001$	***	-2,440	$p < 0,001$	***
-27,5	-6,711	$p < 0,001$	***	-0,521	0,260	n.s.
-37,5	-6,325	$p < 0,001$	***	2,544	$p < 0,001$	***
-47,5	-0,663	0,352	n.s.	7,967	$p < 0,001$	***

Aufgrund der Zunahme des enge Grobporen- und Mittelporenvolumens nach der Proctorverdichtung bei NT wurde eine ANOVA und contrasts jeweils innerhalb von NT und CT gerechnet, um natürliche Lagerung und Proctorverdichtung zu vergleichen.

Beide Bewirtschaftungssysteme zeigen deutliche Unterschiede zwischen natürlicher Lagerung und Proctorverdichtung innerhalb des jeweiligen Bewirtschaftungssystems. Die ANOVA (siehe Tabelle 28 - Anhang) ergibt signifikante Unterschiede für natürliche Lagerung/Proctorverdichtung und Tiefe sowie eine signifikante Interaktion zwischen beiden

Faktoren für NT (alle $p < 0,001$). Bei CT liegen ebenfalls signifikante Unterschiede für natürliche Lagerung/Proctorverdichtung und Tiefe vor ($p < 0,001$), während die Interaktion nicht signifikant ausfällt ($p = 0,300$).

Die contrasts-Analyse (Tabelle 20) zeigt, dass NT in nahezu allen Tiefen signifikant höhere enge Grobporenvolumina nach der Proctorverdichtung aufwies. Besonders in -37,5 cm und -47,5 cm Tiefe ist der Anstieg im Vergleich zur natürlichen Lagerung deutlich ($p < 0,001$). Auch in -7,5 cm und -27,5 cm liegen die Werte nach Verdichtung signifikant über denen der ungestörten Proben, während in -17,5 cm kein signifikanter Unterschied feststellbar ist.

Für CT zeigt sich in allen Tiefen ein deutlicher Rückgang der engen Grobporen durch die Proctorverdichtung. Die Unterschiede waren in jeder Schicht hochsignifikant ($p < 0,001$).

Tabelle 20: Ergebnisse der contrasts zum enge Grobporenvolumen in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung innerhalb von NT und CT (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$)

Tiefe [cm]	Δ NT – nat. Lag. – Proctor	p-Wert	Signifikanz	Δ CT – nat. Lag. – Proctor	p-Wert	Signifikanz
-7,5	1,026	0,018	*	-6,246	$p < 0,001$	***
-17,5	0,622	0,141	n.s.	-5,016	$p < 0,001$	***
-27,5	1,311	0,003	*	-4,879	$p < 0,001$	***
-37,5	2,998	$p < 0,001$	***	-5,871	$p < 0,001$	***
-47,5	4,440	$p < 0,001$	***	-4,190	$p < 0,001$	***

4.7.4 Mittelporen und Feinporen

In der natürlichen Lagerung ergeben sich bei der ANOVA (Tabelle 21) für System und Tiefe signifikante Unterschiede ($p < 0,01$), während keine signifikante Interaktion vorhanden ist. Unter der Proctorverdichtung sind alle Effekte hochsignifikant ($p < 0,001$). Dies bestätigt die in Abbildung 18 und 19 ersichtlichen Muster, dass NT im Vergleich ein signifikant höheres Mittelporenvolumen in beiden Lagerungen aufweist bei zeitgleich größerer Varianz. Zudem zeigen die Abbildungen, dass beide Bewirtschaftungssysteme nach der Proctorverdichtung ein höheres Mittelporenvolumen aufwiesen.

Tabelle 21: Ergebnisse der ANOVA zum Mittelporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$)

natürliche Lagerung					
	Freiheitsgrade	=	F-Wert	p-Wert	Signifikanz
System	F(1,40)	=	8,59	0,0056	**
Tiefe	F(4,40)	=	4,38	0,0049	**
System x Tiefe	F(4,40)	=	2,13	0,0948	n.s.
Proctor					
System	F(1,40)	=	108,45	$p < 0,001$	***
Tiefe	F(4,40)	=	168,21	$p < 0,001$	***
System x Tiefe	F(4,40)	=	34,24	$p < 0,001$	***

Im contrasts-Vergleich (Tabelle 22) unter natürlicher Lagerung lassen sich signifikante Unterschiede nur in den oberen und unteren Bodenschichten beobachten (-7,5, -17,5 und -47,5 cm; $p < 0,05$). Nach der Proctorverdichtung sind die Unterschiede in allen Tiefen signifikant. Entgegen den Ergebnissen der engen Grobporenvolumina zeigt sich hier, dass NT mit Ausnahme von -37,5 cm ein konstant höheres Mittelporenvolumen nach der Proctorverdichtung aufweist.

Tabelle 22: Ergebnisse der contrasts zum Mittelporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung im Tiefenverlauf (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$)

Tiefe [cm]	Δ NT – CT (nat. Lag.)	p-Wert	Signifikanz	Δ NT – CT (Proctor)	p-Wert	Signifikanz
-7,5	3,747	0,037	*	1,133	$p < 0,001$	***
-17,5	3,861	0,032	*	1,640	$p < 0,001$	***
-27,5	-1,496	0,395	n.s.	1,302	$p < 0,001$	***
-37,5	0,826	0,638	n.s.	-1,023	0,0014	**
-47,5	4,471	0,014	*	3,865	$p < 0,001$	***

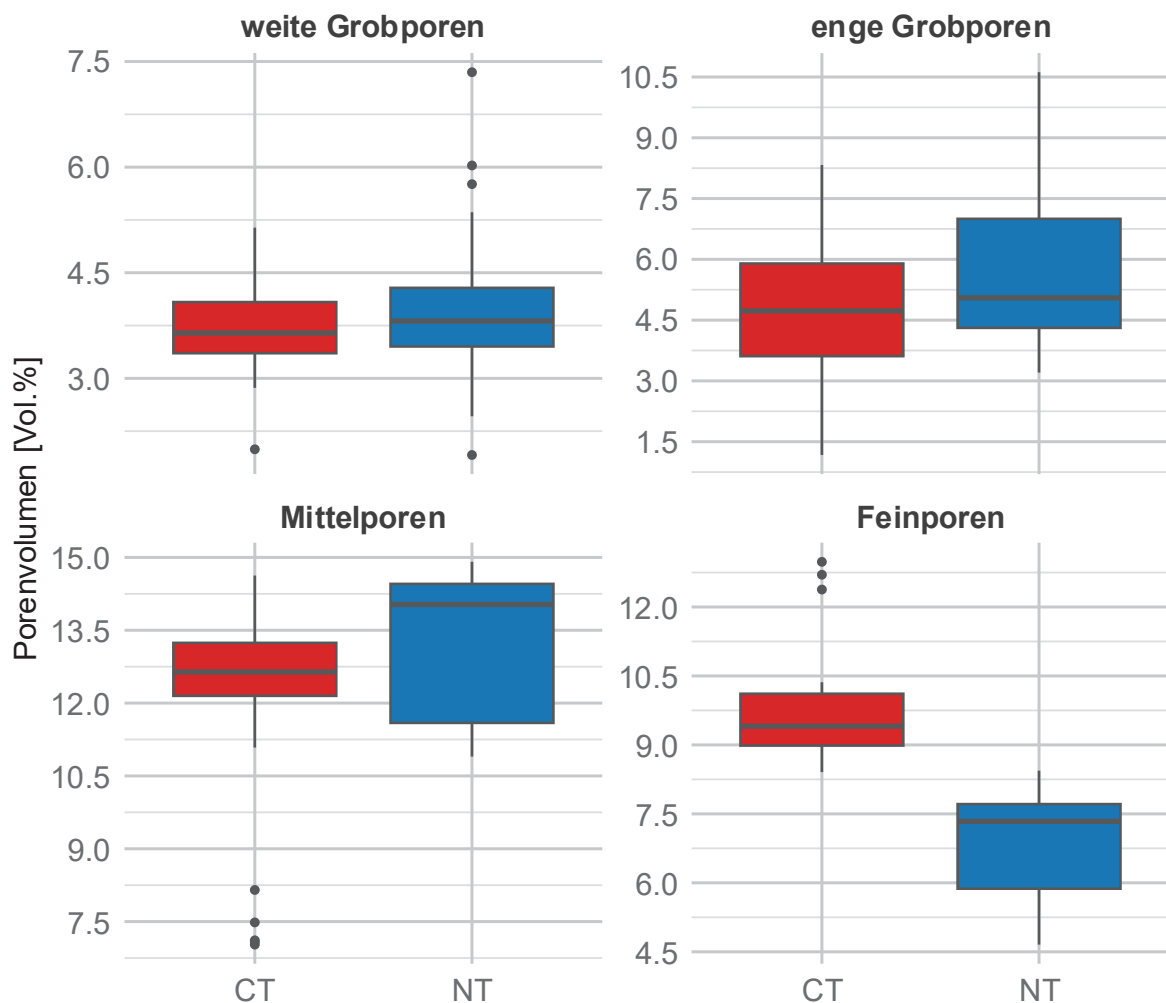


Abbildung 19: Vergleich des Porenvolumens verschiedener Porengrößenklassen (weite Grobporen, enge Grobporen, Mittelporen, Feinporen) unter NT und CT nach der **Proctorverdichtung** über die gesamte Tiefe

Die ANOVA für die Untersuchung der Unterschiede innerhalb des Bewirtschaftungssystem ergibt signifikante Unterschiede bei NT für Lagerungsform und Tiefe sowie eine signifikante Interaktion bei beiden Faktoren (alle $p < 0,001$; siehe Tabelle 29 - Anhang). Dies weist auf eine tiefenabhängige Reaktion des Mittelporenvolumens auf die Proctorverdichtung hin. Auch CT zeigt signifikante Unterschiede bei der Lagerungsform und Tiefe ($p < 0,001$), jedoch ist die Interaktion nicht signifikant ($p = 0,906$), was auf eine gleichmäßige Wirkung der Verdichtung über das gesamte Bodenprofil hinweist.

Die contrasts-Analyse (Tabelle 23) zeigt, dass NT nach der Proctorverdichtung von -17,5 cm bis -47,5 cm Tiefen ein signifikant höheres Mittelporenvolumen aufweist als in der natürlichen Lagerung. CT weist ebenfalls über den ganzen Tiefenverlauf deutliche Zunahmen im Mittelporenvolumen auf, welche jedoch in -7,5 cm und -27,5 cm nicht signifikant waren.

*Tabelle 23: Ergebnisse der contrasts zum Mittelporenvolumen in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung innerhalb von NT und CT (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$)*

Tiefe [cm]	Δ NT – nat. Lag. – Proctor	p-Wert	Signifikanz	Δ CT – nat. Lag. – Proctor	p-Wert	Signifikanz
-7,5	-0,764	0,132	n.s.	-3,378	0,053105	n.s.
-17,5	-1,921	$p < 0,001$	***	-4,142	0,019026	*
-27,5	-4,761	$p < 0,001$	***	-1,963	0,253504	n.s.
-37,5	-1,644	$p < 0,001$	***	-3,493	0,045807	*
-47,5	-1,943	$p < 0,001$	***	-2,549	$p < 0,001$	***

Sowohl unter natürlicher Lagerung als auch nach der Proctorverdichtung zeigen sich bei den Feinporen signifikante Unterschiede für System, Tiefenverlauf und deren Interaktion. (siehe Tabelle 30 - Anhang)

Die contrasts-Analyse (siehe Tabelle 31 - Anhang) zeigt unter natürlicher Lagerung nur bei -37,5 cm und -47,5 cm signifikante Unterschiede. Unter der Proctorverdichtung sind alle Tiefen signifikant unterschiedlich. Im Gesamttrend zeigt sich das NT, weniger Feinporenvolumen aufweist.

4.7.5 Saugspannungskurven der ermittelten Bodenarten

Die Saugspannungskurven von NT- und CT-Böden in natürlicher Lagerung zeigen deutlich unterschiedliche Verläufe (siehe Abbildung 20). Auffällig ist zunächst, dass NT ein insgesamt geringeres Gesamtporenvolumen aufweist als CT, und zwar auch dann, wenn die Betrachtung nach Bodenarten und nicht wie in Kapitel 4.7 nach Bodentiefe erfolgt. Unter NT zeigt sich zudem, dass NT Su4 ein höheres Gesamtporenvolumen besitzt als NT Us.

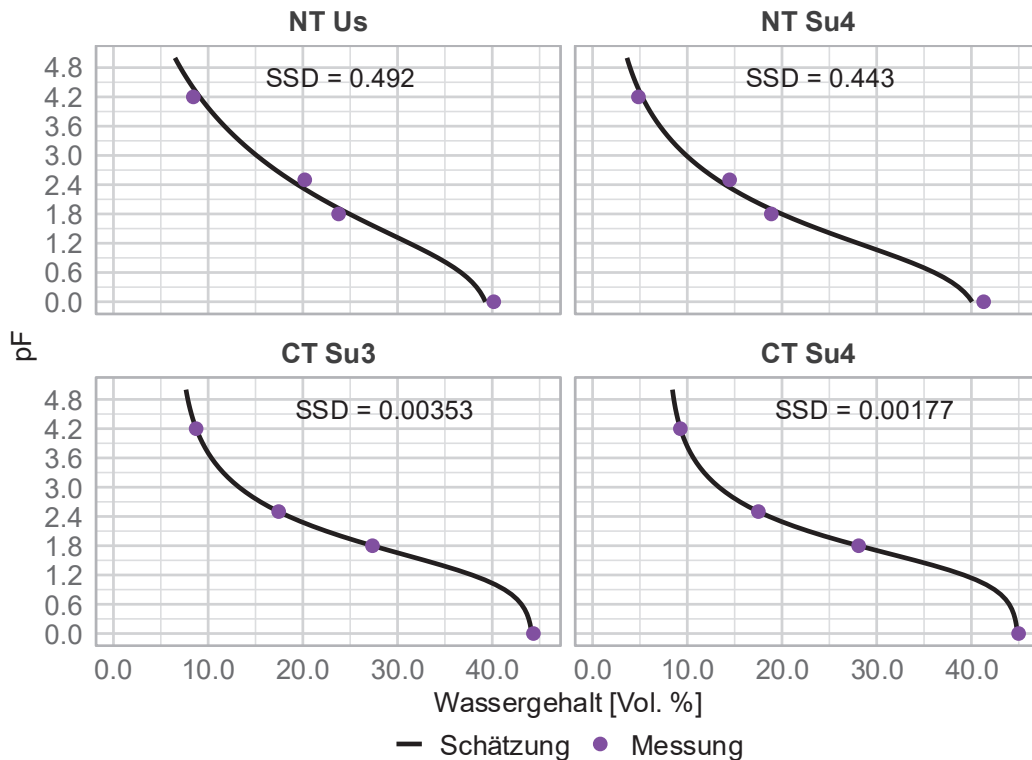


Abbildung 20: Saugspannungskurven für NT und CT, gegliedert nach den vorliegenden Bodenarten in natürlicher Lagerung (SSD = Sum of Squared Difference)

Im Bereich der weiten Grobporen verlaufen beide NT-Kurven annähernd linear, beginnend mit einem leicht konkaven Abschnitt zwischen pF 0 und 0,6. Dabei verliert NT Us rund 3 Vol. % Wasser, während NT Su4 etwa 4 Vol. % verliert. Innerhalb der engen Grobporen zeigen beide Bodenarten ebenfalls einen nahezu linear steigenden Verlauf, wobei NT Us eine etwas steilere Kurve aufweist. Im Bereich der Mittelporen steigt die Steilheit beider Kurven an, bei NT Su4 ist dies bei einem Wassergehalt von rund 9 Vol. % stärker ausgeprägt als bei NT Us, was eine stärkere pF-Zunahme innerhalb der Mittelporen zur Folge hat. Im Bereich der Feinporen nimmt der pF-Wert von NT Su4 deutlich stärker zu als bei NT Us. Zudem beginnt der Feinporenbereich bei NT Us bereits bei einem Wassergehalt von 8,5 Vol. %, während er bei NT Su4 erst ab 4,9 Vol. % beginnt.

Im Vergleich dazu weisen die CT-Kurven eine andere Charakteristik auf. CT Su4 und CT Su3 erreichen höhere maximale Wassergehalte von etwa 45 bzw. 44 Vol. %. Bei beiden Varianten steigt die Kurve beim initialen Wasserverlust von etwa 4 Vol. % sehr steil an, während der pF-Wert zeitgleich von 0 auf 1,1 zunimmt. Anschließend steigen die Kurven im Bereich der weiten Grobporen nahezu linear, verbunden mit einem Wasserverlust von rund 12 Vol. % und einer pF-Zunahme von 0,7. In den engen Grobporen behalten beide CT-Kurven eine annähernd lineare Steigung bei. Im Bereich der Mittelporen zeigt CT Su4 einen leicht konvexeren Verlauf als CT Su3. Bei beiden Böden setzt der Feinporenbereich bei etwa 9 Vol. % Wassergehalt ein.

Nach der Proctorverdichtung (siehe Abbildung 21) weisen alle Bodenarten innerhalb der weiten Grobporen einen ähnlich stark ausgeprägten konkaven Verlauf auf, der durch eine deutliche pF-Zunahme bei relativ geringem volumetrischem Wasserverlust gekennzeichnet ist. Auffällig ist, dass CT Su3 insgesamt stärker an Gesamtporenvolumen verloren hat (25,2 Vol. %) als die anderen Bodenarten, die zwischen 30 und 32 Vol. % Gesamtporenvolumen aufweisen. Zudem zeigen NT Us, NT Su4 und CT Su4 im Bereich zwischen pF 1,8 und 4,2 eine ähnliche leicht konvexe zunehmende Steigung. CT Su3 hingegen fällt im Vergleich zur natürlichen Lagerung aus dem Rahmen. Durch die Proctorverdichtung stieg der Feinporenanteil von 9 auf 12,5 Vol. %, während das Gesamtporenvolumen stark abnahm. Dies führte zu einem insgesamt deutlich steileren Kurvenverlauf. Bei der Betrachtung der Sum of Squared Difference (SSD) fällt auf, dass die Saugspannungskurven für NT in natürlicher Lagerung eine deutlich größere Abweichung des Modells von den gemessenen Werten aufweisen als bei CT, jedoch nach der Proctorverdichtung die SSD deutlich kleiner ist.

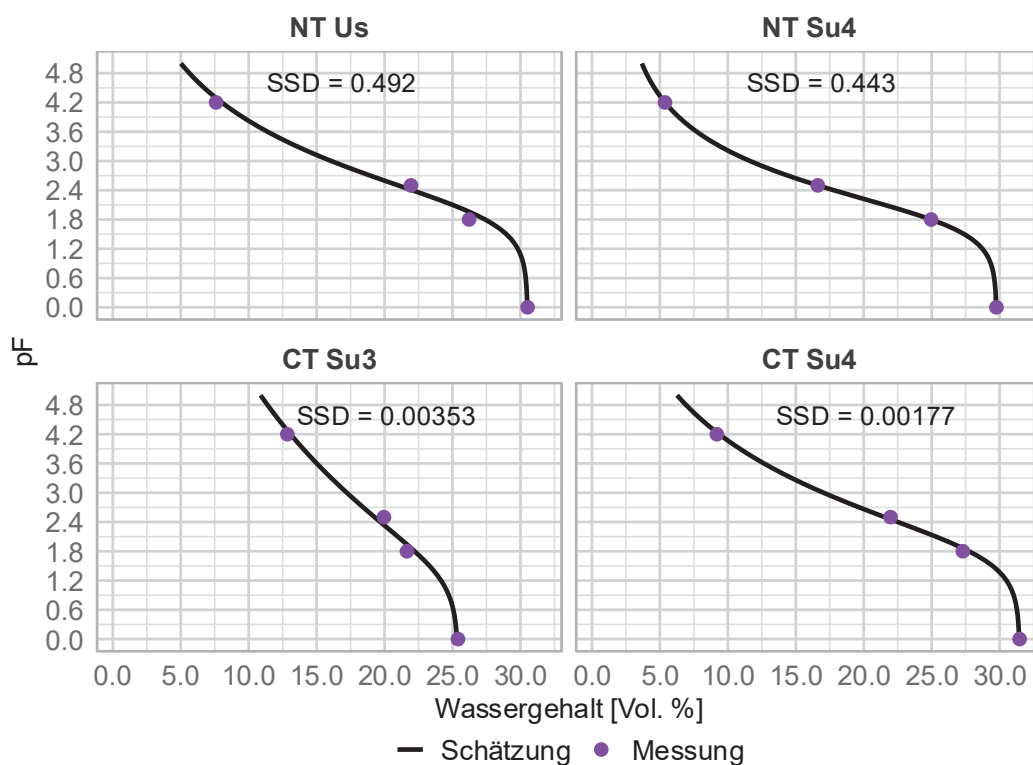


Abbildung 21: Saugspannungskurven für NT und CT, gegliedert nach den vorliegenden Bodenarten nach der Proctorverdichtung (SSD = Sum of Squared Difference)

4.7.6 Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität und relativer Porenanteil

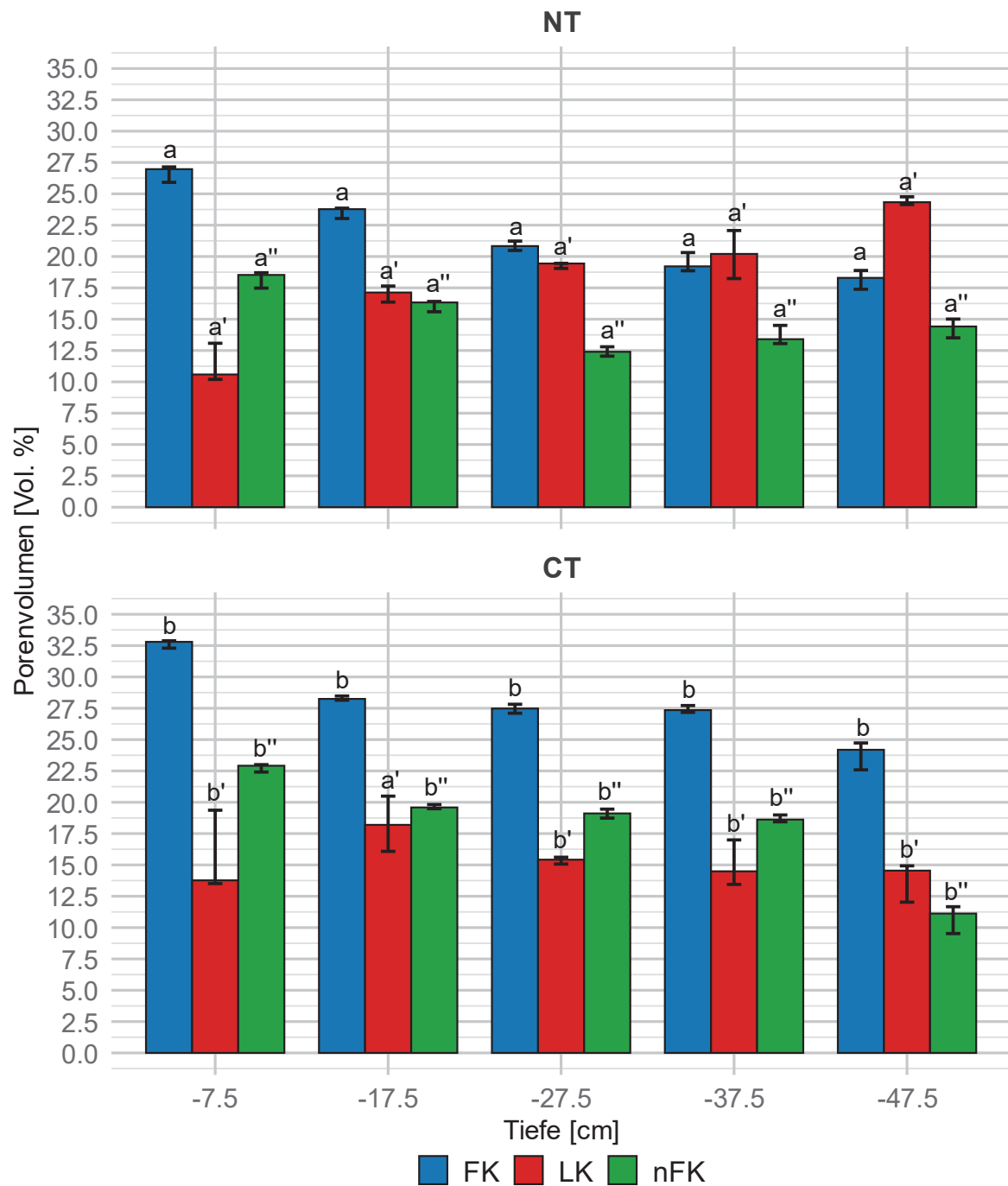


Abbildung 22: Feldkapazität (FK), Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK) nach Tiefenstufen in **natürlicher Lagerung**. Unterschiedliche Buchstaben (a, b) kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Bewirtschaftungssystemen. Hochkommas (', ') wurden für einfachere Zuordnung zwischen den Abbildungen an die Buchstaben angefügt.

Die FK und nFK unterscheiden sich deutlich zwischen den beiden Bewirtschaftungssystemen (siehe Abbildung 22). Die Luftkapazität entspricht den in Kapitel 4.7.2 beschriebenen Daten. In natürlicher Lagerung zeigt CT über den Tiefenverlauf höhere nFK-Werte als NT. Der Tiefenverlauf unter NT ist dabei durch ein Maximum in -7,5 cm und einem anschließenden Rückgang bis -27,5 cm gekennzeichnet, mit leichter Zunahme in den folgenden tieferen Schichten. Im Median ergibt sich für NT eine nFK von 14,5 Vol. %, während CT mit 19,27 Vol. % einen deutlich höheren Wert aufweist. In der tiefsten Schicht -47,5 cm fällt die nFK unter CT hingegen ab, was mit einer erhöhten Trockenrohdichte (1,67 g/cm³) in dieser Tiefe einhergeht. Die FK folgt einem ähnlichen Muster. Auch hier weist CT insgesamt höhere Werte und einen gleichmäßigeren Verlauf in der Tiefe auf. Nach der Proctorverdichtung nähern sich die Systeme hinsichtlich der nFK-Werte an. NT weist nun mit 18,95 Vol. % im Median eine etwas höhere nFK auf als CT mit 17,36 Vol. % im Median. In -47,5 cm ist unter CT erneut ein Rückgang zu erkennen, was mit der erhöhten Trockenrohdichte in dieser Schicht zusammenhängt.

Die ANOVA für die Feldkapazität (Tabelle 32 - Anhang) ergibt in natürlicher Lagerung signifikante Unterschiede für System und Tiefe, während die Interaktion nicht signifikant ist. Dies deutet darauf hin, dass sich die FK in beiden Systemen entlang des Tiefenverlauf ähnlich verhält. Nach der Proctorverdichtung liegen signifikante Unterschiede für Tiefe und Interaktion vor, der Unterschied zwischen den Systemen ist jedoch nicht signifikant.

Die contrasts-Analyse präzisiert die bereits in den Abbildungen 22 erkennbaren Unterschiede zwischen den Systemen in natürlicher Lagerung (siehe Tabelle 33 - Anhang). CT zeigt in den Tiefen von -7,5 cm bis -37,5 cm signifikant höhere FK-Werte. In -47,5 cm war die Feldkapazität bei NT signifikant höher. Nach der Proctorverdichtung (siehe Abbildung 23) bleiben diese Unterschiede bestehen, jedoch war -7,5 cm statistisch nicht signifikant. Auffällig ist, dass NT in -47,5 cm nach der Verdichtung erneut signifikant höhere FK-Werte aufweist.

Die ANOVA für die nFK zeigt für beide Lagerungsformen, System, Tiefe und Interaktion signifikante Unterschiede (siehe Tabelle 34).

Der FK folgend weist CT bei der contrasts-Analyse wieder mit Ausnahme von -47,5 cm signifikant höhere nFK-Volumina auf, NT auf -47,5 cm höhere nFK-Volumina (siehe Tabelle 35 - Anhang). Nach der Proctorverdichtung verschwinden diese Unterschiede in den oberen drei Tiefenstufen (-7,5 cm bis -27,5 cm), während in -37,5 cm und -47,5 cm NT signifikante höhere Werte aufweist. Die in -47,5 cm festgestellte Zunahme unter NT spiegelt die bereits in der natürlichen Lagerung sichtbare Entwicklung wider.

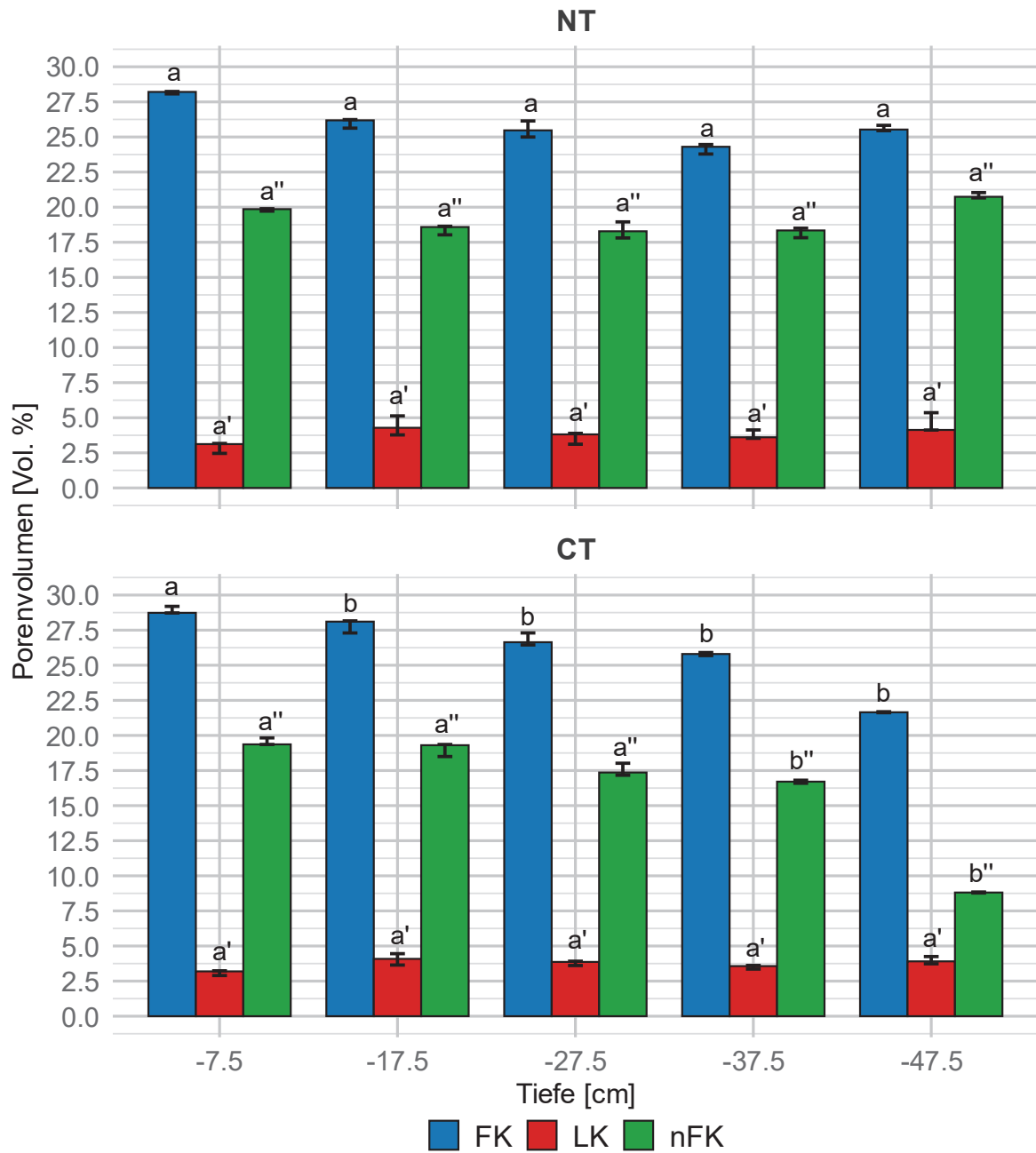


Abbildung 23: Feldkapazität (FK), Luftkapazität (LK), nutzbare Feldkapazität (nFK) nach Tiefenstufen nach der **Proctorverdichtung**. Unterschiedliche Buchstaben (a, b) kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Bewirtschaftungssystemen. Hochkommas (', ') wurden für einfachere Zuordnung zwischen den Abbildungen an die Buchstaben angefügt.

Die Verteilung der relativen Porenanteile an der nFK unter natürlicher Lagerung (siehe Abbildung 24) zeigt, dass unter NT, Mittelporen mit Anteilen zwischen 65 % und 77 % dominieren. CT zeigt hingegen eine gleichmäßigere Aufteilung zwischen den engen Grobporen und Mittelporen, mit einer leichten Tendenz zu den engen Grobporen.

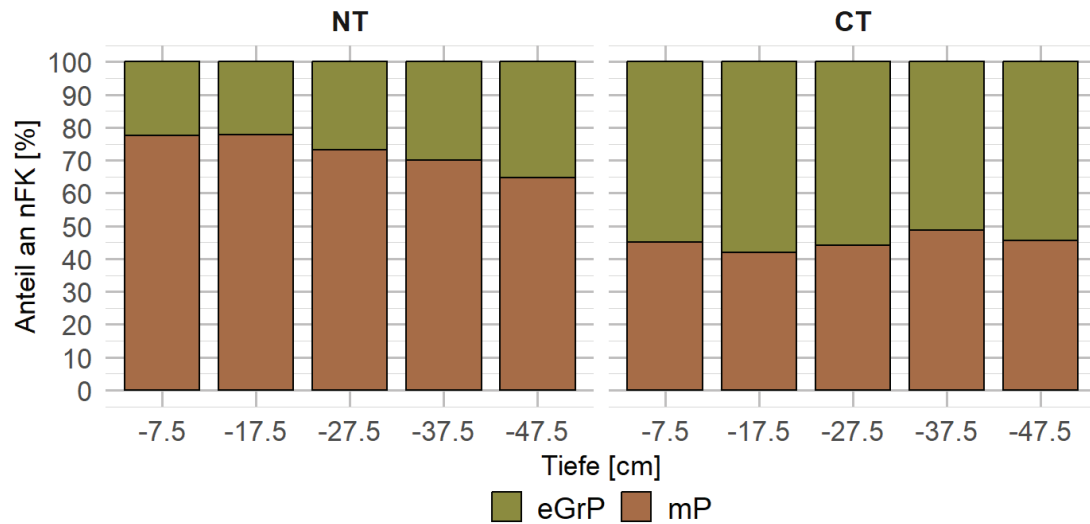


Abbildung 24: prozentualer Anteil der engen Grobporen (eGrP) und Mittelporen (mP) an der nFK

5 Diskussion

Die Untersuchung an den Standorten hatte zum Ziel, die Auswirkungen der Bewirtschaftungssysteme NT und CT auf bodenphysikalische und bodenchemische Parameter zu analysieren sowie die zeitliche Entwicklung der Parameter Trockenrohdichte, Eindringwiderstand, Humusgehalt und pH-Wert zwischen den Jahren 2022 und 2025 zu vergleichen. Im Folgenden werden die Ergebnisse diskutiert und mit Literaturwerten sowie den Hypothesen in Beziehung gesetzt.

Vorweg ist festzuhalten, dass die Beprobung jeweils an nur einem Punkt pro Bewirtschaftungssystem erfolgte. Damit können die Ergebnisse keine repräsentativen Aussagen für die gesamte Fläche liefern. Die Konzentration auf einzelne Punkte war notwendig, da die Flächen selbst eine hohe Heterogenität hinsichtlich Ausgangssubstraten, Bodenarten und Horizontierung aufweisen, was flächenhafte Vergleiche zusätzlich erschwert. Zudem ließ der Umfang der erhobenen Parameter in Verbindung mit dem hohen Arbeitsaufwand im Labor eine Ausweitung der Probenahme im Rahmen dieser Arbeit nicht zu. Die Aussagekraft der statistischen Tests ist durch die geringe Stichprobengröße eingeschränkt. Für den Parameter pH-Wert standen nicht ausreichend Wiederholungen für eine belastbare Auswertung zur Verfügung. Da der Eindringwiderstand eine physikalische Summengröße ist, ist ein seriöser Vergleich über die Jahre hinweg nicht möglich. Darüber hinaus bilden die Jahre 2022 und 2025 lediglich zwei Zeitpunkte ab, weshalb keine langfristigen Trends abgeleitet werden können. Trotz dieser Einschränkungen liefern die erhobenen Parameter neue Ansatzpunkte, die in künftigen Arbeiten mit Beschränkung auf weniger Parameter vertieft und in flächenhaften Untersuchungen aufgegriffen werden können.

Die gemessenen pH-Werte lagen insgesamt im schwach sauren Bereich. Unter NT blieb der pH-Wert über alle Tiefen konstant zwischen 6,0 und 6,5, was auf eine grundsätzlich gute Nährstoffverfügbarkeit und ein gutes Milieu für Bodenlebewesen schließen lässt. Bei CT ist hingegen der deutliche Rückgang ab etwa -27,5 cm auffällig, mit gemessenen pH-Werten von 5,3 bis hin zu 4,75. In diesem Bereich ist davon auszugehen, dass phytotoxisch wirkende Al^{3+} -Ionen in Lösung gehen. In den Profilaufnahmen ist in diesen Horizonten im Vergleich zu NT eine geringere Durchwurzelung sichtbar.

Im Jahr 2025 zeigten beide Systeme eine Absenkung der pH-Werte um etwa 0,25 Einheiten gegenüber 2022, während der grundsätzliche Tiefenverlauf erhalten blieb. Lediglich am Standort CT trat in -47,5 cm Tiefe ein höherer pH-Wert (5,52) auf, der jedoch aufgrund der geringen Probenzahl als Ausreißer interpretiert werden kann. Es besteht auch die Möglichkeit, dass Sediment mit stark unterschiedlichem pH-Wert im Unterboden existiert, wie z.B. durch die in der Gegend vorkommenden Eiskeilpseudomorphosen mit

anschließender Einwehung von Bodenmaterial. Unter NT fiel 2025 zudem ein stark erniedrigter pH-Wert im obersten Horizont (-7,5 cm) auf, der vermutlich auf die zuvor durchgeführte *CULTAN*-Düngung zurückzuführen ist.

Besonders auffällig ist, dass trotz der jährlichen Bearbeitungstiefe von ca. 25 – 30 cm im CT-System kein pH-Wert homogenisierender Effekt im Bearbeitungshorizont erkennbar war. Nach Angaben des Bewirtschafters wurden 2022 rund 2 bis 3 t Konverterkalk pro Hektar ausgebracht, die Wirkung scheint jedoch begrenzt geblieben zu sein. Dies wird auch daran deutlich, dass die durch den beauftragten Beratungsdienstleister genommenen Mischproben für den Bearbeitungshorizont einen mittleren pH-Wert von 6,3 auswiesen, während die hier erhobenen Proben nach Horizonten deutlich niedrigere Werte zeigen. Daraus ergibt sich, dass für den CT-Standort eine nach Tiefe gestufte Beprobung notwendig ist, da die Mischproben tendenziell zu einer Überschätzung des pH-Wertes im Bearbeitungshorizont für diesen Standort führen.

Im Vergleich zu Duiker et al. (2006), Mühlbachová et al. (2024) und Swedrzynska et al. (2013) kann weder bestätigt werden, dass der pH-Wert unter CT innerhalb des Bearbeitungshorizontes besonders homogen ist, noch dass es zu einer ausgeprägten Stratifikation des pH-Wertes unter NT kommt. Lediglich der niedrigere pH-Wert bei -7,5 cm und die anschließende Zunahme bei -17,5 cm deckt sich mit den angeführten Studien.

Wenn man anknüpfend an die gemessenen pH-Werte die KAK_{eff} betrachtet, so ist festzuhalten, dass beide Standorte von einer pH-Wert-Anhebung profitieren würden, wenn auch bei CT der Effekt mit einer 34 % Zunahme im Schnitt deutlich ausgeprägter wäre, wobei die KAK_{eff} bei -27,5 cm und -37,5 cm besonders stark profitieren würden. Dies liegt vorrangig daran, dass die Humusgehalte mit 3,48 % und 3,11 % verhältnismäßig hoch sind und der pH-Wert zeitgleich sehr niedrig ist.

In Bezug auf den Humus zeigte sich, dass der CT-Standort in allen Tiefen und in beiden Untersuchungsjahren signifikant höhere Humusgehalte aufwies als NT. Dieser Unterschied ist jedoch nicht primär auf das jeweilige Bewirtschaftungssystem zurückzuführen, sondern ist eher standortbedingt. Aus der Befragung ist bekannt, dass der Humusgehalt im Oberboden vor der Umstellung auf NT bei etwa 1 % lag. Abbildung 15 zeigt, dass insbesondere im Oberboden Humus aufgebaut wurde, während im Unterboden bislang nur geringe Zunahmen messbar waren.

Beim CT-Standort ist hingegen zwischen 2022 und 2025 ein Rückgang von circa 0,5 Masse-% Humus je Horizont zu beobachten. Auffällig ist zudem die starke Abnahme bei -37,5 cm. Diese Differenz dürfte jedoch weniger auf einen tatsächlichen Humusverlust zurückzuführen sein, sondern lässt sich durch die standortspezifische Variabilität der Probenahme erklären. Bei der Nachbeprobung endete der humose Oberboden etwas früher, sodass der entsprechende Stechzylinder weniger des stark humosen Bodens enthielt.

In der Literatur wird häufig auf eine Stratifikation der Humusgehalte bei NT hingewiesen. Die von Duiker et al. (2006), Jacobs et al. (2015), Šimon et al. (2009) und Swedrzynska et al. (2013) gefundenen ausgeprägten Muster konnten in den hier untersuchten Böden nicht bestätigt werden (vgl. Tabelle 2), auch wenn sich eine leichte Stratifikation andeutet. Beim CT-Standort lässt sich zudem keine ausgeprägte Homogenisierungswirkung im Bearbeitungshorizont erkennen, auch hier sind zwischen den Tiefen leichte Unterschiede erkennbar. Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass ein direkter Vergleich der absoluten Humusgehalte zwischen den Bewirtschaftungssystemen nicht sinnvoll ist, da die höheren Werte bei CT überwiegend standortbedingt sind und nicht auf eine humusfördernde Fruchtfolge oder Düngungsmaßnahmen zurückgeführt werden können.

Die statistische Auswertung der Trockenrohdichte zeigte, dass CT in natürlicher Lagerung signifikant niedrigere Trockenrohdichte im Oberboden aufweist als NT, während sich die Trockenrohdichte im Tiefenverlauf zunehmend annähert. Die Unterschiede zwischen den Jahren lassen sich vermutlich auf den unterschiedlichen Probenahmezeitpunkt zurückführen (Herbst 2022 entgegen Frühjahr 2025). Insbesondere bei CT ist anzunehmen, dass Setzungsprozesse seit der letzten Lockerung über die Wintermonate zu einer Erhöhung der Trockenrohdichte beigetragen haben. In beiden Probejahren war Raps als Kultur angebaut. Auffällig ist zudem, dass die Unterschiede zwischen den Jahren bei CT deutlicher ausfielen als bei NT (vgl. Abbildung 11). NT zeigte insgesamt eine homogenere Trockenrohdichte je Tiefenstufe, was sich an den geringeren Fehlerbalken ablesen lässt. Dies könnte auf die unterschiedliche Gefügestruktur zurückzuführen sein, wie in Kapitel 2.2 beschrieben.

Der Befund, dass sich die Trockenrohdichte im Tiefenverlauf zwischen CT und NT annähern, steht im Einklang mit den Ergebnissen von Carter (1990), Jacobs et al. (2015) und Martinez et al. (2016), die ebenfalls zeigen, dass NT im Oberboden eine signifikant höhere Lagerungsdichte aufweist, die Unterschiede jedoch in tieferen Schichten geringer werden. Als untypisch ist die hohe Trockenrohdichte unter NT bei -7,5 cm zu bewerten, welche in den genannten Studien nicht zu finden ist. Eine mögliche Ursache könnte die Beweidung der Zwischenfrüchte durch Schafe unter feuchten Bedingungen im Winter sein. Die erhöhte Trockenrohdichte im CT-Profil bei -27,5 cm hingegen entspricht den Befunden von Martinez et al. (2016), die unterhalb des Bearbeitungshorizonts eine Pflugsohle beschreiben. Darauf weist auch der starke Anstieg des Eindringwiderstands in dieser Tiefe hin (vgl. Abbildung 13).

Der signifikante Unterschied im Gesamtporenvolumen zwischen den Systemen beschränkt sich auf die Tiefenstufen -7,5, -17,5, -37,5 und -47,5 cm, wobei CT höhere Werte aufwies mit Ausnahme von -47,5 cm. Dies entspricht auch der Metastudie von Mondal et al. (2022), die für NT geringere Porenvolumina im Oberboden und eine Annäherung im Unterboden zeigen, in Übereinstimmung mit dem hier beobachteten Trockenrohdichteverlauf. Auffällig ist zudem,

dass NT insgesamt homogenere Gesamtporenvolumina aufweist, was sich an den geringeren Fehlerbalken zeigt und auf eine einheitlichere Gefügestruktur schließen lässt. Anzumerken ist, dass in den Horizonten -37,5 cm und -47,5 cm das Gesamtporenvolumen signifikant unterschiedlich war, obwohl die Trockenrohddichte in diesen Horizonten keine signifikanten Unterschiede aufwies. Dies lässt sich durch die Berücksichtigung der Partikeldichte bei der Berechnung des Gesamtporenvolumens erklären. CT wies in diesen Schichten höhere Humusgehalte auf. Bei -37,5 cm lag der Humusgehalt von CT bei 3,11 Masse-% gegenüber 0,99 Masse-% bei NT. In -47,5 cm Tiefe wies CT 1,30 Masse-% gegenüber 1,02 Masse-% bei NT auf, was die Partikeldichte dort reduziert. Da der Humus eine geringere Dichte aufweist als der mineralische Anteil, ergeben sich trotz ähnlicher Trockenrohddichte signifikant unterschiedliche Gesamtporenvolumina. Dies zeigt, dass die Messung der Partikeldichte durchaus einen Unterschied machen kann, im Vergleich zum in der Literatur angewendeten Standardwert von $2,65 \text{ g/cm}^3$.

Bei den Proctorversuchen zeigte sich, dass alle Effekte statistisch signifikant waren. Bei genauerer Betrachtung im Tiefenverlauf sind jedoch nur die Tiefen -37,5 cm und -47,5 cm signifikant unterschiedlich, wobei NT die jeweils höheren Porenvolumina aufwies. In der Bodenart unterscheiden sich die Systeme insgesamt nicht maßgeblich und auch der aufgefundene Humusgehalt würde auf einen anderen Verlauf deuten. Auffällig ist jedoch, dass CT bei -47,5 cm einen um 4,47 % höheren Feinschluff sowie einen um 2,33 % höheren Tongehalt aufwies als NT. (siehe externer Anhang) Da Feinschluff bezüglich der Partikelgröße nahe am Ton liegt, könnte dies eine Erklärung der deutlichen Unterschiede im Porenvolumen sein. Aufgrund der begrenzten Datengrundlage zu den Bodenarten kann dies jedoch nicht abschließend bewertet werden. Weiterhin lassen die im Oberboden nicht signifikanten Unterschiede vermuten, dass die Unterschiede von Trockenrohddichte und Gesamtporenvolumen in natürlicher Lagerung nicht von der Korngrößenverteilung herrühren, sondern durch die unterschiedlichen Lagerungszustände bedingt sind.

Bei den weiten Grobporen zeigte sich in natürlicher Lagerung, dass NT über den gesamten Profilverlauf ein höheres Porenvolumen aufwies als CT. Betrachtet man die Tiefenverteilung, so waren die Unterschiede insbesondere ab -27,5 cm signifikant, während CT im Oberboden (-7,5 cm) höhere Werte erreichte. Damit bestätigt sich, dass die Unterschiede zwischen den Systemen stark von der Tiefe abhängen.

Martinez et al. (2016) stellten ebenfalls fest, dass NT im Unterboden ein größeres weites Grobporenvolumen aufweist, was sie auf die stärkere Bioporung zurückführen. Schlüter et al. (2020) fanden ebenfalls für den Oberboden ein signifikant niedrigeres weites Grobporenvolumen unter NT, was mit den hier gemachten Beobachtungen übereinstimmt. Unter realen Bedingungen bedeutet dies, dass der Gasaustausch bei NT auch in den tieferen Bodenschichten besser sichergestellt ist, wobei anzumerken ist, dass bei beiden Systemen

der notwendige Wert von 10 Vol. % luftgefüllter Poren (da Silva et al., 1994; Lal, 2005) in keiner Tiefe unterschritten wird. Nach der Proctorverdichtung gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen NT und CT, was auf ein ähnliches Verhalten der Böden bei Verdichtung schließen lässt.

Bei den engen Grobporen zeigten sich sowohl in natürlicher Lagerung als auch nach der Proctorverdichtung über alle getesteten Effekte signifikante Unterschiede zwischen den Systemen. In natürlicher Lagerung wies NT durchgehend geringere enge Grobporenvolumina im Tiefenverlauf auf. Nach der Proctorverdichtung trat jedoch ein gegenläufiges Muster auf. In den Tiefen -37,5 cm und -47,5 cm wurden für NT signifikant höhere Volumina gemessen, die zudem über den Werten der natürlichen Lagerung lagen. Um diesen paradox erscheinenden Befund genauer zu prüfen, wurde eine Analyse innerhalb der Bewirtschaftungssysteme durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass bei NT das enge Grobporenvolumen nach der Proctorverdichtung insgesamt zunahm, während es bei CT wie erwartet abnahm.

Die Ursachen für das geringe enge Grobporenvolumen unter NT in natürlicher Lagerung lassen sich mit den vorliegenden Daten nicht eindeutig klären. Eine mögliche Erklärung ist, dass Bodenorganismen in NT verstärkt Poren erzeugen, die überwiegend in die Klasse der weiten Grobporen fallen. Gleichzeitig könnte die höhere Trockenrohdichte unter NT dazu führen, dass ein Teil der engen Grobporen funktional in die Mittelporen verschoben wird.

Die Auswertung der Mittelporen unterstützt diese Annahme. In natürlicher Lagerung verfügte NT über signifikant höhere Mittelporenvolumina als CT. Auch nach der Proctorverdichtung blieb dieser Trend bestehen, wenngleich die Streuung deutlich größer war. Im Vergleich innerhalb der Systeme zeigt sich zudem, dass NT nach der Proctorverdichtung ein höheres Mittelporenvolumen aufwies als in natürlicher Lagerung, während CT konsequent abnahm. Dies deutet darauf hin, dass ein Teil der weiten Grobporen in NT durch die Verdichtung in den Bereich der Mittelporen verschoben wurde. Die Beobachtung passt zur Gefügestruktur von NT-Böden, die durch eine kompaktere Matrix charakterisiert sind.

Für die Praxis bedeutet dies, dass der CT-Boden unter Verdichtung tendenziell Porenvolumen in allen Größenklassen verliert, ausgenommen die Feinporen. NT weist zwar in der natürlichen Lagerung geringere Anteile enger Grobporen auf, unter mechanischer Verdichtung nach vorherigem Aufbrechen der Struktur und Homogenisierung geschieht im Boden jedoch teilweise eine Umstrukturierung hin zu mehr engen Grobporen und Mittelporen.

Weitere Unterschiede in der Porengrößenverteilung zwischen den Bewirtschaftungssystemen zeigen sich bei der Betrachtung der Saugspannungskurven nach den Bodenarten. So zeigt NT Us im Bereich von pF 0 bis 1,8 einen nahezu linearen Kurvenverlauf, was auf eine gleichmäßige Verteilung der Porengrößen in dieser Porenklasse

hindeutet. Im Vergleich dazu verläuft NT Su4 in diesem Bereich zwar ebenfalls annähernd linear, weist jedoch bis pF 0,6 einen etwas steileren Beginn auf. Dies deutet darauf hin, dass ein Teil der weiten Grobporen deutlich weiter von der Größenuntergrenze der weiten Grobporen entfernt liegt. In Verbindung mit den Beobachtungen zur Luftkapazität im Tiefenverlauf sowie den in Kapitel 3.14 dargestellten Bildern könnte dies auf eine stärkere Bioporung, etwa durch Regenwurmgänge, zurückzuführen sein.

Die CT-Saugspannungskurven zeigen im Bereich von pF 0 bis 1,1 einen sehr steilen Anstieg, der anschließend bis pF 1,8 in einen annähernd linearen Verlauf übergeht. Dies lässt darauf schließen, dass die Porengrößenverteilung innerhalb der weiten Grobporen stärker in die Richtung von 50 μm geht. Deutlichere Unterschiede treten im Bereich der Mittelporen auf. Hier steigt der Saugspannungsverlauf bei NT Us und NT Su4 weitgehend linear an. Dagegen sind die Kurven von CT Su4 und CT Su3 deutlich konkaver ausgeprägt, was bedeutet, dass die Kulturpflanzen die Mittelporen unter CT bis zum Wendepunkt der Kurve innerhalb der Mittelporen vergleichsweise leicht entwässern können, danach jedoch abrupt die Saugspannung für den Wasserentzug ansteigt und die Wasserverfügbarkeit stark abnimmt. Wie bereits in Kapitel 2.8.2 beschrieben, können die meisten Kulturpflanzen Wasser nicht vollständig bis pF 4,2 nutzen. Folglich könnte kulturabhängig daraus eine geringere effektive Wasserverfügbarkeit resultieren, als es die nFK allein vermuten lässt. In Bezug auf den unterschiedlichen gut passenden SSD der Saugspannungskurven schreibt Lipiec et al. (2024), dass die Heterogenität in der Porengrößenverteilung, Porenform und Konnektivität die Charakteristik der Saugspannungskurve beeinflussen kann. Die bereits in dieser Arbeit angeführten Unterschiede im Gefüge zwischen den Bewirtschaftungssystemen könnten somit die Ursache für die unterschiedlich gute Passung der Saugspannungskurven sein. Unterstützt wird diese These außerdem durch die sinkenden SSD nach der Proctorverdichtung, da für die Proctorverdichtung das natürliche Gefüge aufgebrochen und homogenisiert wird.

In Bezug auf die FK und nFK wies entsprechend den Porenvolumina von engen Grobporen, Mittelporen und Feinporen CT in natürlicher Lagerung eine signifikant höhere FK und nFK auf. Verantwortlich hierfür ist vor allem das deutlich größere Volumen an engen Grobporen. Nach der Proctorverdichtung hingegen zeigte NT die höhere nFK, was mit der bereits angesprochenen Zunahme der engen Grobporen und Mittelporen übereinstimmt, während CT in der FK die höheren Werte erreichte. Dies lässt sich durch das größere Feinporenvolumen in CT erklären, das in die FK, nicht aber in die nFK einfließt. Betrachtet man die prozentualen Porenanteile an der nFK fällt auf, dass CT annähernd gleiche Anteile aus Mittelporen und engen Grobporen aufweist, während NT einen deutlich unausgeglichene Anteil von 75 % zu 25 % besitzt. Dies erklärt sich vor allem durch das unterdurchschnittliche enge Grobporenvolumen von NT.

Entgegen der häufig vertretenen Annahme, dass NT grundsätzlich die Wasserspeicherfähigkeit verbessert, zeigt sich hier, dass CT in natürlicher Lagerung höhere Kapazitäten aufweist. Offen bleibt zudem die Frage, wie der enge Grobporenanteil unter NT durch kulturtechnische Maßnahmen gezielt erhöht werden könnte. Betrachtet man das hohe Volumen an weiten Grobporen ab -27,5 cm, so wäre es aus theoretischer Sicht sinnvoll, dieses Volumen in Richtung enge Grobporen zu verschieben, da dort auch die geringsten nFK-Werte vorlagen. Welche Verfahren in der Praxis hierfür geeignet wären ist unklar und könnte Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

Da die Feinporen in erster Linie durch den Tongehalt und weniger durch die Bewirtschaftung beeinflusst werden (vgl. Kap. 2.2.3), wird auf eine weiterführende Diskussion an dieser Stelle verzichtet. Ein Vergleich der Porenvolumina und Kapazitäten mit Literaturwerten unterbleibt aus den in Kapitel 2.8.2 angeführten Gründen.

Im Jahr 2022 zeigte sich, dass unter NT der wurzelwachstumshemmende Eindringwiderstand von 200 N bereits in -10 cm Tiefe erreicht wurde, im weiteren Verlauf jedoch wieder abnahm. Unter CT wurde dieser Schwellenwert erst in -20 cm Tiefe überschritten und der Widerstand nahm mit der Tiefe weiter zu. Beide Systeme wiesen in -35 cm Tiefe Ausschläge auf, die auf eine Pflugsohle beziehungsweise eine noch nicht vollständig aufgelöste Pflugsohle hindeuten. Auffällig ist zudem, dass trotz annähernd gleicher Wassergehalte unterhalb -37,5 cm die Widerstandswerte bei NT deutlich geringer anstiegen als bei CT. Dies könnte im Zusammenhang mit dem größeren Volumen der weiten Grobporen im Unterboden unter NT stehen, wodurch der Konus mehr Raum für die Erdverdrängung hatte und somit der Widerstand geringer war. Im Jahr 2025 zeigte NT einen deutlichen Ausschlag in -25 cm Tiefe, der ebenfalls als Pflugsohle interpretiert werden kann, während CT die höchsten Werte zwischen -30 cm und -35 cm aufwies. Der Unterschied in der Lage der Widerstandsmaxima könnte allerdings auch auf Unterschiede in der Tiefenmessung des Penetrometers zurückzuführen sein. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass der Wassergehalt die wahrscheinlich wichtigste Einflussgröße auf den Eindringwiderstand darstellt, aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren jedoch keine eindeutige Interpretation gemacht werden kann. Die Pflugsohlen wurden in beiden Systemen sichtbar, ohne dass eines der Verfahren einen eindeutigen Vorteil aufwies. Ob deren mechanische Auflösung langfristig Erfolg verspricht, ist fraglich. Auf dem CT-Acker wurde 2022 ein Tiefenlockerer in -45 bis -55 cm Tiefe eingesetzt, dennoch waren bei beiden Messterminen weiterhin deutliche Anzeichen einer Pflugsohle vorhanden, die den kritischen Wert von 200 N überschritten. Blanco-Canqui et al. (2018) weist ebenfalls auf die große Variabilität und Uneinheitlichkeit von Ergebnissen beim Vergleich von NT und CT hin.

6 Zusammenfassung

Ziel der Masterarbeit war es, die Auswirkungen der Bodenbewirtschaftungssysteme NT und CT auf die Wasserhaltefähigkeit, Gefüge und chemischen Parametern an zwei Standorten nahe Stralsund, Mecklenburg-Vorpommern im Jahr 2022 und 2025 zu untersuchen, zu bewerten und in Befunde internationaler Studien einzuordnen.

Hierfür wurden zwei Probeentnahmepunkte per Fernerkundung ausgewählt. Die Hauptbeprobung fand im November 2022 mit anschließender Auswertung der Proben im Labor statt. Aufgrund der Dauer zwischen der Probeentnahme und der Erstellung dieser Arbeit wurde im März 2025 eine erneute Beprobung in kleinerem Umfang durchgeführt.

Dabei zeigte sich, dass NT im Vergleich zu CT höhere Trockenrohdichten im Oberboden aufwies, die Differenz im Tiefenverlauf jedoch abnahm. Außerdem nahm die Trockenrohdichte im zeitlichen Verlauf bei CT stärker zu, wodurch sich die Trockenrohdichten von CT und NT annäherten. Weiterhin zeigte NT eine niedrigere Variabilität der gemessenen Trockenrohdichten, was auf ein homogeneres Gefüge schließen lässt. Die Messung des Eindringwiderstandes zeigte im Oberboden bei NT leicht höhere Werte als bei CT, während der Widerstand im Unterboden bei CT stark erhöht war. Beide Standorte zeigten Anzeichen einer Pflugsohle. Durch den Vergleich der Bodenwassergehalte kann angenommen werden, dass dieser die Haupteinflussgröße auf den Eindringwiderstand ist, weshalb die Vergleichbarkeit der Messwerte eingeschränkt ist. Die Untersuchung der Humusgehalte zeigte in beiden Jahren über das gesamte Profil signifikant höhere Humusgehalte bei CT. Die Bewirtschaftung stellt keine Erklärung für die gemessenen Werte dar. Dies führt dazu, dass beide Systeme nicht seriös verglichen werden können. Die in der Literatur häufig beschriebene ausgeprägte Stratifikation des Humus konnte für NT nicht bestätigt werden. Auffällig ist hingegen die nicht vorhandene Homogenisierung des Humusgehaltes im Bearbeitungshorizont bei CT. Beide Standorte wiesen bei der Messung des pH(CaCl₂)-Wertes schwach bis stark saure pH-Werte auf. Bei NT lagen die Werte im Tiefenverlauf zwischen 5,9 bis 6,5, CT wies Werte von 6,3 nahe der Oberfläche bis zu 4,8 in der Tiefe auf. Der Vergleich der Jahre zeigt bei beiden Systemen eine Abnahme des pH-Wertes von circa 0,25 Einheiten, wobei der Verlauf in der Tiefe gleichgeblieben ist. Die niedrigen pH-Werte im Unterboden von CT lassen vermuten, dass Al³⁺-Ionen in Lösung gehen und die Durchwurzelung hemmen. Insgesamt weist NT einen deutlich höheren und im Tiefenverlauf homogeneren pH-Wert auf.

Die Betrachtung des Gesamtporenvolumens zeigte, dass die niedrigere Trockenrohdichte im Oberboden von CT zu einem höheren Gesamtporenvolumen führt, während das Gesamtporenvolumen von NT wieder durch eine geringere Variabilität gekennzeichnet ist. Bei der Porengrößenverteilung fiel auf, dass NT deutlich höhere weite Grobporenvolumina als

CT im Unterboden aufwies, was für eine gute Durchlüftung und ausgeprägte Biopörung in diesem Bereich spricht. CT wies hingegen insgesamt höhere enge Grobporenvolumina auf, was eine höhere nFK und FK zur Folge hat, trotz der höheren Mittelporenvolumina von NT. Die Messung der Porenvolumina nach dem Proctorverdichtungstest zeigten keinen Vorteil bei mechanischer Belastung eines Bewirtschaftungssystems gegenüber dem anderen, lediglich eine Verschiebung der Porenvolumina hin zu den Mittelporen. Die Saugspannungskurven zeigten für beide Systeme unterschiedliche Kurvenformen trotz gleicher Bodenart, woraus sich schließen lässt, dass Pflanzen die Böden unterschiedlich gut entwässern können und die Porencharakteristika innerhalb der einzelnen Porengrößen voneinander abweichen. Abschließend lässt sich festhalten, dass die verbreitete Annahme einer höheren Wasserhaltefähigkeit von NT in dieser Arbeit nicht bestätigt werden kann und bestimmte, den Bewirtschaftungssystemen zugeschriebene Eigenschaften nicht zwangsläufig vorhanden sind, sondern stark von Standort und Entnahmetiefe abhängen können. Vor allem die Untersuchung des pH-Wertes und des Humusgehaltes zeigen, dass es durch das Ausbleiben der homogenisierenden Wirkung der Bodenbearbeitung nicht zwangsläufig zu schlechteren Humus- und pH-Wert Verteilungen im Horizont kommen muss. Diese Arbeit stellt Anknüpfungspunkte für zukünftige Untersuchungen dar, um belastbarere Aussagen über langfristige systembedingte Effekte von NT unter den Gegebenheiten Mecklenburg-Vorpommerns zu erlangen.

7 Quellenverzeichnis

- Aghabeygi, M., Strauss, V., Paul, C., & Helming, K. (2024). Barriers of adopting sustainable soil management practices for organic and conventional farming systems. *Discover Soil*, 1(1), 11. <https://doi.org/10.1007/s44378-024-00008-1>
- Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., & Wilke, B.-M. (2018). Physikalische Eigenschaften und Prozesse. In W. Amelung, H.-P. Blume, H. Fleige, R. Horn, E. Kandeler, I. Kögel-Knabner, R. Kretzschmar, K. Stahr, & B.-M. Wilke (Eds.), *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde* (pp. 213-340). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3_6
- Anlauf, R. (2014). *Water Retention Curve 10*. In (Version 1.0) University of Applied Sciences. https://www.hs-osnabrueck.de/fileadmin/HSOS/Homepages/Personalhomepages/Personalhomepages-AuL/Anlauf/Water_Retention_Curve_10.xls
- Benjamin, J. G., Nielsen, D. C., & Vigil, M. F. (2003). Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma*, 116(1), 137-148. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00098-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00098-3)
- Bergtold, J., Sailus, M., & Jackson, T. (2020). *Conservation Tillage Systems in the Southeast: Production, Profitability and Stewardship*.
- Beyer, L. (2014). Humusformen und -typen. In *Handbuch der Bodenkunde* (pp. 1-22). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9783527678495.hbbk1996002>
- Blanco-Canqui, H., Hassim, R., Shapiro, C., Jasa, P., & Klopp, H. (2022). How does no-till affect soil-profile compactibility in the long term? *Geoderma*, 425, 116016. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116016>
- Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2018). No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, 326, 164-200. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
- Blanco-Canqui, H., Stone, L. R., Schlegel, A. J., Benjamin, J. G., Vigil, M. F., & Stahlman, P. W. (2010). Continuous Cropping Systems Reduce Near-Surface Maximum Compaction in No-Till Soils. *Agronomy Journal*, 102(4), 1217-1225. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronj2010.0113>
- Blanco-Canqui, H., Wienhold, B. J., Jin, V. L., Schmer, M. R., & Kibet, L. C. (2017). Long-term tillage impact on soil hydraulic properties. *Soil and Tillage Research*, 170, 38-42. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2017.03.001>
- Böse, M., Ehlers, J., & Lehmkuhl, F. (2018). Die Jungmoränenlandschaft. In M. Böse, J. Ehlers, & F. Lehmkuhl (Eds.), *Deutschlands Norden: vom Erdaltertum zur Gegenwart* (pp. 91-110). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55373-2_6
- Carter, M. R. (1990). Relationship of strength properties to bulk density and macroporosity in cultivated loamy sand to loam soils. *Soil and Tillage Research*, 15(3), 257-268. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0167-1987\(90\)90082-O](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0167-1987(90)90082-O)
- Castellini, M., Fornaro, F., Garofalo, P., Giglio, L., Rinaldi, M., Ventrella, D., Vitti, C., & Vonella, A. V. (2019). Effects of No-Tillage and Conventional Tillage on Physical and Hydraulic Properties of Fine Textured Soils under Winter Wheat. *Water*, 11(3), 484. <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/3/484>
- Chaplain, V., Défossez, P., Richard, G., Tessier, D., & Roger-Estrade, J. (2011). Contrasted effects of no-till on bulk density of soil and mechanical resistance. *Soil and Tillage Research*, 111(2), 105-114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2010.08.015>

- Chen, G., Weil, R. R., & Hill, R. L. (2014). Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil and Tillage Research*, 136, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.004>
- Clark, L. J., Whalley, W. R., & Barraclough, P. B. (2003). How do roots penetrate strong soil? *Plant and Soil*, 255(1), 93-104. <https://doi.org/10.1023/A:1026140122848>
- da Silva, A. P., Kay, B. D., & Perfect, E. (1994). Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(6), 1775-1781. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x>
- Daddow, R. L., Warrington, G., & United, S. (1983). *Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture*. Watershed Systems Development Group, USDA Forest Service. <https://catalog.hathitrust.org/Record/007402663>
<https://hdl.handle.net/2027/umn.31951002902898>
- Derpsch, R. (1998). Historical review of no-tillage cultivation of crops. Conservation Tillage for Sustainable Agriculture. Proceedings from an International Workshop, Harare,
- Deutscher Wetterdienst. (2025). *Downloadarchiv der Monats- und Tageswerte ausgewählter Messstationen in Deutschland*. Retrieved 02.07 from <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klarchivtagmonat.html;jsessionid=37F122A3AA5102AEFE723AA4B5B274D9.live21064?nn=16102>
- Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch, 32 (2012).
- Duiker, S. W., & Beegle, D. B. (2006). Soil fertility distributions in long-term no-till, chisel/disk and moldboard plow/disk systems. *Soil and Tillage Research*, 88(1), 30-41. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.04.004>
- Ehlers, W., Köpke, U., Hesse, F., & Böhm, W. (1983). Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil and Tillage Research*, 3(3), 261-275. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(83\)90027-2](https://doi.org/10.1016/0167-1987(83)90027-2)
- Glanz, F. (1922). *Die Wühlarbeit im Ackerboden*. C. Gerold's Sohn. <https://catalog.hathitrust.org/Record/006826019>
<https://hdl.handle.net/2027/wu.89047143540>
- Hillel, D. (1980). 7 - Soil Water: Content and Potential. In D. Hillel (Ed.), *Fundamentals of Soil Physics* (pp. 123-165). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-091870-9.50012-1>
- Iglesias, J., Galantini, J., Kruger, H., & Venansi, S. (2014). Soil pore distribution as affected by cattle trampling under no-till and reduced-till systems. *AgriScientia*, 31, 93-102.
- Jabro, J., & Stevens, W. (2022). Pore Size Distribution Derived from Soil–Water Retention Characteristic Curve as Affected by Tillage Intensity. *Water*, 14, 3517. <https://doi.org/10.3390/w14213517>
- Jacobs, A., Jungert, & Koch, H. J. (2015). Soil organic carbon as affected by direct drilling and mulching in sugar beet – wheat rotations. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.981669>
- Janetzko, P., & Schmidt, R. (2014). Norddeutsche Jungmoränenlandschaften. In *Handbuch der Bodenkunde* (pp. 1-38). <https://doi.org/10.1002/9783527678495.hbbk1995008>
- Jones, C. A. (1983). Effect of Soil Texture on Critical Bulk Densities for Root Growth. *Soil Science Society of America Journal*, 47(6), 1208-1211. <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700060029x>
- Kirkham, M. B. (2005a). 8 - Field Capacity, Wilting Point, Available Water, and the Non-Limiting Water Range. In M. B. Kirkham (Ed.), *Principles of Soil and Plant Water*

- Relations* (pp. 101-115). Academic Press.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-012409751-3/50008-6>
- Kirkham, M. B. (2005b). 9 - Penetrometer Measurements. In M. B. Kirkham (Ed.), *Principles of Soil and Plant Water Relations* (pp. 117-128). Academic Press.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-012409751-3/50009-8>
- Klonowski, J., Lisowski, A., Dąbrowska, M., Chlebowski, J., Sypuła, M., & Zychowicz, W. (2024). The Usefulness of Soil Penetration Resistance Measurements for Improving the Efficiency of Cultivation Technologies. *Sustainability*, 16(16), 6962. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/16/6962>
- Kühn, P. (2003). *Spätglaziale und holozäne Lessivégenese auf jungweichselzeitlichen Sedimenten Deutschlands* (Vol. 28).
- Kuipers, H. (1970). Historical notes on the zero-tillage concept. *NJAS*, 18(4), 219-224.
<https://doi.org/10.18174/njas.v18i4.17328>
- Lal, R. (2005). *Encyclopedia of soil science - two-volume set* (2 ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/noe0849338304>
- Lal, R., Reicosky, D. C., & Hanson, J. D. (2007). Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research*, 93(1), 1-12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2006.11.004>
- Landesamt für Umwelt Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern. (2017). *Geologische Karte 1:50000*. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern. https://www.umweltkarten.mv-regierung.de/script/mv_a7_geol_karten_wfs.php?&REQUEST=GetCapabilities&SERVICE=WFS
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60-68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Li, Y., Li, Z., Cui, S., & Zhang, Q. (2020). Trade-off between soil pH, bulk density and other soil physical properties under global no-tillage agriculture. *Geoderma*, 361, 114099. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114099>
- Limousin, G., & Tessier, D. (2007). Effects of no-tillage on chemical gradients and topsoil acidification. *Soil and Tillage Research*, 92(1), 167-174.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2006.02.003>
- Lipiec, J., Usowicz, B., & Siczek, A. (2024). Fitting the van Genuchten model to the measured hydraulic parameters in soils of different genesis and texture at the regional scale. *International Agrophysics*, 38, 373-382.
<https://doi.org/10.31545/intagr/191380>
- Logsdon, S. D., & Karlen, D. L. (2004). Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 78(2), 143-149.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2004.02.003>
- Mady, A. (2022). Impact of a long-term conventional tillage and no-tillage on soil hydro-physical properties and its pore size distribution. *Soil and Environment*, 41, 46-54. <https://doi.org/10.25252/SE/2022/232769>
- Martínez, I., Chervet, A., Weisskopf, P., Sturny, W. G., Etana, A., Stettler, M., Forkman, J., & Keller, T. (2016). Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part I. Crop yield, soil organic carbon and nutrient distribution in the soil profile. *Soil and Tillage Research*, 163, 141-151.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.021>
- Martinez, I., Chervet, A., Weisskopf, P., Sturny, W. G., Rek, J., & Keller, T. (2016). Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part II. Soil porosity and gas transport parameters. *Soil and Tillage Research*, 163, 130-140. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2016.05.020>

- Moeys, J. (2024). *The soil texture wizard: R functions for plotting, classifying, transforming and exploring soil texture data*. In <https://github.com/julienmoeys/soiltexture>
- Mondal, S., & Chakraborty, D. (2022). Global meta-analysis suggests that no-tillage favourably changes soil structure and porosity. *Geoderma*, 405, 115443. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115443>
- Mühlbachová, G., Růžek, P., Kusá, H., Vavera, R., & Káš, M. (2024). Nutrient Distribution in the Soil Profile Under Different Tillage Practices During a Long-Term Field Trial. *Agronomy*, 14(12), 3017. <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/12/3017>
- Neugschwandtner, R., Liebhard, P., Kaul, H.-P., & Wagentristl, H. (2014). Soil chemical properties as affected by tillage and crop rotation in a long-term field experiment. *Plant Soil and Environment*, 60, 57-62. <https://doi.org/10.17221/879/2013-PSE>
- Oorts, K., Bossuyt, H., Labreuche, J., Merckx, R., & Nicolardot, B. (2006). Carbon and nitrogen stocks in relation to organic matter fractions, aggregation and pore size distribution in no-tillage and conventional tillage in northern France. *European Journal of Soil Science*, 58, 248-259. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00832.x>
- Pires, L. F., Borges, J. A. R., Rosa, J. A., Cooper, M., Heck, R. J., Passoni, S., & Roque, W. L. (2017). Soil structure changes induced by tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 165, 66-79. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.010>
- Posit, t. (2025). *RStudio: Integrated Development Environment for R*. In (Version 4.5.1) <http://www.posit.co/>
- Ruehlmann, J., & Körschens, M. (2009). Calculating the Effect of Soil Organic Matter Concentration on Soil Bulk Density. *Soil Science Society of America Journal*, 73(3), 876-885. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0149>
- Schlüter, S., Albrecht, L., Schwärzel, K., & Kreiselmeyer, J. (2020). Long-term effects of conventional tillage and no-tillage on saturated and near-saturated hydraulic conductivity – Can their prediction be improved by pore metrics obtained with X-ray CT? *Geoderma*, 361, 114082. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114082>
- Schrey, H.-P. (1987). Eine qualitativ-quantitative Darstellung der tiefenabhängigen Verteilung der Eindringwiderstände. *Mitteilungen Deutsche bodenkundliche Gesellschaft*, 55(55), 456. https://www2.dbges.de/assets/Mitteilungen-der-DBG/Mitteilungen-der-DBG-1987_55-H1.pdf
- Šimon, T., Javůrek, M., Mikanová, O., & Vach, M. (2009). The influence of tillage systems on soil organic matter and soil hydrophobicity. *Soil and Tillage Research*, 105(1), 44-48. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2009.05.004>
- Sponagel, H., Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden, H., K.-J., Eckelmann, W., Grottenthaler, W., & Hartwich, R. (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung 5* (A.-H.-A. B. W. E. u.a. Hartmann, H. S. Red, W. Grottenthaler, & J. K, Eds.). Schweizerbart Science Publishers. http://www.schweizerbart.de/publications/detail/artno/184050681/Bodenkundliche_Kartieranleitung_5_Aufl
- Stirzaker, R. J., Passioura, J. B., & Wilms, Y. (1996). Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. *Plant and Soil*, 185(1), 151-162. <https://doi.org/10.1007/BF02257571>

- Swedrzyńska, D., Małecka, I., Bleharczyk, A., Swędrzyński, A., & Starzyk, J. (2013). Effects of Various Long-Term Tillage Systems on Some Chemical and Biological Properties of Soil. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22, 1835-1844.
- Tan, J., Si, B., Zhao, Y., Lu, Y., Chen, Y., An, N., Li, S., Wang, W., Fu, H., Han, W., & Yi, Y. (2025). Short-term no-tillage improves soil water retention and maintains soil aeration at high moisture conditions despite reduced macroporosity. *Soil and Tillage Research*, 253, 106677. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106677>
- Taylor, H. M., Roberson, G. M., & Parker, J. J. J. (1966). SOIL STRENGTH-ROOT PENETRATION RELATIONS FOR MEDIUM- TO COARSE-TEXTURED SOIL MATERIALS. *Soil Science*, 102(1), 18-22. https://journals.lww.com/soilsci/fulltext/1966/07000/soil_strength_root_penetration_relations_for.2.aspx
- Tebrügge, F. (2003). Konservierende Bodenbearbeitung gestern, heute, morgen–von wendender über nichtwendende Bodenbearbeitung zur Direktsaat. *Landbauforschung Völkenrode FAL Agricultural Research. Nachhaltige Bodennutzung–aus technischer, pflanzenbaulicher, ökologischer und ökonomischer Sicht. Sonderheft*, 256, 49-59.
- Tebrügge, F., & Düring, R.-A. (1999). Reducing tillage intensity - a review of results from a long-term study in Germany. *Soil and Tillage Research*, 53, 15-28. [https://doi.org/10.1016/s0167-1987\(99\)00073-2](https://doi.org/10.1016/s0167-1987(99)00073-2)
- Thaer, A. D. (1810). *Grundsätze der rationellen Landwirtschaft* (Vol. 3). Realschulbuchhandlung. https://www.deutschestextarchiv.de/book/show/thaer_landwirtschaft03_1810
- van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Vomocil, J. A. (1957). Measurement of Soil Bulk Density and Penetrability: A Review of Methods**This paper is based on work done by the author at Rutgers University, the State University of New Jersey. In A. G. Norman (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 9, pp. 159-175). Academic Press. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60112-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60112-1)
- Wardak, D. L. R., Padia, F. N., de Heer, M. I., Sturrock, C. J., & Mooney, S. J. (2022). Zero tillage has important consequences for soil pore architecture and hydraulic transport: A review. *Geoderma*, 422, 115927. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115927>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2016). *The nature and properties of soils* (15 ed.). Pearson.

8 Anhang

Tabelle 24: vorangestellte Zusatzsymbole für geogene Merkmale (Sponagel et al., 2005) - Anhang

Symbol	Definition
i	Kieselig; silikatisch (<2 Masse- % Carbonat); kombinierbar mit IC, mC, xC
l	Lockersubstrat, grabbar; kombinierbar mit C

Tabelle 25: nachgestellte Zusatzsymbole für pedogene Merkmale (Sponagel et al., 2005) - Anhang

Symbol	Definition
b	Gebändert; kombinierbar mit B und C
d	Dicht (wasserstauend); kombinierbar mit S
e	Eluvial, ausgewaschen; sauergebleicht: kombinierbar mit A; nassgebleicht: kombinierbar mit S
l	Lessiviert; tonverarmt; kombinierbar mit A
p	Gepflügt oder anderweitig regelmäßig bearbeitet, kombinierbar mit H und A
t	Tonangereichert; kombinierbar mit B und C
v	Verwittert, verbraunt, verlehmt; kombinierbar mit B,C und T
w	Stauwasserleitend; kombinierbar mit S

Tabelle 26: Ergebnisse der ANOVA für die Unterschiede in der Korngrößenverteilung zwischen den beiden Standorten bezogen auf die gesamte Tiefe (* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$) - Anhang

Korngröße	Freiheitsgrade		F-Wert	p-Wert	Signifikanz
Sand	F(1,8)	=	1,498666	0,255703	n.s.
Schluff	F(1,8)	=	3,066502	0,118027	n.s.
Ton	F(1,8)	=	4,45583	0,06778	n.s.

Tabelle 27: Ergebnisse der contrasts zum Gesamtporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang

Tiefe [cm]	Δ NT – CT (nat. Lag.)	p-Wert	Signifikanz	Δ NT – CT (Proctor)	p-Wert	Signifikanz
-7,5	-10,050	$p < 0,001$	***	-0,916	0,056	n.s.
-17,5	-6,510	$p < 0,001$	***	-1,645	0,00103	**
-27,5	-2,625	0,067	n.s.	-1,623	0,0012	**
-37,5	-3,231	0,026	*	-0,778	0,1017	n.s.
-47,5	4,797	$p < 0,001$	***	4,833	$p < 0,001$	***

Tabelle 28: Ergebnisse der ANOVA zu den Unterschieden des enge Grobporenvolumens zwischen natürlicher Lagerung und Proctorverdichtung innerhalb von NT und CT (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang

NT natürliche Lagerung – Proctor					
	Freiheitsgrade		F-Wert	p-Wert	Signifikanz
Lagerungszustand	F(1,40)	=	125,87	$p < 0,001$	***
Tiefe	F(4,40)	=	52,44	$p < 0,001$	***
System x Tiefe	F(4,40)	=	14,91	$p < 0,001$	***
CT nat. Lag. – Proctor					
Lagerungszustand	F(1,40)	=	258,08	$p < 0,001$	***
Tiefe	F(4,40)	=	34,38	$p < 0,001$	***
System x Tiefe	F(4,40)	=	1,27	0,299596	n.s.

Tabelle 29: Ergebnisse der ANOVA zu den Unterschieden des Mittelporenvolumens zwischen natürlicher Lagerung und Proctorverdichtung innerhalb von NT und CT (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang

NT natürliche Lagerung – Proctor					
	Freiheitsgrade		F-Wert	p-Wert	Signifikanz
System	F(1,40)	=	98,73	$p < 0,001$	***
Tiefe	F(4,40)	=	48,99	$p < 0,001$	***
System x Tiefe	F(4,40)	=	9,20	$p < 0,001$	***
CT natürliche Lagerung – Proctor					
System	F(1,40)	=	16,78	$p < 0,001$	***
Tiefe	F(4,40)	=	7,84	$p < 0,001$	***
System x Tiefe	F(4,40)	=	0,25	0,905761	n.s.

Tabelle 30: Ergebnisse der ANOVA zum Feinporenvolumen in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang

natürliche Lagerung					
	Freiheitsgrade		F-Wert	p-Wert	Signifikanz
System	F(1,40)	=	39,74	$p < 0,001$	***
Tiefe	F(4,40)	=	3,26	0,0327	*
System x Tiefe	F(4,40)	=	17,51	$p < 0,001$	***
Proctor					
System	F(1,40)	=	502,27	$p < 0,001$	***
Tiefe	F(4,40)	=	8,45	$p < 0,001$	***
System x Tiefe	F(4,40)	=	78,65	$p < 0,001$	***

Tabelle 31: Ergebnisse der contrasts zum Feinporenvolumen zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung im Tiefenverlauf (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang

Tiefe [cm]	$\Delta NT - CT$ (nat. Lag.)	p-Wert	Signifikanz	$\Delta NT - CT$ (Proctor)	p-Wert	Signifikanz
-7,5	-1,216	0,214	n.s.	-1,154	0,0017	**
-17,5	0,419	0,663	n.s.	-1,275	$p < 0,001$	***
-27,5	-0,385	0,689	n.s.	-2,055	$p < 0,001$	***
-37,5	-2,720	0,009	**	-3,496	$p < 0,001$	***
-47,5	-9,445	$p < 0,001$	***	-7,937	$p < 0,001$	***

Tabelle 32: Ergebnisse der ANOVA zu den Unterschieden der Feldkapazität zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang

natürliche Lagerung						
	Freiheitsgrade	=	F-Wert	p-Wert	Signifikanz	
System	F(1,40)	=	95,34	$p < 0,001$	***	
Tiefe	F(4,40)	=	16,27	$p < 0,001$	***	
System x Tiefe	F(4,40)	=	1,03	0,402743	n.s.	
Proctor						
System	F(1,40)	=	3,44	0,071089	n.s.	
Tiefe	F(4,40)	=	76,75	$p < 0,001$	***	
System x Tiefe	F(4,40)	=	32,78	$p < 0,001$	***	

Tabelle 33: Ergebnisse der contrasts zur Feldkapazität zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung im Tiefenverlauf (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang

Tiefe [cm]	$\Delta NT - CT$ (nat. Lag.)	p-Wert	Signifikanz	$\Delta NT - CT$ (Proctor)	p-Wert	Signifikanz
-7,5	-5,646	$p < 0,001$	***	-0,562	0,180813	n.s.
-17,5	-5,433	$p < 0,001$	***	-2,004	$p < 0,001$	***
-27,5	-8,140	$p < 0,001$	***	-1,312	$p < 0,001$	***
-37,5	-8,419	$p < 0,001$	***	-1,614	$p < 0,001$	***
-47,5	-5,380	$p < 0,001$	***	3,780	$p < 0,001$	***

Tabelle 34: Ergebnisse der ANOVA zu den Unterschieden der nutzbaren Feldkapazität zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach Proctorverdichtung (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang

natürliche Lagerung						
	Freiheitsgrade	=	F-Wert	p-Wert	Signifikanz	
System	F(1,40)	=	29,34	$p < 0,001$	***	
Tiefe	F(4,40)	=	13,52	$p < 0,001$	***	
System x Tiefe	F(4,40)	=	8,79	$p < 0,001$	***	
Proctor						
System	F(1,40)	=	223,07	$p < 0,001$	***	
Tiefe	F(4,40)	=	74,40	$p < 0,001$	***	
System x Tiefe	F(4,40)	=	155,01	$p < 0,001$	***	

Tabelle 35: Ergebnisse der contrasts zur nutzbaren Feldkapazität zwischen NT und CT in natürlicher Lagerung und nach der Proctorverdichtung im Tiefenverlauf (Signifikanzcodes: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$) - Anhang

Tiefe [cm]	Δ NT – CT (nat. Lag.)	p-Wert	Signifikanz	Δ NT – CT (Proctor)	p-Wert	Signifikanz
-7,5	-4,201	0,008	**	0,458	0,274442	n.s.
-17,5	-4,217	0,008	**	-0,800	0,059804	n.s.
-27,5	-8,207	$p < 0,001$	***	0,780	0,066068	n.s.
-37,5	-5,498	$p < 0,001$	***	1,521	$p < 0,001$	***
-47,5	3,808	0,016	*	11,832	$p < 0,001$	***

		Trockenrohdichte natürliche Lagerung				Trockenrohdichte proctor			Humus			pH-Wert	Bodenwassergehalt		
Einheit		[g/cm ³]				[g/cm ³]			Masse-%				[Vol. %]		
Tiefenstufe	System	Jahr	Median	1. Quartil	3. Quartil	Median	1. Quartil	3. Quartil	Median	1. Quartil	3. Quartil	Wert	Median	1. Quartil	3. Quartil
-7.5	NT	2022	1,63	1,62	1,64	1,80	1,79	1,81	2,46	2,45	2,51	6,3	19,82	19,37	20,05
-17.5	NT	2022	1,55	1,53	1,57	1,82	1,81	1,82	2,14	2,14	2,19	6,48	16,56	16,55	17,27
-27.5	NT	2022	1,56	1,56	1,57	1,85	1,85	1,86	2,18	2,16	2,19	6,37	16,33	16,27	16,39
-37.5	NT	2022	1,60	1,55	1,62	1,89	1,88	1,90	1,00	0,97	1,02	6,42	15,30	14,93	15,46
-47.5	NT	2022	1,52	1,49	1,54	1,85	1,84	1,86	1,02	1,01	1,03	6,41	13,19	12,94	13,68
-7.5	CT	2022	1,37	1,27	1,37	1,76	1,74	1,76	3,95	3,93	3,98	6,31	16,48	14,94	16,82
-17.5	CT	2022	1,38	1,33	1,40	1,77	1,77	1,77	3,69	3,63	3,72	5,76	13,19	13,07	13,35
-27.5	CT	2022	1,49	1,41	1,49	1,80	1,78	1,81	3,42	3,40	3,53	5,36	12,03	11,89	12,33
-37.5	CT	2022	1,44	1,44	1,54	1,83	1,81	1,84	3,14	3,09	3,15	5,39	13,04	12,97	13,35
-47.5	CT	2022	1,67	1,60	1,69	1,97	1,96	1,97	1,22	1,21	1,35	4,78	13,78	12,81	14,24
-7.5	NT	2025	1,63	1,62	1,64				2,16	2,10	2,23	5,9	21,57	21,07	22,07
-17.5	NT	2025	1,55	1,49	1,62				2,09	2,04	2,14	6,47	20,04	18,70	21,37
-27.5	NT	2025	1,56	1,45	1,66				1,72	1,50	1,94	6,145	18,97	18,47	19,47
-37.5	NT	2025	1,74	1,68	1,80				1,04	0,93	1,15	6,245	23,44	22,88	24,00
-47.5	NT	2025	1,75	1,67	1,84				1,09	1,07	1,11	6,38	24,81	21,86	27,76
-7.5	CT	2025	1,57						3,14			6,04	27,13		
-17.5	CT	2025	1,57						2,89			5,64	25,34		
-27.5	CT	2025	1,61						2,61			5,23	24,54		
-37.5	CT	2025	1,64						1,94			5,23	23,46		
-47.5	CT	2025	1,69						1,21			5,51	21,55		

Einheit	System	Gesamtporen- volumen [Vol. %]			weite Groporen			enge Groporen			Mittelporen			Feinporen			FK			nFK		
		Medi an	1. Quartil	3. Quartil	Medi an	1. Quartil	3. Quartil	Medi an	1. Quartil	3. Quartil	Medi an	1. Quartil	3. Quartil	Medi an	1. Quartil	3. Quartil	Medi an	1. Quartil	3. Quartil	Medi an	1. Quartil	3. Quartil
-7.5	NT	37,51	37,34	37,81	10,59	10,19	13,08	4,22	3,70	4,45	14,07	13,16	14,49	8,44	8,44	8,44	26,97	25,92	27,15	18,53	17,48	18,71
-17.5	NT	40,79	40,16	41,42	17,13	16,36	17,64	3,17	3,13	3,65	12,76	12,54	13,02	7,44	7,44	7,44	23,78	23,03	23,86	16,33	15,59	16,41
-27.5	NT	40,37	39,92	40,47	19,44	19,05	19,45	3,36	2,49	3,51	9,04	8,63	9,53	8,43	8,43	8,43	20,83	20,48	21,23	12,40	12,05	12,80
-37.5	NT	39,07	38,55	41,29	20,21	18,24	22,07	3,64	3,19	4,25	10,03	8,81	10,22	5,81	5,81	5,81	19,21	18,86	20,31	13,40	13,05	14,50
-47.5	NT	42,63	41,99	43,64	24,33	24,15	24,76	4,70	4,47	5,91	9,04	8,65	9,24	3,88	3,88	3,88	18,29	17,39	18,89	14,42	13,51	15,01
-7.5	CT	46,88	46,66	50,77	13,77	13,51	19,36	12,21	11,31	12,65	10,35	10,20	10,49	9,88	9,88	9,88	32,80	32,29	32,89	22,91	22,41	23,00
-17.5	CT	46,76	46,24	48,73	18,20	16,08	20,49	11,32	10,79	11,41	8,60	8,18	8,89	8,66	8,66	8,66	28,25	28,14	28,48	19,59	19,49	19,82
-27.5	CT	42,54	42,52	45,43	15,42	15,07	15,61	10,21	9,65	10,48	8,25	7,55	8,90	8,37	8,37	8,37	27,48	27,10	27,82	19,11	18,73	19,45
-37.5	CT	44,34	40,55	44,39	14,49	13,44	16,99	9,72	9,50	10,65	8,72	8,59	9,49	8,73	8,73	8,73	27,35	27,17	27,72	18,62	18,44	18,99
-47.5	CT	36,84	35,85	39,53	14,55	12,03	14,93	5,24	4,44	6,05	4,40	4,29	5,07	13,07	13,07	13,07	24,19	22,59	24,73	11,12	9,52	11,66
-7.5	NT proctor	31,19	30,85	31,38	3,12	2,46	3,17	5,01	4,98	5,39	14,71	14,53	14,91	8,25	8,20	8,35	28,21	28,07	28,24	19,86	19,72	19,89
-17.5	NT proctor	30,60	30,52	30,76	4,29	3,78	5,13	4,24	3,57	4,38	14,34	14,26	14,45	7,60	7,51	7,67	26,19	25,63	26,24	18,59	18,03	18,64
-27.5	NT proctor	29,17	28,89	29,26	3,81	3,11	3,89	4,23	3,96	4,88	14,03	13,90	14,06	7,34	7,19	7,51	25,47	25,00	26,14	18,28	17,81	18,95
-37.5	NT proctor	28,57	27,91	28,59	3,61	3,54	4,13	6,72	6,35	7,00	11,62	11,50	11,90	5,96	5,87	6,00	24,30	23,79	24,46	18,34	17,83	18,50
-47.5	NT proctor	30,19	29,95	30,43	4,13	4,12	5,36	9,15	9,14	9,83	11,21	10,93	11,52	4,68	4,67	4,80	25,53	25,45	25,83	20,74	20,66	21,04
-7.5	CT proctor	31,62	31,60	32,39	3,19	2,90	3,23	5,69	5,24	6,60	13,30	13,22	13,66	9,55	9,21	9,71	28,73	28,72	29,19	19,36	19,35	19,82
-17.5	CT proctor	31,80	31,66	31,88	4,08	3,64	4,45	6,06	5,90	6,85	13,24	12,51	13,36	8,80	8,61	9,09	28,11	27,30	28,16	19,30	18,50	19,35
-27.5	CT proctor	30,44	30,25	31,22	3,87	3,61	3,92	4,73	4,53	5,55	12,63	12,47	12,64	9,41	9,28	9,54	26,64	26,45	27,30	17,36	17,17	18,02
-37.5	CT proctor	29,26	29,00	29,87	3,57	3,36	3,61	3,94	3,91	4,66	12,65	12,50	12,79	9,09	8,96	9,73	25,80	25,69	25,90	16,71	16,59	16,81
-47.5	CT proctor	25,40	25,38	25,94	3,91	3,73	4,25	1,69	1,63	1,75	7,11	7,08	7,48	12,70	12,54	12,84	21,65	21,62	21,69	8,81	8,78	8,85

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Julian Cochius, Ochsenfurt, 20.11.2025

Name, Ort, Datum

Unterschrift