

Berichte 2019

1

Neues aus Untersuchung und
angewandter Forschung

10 Jahre Dauerversuch zur Bodenbearbeitung in Butteltstedt



Erschienen als Beiheft zur Schriftenreihe
„Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen“.

Impressum

Herausgeber: Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum
Naumburger Str. 98, 07743 Jena
Tel.: 0361 574041-000, Fax: 0361 574041-390
Mail: postmaster@tlllr.thueringen.de

Bearbeiter: **Dr. Marcus Schindewolf und Karin Marschall**

Januar 2019

ISSN 0944 - 0348

Copyright:

Diese Veröffentlichung ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die des Nachdrucks von Auszügen und der fotomechanischen Wiedergabe, sind dem Herausgeber vorbehalten.

1 Einleitung

Der Bodenbearbeitungsversuch in Buttelstedt wurde 2008 von der TLL und dem TLPVG mit dem Ziel angelegt, die Wirkung nicht-wendender Bodenbearbeitungsverfahren mit Pflug-integrierten Bearbeitungsvarianten (jährliches oder bedarfsweises Pflügen) zu vergleichen. Es wurde die Wirkung der unterschiedlichen Bodenbearbeitung auf das Bodengefüge und Wasserhaushalt, Bodenbiologie, Nährstoffhaushalt, Ertrag, Pflanzenschutz sowie Ökonomie untersucht.

Der ausgewählte Standort gilt aufgrund seiner hohen Tongehalte (30%) für pfluglose Bearbeitungsformen als bedingt geeignet, da über längere Zeiträume eine Reduktion der Durchlässigkeit und Durchwurzelungstiefe auftreten kann (Paul et al. 2012). Eine Auswertung erster Ergebnisse fand bereits nach vierjähriger Bewirtschaftung statt (Paul et al. 2012). Die Hauptaussagen sollen im vorliegenden Bericht nochmals mit Erweiterung der Datenbasis um weitere 6 Jahre überprüft und gegebenenfalls ergänzt werden.

Folgende Fragestellungen standen im weiteren Projektverlauf im Vordergrund:

- Welchen Einfluss hat die Art der Bodenbearbeitung auf die bodenphysikalischen Eigenschaften im Hinblick auf die Luft- und Wasserversorgung der Wurzel bzw. die Drainagefähigkeit des Bodens?
- Führen Verfahren der pfluglosen Bodenbearbeitung zu einer Schadverdichtung des Bodens?
- Sind die pfluglos bewirtschafteten Varianten ausreichend vor Bodenabtrag geschützt?
- Bilden sich abhängig von der Bodenbearbeitung Nährstoffschichtungen in der Krume aus, die nachteiligen Einfluss auf die Nährstoffversorgung haben?
- Welchen Einfluss hat die Bodenbearbeitung auf die Ertragsentwicklung in Abhängigkeit der Witterungsbedingungen?

2 Standort und Versuchsanordnung

Der 36 ha große Versuchsschlag befindet sich am nördlichen Ausgang der Ortschaft Buttstedt im Landkreis Weimarer Land in Mittelthüringen. Die Lage am Rand des Thüringer Beckens hat mit relativ geringen Jahresniederschlägen (520 mm) und durchschnittlichen Temperaturen von 9,2°C eine überwiegend negative Klimatische Wasserbilanz (KWB) von -138 mm/m² (25-jähriges Mittel 1994-2018) mit entsprechenden Konsequenzen für die ackerbauliche Nutzung zur Folge.

Der Versuch wurde auf einem Braunerde-Tschernosem in vier Streifen zu 6,1; 7,7; 10,7 und 11,7 ha angelegt (Abb. 2). Die Variante 1 wird jährlich gepflügt (Pflug). Nach Norden anschließend folgen die Variante 2, bedarfsweise gepflügt (Pflug_o), die Variante 3, bis 20 cm tief gegrubbert (Grubber_t) und Variante 4, bis 5 cm tief gegrubbert (Grubber_f). Die Tiefenangaben sind Zielwerte, wobei die reale Arbeitstiefe von den Toleranzen der Bodenbearbeitungstechnik bestimmt wird. Im Jahr 2012 wurden aus pflanzenbaulichen Gründen die Pflug- und die optionale Pflugparzelle miteinander vertauscht (Abb. 2), was gewisse Schwierigkeiten bei der Auswertung der Nährstoff und Ertragsdaten mit sich brachte.

Der Schlag wurde von 2005 bis 2008 Jahre komplett pfluglos bestellt und einheitlich bewirtschaftet. Weitere Behandlungsunterschiede außer der Bodenbearbeitung erfolgten nicht.

Untersucht wurden bis 2008 bis 2012

- der Gehalt an pflanzenverfügbaren Nährstoffen
- der pH-Wert
- der Gehalt an mineralischem Stickstoff und Schwefel
- der Regenwurmbesatz durch Austrieb mit 0,8%iger Formalinlösung (in 20 cm Tiefe) und Handauslese mit 10 Wiederholungen je Variante (ISO 23611-1 zit. bei Tischer 2006)
- die bodenbiologische Gesamtaktivität (Köderstreifentest)
- Feldmausauftreten
- Bonituren des Unkrautbesatzes sowie des Krankheits- und Schädlingsbefalls
- Ertrag je ha, Tausendkornmasse und Inhaltsstoffe

bis 2012 und jeweils 2013 und 2016

- Bodenphysikalische Untersuchungen (kf-Wert vertikal, Wassergehalt in den Saugspannungsstufen pF 1,8, 2,5 und 4,2, Trockenrohdichte, Substanzdichte, Aggregatdichte
- der Gehalt an organischem Kohlenstoff bis 30 cm Tiefe in Schichten zu je 10 cm

und 2018

- Aggregatstabilität nach DIN 19683-16:2009-01 und Gehalt an organischem Kohlenstoff bis 20 cm Tiefe.

Die Entnahme der Bodenproben für die Analyse des mineralischen Stickstoffs erfolgte im Frühjahr und Herbst, die für die übrigen Nährstoffe im späten Frühjahr.

Das Bodengefüge wurde an vier Profilen je Variante in vier Schichten (obere Krume, untere Krume, Krumenbasis und krumennaher Unterboden) untersucht. Dazu wurden je Schicht und Profil sechs Stechzylinder (Volumenproben 250 cm³) in vertikaler Richtung entnommen. Die Probenahmezeitpunkte zwischen 2009 und 2012 lagen überwiegend im März, wohingegen 2013 Ende April und 2016 Mitte Mai beprobt wurde (Abb. 1).

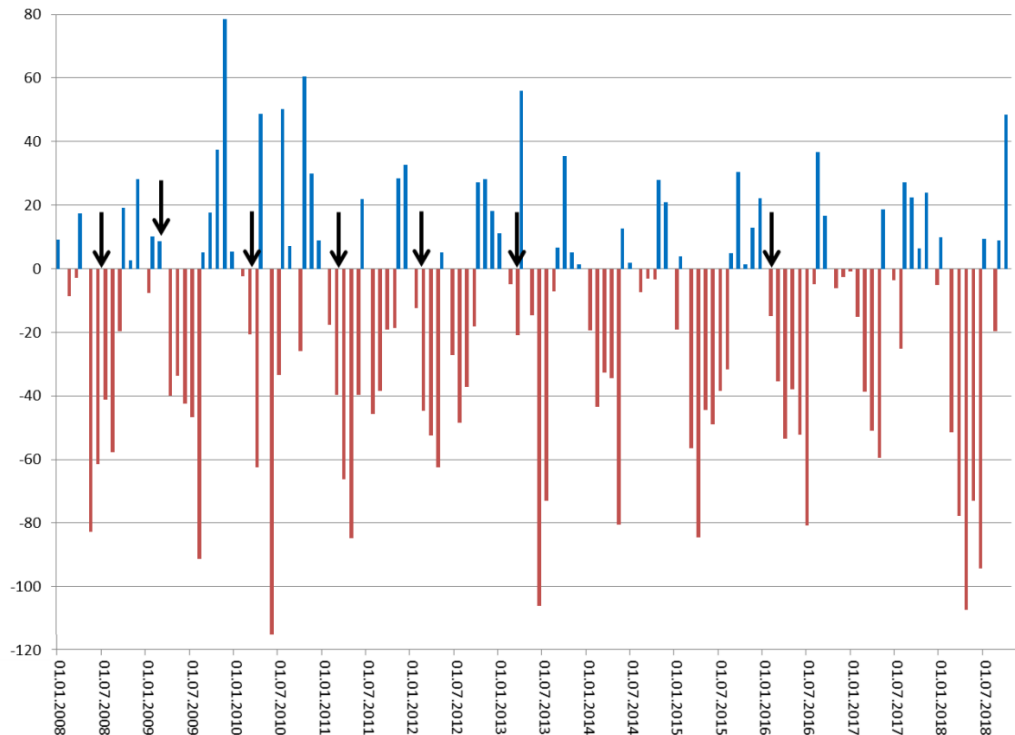


Abbildung 1: Klimatische Wasserbilanz (KWB) im Versuchszeitraum und Probenahmeterminen (schwarze Pfeile)

Es ist davon auszugehen, dass die relativ späten Beprobungstermine der Jahre 2013 und 2016 aufgrund fortgeschrittener Sackungsprozesse, einen Einfluss vor allem auf die bodenphysikalischen Untersuchungsergebnisse haben.

Die Erfassung der Erträge erfolgte mittels Ertragskartierung vom Mähdrescher, wobei die Datenpunkte auf eine Kernparzelle für jede Bearbeitungsvariante zugeschnitten und per Basis-Spline (QGIS 2.14) auf ein Raster interpoliert wurden. Das Ergebnistraster wurde unter Anwendung der Zonal-Statistik (ArcGIS 10.4.1) auf die jeweilige Kernparzelle gemittelt.

Die Anbaufolge ist getreidedominiert mit Winterraps (2008), Winterweizen (2009); Sommergerste (2010 und 2011); Erbsen (2012), Winterweizen (2013), Winterraps (2014), Winterweizen (2015), Sommergerste (2016), Erbsen (2017) und Winterweizen (2018).

Die Grundbodenbearbeitung erfolgte jeweils in der zweiten Septemberhälfte, um Ausfallkulturen wirkungsvoll mechanisch bekämpfen zu können. Aus diesem Grund war der Einsatz des Totalherbizides Glyphosat nur im Erntejahr 2017 erforderlich. Der Schlag wird neben der üblichen mineralischen Düngegabe alle drei Jahre mit jeweils 30 t/ha Gülle und Stallmist gedüngt. Eine Kalkung erfolgt praxisüblich nach Bedarf. Aus betriebswirtschaftlichen Gründen war auf allen Varianten eine jährliche Getreidestrohabfuhr nötig.

3 Ausgangssituation

Eine Interpretation bodenchemischer und bodenphysikalischer Parameter setzt die genaue Kenntnis zu der bodengeologischen und bodengenetischen Bedingungen voraus. Dazu wurde das Versuchsfeld im August 2008 in zwei Trassen je Variante in Längsrichtung begangen, bis 60 cm tief angebort und beprobt. Die Bodenentwicklung erfolgte aus Löss als Deckschicht (max. 60 cm mächtig) mit Beimengungen des mittleren Keuper über Sedimenten des mittleren Keuper. Der Ap-Horizont wird über alle Varianten hinweg aus Lösslehm (stark toniger Schluff /Ut4-stark schluffiger Ton /Tu4) angesprochen. Darunter lagert in der Regel kalkhaltiger Löss (stark toniger Schluff/U4). Die Darstellung der Ackerzahlenverteilung aus der Bodenschätzung (Abb. 2) lässt vermuten, dass geringwertige Bereich mit geringen Lössmächtigkeiten korrespondieren. Paul et al. (2012) haben für ihre Untersuchungen 50 cm als minimale Auflage angegeben.

Die Körnung der ansstehenden Sedimente des mittleren Keuper werden als schluffiger Lehm (Lu) angesprochen. Die Hauptbodenform bildet der Braunerde-Tschernosem, der auf den flachgründigen Standorten mit Pararendzinen vergesellschaftet ist. Hangabwärts schließen sich Kolluvisole an, die auf periodische Umlagerungsprozesse durch Bodenabtrag auf der Fläche schließen lassen. Diese Heterogenität der Bodenbeschaffenheit äußert sich auch in der Verteilung der Ackerzahlen auf dem Standort, die überwiegend die Mächtigkeit der Lössauflage bzw. der Kolluvien kennzeichnen. Diese ist in den von Abtragungsprozessen geprägten Kuppen- und Mittelhangbereichen geringer, als in den morphologischen Senkenstrukturen.

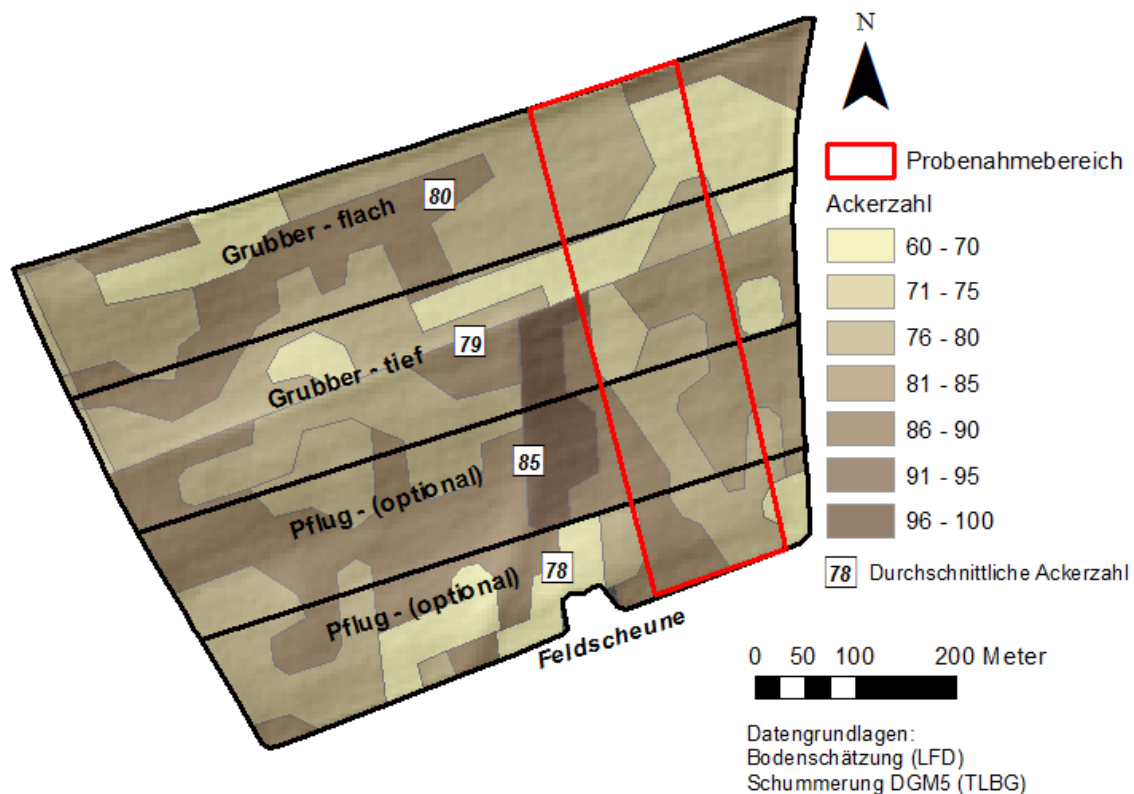


Abbildung 2: Versuchsfeld mit Kennzeichnung der Bodenbearbeitungsvarianten, Ackerzahlen der Bodenschätzung und dem Probenahmebereich

Da die Fläche von 2005 bis 2008 pfluglos bestellt wurde, galt es in einem zweiten Schritt anhand einer Beprobung an drei Profilen je Variante die Ausgangssituation darzustellen. Aufgrund der spätsommerlichen Probenahme vor Bestellung des Winterweizens lassen sich die Ergebnisse zwar nicht ohne Einschränkungen mit den anschließenden Probenahmen vergleichen, liefern aber Rückschlüsse auf die, aus versuchstechnischer Sicht anzustrebende, Homogenität der Fläche.

Im Hinblick auf die Parameter Lagerungsdichte und Luftkapazität ist diese Homogenität durchaus gegeben, beide (Abb. 3) zeichnen einen charakteristischen tiefenabhängigen Verlauf. Während die Lagerungsdichten in der oberen Krume mit $1,39 \text{ g/cm}^3$ in Richtung untere Krume ($1,45 \text{ g/cm}^3$) und Krumenbasis ($1,42 \text{ g/cm}^3$) leicht zunehmen, liegen diese im Unterboden bei $1,34 \text{ g/cm}^3$ mit der größten Streubreite zwischen den Varianten, was einen ersten Eindruck auf die Variabilität des Standorts zulässt. Die Verteilung der Grobporen $>50 \mu\text{m}$ (Luftkapazität) verhält sich dementsprechend indirekt proportional zur Lagerungsdichte (Abb. 3). Eine Schadverdichtung vor Versuchsbeginn kann ausgeschlossen werden.

Die starke Schwankung der gesättigten Leitfähigkeiten (Abb. 3) zwischen den Varianten kann, da eine homogene Bodenbearbeitung über alle Varianten hinweg vorausgesetzt wird, nicht ausreichend erklärt werden. Wahrscheinlich ist eine wechselnde mechanische Vorbelastung in Verbindung mit Substratunterschieden. Dies wird durch die Auswertung der Porengrößenverteilung auf der Fläche zusätzlich unterstrichen (Abb. 4).

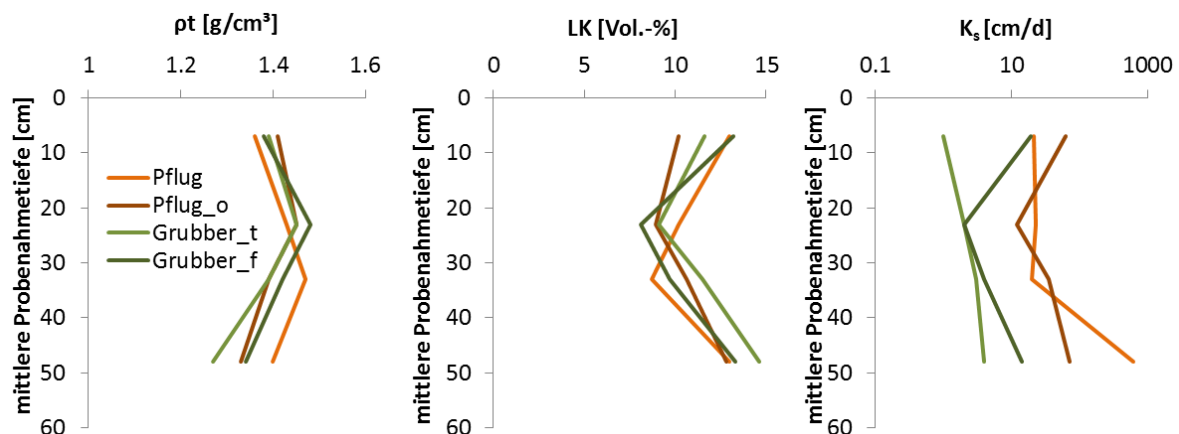


Abbildung 3: Ausgangszustand der Lagerungsdichte (pt), Luftkapazität (LK) und gesättigten Leitfähigkeit (K_s) in Abhängigkeit der Tiefenstufe und späterer Bearbeitungsvariante

Deutlich zu Tage treten diese Unterschiede in der Porengrößenklasse $<50 \mu\text{m}$ (resp. $pF < 1,8$; Abb. 4). Enge, d.h. langsam dränende Grobporen sind besonders in der Krume, der im Nachhinein pfluglos bewirtschafteten Varianten, geringer. Auch bei der Verteilung der Mittelporen (Abb. 4) ist ein räumlicher Gradient in nördliche Richtung erkennbar, was auf eine unterschiedliche Vorbelastung der Fläche zurückzuführen sein kann. Die Feinporenvolumina sind überwiegend substratabhängig, weshalb die indirekt proportionale Verteilung der Feinporen (Abb. 4) in gleicher Richtung auf eine heterogene Substratverteilung der Fläche über alle Horizonte hinweg schließen lässt.

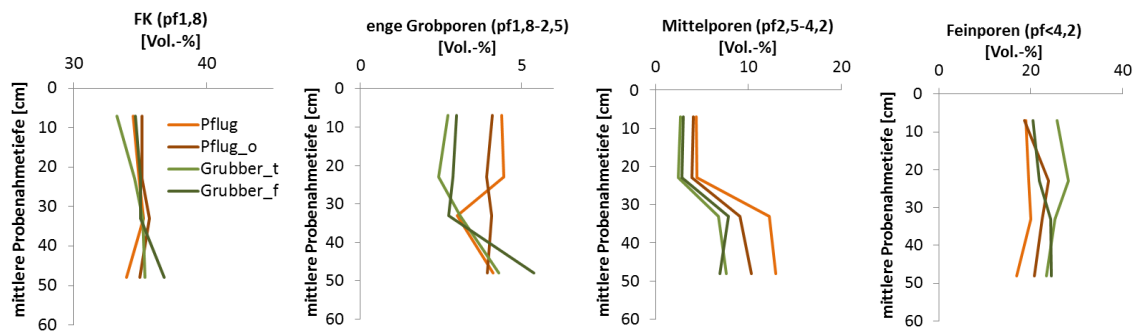


Abbildung 4: Ausgangszustand der Feldkapazität (pF1,8), enge Grobporen (pF1,8-2,5), Mittelporen (pF2,5-4,2) und Feinporen (pF>4,2) in Abhängigkeit der Tiefenstufe und späterer Bearbeitungsvariante

Zur Beurteilung der Wasserleitfähigkeit vor Beginn des Versuches existieren nur wenige Daten aus 2008, die in Abbildung 5 als relative Häufigkeiten, orientiert an den Durchflussklassen der KA5 (Ad-hoc AG Boden), dargestellt sind.

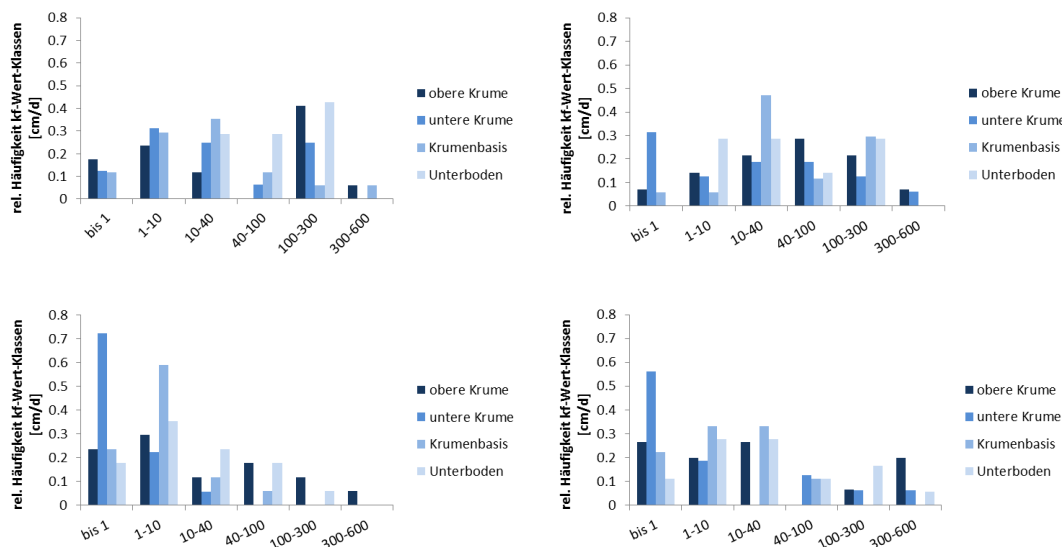


Abbildung 5: Relative Häufigkeiten der Kf-Wertklassen bezogen auf die beprobte Schicht der Pflugparzelle (oben links), optional gepflügten Parzelle (oben rechts), tief gegrubberten Parzelle (unten links) und der flach gegrubberten Parzelle (unten rechts)

Auffallend ist an dieser Stelle eine überwiegend linksschiefe bis normale Verteilung der Durchlässigkeitsklassen der Pflugvarianten mit einer guten Wasserzügigkeit gegenüber eher rechtsschiefen Verteilungen in den Grubbervarianten, verbunden mit einem teilweise gehemmten Wasserfluss. Da alle Varianten bis zum Probenahmezeitpunkt 3 Jahre homogen behandelt wurden, sind diese Unterschiede substratbedingt oder basieren auf einer unterschiedlichen Vorbelastung.

Die bodenchemischen Eigenschaften wurden anhand einer Mischprobe aus Bohrstockproben pro Variante bestimmt. Die Gehalte der Makronährstoffe und C_{org} nehmen erwartungsgemäß mit der Tiefe ab. Mineralischer Stickstoff und organischer Kohlenstoff liegen in der Krume relativ homogen vor (Abb. 6). Das reinge C/N-Verhältnis (ca. 11) lässt auf hohe Mineralisierungsraten in der Krume schließen. Der pH-Wert steigt mit der Probenahmetiefe im weniger entkalkten Unterbodenhorizont erwartungsgemäß an, wobei die Pflugvariante insgesamt den höchsten pH-Wert aufweist ($pH > 7,2$). Die Ergebnisse der Bodenreaktion sowie der Phosphor- und Kaliumgehalte legen den Schluss nahe, dass ein räumlicher Gradient in nordwestliche Richtung existiert, der keinen unwesentlichen Einfluss auf die anschließenden Untersuchungsergebnisse hat (Abb.6). Die Versorgungssituation mit Phosphor (P) und Kalium (K) ist trotz der angesprochenen Heterogenitäten und kopflastiger Schichtung des K in der Krume für alle Parzellen gut.

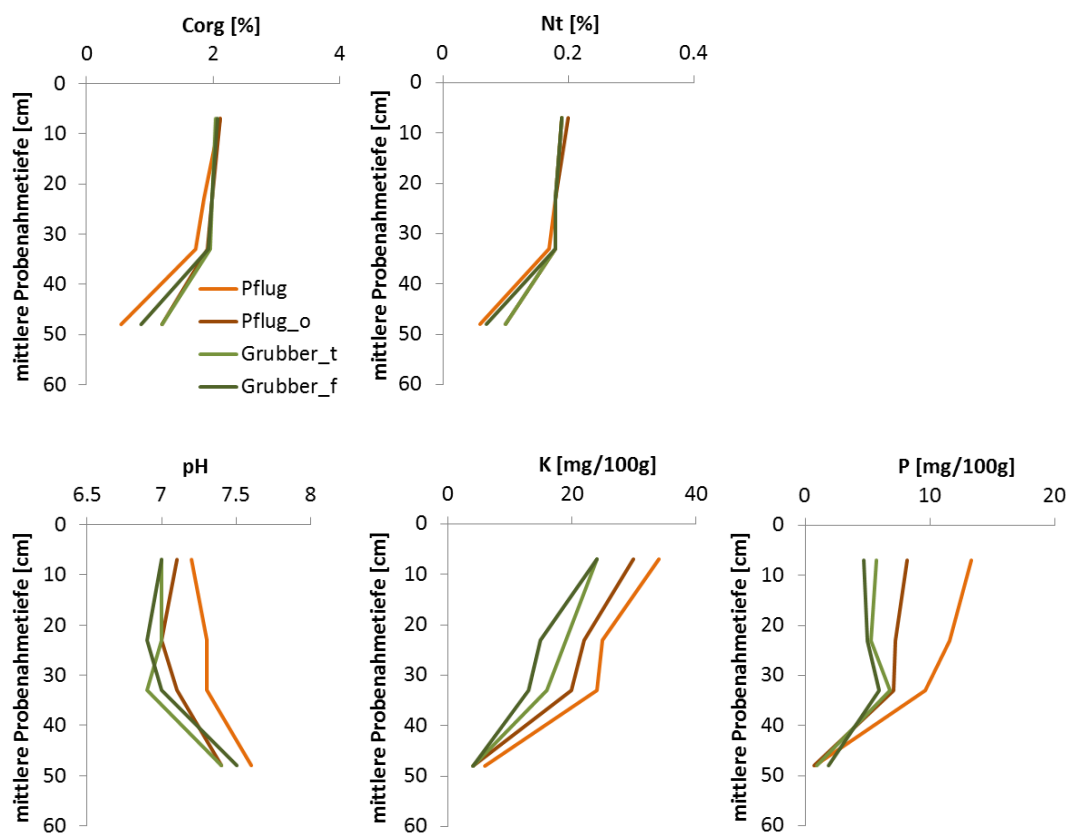


Abbildung 6: Ausgangszustand der Bodenchemie in Abhängigkeit der Tiefenstufe und späterer Bearbeitungsvariante

$CaCl_2$ -lösliches Magnesium ist über alle Varianten hinweg mit >20 mg/100 g aufgrund der hohen Magnesiumhintergrundgehalte des Ausgangsmaterials (mittlerer Keuper) ausreichend vorhanden.

5 Ergebnisse

5.1 Lagerungsdichte und Luftkapazität

Das Bodengefüge ist stark abhängig von der Art der Bodenbearbeitung. Alle Bearbeitungsvarianten reagieren ausgeprägt auf die Wirkung des Bearbeitungsgerätes in der jeweilig aktiven Krume (Abb. 7).

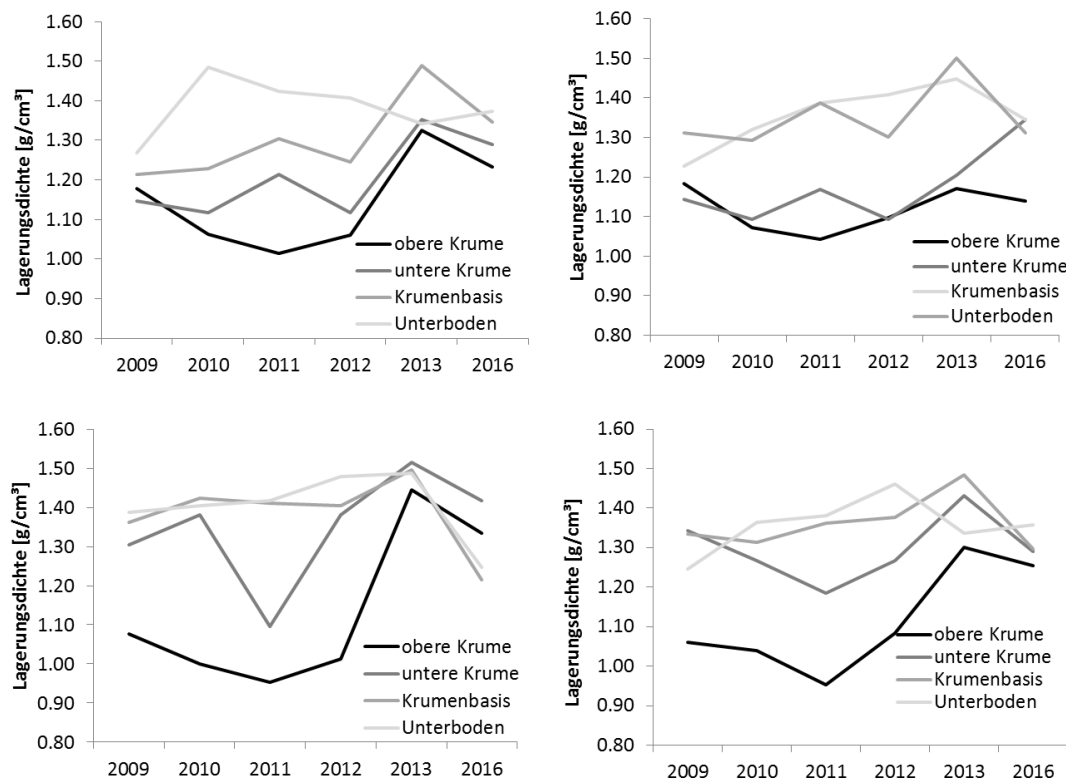


Abbildung 7: Entwicklung der Lagerungsdichten der Pflugparzelle (oben links), optional gepflügten Parzelle (oben rechts), tief gegrubberten Parzelle (unten links) und der flach gegrubberten Parzelle (unten rechts)

Diese Lockerung ist besonders in den Jahren 2009 bis 2012 ausgeprägt und nähert sich in den Jahren 2013 und 2016 dem Ausgangszustand von 2008 an (Abb. 8). Ursächlich für dieses Verhalten ist der späte Probenahmeterrmin 2013 (27. April) und 2016 (13. Mai) im Vergleich zu den relativ frühen Terminen der übrigen Jahre (Anfang-Mitte März). Basierend auf diesen Befunden ist davon auszugehen, dass Sackungsprozesse durch fortgeschrittene Austrocknung auf den Flächen den Effekt der unterschiedlichen Bodenbearbeitung in der Krume deutlich überlagern, was von Bernhardt et al. (2008) in vergleichbaren Untersuchungen ebenfalls nachgewiesen werden konnte.

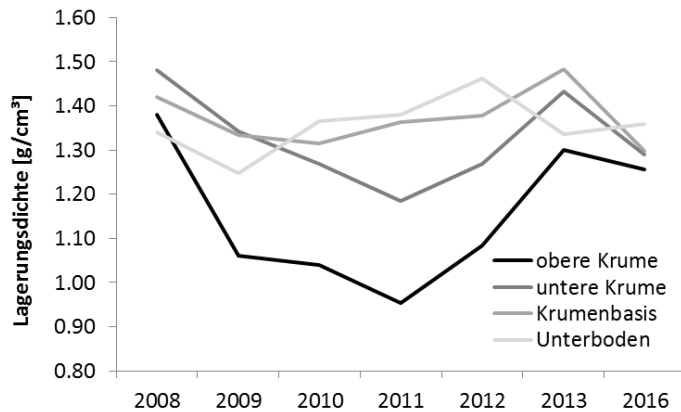


Abbildung 8: Entwicklung der Lagerungsdichte auf der flach gegrubberten Parzelle mit 2008.

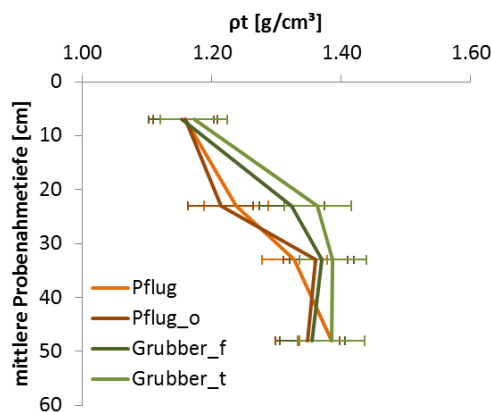


Abbildung 9: Mittlere Verteilung der Lagerungsdichte (pt) als Funktion der Beprobungstiefe und Angabe der Konfidenzintervalle bei 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit.

Abbildung 9 gibt Aufschluss über die Tiefenverteilung der mittleren Lagerungsdichte (Sechs Probenahmejahre) für alle Varianten. Am deutlichsten unterschieden sich diese für die zweite Beprobungstiefe, die noch aktive Krume der wendenden bzw. die verlassene Krume der nicht wendenden Variante. Diese sind jedoch nur für die reine Pflug- und die flache Grubbertvariante statistisch signifikant.

Die Luftkapazitäten verhalten sich über alle Varianten erwartungsgemäß umgekehrt proportional zur Lagerungsdichte. In Jahren hoher Lockerung (2009-2012) ist diese vor allem in der gesamten oberen Krume sehr hoch (>20 Vol.-%) (Abb. 10 & 13). Dabei erreichen die Grubbertvarianten auch signifikant höhere Ergebnisse gegenüber der optionalen Pflugvariante. Mit zunehmender Tiefe sinken die Luftkapazitäten, im Mittel jedoch nicht unter generell hohe Werte. In der Krumenbasis und im Unterboden ist die Menge an weiten Grobporen über die Jahre hinweg, von 2011 und 2013 abgesehen, relativ ähnlich verteilt. Auffallend sind die geringeren, aber immer noch hoch eingestuftten Werte der Krume in den Jahren 2013 und 2016, die auf der Bodenbearbeitung nachgeordnete Verdichtungsprozesse (z.B. Sackung) zuzuschreiben sind (Abb. 14).

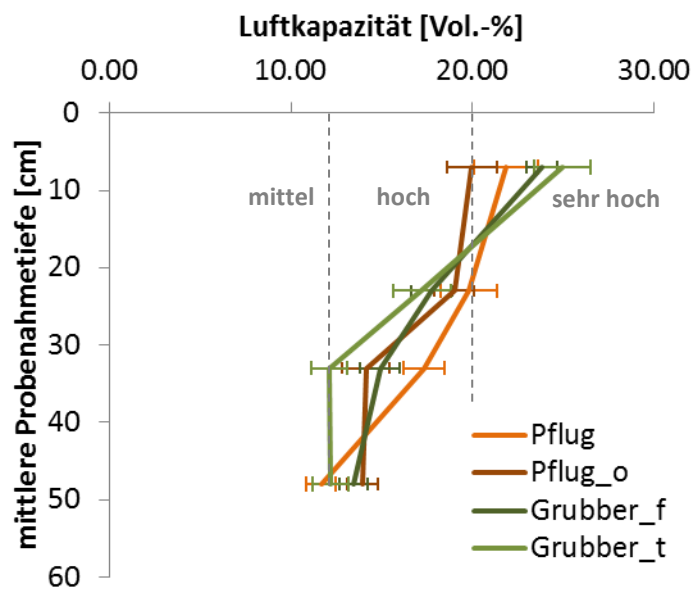


Abbildung 10: Mittlere Verteilung der Luftkapazität als Funktion der Beprobungstiefe und Angabe der Konfidenzintervalle bei 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit

5.2 Wasserleitfähigkeit

Der Einfluss der geänderten Bodenbearbeitung auf Infiltration und Wasserhaltefähigkeit ist nachweisbar. Allerdings streuen die K_f -Werte innerhalb der Varianten und Probejahre um mehrere Zehnerpotenzen, weshalb die Angabe des Geomittels nur bedingt geeignet ist. Die besonders hohen Werte von teilw. >600 cm/d deuten auf Makroporenfluss hin (Nitzsche et al. 2002), der biogenen Ursprung haben kann (z.B. Regenwurmgänge) bzw. auf Schrumpfrisse oder auf Störungen bei der Probenahme zurückzuführen ist. Aus diesem Grund wurde die Datenbasis auf Werte <600 cm/d reduziert. Abbildung 11 zeigt, basierend darauf, die geometrischen Mittelwerte. In der oberen Krume sind diese über alle Varianten hinweg hoch, mit Tendenzen zu höheren Werten in den nicht-wendenden Varianten. In der unteren Krume kehren sich diese Verhältnisse teilweise um, mit niedrigeren Werten für die tiefe Grubbervariante, verglichen mit den Übrigen. In der Krumbasis und im Unterboden treten die geringsten Werte auf.

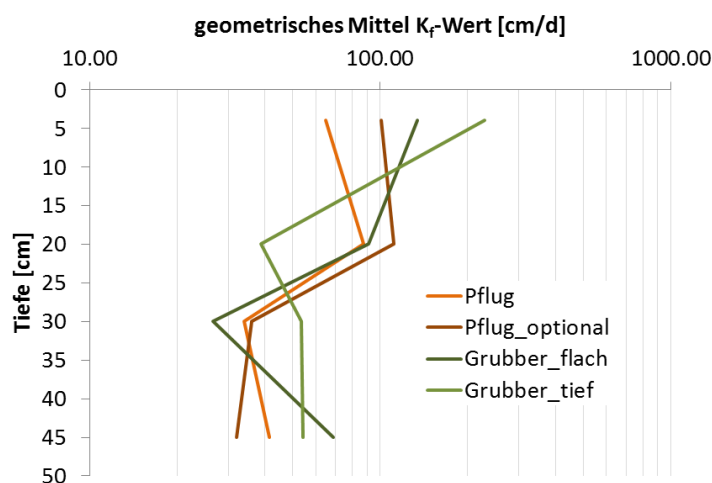


Abbildung 11: Geometrische Mittelwerte der Wasserleitfähigkeit (K_f) als Funktion der Beprobungstiefe

Zielführender als die bloße Interpretation der geometrischen Mittelwerte ist die Auswertung der relativen Klassenhäufigkeiten, orientiert an den Durchflussklassen der KA5 (Ad-hoc AG Boden), dargestellt in Abbildung 12.

Wie bereits in Paul et al. (2012) beschrieben, kennzeichnet eine Normalverteilung ein homogenes Gefüge (Einzelkorn bzw. lockeres Krümelgefüge), wobei eine mehrgipflige Verteilung eine dichte Matrix mit Vertikalporen anzeigt. Die Schiefe der Verteilung gibt an, welche Porengrößenklassen überwiegend an der Entwässerung beteiligt sind.

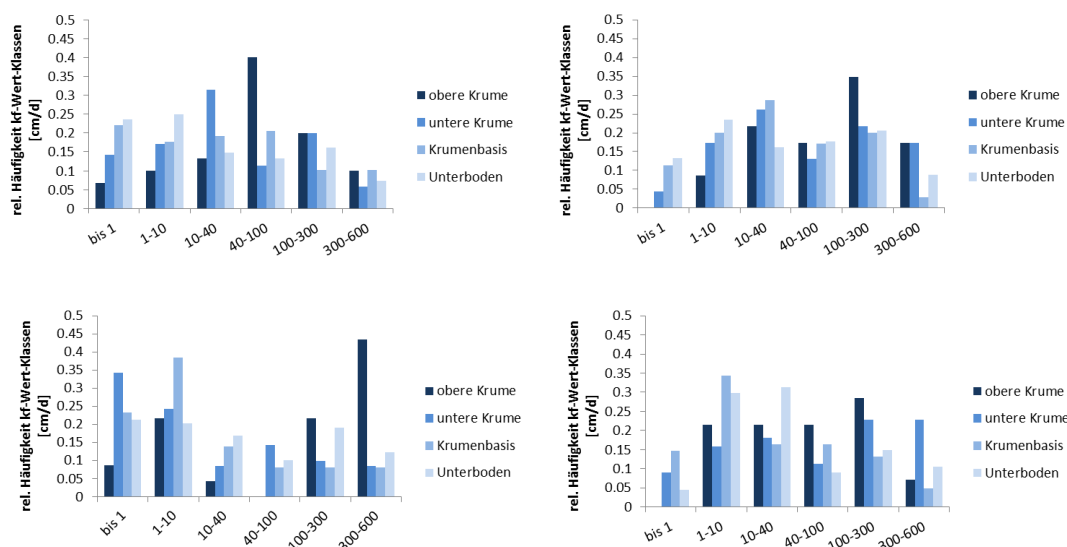


Abbildung 12: Relative Häufigkeiten der Kf-Wertklassen bezogen auf die beprobte Schicht der Pflugparzelle (oben links), der optional gepflügten Parzelle (oben rechts), der tief gegrubberten Parzelle (unten links) und der flach gegrubberten Parzelle (unten rechts)

Die Werte der Pflugparzelle liegen in der oberen Krume nahezu normalverteilt vor (Abb. 12), mit weniger als 20 % der Werte im Schadbereich bis 10 cm/d. Mit zunehmender Tiefe nimmt der Anteil der Werte im Schadbereich auf 31 % in der Unterkrume, auf 39 % in der Krumenbasis und auf 48 % im Unterboden zu. Darüber hinaus ändert sich die Verteilung der Werte hin zu einer rechtsschiefen Ausprägung (Krumenbasis und Unterboden), was für den Wasserfluss im Bodenprofil jedoch geringe negative Auswirkungen haben sollte.

Die Werteverteilung der optionalen Pflugparzelle ist nahezu über das gesamte Profil hinweg zweigipflig (Abb. 12). In der oberen Krume befinden sich weniger als 10 % der Werte im Schadbereich bis 10 cm/d. Mit zunehmender Tiefe steigen die Anteile der Werte in der Schadklasse auf 21 % in der Unterkrume, auf 31 % in der Krumenbasis und auf 37 % im Unterboden. Allerdings liegen zwei Drittel der Werte im optimalen Bereich, weshalb negative Auswirkungen auf den Wasserfluss im Profil insgesamt gering ausfallen dürften.

Die tief gegrubberte Variante zeichnet sich durch eine zweigipflige Verteilung der Werte in der Oberkrume aus (Abb. 12). Rund 30 % der Werte befinden sich im Schadbereich. Mit zunehmender Tiefe tritt eine rechtsschiefe Verteilung auf, die einen relativ hohen Anteil >50 % der Werte im Schadbereich aufweisen und zumindest temporär ungünstige Effekte auf die Wasserführung im Profil möglich machen. Allerdings sprechen die ebenfalls hohen Anteile in

den Schadklassen des Unterbodens dafür, dass Effekte unterschiedlicher mechanischer Vorbelastung, ähnlich, wie sie bereits im Kapitel 3 diskutiert wurden, gegenüber den Effekten der Bodenbearbeitung dominieren.

Die K_f -Werte der flach gegrubberten Variante sind in der Krume nahezu gleich verteilt (Abb. 12). Die Anteile in den Schadensklassen sind mit unter 30 % vergleichsweise gering, weshalb nicht mit negativen Effekten gehemmter Wasserführung zu rechnen ist. Die rechtsschiefe Verteilung in der Krumenbasis und dem Unterboden deutet, vergleichbar zur tief gegrubberten Variante auf Gefügeschäden hin, die bereits vor Umstellung der Bearbeitung vorhanden waren (Abb. 5).

5.3 Wasserspeicher

Der Wasserrückhalt findet im Boden in den Poren $<50\ \mu\text{m}$ statt (Feldkapazität). Veränderungen in diesen Porengrößenklassen sind im Bereich der engen Grobporen ($50\text{--}10\ \mu\text{m}$) und der Mittelporen ($10\text{--}2\ \mu\text{m}$) zu erwarten, die zwischen $pF\ 1,8$ und $pF\ 2,5$ bzw. zwischen $pF\ 2,5$ und $pF\ 4,2$ entwässern. Diese Poren können bei hohem Bodendruck zerstört werden bzw. auch bei der Gefügeentwicklung (Gare) entstehen und sind maßgeblich für die Wasserbewegung und Durchlüftung verantwortlich. Der Gehalt an Poren unterhalb $2\ \mu\text{m}$ ist überwiegend substratabhängig.

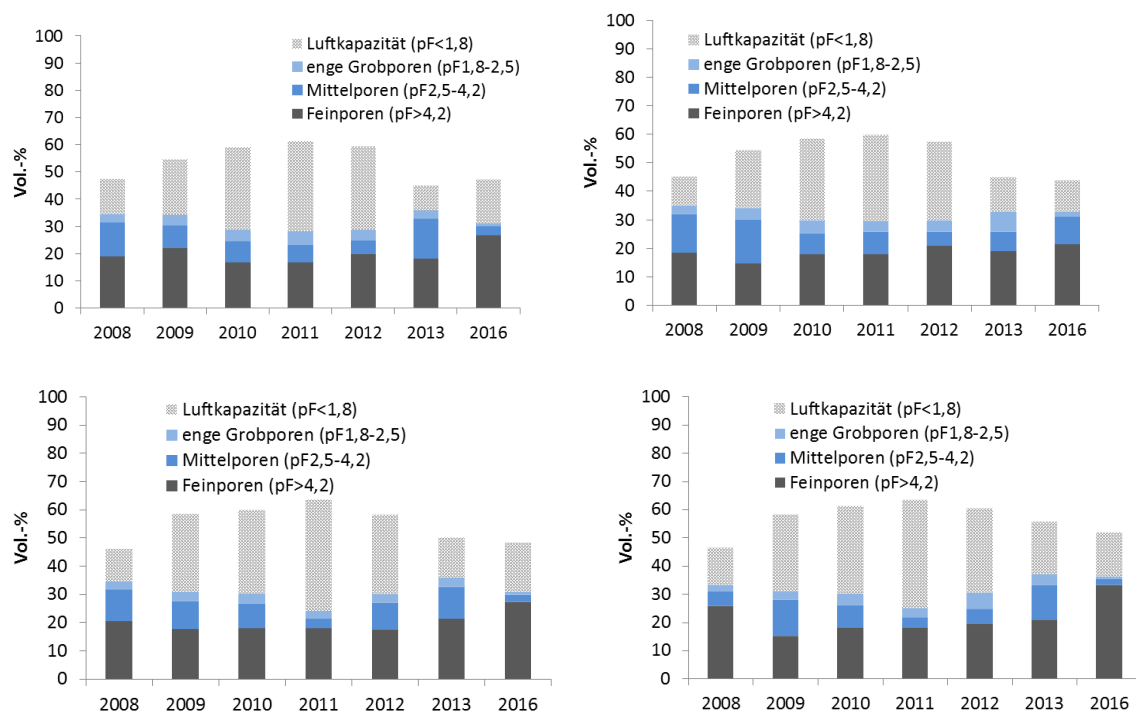


Abbildung 13: Jährliche Verteilung der Porengrößenanteile in Volumenprozent in der oberen Krume der Pflugparzelle (oben links), der optional gepflügten Parzelle (oben rechts), der tief gegrubberten Parzelle (unten links) und der flach gegrubberten Parzelle (unten rechts)

Die Entwicklung der Luftkapazität, ist wie oben (Kap. 5.1) bereits angesprochen, über alle Varianten hinweg ähnlich und besonders in Jahren früher Probenahmezeitpunkte hoch (Abb. 13). Die Verteilung der engen Grobporen schwankt ebenfalls zwischen den Einzeljahren, wenngleich in bedeutend geringerem Umfang. Diese nimmt mit der Intensität der Bodenbearbeitung von im Mittel 4,2 Vol.-% auf der Pflugparzelle bis auf 2,5 Vol.-% der flachen Grubberparzelle ab. Im Probejahr 2016 treten in allen Varianten die mit Abstand geringsten Werte auf. Ursächlich dafür ist aus Sicht der Autoren die Stechzylindernahme unter relativ trockenen Bedingungen im späten Frühjahr und die daraus resultierende Quellung der Probe im Wasserbad mit einhergehender Reduktion der engen Grobporen.

Die Mittelporen verhalten sich leicht gegenläufig mit hohen Werten in den nicht (teilweise) wendenden Varianten Pflug_o mit 8,2 Vol.-%, Grubber_t mit 7,0 Vol.-% und Grubber_f mit 8,6 Vol.-% gegenüber der ständig gepflügten Parzelle mit 5,9 Vol.-% (Abb. 13). Die Verteilung der Feinporen ist bearbeitungsunabhängig und spiegelt vielmehr die Substrateigenschaften wieder, die nicht nur zwischen den Parzellen sondern auch innerhalb dieser z.T. stark schwankten.

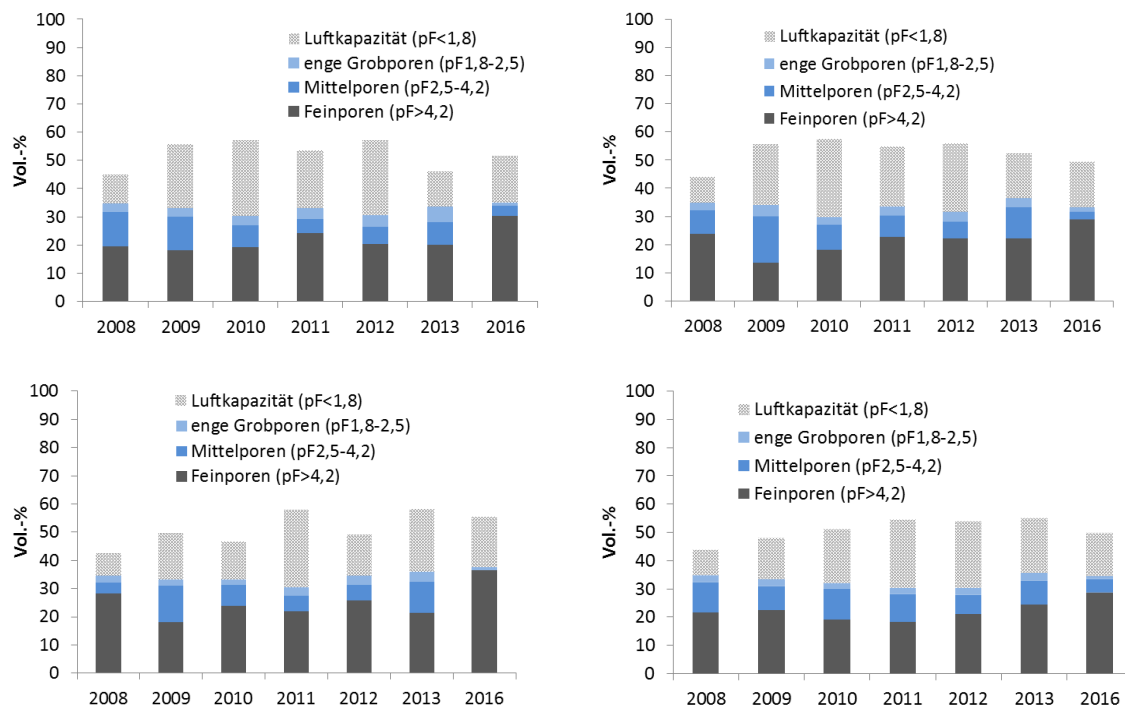


Abbildung 14: Jährliche Verteilung der Porengrößenanteile in Volumenprozent in der unteren Krume der Pflugparzelle (oben links), der optional gepflügten Parzelle (oben rechts), der tief gegrubberten Parzelle (unten links) und der flach gegrubberten Parzelle (unten rechts)

Wie oben bereits beschrieben, sind die mittleren Luftkapazitäten der unteren Krume bearbeitungsbedingt in den wendenden Varianten am höchsten (Abb. 14). Die engen Grobporen reagieren ebenfalls auf die Intensität der Bearbeitung mit den höchsten Werten (3,6 Vol.-%) in der Pflugparzelle zu 2,3 Vol.-% in der flach gegrubberten Parzelle. Die Reaktion fällt jedoch, verglichen mit jener der Oberkrume, geringer aus.

Die Verteilung der Mittelporen ist ähnlich zu jener der oberen Krume. Die geringsten Werte werden in der tief gegrubberten Parzelle mit 6,5 Vol.-% und die höchsten (8,9 Vol.-%) in der optionalen Pflugparzelle verzeichnet (Abb. 14). Die gegrubberten Parzellen liegen mit 8,4 Vol.-% und 7,2 Vol.-% für die Pflugparzelle dazwischen. Substratbedingte Unterschiede sind auch in dieser Schicht für die Verteilung der Feinporen nachzuweisen. Die geringsten Werte werden für die optionale Pflugvariante (20,7 Vol.-%) und die höchsten für die tiefe Grubbervariante (23,5 Vol.-%) erreicht. Diese Tendenz war bereits in den Daten der Ausgangssituation erkennbar und ist bei der Betrachtung der nutzbaren Feldkapazität zwingend zu beachten.

Über alle Varianten hinweg dominieren bodenartbedingt Feinporen in denen Bodenwasser für die meisten Pflanzen nicht mehr verfügbar ist. Unterschiede zwischen den Varianten sind vor allem auf wechselnde Tongehalte zwischen den Parzellen zurückzuführen.

Die mittlere Verteilung der für Pflanzen zugänglichen Porengrößenanteile ist für alle Varianten in Abbildung 15 dargestellt. Den im Mittel geringsten Anteil bildet Wasser in überwiegend schnell dränenden engen Grobporen. Ein Bearbeitungseinfluss ist vor allem in der unteren Krume zu verzeichnen. Die fehlende Lockerung in dieser Zone hat demnach signifikant zu einer wenn auch geringen Minderung (-1 Vol.-%) der Volumina innerhalb der Größenklasse 50-10 µm beigetragen. Essentiell für die Wasserversorgung der Pflanzen ist der Porengrößenbereich 10-2 µm, in welchem auch die höchsten bearbeitungsbedingten Unterschiede auftreten. In der Oberkrume werden die höchsten Werte auf der flach gegrubberten und der periodisch gepflügten Parzelle mit 8,6 Vol.-% bzw. 8,2 Vol.-% erreicht. Demgegenüber sind die Volumenanteile im Mittelporenbereich der rein gepflügten Parzelle um mind. 2,3 Vol.-% reduziert. Auch in der unteren Krume existieren diese Unterschiede, wenngleich diese nicht so deutlich ausfallen.

Die tief gegrubberte Variante schneidet gegenüber der flachen Variante signifikant schlechter ab (Abb. 15). Ein ähnliches Bild lässt sich in der Unterkrume und der Krumenbasis beobachten. Betrachtet man die anhaltend hohen Mittelporenanteile der periodisch gepflügten Variante im Unterboden auch vor dem Hintergrund hoher Werte verteilt das Gesamtprofil und vergleicht diese mit der Ausgangssituation des Versuches (Abb. 4), wird deutlich, dass das tendenziell bessere Abschneiden der periodisch gepflügten Parzelle überwiegend auf Bewirtschaftungsbedingungen vor Beginn des Versuches als auf die Bewirtschaftung während des Versuches zurückzuführen sind.

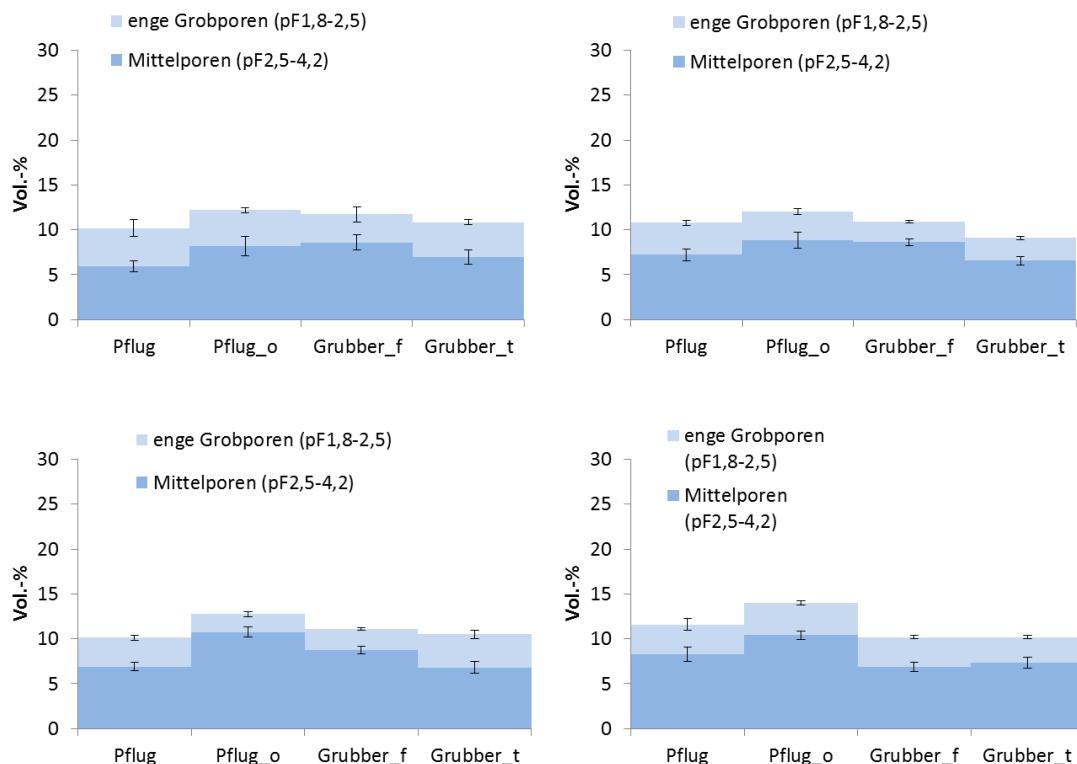


Abbildung 15: Mittlere Verteilung (2009-2013) der Porengrößen in Volumenprozent in der Oberkrume (oben links), der Unterkrume (oben rechts), der Krumenbasis (unten links) und dem Unterboden (unten rechts) und Angabe der Konfidenzintervalle bei 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit

Angaben zur nutzbaren Feldkapazität können abgesichert nur für den untersuchten Bereich bis 60 cm Tiefe gemacht werden. Demnach schneiden die Pflugparzelle und die tief gegrubberte Parzelle jeweils mit 43 mm/6 dm bzw. 42 mm/6 dm am schlechtesten ab. Die periodisch gepflügte Parzelle weist mit 57 mm/6 dm die höchsten Werte auf; die flach gegrubberte liegt mit 49 mm/6 dm dazwischen.

Vor dem Hintergrund der relativen guten Ausgangssituation der Pflugparzelle von 67 mm/6 dm im Jahr 2008, bedeutet der Pflugeinsatz nach drei Jahren nicht-wendender Tätigkeit einen Verlust an pflanzenverfügbarem Bodenwasser von 25 mm in den obersten 60 cm des Bodenprofils. Demgegenüber befinden sich die übrigen Varianten auf dem Niveau der Ausgangssituation, was darauf hindeutet, dass auch der permanente Verzicht auf wendende Verfahren für den untersuchten Boden keine negativen Auswirkungen hinsichtlich Bodenwasserspeicherung mit sich bringt.

5.2 Erosionsgefährdung

Die Art der Bodenbearbeitung hat, zahlreichen Studien zufolge (z.B. Teebrügge und Düring, 1999, Nitzsche et al., 2000), Auswirkungen auf die Erosionsgefährdung eines Standorts. Neben schädlicher Bodenverdichtung, die für den Standort ausgeschlossen werden kann, ist vor allem der Verbleib organischen Materials an der Bodenoberfläche zum Schutz vor Verschlammung und die Minimierung der Bearbeitungsintensität zum Erhalt der Aggregatstabilität des Bodens entscheidend. Untersuchungen zur Bodenbedeckung wurden nicht durchge-

führt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die jährliche Strohabfuhr von allen Parzellen auch auf den pfluglos bearbeiteten Parzellen einen nicht ausreichenden Erosionsschutz zur Folge hat.

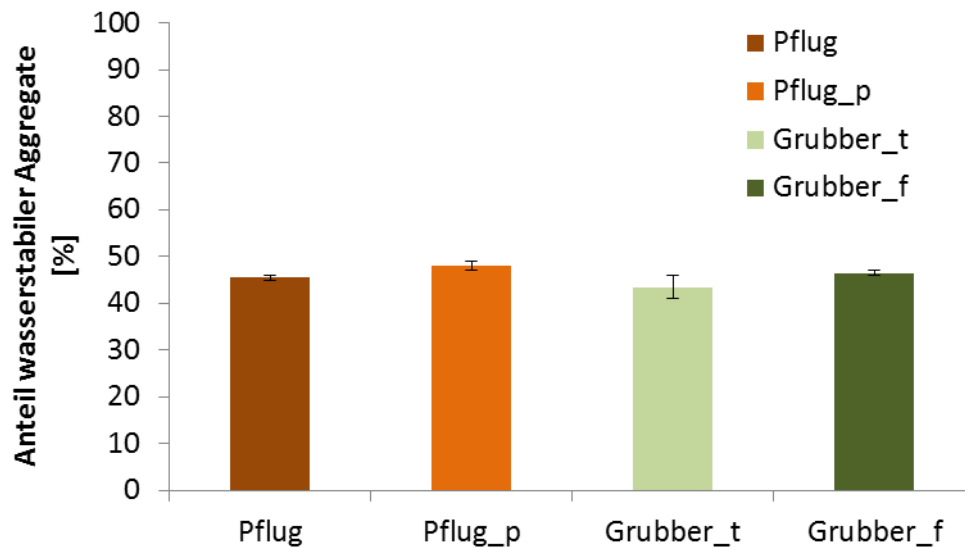


Abbildung 16: Aggregatstabilität der Versuchsparzellen im Juni 2018. Die Fehlerbalken markieren die Schwankungsbreite der Daten.

Im Jahr 2018 wurde erstmalig die Aggregatstabilität der Oberkrume auf den einzelnen Parzellen bestimmt (Abb. 16). Die hohen Tongehalte haben zur Folge, dass im Mittel 45 % der Bodenaggregate wasserstabil sind. Deutliche Unterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten sind nicht zu erkennen. Dies könnte auf die fehlende organische Substanz an der Bodenoberfläche als Folge der Strohabfuhr und auf den geringen Besatz an Regenwürmern zurückzuführen sein. Frühere Untersuchungen (siehe Ergebnisse Paul et al. 2012) haben ergeben, dass der Besatz an Regenwürmern, die maßgeblich für den Aufbau stabiler Aggregate verantwortlich gemacht werden, auf allen Parzellen mit <30 Individuen/m² gering ist und keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten erkennbar sind. Ursächlich dafür sind die im Vegetationszeitraum relativ trockenen Bedingungen des Standorts (Berry und Jordan, 2001), sowie das eher geringe Nahrungsangebot. In zukünftigen Untersuchungen gilt es, neben den günstigen Effekten durch Bodenbedeckung und Humusanreicherung, zu klären, inwieweit sich Steigerungen der Regenwurmpopulation durch den Verbleib von organischem Material auf der Fläche erzielen lassen, wie es z.B. von Edwards (2004) bzw. Sizmur et al. (2017) festgestellt wurde.

5.3 Bodenchemie

Humusgehalte

Bodenhumus spielt eine wichtige Rolle als langfristiger Speicher von Pflanzennährstoffen und der Stabilität des Bodengefüges. Neben den naturräumlichen Standortfaktoren (Bodenart, Klima, Geologie und Grundwasser) ist vor allem die Bewirtschaftung für den Humusaufbau entscheidend.

Humus wurde in Form des C_{org} -Gehaltes innerhalb der Krume untersucht, allerdings nicht in jedem Probejahr einheitlich untersucht. In den Jahren 2008-2012 und 2015 erfolgte die Probenahme in den drei Tiefen 0-10 cm, 10-20 cm und 20-30 cm. In den Jahren 2013 und 2014 orientieren sich die Entnahmetiefen an denen der Stechzylindernahmen in 5-11 cm und 15-26 cm. Lediglich im Jahr 2018 erfolgte eine Mischprobenahme für die Schicht 0-20 cm.

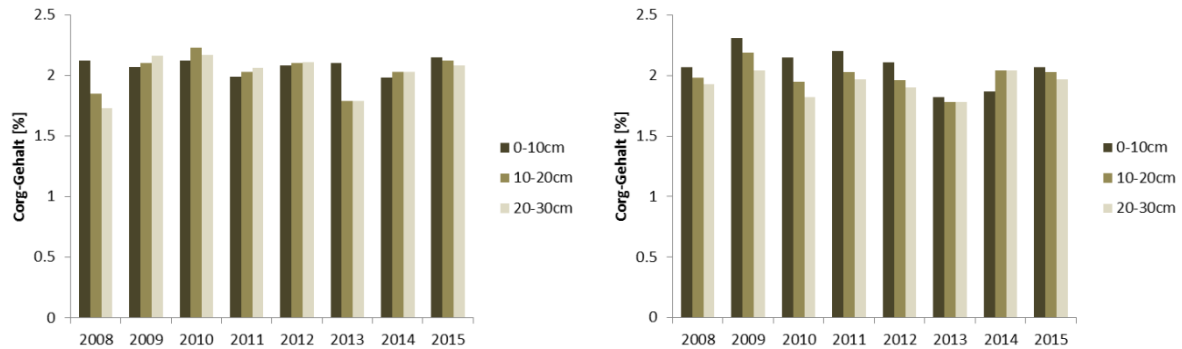


Abbildung 17: Verteilung der Corg-Gehalte innerhalb der Krume für die Pflugvariante (links) und die flach gegrubberte Variante (rechts).

Die vorerst (2008) kopflastige Verteilung des C_{org} -Gehaltes (Abb. 17) kehrt sich auf der Pflugvariante durch das Wiedereinsetzen wendender Bearbeitung um, wohingegen diese auf der flach gegrubberten Parzelle erhalten bleibt. Diese Ausprägung ist ebenfalls in den anderen Varianten zu beobachten. Bezogen auf den Gesamtgehalt bis 30 cm Bodentiefe schneiden die wendenden Parzellen mit 2,11 % gegenüber den pfluglos bewirtschafteten mit 2,06 % geringfügig besser ab. Da diese jedoch im Mittel auch deutlich lockerer lagern, kehrt sich dieser Sachverhalt bei Betrachtung des C_{org} -Vorrates zumindest in den obersten 20 cm der Krume um.

Eine erhöhte Kohlenstoffsequestrierung ist auf den pfluglos bestellten Flächen unter derzeitigem Management höchstens ansatzweise belegbar. Methodisch bedingt stellt Abbildung 18 den C_{org} -Vorrat als Mittelwert von 2009-2018 auf den Versuchspartzellen dar. Die nicht gepflügten Parzellen besitzen gegenüber den gepflügten im Schnitt 2,6 t/ha erhöhte C-Vorräte, allerdings mit ziemlich hohen Schwankungsbreiten zwischen den Einzeljahren. Auch für die gesamte Krumentiefe (bis 30 cm Bodentiefe) lässt sich zumindest zwischen den Jahren 2009-2012 eine Erhöhung in gleicher Größenordnung bestätigen, die jedoch in beiden Fällen nicht signifikant ausfällt.

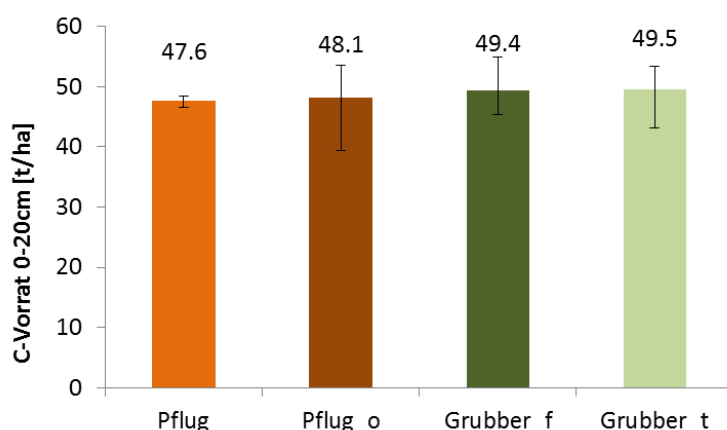


Abbildung 19: Durchschnittliche C-Vorräte der Versuchspartzellen unter Angabe der Schwankungsbreiten bezogen auf 20 cm Krumentiefe

Diese Ergebnisse decken sich mit Erkenntnissen von Lou et al. 2010 und Körschens et al. 2014, denen zu Folge keine nennenswerten Erhöhungen der C-Vorräte durch eine Umstellung der Bodenbearbeitung nachweisbar sind. Vielmehr orientiert sich der C-Vorrat in der vorliegenden Studie an den mittleren Erträgen (siehe Kapitel 5.4), da überwiegend Wurzelbiomasse die Grundlage des Humusaufbau darstellt (Körschens et al. 2014). Die Korrelation zwischen mittleren Kohlenstoffvorräten und auf der jeweiligen Parzelle erzielten Ertrag beträgt bis zu 80 %.

Makronährstoffe

Hinsichtlich der Stickstoffgehalte zeigen sich gegenüber der Ausgangssituation auf dem Standort keine nennenswerten bearbeitungsbedingten Veränderungen.

Die Gehalte an P (CAL) gehen in den Jahren von 2008 bis 2015 über alle Varianten hinweg zurück. Jedoch ist dieser Rückgang auf der reinen Pflugparzelle, da von hohem Niveau startend, deutlicher ausgeprägt als auf den anderen Parzellen (Abb. 20).

Die anfangs (2008) kopflastige Verteilung des Phosphors hebt sich erwartungsgemäß auf den wendend bearbeiteten Flächen auf. Auf den nicht wendend bewirtschafteten Parzellen ist der Gradient in den ersten Jahren nach Umstellung weniger stark ausgeprägt. Vor allem die flach gegrubberte Variante neigt zu einer Akkumulation des P in den obersten 10 cm (Abb. 20).

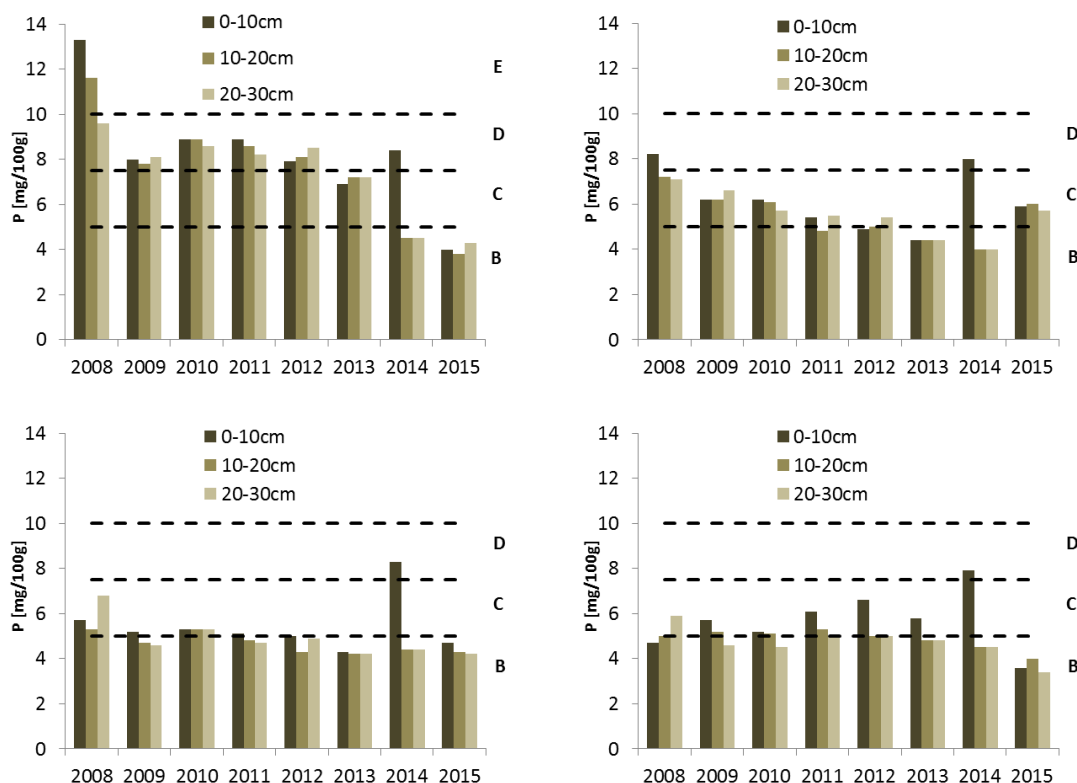


Abbildung 20: Verteilung der P(CAL)-Gehalte in der Krume für die reine Pflugvariante (oben links) die optionale Pflugvariante (oben rechts), die tiefe Grubbervariante (unten links) und die flache Grubbervariante (unten rechts)

Alle Varianten befinden sich zumindest jahresweise in die Gehaltsklasse B ab, was gerade in Trockenjahren ertragslimitierende Auswirkungen haben kann. Ein Zuschlag von +15% der P-Abfuhr könnte eine drohende Unterversorgung beheben und in Kombination mit einer Unterfußdüngung, vor allem auf der flach gegrubberten Variante für eine homogenere Verteilung des P in der Krume sorgen.

Auch der Zustand der Kaliumversorgung nimmt im Zeitraum von 2008-2015 ab, so dass vor allem in den pfluglos bewirtschafteten Varianten in Einzeljahren die Versorgungsstufe B erreicht wird, die eine Zuschlagsdüngung nach K-Entzug von +25-50 % erfordert (Abb. 21). Darüber hinaus tritt Kalium in den nicht wendenden Varianten mit einem stärkeren Tiefengradienten, als Phosphor auf. Folglich kann der Boden den Nährstoffanspruch, gegenüber insbesondere tief wurzelnden Pflanzen nur zum Teil decken. Bei trockenen Standortverhältnissen z.B. im Zusammenhang mit der häufiger auftretenden Frühjahrstrockenheit wird das leicht lösliche Kalium an der Oberfläche fixiert, wodurch das Problem weiter verschärft wird. Eine rechtzeitige Kaliumdüngung im Herbst ist deshalb auf schweren Böden zu empfehlen, um Mangelercheinungen vorzubeugen.

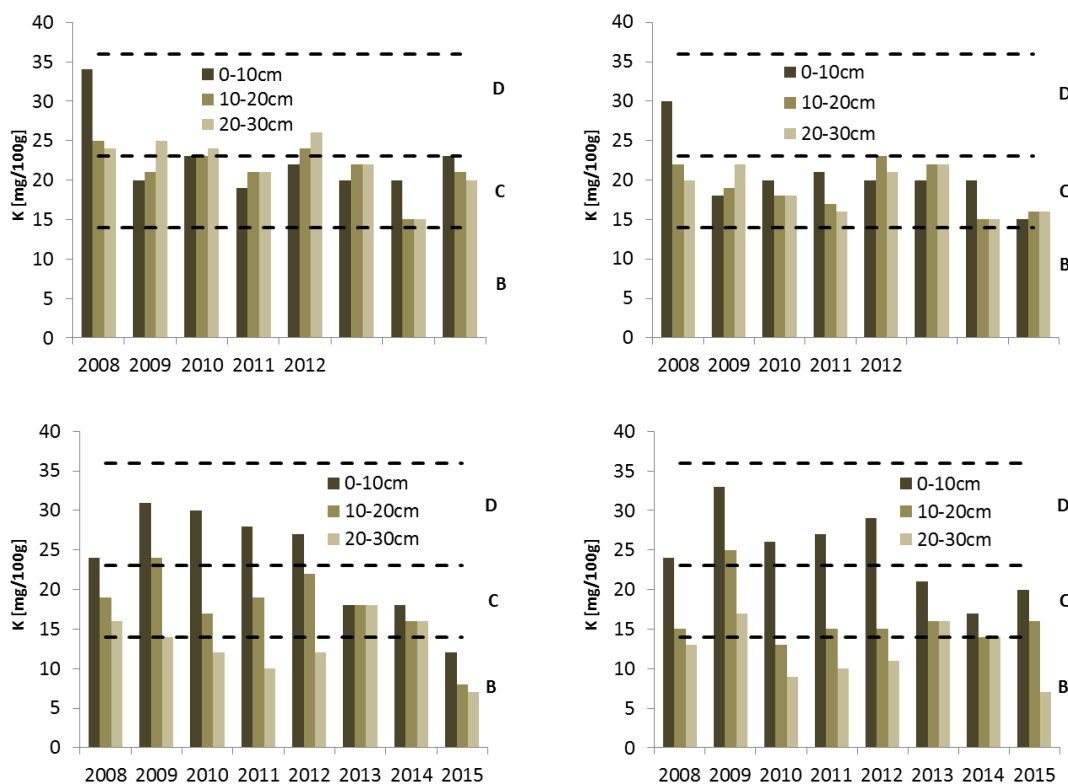


Abbildung 21: Verteilung der K(CAL)-Gehalte in der Krume für die reine Pflugvariante (oben links) die optionale Pflugvariante (oben rechts), die tiefe Grubbervariante (unten links) und die flache Grubbervariante (unten rechts)

Aufgrund der hohen Hintergrundgehalte an Magnesium in Verwitterungs- und Verwehungsprodukten des mittleren Keuper sind die CaCl_2 -löslichen Magnesiumgehalte auch nach Umstellung der Bearbeitung in der Versorgungsstufe D und E ausreichend hoch.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass gerade die Nährstoffversorgung mit Kalium und Phosphor, von der Pflugparzelle abgesehen, negative Auswirkungen auf die Ertragsentwicklung haben kann.

5.4 Ertragsentwicklung

Die Betrachtung der Ausgangssituation hat gezeigt, dass der Untersuchungsstandort keinesfalls ausreichend homogen ist, die Ernteerträge direkt miteinander vergleichen zu können. Um den Einfluss der Bodeneigenschaften auf die Ertragsentwicklung abzubilden hat Rötischer (2013) ein entsprechendes Verfahren entwickelt, bei dem es möglich ist, einen Teil der Ertragsvarianz über die Bodenzahl der Bodenschätzung zu erklären. Die beschriebenen Zusammenhänge sind dabei für Einzeljahre in Abhängigkeit der Witterung und der angebauten Kultur unterschiedlich eng.

Zudem wird die Auswertung der Ertragsdaten durch den Tausch der reinen und der optionalen Pflugparzelle erschwert. Die Erträge konnten folglich für den Zeitraum 2013-2018 nur gemittelt über beide Parzellen angegeben werden, weshalb eine Interpretation hinsichtlich der Bodenheterogenität in diesem Zeitraum nicht möglich war.

Die relativen Erträge zeigen eine deutlich Abhängigkeit von der Ausstattung der jeweiligen Bearbeitungsparzelle (Abb. 22). Mit steigenden Bodenzahlen nehmen die Erträge im Mittel zu und erreichen bei 80 ein Plateau. Da es sich um Altschätzungsdaten handelt, ist davon auszugehen, dass gerade die geringeren Ackerzahlen durch andauernde Bodenumlagerungsprozesse seit Erstaufnahme tendenziell eine Verschlechterung, wohingegen die ohnehin begünstigten morphologischen Tiefenlinien durch gleichzeitigen Materialauftrag eine Verbesserung erfahren haben. Dieser Zusammenhang könnte erklären, warum auch bei geringen Schwankungsbreiten der Ackerzahlen die Ertragsunterschiede von der südlichsten Variante (Ackerzahl 78) zu den übrigen signifikant sind.

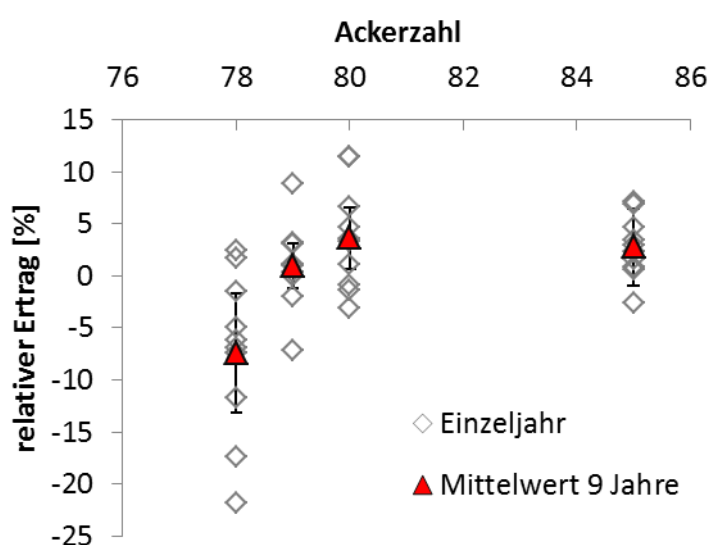


Abbildung 22: Abhängigkeit des relativen Ertrages von der mittleren Ackerzahl der Variante dargestellt als Einzelwert und Mittelwerte über 9 Erntejahre. Die Fehlerbalken markieren das Konfidenzintervall bei 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit.

Die Streuung der Werte innerhalb einer Parzelle kann weitestgehend über die Witterung im Bewirtschaftungszeitraum und die jeweiligen Wasseransprüche der angebauten Kultur er-

klärt werden. Rötischer kommt bei seinem 2013 vorgestellten Verfahren zu dem Schluss, dass der Zusammenhang zwischen Bodenzahl und Ertrag (angegeben als Bestimmtheitsmaß r^2) in folgender Kulturartenreihenfolge abnimmt: Winterweizen>Sommergerste>Erbsen>Winterraps. Insbesondere in Trockenjahren nimmt dieser Zusammenhang zu, da die Bodenzahl auch als Maß des Wasserspeichervermögens eines Standortes verstanden werden kann. So stellen z.B. Vorderbrügge et al. (2004) eine Methode vor, die nutzbare Feldkapazität über die Bodenzahl und den Substrattyp der Bodenschätzung abzuleiten.

Im vorliegenden Bericht wird versucht, die gemittelten Erträge einer Parzelle, mit Hilfe der von Rötischer (2013) vorgestellten Bestimmtheitsmaße und den Angaben der Bodenschätzung, zu normieren. Statistisch gesehen erklärt das Bestimmtheitsmaß den Anteil der Varianz der abhängigen Variable y (mittlere relative Erträge) von der unabhängigen Variable x (Bodenzahl). Somit können die von Rötischer vorgestellten Bestimmtheitsmaße direkt als Gewichtung des Einflusses der Ackerzahl auf die ertragsbildenden Standorteigenschaften verwendet werden. Ergebnis dieser Normierung sollte im besten Falle ein, um den Einfluss Standorteigenschaft gänzlich bereinigter, Ertragsdatensatz sein, dessen Varianz lediglich durch den Einfluss der unterschiedlichen Bodenbearbeitung erklärt werden kann.

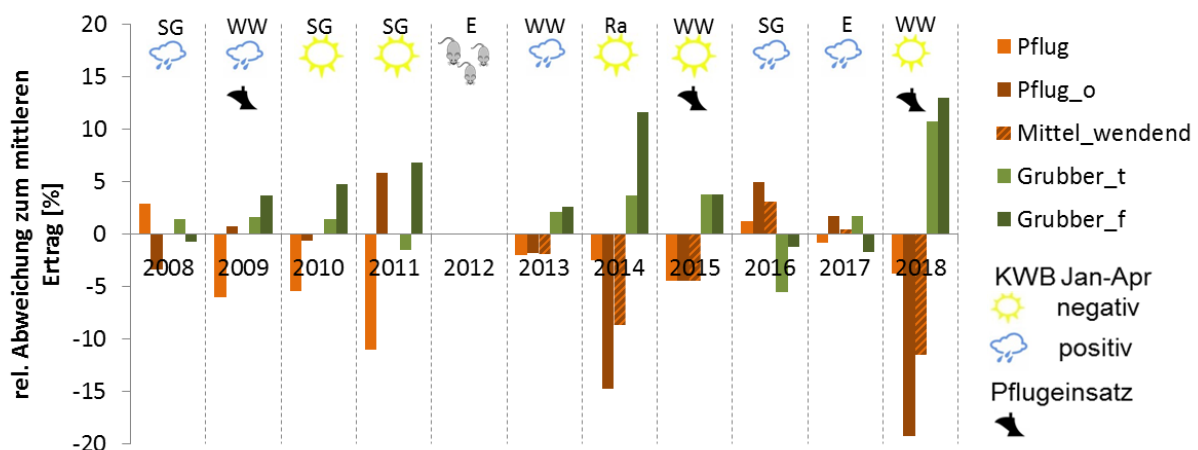


Abbildung 23: Normierte relative Abweichung zum mittleren Ertrag im Einzeljahr unter Berücksichtigung der Bearbeitungsvariante, der Kultur und der Witterung als Klimatische Wasserbilanz (KWB) zwischen Januar und April

Abbildung 23 zeigt deutlich die Entwicklung, der um den Einfluss der Ackerzahl normierten, jährlichen Erträge im Versuchszeitraum, in Abhängigkeit der Bearbeitungsvariante, der Kultur und der Witterung, angegeben als Klimatische Wasserbilanz zwischen den Monaten Januar–April. Besonders in trockneren Jahren sind die relativen Erträge auf den nichtwendend bearbeiteten Varianten höher als die der gepflügten. In feuchten Jahren ist dieser Effekt lediglich für Weizen nachweisbar, aber deutlich geringer. Staunässeanfällige Kulturen, wie Sommergerste und Erbse reagieren in feuchten Jahren umgekehrt, mit, gegenüber dem Mittelwert, leicht erhöhten Erträgen auf den gepflügten Parzellen. Deutlich zu erkennen ist auch der Tausch der Pflug- und der optionalen Pflugparzelle ab dem Jahr 2012. Die besonders in Trockenjahren unterdurchschnittliche Ertragsniveaus der optionalen Pflugparzelle, die ab diesem Zeitpunkt auf der Fläche mit den ungünstigsten Standorteigenschaften verortet war, deutet darauf hin, dass der Einfluss der Standorteigenschaften, ausgedrückt durch die

Ackerzahl, in Einzeljahren höher sein kann als basierend auf den Daten von Rötcher (2013) abschätzbar war.

Die Analyse der bodenchemischen und bodenphysikalischen Untersuchungen legt den Schluss nahe, dass sowohl die Nährstoff- als auch Wasserversorgung auf dem Standort bei Trockenheit nicht optimal sind.

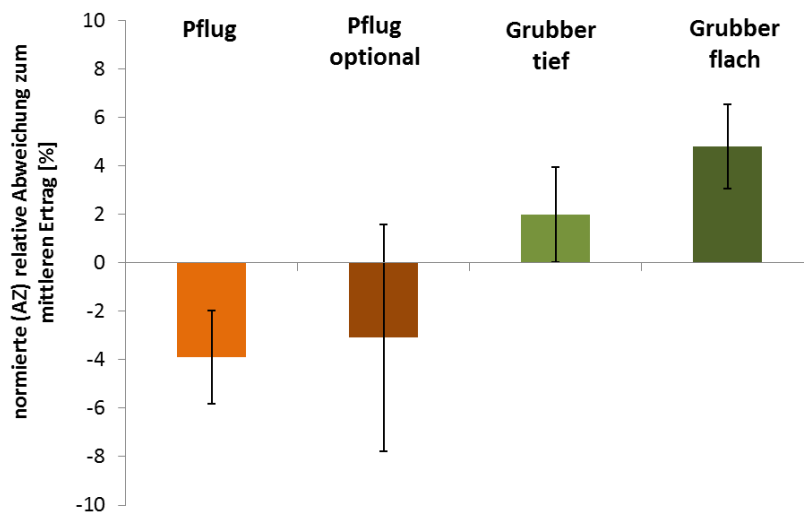


Abbildung 24: Normierte relative Abweichung zum mittleren Flächenertrag (9 Erntejahre). Die Fehlerbalken geben den Konfidenzintervall bei 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit an.

Abbildung 24 stellt die über acht Anbaujahre gemittelten Erträge für alle Bearbeitungspartzen dar. Die Pflugparzelle schneidet mit -3,9 % am schlechtesten ab. Auch die gemittelten Erträge der optionalen Pflugvariante liegen mit - 3,1 % deutlich unter dem Durchschnitt über alle Varianten, wobei dies überwiegend auf die Mindererträge des Trockenjahres 2018 zurückzuführen ist, was sich letztlich in der großen Breite des Konfidenzintervalls niederschlägt. In den Jahren vor dem Variantentausch 2009-2012 waren die Erträge und die Konfidenzintervalle der optionalen Pflugvariante mit denen der tiefen Grubbervariante vergleichbar. Die tiefe Grubbervariante liegt über die Jahre 2 % über dem Gesamtmittel und wird von der flachen Grubbervariante mit 4,8 % übertroffen. Gegenüber der reinen Pflugvariante sind die Ertragsunterschiede beider Grubbervarianten statistisch signifikant, gegenüber der optionalen Pflugvariante hingegen nur die flache Grubbervariante, was dahingehend einleuchtet, da bis auf die wenigen Jahre mit Pflugeinsatz (2009, 2015 und 2018) die Bearbeitung analog zur tiefen Grubbervariante erfolgte.

Mittelt man die Erträge reinen Grubbervarianten und der gepflügten jeweils über alle Jahre, liegen erstere mit 3,5 % über den mittleren Erträgen und folglich letztere um den gleichen Betrag darunter (Abb. 25). Die engere Breite der Konfidenzintervalle der Grubbervarianten gegenüber den Pflugvarianten deutet darauf hin, dass die Erträge nicht nur höher, sondern über die Jahre auch stabiler sind.

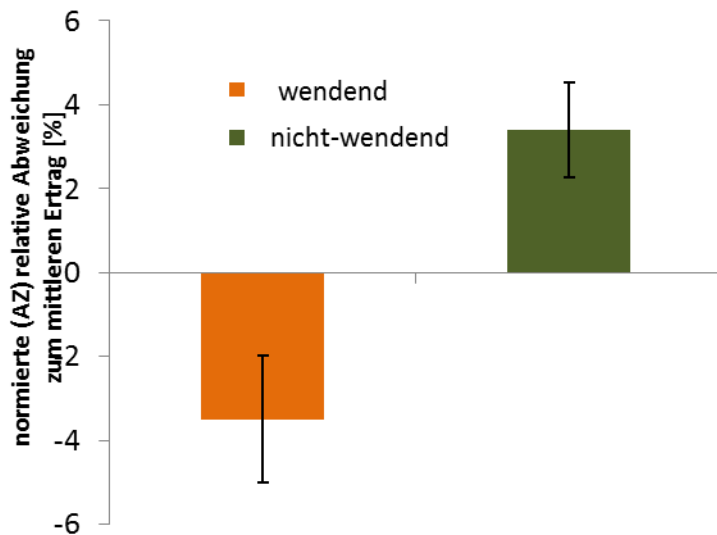


Abbildung 25: Normierte relative Abweichung zum mittleren Ertrag für 9 Jahre. Die Fehlerbalken geben den Konfidenzintervall bei 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit an.

Da sowohl die bodenphysikalischen, als auch bodenchemischen Untersuchungen kaum signifikante Unterschiede hinsichtlich der Bearbeitungsintensität hervorgebracht haben, können nur schwer messbare Effekte für diese Ertragsunterschiede verantwortlich gemacht werden. Diese betreffen überwiegend den Bodenwasserhaushalt. Korreliert man die Mittelwerte der relativen Erträge der wendenden und nicht-wendenden Varianten mit der Klimatischen Wasserbilanz der Vegetationsperiode der jeweiligen Kultur im Einzeljahr, kann die Varianz der Erträge mit bis zu 60 % nur mit Hilfe der KWB erklärt werden (Abb. 26). Dieser Zusammenhang ist hoch signifikant ($p < 0,01$) und gegenläufig. Das bedeutet, dass je negativer die KWB ausfällt, der relative Ertrag auf den Pfluglospartzellen steigt bzw. auf den Pflugpartzellen sinkt. Der Zuwachs relativer Erträge der nichtwendenden Bodenbearbeitungsvarianten beträgt im untersuchten Wertespektrum 4,8 % relativem Ertrag bezogen auf -100 mm KWB im Vegetationszeitraum.

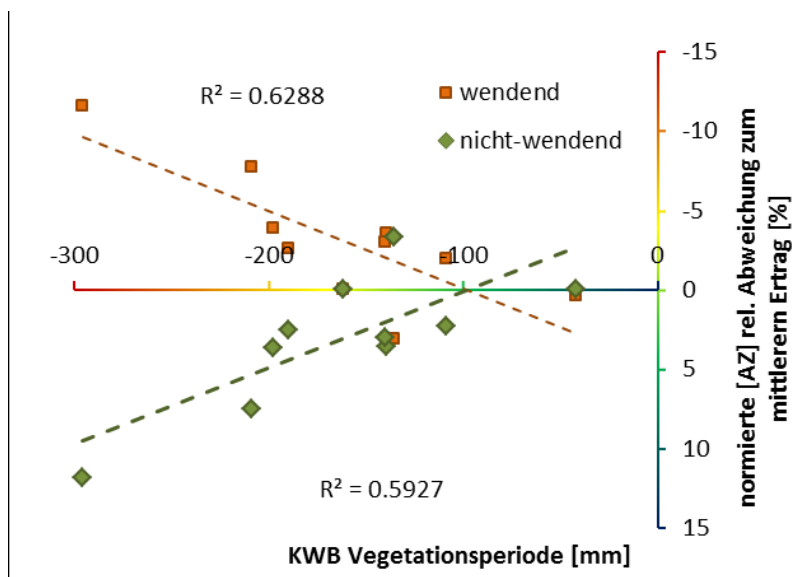


Abbildung 26: normierte relative Abweichung zum mittleren Ertrag als Funktion der Klimatischen Wasserbilanz (Zeitraum 2009-2018) gemittelt für wendend und nicht-wendend bearbeitete Parzellen.

Über die Ursachen kann aufgrund fehlender Datengrundlagen nur spekuliert werden. Die wendende Pflugarbeit hat nachweislich eine bessere Belüftung vor allem der Unterkrume zur

Folge, weshalb mehr Bodenwasser verdunsten kann. Zusätzlich schützt die, wenn auch geringe, Mulchauflage der Grubbervarianten vor weiteren Verdunstungsverlusten.

Dieser Sachverhalt wird vor allem vor dem Hintergrund der prognostizierten klimatischen Entwicklung, mit einer mittelfristigen Abnahme der Sommerniederschläge (PIK <http://www.climateimpactsonline.com/>) umso entscheidender. Eigenen Berechnungen zu Folge sind anhaltende Trockenperioden zwischen April und Juli für den Standort Butteltstedt nach 2018 mehr als doppelt so wahrscheinlich geworden (Messzeitraum 1994-2018). Ziel der ackerbaulichen Praxis sollte es deshalb sein, besonders wassereffizient zu wirtschaften. Dazu zählen sowohl der Schutz des Bodenwassers vor Verdunstung, als auch das Wiederauffüllen dieses Vorrates besonders im Zusammenhang mit Starkregenereignissen. Für beide Zielstellungen sind Methoden der pfluglosen gegenüber der wendenden Bodenbearbeitung nachweislich im Vorteil. Allerdings ist dieser Effekt für den ausgewählten Standort durch die jährliche Strohabfuhr reduziert.

6 Schlussfolgerung

Der Streifenbearbeitungsversuch in Butteltstedt unterscheidet vier verschiedene Bearbeitungsintensitäten, permanentes Pflügen, Pflügen nach Bedarf, tiefes Grubbern und flaches Grubbern auf einem Hohertragsstandort in einer Randlage des Thüringer Beckens. Folgende Zentrale Aussagen lassen sich für den Untersuchungszeitraum treffen:

- Bodenheterogenität und Ausgangssituation sind bei der Auswertung der Ergebnisse unbedingt zu berücksichtigen
- Die Umstellung der Bodenbearbeitung hat z.T. gegenläufige Effekte auf Bodengefüge, Wasserhaushalt, und Nährstoffverteilung
- Die bodenphysikalischen Unterschiede zwischen den Varianten sind selten signifikant
- Eine Bodenschadverdichtung durch Pflugverzicht kann auf den nicht-wendend bearbeiteten Parzellen für kein Untersuchungsjahr nachgewiesen werden; allerdings sind mechanische Druckbelastungsspitzen unter feuchten Bedingungen in der vorliegenden Fruchtfolge im Vergleich zu Hackfruchtfolgen eher seltener
- Kohlenstoff, Phosphor und vor allem Kalium sind in den Pfluglosvarianten kopflastig verteilt, wobei ein negativer Effekt für die Ertragsbildung nicht nachgewiesen werden konnte.
- Die Ertragsbildung wird signifikant von den Standorteigenschaften und von der Intensität der Bodenbearbeitung beeinflusst. Eine Reduktion der Bearbeitung hat vor allem in Trockenjahren einen stark positiven Effekt
- Zur Gewährleistung der Ertragssicherheit im Thüringer Trockengebiet bei wahrscheinlicher auftretenden Trockenphasen im Frühjahr und Sommer kann deshalb die Reduktion der Bodenbearbeitung eine wirksame und zugleich ökonomisch effizientere Methode darstellen

Literatur

Bernhardt, H., Bauer, U., Tebrügge, F. (2008): Ergebnisse aus langjährigen Bodenbearbeitungsverfahren. In: LLH (Hrsg.) Bodenbearbeitungssysteme im Vergleich. 98 S.

Berry, E.C., Jordan, D. (2001): Temperature and soil moisture content effects on the growth of *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta: Lumbricidae) under laboratory conditions. *Soil Biology & Biochemistry* 33. S. 133-136.

DIN (2009): 19683-16:2009-01. Bodenbeschaffenheit - Physikalische Laboruntersuchungen - Teil 16: Bestimmung der Aggregatstabilität nach dem Siebtauchverfahren.

Edwards, C.A. (2004): *Earthworm Ecology*. CRC Press. 2nd Edition. 456 S.

Kay, B.D., VandenBaygaard, A.J. (2002): Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research* (66/2). S. 107-118.

Körschens, M., Albert, E., Baumecker, M., Ellmer, F., Grunert, M., Hoffmann, S., Kismányoky, T., Kubat, J., Kunzova, E., Marx, M., Rogasik, J., Rinklebe, J., Rühlmann, J., Schilli, C., Schröter, H., Schroetter, S., Schweizer, K., Toth, Z., Zimmer, J., Zorn, W. (2014): Humus und Klimaänderung - Ergebnisse aus 15 langjährigen Dauerfeldversuchen, Humus and climate change - results of 15 long-term experiments. *Archives of Agronomy and Soil Science*. S. 1485-1517. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.892204>.

Luo, Z., Wang, E., Sun O.J. (2010): Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139 (2010) 224–23.

Nitzsche, O., Krück, S., Zimmermann, M., Schmidt, W. (2002): Entwicklung von dauerhaft umweltgerechten Landbewirtschaftungsverfahren im sächsischen Einzugsgebiet der Elbe. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Leipzig. 130.S.

Rötscher, T. (2013): Aussagewert der Bodenschätzung für den Pflanzenbau - Möglichkeit der Ableitung von Ertragspotenzialzonen für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung aus digitalen Daten der Bodenschätzung, als Ergebnis der Auswertung mehrjähriger Ertragskartierung am Mähdrösch. Dissertation an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Halle/Salle.

Sizmur, T., Martin, E., Wagner, K., Parmentier, E., Watts, C., Whitmor, A.P. (2017): Milled cereal straw accelerates earthworm (*Lumbricus terrestris*) growth more than selected organic amendments. *Applied Soil Ecology* 113. S. 166-177.

Vorderbrügge, T., Miller, R., Peter, M. & Sauer, S. (2004): Ableitung der nutzbaren Feldkapazität aus den Klassenzeichen der Bodenschätzung . *DBG-Mitteilungen* 2004, Bd.104, S. 33-34

TISCHER, S. (2006): Erfassung und Bewertung von Lumbricidenvorkommen sowie deren Schwermetallgehalte auf Boden-Dauerbeobachtungsflächen von Sachsen-Anhalt und Thüringen. In: Workshop Nr. Z 15/2006 des Umweltbundesamtes mit d. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, 30.11/1.12.2006 Weimar, S. 5-6