

Petra Kahle¹, Ines Bull², Andreas Seelig¹, Tobias Thiel²

Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf Ertragsverhalten und physikalische Bodeneigenschaften am Standort Gülzow (Mecklenburg-Vorpommern)

Effects of different tillage systems on yields and soil properties at test site Gülzow (Mecklenburg-Western Pomerania)

52

Zusammenfassung

In einem langjährigen Bodenbearbeitungsversuch in Mecklenburg-Vorpommern wurden nach regelmäßiger Bearbeitung mit dem Pflug hohe, typisch ansteigende Eindringwiderstände von max. 3,5 MPa in 30–45 cm Bodentiefe festgestellt, während nach Grubbereinsatz eher allmähliche Anstiege über 0–60 cm Tiefe vorlagen. Wendende (Pflug) und nichtwendende (Grubber) sowie wechselnde (Pflug/Grubber) Bodenbearbeitung bewirkten im Tiefenbereich 0–30 cm differenzierte Effekte auf Trockenrohdichte, Porosität, Wasser- und Luftanteil. Die Untersuchungen zum Ertragsverhalten zeigten, dass unter den gegebenen Standortbedingungen eine Reduzierung der jährlich wendenden Bodenbearbeitung bis zum Pflugverzicht ohne Ertragsverluste möglich ist. Der periodische Wechsel aus wendender und nichtwendender Bodenbearbeitung lässt ähnlich wie dauerhaft nichtwendende Bearbeitung im Vergleich zum jährlichen Pflügen günstige bodenphysikalische Eigenschaften erwarten.

Stichwörter: Landwirtschaft, Pflug, Grubber, Verdichtung, Eindringwiderstand

Abstract

In a long-term tillage experiment in Mecklenburg-Western Pomerania high penetration resistances up to

3,5 MPa were found in 30–45 cm soil depth as a result of continuous ploughing. A no-till-system showed a gradual increase over 0–60 cm soil depth. Tillage with plough, cultivator or rotational tillage (changing of plough and cultivator) caused different effects on dry density, porosity, water and air content in the upper soil (0–30 cm). Under the existing site conditions, yields were not compromised by a reduction of the tillage intensity. The data suggest that rotational tillage may have beneficial effects on physical soil properties, similar to the effects observed with continuous no-till regimes.

Key words: agriculture, compaction, plough, grubber, penetration resistance

Einleitung

In Europa wird die Bodenverdichtung als Hauptproblem der Bodendegradierung angesehen (VAN LYNDEN, 2000). Sie betrifft schätzungsweise 33 Mio. Hektar Fläche (VAN DEN AKKER and CANARACHE, 2001). 32% der Unterböden gelten als stark und 18% als mäßig verdichtungsgefährdet (FRATERS, 1996). In Deutschland wird die Gefährdung der Bodenfunktionen durch Verdichtung in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Bodens beurteilt. Im sehr feuchten Zustand weisen 68% der Ackerflächen eine sehr hohe Verdichtungsgefährdung des Unterbodens auf, bei 80% der Feldkapazität sind es ca. 32% (LEBERT, 2010). Betroffen sind vorrangig Böden aus Geschiebelehm und lehmi-

Institut

Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Rostock¹
Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, Sachgebiet Acker- und Pflanzenbau, Gülzow-Prüzen²

Kontaktanschrift

Dr. Petra Kahle, Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Professur Bodenphysik, Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock. E-Mail: petra.kahle@uni-rostock.de

Zur Veröffentlichung angenommen

6. Februar 2019

gem Geschiebemergel in Norddeutschland sowie Böden mit hohen Tonanteilen in Süddeutschland (UBA, 2015).

Bodenverdichtungen können aufgrund der Entstehungsgeschichte auf natürliche Art und Weise entstehen und/oder durch die Tätigkeit des Menschen befördert werden. Böden gelten als schadverdichtet, wenn infolge technogener Überlastung das Porensystem im Boden soweit reduziert ist, dass die Produktions-, Regelungs- und Lebensraumfunktionen zeitweilig oder dauerhaft beeinträchtigt werden (LUNG MV, 2005). Folgen sind reduzierter Hohlraumanteil, behinderter Luft- und Wassertransport, eingeschränkte Wuchsbedingungen für Pflanzen und letztlich Ertragsrückgang sowie finanzielle Einbußen. Neben der flächenhaften Ausdehnung verdichteter Areale gilt es, die Verdichtungsanfälligkeit der Unterböden verstärkt zu beachten, um landwirtschaftliche Arbeitsvorgänge festlegen und Umweltschutzmaßnahmen planen zu können (JONES et al., 2003).

In der landwirtschaftlichen Praxis existiert heute eine Vielfalt an Bearbeitungssystemen. Jede Form der Bodenbearbeitung bewirkt in Abhängigkeit von Eingriffstiefe und -intensität spezifische Bodenveränderungen. Das traditionelle Pflügen beinhaltet die Lockerung und Wendung des Bodens und die Einarbeitung organischer Materialien. Neben den gewünschten Effekten hinsichtlich Pflanzenentwicklung und Unkrautmanagement kann der Einsatz immer größerer und schwererer Bewirtschaftungseinheiten zur Quelle von Verdichtungsvorgängen werden (HORN, 2009). Als kritisch gilt der Bodenbereich unterhalb des gelockerten Oberbodens, in dem keine maschinelle Lockerung erfolgt und bestehende Verdichtungen langfristig erhalten bleiben (UBA, 2015). Hier können Pflugsohlenverdichtungen durch häufiges Fahren in der Furche beim Pflügen vorkommen (JONES et al., 2003). Zu erwarten sind Beeinflussungen der bodenphysikalischen Eigenschaften wie Trockenrohddichte, Porenanteil, Porengrößenverteilung und Porenkontinuität als bestimmende Parameter eines funktionsfähigen Bodengefüges.

Die nichtwendende Bodenbearbeitung ist durch eine Reduzierung der Arbeitsintensität gekennzeichnet. Verschiedene Systeme unterscheiden sich bezüglich Art der Werkzeuge, Arbeitstiefe und Bodenbedeckung mit organischen Materialien (KTBL, 2015). Als Vorteile nichtwendender Bewirtschaftungsformen werden neben verringerten Arbeiterledigungskosten die Verminderung der Erosionsgefährdung und der diffusen Stoffeinträge in die Gewässer genannt (BRUNOTTE, 2007).

Untersuchungen an langjährig nichtwendend bearbeiteten Böden in Mitteldeutschland haben gezeigt, dass der Übergang zur nichtwendenden Bodenbearbeitung in der Praxis nicht zwangsläufig mit einer Verbesserung der Bodenstruktur einhergeht und unterhalb des Bearbeitungshorizontes eingeschränkte und partiell unzureichende Bodenstrukturzustände vorkommen können (GÖTZE et al., 2013).

Ausgehend von kontroversen Meinungen zum Einfluss der Bearbeitungssysteme auf den Boden, der Degradationsgefahr und der hohen Verdichtungsempfindlichkeit

der Böden in Nordostdeutschland zielt die vorliegende Untersuchung darauf ab, den Einfluss der Bodenbearbeitungsintensität auf ausgewählte physikalische Bodeneigenschaften und Ertragsverhalten der angebauten Kulturen vergleichend unter den gegebenen spezifischen Standortbedingungen zu prüfen. Prüfgegenstand sind die wendende und die nichtwendende Bearbeitung sowie die Kombination beider Systeme innerhalb der Fruchtfolge. Letztere findet zwar in der landwirtschaftlichen Praxis breite Anwendung, aber deren Effekte auf Boden und Pflanze sind noch nicht ausreichend untersucht. Es stellt sich die Frage, ob und in welchem Maße ein periodischer Pflugeinsatz die positiven Wirkungen der nichtwendenden Bearbeitung mit dem Grubber nivelliert und wie sich die Häufigkeit der wendenden Bodenbearbeitung von jährlicher Pflugfurche über teilweisen Pflugverzicht bis zur vollständig nichtwendenden Bearbeitung auswirkt. Grundlage bildet ein im Jahr 1994 angelegter Bodenbearbeitungsversuch in Mecklenburg-Vorpommern. Als Prüfparameter wurden der Eindringwiderstand des Bodens, die Trockenrohddichte, die Porosität, die Wasserretention sowie die Ertragsergebnisse herangezogen.

Material und Methoden

Versuchsstandort

Der Versuchsstandort Gülzow (12°04'05'' E, 53°49'20'' N), Mecklenburg-Vorpommern, befindet sich inmitten der jungpleistozänen Grundmoränenlandschaft. Die mittlere Jahresdurchschnittstemperatur (1993–2010) beträgt 8,7 (± 0,9) °C und die Jahresniederschlagssumme 567 (± 107) mm. Die Versuchsfläche ist durch den Bodentyp Parabraunerde-Pseudogley gekennzeichnet. Dementsprechend nehmen die Feinanteile (< 0,006 mm) mit zunehmender Bodentiefe zu. Im Mittel finden sich 28% Schluff und Ton in 0–30 cm, 30% in 30–60 cm und 36% in 60–90 cm Bodentiefe. Prägend sind die Bodenarten mittel lehmiger Sand (Sl3) im Oberboden und stark lehmiger Sand (Sl4) im Unterboden (AG BODEN, 2005). Der Versuch repräsentiert typische Standortbedingungen für die Bodenregion der Jungmoränen und die Bodengroßlandschaft der Grundmoränenplatten und lehmigen Endmoränen im Jungmoränengebiet Norddeutschlands (AG BODEN, 2005).

Versuchsaufbau und Auswahl der Varianten

Es handelt es sich um einen kombinierten Bodenbearbeitungs- und Düngungsversuch, der als Langparzellenanlage mit Standard auf vier Teilschlägen wiederholt wird. Dabei kommen zwei dreifeldrige Fruchtfolgen seit 2000 bzw. 2002 unverändert zum Anbau. Beide werden je einmal zeitlich um ein Jahr versetzt wiederholt. Die Fruchtfolge 1 umfasst mit den Kulturarten Winterraps – Winterweizen – Winterweizen ausschließlich Winterungen und Mähdruschfrüchte. In der Fruchtfolge 2 (Silomais – Winterweizen – Wintergerste) wird nach Wintergerste in den nicht gepflügten Varianten eine abfrierende Zwischen-

frucht angebaut. Der Versuch zur Bodenbearbeitung wird seit 1994 (bzw. 1996 auf den Teilschlägen 3 und 4) unverändert durchgeführt und seit 2007 bzw. 2010 durch Prüfvarianten zu Fragen der organischen Düngung ergänzt.

In dieser Untersuchung standen die Effekte der Bodenbearbeitung durch jährliches tiefes Pflügen (ca. 25 cm), jährliches tiefes Grubbern (ca. 25 cm), jährliches flaches Grubbern (ca. 10 cm) und wechselnder Nutzung von flachem Grubber (ca. 10 cm) und tiefem Pflug (ca. 25 cm, jeweils vor dem Stoppelgetreide) im Fokus. Alle Arbeiten wurden mit vergleichsweise leichter Technik durchgeführt (Traktorgewicht max. 6 t, Reifentyp: 500/60–26.5 und 800/55–30.5 bzw. 480/65 R28 und 520/70 R38, Luftdruck jeweils ca. 100 kPa).

Die Eindringwiderstandsuntersuchung beschränkt sich auf die Bearbeitungsvarianten Pflug, tiefer und flacher Grubber, durchgeführt im Oktober 2013 in der Kultur Wintertraps. Die zum Vergleich herangezogenen Werte früherer Beprobungen (2000, 2003) wurden auf demselben Teilschlag jeweils im März/April in der Kultur Winterweizen (nach Blattfrucht) ermittelt. Zum Zeitpunkt der Bodenprobenahme im November 2014 stand Winterweizen (Vorfrucht Wintertraps) auf dem Feld. Bei allen Terminen war das Erreichen der Feldkapazität in der relevanten Bodentiefe gegeben (NEUBAUER, 2000, AMELS, 2003).

Die bodenphysikalischen Untersuchungen zur Erfassung von Trockenrohdichte, Porosität und Wasserretention wurden zwecks besserer Vergleichbarkeit (ohne den Effekt organischer Düngung) auf Flächen mit mineralischer Düngung durchgeführt. Betrachtet wurde ein Teilschlag mit der Mähdruschfruchtfolge Wintertraps – Winterweizen – Winterweizen. Hier verbleibt das Rapsstroh nach der Ernte auf dem Feld, während Getreidestroh abgefahren wird.

Die Ertragsauswertung erfolgte entsprechend den bodenphysikalischen Untersuchungen in den Prüfvarianten der Bodenbearbeitung und ohne Berücksichtigung von Düngungseffekten.

Untersuchungsparameter, Bodenuntersuchung und Ertrags erfassung

Parameter der Bodenuntersuchung waren der Eindringwiderstand, die Trockenrohdichte, die Porosität, einschließlich Porengrößenverteilung, der aktuelle Wasser- und Luftvolumenanteil und die Wasserretention.

Der Eindringwiderstand als Maß zum Nachweis von Schadverdichtungen im Boden wurde mittels Penetrologger (SN 0, Eijkelkamp, Sondenlänge 80 cm, 60°-Konus 1 cm², Messintervall 1 cm) erfasst. Dazu wurden je Bearbeitungsvariante und deren Wiederholung 10 Messungen über den Tiefenbereich 0–60 cm durchgeführt. Aus den Penetrologgerdaten wurden mittlere Eindringwiderstände bezogen auf 10 cm-Sektoren abgeleitet. Eindringwiderstände < 1 MPa zeigen Überlockerung an, Eindringwiderstände > 3 MPa lassen nachteilige Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum erwarten (MUNLV NRW, 2009).

Für die Bodenuntersuchung wurden je Prüfvariante zwei Bodenprofile angelegt und nach dem Beprobungsschema (Abb. 1) je vier Stechzylinderproben ($V = 250 \text{ cm}^3$) sowie eine gestörte Probe (Mischprobe aus 3 Einstichen) aus den Tiefenstufen 0–10 cm, 10–20 cm und 20–30 cm entnommen.

Die Bestimmung der Trockenrohdichte (ρ_d) erfolgte nach Trocknung des Bodens bei 105°C. Die Festsubstanzdichte (ρ_s) wurde mit $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ angenommen. Die Porosität (PV) wurde aus $(100 - \rho_d/\rho_s)$ berechnet. Die Zusammensetzung des Bodens aus fester (SV), flüssiger (θ) und gasförmiger Phase (a_v) wurde wie folgt kalkuliert: $SV = 100 - PV$, $\theta = (\rho_m - \rho_d) \times 100$, $a_v = (PV - \theta) \times 100$. Die Wasserretentionsparameter wurden bei den pF-Werten pF 1,8 und 2,48 bzw. pF 4,2 unter Verwendung keramischer Platten bzw. Druckmembranapparatur bestimmt (HARTGE und HORN, 2009), um daraus die Porengrößenverteilung abzuleiten:

Grobporen (GP) > 50 μm , Mittelporen (MP) 0,2–50 μm , Feinporen (FP) < 0,2 μm wurden wie folgt abgeleitet: $GP = PV - \theta_{pF1,8}$ (Vol.%), $MP = \theta_{pF1,8}$ (Vol.) – $\theta_{pF4,2}$ (Vol.%), $FP = \theta_{pF4,2}$ (Vol.%).

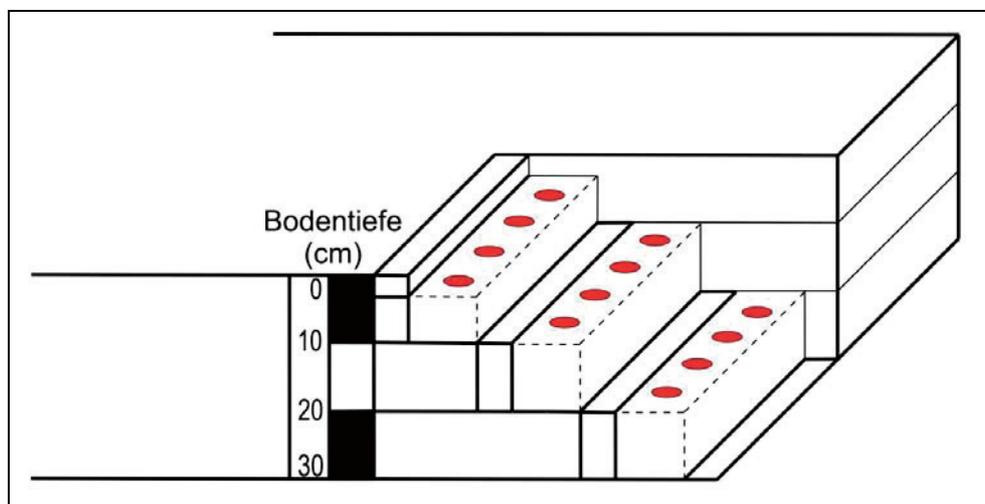


Abb. 1. Schema zur Stechzylinderprobenahme

Die pflanzenbauliche Versuchsdurchführung erfolgte nach den Richtlinien der Sortenprüfung (BUNDESSORTENAMT, 2000). Die Ertragsermittlung fand jeweils als Kernbeerntung auf einer Fläche von $1,5 \times 6,5$ m mit Parzellentechnik statt. Erntegewichte und Trockensubstanzgehalte wurden für jede Prüfvariante parzellenweise mit einer Messwiederholung bestimmt. Pro Teilschlag standen damit pro Anbaujahr und Prüfvariante zwei und für den Standard vier Ertragswerte zur Verfügung. Zur Erhöhung der Aussagesicherheit wurden die Jahre 2000–2017 (seit Einführung der aktuellen Fruchtfolge) in die Auswertung einbezogen. Aufgrund von Auswinterungen und Ausfällen durch Fraßschäden konnten nicht in allen Anbaujahren Erträge ermittelt werden. Der Auswertung liegen für Winterraps 11, für Winterweizen nach Vorfrucht Winterraps 10, für Winterweizen nach Vorfrucht Winterweizen 10, für Silomais 9, für Winterweizen nach Vorfrucht Silomais 10 und für Wintergerste 11 Anbaujahre zugrunde.

Statistik

Die zentimetergenau erfassten Eindringwiderstände wurden zu 10 cm-Sektoren zusammengefasst und statistisch mittels RStudio 2009–2011, Version 0.96.331, ausgewertet. Die Ergebnisse zu den bodenphysikalischen Grundparametern wurden als Mittelwerte für den Oberboden (0–30 cm) und tiefenabhängig differenziert über die Tiefenbereiche (0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm) angegeben. Das Signifikanzniveau α betrug 0,05.

Die statistische Auswertung der Einzeljahresergebnisse (Ertrags- und Bodendaten) bezogen auf einen Teilschlag erfolgte mit dem PIAFStat-Verfahren „Geostatistik zwei-

faktoriell Bodenbearbeitung“, welches eine Anpassung des Verfahrens „Geostatistik Langparzelle Grundverfahren“ an die spezielle Anlage des beschriebenen Versuches ist und die geostatistische Auswertung mit optimiertem Bodenausgleich ermöglicht (MICHEL et al., 2007, MICHEL und ZENK, 2006). Die Mittelwerte wurden mittels t-Test verglichen.

Die mehrjährigen Ertragsauswertungen beruhen auf den mit PIAFStat ermittelten adjustierten Mittelwerten der Einzeljahre mit den dazugehörigen Standardfehlern. Die Serienverrechnung erfolgte mit der Software SAS 9.4® auf der Grundlage der Realerträge und getrennt nach Kulturart und Vorfrucht. Es wurden „proc mixed“-Modelle verwendet.

Ergebnisse

Einfluss der Bodenbearbeitung auf physikalische Eigenschaften des Bodens

In 2013 nahmen die Eindringwiderstände in allen Bearbeitungsvarianten mit der Bodentiefe (Abb. 2) zu. Hingegen unterschieden sich die tiefenabhängigen Verteilungsmuster der Eindringwiderstände zwischen den Bearbeitungsvarianten deutlich. Während sich die Pflugvariante durch abrupt hohe Eindringwiderstände im Tiefenbereich 30–45 cm (max. 3,5 MPa) auszeichnete, zeigten die Grubbervarianten allmählich mit der Bodentiefe ansteigende Eindringwiderstände, ohne Anzeichen stark erhöhter Eindringwiderstände in bestimmten Tiefenbereichen.

In der oberen Krume (0–10 cm) lagen keine signifikant verschiedenen Eindringwiderstände (Mittelwerte) zwi-

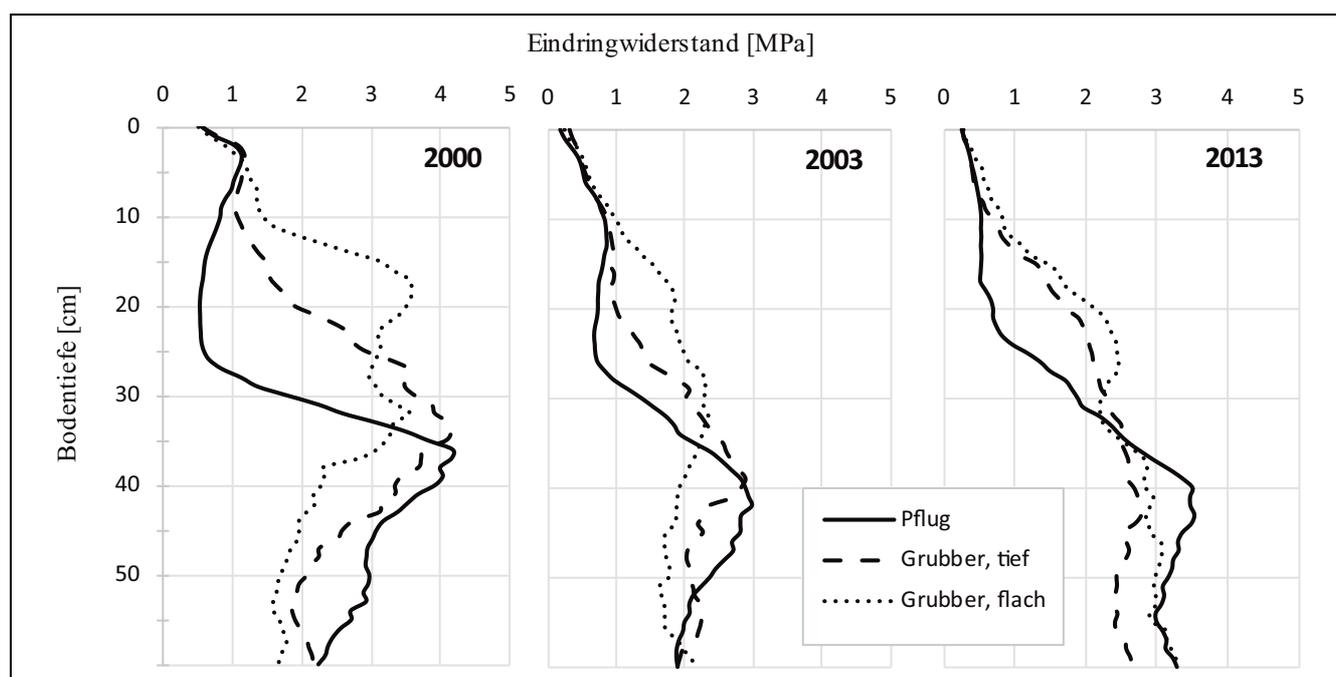


Abb. 2. Eindringwiderstände über 0–60 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitung zu drei verschiedenen Aufnahmezeitpunkten, nach NEUBAUER (2000), AMELS (2003) und SEELIG (2015)

schen Pflug- (0,43 MPa) und Grubbervarianten (0,51 MPa) vor. Mit zunehmender Bodentiefe wurde eine Differenzierung deutlich, wobei die Eindringwiderstände im Tiefenbereich 11–30 cm der Grubber- (1,80 MPa) signifikant höher gegenüber den Pflugvarianten (0,92 MPa) und im Tiefenbereich 31–60 cm signifikant höher bei Pflug- (3,57 MPa) gegenüber den Grubbervarianten (3,00 MPa) waren.

Die Eindringwiderstände aus den Jahren 2000 und 2003 bestätigen den Größenbereich, die Tiefenverteilung und die bearbeitungsabhängigen Effekte aus 2013. Über den Prüfzeitraum 2000 bis 2013 deutet sich eine zunehmende Abflachung der Eindringwiderstandskurve in den Bearbeitungsvarianten Grubber tief und Grubber flach gegenüber der Bearbeitungsvariante Pflug an. Als Beleg dafür können die maximalen Eindringwiderstände beider Bearbeitungsvarianten (Grubber tief bzw. Pflug) im Bereich der Krumbasis dienen (4,1 bzw. 4,5 MPa (2000), 3,0 MPa bzw. 3,0 (2003) und 2,7 bzw. 3,5 MPa (2013)).

Die mittleren Trockenrohdichten der Oberböden (0–30 cm) unter Pflug, Grubber flach und tief und bei wechselnder Bodenbearbeitung unterschieden sich signifikant (Tab. 1). Nach AG BODEN (2005) handelt es sich bei der Pflugvariante um mittlere ($1,4\text{--}1,6\text{ g cm}^{-3}$) und bei den Grubbervarianten sowie der wechselnden Bodenbearbeitung um hohe Trockenrohdichten ($1,6\text{--}1,8\text{ g cm}^{-3}$).

Die abgeleiteten Porositäten unterschieden sich dementsprechend ebenfalls signifikant. Nach AG BODEN (2005) waren die Porositäten der beiden Grubbervarianten als gering (30–38%) und die der Varianten Pflug und wechselnde Bearbeitung als mittel (38–46%) einzustufen. Die Böden unter Pflug wiesen signifikant geringere Wasser- und signifikant höhere Luftanteile als die weniger intensiv bearbeiteten Böden auf. Innerhalb des Porenvolumens dominierten in allen Bearbeitungsvarianten die für die Pflanzenwasserversorgung relevanten Mittelporen, ohne bearbeitungsabhängige Unterschiede anzuzeigen. Die ermittelten Mittelporenanteile entsprachen der mittleren Niveaustufe (14–22%) nach AG BODEN (2005). Hinsichtlich der übrigen Porengrößenklassen zeichneten sich die Böden der Pflugvariante durch signifikant höhere Grobporenanteile und signifikant geringere Feinporen-

anteile gegenüber den Grubbervarianten aus. Die Böden der wechselnden Bearbeitung nahmen bezüglich der Verteilung an Grob- und Feinporen eine Mittelstellung zwischen Pflug- und Grubbervarianten ein. Bei vergleichender Betrachtung der Bearbeitungseffekte hinsichtlich Trockenrohdichte, Porosität und Verteilung der Wasser- und Luftanteile wurden Ähnlichkeiten zwischen wechselnder Bearbeitung und Bearbeitung mit dem Grubber deutlich, während zwischen wechselnder Bearbeitung und Bearbeitung mit dem Pflug signifikante Unterschiede bestanden. Zwischen tiefer und flacher Grubberbearbeitung wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

Differenzierung der physikalischen Bodeneigenschaften in Abhängigkeit von der Bodentiefe

In der Tiefenzone 0–10 cm ergab sich für die Trockenrohdichten folgende Reihung: flacher Grubber < wechselnde Bearbeitung < tiefer Grubber < Pflug (Abb. 3). Alle Bearbeitungsvarianten entsprachen der mittleren Trockenrohdichtestufe ($1,4\text{--}1,6\text{ g cm}^{-3}$) nach AG BODEN (2005). Die festgestellten Trockenrohdichteunterschiede waren gering und nur zwischen den Varianten Pflug und flacher Grubber statistisch gesichert. Die korrespondierenden Porositäten zeigten ebenfalls signifikant erhöhte Werte bei flacher Grubberbearbeitung im Vergleich zum tiefen Grubber und Pflug.

In der Tiefenzone 10–20 cm wurden in der Pflugvariante signifikant geringere Trockenrohdichten gegenüber beiden Grubbervarianten und der wechselnden Bearbeitung festgestellt. Sie entsprechen der mittleren ($1,4\text{--}1,6\text{ g cm}^{-3}$) bzw. hohen Trockenrohdichtestufe ($1,6\text{--}1,8\text{ g cm}^{-3}$) nach AG BODEN (2005). Im Einklang damit ergaben sich in der Pflugvariante signifikant höhere Porositäten als in den anderen Varianten.

Auch in der Tiefenzone 20–30 cm wurden die geringste Trockenrohdichte und die höchste Porosität in der Pflugvariante festgestellt. Demgegenüber zeichnen sich die Grubbervarianten durch signifikant höhere Trockenrohdichten und signifikant geringere Porositäten aus, während die Variante wechselnde Bearbeitung bezüglich der Parameter Trockenrohdichte und Porenvolumen eher der Pflugvariante ähnelt, sich aber doch signifikant von ihr unterscheidet (Abb. 3 und 4).

Tab. 1. Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf physikalische Eigenschaften des Oberbodens (Mittelwerte, 0–30 cm) am Standort Gülzow (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede, $\alpha \leq 0,05$)

Variante	ρ_d g cm^{-3}	PV %	θ %	av %	GP %	MP %	FP %
Pflug	1,57 ^b	40,7 ^a	25,1 ^b	15,5 ^a	11,3 ^a	21,9 ^a	7,5 ^b
Grubber tief	1,68 ^a	36,4 ^c	27,4 ^a	9,0 ^b	7,6 ^b	20,6 ^a	8,3 ^a
Grubber flach	1,66 ^a	37,5 ^{b,c}	27,4 ^a	10,1 ^b	8,5 ^b	20,7 ^a	8,2 ^{a,b}
Grubber/Pflug	1,63 ^a	38,2 ^b	27,1 ^a	11,1 ^b	9,4 ^{a,b}	20,8 ^a	8,0 ^{a,b}

(ρ_d Trockenrohdichte, PV Porosität, θ Wasservolumenanteil, av Luftvolumenanteil, GP Grobporen, MP Mittelporen, FP Feinporen)

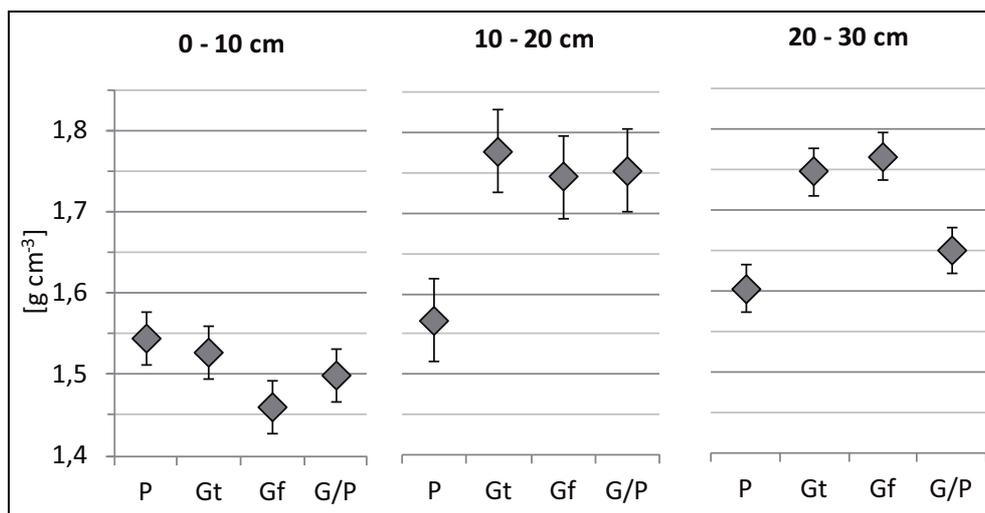


Abb. 3. Tiefendifferenzierte Trockenrohdichten des Bodens (Mittelwerte und Intervalle für den paarweisen Vergleich, t-Test mit $\alpha > 0,05$) in 0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm Bodentiefe bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (P Pflug, Gt Grubber tief, Gf Grubber flach, G/P wechselnde Bearbeitung mit Grubber und Pflug) am Standort Gülzow (Herbst 2014)

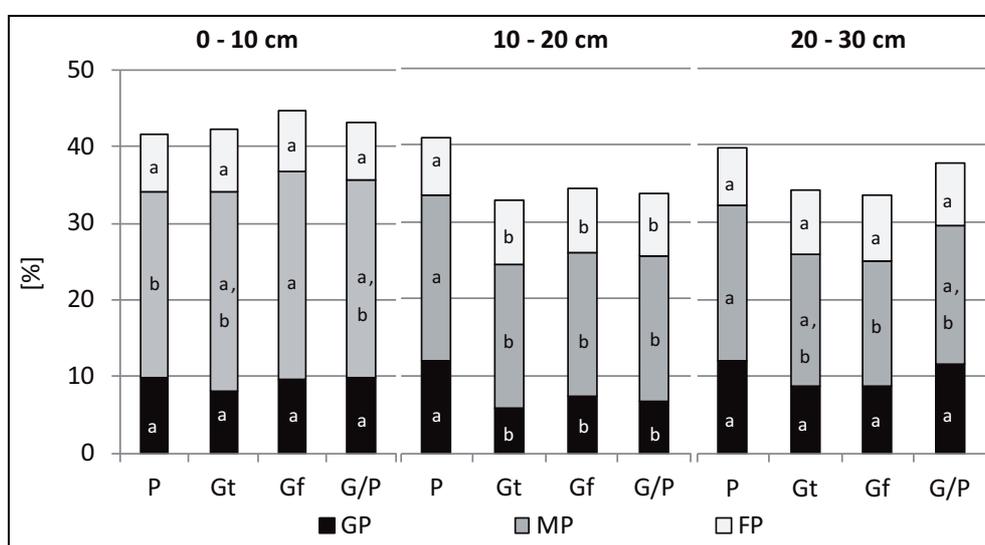


Abb. 4. Tiefenabhängige Porengrößenverteilung (GP Grobporen, MP Mittelporen, FP Feinporen) bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung (P Pflug, Gt Grubber tief, Gf Grubber flach, G/P wechselnde Bearbeitung mit Grubber und Pflug) am Standort Gülzow (Herbst 2014), (Mittelwerte, unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten an, $\alpha \leq 0,05$)

Hinsichtlich der Porengrößenverteilung (Abb. 4) ließen sich im Bereich 0–10 cm nur geringe Unterschiede zwischen den Varianten finden. Nur in der Variante Grubber flach waren die Mittelporenanteile im Vergleich zur Pflugvariante signifikant erhöht. Insgesamt zeigte sich die Beeinflussung der Porosität im Tiefenbereich 10–20 cm am deutlichsten. Hier bewirkte der Pflugeinsatz signifikant erhöhte Grob- und Mittelporenanteile sowie verringerte Feinporenanteile gegenüber den anderen Bearbeitungsvarianten. Im Tiefenbereich 20–30 cm deuteten sich erhöhte Grob- und Mittelporenanteile der Varianten Pflug und wechselnde Bearbeitung gegenüber beiden Grubbervarianten an. Aufgrund der höheren Varianz der Parameter in dieser Bodentiefe lässt sich allerdings nur der Unterschied bezüglich der Mittelporen zwischen der Pflugvariante gegenüber der Variante mit flachem Grubber statistisch absichern.

Einfluss der Bodenbearbeitung auf den Ertrag

Im Mittel aller Mähdruschfrüchte waren keine Ertragsnachteile durch nichtwendende Bodenbearbeitung festzustellen (Abb. 5). Unabhängig davon zeigten sich für einzelne Kulturen über den Prüfzeitraum 2000–2017 signifikante Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten, wobei die verschiedenen Kulturen nicht gleichgerichtet reagierten.

Im Winterraps konnte in keinem der untersuchten Jahre eine Ertragsabhängigkeit von der Bodenbearbeitung nachgewiesen werden. Für Winterweizen nach Vorfrucht Winterraps zeigte sich ein Ertragsvorteil der flachen Grubbervariante. Dagegen führte für Winterweizen nach Vorfrucht Winterweizen sowohl der jährliche Pflugeinsatz als auch die wechselnde Bearbeitung, bei der zu dieser Kultur gepflügt wird, in vier von zehn Versuchsjahren zu Ertragsvorteilen. Über den gesamten Auswertungs-

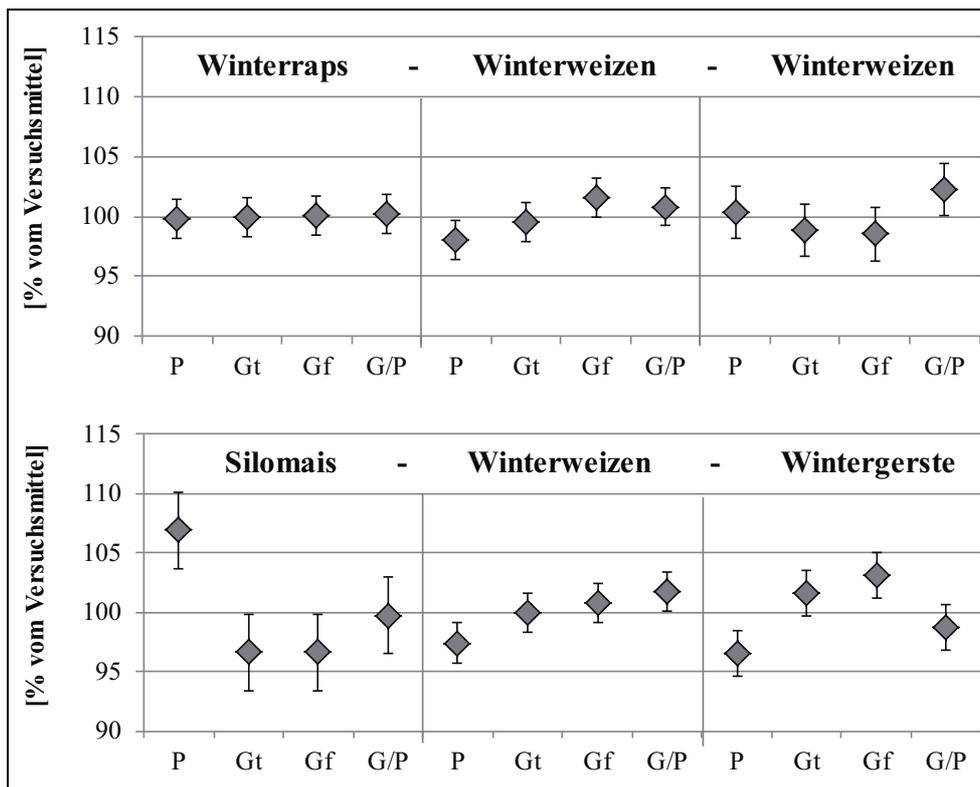


Abb. 5. Relativer Korn- bzw. Trockenmasse-Ertrag in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung (P Pflug, Gt Grubber tief, Gf Grubber flach, G/P wechselnde Bearbeitung mit Grubber und Pflug), Kultur und Vorfrucht (oben Fruchtfolge 1, unten Fruchtfolge 2, Mittelwerte und Intervalle für den paarweisen Vergleich, tuckey-Test mit $\alpha > 0,05$) am Standort Gülzow (2000–2017)

zeitraum betrachtet waren diese Unterschiede jedoch nicht signifikant. Bei Winterweizen nach Vorfrucht Winterraps und bei der Wintergerste zeigten sich die Vorteile nichtwendender Bodenbearbeitung vor allem in trockenen Jahren. So lag beispielsweise 2015, einem Jahr mit einer ausgeprägten Trockenperiode im Juni, der Korn-ertrag der Wintergerste in den Grubbertypen um ca. 10 dt höher als nach Pflugeinsatz (signifikant). Dabei gab es keinen Unterschied zwischen den Varianten mit wechselnder Bodenbearbeitung, in der plangemäß zur Gerste gepflügt wurde, und jährlichem Pflügen. Für Winterweizen nach Vorfrucht Silomais ist ein signifikanter Ertragsvorteil bei flacher Grubbertypen (Varianten: Grubber flach und wechselnde Bearbeitung, in der nach Silomais flach gegrubbert wird) festzustellen. Silomais reagierte in der vorgegebenen Fruchtfolge in Einzeljahren eher positiv auf die wendende Bearbeitung, wobei der große Abstand zu den anderen Varianten auf ein einzelnes Jahr im Auswertungszeitraum zurückgeht. Sonst lag der Ertragsvorteil nach Pflug bei 5–10% und wurde nur in der Hälfte der Jahre festgestellt (Abb. 5).

Diskussion

Die Eindringwiderstandsmessung zum Grad und zur Tiefe der Bodenverdichtung verdeutlichte bearbeitungsabhängige Unterschiede (Abb. 2). Ausgehend von sehr geringen Eindringwiderständen in der Oberkrume (0–10 cm) nahmen die Werte in allen untersuchten Bearbeitungs-

varianten vom Ober- zum Unterboden zu, erklärlich aus der natürlichen Auflast und den wechselnden Substrateigenschaften über die Bodentiefe (vgl. Versuchsstandort).

In den jährlich gepflügten Parzellen war der Eindringwiderstand im gesamten Bearbeitungshorizont vergleichsweise gering und gleichmäßig verteilt. Zu geringe Dichtlagerung (überlockerte Bereiche) wurden unterhalb von 10 cm Tiefe nur in der Pflugvariante festgestellt. Unterhalb der Krume (in 30–50 cm) wiesen diese Böden typische Schadverdichtungen auf, wie sie auch aus früheren Untersuchungen zu den Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren im Unterboden bekannt sind (TEBRÜGGE and DUERING, 1999, VOORHEES et al., 1986). Sie können Verschiebungen der Phasenverteilung, Porengrößenverteilung zu Lasten der Grobporen und letztlich Stauwassergefahr verursachen und eine Durchwurzelungsbarriere für die Kulturpflanzen darstellen. Schadverdichtungen im Bereich der Krumbasis gelten für die herkömmlich bearbeiteten Böden des Jungpleistozäns in Nordostdeutschland als typisch (NEUBAUER, 2003) und zeigen die Verdichtungsgefährdung der Böden an.

Die nichtwendend bearbeiteten Böden zeichneten sich im Tiefenbereich von 10–35 cm durch vergleichsweise höhere und allmählich über die Bodentiefe ansteigende Eindringwiderstände aus und lassen einen weitgehend ungehinderten Wasser- und Luftaustausch erwarten. KUHWARD et al. (2016) verwiesen in diesem Kontext auf signifikant erhöhte gesättigte Wasserleitfähigkeiten und mehr Bioporen bei reduzierter gegenüber konventioneller Bearbeitung. Am Standort Gülzow hat die im Zeit-

raum 1994–2013 praktizierte nichtwendende Bodenbearbeitung über Regenerationsprozesse offenbar dazu beigetragen, die durch die vorangegangene konventionelle Bearbeitung verursachten Verdichtungen im Bereich der Krumbasis abzumildern.

In 2013 fanden sich Bereiche ungünstiger Dichtlagerung > 3 MPa nur noch in der gepflügten Variante in > 35 cm Bodentiefe. Bei der Interpretation dieser Effekte ist zu berücksichtigen, dass der Eindringwiderstand einen Summeneffekt mehrerer Mechanismen darstellt und durch vielfältige Faktoren beeinflusst wird, wie Lagerungsdichte, Wasserspannung, Wassergehalt, Körnung und Aggregation (HARTGE und BACHMANN, 2004). Aussagen zur zeitlichen Veränderung dieses Parameters sind daher nur unter der Voraussetzung vergleichbarer Standortbedingungen möglich, wie sie in der vorliegenden Studie hinsichtlich Boden, Meteorologie und Kulturarten gegeben sind. Unabhängig davon erweist sich auch der Untersuchungszeitpunkt als wichtige Einflussgröße. Nach Bearbeitung und Bestellung ist der gepflügte Boden auf Arbeitstiefe lockerer gelagert als der gegrubberte (Abb. 2 und 3). Im Jahresverlauf nimmt die Tendenz zur Dichtlagerung nach Pflugeinsatz zu. Das belegen vergleichende Untersuchungen zu konventioneller Bearbeitung und No-Till-Verfahren, die bei Pflugverzicht abnehmende Trockenrohdichten über die Zeit lieferten (TEBRÜGGE und DUERING, 1999). Das vorliegende Datenmaterial erlaubt aufgrund unterschiedlicher Untersuchungstermine keinen direkten Vergleich der Eindringwiderstände zwischen Frühjahr (2000, 2003) und Herbst (2013).

Die ermittelten Eindringwiderstände im Größenbereich von 1 bis 5 MPa bestätigen Erfahrungen aus anderen Untersuchungen (CRAMER, 2006, SCHMIDT et al., 2015, KUHWALD et al., 2016). Die Einordnung der bearbeitungsabhängigen Ergebnisse ist allerdings schwierig, da es derzeit keine einheitlichen Angaben zu kritischen Werten und zu deren Klassifikation im Hinblick auf die Funktionalität des Bodengefüges gibt (CRAMER, 2006). Der Eindringwiderstand ist daher eher als Hilfskriterium zur Eingrenzung möglicher Schadverdichtungsflächen aufzufassen (LEBERT et al., 2004).

Nach langjährigem Einsatz unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren zeigten die Oberböden (0–30 cm) am Versuchsstandort Gülzow durchweg Trockenrohdichten $> 1,50$ g cm⁻³. Damit übertreffen diese Ergebnisse den von PETELKAU et al. (2000) in Abhängigkeit von Ton- und Schluffgehalt sowie C_{org}-Gehalt abgeleiteten oberen Grenzwert des optimalen Bereiches der Lagerungsdichte für die Krume von Sandböden und belegen die Verdichtungsgefährdung der am Standort Gülzow anstehenden Böden. Als ein Grund dafür ist die Verdichtungsneigung der sandigen Böden aufgrund ihrer ungleichkörnigen Zusammensetzung zu nennen. Weiterhin sind der Feuchtegehalt des Bodens zum Bearbeitungszeitpunkt und die eingesetzte Achslast nicht zu vernachlässigen. Untersuchungen auf feuchtem Ackerboden lieferten nach dem Einsatz schwerer Technik noch Jahre später anhaltende und tiefreichende Verdichtungserscheinungen (BALL et al., 1997, VOORHEES et al., 1986). Vor diesem Hintergrund

wurde ein Konzept zur Abschätzung der Verdichtungsgefährdung verschiedener Böden in Deutschland entwickelt, das die verfügbaren Befahrbarkeitstage im langjährigen Jahresverlauf ableiten lässt (LORENZ et al., 2016).

Beim Pflügen wird der Oberboden gewendet, die natürliche Lagerung gestört und die Belüftung befördert. Im Einklang damit wurden in der Pflugvariante vergleichsweise höhere Luft- und geringere Wasservolumenanteile gegenüber der nichtwendenden Bearbeitung festgestellt. Diese Verteilungsmuster belegen die Rolle des Pflügens für Durchlüftung und Austrocknung des Bodens. Die nichtwendende Bearbeitung lieferte aufgrund der reduzierten Eingriffsintensität vergleichsweise höhere Trockenrohdichten und verringerte Porositäten. Über gleichlautende Ergebnisse berichteten Mc VAY et al. (2006) und GÖTZE et al. (2013), die teilweise sogar erhebliche Bodenverdichtungen in langjährig nichtwendend bearbeiteten Böden fanden und darauf verwiesen, dass der Übergang zur konservierenden Bodenbearbeitung in der Praxis nicht zwangsläufig mit einer Verbesserung der Bodenstruktur einhergeht.

Am Standort Gülzow ergab die tiefenabhängige Untersuchung, dass die Oberkrume (0–10 cm) der geprüften Bearbeitungsvarianten nur geringe Dichteunterschiede aufweist und ihre Funktion der Wasser- und Luftführung weitgehend erfüllt. Demgegenüber zeichnete sich die Unterkrume (10–30 cm) der Bearbeitungsvarianten Grubber tief und flach sowie bei wechselnder Bearbeitung durch stärkere Verdichtungen gegenüber der Pflugvariante aus.

Im Tiefenbereich 10–20 cm wurden die vergleichsweise höchsten Trockenrohdichten (1,74–1,78 g cm⁻³) und folglich geringsten Porositäten (32,8%–34,3%) in den nicht jährlich gepflügten Varianten festgestellt. Grobporenanteile von 5,9% (Grubber, tief) bzw. 6,7% (wechselnde Bearbeitung) in diesem Bodenbereich deuten auf ungünstige Gefügeänderungen hin. Sie sind aber kein sicheres Indiz für Gefügeschäden, da solche Werte auch substratspezifisch oder bodengenetisch bedingt sein können (CRAMER, 2006). Die Identifikation von Bodenschadverdichtungen sollte daher nicht an einem Parameter festgemacht werden, sondern kombinierte Betrachtungen von Luftkapazität, Wasserleitfähigkeit und Feldgefügekennwerte beinhalten (LEBERT et al., 2004).

Im Tiefenbereich 20–30 cm zeigten die Grubbertypen vergleichbare Trockenrohdichten (Grubber flach 1,74 g cm⁻³, Grubber tief 1,77 g cm⁻³) und Porositäten (33,2%–34,0%), während die wechselnde Bearbeitung vergleichsweise geringere Trockenrohdichten (1,65 g cm⁻³) und höhere Porositäten (37,7%) aufwies. Dieser Effekt könnte als Nachwirkung des regelmäßigen Pflügens interpretiert werden. Damit wird die in früheren Untersuchungen erkannte Rolle von Bodendichten bzw. Porenvolumina zur Identifikation von Bodenschadverdichtungen bestätigt (GIESKA et al., 2003, EHLERS et al., 2003).

In der vorliegenden Untersuchung wurde der für das pflanzenverfügbare Wasser verantwortliche Anteil an Mittelporen bislang nicht nachhaltig beeinflusst. Auch in

langjährigen Bodenbearbeitungsversuchen in den USA wurde nur in Einzelfällen eine Beeinflussung der Wasserhaltefähigkeit des Bodens festgestellt (MC VAY et al., 2006). STRUDLEY et al. (2008) kommen in Auswertung zahlreicher Untersuchungen zu dem Schluss, dass Effekte der Bodenbearbeitung auf die Bodeneigenschaften aufgrund der vielfältigen Einflussgrößen und Interaktionen sowie der räumlich-zeitlichen Abhängigkeit schwer nachzuweisen sind.

TEBRÜGGE und DUERING (1999), EMMERLING und HAMPL (2002) sowie BERNER et al. (2008) verweisen im Zusammenhang mit länger anhaltender Bodenruhe und einer Mulchschicht bei nichtwendender Bodenbearbeitung auf erhöhte Gehalte an organischer Substanz im Boden, erhöhte biologische Aktivität und verbesserte Aggregierungsbedingungen. Eine besondere Rolle wird hierbei den Regenwürmern zugesprochen, die durch ihre Grabetätigkeit kontinuierliche Grobporen schaffen und dadurch bodenphysikalische Eigenschaften, wie Infiltration und Durchlüftung, sichern. Obwohl sich am Standort Gülzow bislang keine Mulchschicht ausgebildet hat und die Versorgung mit organischer Substanz sowie die Aggregation bisher nicht geprüft wurden, sprechen das bessere Infiltrationsverhalten (Abb. 6) und die verminderte Verschlammungsneigung (Abb. 7) der Oberfläche der gegrubberten Böden nach Niederschlagsereignissen für die Wirksamkeit solcher Effekte.

Bei der Interpretation der Boden- und Ertragsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die bodenphysikalischen Untersuchungen einerseits auf einer einmaligen Beprobung beruhen und andererseits durch die langjährigen Bearbeitungsunterschiede, den zeitlichen Abstand zur letzten Bodenbearbeitung und die aktuelle Witterung beeinflusst sind. Im Unterschied dazu repräsentieren die Ernteerträge, die in Abhängigkeit von Fruchtfolge, Kulturart und Bodenbearbeitung erfasst wurden, den gesamten Auswertungszeitraum.

Am Standort Gülzow erweist sich das Wasser als wichtigster ertragsbegrenzender Faktor. Während der Hauptvegetationsperiode von April bis Juli fallen im langjährigen Mittel (1988–2017) 209 mm Niederschlag. Ein wassersparender Effekt der nichtwendenden Bodenbearbeitung wurde nur in einzelnen Kulturen und einzelnen Jahren wirksam. Im Unterschied dazu fand BARKUSKY (2008) in einem langjährigen Versuch in Brandenburg bei weitgehendem Verzicht auf den Pflug tendenziell höhere Erträge als beim jährlichen Pflügen. Dieser Effekt könnte durch vergleichsweise geringere natürliche Niederschläge, geringere Schluff- und Tongehalte der Böden und dem überwiegenden Anbau von Sommer-Kulturen (Kartoffeln, Zuckerrüben) in Brandenburg bedingt sein.

In der Literatur wird vor allem in Trockengebieten oder in Trockenperioden für die besonders flache Bearbeitung oder die Direktsaat im Gegensatz zum Pflügen und tiefer/



Abb. 6. Differenzierte Wasserinfiltration nach Niederschlagsereignis in den Bearbeitungsvarianten Pflug und Grubber



Abb. 7. Differenzierte Verschlammungsneigung der Bodenoberfläche nach Niederschlagsereignis in den Bearbeitungsvarianten Pflug (links) und Grubber, flach (rechts)

intensiver Grubberbearbeitung ein Ertragsvorteil herausgestellt und mit einer verbesserten Wasserführung und dem Verdunstungsschutz von Mulchauflagen begründet (PITTELKOW et al., 2014, DÜLL, 2014, BÖTTCHER et al., 2016, MOITZI et al., 2019) Vergleichbare, auf eine verbesserte Wasserversorgung der Kulturarten zurückführbare Ertragsvorteile sind am Gülzower Standort jedoch auch in der tiefen Grubbervariante zu beobachten. Allerdings sind die Unterschiede zwischen den beiden Grubbervarianten gering. Beide werden aufgrund der Anforderungen der engen Fruchtfolge im Versuch eher als eine intensive Mulchsaat ausgeführt, was eine Erklärung für die ähnlichen Ergebnisse sein könnte.

Der Ertragsnachteil der Pflugvariante für Winterweizen nach Silomais muss nicht (nur) auf ungünstige Wasserführung zurückgeführt werden. Vielmehr wird der nach Silomais häufig tief ausgetrocknete Boden mit dem Pflug an die Oberfläche geholt mit der Folge eines grobscholligen klutigen Saatbetts.

Die positiven Effekte des Pflugeinsatzes für den Ertrag des Winterweizens nach Vorfrucht Winterweizen sind bekannt und werden im Versuch bestätigt, ohne in jedem Jahr sichtbar zu werden.

Bei der wechselnden Bearbeitung mit nur einer Pflugfurche in den dreifeldrigen Fruchtfolgen erwies sich bei allen geprüften Kulturen die jeweils zuletzt durchgeführte Bearbeitung als dominant für die Ertragswirkung.

Fazit

Der unter den Standortbedingungen der jungpleistozänen Moränenlandschaft Mecklenburg-Vorpommerns durchgeführte langjährige Bodenbearbeitungsversuch zeigte deutliche Differenzierungen der bodenphysikalischen Eigenschaften in Abhängigkeit von Eingriffsintensität und -tiefe. Jährliches Pflügen bewirkte im Oberboden erwartungsgemäß Auflockerungen sowie geringere Wasser- und höhere Luftvolumenanteile. Die nichtwendende Bearbeitung mittels Grubber sowie die wechselnde Bearbeitung mit Grubber und Pflug zeichneten sich durch bessere Tragfähigkeit, aber auch erhöhte Dichtlagerung des Oberbodens und aus. Die nichtwendende Bodenbearbeitung auf Sandböden stellt daher besondere Anforderungen an die Bewirtschaftung.

Eine Reduzierung der jährlich wendenden Bodenbearbeitung bis zum Pflugverzicht ist unter den gegebenen Standortbedingungen ohne weitgehende Ertragsverluste möglich. Der periodische Wechsel aus wendender und nichtwendender Bodenbearbeitung lässt bei langfristiger Anwendung günstige bodenphysikalische Eigenschaften erwarten. Die Ertragsbildung der landwirtschaftlichen Kulturen scheint jedoch vorrangig von kurzfristigen Effekten der jeweils letzten Bodenbearbeitung beeinflusst. Für die langfristigen Ertragswirkungen reduzierter Bodenbearbeitung ist die Fruchtfolge maßgebend. Dabei ist mit nachteiligen Ertragseffekten vor allem in der ungünstigen Fruchtfolge Weizen nach Weizen zu rechnen.

Danksagung

Wir danken Frau Dr. Andrea ZENK, Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei MV, Sachgebiet Biostatistik und Sortenwesen, für die Unterstützung bei der statistischen Verrechnung.

Literatur

- AG BODEN, 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Verbesserte und erweiterte Auflage, Hannover 438 S.
- AMELS, L., 2003: Untersuchungen zum Einfluß unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren auf den Durchdringungswiderstand und die Infiltrationskapazität des Bodens. Bachelorarbeit. Universität Rostock. Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät.
- BALL, B.C., D.J. CAMPBELL, J.T. DOUGLAS, J.K. HENSHALL, M.F. O'SULLIVAN, 1997: Soil structural quality, compaction and land management. *European Journal of Soil Science*, **48**, 593–601.
- BARKUSKY, D., 2008: Bewirtschaftungsversuch V760. Untersuchung von Anbausystemen unterschiedlicher Bewirtschaftungsintensität hinsichtlich ihrer Ertragsfähigkeit und Klimarelevanz. In: Dauerfeldversuche in Brandenburg und Berlin. Beiträge für eine nachhaltige landwirtschaftliche Bodennutzung. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg. Potsdam, 109–115.
- BODSCHG, 1998: Gesetz zum Schutz des Bodens BUNDESBODENSCHUTZGESETZ. Bundesgesetzblatt, Teil I Nr. 16., Bonn 1998.
- BERNER, A., I. HILDERMANN, A. FLIEßBACH, L. PFIFFNER, U. NIGGLI, P. MÄDER, 2008: Crop yield and soil fertility response to reduced tillage under organic management. *Soil & Tillage Research* **101**, 89–96.
- BÖTTCHER, F., M. SCHMIDT, E. MÜLLER, F. FISCHER, G. SCHMIDT, S. HAMBERGER, B. LOIBL, 2016: Bodenbearbeitung und Wasserhaushalt – Ergebnisse von Untersuchungen im mittelsächsischen Hügelland und auf der Querfurter Platte. In: Kurzfassungen der Meteorologentagung DACH. Berlin, 14.-18.03.2016.
- BRUNOTTE, J., 2007: Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide. *Landbauforschung Völknerode*, SH **305**. 159 S.
- BUNDESSORTENAMT, 2000: Richtlinien für die Durchführung von landwirtschaftlichen Wertprüfungen und Sortenversuchen. Hannover: Landbuch-Verlag.
- CRAMER, B., 2006: Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen. Diss. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- DÜLL, E., H. FLAIG, 2014: Bodenwasserhaushalt und konservierende Bodenbearbeitung. KLIMOPASS-Berichte. Projektnr.: 45003080 39/23. Online unter: <http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/>.
- EHLERS, W., K. SCHMIDTKE, R. RAUBER, 2003: Änderung der Dichte und Gefügefunktion südniedersächsischer Lössböden unter Ackerntzung. *Landnutzung Landentw. 44*, 9–18.
- EMMERLING, C, U. HAMPL, 2002: Wie sich reduzierte Bodenbearbeitung auswirkt. *Ökologie & Landbau* **124** (4), 19–23.
- FRATERS, B., 1996: Generalized soil map of Europe. Aggregation of the FAO–Unesco soil units based on the characteristics determining the vulnerability to degradation processes. RIVM Report No. 481505006, Bilthoven, The Netherlands, p. 60.
- GIESKA, M., R.R.VAN DER PLOEG, P. SCHWEIGERT, N. PINTER, 2003: Physikalische Bodendegradierung in der Hildesheimer Börde und das Bundes-Bodenschutzgesetz. *Ber. Landwirtsch.* **4**, 485–511.
- GÖTZE, P., J. RÜCKNAGEL, O. CHRISTEN, 2013: Bodenstrukturzustand der unteren Ackerkrume auf langjährig konservierend und tiefenreduziert bearbeiteten Mitteldeutschen Ackerflächen. *Bodenschutz* **3** (13), 88–93.
- HARTGE, K.H., J. BACHMANN, 2004: Ermittlung des Spannungszustandes von Böden aus Werten des Eindringwiderstandes von Sonden. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **167**, 303–308.
- HARTGE, K.H., R. HORN, 1999: Die physikalische Untersuchung von Böden. Enke Stuttgart.
- HORN, R., 2009: Introduction to the special issue about soil management for sustainability. *Soil & Tillage Research* **102**, 165–167.
- JONES, R.J.A., G. SPOOR, A.J. THOMASSON, 2003: Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: a preliminary analysis. *Soil & Tillage Research* **73** (1–2), 131–143.

- KUHWALD, M., M. BLASCHEK, R. MINKLER, Y. NAZEMTSEVA, M. SCHWANEBECK, J. WINTER, R. DUTTMANN, M.J. GOSS, 2016: Spatial analysis of long-term effects of different tillage practices based on penetration resistance. *Soil Use and Management* 32 (2), 197-240-249.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), 2015: Bodenbearbeitung und Bestellung. Definition von Bodenbearbeitungs- und Bestellsystemen. KTBL-Fachartikel.
- LEBERT, M., 2010: Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. UBA-TEXTE 51/2010, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- LEBERT, M., J. BRUNOTTE, C. SOMMER, C., 2004: Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr. UBA Texte 46/04. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- LORENZ, M., J. BRUNOTTE, T. VORDERBRÜGGE, R. BRANDHUBER, H.-J. KOCH, M. SENGER, N. FRÖBA, F.-J. LÖPMEIER, 2016: Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens – Grundlagen für ein bodenschonendes Befahren von Ackerland. *Landbauforsch Appl Agric Forestry Res.* 2 (66), 101-144.
- LUNG MV (Landesamt für Umwelt, Natur und Geologie Mecklenburg-Vorpommern), 2005: Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg-Vorpommern. Bodenverdichtung.
- MC VAY, K.A., J.A. BUDDE, K. FABRIZZI, M.M. MIKHA, C.W. RICE, A.J. SCHLEGEL, D.E. PETERSON, D.W. SWEENEY, C. THOMPSON, 2006: Management effects on soil physical properties in long-term tillage studies in Kansas. *Soil Science Society of America J.* 70, 434-438.
- MICHEL, V., A. ZENK, J. SCHMIDTKE, 2007: Gülzower PIAFStat-Verfahren. Standard der Versuchsauswertung in Deutschland. In: Mitteilungen der LFA, 37, 61-71.
- MICHEL, V., A. ZENK, 2006: Verfahren zur Auswertung von Feldversuchen mit Methoden der Geoinformatik und Geostatistik. Forschungsbericht 6/03. Gülzow.
- MOITZL, G., R.W. NEUGSCHWANDTNER, H.-P. KAUL, H. WAGENTRISTL, 2019: Energy efficiency of winter wheat in a long-term tillage experiment under Pannonian climate conditions. *European Journal of Agronomy* 103, 24-31.
- MOSADDEGHI, M.R., A.J. KOOLEN, M.A. HAJABBASI, A. HEMMAT, T. KELLER, 2007: Suitability of pre-compression stress as the real critical stress of unsaturated agricultural soils. *Biosystems Engineering* 98, 90-101.
- MUNLV NRW, 2009: Ministerium für Umwelt, Natur, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein – Westfalen, Bodenverdichtung vermeiden, Bodenfruchtbarkeit erhalten und wiederherstellen, Broschüre November 2009, 6-24.
- NEUBAUER, W. 2003: Dauerhafter Pflugverzicht auf Sandböden. *Landwirtschaft ohne Pflug*, 3, 10-15.
- NEUBAUER, W., 2000: Komplexe Wirkung aufwandsgeminderter Bodenbearbeitung auf die Verfahrenseffektivität in ausgewählten Fruchtfolgen. Forschungsbericht der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern. unveröffentlicht.
- PETELKAU, H., K. SEIDEL, M. FRIELINGHAUS, 2000: Ermittlung des Verdichtungswiderstands von Böden des Landes Brandenburg und Bewertung von Landmaschinen und landwirtschaftlichen Anbauverfahren hinsichtlich der Beeinträchtigung von Bodenfunktionen durch die Verursachung von schwer regenerierbaren Schädverdichtungen. ZALF Müncheberg, 145 S.
- PITTELKOW, C.M., X. LIANG, B.A. LINQUIST, K.J. VAN GROENIGEN, J. LEE, E. LUNDY, N. VAN GESTEL, J. SIX, R.T. VENTEREA, C. VAN KESSEL, 2014: Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. doi:10.1038/nature13809 (online); *Nature* 517, 365-368 (2015).
- SCHMIDT, H., C. BRUNS, K. WILBOIS, 2015: Eindringwiderstand ökologisch bewirtschafteter Ackerböden – Einfluss von Standort und Bewirtschaftung sowie Auswirkungen auf den Ertrag von Wintergetreide. 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Beitrag archiviert unter <http://orgprints.org/view/projects/int-conf-wita-2015.html>.
- SEELIG, A., 2015: Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf physikalische Bodeneigenschaften am Standort Gülzow (Mecklenburg-Vorpommern), Masterarbeit. Universität Rostock. Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät.
- TEBRÜGGE, F., R.-A. DUERING, 1999: Reducing tillage intensity – a review of results from a long-term study in Germany. *Soil & Tillage Research* 53, 15-28.
- STRUDLEY, M.W., T.R. GREEN, & J.C. ASCOUGH II, 2008: Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil & Tillage Res.* 99, 4-48.
- VAN DEN AKKER J.J.H., A. CANARACHE, 2001: Two European concerted actions on subsoil compaction. *Landnutzung und Landentwicklung*, 42 (1), 15-22.
- VAN LYNDEN, G.W.J., 2000: Soil Degradation in Central and Eastern Europe. FAO, ISRIC.
- Umweltbundesamt (UBA), 2015: Bodenzustand in Deutschland. 104 S., Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. www.umweltbundesamt.de/publikationen/bodenzustand-in-deutschland.
- VOORHEES, W.B., W.W. NELSON, G.W. RANDALL, 1986: Extent and persistence of subsoil compaction caused by heavy axle loads. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50, 428-433.

© Der Autor/ Die Autorin 2019.

 Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt wird (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

© The Author(s) 2019.

 This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).