

JUSTUS–LIEBIG–UNIVERSITÄT GIESSEN
Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotoxikologie und Umweltmanagement
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung II
- Professur für Organischen Landbau -

Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf Gehalt und Dynamik der organischen Bodensubstanz in Ackerböden sowie deren Bedeutung für die Humusbilanzierung

Masterarbeit

gestellt von: Prof. Dr. Günter Leithold
eingereicht von: cand. M. Sc. agr. Manuel Krawutschke

Giessen
Januar 2007

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung und Problemstellung.....	1
2 Literaturübersicht.....	3
2.1 Organische Bodensubstanz.....	3
2.1.1 Bedeutung.....	3
2.1.2 Einflussfaktoren.....	4
2.2 Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf die Stratifikation und Umsetzung der organischen Bodensubstanz.....	6
2.2.1 Bodenbearbeitungssysteme.....	6
2.2.2 Stratifikation der organischen Bodensubstanz.....	7
2.2.3 Umsetzung der organischen Bodensubstanz.....	8
2.3 Humusbilanzierung.....	10
3 Material und Methoden.....	12
3.1 Beschreibung der Versuchsstandorte und -anlagen.....	12
3.1.1 Dauerversuch „Ökologisch - Integrierte Anbausysteme“ Bad Lauch- städt.....	12
3.1.2 Gießener Bodenbearbeitungsversuche.....	14
3.1.2.1 Gießen.....	15
3.1.2.2 Hassenhausen.....	16
3.1.2.3 Ossenheim.....	17
3.1.3 Ökologischer Ackerbauversuch Gladbacherhof.....	18
3.1.4 Ökologische Fruchtfolge Güterfelde.....	20
3.1.5 Systemversuch Scheyern.....	21
3.2 Probenahme.....	23
3.3 Prüfmerkmalserfassung.....	23
3.4 Statistische Auswertung.....	24

4	Ergebnisse.....	25
4.1	Dauerversuch „Ökologisch - Integrierte Anbausysteme“ Bad Lauchstädt.....	25
4.1.1	Lagerungsdichte.....	25
4.1.2	Gesamtkohlenstoff (C _t).....	25
4.2	Gießen.....	27
4.2.1	Lagerungsdichte.....	27
4.2.2	Gesamtkohlenstoff (C _t).....	28
4.3	Hassenhausen.....	30
4.3.1	Lagerungsdichte.....	30
4.3.2	Gesamtkohlenstoff (C _t).....	31
4.4	Ossenheim.....	33
4.4.1	Lagerungsdichte.....	33
4.4.2	Gesamtkohlenstoff (C _t).....	34
4.5	Ökologischer Ackerbauversuch Gladbacherhof.....	36
4.5.1	Lagerungsdichte.....	36
4.5.2	Gesamtkohlenstoff (C _t).....	37
4.6	Ökologische Fruchtfolge Güterfelde.....	39
4.6.1	Lagerungsdichte.....	39
4.6.2	Gesamtkohlenstoff (C _t).....	40
4.7	Systemversuch Scheyern.....	42
4.7.1	Lagerungsdichte.....	42
4.7.2	Gesamtkohlenstoff (C _t).....	43
4.8	Relative Kohlenstoffmenge.....	45
5	Diskussion.....	47
5.1	Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Lagerungsdichte des Bodens.....	47
5.2	Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf Kohlenstoffgehalte und -mengen in der Ackerkrume.....	48
5.2.1	Kohlenstoffgehalte.....	48
5.2.2	Kohlenstoffmengen.....	50
5.3	Schlussfolgerungen.....	57

6	Zusammenfassung.....	59
7	Literaturverzeichnis.....	61
	Eidesstattliche Erklärung.....	69

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: C _t -Gehalte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Bad Lauchstädt im Frühjahr 2006.....	26
Abb. 2: C _t -Mengen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Bad Lauchstädt im Frühjahr 2006.....	26
Abb. 3: C _t -Mengen in der Ackerkrume bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Bad Lauchstädt im Frühjahr 2006.....	27
Abb. 4: C _t -Gehalte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Gießen im Frühjahr 2005.....	29
Abb. 5: C _t -Mengen bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und Bodentiefe bezogen auf eine Schichtdicke von 1 dm am Standort Gießen im Frühjahr 2005.....	29
Abb. 6: C _t -Mengen in der Ackerkrume bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Gießen im Frühjahr 2005.....	30
Abb. 7: C _t -Gehalte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Hassenhausen im Frühjahr 2005.....	32
Abb. 8: C _t -Mengen bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und Bodentiefe bezogen auf eine Schichtdicke von 1 dm am Standort Hassenhausen im Frühjahr 2005.....	32
Abb. 9: C _t -Mengen in der Ackerkrume bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Hassenhausen im Frühjahr 2005.....	33
Abb. 10: C _t -Gehalte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Ossenheim im Frühjahr 2005.....	35
Abb. 11: C _t -Mengen bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und Bodentiefe bezogen auf eine Schichtdicke von 1 dm am Standort Ossenheim im Frühjahr 2005.....	35
Abb. 12: C _t -Mengen in der Ackerkrume bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Ossenheim im Frühjahr 2005.....	36
Abb. 13: C _t -Gehalte in Abhängigkeit von Fruchtfolge, Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Gladbacherhof im Frühjahr 2006.....	38
Abb. 14: C _t -Mengen (t ha ⁻¹) in Abhängigkeit von Fruchtfolge, Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Gladbacherhof im Frühjahr 2006.....	38
Abb. 15: C _t -Mengen (t ha ⁻¹) in der Ackerkrume bei differenzierter Bodenbearbeitung und Fruchtfolge am Gladbacherhof im Frühjahr 2006.....	39

Abb. 16: C _t -Gehalte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Güterfelde im Frühjahr 2006.....	40
Abb. 17: C _t -Mengen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Güterfelde im Frühjahr 2006.....	41
Abb. 18: C _t -Mengen in der Ackerkrume bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Güterfelde im Frühjahr 2006.....	42
Abb. 19: C _t -Gehalte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Scheyern im Frühjahr 2006.....	43
Abb. 20: C _t -Mengen in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Scheyern im Frühjahr 2006.....	44
Abb. 21: C _t -Mengen in der Ackerkrume bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Scheyern im Frühjahr 2006.....	44
Abb. 22: Relative Kohlenstoffmenge in der Ackerkrume (0-25 cm) bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Gießen, Hassenhausen und Ossenheim.....	45
Abb. 23: Relative Kohlenstoffmenge in der Ackerkrume bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Bad Lauchstädt, Gießen, Hassenhausen und Güterfelde.....	46
Abb. 24: Relative Kohlenstoffmenge in der Ackerkrume (0-25 cm) bei differenzierter Bodenbearbeitung und Fruchtfolge am Gladbacherhof.....	46

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Versuchsanlage Bad Lauchstädt.....	13
Tab. 2: Kennzeichen der ausgewählten Standorte.....	14
Tab. 3: Fruchtfolgegestaltung am Standort Giessen.....	16
Tab. 4: Fruchtfolgegestaltung am Standort Hassenhausen.....	16
Tab. 5: Fruchtfolgegestaltung am Standort Ossenheim.....	17
Tab. 6: Fruchtfolgegestaltung im Ökologischen Ackerbauversuch Gladbacherhof seit 1998.....	18
Tab. 7: Versuchsanlage Ökologischer Ackerbauversuch Gladbacherhof.....	19
Tab. 8: Ökologische Demonstrations-Fruchtfolge Güterfelde.....	20
Tab. 9: Versuchsanlage Güterfelde.....	21
Tab. 10: Versuchsanlage integrierter Systemversuch Scheyern.....	22
Tab. 11: Übersicht über die Probenahmeterminale und Tiefenabstufungen auf den verschiedenen Versuchsstandorten.....	23
Tab. 12: Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Bad Lauchstädt im Frühjahr 2006.....	25
Tab. 13: Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Gießen im Frühjahr 2005.....	28
Tab. 14: Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Hassenhausen im Frühjahr 2005.....	31
Tab. 15: Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Ossenheim im Frühjahr 2005.....	34
Tab. 16: Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Fruchtfolge, Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Gladbacherhof im Frühjahr 2006.....	37
Tab. 17: Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Güterfelde im Frühjahr 2006.....	40
Tab. 18: Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Scheyern im Frühjahr 2006.....	42
Tab. 19: C _{org} -Mengen in der Ackerkrume bei differenzierter Bodenbearbeitung (0 - 25 cm) am Standort Ossenheim und Bruchköbel.....	53
Tab. 20: Änderung der Humusmenge in der Ackerkrume bei differenzierter Bodenbearbeitung unter sonst gleichen Standortbedingungen.....	54

Tab. 21: C _{org} -Mengen der Bodenbearbeitungsvarianten Pflug und Schwergrubber in Oberkrume, Unterkrume und Krumenbasis nach 16jähriger Versuchsdauer am Standort Seehausen.....	56
---	----

Abkürzungsverzeichnis

AHL	Ammonium-Nitrat-Harnstofflösung
BB	Bodenbearbeitung
C	Kohlenstoff
C _{org}	organischer Kohlenstoff
C _t	Gesamtkohlenstoff
GV	Großvieheinheit
Kart	Kartoffeln
N	Stickstoff
NN	Normal Null
OBS	organische Bodensubstanz
OPS	organische Primärschubstanz
R	Rotoregge
TM	Trockenmasse
WW	Winterweizen

1 Einleitung und Problemstellung

In der landwirtschaftlichen Bodenutzung stehen eine Reihe von Maßnahmen zur Verfügung, die das komplexe Ökosystem Boden beeinflussen. Zu den wichtigsten gehören Bodenbearbeitung, Versorgung der Böden mit organischer Substanz, Fruchtfolgegestaltung, Mineraldüngung und Pflanzenschutz (SOMMER, 1998).

Die Bodenbearbeitung erfolgt heute noch zum größten Teil mit dem Pflug, obwohl sich inzwischen eine Vielzahl von verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren ohne Bodenwendung etabliert haben (KÖLLER & LINKE, 2001). Bei der Schaffung optimaler Wachstumsbedingungen für die folgende Kulturpflanze ist sie von zentraler Bedeutung. Hierbei sollen die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften des Bodens positiv beeinflusst werden (SOMMER, 1998). Eine zunehmende Bearbeitungsintensität des Bodens verursacht jedoch unerwünschte Nebeneffekte auf Bodenstruktur, Bodenqualität, Bodenfauna und Umwelt (TEBRÜGGE, 2003). Demzufolge sind Kenntnisse über die Auswirkungen von alternativen Bewirtschaftungsmaßnahmen für eine nachhaltige Landnutzung unerlässlich (DORAN, 1992).

Bodenbearbeitungssysteme mit einer unterschiedlichen Eingriffsintensität haben einen Einfluss auf die organische Bodensubstanz (GROCHOLL, 1991, EHLERS, 1992, PEKRUN & CLAUPEIN, 1998, TEBRÜGGE & DÜRING, 1999, KÖLLER & LINKE, 2001, FRANZLUEBBERS, 2002, TEBRÜGGE, 2003). Daneben führt jegliche Art der Bodenbearbeitung zu einer Veränderung der Lagerungsdichte (KÖPPEN, 2004a). Im Oberboden kommt es bei abnehmender Bodenbearbeitungsintensität meistens zu einer Zunahme der Dichtlagerung (BEISECKER, 1994, RICHTER, 1995, TEBRÜGGE & DÜRING, 1999, DÜRING et al., 2005).

Neuere Untersuchungen in einem langjährigen Feldversuch zeigen, dass die absolute Humusmenge durch nicht wendende Bodenbearbeitung vergrößert wird (HOFMANN et al., 2003). Die organische Bodensubstanz nimmt aufgrund ihrer vielfältigen Wirkungen eine besondere Stellung für Boden und Pflanze, insbesondere bei ökologischer Wirtschaftsweise ein, so dass zur Gewährleistung von dauerhaft umweltverträglichen Produktionssystemen in der Pflanzenproduktion eine entsprechende Humusreproduktion erforderlich ist (LEITHOLD et al., 1997, LEITHOLD & HÜLSBERGEN, 1997). Infolge der engen Beziehung zwischen Humus- und Stickstoffgehalt des Bodens (ASMUS, 1992) übt sie einen maßgeblichen Einfluss auf die Stickstoffversorgung der Pflanzen sowie das Potential möglicher

Stickstoffverluste durch Auswaschung und Denitrifikation aus (KÖRSCHENS, 1990). So wird über die Bodenbearbeitungsintensität die Stickstoffdynamik im Boden als Folge der Umsetzung der organischen Bodensubstanz beeinflusst (CLAUPEIN & BAEUMER, 1990, HARRACH & RICHTER, 1992, 1994, RICHTER, 1995).

Die Cross Compliance-Regelungen fordern die Erhaltung der organischen Substanz im Boden und der Bodenstruktur, die laut Paragraph 17 des Bundes-Bodenschutzgesetzes zu den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis gehören. Ziel einer nachhaltigen Wirtschaftsweise sollte somit die Einstellung eines standortspezifischen optimalen Gehaltes an organischer Bodensubstanz zur Sicherung der naturveranlagten Fruchtbarkeit des Bodens unter einer weitgehendsten Vermeidung unerwünschter Umweltwirkungen sein.

Vor diesem Hintergrund wurden in der vorliegenden Arbeit anhand von sieben verschiedenen Versuchsstandorten folgende Fragestellungen untersucht, deren Klärung insbesondere für das Verbundprojekt „Entwicklung einer praxisanwendbaren Methode der Humusbilanzierung im Ökologischen Landbau“ von großer Relevanz sind:

1. Beeinflusst differenzierte Bodenbearbeitung die organische Bodensubstanz?
2. Werden die Effekte der Bodenbearbeitung auf die organische Bodensubstanz nur durch Lagerungs- und Verteilungsunterschiede vorgetäuscht?
3. Wie wirkt sich differenzierte Bodenbearbeitung auf Gehalt und Menge der organischen Bodensubstanz in der Ackerkrume aus?
4. Lassen sich von den durch die Bodenbearbeitung ausgehenden Wirkungen Zu- bzw. Abschläge für die Humusbilanz-Koeffizienten ableiten?

2 Literaturübersicht

2.1 Organische Bodensubstanz (OBS)

2.1.1 Bedeutung

Die organische Bodensubstanz – umgangssprachlich auch als Humus bezeichnet – umfasst nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002) die Gesamtheit der abgestorbenen pflanzlichen und tierischen Stoffe in und auf dem Boden sowie deren organischen Umwandlungsprodukte. Den heterotrophen Bodenorganismen dient sie als Energie- und Kohlenstoffquelle, so dass die organische Substanz des Bodens als treibende Kraft für die Umsetzungsprozesse im Boden fungiert (ROGASIK et al., 2005). Ausgangsstoffe für die Humusbildung sind organische Primärsubstanzen (OPS) in Form von Ernte- und Wurzelrückständen, Bestandesabfällen, abgestorbenen Bodenorganismen sowie organischer Dünger (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002).

KÖHNLEIN (1964, S. 9) bezeichnet den Humus als „ersten fruchtbarkeitsbedingenden Faktor“, der für die Erhaltung und Mehrung der Bodenfruchtbarkeit eine zentrale Stellung einnimmt (LEITHOLD & HÜLSBERGEN, 1997). Er übt einen maßgeblichen Einfluss auf alle wichtigen physikalischen, chemischen und biologischen Bodenfunktionen aus, wobei zwischen den einzelnen Bodenfunktionen Interaktionen bestehen (ROGASIK et al., 2005). Seine Zusammensetzung und Abbauraten haben Auswirkungen auf die Bodenstruktur und die Porosität, die Wasserinfiltration, die Wasserspeicherfähigkeit, die Diversität und biologische Aktivität der Bodenorganismen sowie auf die Nährstoffverfügbarkeit (BOT & BENITES, 2005). Des Weiteren wirkt sich die organische Bodensubstanz auf die Ertrags- und -qualität sowie -stabilität der angebauten Fruchtarten aus und übernimmt im Zusammenhang mit einer nachhaltigen Bodennutzung eine wichtige Funktion als CO₂-Senke (KÖPPEN, 2004b).

Im ökologischen Landbau stellt die OBS einen Indikator für dauerhaft stabile Erträge dar und ist aufgrund folgender Gründe für eine ausreichende Nährstoffversorgung der Pflanzen von besonderer Bedeutung (LINDENTHAL & HARTL, 2003):

- Aktivierung und Förderung des Bodenlebens
- Nährstoffspeicher und -transformator, insbesondere für Stickstoff, aber auch für viele andere Nährstoffe, wie z.B. Kalium, Phosphor, Mikronährstoffe
- Bildung eines stabilen Bodengefüges
- Wasserspeicher
- Förderung der Pflanzengesundheit durch ein hohes antiphytopathogenes Potential des Bodens.

2.1.2 Einflussfaktoren

Die organische Bodensubstanz unterliegt einer Vielzahl von Faktoren. Das Ausgangsniveau des Bodens an Humus wird primär von Klima, Vegetationstyp und Ausgangsgestein geprägt (SAUERBECK, 1992). Die Humusmenge im Boden sowie ihre Verteilung in der Ackerkrume ist abhängig von Bodentextur, Klima, Bewirtschaftung, Mineralzusammensetzung, Topographie, Bodenorganismen und den Interaktionen zwischen diesen Faktoren (ROGASIK et al., 2005). Auswirkungen auf den Humusumsatz landwirtschaftlich genutzter Böden haben die vorherrschenden Standortbedingungen sowie die Bewirtschaftungsweise (HÜLSBERGEN et al., 2005). Als Resultat ergibt sich ein standort- und nutzungstypischer Gehalt an organischer Bodensubstanz, der Veränderungen unterliegt (ASMUS, 1992).

Die Standortfaktoren – Bodenart und Klima – können nicht durch die landwirtschaftliche Bodennutzung beeinflusst werden. Auf leichten und mittleren Böden variiert der Humusgehalt zwischen 1 und 5 Prozent, auf schweren Böden zwischen 1 und 7 Prozent (FÜRSTENFELD & HETTERICH, 2005). Infolge eines verminderten mikrobiellen Abbaus der organischen Substanz kommt es in tonreichen Böden zu höheren Humusgehalten. Das Klima als Grundlage der Pflanzenproduktion übt einen entscheidenden Einfluss auf Gehalt, Menge und Eigenschaften der organischen Substanz im Boden aus. Niedrigere Temperaturen sowie Trockenheit hemmen den Humusabbau und führen ebenfalls zu höheren Humusgehalten (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002). Untersuchungen von MANZKE (1995) belegen, dass die Standortfaktoren einen deutlich größeren Einfluss auf den Humusgehalt haben als differenzierte Bodennutzungssysteme.

Auch wenn sich Veränderungen des Humusniveaus durch ackerbauliche Maßnahmen wie Fruchtfolge, Düngung und Bodenbearbeitung nur in einem engem Umfang realisieren lassen (SAUERBECK, 1992), haben acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen einen maßgeblichen Einfluss auf den OBS-Gehalt (FÜRSTENFELD & HETTERICH, 2005). SAUERBECK (1992) beziffert die Veränderlichkeit des Gesamt-Humusgehaltes auf etwa ± 20 bis 30 %, wobei sich messbare Veränderungen erst nach mehr als 10 Jahren nachweisen lassen (KÖRSCHENS & SCHULZ, 1999). Bis sich ein neues Fließgleichgewicht einstellt vergehen auf lehmigen bis tonigen Böden Jahrzehnte, auf sandig-lehmigen Böden 15 bis 30 Jahre (FREYER, 2003). Nach ROGASIK et al. (2005) dauert es mehr als 30 Jahre.

Fruchtfolgebedingte Unterschiede im Humusgehalt werden vom Anfall und der stofflichen Zusammensetzung der Ernte- und Wurzelrückstände, der Bodenbearbeitungsintensität sowie der Vegetationsdauer beeinflusst (KÖRSCHENS & SCHULZ, 1999). In Ackerböden des gemäßigt humiden Klimas verbleiben laut SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002) durchschnittlich drei Tonnen $\text{TM ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ an organischen Reststoffen im Boden. FREYER (2003) teilt die Fruchtarten hinsichtlich ihrer Humuswirkung in drei Gruppen ein: (1) Hackfrüchte ; (2) Körnerfrüchte und (3) mehrjährige Feldfutterpflanzen. Kartoffeln und Zuckerrüben gelten als humuszehrend, da dem anbaubedingten Humusverlust von $1,3 \text{ t TM ha}^{-1}$ nur eine Zufuhr von $0,7 \text{ t TM ha}^{-1}$ über die Ernte- und Wurzelrückstände gegenübersteht (FÜRSTENFELD & HETTERICH, 2005). Körnermais und Raps sind humusneutrale Kulturpflanzen. Mehrjähriger Klee grasanbau wirkt humusmehrend (FREYER, 2003).

Der Einsatz von organischen Düngemitteln wie Stallmist, Gülle, Stroh, Gründüngung und Kompost dient in erster Linie der Nährhumuszufuhr und der Aufrechterhaltung des Humusgehaltes (OEHMICHEN, 2000). Hierbei handelt es sich um Substanzen, die sich sowohl in der stofflichen Zusammensetzung als auch in ihrem Umsetzungsverhalten z. T. sehr stark unterscheiden (ASMUS, 1992). Die Kombination von organischer und anorganischer Düngung führt im allgemeinen zu höheren Humusgehalten als alleinige Mineraldüngung oder organische Düngung (SAUERBECK, 1992). Langjährige Dauerversuche auf diluvialen sandigen Böden zeigen, dass bei einer kombinierten organisch-mineralischen Düngung im Vergleich zu alleiniger N-Mineraldüngung Ertragssteigerungen von 5 bis 10 % erzielt werden können (ASMUS, 1992).

Auf den Einfluss der Bodenbearbeitung wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

2.2 Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf die Stratifikation und Umsetzung der organischen Bodensubstanz

2.2.1 Bodenbearbeitungssysteme

Die verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren lassen sich nach der Anzahl der Bearbeitungsschritte, der Art und Intensität der Bearbeitung sowie der Zweckbestimmung des Verfahrens ordnen (BAEUMER, 1992) und können laut KÖLLER & LINKE (2001) in folgende Systeme gegliedert werden:

- (1) Konventionelle Bodenbearbeitung
- (2) Konservierende Bodenbearbeitung
- (3) Direktsaat.

Wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug ist gekennzeichnet durch eine jährlich wiederkehrende Lockerung und Wendung des Bodens auf Krumentiefe (KÖLLER & LINKE, 2001). Sie erzielt unter den o. g. Bodenbearbeitungssystemen den intensivsten Eingriff in den Boden (SEUFERT, 2003). BAEUMER (1992) bezeichnet dieses Bodenbearbeitungssystem als „Lockerbodenwirtschaft“. Die vorhandene Technik und jahrzehntelange Erfahrungen sind Gründe, die für einen Pflugeinsatz sprechen (SOMMER, 1998).

Charakteristisch für konservierende Bodenbearbeitungssysteme ist die Reduzierung der Grundbodenbearbeitungsintensität nach Art, Häufigkeit und Tiefe des Werkzeugeingriffs sowie das Belassen der Pflanzenrückstände nahe bzw. auf der Bodenoberfläche (SOMMER, 1998). BAEUMER (1992) spricht in diesem Zusammenhang von der sog. „Lockerboden-Mulchwirtschaft“. Auf eine Wendung des Bodens wird verzichtet (KÖLLER & LINKE, 2001, SEUFERT, 2003). Hierbei unterscheidet SEUFERT (2003) zwischen Systemen mit und ohne krumentiefer Lockerung. Für eine krumentiefe Bodenlockerung werden zur Erhaltung der natürlichen Bodenschichtung in der Regel Grubber mit nicht wendenden Bodenbearbeitungswerkzeugen verwendet. Häufig kommen Gerätekombinationen zum Einsatz, die eine tiefgreifende Bodenlockerung, Saatbettbereitung und Aussaat in einem Arbeitsgang ermöglichen (KÖLLER & LINKE, 2001).

Die Direktsaat stellt schließlich den geringsten Bodeneingriff dar. Sie verfolgt das Prinzip der „extremen Festboden-Mulchwirtschaft“, wobei sich der Eingriff in den Boden auf das Anlegen von Saatschlitzten beschränkt (BAEUMER, 1992). Hierzu sind spezielle Drillma-

schinen erforderlich, wie z.B. Direktsaatmaschinen mit Scheiben- oder Zinkensäscharen (KÖLLER & LINKE, 2001).

2.2.2 Stratifikation der organischen Bodensubstanz

Das verwendete Bodenbearbeitungsverfahren hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Verteilung der Pflanzenrückstände innerhalb der Ackerkrume (FRANZLUEBBERS, 2004). Nach KLADIVKO (1994) kann der Verbleib von pflanzlichen Reststoffen in 4 Hauptkategorien eingeteilt werden: (1) auf oder nahe der Bodenoberfläche ; (2) teilweise inkorporiert ; (3) vollständig inkorporiert und (4) vollständig von der Ackeroberfläche entfernt. Der durch die unterschiedlichen Bodenbearbeitungssysteme bedingte Verbleib von Pflanzenrückständen ist von entscheidender Bedeutung für die Stratifikation der organischen Bodensubstanz (FRANZLUEBBERS, 2004).

Bei wendender Bodenbearbeitung mit dem Pflug werden sämtliche auf der Ackerfläche befindlichen Pflanzenrückstände auf Krumentiefe eingearbeitet (TEBRÜGGE, 2003), wobei mehr als 60 % in einer Bodentiefe von 15 bis 25 cm schichtweise abgelegt wird (TEBRÜGGE, 1986). Langfristig gesehen kommt es zu einer gleichmäßigen Verteilung der organischen Reststoffe in der Ackerkrume (GROCHOLL, 1991), was innerhalb der Ackerkrume zu einer Homogenisierung der organischen Bodensubstanz führt (FRANZLUEBBERS, 2004). Demzufolge weisen Ober- und Unterkrume ähnliche Humusgehalte auf (GROCHOLL, 1991). Nach Untersuchungen von LIEBHARD (1993) kann bei Pflugbearbeitung eine Aufrechterhaltung des Humusspiegels gerade noch gewährleistet werden. Dagegen verbleiben bei nicht wendender Bodenbearbeitung die Pflanzenreststoffe auf oder nahe der Ackeroberfläche (TEBRÜGGE, 1986), so dass dem unteren Krumenbereich nur geringe Mengen an frischen organischen Reststoffen zugeführt werden (STOCKFISCH, 1997). Direktsaatverfahren belassen die Pflanzenrückstände zu 100 % auf der Bodenoberfläche (TEBRÜGGE, 2003). Somit führt die Reduzierung der Bodenbearbeitungsintensität zur Anreicherung an organischer Substanz in der obersten Bodenschicht (CLAUPEIN & BAEUMER, 1990, EHLERS, 1992, STOCKFISCH, 1997, EPPERLEIN, 2002, HERNANZ et al., 2002).

Eine Entfernung der pflanzlichen Reststoffe, z. B. durch Abfuhr hat große Auswirkungen auf die Dynamik der organischen Bodensubstanz, da diese für die anschließende Humusbildung eine zentrale Stellung einnehmen. Art, Qualität und Menge sowie Zeitpunkt und Intensität der Einarbeitung der Residuen bestimmen das Ausmaß der Humusbildung (FRANZLUEBBERS, 2004).

2.2.3 Umsetzung der organischen Bodensubstanz

KÖRSCHENS (1989) unterteilt die organische Bodensubstanz in eine „inerte“ und eine „umsetzbare“ Fraktion. An der Mineralisation und damit an der N-Freisetzung ist nahezu ausschließlich der umsetzbare Anteil der OBS beteiligt, deren Verlauf jedoch sehr langsam ist. Die inerte Fraktion ist an den Umsetzungsprozessen weitgehend unbeteiligt und steht in enger Korrelation mit dem Tonanteil des Bodens (KÖRSCHENS & SCHULZ, 1999).

Die durchschnittliche Humusmenge in Ackerböden des gemäßigt-humiden Klimas beträgt 100 bis 200 t ha⁻¹ (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002). Eine Tonne Humus enthält etwa 50 kg Humus-N bzw. 5 % N in der Humus-TM und 580 kg C bzw. 58 % C in der Humus-TM (LEITHOLD et al., 1997). Demzufolge besteht zwischen dem N_t- und C_{org}-Gehalt eine enge Beziehung. Fruchtbare Böden weisen in der bearbeiteten Bodenschicht meistens ein C/N-Verhältnis von 10 auf (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002).

In der organischen Bodensubstanz sind bis zu 99 % des gesamten Bodenstickstoffs gespeichert (DORAN, 1992). Stickstoff liegt im Boden zu etwa 90 bis 95 % in organischer Form vor. Nur ein geringer Anteil von 5 bis 10 % kommt in anorganischer Bindung vor. Der organisch gebundene Stickstoff besteht zu zwei Drittel aus Aminosäuren sowie Amid-N und zu einem Drittel aus Aminozuckern, Nucleinsäuren oder heterozyklisch gebundenem N in Huminsäuren (OEHMICHEN, 2000). Im durchwurzelten oberen Bodenbereich sind 3 bis 50 Tonnen pro Hektar gespeichert. Nitrat und Ammonium sind die anorganischen Bindungsformen des Stickstoffs (FREYER, 2003).

In Abhängigkeit vom Humusgehalt, dem C/N-Verhältnis, den Lebensbedingungen der Mikroorganismen und der Bodentemperatur werden in Mineralböden jährlich 1 bis 3 % des organisch gebundenen Stickstoffs mineralisiert, so dass sich eine N-Mobilisierung von 20 bis 150 kg ha⁻¹ ergibt (OEHMICHEN, 2000). Laut FREYER (2003) liegt die Mobilisierung aus dem Humusvorrat bei ca. 30 bis 200 kg N ha⁻¹.

Die Mineralisation bewirkt einem vollständigen mikrobiellen Abbau der organischen Substanz im Boden. Sie besteht aus den beiden Teilprozessen Ammonifikation und Nitrifikation. Bei der Ammonifikation wird aus Aminosäuren oder Aminosukzern unter Beteiligung von Bakterien unterschiedlichster Gattungen Ammonium freigesetzt. Im zweiten Teilprozess wird Ammonium zunächst durch die Nitritbildner zu Nitrit und anschließend durch die Nitratbildner zu Nitrat oxidiert (SCHUBERT, 2006). Hohe pH-Werte, Temperaturen von 25 bis 30 °C sowie gute Wasser- und Sauerstoffversorgung sind optimale Bedingungen für die N-Mineralisation (FREYER, 2003).

Das Ausmaß an Mineralisationsprozessen im Boden wird durch Art, Häufigkeit und Intensität der Bodenbearbeitung bestimmt (SEITER & HORWARTH, 2004). Bei wendender Bodenbearbeitung mit dem Pflug kommt es gegenüber reduzierter Bodenbearbeitung sowie Direktsaat infolge einer verbesserten Durchlüftung des Bodens zu einer verstärkten Mineralisation und Nährstofffreisetzung aus der organischen Bodensubstanz (NIEDER, 1998). Nach EPPERLEIN (2002) liegt die Mineralisation bei Pflugeinsatz um etwa 150 % höher als bei konservierender Bodenbearbeitung. Die Folge ist eine Beschleunigung des Humusabbaus (KÖPPEN, 2004a).

FRIEDEL (1995) stellte bei nicht wendender Bodenbearbeitung mit der Fräse im oberen Krumbereich ein höheres C-Mineralisationspotential fest als bei Pflugeinsatz. DOYLE et al. (2004) berichten bei Direktsaat von einem signifikant höherem C-Mineralisationspotential in 0-5 cm Bodentiefe, die Mineralisationsrate war gegenüber Pflugbearbeitung nicht signifikant.

Durch die feuchteren und kühleren Bodenverhältnisse bei abnehmender Bearbeitungsintensität (KÖLLER & LINKE, 2001) werden die Mineralisationsraten vermindert (CLAUPEIN & BAEUMER, 1990). Infolge des späteren Beginns im Frühjahr und der geringeren Intensität verläuft die Mineralisation jedoch nachhaltiger (HARRACH & RICHTER, 1994). Der Gesamt-N-Gehalt und damit die Menge an potentiell mineralisierbarem Stickstoff in der Krume vergrößert sich. Diesbezüglich besteht jedoch nur ein erhöhtes Gefährdungspotential, wenn nach langjährigem Pflugverzicht, eine Rückkehr zur konventionellen Bodenbearbeitung mit dem Pflug stattfindet. Unerwünschte Mineralisationsschübe können die Folge sein (RICHTER, 1995).

In der Umstellungsphase von wendenden zu nicht wendenden Bodenbearbeitungsverfahren dominieren aufgrund ansteigender Humusgehalte N-Immobilisationsprozesse im Boden (CLAUPEIN & BAEUMER, 1990, KÖLLER & LINKE, 2001). Der Vorrat an organisch gebundenem Stickstoff in der obersten Bodenschicht vergrößert sich zu Lasten des pflan-

zenverfügbaren Mineralstickstoffs, um die geringeren Mineralisationsraten ausgleichen zu können. Nach 10 bis 15 Jahren stellt sich laut CLAUPEIN & BAEUMER (1990) ein neues Fließgleichgewicht ein, so dass reduziert bearbeitete gegenüber gepflügten Böden keine maßgeblichen Unterschiede mehr in der Stickstoffnachlieferung aufweisen. Die Ausprägung und Dauer der Umstellungszeit wird aber sehr stark durch die Stabilität der Bodenstruktur, die Durchlüftung sowie die biologische Aktivität des Bodens beeinflusst (KÖLLER & LINKE, 2001).

2.3 Humusbilanzierung

Der Humushaushalt ackerbaulich genutzter Flächen kann mit Hilfe von Humusbilanzen beurteilt werden (LEITHOLD & HÜLSBERGEN, 1997, LEITHOLD et al., 1997, VDLUFA, 2004). HÜLSBERGEN et al. (2005) bezeichnen die Humusbilanz als „Instrument zur indirekten Einschätzung des Humushaushaltes ackerbaulich genutzter Böden“. Ziel der Humusbilanzierung ist die Abschätzung von bewirtschaftungsbedingten Veränderungen im Humusvorrat von Ackerböden, wobei die Bilanzierung auf der Ebene Fruchtfolge, Schlag oder Gesamtbetrieb erfolgen kann (LEITHOLD & HÜLSBERGEN, 1997, VDLUFA, 2004). Zur Beurteilung dieser Veränderungsprozesse sind lange Untersuchungszeiträume erforderlich, deren Dauer in Abhängigkeit vom Standort deutlich mehr als 10 Jahre betragen kann. Demzufolge sind Dauerfeldversuche die Grundlage der Humusbilanzierung (HÜLSBERGEN et al., 2005).

Das Prinzip der Humusbilanzierung beruht auf der Gegenüberstellung des Humusverlustes durch den Anbau humuszehrender Fruchtarten und die Humuszufuhr durch den Anbau humusmehrender Kulturen sowie durch organische Düngemittel, wie anhand des nachfolgenden Schemas ersichtlich wird (VDLUFA, 2004):

$$\boxed{\text{Humussaldo}} = \boxed{\begin{array}{c} \text{Humuszufuhr} \\ \text{Reproduktionsleistung} \\ \text{organischer Materialien} \end{array}} \text{ minus } \boxed{\begin{array}{c} \text{Humusbedarf} \\ \text{anbauspezifisch} \end{array}}$$

Die auf der Basis langjähriger Versuchsergebnisse und Bewirtschaftungsdaten der Betriebe rechnerisch ermittelten Humussalden lassen Schlussfolgerungen im Hinblick auf die erforderliche Humusersatzwirtschaft zu (HÜLSBERGEN et al., 2005). Bei einem Saldo von ± 0 liegt ein Fließgleichgewicht zwischen Humusaufbau und -abbau vor (LEITHOLD, 2004).

Gegenwärtig werden in Deutschland drei Methoden mit unterschiedlichen Maßstäben zur Bilanzierung des Humushaushaltes verwendet:

1. Reproduktionswirksame organische Substanz (ROS) (ASMUS & HERRMANN, 1977)
2. Humuseinheit (HE) (LEITHOLD & HÜLSBERGEN, 1997, LEITHOLD et al., 1997)
3. Humusäquivalent (Häq) (VDLUFA, 2004)

Die Bezugsbasis der o. g. Bilanzierungsmaßstäben lässt sich laut VDLUFA (2004) folgendermaßen umrechnen:

$$1 \text{ t ROS} = 0,35 \text{ HE}$$

$$1 \text{ HE} = 2,8 \text{ t ROS}$$

$$1 \text{ t ROS} = 1 \text{ t Rottemist-TM} \sim 200 \text{ kg C}$$

$$1 \text{ HE} = 1 \text{ t Humus} \sim 580 \text{ kg C.}$$

Zur Berechnung der Humusbilanz sind Humusbilanz-Koeffizienten für humuszehrende und -mehrende Fruchtarten sowie organische Dünger mit unterschiedlicher Herkunft erforderlich (LEITHOLD, 2004). Die Bodenbearbeitungsintensität findet zur Zeit keine Berücksichtigung. Bereits LEITHOLD & HÜLSBERGEN (1997) sehen jedoch eine Modifizierung der Humusbilanz-Koeffizienten im Hinblick auf eine differenzierte Intensität der Grundbodenbearbeitung als erforderlich. Auch laut VDLUFA (2004) wird eine Überprüfung der Humusbilanzierung hinsichtlich der Bodenbearbeitungsintensität gefordert.

3 Material und Methoden

3.1 Beschreibung der Versuchsstandorte und –anlagen

Um die Wirkungen differenzierter Bodenbearbeitungssysteme auf die organische Bodensubstanz untersuchen zu können, wurden für diese Arbeit sieben verschiedene Versuchsstandorte herangezogen. Die Untersuchungen erfolgten sowohl auf konventionell bzw. integriert als auch auf ökologisch bewirtschafteten Ackerflächen, wobei jeweils nur ausgewählte Varianten Berücksichtigung fanden.

3.1.1 Dauerversuch „Ökologisch-Integrierte Anbausysteme“ Bad Lauchstädt

Der Dauerversuch „Ökologisch-Integrierte Anbausysteme“ wurde 1998 in der Versuchstation Bad Lauchstädt angelegt, um die Langfristigkeit differenzierter Düngungs- und Bodenbearbeitungssysteme unter ökologischen und integrierten Anbaubedingungen zu untersuchen. Hierbei handelt es sich um einen dynamischen Feldversuch, wobei die Produktionstechnik durch fest vorgegebene Bewirtschaftungssysteme (Fruchtfolge, Tierbesatz) an die jeweiligen Anbaubedingungen angepasst wird (HÜLSBERGEN et al., 2001).

Das Versuchsfeld befindet sich 113 m über NN am Ostrand der Querfurter Platte des Schwarzerdegebietes Sachsen-Anhalts. Maßgeblichen Einfluss auf das Klima hat die Regenschattenwirkung des Harzes. Die durchschnittliche Jahrestemperatur im langjährigen Mittel (1896 - 1995) betrug 8,7 °C, die mittlere Niederschlagsmenge lag bei 484 mm. Längere Trockenperioden in den Monaten Mai und Juni sind charakteristisch für diesen Standort. Der Bodentyp ist eine Löss-Schwarzerde mit einer Ackerzahl von 92 bis 96 Bodenpunkten, die Bodenart ist Lehm mit einem Tongehalt von 22 % (HÜLSBERGEN et al., 2001).

Der Versuch besteht jeweils aus einer dreifaktoriellen zweistufigen Spaltanlage mit vier Wiederholungen und 96 Parzellen für jedes Anbausystem. Jede Parzelle besitzt eine Länge von 11,5 m und eine Breite von 6,0 m, so dass sich eine Parzellenfläche von 69 m² ergibt. Die Gesamtgröße der Versuchsanlage beträgt 21009 m².

Der Prüffaktor A beinhaltet die Fruchtart in sechs Faktorstufen, wobei in Stufe a_2 zwischen viehhaltenden und viehlosen Betriebssystemen unterschieden wird. Den Prüffaktor B in zweifacher Abstufung stellt die organische Düngung dar. Der Prüffaktor C umfasst die Bodenbearbeitung mit zwei Faktorstufen. Die konventionelle Bodenbearbeitung erfolgt mit dem Pflug, die strukturschonende Bearbeitung wird im integrierten Anbausystem mit dem Schwergrubber durchgeführt (HÜLSBERGEN et al., 2001). Tabelle 1 zeigt einen genauen Überblick über die Versuchsanlage.

Tab. 1: Versuchsanlage Bad Lauchstädt (Prüfglieder, die bei den Untersuchungen berücksichtigt wurden, sind durch blauen Fettdruck hervorgehoben) (Quelle: in Anlehnung an HÜLSBERGEN et al., 2001)

Anagemethode	Dreifaktorielle zweistufige Spaltanlage
Prüffaktor A:	Fruchtart: a_1 : Klee-Luzerne-Gras a_2 : Silomais (bei b_1) / Kartoffeln (bei b_2) a_3: Winterweizen a_4 : Wintergerste a_5 : Erbsen a_6 : Winterroggen + Untersaat Klee-Luzerne-Gras
Prüffaktor B:	Organische Düngung: b_1: Stallmist als Rottedung vom Rind b_2 : Stroh- und Gründüngung
Prüffaktor C:	Bodenbearbeitung c_1: konventionell (20 cm) c_2: strukturschonend (15 cm)
Wiederholungen	4
Gesamtparzellenzahl	je Anbausystem 96
Parzellenbreite	6,00 m
Parzellenlänge	11,50 m

Für die vorliegende Arbeit wurde nur das integrierte Anbausystem mit den Prüfgliedkombinationen $a_3b_1c_1$ und $a_3b_1c_2$ berücksichtigt (vgl. Tab. 1).

3.1.2 Gießener Bodenbearbeitungsversuche

Aus den vom Institut für Landtechnik der Justus-Liebig-Universität angelegten Bodenbearbeitungsversuche in Form von Langparzellen wurden für diese Arbeit drei verschiedene Standorte herangezogen. In Tab. 2 sind einige Kennzeichen dieser Standorte zusammengestellt.

Tab. 2: Kennzeichen der ausgewählten Standorte (Quelle: in Anlehnung an TEBRÜGGE, 1994)

Standort	Textur			C _{org} (in %)	pH (CaCl ₂)
	Ton	Schluff (in %)	Sand		
Gießen	31,0	53,0	16,0	1,52	6,6
Hassenhausen	13,8	66,7	19,5	1,30	6,7
Ossenheim	21,2	67,3	11,5	1,59	7,3

Nach der Ernte erfolgt in allen Bodenbearbeitungsvarianten eine Stoppelbearbeitung, die in der Direktsaatvariante erst seit einigen Jahren durchgeführt wird. Die Varianten lassen sich folgendermaßen charakterisieren:

- **Pflug + Sekundärbearbeitung (P):**
Die wendende Grundbodenbearbeitung erfolgt mit einem 4-Schar-Volldrehpflug (160 cm) bis zu einer Tiefe von 25 cm. Bei der nachfolgenden Sekundärbearbeitung mittels einer Kreiselgrubber-Drillmaschinenkombination mit einer Arbeitsbreite von 3 m beschränkt sich die Eingriffstiefe auf 10 cm.
- **Schwergrubber mit Rotoregge (SR):**
Der dreibalkige Schwergrubber mit Doppelherzscharen und einer Arbeitsbreite von 2,55 m weist einen Strichabstand von 25 cm auf und lockert den Boden wie beim Pflügen auf volle Krumentiefe. Die Arbeitstiefe der angebauten Rotoregge beträgt 10 cm. Die Aussaat wird in einem zweiten Arbeitsgang mit der Kreiselgrubber-Drillmaschinenkombination durchgeführt.

- **Flügelschargrubber mit Rotoregge (FR):**
Bei dieser Bodenbearbeitungsvariante wird ein Flügelschargrubber (einbalkig) mit Rotoregge und aufgebauter pneumatischer Drillmaschine mit Scheibenscharen (2,50 m Arbeitsbreite) eingesetzt, so dass Grundbodenbearbeitung und Aussaat in einem Arbeitsschritt erfolgen. Die Eingriffstiefe des Flügelschargrubbers beträgt 25 cm und die der Rotoregge 10 cm. Somit verbleiben etwa 30 % der Pflanzenrückstände an der Bodenoberfläche und 70 % werden in die obere Krumenschicht eingemischt.

- **Direktsaat (D):**
Bei der Direktsaat wird auf jegliche Art von Bodenbearbeitung verzichtet. Der Eingriff in den Boden beschränkt sich bei dieser Bodenbearbeitungsvariante nur auf die Tiefe der Saatgutablage und damit auf das Anlegen von Saatschlitzten. Dies wird mit einer Direktsaatmaschine, Arbeitsbreite 3 m, durchgeführt, die mit Meißel-Säscharen und einer pneumatischen Drillmaschine ausgerüstet ist.

3.1.2.1 Gießen

Der im Gießener Lahntal liegende Standort (156 m über NN) ist gekennzeichnet durch eine durchschnittliche Jahrestemperatur von 8 °C und eine mittlere Jahresniederschlagsmenge von 600 mm. Als Bodentyp findet sich ein Brauner Auenboden aus holozänen Ablagerungen der Lahn (Auenlehme). Die Bodenart ist schluffiger bis schluffig-toniger Lehm (RICHTER, 1995).

Die Versuchsanlage wurde 1986 mit doppelter Wiederholung für jede Bodenbearbeitungsvariante angelegt. Jede Parzelle hat eine maximale Länge von 346 m und eine Breite von 12 m. Berücksichtigung fanden die oben beschriebenen Varianten.

Das Stroh wird i.d.R. abgefahren. Auf der Versuchsfläche erfolgte im Untersuchungs-jahr 2005 der Anbau von Silomais, Vorfrucht war Winterweizen. Die Fruchtfolgegestaltung am Standort Gießen geht aus Tab. 3 hervor.

Tab. 3: Fruchtfolgegestaltung am Standort Gießen

Fruchtfolgefeld	Fruchtart
1	Silomais
2	Winterweizen
3	Hafer
4	Wintergerste

3.1.2.2 Hassenhausen

Der Versuchsstandort Hassenhausen befindet sich im Grenzbereich des Marburger Lahn-ales, Gemarkung Erbenhausen. Wesentliche Standortcharakteristika sind die Höhenlage mit 280 m über NN, die Jahresniederschlagssumme mit 630 mm und eine mittlere Jahrestemperatur von 7,5 °C. Bei der Geländeform handelt es sich um einen sehr schwach geneigten Mittelhang. Der Bodentyp ist eine schwach pseudovergleyte Parabraunerde aus Lösslehm über Buntsandstein, die Bodenart ein schwach toniger bis toniger Schluff (RICHTER, 1995).

Auf diesem Standort erfolgt seit 1979 eine differenzierte Bodenbearbeitung, während die Direktsaatvariante erst im Jahre 1988 in den Versuch integriert worden ist. Die Versuchsanlage weist eine Länge von 240 m auf, die Parzellenbreite variiert zwischen 12 und 31 m. Der Versuch enthält jedoch keine Wiederholungen.

Das Stroh verbleibt i.d.R. auf dem Feld. Jedes Jahr werden ca. 30 m³ Schweinegülle ausgebracht. Aus Tab. 4 wird die Fruchtfolge am Standort Hassenhausen ersichtlich. Im Untersuchungsjahr 2005 wurde Winterraps angebaut.

Tab. 4: Fruchtfolgegestaltung am Standort Hassenhausen

Fruchtfolgefeld	Fruchtart
1	Winterraps
2	Winterweizen
3	Winterweizen
4	Wintergerste

3.1.2.3 Ossenheim

Der Standort Ossenheim liegt 125 m über NN in der Wetterau östlich von Friedberg. Das ebene Versuchsfeld ist gekennzeichnet durch eine Jahresmitteltemperatur von 9 °C und eine durchschnittliche Jahresniederschlagshöhe von 550 bis 600 mm. Der Bodentyp ist eine Tschernosem-Parabraunerde aus Löss, dessen Unterboden, bedingt durch die Auenrandlage, vergleht ist. Die Schwankungen des Grundwasserstandes im Jahresverlauf zwischen 1,2 m im Frühjahr und bis > 2 m unter Geländeoberfläche im Sommer führten zu Eisen- und Mangankonkretionen im Bt-Horizont.

Die mittlere Durchwurzelungstiefe beträgt ca. 100 cm. Die Bodenart im Oberboden ist schluffiger Lehm mit 21 % Ton und im Unterboden tonig-schluffiger Lehm mit 30 bis 35 % Ton (DÜRING et al., 2005).

Im Jahre 1979 wurden auf dem Standort Ossenheim verschiedene Bodenbearbeitungsvarianten angelegt, die 1990 eine Veränderung erfuhren. Übrig geblieben sind vier Varianten (P, FR, R, D), wobei für die eigenen Untersuchungen die Varianten P, FR und D ausgewählt wurden. Die Länge der Versuchsanlage beträgt 164 m und die Breite 90 m. Tab. 5 zeigt die Fruchtfolge am Standort Ossenheim. Im Versuchsjahr 2005 erfolgte wie in 2003 und 2004 der Anbau von Winterweizen.

Tab. 5: Fruchtfolgegestaltung am Standort Ossenheim

Fruchtfolgefeld	Fruchtart
1	Zuckerrüben
2	Winterweizen
3	Winterweizen
4	Winterweizen

3.1.3 Ökologischer Ackerbauversuch Gladbacherhof

Die Hessische Staatsdomäne Gladbacherhof, Lehr- und Versuchsbetrieb für ökologischen Landbau der Justus-Liebig-Universität Gießen in Villmar-Aumenau, Kreis Limburg-Weilburg liegt 140 - 230 m über NN, ca. 17 km östlich von Limburg an den nordwestlichen Ausläufern des Taunus. Die mittlere jährliche Niederschlagssumme beträgt 670 mm, die Durchschnittstemperatur im langjährigen Mittel liegt bei 9,3 °C. Als Bodentyp ist eine Pararendzina bis erodierte Parabraunerde mit einer Ackerzahl von 66 anzufinden. Die Bodenart ist schluffiger Lehm bis lehmiger Schluff.

Auf der Versuchsfläche Gewann II (170 m über NN) wurde im Frühjahr 1998 ein Feldversuch in Form einer vollrandomisierten zweifaktoriellen Spaltanlage mit dem Prüffaktor A als Großteilstück und dem Prüffaktor B als Kleinteilstück angelegt. Geprüft werden 12 Varianten in vierfacher Wiederholung, so dass sich eine Gesamtparzellenzahl von 48 ergibt. Jedes Kleinteilstück hat eine Länge von 14 m und eine Breite von 9 m. Die Gesamtgröße der Versuchsanlage einschließlich Wege und Schutz beträgt 12384 m².

Der Prüffaktor A umfasst das Fruchtfolgesystem in dreifacher Abstufung, wobei dem viehhaltenden System mit Rinderhaltung (ca. 0,9 GV, Futterbau, Strohabfuhr, Mistdüngung) zwei viehlose Systeme (nur Export der Marktfrüchte) gegenüber gestellt werden. In Tab. 6 ist die Fruchtfolgegestaltung seit 1998 im ökologischen Ackerbauversuch Gladbacherhof der ausgewählten Varianten zusammengestellt. Der Prüffaktor B beinhaltet das Bodenbear-

Tab. 6: Fruchtfolgegestaltung im Ökologischen Ackerbauversuch Gladbacherhof seit 1998

Jahr	viehhaltend (a ₁)	viehlos (a ₃)
1998	Luzernegras	Sommerweizen + Stoppelsaat
1999	Luzernegras	Ackerbohnen + Untersaat
2000	Winterweizen + Stoppelsaat	Winterweizen + Stoppelsaat
2001	Kartoffeln	Kartoffeln
2002	Hafer-Erbsen-GPS + Untersaat	Erbsen
2003	Winterroggen + Untersaat	Winterroggen + Stoppelsaat
2004	Luzernegras	Sommerweizen + Stoppelsaat
2005	Luzernegras	Ackerbohnen + Untersaat
2006	Winterweizen + Stoppelsaat	Winterweizen + Stoppelsaat

beitungssystem mit vier Faktorstufen. Die Stoppelbearbeitung erfolgt in der tief wendenden Variante (b₁) mit dem Grubber auf einer Tiefe < 15 cm. Einen genauen Überblick über die Versuchsanlage gibt Tabelle 7.

Tab. 7: Versuchsanlage Ökologischer Ackerbauversuch Gladbacherhof (Prüfglieder, die bei den Untersuchungen berücksichtigt wurden, sind durch blauen Fettdruck hervorgehoben)

Anagemethode	Vollrandomisierte zweifaktorielle Spaltanlage
Prüffaktor A:	Fruchtfolgesystem, 3 Faktorstufen: a₁: viehhaltend a ₂ : viehlos Grünbrache a₃: viehlos Körnerleguminosen
Prüffaktor B:	Bodenbearbeitungssystem, 4 Faktorstufen: b₁: tief wendend mit Pflug (30 cm) b ₂ : flach wendend/tief lockernd mit Zweischichtenpflug (15/30 cm) b ₃ : flach wendend mit Pflug (15 cm) b₄: Flügelschargrubber mit Zinkenrotor (30/15 cm)
Wiederholungen	4
Gesamtparzellenzahl	48
Parzellenbreite	9,00 m
Parzellenlänge	14,00 m

Für die vorliegende Arbeit wurden folgende Prüfgliedkombinationen berücksichtigt (vgl.

Tab. 7):

- a₁b₁
- a₁b₄
- a₃b₁
- a₃b₄.

3.1.4 Ökologische Fruchtfolge Güterfelde

Der Dauerfeldversuch „Ökologische Fruchtfolge Güterfelde“, im Kreis Potsdam-Mittelmark wurde 1993/94 eingerichtet. Die Landesanstalt für Landwirtschaft des Landes Brandenburg führt hier seit 1994/95 Untersuchungen zur Nachhaltigkeit von Ertragsniveau, Produktqualität und Nährstoffversorgung anhand einer siebenfeldrigen Ökologischen Demonstrations-Fruchtfolge durch.

Wesentliche Standortcharakteristika sind die Jahresniederschlagssumme von 545 mm und eine mittlere Jahrestemperatur von 8,9°C. Dominierende Bodenart ist lehmiger Sand, der Bodentyp ist als Parabraunerde anzusprechen. Die Ackerzahl liegt zwischen 23 und 31 Bodenpunkten (DITTMANN, 2006).

Jede Fruchtart der in Tabelle 8 dargestellten Fruchtfolge wird jährlich in einer separaten Streifen-Spaltanlage mit vierfacher Wiederholung angebaut.

Die Versuchsanlage geht aus Tab. 9 hervor. Der Prüffaktor A beinhaltet die Grundbodenbearbeitung mit zwei Faktorstufen. Die wendende Bodenbearbeitung erfolgt mit dem Pflug, bei der nicht wendenden Bearbeitung werden Schwergrubber und Scheibenegge eingesetzt. Der Prüffaktor B enthält die organische Düngung in zweifacher Abstufung, wobei zwischen viehhaltender und viehloser Bewirtschaftung unterschieden wird.

**Tab. 8: Ökologische Demonstrations-Fruchtfolge Güterfelde
(Quelle: nach DITTMANN, 2006)**

Fruchtfolgefeld	Fruchtart
1	Silomais
2	Winterroggen + Klee grasuntersaat
3	Klee gras + Zwischenfrucht
4	Kartoffeln
5	Winterroggen + Zwischenfrucht
6	Lupine
7	Wintertriticale + Zwischenfrucht

Tab. 9: Versuchsanlage Güterfelde (Prüfglieder, die bei den Untersuchungen berücksichtigt wurden, sind durch blauen Fettdruck hervorgehoben) (Quelle: in Anlehnung an DITTMANN, 2006)

Anlagemethode	Streifen-Spaltanlage
Prüffaktor A:	Grundbodenbearbeitung: a₁: wendend mit Pflug (25 cm) a₂: nicht wendend mit Scheibenegge/Schwergrubber (10 cm)
Prüffaktor B:	Organische Düngung: b ₁ : viehhaltende Bewirtschaftung mit Dunganfall (0,7 GV/ha) <ul style="list-style-type: none"> - 200 dt/ha Stalldung zu Kartoffeln und Silomais - 100 dt/ha Stalldung als Kopfdüngung zu Winterroggen und -triticale b₂: viehlos ohne Dunganfall
Wiederholungen	4
Parzellenbreite	1,50 m
Parzellenlänge	18,70 m

In der vorliegenden Arbeit wurden die Parzellen mit der Fruchtart Winterroggen (5. Fruchtfolgefeld) und den Prüfgliedkombinationen a₁b₂ sowie a₂b₂ ausgewählt (vgl. Tab. 8 und 9).

3.1.5 Systemversuch Scheyern

Das Kloostergut Scheyern liegt im Bayerischen Tertiär-Hügelland (Donau-Isar-Hügelland), Kreis Pfaffenhofen an der Ilm, 40 km nördlich von München auf einer Höhe von 450 bis 490 m über NN. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 7,4 °C, die durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge liegt bei 843 mm. Der Standort ist durch eine hohe Variabilität von verschiedenen Bodentypen gekennzeichnet. Reliefbedingt besteht eine erhöhte Erosionsgefahr. Die Tongehalte liegen zwischen 9 und 45 %. Es herrschen Braunerden mit geringmächtigen Lösslehm-Auflagen vor.

Nach einer zweijährigen Inventurphase mit einheitlicher Bewirtschaftung der gesamten Ackerfläche wurde im Herbst 1992 die Betriebsfläche des Klostergutes Scheyern zu Forschungszwecken in einen integrierten und ökologischen Betrieb (114 ha) sowie in eine Parzellenversuchsanlage (39 ha) aufgeteilt, die zur Untersuchung der Wirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf das Agrarökosystem dient. Hierzu erfolgte die Anlage eines Systemversuches für die integrierte und ökologische Wirtschaftsweise mit derselben Fruchtfolge wie im Versuchsbetrieb. Die Bodenzahlen variieren im integrierten Betrieb von 45 bis 68, im ökologischen Betrieb von 35 bis 68 (OSINSKI & PRIESACK, 2005).

Im integrierten Systemversuch (Spaltanlage) wird eine vierfeldrige Fruchtfolge mit Bodenbearbeitung und Düngungsintensität in jeweils dreifacher Abstufung geprüft. Die Versuchsanlage enthält drei Wiederholungen, so dass sich insgesamt 108 Parzellen ergeben. Tab. 10 liefert detaillierte Informationen über die Versuchsanlage.

Tab. 10: Versuchsanlage integrierter Systemversuch Scheyern (Prüfglieder, die bei den Untersuchungen berücksichtigt wurden, sind durch blauen Fettdruck hervorgehoben) (Quelle: in Anlehnung an OSINSKI & PRIESACK, 2005)

Anlagemethode	Spaltanlage
Fruchtfolge	1 Kartoffeln 2 Winterweizen + Zwischenfrucht 3 Mais 4 Winterweizen + Zwischenfrucht
Prüffaktor A:	Bodenbearbeitung: a₁: wendend mit Pflug (> 20 cm) a ₂ : tief mischend mit Rototiller, Grubber (~ 15 cm) a₃: ohne/flach mischend mit Rototiller, Grubber, Kreisel-egge (~ 8 cm)
Prüffaktor B:	Düngungsintensität (AHL): b ₁ : niedrig (WW = 90, Kart = 50, Mais = 65 kg N/ha) b₂: mittel (WW = 135, Kart = 100, Mais = 105 kg N/ha) b ₃ : hoch (WW = 180, Kart = 150, Mais = 135 kg N/ha)
Wiederholungen	3
Gesamtparzellenzahl	108
Parzellenbreite	3,00 m
Parzellenlänge	12,00 m

Für die eigenen Untersuchungen wurden die Prüfgliedkombinationen a_1b_2 und a_3b_2 mit der Fruchtart Winterweizen herangezogen (vgl. Tab. 10).

3.2 Probenahme

Die Entnahme der Bodenproben erfolgte auf den sieben Versuchsstandorten zu den in Tabelle 11 aufgelisteten Terminen und Tiefenabstufungen. Die Bodenzone 12 bis 17 cm wurde am Gladbacherhof ausgespart, um bei der Probenahme zwei getrennte Bodenschichten zu erhalten.

Tab. 11: Übersicht über die Probenahmetermine und Tiefenabstufungen auf den verschiedenen Versuchsstandorten

Standort	Probenahme-Termin	Tiefenabstufung
Bad Lauchstädt	28.03.2006	0-10 cm und 10-20 cm
Gießen	30.03.2005	0-5 cm, 5-10 cm und 10-25 cm
Hassenhausen	14.03.2005	0-5 cm, 5-10 cm und 10-25 cm
Ossenheim	31.03.2005	0-5 cm, 5-10 cm und 10-25 cm
Gladbacherhof	22.03.2006	0-12 cm und 17-25 cm
Güterfelde	29.03.2006	0-12,5 cm und 12,5-25 cm
Scheyern	04.04.2006	0-10 cm und 10-20 cm

3.3 Prüfmerkmalserfassung

➤ Lagerungsdichte:

Zur Bestimmung der Lagerungsdichte des Bodens wurden mit Hilfe von Stechzylindern ungestörte Bodenproben in den verschiedenen Tiefenstufen aller ausgewählten Varianten entnommen. Am Standort Gießen erfolgte die Beprobung nur in einer Wiederholung. Das Volumen der Stechzylinder betrug 400 cm^3 , wobei auf den Standorten Hassenhausen (nur Pflugvariante) und Gladbacherhof jeweils $4 \times 100 \text{ cm}^3$ zur Anwendung kam. Diese Proben wurden bei $105 \text{ }^\circ\text{C}$ bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend gewogen. Aus

dem ermittelten Gewicht und dem Stechzylindervolumen lässt sich mit Hilfe der folgenden Formel die Lagerungsdichte (LD) berechnen:

$$LD [g \text{ cm}^{-3}] = \frac{\text{Trockengewicht des Bodens [g]}}{\text{Volumen [cm}^3\text{]}}$$

➤ Gesamtkohlenstoff (C_t):

Die Bestimmung des C_t -Gehaltes erfolgte simultan mittels Elementaranalysator Vario EL. Aus Kapazitätsgründen konnte der anorganisch gebundene Carbonat-Kohlenstoff nicht bestimmt werden, so dass auch keine C_{org} -Gehalte berechnet werden konnten. Die C_t -Gehalte wurden mittels Lagerungsdichte und Schichtdicke in Kohlenstoffmengen pro Flächeneinheit [$t \text{ ha}^{-1}$] umgerechnet.

3.4 Statistische Auswertung

Die Auswertung der Versuchsdaten erfolgte mit Hilfe von Microsoft Excel und dem Statistikprogramm SPSS. Anhand deskriptiver Statistik wurden die Kennwerte arithmetisches Mittel und Standardabweichung ermittelt. Um signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten nachweisen zu können, wurde der t-Test herangezogen, mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\leq 5 \%$. Signifikante Unterschiede zwischen Ober- und Unterkrume sind durch * gekennzeichnet, verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Differenzen zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten.

Das Datenmaterial der Versuchsstandorte Gießen, Hassenhausen und Ossenheim konnte aufgrund nur einer Wiederholung nicht statistisch verrechnet werden. Um diese Daten dennoch mit den anderen Standorten vergleichen zu können, wurden die relativen Kohlenstoffmengen berechnet und zwar in Relation zur wendenden Bodenbearbeitung mit dem Pflug (Pflugvariante = 100 %).

4 Ergebnisse

4.1 Dauerversuch „Ökologisch - Integrierte Anbausysteme“ Bad Lauchstädt

4.1.1 Lagerungsdichte

Bei wendender Bodenbearbeitung mit dem Pflug (c_1) zeigte sich in der gesamten Ackerkrume eine gleichmäßige Dichtlagerung. Demgegenüber führte der Verzicht auf eine Bodenwendung (c_2) zu einer geringeren Lagerungsdichte im oberen Krumbereich, die in der Unterkrume anstieg. Signifikante Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten sowie zwischen Ober- und Unterkrume konnten nicht festgestellt werden (Tab. 12).

Tab. 12: Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Bad Lauchstädt im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1998)

Integriertes Anbausystem		
	Lagerungsdichte [g cm^{-3}]	
Bodentiefe [cm]	Pflug (c_1)	Schwergrubber (c_2)
0 – 10	1,42	1,33
10 – 20	1,43	1,41

Bearbeitungstiefe: Pflug 20 cm, Schwergrubber 15 cm

4.1.2 Gesamtkohlenstoff (C_t)

Die Kohlenstoffgehalte für den Versuchsstandort Bad Lauchstädt sind in Abb. 1 dargestellt. Das Pflügen (c_1) bewirkte ähnliche Gehalte in Ober- und Unterkrume, wohingegen es bei der Schwergrubbersvariante (c_2) zu signifikanten Differenzen kam. Der C_t -Gehalt im unteren Krumbereich dieser Variante fiel signifikant niedriger aus. In der oberen Bodenschicht (0-10 cm) wurde der höchste Wert erreicht.

Unter Berücksichtigung der jeweiligen Lagerungsdichten wurden die Kohlenstoffgehalte der verschiedenen Bodentiefen in Kohlenstoffmengen pro Flächeneinheit umgerechnet, wie aus Abb. 2 hervorgeht. Der Grubbereinsatz (c_2) bewirkte in beiden Bodenschichten niedrigere Werte als bei wendender Bodenbearbeitung mit dem Pflug (c_1).

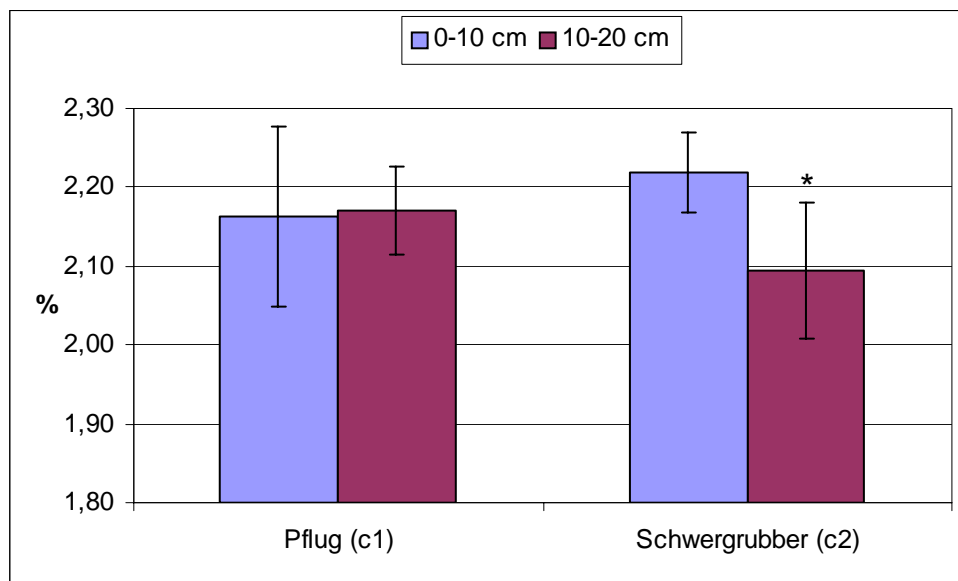


Abb. 1: C₁-Gehalte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Bad Lauchstädt im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1998). Signifikante Unterschiede zwischen Ober- und Unterkrume sind durch * gekennzeichnet ($p \leq 0,05$); Bearbeitungstiefe: Pflug 20 cm, Schwergrubber 15 cm

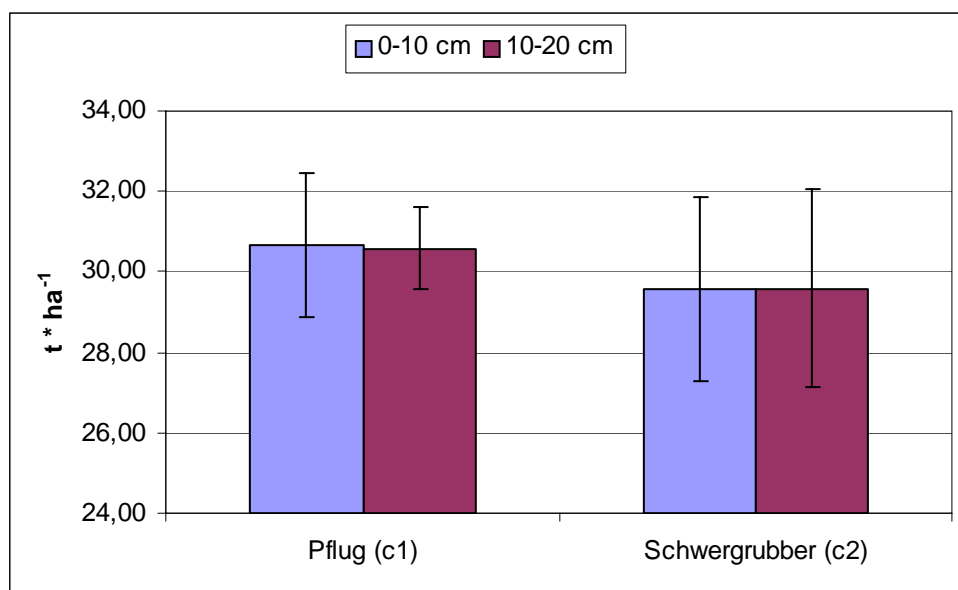


Abb. 2: C₁-Mengen (t ha⁻¹) in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Bad Lauchstädt im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1998); Bearbeitungstiefe: Pflug 20 cm, Schwergrubber 15 cm

Im Hinblick auf die Gesamtmenge an Kohlenstoff in der Ackerkrume waren die beiden Bodenbearbeitungsvarianten nicht signifikant verschieden. Bei der Schwergrubbervariante (c₂) lag die Gesamtkohlenstoffmenge um 2,12 t ha⁻¹ niedriger (Abb. 3).

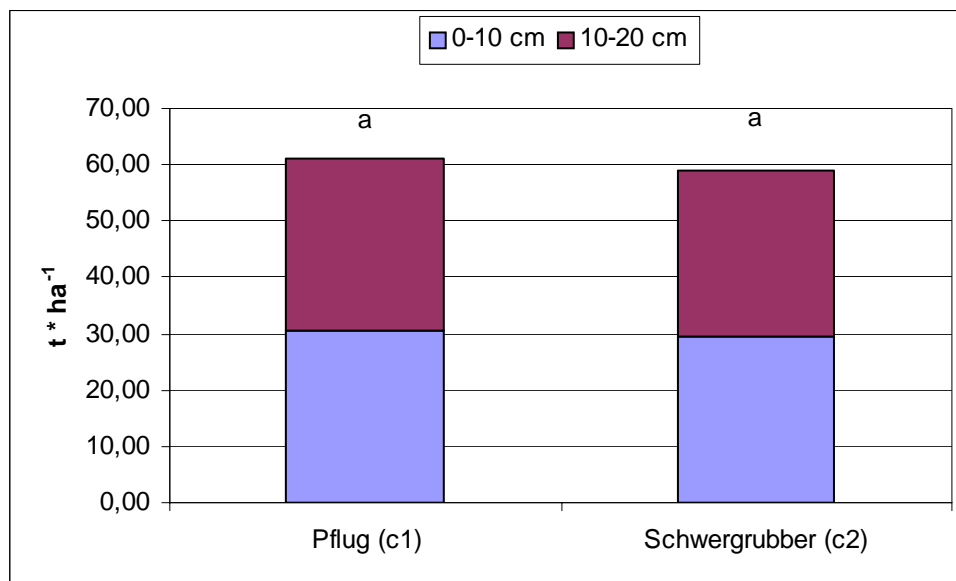


Abb. 3: C₁-Mengen (t ha⁻¹) in der Ackerkrume (0-20 cm) bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Bad Lauchstädt im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1998). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$); Bearbeitungstiefe: Pflug 20 cm, Schwergrubber 15 cm

4.2 Gießen

4.2.1 Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Gießen ist in Tab. 13 dargestellt. In der P-Variante lagerte der Boden in der obersten Krumenschicht geringfügig höher als im mittleren Bereich, in der Bodentiefe von 10 bis 25 cm kam es wieder zu einem Anstieg der Lagerungsdichte. Die pfluglosen Bearbeitungsvarianten (SR, FR, D) zeigten eine Zunahme der Dichtlagerung mit zunehmender Bodentiefe. Im Vergleich zur wendenden Bodenbearbeitung mit dem Pflug trat in der bodennahen Schicht (0-5 cm) der SR- und Direktsaat-Variante eine niedrigere Lagerungsdichte auf. Bei der FR-Variante wurde in der obersten und untersten Krumenschicht gegenüber der Direktsaat eine dichtere Lagerung des Bodens beobachtet, wobei die Differenz in der bodennahen Schicht $0,08 \text{ g cm}^{-3}$ betrug.

Tab. 13: Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Gießen im Frühjahr 2005 (Versuchsbeginn: 1986)

Bodentiefe [cm]	Lagerungsdichte [g cm^{-3}]			
	P	SR	FR	D
0 – 5	1,49	1,44	1,53	1,45
5 – 10	1,47	1,46	1,53	1,64
10 – 25	1,50	1,50	1,65	1,64

P = Pflug + Sekundärbearbeitung (25/10 cm)

SR = Schwergrubber mit Rotoregge (25/10 cm)

FR = Flügelschargrubber mit Rotoregge (25/10 cm)

D = Direktsaat

4.2.2 Gesamtkohlenstoff (C_t)

In der bodennahen Schicht (0-5 cm) kam es von der Pflug- zur Direktsaat-Variante zu einem Anstieg der Kohlenstoffgehalte, so dass zwischen P- und D-Variante die größten Differenzen beobachtet wurden. Die P-Variante hatte einen nahezu gleichen Kohlenstoffgehalt in allen drei Bodenbereichen. Demgegenüber zeigte sich bei der FR- und D-Variante eine kontinuierliche Abnahme mit zunehmender Bodentiefe, die bei der Direktsaat eine deutliche Differenzierung zwischen der oberen und mittleren Krumenschicht bewirkte (Abb. 4).

Mit Hilfe der Lagerungsdichte wurden die Kohlenstoffgehalte in Gesamtmengen an Kohlenstoff pro Flächeneinheit umgerechnet. Da die Tiefenabstufung bei der Probenahme nicht gleichmäßig war, sind die Kohlenstoffmengen zur Gewährleistung einer besseren Vergleichbarkeit bezogen auf eine Schichtdicke von 1 dm dargestellt. Bei der Pflugvariante bestanden zwischen den verschiedenen Bodentiefen nahezu keine Unterschiede, wohingegen bei der FR- und D-Variante die Kohlenstoffmengen mit zunehmender Bodentiefe abnahmen. In der obersten Krumenschicht (0-5 cm) der Direktsaat wurde die höchste Kohlenstoffmenge beobachtet (Abb. 5).

Aus Abb. 6 wird die Menge an Kohlenstoff in der gesamten Ackerkrume bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung ersichtlich. Bei der Direktsaat wurde mit $69,62 \text{ t ha}^{-1}$ die höchste Gesamtmenge an Kohlenstoff gefunden, die im Vergleich zur wendenden Bodenbearbeitung um $9,0 \text{ t ha}^{-1}$ höher lag. Die SR-Variante fiel am niedrigsten aus.

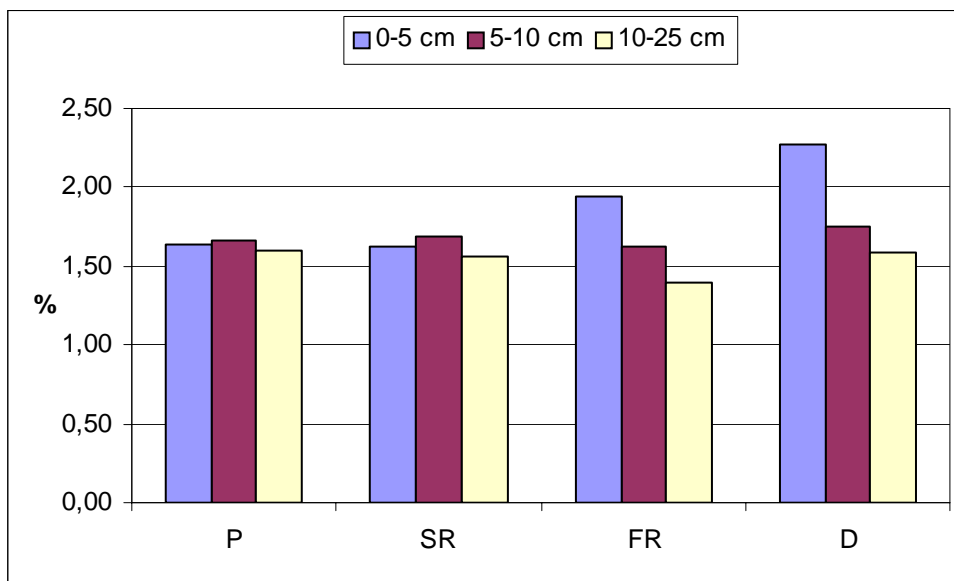


Abb. 4: C_t-Gehalte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Gießen im Frühjahr 2005 (Versuchsbeginn: 1986)

P = Pflug + Sekundärbearbeitung (25/10 cm)
 SR = Schwergrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
 FR = Flügelschargrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
 D = Direktsaat

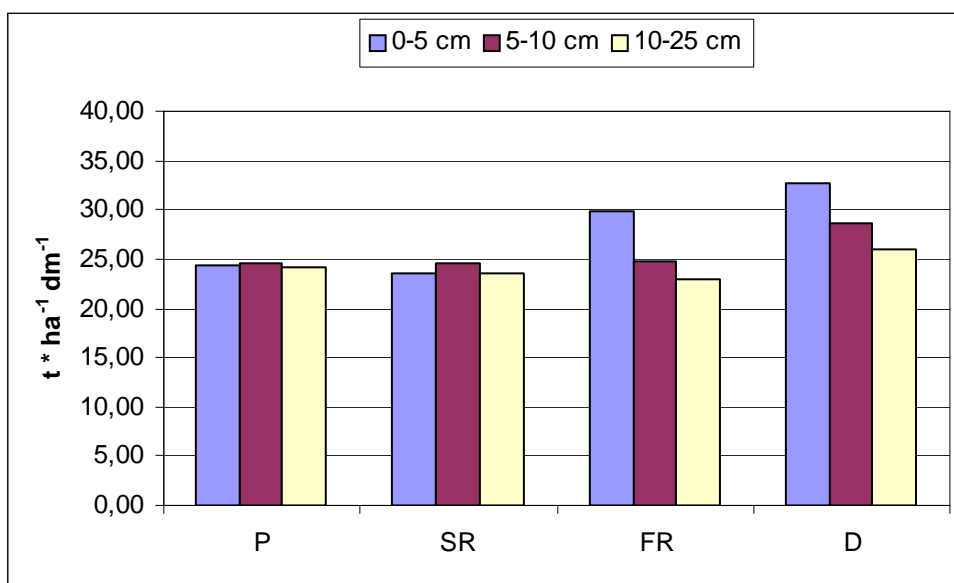


Abb. 5: C_t-Mengen (t ha⁻¹) bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und Bodentiefe bezogen auf eine Schichtdicke von 1 dm am Standort Gießen im Frühjahr 2005 (Versuchsbeginn: 1986)

P = Pflug + Sekundärbearbeitung (25/10 cm)
 SR = Schwergrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
 FR = Flügelschargrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
 D = Direktsaat

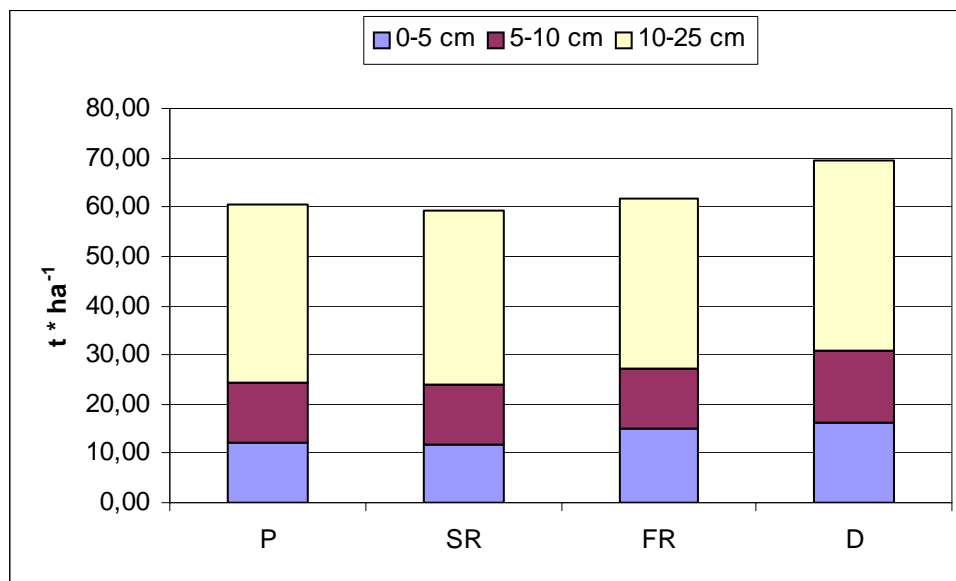


Abb. 6: C_t-Mengen (t ha⁻¹) in der Ackerkrume (0-25 cm) bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Gießen im Frühjahr 2005 (Versuchsbeginn: 1986)

- P = Pflug + Sekundärbearbeitung (25/10 cm)
- SR = Schwergrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
- FR = Flügelschargrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
- D = Direktsaat

4.3 Hassenhausen

4.3.1 Lagerungsdichte

Die Dichtlagerung des Bodens erhöhte sich, wie am Standort Gießen, mit zunehmender Bodentiefe, wobei sich die Lagerungsdichten der P-Variante im gesamten Krumbereich ähnelten. Des weiteren nahmen in der obersten Bodenschicht (0-5 cm) die Werte mit der Reduzierung der Eingriffsintensität in den Boden ab. So erreichte die Direktsaat mit einer Lagerungsdichte von 1,19 g cm⁻³ den niedrigsten Wert und in 10-25 cm Bodentiefe die höchste Lagerungsdichte (Tab. 14).

Tab. 14: Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Hassenhausen im Frühjahr 2005 (Versuchsbeginn: 1979)

	Lagerungsdichte [g cm^{-3}]			
Bodentiefe [cm]	P	SR	FR	D
0 – 5	1,31	1,21	1,20	1,19
5 – 10	1,38	1,28	1,32	1,48
10 – 25	1,38	1,30	1,46	1,59

P = Pflug + Sekundärbearbeitung (25/10 cm)

SR = Schwergrubber mit Rotoregge (25/10 cm)

FR = Flügelscharrgrubber mit Rotoregge (25/10 cm)

D = Direktsaat

4.3.2 Gesamtkohlenstoff (C_t)

Am Standort Hassenhausen kam es im oberflächennahen Bereich (0-5 cm) mit abnehmender Bodenbearbeitungsintensität zu einer Zunahme der Kohlenstoffgehalte. Dagegen kehrten sich die Verhältnis in der untersten Krumenschicht um, mit der Folge, dass bei der Direktsaat der niedrigste Wert beobachtet wurde. Demzufolge hatte die Direktsaat-Variante in der obersten Bodenschicht den höchsten Kohlenstoffgehalt, im unteren Bodenbereich war bei der P-Variante der höchste Gehalt festgestellt worden, der jedoch nur geringfügig höher lag als in den darüber liegenden Bodenschichten dieser Variante. Weiterhin fiel bei der Direktsaat der deutliche Unterschied zwischen dem oberen und mittleren Krumenbereich auf, wie aus Abb. 7 ersichtlich wird.

Unter Berücksichtigung der jeweiligen Lagerungsdichte wurden die Kohlenstoffgehalte der verschiedenen Bodenbearbeitungsvarianten und Bodentiefen in Kohlenstoffmengen pro Flächeneinheit umgerechnet, die in Abb. 8 dargestellt sind. Die Kohlenstoffmengen beziehen sich jedoch aufgrund einer ungleichmäßigen Tiefenabstufung auf eine Schichtdicke von 1 dm. Somit kann eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden. In der obersten Bodenschicht (0-5 cm) der D-Variante war die Kohlenstoffmenge am höchsten, im Bodenbereich 5-10 cm und 10-25 cm jedoch deutlich niedriger. Die höchste Menge in der untersten Krumenschicht wurde bei der P-Variante erreicht, wobei die darüber liegenden Bereichen dieser Variante geringere Werte annahmen. Auffallend ist, dass bei der FR-Variante im mittleren Krumenbereich (5-10 cm) eine höhere Menge an Kohlenstoff vorlag als in den beiden anderen Schichten.

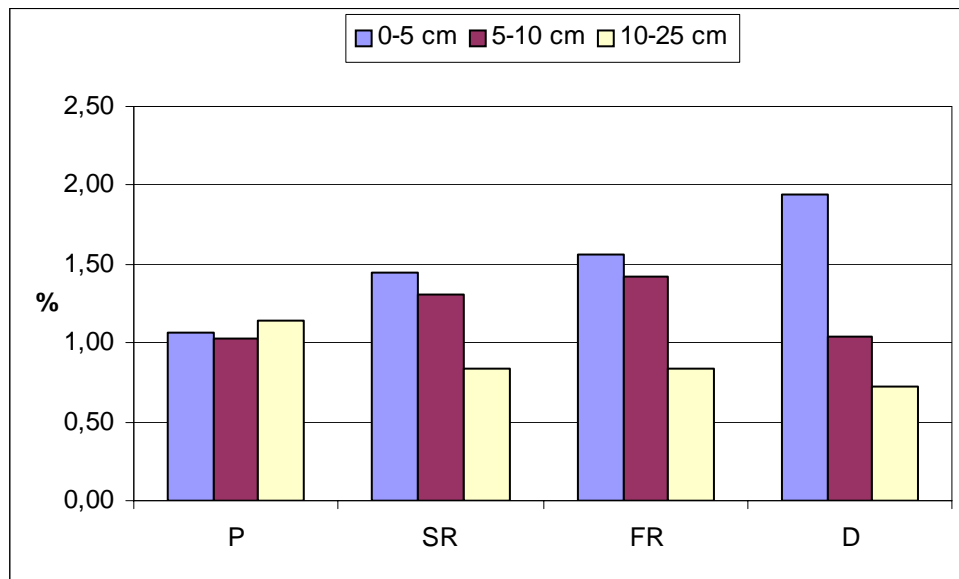


Abb. 7: C_t -Gehalte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Hassenhausen im Frühjahr 2005 (Versuchsbeginn: 1979)

P = Pflug + Sekundärbearbeitung (25/10 cm)
 SR = Schwergrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
 FR = Flügelscharrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
 D = Direktsaat

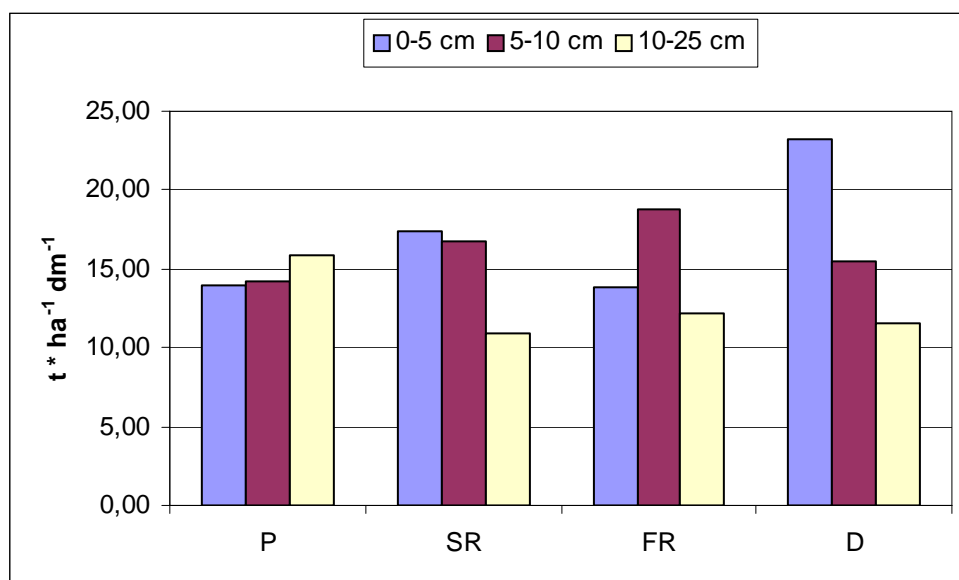


Abb. 8: C_t -Mengen ($t \cdot ha^{-1}$) bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und Bodentiefe bezogen auf eine Schichtdicke von 1 dm am Standort Hassenhausen im Frühjahr 2005 (Versuchsbeginn: 1979)

P = Pflug + Sekundärbearbeitung (25/10 cm)
 SR = Schwergrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
 FR = Flügelscharrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
 D = Direktsaat

Im Hinblick auf die Kohlenstoffmenge in der gesamten Ackerkrume erzielte die Pflugvariante am Standort Hassenhausen die höchste Menge. Demgegenüber kam es bei der Direktsaat zu einer um $1,22 \text{ t ha}^{-1}$ niedrigeren Menge. Die SR-Variante erreichte mit $33,49 \text{ t ha}^{-1}$ die geringste Gesamtmenge in der bearbeiteten Krume (Abb. 9).

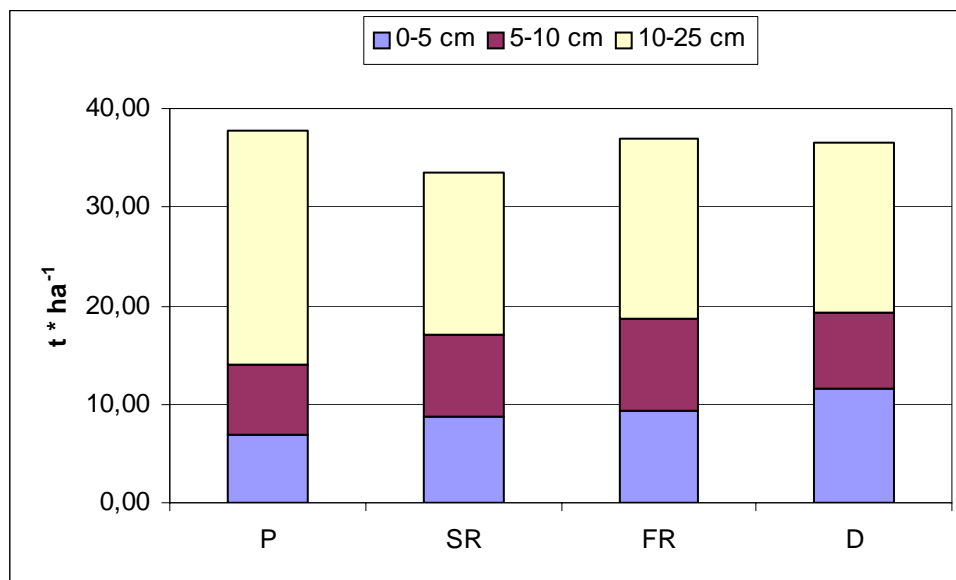


Abb. 9: C_t-Mengen (t ha^{-1}) in der Ackerkrume (0-25 cm) bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Hassenhausen im Frühjahr 2005 (Versuchsbeginn: 1979)

- P = Pflug + Sekundärbearbeitung (25/10 cm)
- SR = Schwergrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
- FR = Flügelscharrgrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
- D = Direktsaat

4.4 Ossenheim

4.4.1 Lagerungsdichte

Bei wendender Bodenbearbeitung mit dem Pflug zeigte sich in der gesamten Ackerkrume eine etwa gleich hohe Dichtlagerung. Die Lagerungsdichte in der Bodentiefe 0-5 cm der FR-Variante fiel gegenüber der D-Variante um $0,20 \text{ g cm}^{-3}$ niedriger aus. Auch am Standort Ossenheim konnten zunehmende Werte vom oberen zum unteren Krumenbereich beobachtet werden, wobei der höchste Anstieg in der D-Variante festgestellt wurde. So lagerte der Boden in 5-10 cm Tiefe mit einer Lagerungsdichte von $1,54 \text{ g cm}^{-3}$ deutlich dichter als in der obersten Krumenschicht (Tab. 15).

Tab. 15: Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Ossenheim im Frühjahr 2005 (Versuchsbeginn: 1979)

Bodentiefe [cm]	Lagerungsdichte [g cm^{-3}]		
	P	FR	D
0 – 5	1,22	1,08	1,28
5 – 10	1,24	1,19	1,54
10 – 25	1,25	1,32	1,55

P = Pflug + Sekundärbearbeitung (25/10 cm)

FR = Flügelscharrubber mit Rotoregge (25/10 cm)

D = Direktsaat

4.4.2 Gesamtkohlenstoff (C_t)

In der obersten Krumenschicht (0-5 cm) kam es von der P- über die FR- zur D-Variante zu einem Anstieg der Kohlenstoffgehalte. Die größten Unterschiede zwischen Pflug- und Direktsaat-Variante bestanden in der oberflächennahen Bodenschicht, so dass die Direktsaat mit einem C_t -Gehalt von 2,51 % einen deutlich höheren Wert aufwies als der jährlich gepflügte Boden. Die Pflugbearbeitung hatte im Vergleich zu den beiden nicht wendenden Verfahren in allen drei Bodenschichten nahezu gleiche Gehalte. Bei der FR- und D-Variante nahmen die Kohlenstoffgehalte mit zunehmender Tiefe ab. Dies führte bei der Direktsaat zu deutlichen Differenzen zwischen den verschiedenen Bodentiefen. Im untersten Krumenbereich erzielte die Direktsaat den niedrigsten Kohlenstoffgehalt, wobei die Unterschiede zu den anderen Varianten gering waren (Abb. 10).

Die Kohlenstoffgehalte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe wurden mittels Lagerungsdichte in Kohlenstoffmengen pro Flächeneinheit umgerechnet. Zu einer besseren Vergleichbarkeit sind die C_t -Mengen in Abb. 11 bezogen auf eine Schichtdicke von 1 dm dargestellt, da die Tiefenaufteilung bei der Probenahme nicht gleichmäßig war. So stieg in der Bodenschicht 0-5 cm die Menge an Kohlenstoff mit abnehmender Eingriffintensität der Bearbeitungswerkzeuge. Während in der P-Variante die Kohlenstoffmenge mit zunehmender Bodentiefe geringfügig anstieg, wurde bei der Direktsaat eine Abnahme beobachtet. Bei der Direktsaat traten jedoch in allen drei Bodenschichten höhere Kohlenstoffmengen auf als bei der P- und FR-Variante.

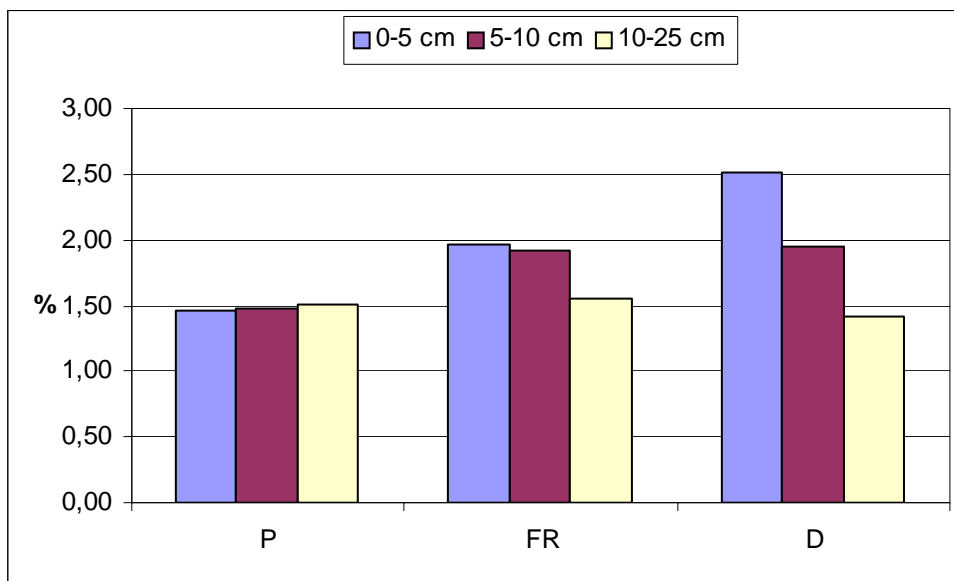


Abb. 10: C_t-Gehalte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Ossenheim im Frühjahr 2005 (Versuchsbeginn: 1979)

P = Pflug + Sekundärbearbeitung (25/10 cm)
 FR = Flügelschargrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
 D = Direktsaat

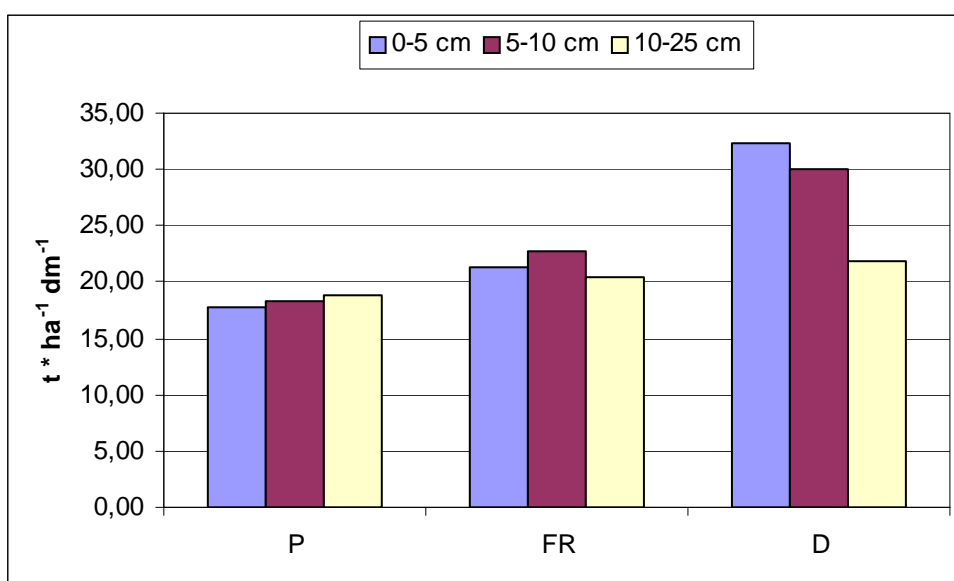


Abb. 11: C_t-Mengen (t ha⁻¹) bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung und Bodentiefe bezogen auf eine Schichtdicke von 1 dm am Standort Ossenheim im Frühjahr 2005 (Versuchsbeginn: 1979)

P = Pflug + Sekundärbearbeitung (25/10 cm)
 FR = Flügelschargrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
 D = Direktsaat

Hinsichtlich der Kohlenstoffmenge in der gesamten Ackerkrume wurde eine Zunahme mit abnehmender Bearbeitungsintensität festgestellt, so dass die Direktsaat mit einer Gesamtmenge von $64,04 \text{ t ha}^{-1}$ den höchsten Vorrat aufwies (Abb. 12).

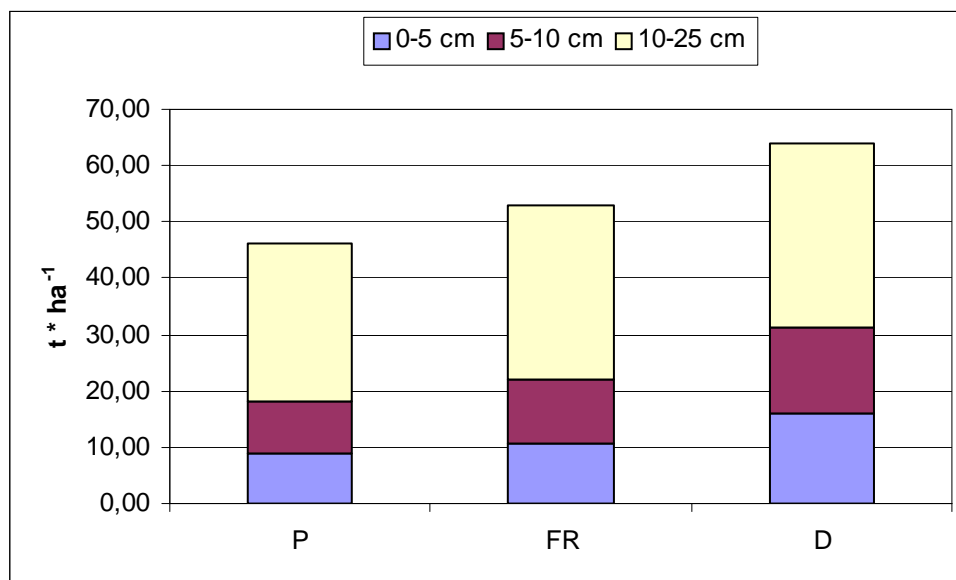


Abb. 12: C_t-Mengen (t ha^{-1}) in der Ackerkrume (0-25 cm) bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Ossenheim im Frühjahr 2005 (Versuchsbeginn: 1979)

- P = Pflug + Sekundärbearbeitung (25/10 cm)
 FR = Flügelschargrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
 D = Direktsaat

4.5 Ökologischer Ackerbauversuch Gladbacherhof

4.5.1 Lagerungsdichte

In beiden Fruchtfolgesystemen (a_1 , a_3) lagerte der gepflügte Boden in der Oberkrume geringfügig dichter als in der Unterkrume. Demgegenüber stieg bei der Flügelschargrubbersvariante (b_4) die Lagerungsdichte mit zunehmender Bodentiefe an, wobei die Werte in der obersten Krumenschicht im Vergleich zur Pflugvariante (b_1) niedriger ausfielen. Bei der viehlosen Fruchtfolge (a_3) kam es im allgemeinen zu einer höheren Dichtlagerung des Bodens, so dass die höchste Lagerungsdichte im untersten Bodenbereich der Flügelschargrubbersvariante (b_4) beobachtet wurde. Signifikante Differenzen konnten zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten b_1 und b_4 in der Oberkrume des viehlosen Fruchtfolgesystems (a_3) festgestellt werden (Tab. 16).

Tab. 16: Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Fruchtfolge, Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Gladbacherhof im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1998)

	Lagerungsdichte [g cm^{-3}]			
	Viehhaltend (a_1)		Viehlos (a_3)	
Bodentiefe [cm]	b_1	b_4	b_1	b_4
0 – 12	1,24	1,11	1,29*	1,20
17 – 25	1,22	1,23	1,27	1,31

Signifikante Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten sind durch ein * gekennzeichnet ($p \leq 0,05$)

b_1 = Pflug (30 cm)

b_4 = Flügelschargrubber mit Zinkenrotor (30/15 cm)

4.5.2 Gesamtkohlenstoff (C_t)

Bei tief wendender Bodenbearbeitung mit dem Pflug (b_1) wurde im oberen Bodenbereich beider Fruchtfolgesysteme (a_1 , a_3) im Unterschied zum unteren Bodenbereich ein niedrigerer C_t -Gehalt beobachtet. Durch den Einsatz des Flügelschargrubbers (b_4) kehrten sich die Verhältnisse in der Ackerkrume um. Die höchsten Kohlenstoffgehalte traten jeweils in einer Bodentiefe von 0-12 cm auf, so dass es zu deutlichen Differenzen zwischen der oberen und unteren Bodenschicht kam. Im Vergleich zum gepflügten Boden (b_1) führte die Flügelschargrubberbearbeitung (b_4) zu höheren C_t -Gehalten in der oberen Krumenschicht (Abb. 13).

Mit Hilfe der Lagerungsdichte wurden die Kohlenstoffgehalte in Gesamtmengen an Kohlenstoff pro Flächeneinheit umgerechnet, wie aus Abb. 14 hervorgeht. Obwohl nur in der obersten Krumenschicht der Variante a_1b_1 die C_t -Menge signifikant höher ausfiel, zeigten alle Varianten deutliche Unterschiede zwischen Ober- und Unterkrume. Die Flügelschargrubber-Variante (b_4) erreichte im oberen Krumenbereich (0-12 cm) tendenziell einen höheren und im unteren Krumenbereich (17-25 cm) einen niedrigeren C_t -Vorrat als bei Pflugbearbeitung (b_1) (Abb. 14).

Das Pflügen (b_1) bewirkte geringfügig niedrigere Kohlenstoffmengen in der gesamten Ackerkrume. Die verschiedenen Varianten (a_1b_1 , a_1b_4 , a_3b_1 , a_3b_4) unterschieden sich jedoch nicht signifikant. Hierbei ist zu beachten, dass die Bodenzone 12 bis 17 cm bei der Probenahme ausgespart wurde, um zwei getrennte Bodenschichten zu erhalten (Abb. 15).

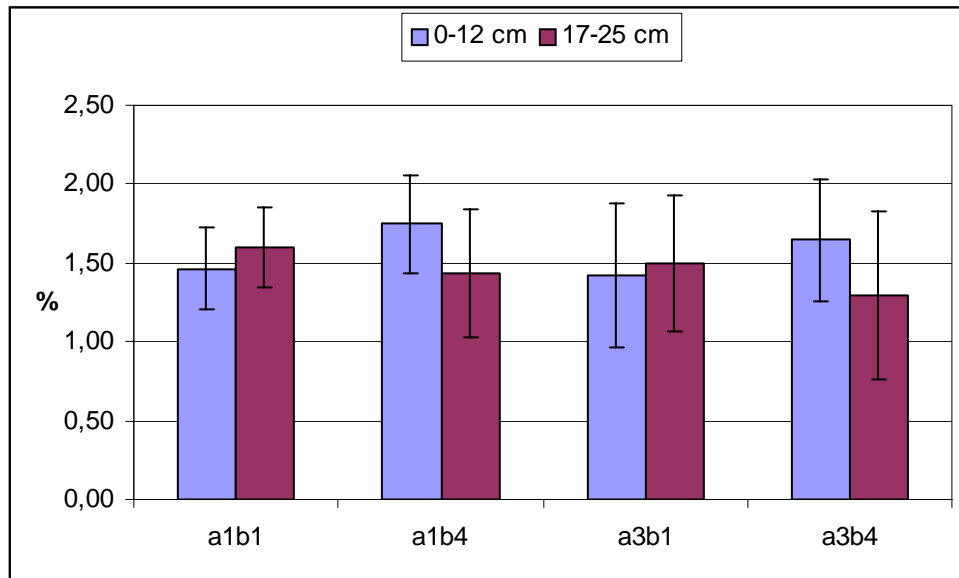


Abb. 13: C_t-Gehalte in Abhängigkeit von Fruchtfolge, Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Gladbacherhof im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1998)

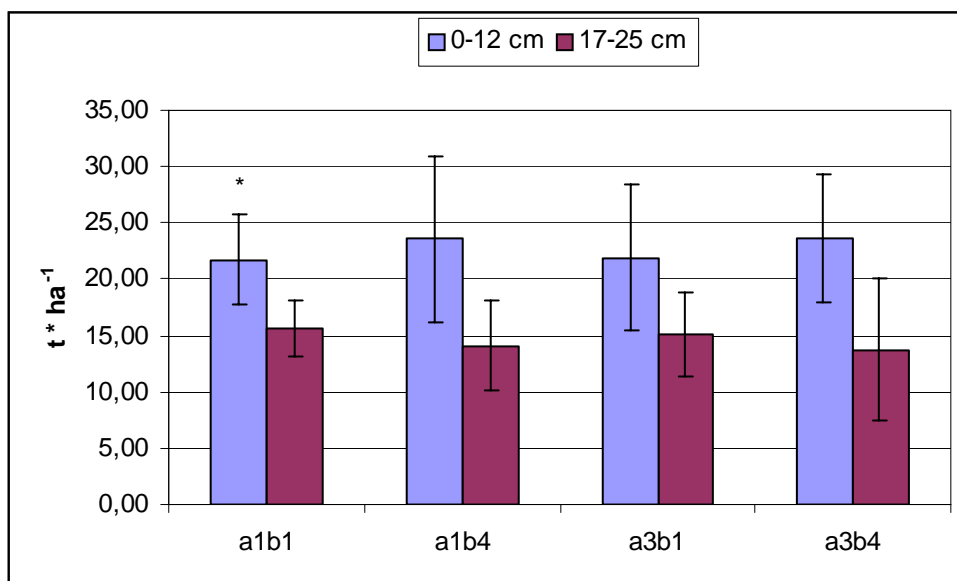


Abb. 14: C_t-Mengen (t ha⁻¹) in Abhängigkeit von Fruchtfolge, Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Gladbacherhof im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1998). Signifikante Unterschiede zwischen Ober- und Unterkrume sind durch * gekennzeichnet ($p \leq 0,05$)

a₁: viehhaltend
a₃: viehlos
b₁: Pflug (30 cm)
b₄: Flügelscharrubber mit Zinkenrotor (30/15 cm)

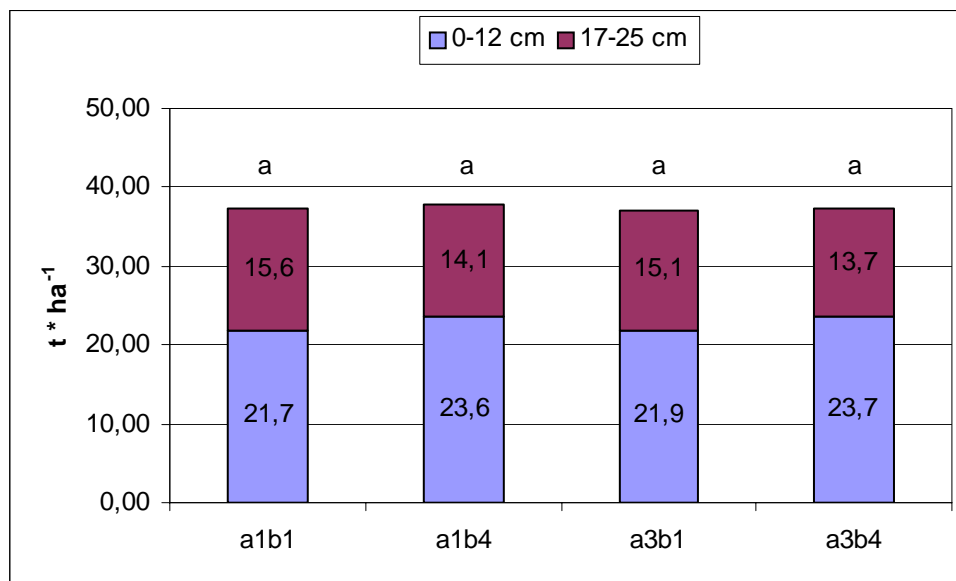


Abb. 15: C_t-Mengen (t ha⁻¹) in der Ackerkrume (0-25 cm) bei differenzierter Bodenbearbeitung und Fruchtfolge am Gladbacherhof im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1998). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$)

- a₁: viehhaltend
- a₃: viehlos
- b₁: Pflug (30 cm)
- b₄: Flügelscharrubber + Zinkenrotor (30/15 cm)

4.6 Ökologische Fruchtfolge Güterfelde

4.6.1 Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichte des Standortes Güterfelde geht aus Tab. 17 hervor. In der Oberkrume wurde bei beiden Bodenbearbeitungsvarianten (a₁, a₂) die gleiche Lagerungsdichte festgestellt, die im unteren Krumbereich zunahm. Zwischen der oberen und unteren Bodenschicht der nicht wendenden Grundbodenbearbeitung (a₂) kam es zu signifikanten Unterschieden, so dass in der Unterkrume eine signifikant höhere Dichtlagerung erzielt wurde.

Tab. 17: Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Güterfelde im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1993)

Bodentiefe [cm]	Lagerungsdichte [g cm^{-3}]	
	Pflug (a_1)	Schwergrubber (a_2)
0 – 12,5	1,43	1,43
12,5 – 25	1,47	1,57 *

Signifikante Unterschiede zwischen Ober- und Unterkrume sind durch * gekennzeichnet ($p \leq 0,05$) ; Bearbeitungstiefe: Pflug 25 cm, Schwergrubber 10 cm

4.6.2 Gesamtkohlenstoff (C_t)

Beim Pflügen (a_1) war der Kohlenstoffgehalt in der untersten Krumenschicht nur geringfügig niedriger als im darüber liegenden Krumenbereich. Der höchste Gehalt wurde in der Unterkrume der nicht wendenden Variante (a_2) beobachtet, der niedrigste Wert lag im unteren Bodenbereich der Pflugvariante (a_1) vor. Mit zunehmender Bodentiefe führte der Verzicht auf eine Bodenwendung (a_2) zu einem Anstieg des Kohlenstoffgehaltes (Abb. 16).

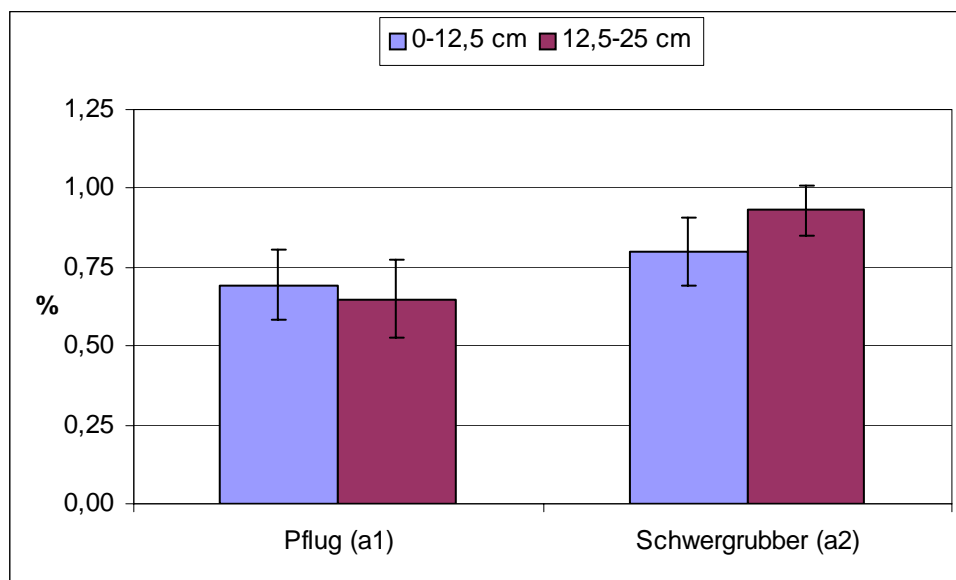


Abb. 16: C_t -Gehalte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Güterfelde im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1993) ; Bearbeitungstiefe: Pflug 25 cm, Schwergrubber 10 cm

Die Kohlenstoffgehalte bei differenzierter Bodenbearbeitung und Bodentiefe wurden anhand der Lagerungsdichte in Kohlenstoffmengen pro Flächeneinheit umgerechnet. Im Vergleich zur Pflugvariante (a_1) traten bei der nicht wendenden Bodenbearbeitungsvariante (a_2) signifikante Differenzen zwischen Ober- und Unterkrume auf (Abb. 17).

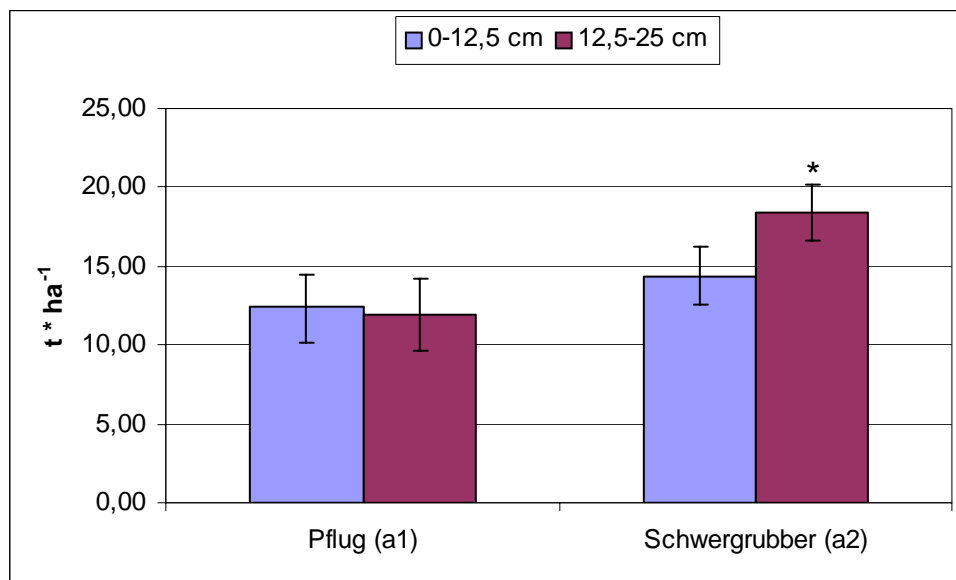


Abb. 17: C_t -Mengen ($t \cdot ha^{-1}$) in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Güterfelde im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1993). Signifikante Unterschiede zwischen Ober- und Unterkrume sind durch * gekennzeichnet ($p \leq 0,05$); Bearbeitungstiefe: Pflug 25 cm, Schwergrubber 10 cm

Im Hinblick auf die Kohlenstoffmenge in der gesamten Krume bestanden zwischen den beiden Bodenbearbeitungsvarianten keine signifikanten Unterschiede, obwohl die Gesamtmenge an Kohlenstoff bei der nicht wendenden Bearbeitung (a_2) um $8,36 t \cdot ha^{-1}$ höher ausfiel (Abb. 18).

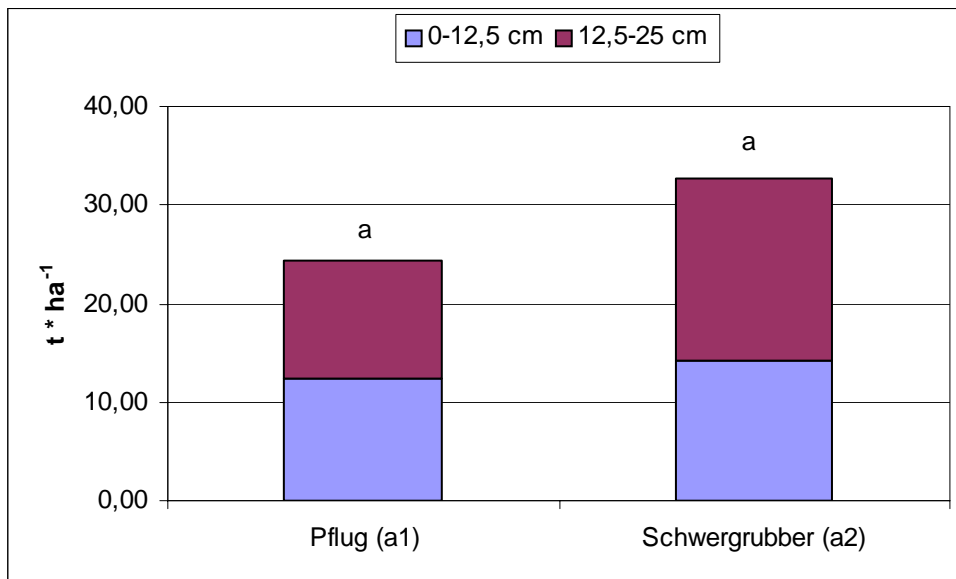


Abb. 18: C_t-Mengen (t ha⁻¹) in der Ackerkrume (0-25 cm) bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Güterfelde im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1993). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede (p ≤ 0,05) ; Bearbeitungstiefe: Pflug 25 cm, Schwergrubber 10 cm

4.7 Systemversuch Scheyern

4.7.1 Lagerungsdichte

Im integrierten Systemversuch wiesen beide Bodenbearbeitungsvarianten in 0-10 cm Bodentiefe eine Lagerungsdichte von 1,41 g cm⁻³. Mit zunehmender Bodentiefe stieg die Dichtlagerung des Bodens an, wobei die Unterkrume der flach mischenden Variante (a₃) gegenüber der Oberkrume signifikant dichter lagerte (Tab. 18).

Tab. 18: Lagerungsdichte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Scheyern im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1992)

Integrierter Systemversuch		
	Lagerungsdichte [g cm ⁻³]	
Bodentiefe [cm]	Pflug (a ₁)	Rototiller/Grubber (a ₃)
0 – 10	1,41	1,41
10 – 20	1,50	1,59*

Signifikante Unterschiede zwischen Ober- und Unterkrume sind durch * gekennzeichnet (p ≤ 0,05) ; Bearbeitungstiefe: Pflug > 20 cm, Rototiller/Grubber ~ 8 cm

4.7.2 Gesamtkohlenstoff (C_t)

Wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug (a_1) führte zu nahezu gleich hohen C_t -Gehalten in beiden Bodenschichten. Im Vergleich dazu, kam es bei der flach mischenden Bearbeitung (a_3) zu einer Differenzierung zwischen dem oberen und unteren Krumenbereich. Signifikante Unterschiede konnten nicht festgestellt werden, obwohl der Kohlenstoffgehalt der Oberkrume einen deutlich niedrigeren Wert annahm (Abb. 19).

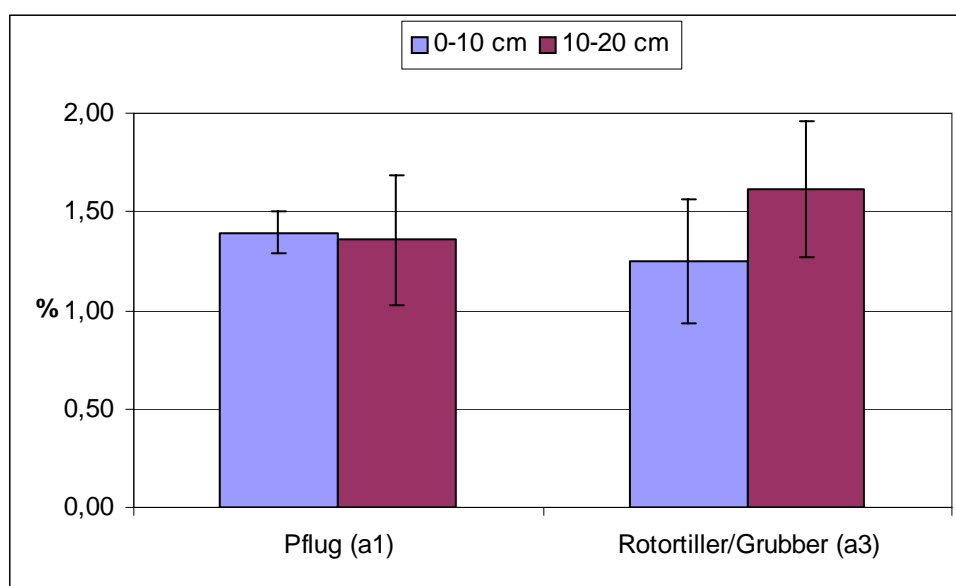


Abb. 19: C_t -Gehalte in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Scheyern im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1992) ; Bearbeitungstiefe: Pflug > 20 cm, Rototiller/Grubber ~ 8 cm

Unter Berücksichtigung der jeweiligen Lagerungsdichte wurden die Kohlenstoffgehalte der verschiedenen Bodentiefen in Kohlenstoffmengen pro Flächeneinheit umgerechnet, wie Abb. 20 vermittelt. Bei Pflugbearbeitung (a_1) traten in der oberen und unteren Krumenschicht etwa gleich hohe C_t -Mengen auf. Demgegenüber erreichte die flach mischende Bodenbearbeitungsvariante (a_3) im unteren Bodenbereich (10-20 cm) eine deutlich höhere C_t -Menge, die der oberen Bodenschicht (0-10 cm) fiel im Vergleich zur Pflugvariante niedriger aus.

Die Gesamtmenge an Kohlenstoff in der Ackerkrume zwischen den beiden Bearbeitungsvarianten war nicht signifikant verschieden. Mit einer Kohlenstoffmenge von $43,16 \text{ t ha}^{-1}$ lag die Gesamtmenge der flach mischenden Bearbeitung (a_3) um $3,07 \text{ t ha}^{-1}$ höher (Abb. 21).

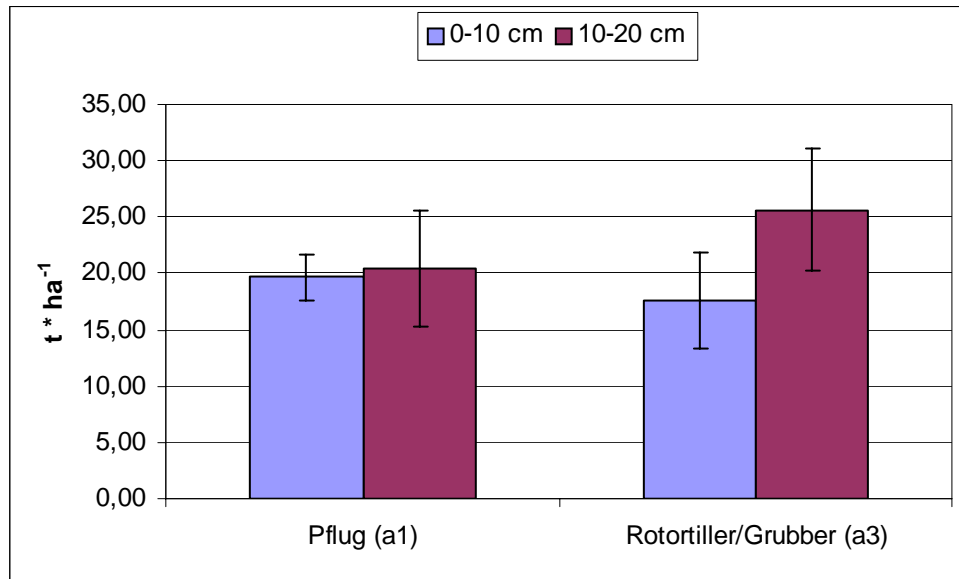


Abb. 20: C_t -Mengen ($t \cdot ha^{-1}$) in Abhängigkeit von Bodenbearbeitung und Bodentiefe am Standort Scheyern im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1992) ; Bearbeitungstiefe: Pflug > 20 cm, Rotortiller/Grubber ~ 8 cm

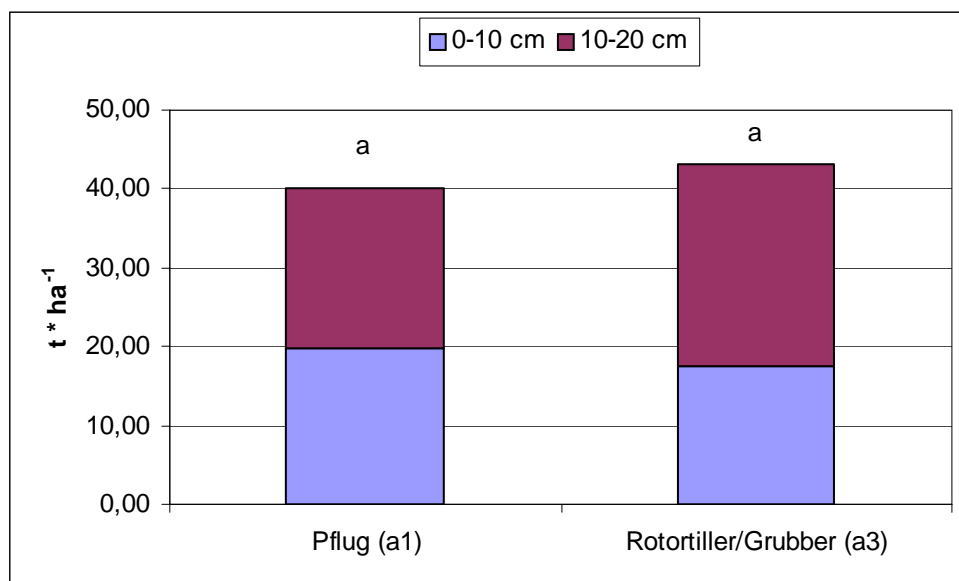


Abb. 21: C_t -Mengen ($t \cdot ha^{-1}$) in der Ackerkrume (0-20 cm) bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Scheyern im Frühjahr 2006 (Versuchsbeginn: 1992). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) ; Bearbeitungstiefe: Pflug > 20 cm, Rotortiller/Grubber ~ 8 cm

4.8 Relative Kohlenstoffmenge

Um die Varianten der Gießener Bodenbearbeitungsversuche mit den anderen Versuchsstandorten vergleichen zu können, wurde die Gesamtkohlenstoffmenge in der Ackerkrume in Relativwerte umgerechnet und zwar in Relation zur wendenden Bodenbearbeitung mit dem Pflug (Pflugvariante = 100 %). Aus Abb. 22 werden die Relativwerte für die Gießener Bodenbearbeitungsversuche mit den Varianten P, FR und D ersichtlich. Die Standorte Gießen und Ossenheim zeigten gegenüber Hassenhausen eine Zunahme von der P- über die FR- zur D-Variante, wobei die Differenz zwischen Pflugbearbeitung und Direktsaat am Standort Ossenheim mit + 38,6 % am größten war. Am Standort Hassenhausen nahm die P-Variante die höchste relative Kohlenstoffmenge an, die D-Variante fiel mit 96,77 % nur geringfügig niedriger aus.

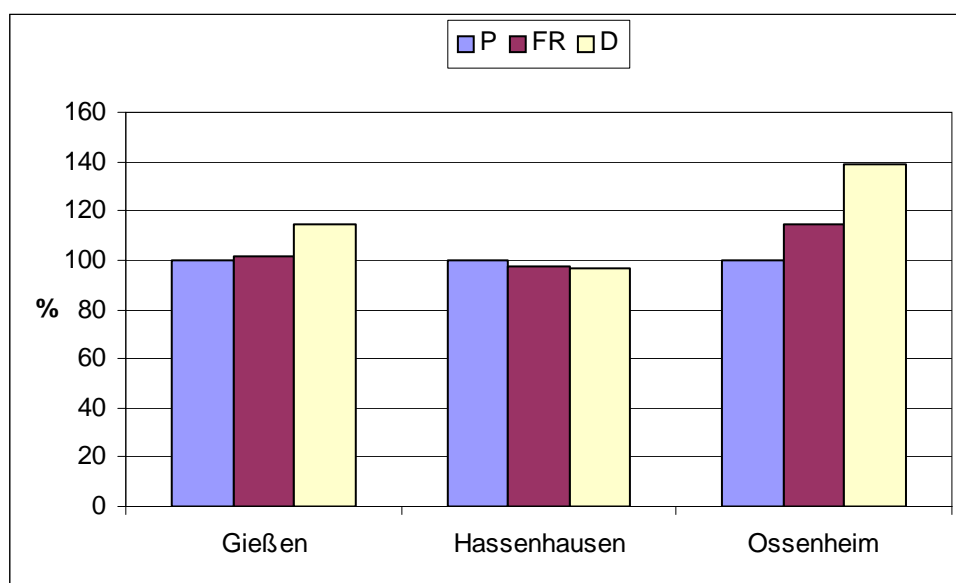


Abb. 22: Relative Kohlenstoffmenge in der Ackerkrume (0-25 cm) bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Gießen, Hassenhausen und Ossenheim (Pflugvariante = 100 %)

P = Pflug + Sekundärbearbeitung (25/10 cm)
FR = Flügelschargrubber mit Rotoregge (25/10 cm)
D = Direktsaat

Während auf den Versuchsstandorten Bad Lauchstädt, Gießen und Hassenhausen die relativen Kohlenstoffmengen von der Pflug- zur Grubbervariante niedriger wurden, kehrten sich am Standort Güterfelde die Verhältnisse um. Im Vergleich zur Pflugvariante betrug die Zunahme bei der Grubbervariante + 34,3 % (Abb. 23).

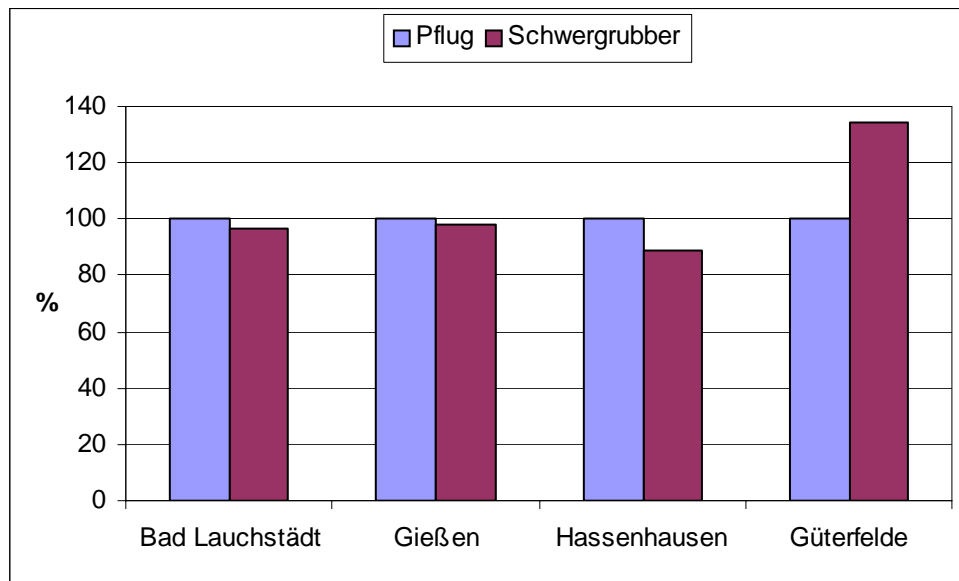


Abb. 23: Relative Kohlenstoffmenge in der Ackerkrume bei differenzierter Bodenbearbeitung am Standort Bad Lauchstädt, Gießen, Hassenhausen und Güterfelde (Pflugvariante = 100 %)

Im Ökologischen Ackerbauversuch Gladbacherhof ergaben sich bei den relativen Kohlenstoffmengen zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten keine maßgeblichen Unterschiede. Auch das Fruchtfolgesystem hatte keinen Einfluss (Abb. 24).



Abb. 24: Relative Kohlenstoffmenge in der Ackerkrume (0-25 cm) bei differenzierter Bodenbearbeitung und Fruchtfolge am Gladbacherhof (Pflugvariante = 100 %)

b₁ = Pflug (30 cm)

b₄ = Flügelscharrgrubber mit Zinkenrotor (30/15 cm)

5 Diskussion

5.1 Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf die Lagerungsdichte des Bodens

Die Lagerungsdichte ist das Verhältnis von Bodenmasse zu Bodenvolumen, das sich bei jeder Bodenbearbeitung verändert (KÖPPEN, 2004a). Generell wird mit abnehmender Bodenbearbeitungsintensität im Oberboden eine Zunahme der Dichtlagerung erzielt (BEISECKER, 1994, RICHTER, 1995, DÜRING et al., 2005). Nach EPPERLEIN (2002) kommt es bei konservierender Bodenbearbeitung in der bearbeiteten Bodenschicht (0-15 cm) tendenziell zu höheren Lagerungsdichten. Untersuchungen von STOCKFISCH (1997) zeigen, dass wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug zu einer gleichmäßigeren Dichtlagerung des Bodens in der gesamten Ackerkrume führt, wobei im obersten Bodenbereich der Boden dichter und in der unteren Krumenschicht lockerer gelagert ist als bei langjährig reduzierter Bodenbearbeitung. Mit Ausnahme des Standortes Ossenheim, wo die Lagerungsdichte der Direktsaat- im Vergleich zur Pflugvariante in der oberen Krumenschicht höher lag und der Standorte Güterfelde sowie Scheyern, die keine Unterschiede aufwiesen, konnten in der vorliegenden Arbeit die Ergebnisse von STOCKFISCH (1997) weitgehend bestätigt werden. Als Grund für die geringere Dichtlagerung des Bodens in der bodennahen Schicht bei Direktsaat, die nur am Standort Gießen und Hassenhausen beobachtet wurde, nennen BEISECKER (1994) und STOCKFISCH (1997) das Belassen der Pflanzenrückstände auf der Ackeroberfläche. Des weiteren kann dieses Resultat durch die seit einigen Jahren durchgeführte Stoppelbearbeitung bedingt sein. Im Unterschied dazu stellten HERNANZ et al. (2002) bei Direktsaat eine signifikant höhere Lagerungsdichte im Bodenbereich 0 bis 10 cm fest. In reduziert bearbeiteten Böden ist laut EHLERS (1992) die für unbearbeitete Böden charakteristische Dichtlagerung nicht so deutlich zu erkennen. Auf den Standorten Bad Lauchstädt, Gießen und Hassenhausen (Tab. 12-14) trat bei der Schwergrubber- sowie am Gladbacherhof bei der Flügelschargrubber- im Gegensatz zur Pflugvariante, insbesondere in der oberflächennahen Schicht eine niedrigere Lagerungsdichte auf. Dies liegt in der systembedingten Einarbeitung bzw. Verteilung der organischen Substanz in der Ackerkrume begründet. Etwa 75 % der pflanzlichen Reststoffe befinden sich bei der Schwergrubbersvariante in einer Bodentiefe von 0-10 cm, bei der Flügelschargrubberbearbeitung sind es sogar 90 %, wohingegen es beim Pflügen nur 17 % sind (TEBRÜGGE, 1986). Der im Vergleich zum gepflügten Boden höhere Kohlenstoffgehalt im

obersten Krumbereich bewirkte eine Reduzierung der Lagerungsdichte, wie auch RÜCK-NAGEL et al. (2003) in ihren Untersuchungen im Systemversuch Seehausen bei Leipzig zeigen konnten. Sie berichten jedoch bei Grubberbearbeitung in der Unterkrume von einer signifikant höheren Trockenrohdichte, die bei den eigenen Untersuchungen nur auf den Standorten Güterfelde (Tab. 17) und Scheyern (Tab. 18) beobachtet werden konnte.

Bereits KÖRSCHENS (1988) erkannte, dass zwischen der Trockenrohdichte und dem C_T -Gehalt eine enge Korrelation besteht. Nach seinen Erkenntnissen führt eine Erhöhung des C_T -Gehaltes um 0,1 % zu einer Verringerung der Lagerungsdichte um 0,01 bis 0,02 g cm⁻³. Mit zunehmender Bodentiefe kam es zu einem Anstieg der Lagerungsdichte, der bei Unterlassung der Bodenbearbeitung stärker ausfiel und somit im unteren Krumbereich eine dichtere Lagerung des Bodens als bei Pflugbearbeitung bewirkte. BEISECKER (1994), RICHTER (1995) sowie STOCKFISCH (1997) berichten von einem abrupten Anstieg der Lagerungsdichte an der Krumbasis bei wendender Bodenbearbeitung mit dem Pflug, der aber auch für die Bearbeitung mit dem Flügelschargrubber charakteristisch sein kann (BEISECKER, 1994, RICHTER, 1995). Die Direktsaatvariante erreicht an der Bearbeitungsgrenze die niedrigste Dichtlagerung (BEISECKER, 1994).

Die Lagerungsdichte ist ein indirektes Maß für den Porenanteil im Boden (BAEUMER, 1992). Direktsaat führt bedingt durch die höhere Dichtlagerung des Bodens im Vergleich zur Pflugbearbeitung zu einer Verringerung des Grobporenanteils und des Gesamtporenvolumens (BEISECKER, 1994, RICHTER, 1995, STOCKFISCH, 1997). Hohe Porenkontinuität, insbesondere der biogenen Grobporen gewährleisten jedoch eine ausreichende Bodendurchlüftung (RICHTER, 1995). Beim Pflügen wird die Kontinuität der Grobporen in den Unterboden im Gegensatz zu unbearbeiteten Böden unterbrochen (KÖPPEN, 2004a).

5.2 Auswirkungen differenzierter Bodenbearbeitung auf Kohlenstoffgehalte und -mengen in der Ackerkrume

5.2.1 Kohlenstoffgehalte

Eine näherungsweise Quantifizierung der organischen Bodensubstanz erfolgt mit dem Gesamtkohlenstoffgehalt. Unter Annahme einer mittleren C-Konzentration der OBS von 58 % kann mit einem Faktor von 1,724 der Kohlenstoffgehalt in OBS umgerechnet werden

(BAEUMER, 1992). Die C-Konzentration unterliegt jedoch Schwankungen, so dass der Umrechnungsfaktor zwischen 1,7 und 3,2 liegen kann (SCHUBERT, 2006).

Die maßgebliche Ursache für die unterschiedlichen Kohlenstoffgehalte in Ober- und Unterkrume bei differenzierter Bodenbearbeitung ist die systemspezifische Einarbeitung bzw. Verteilung der Pflanzenrückstände in der Ackerkrume. So erzielte die wendende Bodenbearbeitung mit Pflug auf allen Versuchsstandorten einen nahezu gleichen Kohlenstoffgehalt in den verschiedenen Krumenbereichen, wie schon GROCHOLL (1991) und EPPERLEIN (2002) in ihren Untersuchungen feststellten. Eine tiefe Pflugfurche bewirkt sowohl im Oberboden als auch im Unterboden eine Verminderung des Humusgehaltes (LIEBHARD, 1993).

Dagegen kam es bei nicht wendender Bodenbearbeitung in der oberen Krumenschicht meistens zu deutlich höheren Kohlenstoffgehalten als in der untersten Krumenschicht, was zu einer Differenzierung zwischen Ober- und Unterkrume führt (GROCHOLL, 1991, EMMERLING, 1998). In der Regel werden bei konservierender Bodenbearbeitung in der oberen Krumenschicht signifikant höhere Humusgehalte beobachtet (EMMERLING, 1998). FRIEDEL (2001) berichtet von höheren C_{org} -gehalten bei nicht wendender Bodenbearbeitung mit der Fräse in den obersten 10 cm des Bodens gegenüber wendender Bodenbearbeitung mit dem Pflug. FRANZLUEBBERS (2002) sowie HERNANZ et al. (2002) fanden die signifikant höchsten C_{org} -Gehalte bei einem Verzicht auf jegliche Bodenbearbeitung in der bodennahen Schicht, die mit zunehmender Bodentiefe abnahmen. Dieses Resultat trifft jedoch nicht auf Standorte mit trockenen und kalten Klimaverhältnissen zu, wie Versuche von FRANZLUEBBERS (2002) auf drei verschiedenen Standorten belegen. So traten im oberflächennahen Bodenbereich keine signifikanten Unterschiede zwischen Pflugbearbeitung und Direktsaat auf (FRANZLUEBBERS, 2002). LIEBHARD (1993) hingegen stellte bei allen Bodenbearbeitungssystemen eine Zunahme der Humusgehalte im Unterboden fest.

Lediglich am Standort Bad Lauchstädt (Abb. 1) wies die Schwergrubbervariante in der unteren Krumenschicht einen signifikant niedrigeren C_t -Gehalt auf. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die C_t -Gehalte infolge der gewählten Tiefenabstufung die Wirkung der Bodenbearbeitung nicht so deutlich widerspiegeln. In diesem Fall wäre eine engere Tiefenabstufung von 5 cm-Bodenschichten besser geeignet gewesen, da die Arbeitstiefe in der Schwergrubbervariante 15 cm betrug.

Auf den Standorten Hassenhausen (Abb. 7) und Ossenheim (Abb. 10) trat die größte Differenz zwischen der Pflug- und Direktsaatvariante in der obersten Bodenschicht (0-5 cm) auf, was schon GROCHOLL (1991) am Standort Ossenheim beobachtete. Der jähr-

liche Pflugeinsatz hatte in seinen Untersuchungen im Vergleich zu den nicht wendenden Varianten einen signifikant niedrigeren Kohlenstoffgehalt in der oberen Krumenschicht zur Folge. Bei den eigenen Untersuchungen zeigte sich in der oberflächennahen Bodenschicht (0-5 cm) eine Zunahme der Kohlenstoffgehalte mit abnehmender Bodenbearbeitungsintensität. Während am Standort Gießen (mit Ausnahme der Direktsaat) und Hassenhausen im unteren Krumenbereich (10-25 cm) eine Abnahme der Kohlenstoffgehalte von der Pflug- zur Direktsaatvariante festgestellt wurde, war dies am Standort Ossenheim nicht der Fall. Hier wurden bei allen Bodenbearbeitungsvarianten ähnliche Gehalte gefunden. Dies steht im Widerspruch zu den Erkenntnissen von GROCHOLL (1991), der von signifikant höheren Kohlenstoffgehalten bei Pflug- gegenüber Flügelscharbearbeitung und Direktsaat berichtet.

Im Ökologischen Ackerbauversuch Gladbacherhof (Abb. 13) wurden wie im Projekt „Ökologische Bodenbewirtschaftung“ bei nicht wendender Bodenbearbeitung höhere Humusgehalte in der Oberkrume beobachtet (WEBER & EMMERLING, 2005). Sie stellten im Vergleich zu Pflugbearbeitung nach zehnjähriger Versuchsdauer durchschnittlich 7 bis 10 % höhere Werte fest.

5.2.2 Kohlenstoffmengen

Die bei reduzierter Bodenbearbeitung höheren Kohlenstoffgehalte im oberen Krumenbereich - wie im vorherigen Kapitel diskutiert - können jedoch durch eine höhere Lagerungsdichte und demzufolge höheren Bodenmassen vorgetäuscht werden. Schon LAWANE (1984) berichtet davon, dass Unterschiede in der Trockenrohdichte infolge differenzierter Bodenbearbeitung einen Einfluss auf die Menge an OBS der betreffenden Krumenschicht haben muss. So sollten Aussagen über die Veränderung der OBS nicht anhand der Gehalte, sondern mit Hilfe der Mengen an OBS getroffen werden. Aufgrund dieses Sachverhaltes war es notwendig die Kohlenstoffgehalte der einzelnen Bodenschichten unter Berücksichtigung der Lagerungsdichte in Kohlenstoffmengen pro Flächeneinheit umzurechnen, um schließlich die in der Ackerkrume vorliegende Gesamtkohlenstoffmenge zwischen den verschiedenen Bodenbearbeitungsvarianten vergleichen zu können. Auch MANZKE (1995), STOCKFISCH (1997) sowie FORSTREUTER (1999) nutzten die Bodentiefe als Bezugsbasis zur Berechnung der Gesamtmenge von Bodenkennwerten.

MANZKE (1995) wählte diese Bezugsgröße, da für das Wurzelwachstum und die Nährstoffaufnahme das Bodenvolumen bedeutsam ist und nicht die Bodenmenge. Sie gibt jedoch zu bedenken, dass aufgrund von Sackungsprozessen der Zeitraum zwischen der letzten Bodenbearbeitungsmaßnahme und dem Probenahmetermin einen maßgeblichen Einfluss auf die Lagerungsdichte ausübt, was die Berechnung von Kohlenstoffmengen erschwert.

Im Gegensatz dazu empfehlen POWLSON & JENKINSON (1981) die „äquivalente Beprobungstiefe“ als Vergleichsbasis, um konkrete Aussagen pro Flächeneinheit treffen zu können. Hierbei wird der Krumbereich des gepflügten Bodens mit einer äquivalenten Bodenschicht des unbearbeiteten Bodens verglichen. Somit beziehen sich die Kohlenstoffmengen auf die gleiche Bodenmasse, jedoch auf unterschiedliche Bodentiefen. Die Autoren stellten mit diesem Ansatz bei Direktsaat nur auf einem von vier Versuchsstandorten eine Anreicherung von C_{org} fest, die gegenüber der Pflugbearbeitung jedoch nicht signifikant war.

Im Folgenden werden die Resultate der vorliegenden Arbeit im Hinblick auf die Kohlenstoffmenge in der Ackerkrume diskutiert und mit Ergebnissen aus der Literatur verglichen. Hierbei ist zu beachten, dass in den eigenen Untersuchungen nicht die C_{org} -Mengen berechnet wurden, also der anorganisch gebundene Carbonat-Kohlenstoff fand keine Berücksichtigung.

Beim Vergleich der Standorte Gießen, Hassenhausen und Ossenheim (Abb. 22) fiel auf, dass der Standort Hassenhausen gänzlich anders auf die Bodenbearbeitung reagierte. Direktsaat hatte eine um 3,23 % ($1,22 \text{ t ha}^{-1}$) niedrigere C_T -Menge als die Pflugvariante zur Folge. Der Grund für diese Abnahme liegt vermutlich in den physikalischen Bodenbedingungen des Standortes. HARRACH & RICHTER (1992) bezeichnen das Bodengefüge des Standortes Hassenhausen als eher instabil. Das durch die wendende Grundbodenbearbeitung entstandene grobporenreiche Bröckel- bzw. Klumpengefüge fällt demnach infolge hoher Schluffgehalte und vergleichsweise geringen Humusgehalten sehr schnell zu einem grobporenarmen Kohärentgefüge zusammen. Die Folge ist eine Verminderung der Durchlüftung und damit einhergehend eine Verlangsamung der Mineralisierung. Demgegenüber entsteht bei Direktsaat durch den höheren Regenwurmbesatz ein kontinuierliches Grobporensystem, das auch durch Starkniederschläge nicht beeinträchtigt wird. Dies ermöglicht eine gute Sauerstoffversorgung und damit eine höhere Nettomineralisation als bei Pflugbearbeitung (HARRACH & RICHTER, 1992). Zu berücksichtigen ist noch, dass sich dieser Standort auf einem schwach geneigten Mittelhang befindet und somit Erosion einen Einfluss auf den Humusgehalt ausübt (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002).

Die niedrigeren Kohlenstoffmengen in der gesamten Ackerkrume der Grubber- im Vergleich zu den Pflugvarianten der Standorte Bad Lauchstädt, Gießen und Hassenhausen (Abb. 23) können ebenfalls durch die bodenphysikalischen Bedingungen hervorgerufen worden sein. Zum einen war in der oberen Krumenschicht die Lagerungsdichte im Vergleich zur Pflugvariante niedriger, was eine geringere Bodenmasse bedingte. Dieser Sachverhalt wurde bereits im Kapitel 5.1 diskutiert. Zum anderen ist beim Grubbern das Gesamtporenvolumen und vor allem der Anteil an weiten Grobporen ($> 50 \mu\text{m}$) in der Oberkrume höher (TEBRÜGGE, 1986), die meist mit Luft gefüllt sind (BAEUMER, 1992). Sie stellen einen Indikator für den Bodendurchlüftungszustand dar (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002). Infolge einer besseren Durchlüftung des Bodens kommt es in den Grubbervarianten zu einer Stimulierung der Mineralisierung und damit auch zu einem stärkeren Humusabbau als in der Pflugvariante (TEBRÜGGE, 1986).

Am Standort Güterfelde (Abb. 18) und Scheyern (Abb. 21) zeigte sich bei nicht wendender Bodenbearbeitung gegenüber Pflugeinsatz jeweils eine deutlich höhere Kohlenstoffmenge in der Unterkrume, die in Güterfelde sogar signifikant war. Auffallend ist das beide Standorte im unteren Krumenbereich auch eine signifikant höhere Dichtlagerung des Bodens aufwiesen, die wiederum eine höhere Bodenmasse bewirkten. Hinzu kommt, dass mit zunehmender Lagerungsdichte der Porenanteil vermindert wird (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002) und damit einhergehend ist eine Verminderung der Sauerstoffnachlieferung. Die Folge ist eine Hemmung der Mineralisation, was die Anreicherung von Kohlenstoff im unteren Krumenbereich erklären könnte.

Die größte Veränderung zwischen Pflugbearbeitung und Direktsaat trat am Standort Ossenheim auf. Durch die Unterlassung jeglicher Bodenbearbeitung vergrößerte sich die C_T -Menge in der Ackerkrume um 38,6 % ($17,84 \text{ t ha}^{-1}$) (Abb. 22). Schon GROCHOLL (1991) beobachtete beim Direktsaatverfahren eine höhere Kohlenstoffmenge in der Ackerkrume, die Zunahme fiel jedoch mit 12,6 % deutlich geringer aus. Diese Unterschiede können wahrscheinlich auf die Versuchsdauer zurückgeführt werden. Auf einer Braunerde aus Flugsand (Bruckköbel) kam es laut seinen Berechnungen zu einer ähnlich hohen Humusanreicherung im Vergleich zum Pflugeinsatz (Tab. 19).

KÖPPEN (2004a) sowie NIEDER (1998) nehmen an, dass durch krumentiefes Pflügen die Mineralisation der organischen Substanz im Boden gegenüber Direktsaat stimuliert wird, da Art, Häufigkeit und Intensität der Bodenbearbeitung das Ausmaß an Mineralisationsprozessen im Boden bestimmen (SEITER & HORWARTH, 2004). Laut FORSTREUTER (1999) besteht eine enge Beziehung zwischen der jeweiligen Bearbeitungstiefe und der Gesamt-

menge an OBS in der Ackerkrume. Demzufolge nahmen die Kohlenstoffmengen in der Ackerkrume des Standortes Ossenheim mit abnehmender Bodenbearbeitungsintensität zu. Nicht wendende Bodenbearbeitungsverfahren zeigen aber nach GROCHOLL (1991) in der Ober- gegenüber der Unterkrume auch deutlich höhere Enzymaktivitäten, Biomassegehalte sowie eine höhere Netto-C-Mineralisation. So kann es noch eine andere Erklärung für dieses Resultat geben, weil die Enzymaktivität ein Maß für die mikrobielle Aktivität im Boden darstellt. Eine geringe Mineralisierung der organischen Substanz bei gleichzeitig hoher mikrobieller Aktivität und Humusanreicherung kann folglich nur durch einen „internen C-Umsatz“, also den verstärkten Einbau von Kohlenstoff in die Biomasse, erklärt werden. Demzufolge führt nicht wendende Bodenbearbeitung zu einer größeren und effizienteren Biomasse, so dass der Kohlenstoffverlust bei hoher mikrobieller Aktivität geringer ist (GROCHOLL, 1991).

Tab. 19: C_{org}-Mengen (t ha⁻¹) in der Ackerkrume bei differenzierter Bodenbearbeitung (0-25 cm) am Standort Ossenheim und Bruchköbel (Mittelwerte aus 5 Untersuchungsterminen in den Vegetationsperioden 1987 - 1989) (Quelle: nach GROCHOLL, 1991)

Varianten	C _{org} -Mengen [t ha ⁻¹]	
	Ossenheim	Bruchköbel
P	47,91	24,80
FR	53,29	26,49
D	53,96	28,22

P = Pflug + Sekundärbearbeitung (25/10 cm)

FR = Flügelscharrgrubber mit Rotoregge (25/10 cm)

D = Direktsaat

Der Ackerbau-Systemversuch Reinshof und der Dauerversuch Hoffmannshof – beide in der Nähe von Göttingen – weisen vergleichbare Standortbedingungen auf wie der Standort Ossenheim. In Tab. 20 sind die Standortverhältnisse sowie die Änderung der Humusmenge in der Ackerkrume bei differenzierter Bodenbearbeitungsintensität für die o. g. Versuchstandorte zusammengestellt. FORSTREUTER (1999) fand auf dem Standort Reinshof nach einer Versuchsdauer von 15 Jahren in der sechsfeldrigen Futterbau-Marktfruchtfolge mit flach-mulchender bis mitteltiefer Bodenbearbeitung eine um 9,2 % (4,1 t ha⁻¹) höhere C_{org}-Menge in der Ackerkrume (0-30 cm) als in der dreifeldrigen Marktfruchtfolge mit Pflugbearbeitung. Die Unterschiede zwischen den beiden Bodennutzungssystemen waren sogar

signifikant. Gegenüber dem Ausgangszustand traten bei der reduzierten Bodenbearbeitung jedoch keine Veränderungen in der Humusmenge auf (FORSTREUTER, 1999). MANZKE (1995) stellte zwar bereits nach zehn Versuchsjahren höhere C_t-Mengen in der Ackerkrume fest, die aber noch keine Signifikanzen gegenüber der wendenden Bodenbearbeitung aufwiesen.

Tab. 20: Änderung der Humusmenge in der Ackerkrume bei differenzierter Bodenbearbeitung unter sonst gleichen Standortbedingungen

Standort	Hoffmannshof LAWANE (1984) MANZKE (1995)	Ossenheim GROCHOLL (1991)	Reinshof FORSTREUTER (1999)
Witterung	8,8 °C ; 611 mm	9,0 °C ; 575 mm	8,7 °C ; 635 mm
Bodentextur	Ton: 20,0 % Schluff: 72,0 % Sand: 8,0 %	Ton: 21,2 % Schluff: 67,3 % Sand: 11,5 %	Ton: 17,8 % Schluff: 70,9 % Sand: 11,3 %
Entstehung	Löss	Löss	Löss
BB-Varianten	Schwergrubber (20 cm), Direktsaat	P, FR, D	Pflug (ø 25 cm) ^{*)} , Reduzierte BB (ø 13,5 cm) ^{**)}
Änderung der Humusmenge in der Ackerkrume (Versuchsjahre)	Schwergrubber: + 5,9 % im Vergleich zum Ausgangszustand (15 Jahre) Direktsaat: + 7,9 % (6 Jahren) - 5,0 % (15 Jahren)	FR: + 12,3 % (9 Jahren) D: + 12,6 % (9 Jahren)	Reduzierte BB: + 9,2 % (15 Jahren), keine Veränderung im Vergleich zum Ausgangszustand

^{*)} Marktfruchtfolge

^{**)} Futterbau-Marktfruchtfolge

P = Pflug + Sekundärbearbeitung (25/10 cm)

FR = Flügelscharrgrubber mit Rotoregge (25/10 cm)

D = Direktsaat

Am Dauerversuch Hoffmannshof berichtet LAWANE (1984) nach sechsjähriger Versuchsdauer von einer 7,9 % ($3,54 \text{ t ha}^{-1}$) größeren Menge an C_{org} in der Ackerkrume (0-30 cm) durch Direktsaat im Vergleich zu einer tiefgreifenden Lockerung des Bodens mit dem Schwergrubber auf einer Tiefe von 20 cm. Er beziffert die jährliche Zunahme an C_{org} auf 580 kg ha^{-1} . Nach einer Versuchsdauer von 15 Jahren kam es in der Direktsaatvariante zu einer 5,0 % ($4,14 \text{ t ha}^{-1}$) niedrigeren C_{t} -Menge als bei der Schwergrubbersvariante (MANZKE, 1995). Die Autorin begründet dieses Resultat damit, dass die Lagerungsdichte der Direktsaat- gegenüber der Schwergrubbersvariante nicht erhöht war. Die C_{t} -Gehalte unterschieden sich ebenfalls kaum. Gegenüber dem Ausgangszustand von 1976 veränderte sich die Humusmenge in der Ackerkrume der Direktsaatvariante nur geringfügig ($+ 440 \text{ kg ha}^{-1}$), die intensive Bearbeitung mit dem Schwergrubber bewirkte eine Zunahme von $4,58 \text{ t ha}^{-1}$ (MANZKE, 1995).

Die Standorte Gießen, Ossenheim, Güterfelde und Scheyern zeigten bei nicht wendender Bodenbearbeitung eine Anreicherung von Kohlenstoff in der Ackerkrume. Signifikante Unterschiede konnten in keinem Fall beobachtet werden. STOCKFISCH (1997) beobachtete auch keine Signifikanzen bei der Gesamtmenge an organischem Kohlenstoff in der Ackerkrume zwischen langjährig reduzierter und wendender Bodenbearbeitung. Durch die Berücksichtigung der Lagerungsdichte zeigten sich in den Untersuchungen von HERNANZ et al. (2002) nur bei Direktsaat in den Bodenbereichen von 0-10 cm und 0-20 cm signifikant höhere Mengen. DOLAN et al. (2006) betrachteten in ihren Untersuchungen die gesamte durchwurzelbare Bodenschicht (0-45 cm) und nicht nur die bearbeitete Schicht. Nach einer Versuchsdauer von 23 Jahren lagen bei Direktsaat die C_{org} -Mengen in der oberen Bodenschicht signifikant höher als beim Pflügen. In einer Bodentiefe von 15 bis 20 cm befand sich eine Übergangszone, wo keine Signifikanzen zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten auftraten. Ab 20 bis 25 cm Bodentiefe kam es zu einem abrupten Wechsel mit der Folge, dass die wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug eine signifikante Erhöhung der Menge an C_{org} bewirkte. Die Gesamtmengen an organischem Kohlenstoff im durchwurzelbaren Bodenbereich waren jedoch nicht signifikant verschieden. Ebenso hatte das Residuen-Management keinen signifikanten Einfluss auf die C_{org} -Menge, obwohl das Belassen der pflanzlichen Reststoffe auf der Ackerfläche tendenziell zu einer Zunahme der Humusmenge führte (DOLAN et al., 2006).

Auch ERMICH & HOFMANN (1991) stellten am Versuchstandort Seehausen nach 24jähriger Versuchsdauer keine maßgeblichen Differenzen zwischen den verschiedenen Bearbeitungsvarianten fest. Neuere Untersuchungen auf diesem Standort berichten aber von einer

Humuszunahme bei nicht wendender Bodenbearbeitung. So stieg nach 37 Versuchsjahren die Humusmenge in der Ackerkrume um 9,0 % (4,1 t ha⁻¹) an (HOFMANN et al., 2003). Im Systemversuch zur schonenden Bodenbearbeitung, der 1984 in der Lehr- und Versuchstation Seehausen angelegt wurde, kam es nach eigenen Berechnungen durch flache Grubberbearbeitung zu einer um 4,6 % (2,69 t ha⁻¹) niedrigeren C_{org}-Menge in 0 bis 35 cm Bodentiefe als bei mitteltief wendender Bodenbearbeitung mit dem Pflug (Tab. 21). Folglich hat die Dauer, mit der ein Standort differenziert bearbeitet wird, einen entscheidenden Einfluss auf die Gesamtmenge an OBS in der Ackerkrume, so dass die beschriebenen Diskrepanzen damit erklärt werden können. Hinzu kommt noch, dass nach DORAN (1992) für die Auswirkungen der Bodenbearbeitungsverfahren auf die Bodeneigenschaften die Vornutzung sowie die Fruchtfolge von maßgeblicher Bedeutung sind.

Tab. 21: C_{org}-Mengen (t ha⁻¹) der Bodenbearbeitungsvarianten Pflug und Schwergrubber in Oberkrume, Unterkrume und Krumbasis nach 16jähriger Versuchsdauer am Standort Seehausen (Quelle: eigene Berechnungen nach RÜCKNAGEL et al., 2003)

	C _{org} -Mengen [t ha ⁻¹]	
	Pflug	Schwergrubber
Oberkrume	25,29	28,52
Unterkrume	25,23	19,64
Krumbasis	7,89	7,56
Σ (0-35 cm)	58,41	55,72

Mittlere Bearbeitungstiefe: Pflug 22,3 cm, Schwergrubber 9,6 cm

KOCH & STOCKFISCH (2006) sind in ihren Untersuchungen der Frage nachgegangen, wie sich einmaliges Pflügen nach mehrjährigem Pflugverzicht auf die Humusmenge in der Ackerkrume auswirkt, da gerade nicht wendende Bodenbearbeitungssysteme Probleme verursachen, die durch einmaligen Pflugeinsatz behoben werden können. Die zentralen Probleme reduzierter Bodenbearbeitung sind laut EHLERS (1992) das Strohmanagement und die Unkrautkontrolle. Eine einmalige Wendung des Bodens nach mehrjährigem Pflugverzicht führte innerhalb von ein bis sechs Monaten gegenüber dem Ausgangszustand zu einem erheblichen Humusverlust. So betrug die Abnahme der C_{org}-Menge in 0-30 cm Bodentiefe 4,0 %. Dies waren etwa zwei Drittel des Gesamtverlustes innerhalb von 18 bis 30 Monaten (KOCH & STOCKFISCH, 2006).

5.3 Schlussfolgerungen

Die auf sieben verschiedenen Versuchsstandorten durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass sich mit einer Reduzierung der Bodenbearbeitungsintensität bis hin zur Unterlassung jeglicher Bodenbearbeitung nicht unbedingt höhere Kohlenstoffmengen in der Ackerkrume realisieren lassen. Vielmehr kann Grubberbearbeitung einen stärkeren Humusabbau bewirken als Pflugbearbeitung.

Bei den Wirkungen der Bodenbearbeitung auf die organische Bodensubstanz sind deutliche Standortunterschiede aufgetreten. Somit muss die Bodenbearbeitung in ihrer Wirkung auf das ganze System Boden-Pflanze beurteilt werden und darf nicht als alleinige Bewirtschaftungsmaßnahme betrachtet werden, was die Beurteilung von Einzelfaktoren auf den Humushaushalt des Bodens erschwert. Jede Bodenbearbeitungsmaßnahme hat sowohl erwünschte als auch unerwünschte Wirkungen auf das Ökosystem Boden, die nicht nur von der Bodenbearbeitung abhängen. Als weitere Einflussfaktoren nennt RICHTER (1995) die Standorteigenschaften, die Witterung, den Bodenzustand sowie die Gesamtbewirtschaftung des betreffenden Ackerschlags. Gerade die physikalischen Bodenbedingungen haben einen entscheidenden Einfluss auf die Umsetzung der organischen Bodensubstanz. Je nach den vorherrschenden Standortbedingungen sind zur Aufrechterhaltung eines standorttypischen Humusniveaus unterschiedlich hohe Mengen an organischer Substanz erforderlich. Allgemeine Schlussfolgerungen zur Gestaltung der Humusersatzwirtschaft bei differenzierter Bodenbearbeitungsintensität sind daher ohne Berücksichtigung der Standortverhältnisse nicht möglich.

Des Weiteren haben die vorliegenden Ergebnisse zu dem Schluss geführt, dass die Lagerungsdichte des Bodens einen deutlichen Einfluss auf die Menge an OBS in der Ackerkrume ausübt. Somit kann eine unterschiedliche Dichtlagerung des Bodens infolge einer unterschiedlichen Bodenbearbeitungsintensität eine scheinbare Humusanreicherung vortäuschen. Um ein vollständiges Bild über die Veränderung der OBS in der Ackerkrume zu erhalten, sollten die Humusgehalte mit Hilfe der Lagerungsdichte und Bodentiefe in Humusmengen pro Flächeneinheit umgerechnet werden.

Im Hinblick auf die Humusbilanzierung stellt sich noch die Frage, wie zukünftig mit einer differenzierten Intensität der Grundbodenbearbeitung umgegangen werden sollte. Aufgrund der deutlichen Standortunterschiede scheint eine Modifizierung der Humusbilanzkoeffizienten nur unter sonst gleichen Standortbedingungen möglich zu sein. Demzufolge ist es erforderlich, die Mengenänderung an Humus in der Ackerkrume von Standorten mit

ähnlichen bzw. vergleichbaren Verhältnissen in Bezug auf Witterung und Bodentextur miteinander zu vergleichen (vgl. Tab. 20). Unter Berücksichtigung der Grundbodenbearbeitungsintensität könnte sich der anbaubedingte Humusverlust mit Hilfe der folgenden Formel genauer quantifizieren lassen, um im Sinne einer nachhaltigen Bodenbewirtschaftung entsprechende Maßnahmen zur Verbesserung der Humusersatzwirtschaft abzuleiten:

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{Humusverlust} \\ \text{(t Humus ha}^{-1}\text{)} \end{array}} = \boxed{\begin{array}{l} \text{Humusbilanz-} \\ \text{Koeffizient} \end{array}} \text{ mal } \boxed{\begin{array}{l} \text{Faktor} \\ \text{systemspezifisch} \\ \text{(Bodenbearbeitung)} \end{array}}$$

Die Ableitung von „systemspezifischen Faktoren“, die für die Berechnung des Humusverlustes erforderlich sind, war anhand der vorliegenden Ergebnisse auch unter Einbeziehung von langjährigen Feldversuchen aus der Literatur nicht möglich. Hierzu besteht noch weiterer Forschungsbedarf, insbesondere im Hinblick auf die zu verwendende Krumentiefe bzw. Bodentiefe bei der Berechnung von Humusmengen. Des Weiteren ist eine Präzisierung der Bilanzkoeffizienten für unterschiedliche Standortbedingungen notwendig.

6 Zusammenfassung

Auf sieben unterschiedlichen Versuchsstandorten wurden Untersuchungen zum Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf Gehalt und Menge der organischen Bodensubstanz in Ackerböden durchgeführt, wobei nur ausgewählte Varianten Berücksichtigung fanden. Weiterhin sollte anhand dieser Resultate geklärt werden, ob sich von den durch die Bodenbearbeitung ausgehenden Wirkungen Zu- bzw. Abschläge für die Humusbilanz-Koeffizienten ableiten lassen.

Im Frühjahr 2005 erfolgte auf den Standorten Gießen, Hassenhausen und Ossenheim, im Frühjahr 2006 auf den Standorten Bad Lauchstädt, Gladbacherhof, Güterfelde und Scheyern die Entnahme von Bodenproben aus verschiedenen Tiefenabstufungen. Als Untersuchungsparameter dienten die Lagerungsdichte und der Gesamtkohlenstoffgehalt. Um ein vollständiges Bild über die Veränderungen der OBS in der Ackerkrume zu erhalten, wurden die Gesamtkohlenstoffgehalte der einzelnen Bodenschichten mittels Lagerungsdichte in Kohlenstoffmengen pro Flächeneinheit umgerechnet.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Bodenbearbeitungsintensität wirkte sich auf die Lagerungsdichte des Bodens aus. Bei wendender Bodenbearbeitung mit dem Pflug zeigte sich in der gesamten Ackerkrume eine nahezu gleichmäßige Dichtlagerung. Im Gegensatz dazu, bewirkte die nicht wendende Bodenbearbeitung in der bodennahen Schicht eine Reduzierung der Lagerungsdichte. Grund hierfür waren die im Vergleich zur Pflugbearbeitung höheren Kohlenstoffgehalte in der obersten Krumenschicht. Mit zunehmender Bodentiefe kam es zu einer Zunahme der Dichtlagerung des Bodens, die bei Unterlassung jeglicher Bodenbearbeitung stärker ausfiel und somit wurde im unteren Krumbereich eine höhere Lagerungsdichte festgestellt als bei Pflugeinsatz.
2. Das verwendete Bodenbearbeitungsverfahren hatte einen maßgeblichen Einfluss auf die Einarbeitung bzw. Verteilung der Pflanzenrückstände in der Ackerkrume. Jährlich gepflügter Boden zeigte etwa gleich hohe Kohlenstoffgehalte in den verschiedenen Krumbereichen. Demgegenüber führte nicht wendende Bodenbearbeitung in der obersten Bodenschicht zu deutlich höheren Kohlenstoffgehalten als in der untersten Bodenschicht. Nur am Standort Bad Lauchstädt wurde in der Unterkrume der Schwergrubbervariante ein signifikant geringerer C_t -Gehalt beobachtet.

3. Die Lagerungsdichte übte einen entscheidenden Einfluss auf die OBS-Menge in der Ackerkrume aus. Des Weiteren kam es bei den Wirkungen der Bodenbearbeitung zu deutlichen Standortunterschieden. Die Standorte Güterfelde und Scheyern zeigten bei nicht wendender Bodenbearbeitung gegenüber Pflugeinsatz jeweils eine deutlich höhere Kohlenstoffmenge in der Unterkrume, die in Güterfelde sogar signifikant war. Auf den Standorten Bad Lauchstädt, Gießen und Hassenhausen erzielten die Grubbervarianten eine niedrigere Kohlenstoffmenge in der Ackerkrume als die gepflügten Varianten. Bei Direktsaat war am Standort Hassenhausen die Kohlenstoffmenge ebenfalls geringer. Die größte Kohlenstoffanreicherung trat am Standort Ossenheim auf, was bei Unterlassung jeglicher Bodenbearbeitung im Vergleich zu Pflugbearbeitung zu einer um 38,6 % ($17,84 \text{ t ha}^{-1}$) höheren C_t -Menge in der Ackerkrume führte. Signifikante Unterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsverfahren konnten bei der Gesamtmenge an Humus in der Ackerkrume auf keinem Standort festgestellt werden.

4. Insgesamt war aufgrund der vorliegenden Resultate unter Berücksichtigung von Ergebnissen langjähriger Feldversuche aus der Literatur keine Modifizierung der Humusbilanz-Koeffizienten möglich.

7 Literaturverzeichnis

ASMUS, F. (1992): Einfluss organischer Dünger auf Ertrag, Humusgehalt des Bodens und Humusproduktion. Berichte über Landwirtschaft SH 206. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 127 – 139.

ASMUS, F. und V. HERRMANN (1977): Reproduktion der organischen Substanz des Bodens. Fortschrittsberichte für die Landwirtschaft und Nahrungsgüterwirtschaft, Bd. 15, Heft 11.

BAEUMER, K. (1992): Allgemeiner Pflanzenbau. 3. Auflage. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

BEISECKER, R. (1994): Einfluss langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge, die Wasserinfiltration und die Stoffverlagerung eines Löß- und eines Sandbodens. Bodenökologie und Bodengenese Heft 12, Berlin.

BOT, A. and J. BENITES (2005): The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food and production. FAO, Rome.

CLAUPEIN, W. und K. BAEUMER (1990): Einfluss der Bodenbearbeitung auf den Stickstoffumsatz in Ackerböden. Tag.-Ber., Akad. Landwirtsch.-Wiss. 295, Berlin, 145 – 159.

DITTMANN, B. (2006): Ökologische Fruchtfolge Güterfelde. Online im Internet: URL: <http://www.mluv.brandenburg.de/cms/detail.php/lbm1.c.209310.de> Stand 8.06.2006.

DOLAN, M.S. ; CLAPP, C.E. ; ALLMARAS, R.R. ; BAKER, J.M. and J.A.E. MOLINA (2006): Soil organic carbon and nitrogen in a Minnesota soil as related to tillage, residue and nitrogen management. Soil and Tillage Research 89, 221 – 331.

DORAN, J. W. (1992): Einfluss verschiedener Bewirtschaftungs- und Bearbeitungssysteme auf die organische Bodensubstanz und die Bodenfruchtbarkeit. Berichte über Landwirtschaft SH 206. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 155 – 167.

DOYLE, G.L. ; RICE, C.W. ; PETERSON, D.E. and J. STEICHEN (2004): Biologically defined soil organic matter pools as affected by rotation and tillage. *Environmental Management* Vol. 33, Supplement 1, 528 – 538.

DÜRING, R. ; GÄTH, S. ; GROß, U. ; HARRACH, T. ; SEUFERT, H. und F. TEBRÜGGE (2005): Langjährige Bodenbearbeitungsversuche in Hessen. In: Felix-Hennigsen, P. ; Kühn, P. und C. Opp (Hrsg.): Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Exkursionsführer, 123 – 130.

EHLERS, W. (1992): Reduzierte Bodenbearbeitung – Ökologische Folgen und ackerbauliche Grenzen. *VDLUFA-Schriftenreihe* 35, Darmstadt, 35 – 58.

EMMERLING, C. (1998): Bodenbiologische und -ökologische Aspekte nachhaltiger landwirtschaftlicher Bodennutzung. *Habilitationsschrift*. Univ. Trier.

EPPERLEIN, J. (2002): Vergleichende Untersuchungen zum Einfluss konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung auf ausgewählte biologische und physikalische Bodenparameter im Biosphärenreservat Schorfheide-Chorin. *Diss. Univ. Berlin*.

ERMICH, D. und B. HOFMANN (1991): Einfluss unterschiedlicher Intensität der Bodenbearbeitung auf Bodeneigenschaften und Erträge in einem Dauerversuch. *Wiss. Beiträge d. Universität Halle* 1991/22, 117 – 126.

FORSTREUTER, T. (1999): Bodenfruchtbarkeitskennwerte und Kulturpflanzenertrag in zwei Bodennutzungssystemen. *Diss. Univ. Göttingen*. Online im Internet: URL: <http://webdoc.sub.gwdg.de/diss/1999/forstreu/> Stand 07.11.2001.

FRANZLUEBBERS, A.J. (2002): Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research* 66, 95 – 106.

FRANZLUEBBERS, A.J. (2004): Tillage and residue management effects on soil organic matter. In: Magdoff, F. and R.R. Weil (Eds.): *Soil organic matter in sustainable agriculture*. CRC Press, Boca Raton, 227 – 268.

FREYER, B. (2003): Fruchtfolgen – konventionell, integriert, biologisch. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

FRIEDEL, J.K. (1995): Erfassung von Bodenbearbeitungs- und Fruchtfolgewirkungen auf Bodenmikroorganismen durch Bestimmung von Adenylatgehalten. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch. 75, 75 – 78.

FÜRSTENFELD, F. und T. HETTERICH (2005): Humus als Kapitalanlage. DLZ 7/2005, 38 – 42.

GROCHOLL, J. (1991): Der Einfluss verschiedener Bodenbearbeitungssysteme auf den mikrobiologischen Status von Böden verschiedener Standorte unter besonderer Berücksichtigung der C-Umsetzungen. Diss. Univ. Gießen.

HERNANZ, J.L. ; LÓPEZ, R. ; NAVARRETE, L. and V. SÁNCHEZ-GIRÓN (2002): Long-term effects of tillage systems and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain. Soil & Tillage Research 66, 129 – 141.

HARRACH, T. und U. RICHTER (1992): Wirkung von Bodenbearbeitungsverfahren auf den Stickstoffhaushalt im System Boden-Pflanze. In: FRIEBE, B. (Hrsg.): Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf das Ökosystem Boden. Beiträge zum 3. Symposium vom 12. – 13. Mai in Gießen, Wiss. Fachverlag Dr. Fleck, 81 – 96.

HARRACH, T. und U. RICHTER (1994): Einfluss von Bodenbearbeitungsverfahren auf die Nitratverlagerung. In: Schultheiß, U. (Hrsg.): Strategien zur Verminderung der Nitratauswaschung in Wasserschutzgebieten. KTBL-Arbeitspapier 206 , 71 – 81.

HOFMANN, B. ; TISCHER, S. und O. CHRISTEN (2003): Einfluss langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf Humusgehalt und biologische Bodeneigenschaften. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 15, 288 – 289.

- HÜLSBERGEN, K.-J. ; REINICKE, F. und M. HEINE (2001): Der Dauerversuch „Ökologisch-integrierte Anbausysteme“ in Bad Lauchstädt. In: Diepenbrock, W. (Hrsg.): Gestaltung der Anbauverfahren landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Shaker Verlag, Aachen, 145 – 161.
- HÜLSBERGEN, K.-J. ; KÜSTERMANN, B. und H. SCHMID (2005): Humusmanagement im ökologischen Betrieb. In: Schriftenreihe der LfL 6/2005. Forschung für den Ökologischen Landbau in Bayern. Freising-Weihenstephan, 55 – 69.
- KOCH, H.-J. and N. STOCKFISCH (2006): Loss of soil organic matter upon ploughing under a loess soil after several years of conservation tillage. Soil and Tillage Research 86, 73 – 83.
- KLADIVKO, E.J. (1994): Residue effects on soil physical properties. In: Unger, P.W. (Eds.): Managing agricultural residues. Lewis publishers, Boca Raton, 123 – 141.
- KÖHNLEIN, J. (1964): Über die Beziehungen zwischen Ertragsbildung, Bodenfruchtbarkeit und Humus und die Beeinflussbarkeit des Faktors „Humus“ auf landwirtschaftlich genutzten Böden. Schriftenreihe der Landw. Fakultät der Univ. Kiel 37, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 5 – 40.
- KÖLLER, K. und C. LINKE (2001): Erfolgreicher Ackerbau ohne Pflug. 2. neu überarb. und erw. Auflage. DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt am Main.
- KÖPPEN, D. (2004a): Bodenbearbeitung. In: Köppen, D. (Hrsg.): Bodenfruchtbarkeit im Agroökosystem. Teil 1. Verlag Dr. Kovac, Hamburg, 269 – 300.
- KÖPPEN, D. (2004b): Systemwirkungen. In: Köppen, D. (Hrsg.): Bodenfruchtbarkeit im Agroökosystem. Teil 2. Verlag Dr. Kovac, Hamburg, 599 – 631.
- KÖRSCHENS, M. (1988): Die Abhängigkeit der Trockenrohdichte vom Ct- und Feinanteilgehalt von Mineralböden. Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkd. 32, 363 – 367.

KÖRSCHENS, M. (1989): Humusgehalt – Humusbilanz – N-Nachlieferung. *Feldwirtschaft* 30, 368 – 369.

KÖRSCHENS, M. (1990): C-N-Langzeitdynamik im Statischen Düngungsversuch Lauchstädt. *Tag.-Ber., Akad. Landwirtsch.-Wiss.* 295, Berlin, 81 – 90.

KÖRSCHENS, M. und E. SCHULZ (1999): Die organische Bodensubstanz: Dynamik – Reproduktion – ökonomisch und ökologisch begründete Richtwerte. *UFZ Bericht* 13, Leipzig.

LAWANE, G. (1984): Mengenänderung der organischen Bodensubstanz bei unterschiedlicher Bodenbearbeitungsintensität. *Diss. Univ. Göttingen*.

LEITHOLD, G. (2004): Humusbilanzausgleich durch organische Düngemittel – Chancen für Bioabfallkomposte. Online im Internet: URL: <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2004/1515/> Stand 30.04.2004.

LEITHOLD, G. und K.-J. HÜLSBERGEN (1997): Verfahren der Humusbilanzierung – methodische Grundlagen und Anwendung in verschiedenen Bewirtschaftungssystemen. *VDLUFA-Schriftenreihe* 46, 383 – 386.

LEITHOLD, G. ; HÜLSBERGEN, K.-J. ; MICHEL, D. und H. SCHÖNMEIER (1997): Humusbilanzierung – Methoden und Anwendung als Agrar-Umweltindikator. In: *Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Hrsg.): Umweltverträgliche Pflanzenproduktion: Indikatoren, Bilanzierungsansätze und ihre Einbindung in Ökobilanzen. Initiativen zum Umweltschutz* 5. Zeller Verlag, Osnabrück, 43 – 54.

LIEBHARD, P. (1993): Einfluss der Primärbodenbearbeitung auf Textur und organische Substanz von Ackerböden im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 1). *Die Bodenkultur* 44, 199 – 210.

LINDENTHAL, T. und W. HARTL (2003): Den Boden und nicht die Pflanze düngen! *Ernte – Zeitschrift für Landwirtschaft und Ökologie*, 5/2003, 18 – 20.

MANZKE, F. (1996): Bodenmikrobiologische und bodenchemische Kenngrößen zur Beurteilung des Umsatzes organischer Bodensubstanz in unterschiedlichen Benutzungssystemen. Diss. Univ. Göttingen.

NIEDER, R. (1998): Bodenbearbeitung und Nährstoffaustrag. In: KTBL-Arbeitspapier 266. Bodenbearbeitung und Bodenschutz. Schlussfolgerungen für gute fachliche Praxis. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup, 91 – 116.

OEHMICHEN, J. (2000): Pflanzenernährung und Düngung. In: LÜTKE ENTRUP N. und J. OEHMICHEN (Hrsg.): Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 1: Grundlagen. Verlag Th. Mann, Gelsenkirchen, 407 – 599.

OSINSKI, E. und E. PRIESACK (2005): FAM – Forschungshintergrund und Ergebnisstruktur. In: Osinski et al. (Hrsg.): Landwirtschaft und Umwelt – ein Spannungsfeld. Oekom Verlag, München, 21 – 56.

PEKRUN, C. und W. CLAUPEIN (1998): Forschung zur reduzierten Bodenbearbeitung in Mitteleuropa: eine Literaturübersicht. Pflanzenbauwissenschaften 2, 160 – 175.

POWLSON, D.S. and D.S. JENKINSON (1981): A comparison of the organic matter, biomass, adenosine triphosphate and mineralizable nitrogen contents of ploughed and direct-drilled soils. J. agric. Sci., Camb. 97, 713 – 721.

RICHTER, U. (1995): Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge und den Stickstoffhaushalt. Schriftenreihe zur Bodenkunde, Landeskultur und Landschaftsökologie, Giessen, 4, 178 Seiten.

ROGASIK, J. ; FUNDER, U. ; SCHNUG, E. ; ROGASIK, H. und M. KÖRSCHENS (2005): Zentrale Stellung des Humus für die Bodenfruchtbarkeit. In: Schriftenreihe des Instituts für Landwirtschaft und Umwelt 10/2005. Bodenleben und Bodenfruchtbarkeit – Stand des Wissens und zukünftige Herausforderungen. Bonn, 51 – 64.

RÜCKNAGEL, J. ; HOFMANN, B. und O. CHRISTEN (2003): Einfluss langjährig unterschiedlicher Bearbeitungsintensität auf physikalische Bodeneigenschaften, Humusgehalt und Wintergerstenertrag. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 15, 290 – 291.

SAUERBECK, D. (1992): Funktionen und Bedeutung der organischen Substanzen für die Bodenfruchtbarkeit – ein Überblick. Berichte über Landwirtschaft SH 206. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 13 – 29.

SCHIEFFER, F. und P. SCHACHTSCHABEL (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, ISBN: 3-8274-1324-9.

SCHUBERT, S. (2006): Pflanzenernährung. Grundwissen Bachelor. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

SEITER, S. and W.R. HORWARTH (2004): Strategies for managing soil organic matter to supply plant nutrients. In: Magdoff, F. and R.R. Weil (Eds.): Soil organic matter in sustainable agriculture. CRC Press, Boca Raton, 269 – 293.

SEUFERT, H. (2003): Nachhaltige Landtechnik im Sinne Liebig's. Justus Liebig: Seine Zeit und unsere Zeit, Gießen, 267 – 276.

SOMMER, C. (1998): Konservierende Bodenbearbeitung – ein Konzept zur Lösung agrarrelevanter Bodenschutzprobleme. Landbauforschung Völkenrode SH 191.

STOCKFISCH, N. (1997): Strohabbau durch Mikroorganismen und Regenwürmer in zwei Bodenbearbeitungssystemen. Schriftenreihe agrarwissenschaftliche Forschungsergebnisse Bd. 5. Verlag Dr. Kovac, Hamburg.

TEBRÜGGE, F. (1986): Neuere Bearbeitungsverfahren in ihrer Wechselwirkung auf Bodenstruktur und Bodenertrag. Schriftenreihe des deutschen Rates für Landespflege, Bodenschutz 51, 56 – 64.

TEBRÜGGE, F. (1994): Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen unter den Aspekten von Bodenschutz und Ökonomie. In: Tebrügge, F. und M. Dreier (Hrsg.): Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristigen Auswirkungen auf den Boden. Wiss. Fachverlag Dr. Fleck, 5 – 16.

TEBRÜGGE, F. (2003): Konservierende Bodenbearbeitung gestern, heute, morgen - von wendender über nicht wendende Bodenbearbeitung zur Direktsaat. In: Artmann, R. und F.-J. Bockisch (Hrsg.): Nachhaltige Bodennutzung - aus technischer, pflanzenbaulicher, ökologischer und ökonomischer Sicht. Landbauforschung Völkenrode SH 256, 49 – 59.

TEBRÜGGE, F. and R.-A. DÜRING (1999): Reducing tillage intensity - a review of results from a long-term study in Germany. Soil & Tillage Research 53, 15 – 28.

WEBER, M. und C. EMMERLING (2005): Zehn Jahre differenzierte Grundbodenbearbeitung im ökologischen Ackerbau (Projekt Ökologische Bodenbewirtschaftung) – Entwicklung der organischen Bodensubstanz, Nährstoffgehalte sowie bodenbiologischen Eigenschaften. In: Heß, J. und G. Rahmann (Hrsg.): Ende der Nische. Beiträge zur 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Kassel, 5 – 8.

VDLUFA (2004): Humusbilanzierung. Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Bonn.

Eidesstattliche Erklärung

„Ich versichere, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die gegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Die Stellen, die anderen Werken wörtlich oder sinngemäß entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Ich versichere weiterhin, dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat.“