

Thomas Forstreuter

---

**Bodenfruchtbarkeitskennwerte und  
Kulturpflanzenertrag  
in zwei Bodennutzungssystemen**

---

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Fakultät für Agrarwissenschaften  
der Georg-August-Universität Göttingen

Aus dem Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung  
der Georg-August-Universität Göttingen

---

**Bodenfruchtbarkeitskennwerte und Kulturpflanzenertrag  
in zwei Bodennutzungssystemen**

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
(Dr. sc. agr.)  
der Fakultät für Agrarwissenschaften  
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von  
Thomas Forstreuter  
aus Lünne

Göttingen, im Februar 1999

Gefördert durch die DFG im Graduiertenkolleg "Landwirtschaft und Umwelt"

D 7

Referent: Prof. Dr. W. Ehlers

Korreferent: Prof. Dr. W. Römer

Tag der mündlichen Prüfung: 4. Februar 1999

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Verzeichnis der Abbildungen.....	1
Verzeichnis der Tabellen.....	3
Verzeichnis der Abkürzungen .....	4
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>2 Untersuchungsstandort und Versuchsanlage</b> .....	<b>10</b>
2.1 Standortbeschreibung .....	10
2.2 Versuchsanlage.....	11
<b>3 Methoden</b> .....	<b>16</b>
3.1 Untersuchungsprogramm .....	16
3.2 Lagerungsdichte .....	17
3.3 Gravimetrischer Wassergehalt und maximale Wasserhaltekapazität .....	18
3.4 Eindringwiderstand .....	18
3.5 Kohlenstoff und Stickstoff im Boden.....	19
3.6 Phosphor, Kalium und Magnesium im Boden sowie pH-Wert des Bodens .....	19
3.7 Regenwurmaktivität und Regenwurmporen.....	19
3.8 Mikrobielle Biomasse ( $C_{\text{mik}}$ ).....	20
3.9 $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ - Verhältnis.....	22
3.10 $\text{CO}_2$ -Freisetzung im Feld.....	22
3.11 Metabolischer Quotient ( $q\text{CO}_2$ ).....	23
3.12 Dehydrogenaseaktivität (DHA).....	23
3.13 Bodentemperatur .....	25
3.14 Pflanzenertrag.....	25
3.15 Statistische Auswertung .....	25
<b>4 Ergebnisse</b> .....	<b>26</b>
4.1 Auswirkungen langjährig unterschiedlicher Bodennutzung auf physikalische Bodenkennwerte.....	26
4.1.2 Lagerungsdichte .....	27
4.1.3 Eindringwiderstand .....	28
4.2 Auswirkungen langjährig unterschiedlicher Bodennutzung auf chemische Bodenkennwerte.....	32
4.2.1 Einfluß von Fruchtarten und Bodennutzung auf die Menge an organischem Kohlenstoff ( $C_{\text{org}}$ ) und Gesamtstickstoff ( $N_{\text{t}}$ ) im Boden .....	32
4.2.2 Langjährige Veränderungen des organischen Kohlenstoffs und Gesamtstickstoffs im Boden bei unterschiedlicher Bodennutzung .....	34
4.2.3 Tiefenverteilung der $C_{\text{org}}$ - und $N_{\text{t}}$ -Gehalte in Abhängigkeit vom Bodennutzungssystem.....	35
4.2.4 Gehalte an K, P und Mg und pH-Wert .....	37

	Seite
4.3	Auswirkungen unterschiedlicher Bodennutzung auf die Regenwurmpopulation.....39
4.3.1	Regenwurm-Biomasse .....39
4.3.2	Aktivitätsdichten.....41
4.3.3	Artenspektrum.....43
4.3.4	Regenwurmporen .....44
4.4	Einfluß von Bodennutzung auf die mikrobielle Biomasse und mikrobielle Aktivität des Bodens .....47
4.4.1	Gesamt mengen an mikrobieller Biomasse.....47
4.4.2	Zeitliche Dynamik der mikrobiellen Biomasse innerhalb der Fruchtfolge.....48
4.4.3	Vertikale Verteilung der mikrobiellen Biomasse .....50
4.4.4	Dehydrogenaseaktivität.....54
4.4.5	CO <sub>2</sub> -Freisetzung im Feld .....57
4.4.6	C <sub>mik</sub> /C <sub>org</sub> -Verhältnis.....62
4.4.7	Einfluß der Bodennutzung auf den metabolischen Quotienten .....63
4.5	Ertrag der Feldfrüchte.....66
4.5.1	Zuckerrübe .....67
4.5.2	Winterweizen.....69
4.5.3	Wintergerste .....71
4.5.4	Langfristige Entwicklung der Bodennutzungssysteme und der Erträge in Abhängigkeit von der Höhe der mineralischen N-Düngung.....73
<b>5</b>	<b>Diskussion</b> .....80
5.1	Auswirkungen langjährig unterschiedlicher Bodennutzung auf die Lagerungsdichte und den Eindringwiderstand .....80
5.2	Wirkung unterschiedlicher Bodennutzung auf die organische Bodensubstanz .....85
5.3	Auswirkungen langjähriger differenzierter Bodennutzung auf die Regenwürmer.....94
5.4	Auswirkungen unterschiedlicher Bodennutzung auf die mikrobielle Biomasse des Bodens und Dehydrogenaseaktivität .....103
5.5	Auswirkungen unterschiedlicher Bodennutzung auf die Bodenatmung und den metabolischen Quotienten .....113
5.6	Einfluß der Bodennutzung auf die Erträge von Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste .....121
5.7	Ertragsstabilität und langfristige Entwicklung des Ertragsniveaus .....129
5.8	Zusammenfassende Diskussion und Schlußfolgerungen.....139
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....145
<b>7</b>	<b>Literatur</b> .....147

<b>Verzeichnis der Abbildungen</b>	<b>Seite</b>
Abb. 1: Monatsmitteltemperaturen und Niederschläge (Monatssummen) während des Versuchszeitraumes 1995-1997.....	10
Abb. 2: Versuchsplan des Ackerbau-Systemversuches im Jahr 1995.....	13
Abb. 3: Verteilung der einzelnen N-Stufen (N0, N1, N2, N3) in einem Fruchtfolge-Großteilstück.....	14
Abb. 4: Dehydrogenaseaktivität (DHA) des Versuchsbodens in Abhängigkeit von der TTC-Konzentration.....	24
Abb. 5: Lagerungsdichte (LD) unter Zuckerrübe, Winterweizen, Wintergerste, .....	28
Abb. 6: Mittelwerte der Eindringwiderstände aller Parzellen der lF und kF in Abhängigkeit von der Bodentiefe im Frühjahr 1996 .....	30
Abb. 7: Mittelwerte der Eindringwiderstände aller Parzellen der lF und kF in Abhängigkeit von der Bodentiefe im Frühjahr 1997 .....	31
Abb. 8: Mengen an organischem Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) in 0-20 cm Bodentiefe der Bodennutzungssysteme lange (lF) und kurze (kF) Fruchtfolge in den Untersuchungsjahren 1995 und 1996 im Vergleich zum Ausgangszustand 1981 ..	34
Abb. 9: Mengen an Gesamtstickstoff ( $N_t$ ) in 0-20 cm Bodentiefe der Bodennutzungssysteme lange (lF) und kurze (kF) Fruchtfolge in den Untersuchungsjahren 1995 und 1996 im Vergleich zum Ausgangszustand 1981 ...	35
Abb. 10: Gehalte an organischem Kohlenstoff (A-D) und Gesamtkohlenstoff (E-H) unter den Kulturen der langen und kurzen Fruchtfolge .....	36
Abb. 11: Regenwurm-Biomasse (Lebendgewicht) in der langen (lF) und kurzen (kF) Fruchtfolge im Frühjahr 1995.....	40
Abb. 12: Regenwurm-Biomasse (Lebendgewicht) in der langen (lF) und kurzen (kF) Fruchtfolge im Frühjahr 1996.....	41
Abb. 13: Anzahl Bioporen mit einem Durchmesser von > 2 mm in Abhängigkeit vom Bodennutzungssystem und der Bodentiefe im Jahr 1995 .....	45
Abb. 14: Flächenanteil der Bioporen mit einem Durchmesser von > 2 mm in Abhängigkeit vom Bodennutzungssystem und der Bodentiefe im Jahr 1995 .....	45
Abb. 15: $C_{mik}$ -Mengen ( $kg\ C\ ha^{-1}$ ; 0-30 cm Tiefe) unter dem Einfluß von Fruchtart und Bodennutzungssystem zu unterschiedlichen Terminen 1996 .....	49
Abb. 16: Gehalte an mikrobieller Biomasse ( $C_{mik}$ ) in unterschiedlichen Bodentiefen unter Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste in der langen und kurzen Fruchtfolge zu verschiedenen Beprobungsterminen 1995.....	51
Abb. 17: Gehalte an mikrobieller Biomasse ( $C_{mik}$ ) in unterschiedlichen Bodentiefen unter Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste in der langen und kurzen Fruchtfolge zu verschiedenen Beprobungsterminen 1996.....	52

	Seite
Abb. 18: Gehalte an mikrobieller Biomasse ( $C_{\text{mik}}$ ) in unterschiedlichen Bodentiefen unter den Früchten Luzerne, Silomais und Ackerbohne der langen Fruchtfolge zu verschiedenen Beprobungsterminen 1996;.....	53
Abb. 19: Zusammenhang zwischen der mikrobiellen Biomasse ( $C_{\text{mik}}$ ) und der Dehydrogenaseaktivität (DHA) unter den Früchten der langen und kurzen Fruchtfolge im Untersuchungsjahr 1995 (A) und 1996 (B);.....	54
Abb. 20: Einfluß des Bodennutzungssystems (lange und kurze Fruchtfolge) auf die Dehydrogenaseaktivität (DHA) des Bodens unter Winterweizen.....	55
Abb. 21: Dehydrogenaseaktivität (DHA) des Bodens in der langen Fruchtfolge unter Luzerne, Silomais und Ackerbohne.....	56
Abb. 22: Bodenatmung (BA) zu verschiedenen Untersuchungsterminen 1996 in den Zuckerrüben-, Winterweizen- und Wintergerstenparzellen der langen (lF) und kurzen (kF) Fruchtfolge.....	58
Abb. 23: Bodenatmung (BA) zu verschiedenen Untersuchungsterminen 1997 in den Zuckerrüben-, Winterweizen- und Wintergerstenparzellen der langen (lF) und kurzen (kF) Fruchtfolge.....	60
Abb. 24: Bereinigter Zuckerertrag (BZE) von Zuckerrübe in der langen (lF) und kurzen (kF) Fruchtfolge.....	68
Abb. 25: Kornertrag von Winterweizen in der langen (lF) und kurzen (kF) Fruchtfolge.....	71
Abb. 26: Kornertrag von Wintergerste in der langen (lF) und kurzen (kF) Fruchtfolge.....	72
Abb. 27: Bereinigter Zuckerertrag (BZE) von Zuckerrübe sowie Kornertrag von Winterweizen und Wintergerste in Abhängigkeit vom Bodennutzungssystem (lF = lange Fruchtfolge; kF = kurze Fruchtfolge) und mineralischer Stickstoffdüngung (N0, N1, N2 und N3) nach unterschiedlicher Versuchsdauer ..	74
Abb. 28: Zusammenhang zwischen der Versuchsdauer und der Ertragsdifferenz zwischen der lF und kF bei unterschiedlicher N-Düngung .....	78
Abb. 29: Zusammenhang zwischen der Versuchsdauer und der Ertragsdifferenz zwischen der lF und kF bei unterschiedlicher N-Düngung .....	78
Abb. 30: Zusammenhang zwischen der Gesamtmenge an organischem Kohlenstoff ( $C_{\text{org}}$ ) bis 30 cm Bodentiefe unter den Feldfrüchten der langen (lF) und kurzen (kF) Fruchtfolge (Mittelwerte über die Beprobungstermine April 1995 und April 1996) und der Bearbeitungstiefe .....	91
Abb. 31: Variationskoeffizienten für den bereinigten Zuckerertrag von Zuckerrübe sowie für die Kornerträge von Winterweizen und Wintergerste in den Jahren 1982 bis 1996 in der langen (lF) und kurzen (kF) Fruchtfolge.....	131

<b>Verzeichnis der Tabellen</b>	<b>Seite</b>
Tab. 1: Merkmale der beiden Bodennutzungssysteme, die sich in der organischen Düngung sowie der Art und Tiefe der Bodenbearbeitung unterscheiden.....	12
Tab. 2: Versuchsfaktoren und Faktorstufen des Ackerbau-Systemversuchs Reinshof.....	15
Tab. 3: Gesamtmenge an organischem Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) und Gesamtstickstoff ( $N_t$ ) bis 30 cm Bodentiefe unter den Feldfrüchten der langen und kurzen Fruchtfolge.....	33
Tab. 4: Gehalte an K, P und Mg in den Bodennutzungssystemen (BNS) lange (IF) und kurze (kF) Fruchtfolge in 0-30 cm Bodentiefe .....	38
Tab. 5: Aktivitätsdichte juveniler und adulter Regenwürmer unter den Feldfrüchten der langen und kurzen Fruchtfolge .....	42
Tab. 6: Einzelwurmgewichte unter den Feldfrüchten der langen und kurzen Fruchtfolge.....	43
Tab. 7: Artenzusammensetzung der Regenwurmpopulation in der IF und kF bezogen auf die Regenwurmbiomasse .....	44
Tab. 8: Mengen an mikrobieller Biomasse ( $C_{mik}$ ) unter den Feldfrüchten der Bodennutzungssysteme (BNS) lange (IF) und kurze (kF) Fruchtfolge .....	48
Tab. 9: $C_{mik}/C_{org}$ -Quotienten in Abhängigkeit von Bodennutzungssystem (BNS), Feldfrucht und Bodentiefe .....	63
Tab. 10: Metabolischer Quotient in Abhängigkeit von Bodennutzungssystem (BNS) und Feldfrucht im Jahr 1996.....	65
Tab. 11: Einfluß der langen (IF) und der kurzen (kF) Fruchtfolge sowie der mineralischen N-Düngung auf den bereinigten Zuckerertrag (BZE) und den Rüben- und Blattertrag.....	67
Tab. 12: Einfluß der langen (IF) und der kurzen (kF) Fruchtfolge sowie der mineralischen N-Düngung auf den Korn- und Strohertrag und den Ernteindex von Winterweizen .....	70
Tab. 13: Einfluß der langen (IF) und der kurzen (kF) Fruchtfolge sowie der mineralischen N-Düngung auf den Korn- und Strohertrag und den Ernteindex von Wintergerste .....	72
Tab. 14: Kornertrag von Winterweizen ( $TM \text{ dt ha}^{-1}$ ) in der langen (IF) und kurzen (kF) Fruchtfolge sowie die Ertragsdifferenz (IF minus kF) zwischen den Fruchtfolgen in den Parzellen ohne mineralische N-Düngung ( $N_0$ ) in den Jahren 1982 bis 1996 .....	76
Tab. 15: Die Differenz des bereinigten Zuckerertrages bzw. des Kornertrages von Winterweizen und Wintergerste zwischen IF und kF in Abhängigkeit von der Versuchsdauer .....	77



---

## Verzeichnis der Abkürzungen

BNS:	Bodennutzungssystem
BZE:	bereinigter Zuckerertrag
C <sub>an</sub> :	anorganisch gebundener Kohlenstoff
C <sub>mik</sub> :	Kohlenstoff in der mikrobiellen Biomasse
CO <sub>2</sub> -C:	Kohlenstoff im Kohlendioxid
C <sub>org</sub> :	organischer Kohlenstoff
C <sub>t</sub> :	Gesamtkohlenstoff
DHA:	Dehydrogenaseaktivität
dt:	Dezitonne = 100 kg
EW:	Eindringwiderstand
ha:	Hektar
kF:	kurze Fruchtfolge
LD:	Lagerungsdichte des Bodens
lF:	lange Fruchtfolge
N0:	Variante ohne mineralische Stickstoffdüngung
N1:	Variante mit suboptimaler mineralischer Stickstoffdüngung
N2:	Variante mit optimaler mineralischer Stickstoffdüngung
N3:	Variante mit hyperoptimaler mineralischer Stickstoffdüngung
N-fix:	konstantes N-Düngungssystem
NO <sub>3</sub> -N:	Nitratstickstoff
N-rot:	rotierendes N-Düngungssystem
qCO <sub>2</sub> :	metabolischer Quotient (Verhältnis von CO <sub>2</sub> -C-Freisetzungsrate zum mikrobiell gebundenen Kohlenstoff C <sub>mik</sub> )
TM:	Trockenmasse
TPF:	Triphenyltetrazoliumformazan
TS:	Trockensubstanz
TTC:	Triphenyltetrazoliumchlorid
VK:	Variationskoeffizient
WG:	Wassergehalt
WHK:	Wasserhaltekapazität eines gesiebten Bodens

## Kurzfassung

Mit der Entkopplung von Ackerbau und Viehzucht, mit kurzen Fruchtfolgen und hoher Mineraldüngung sowie mit intensiv-lockernder Bodenbearbeitung können moderne Bewirtschaftungssysteme das Bodenleben und die nachhaltige Bodenfruchtbarkeit gefährden. Im Hinblick auf die Gefährdung des Bodens durch Verdichtung, Erosion und Humusschwund wurde der Einfluß von zwei Bodennutzungssystemen mit unterschiedlicher Bearbeitungsintensität, Fruchtfolge und Düngung auf Bodeneigenschaften und Ertragsgeschehen untersucht. Dazu diente ein im Jahr 1981 im Leinetal bei Göttingen angelegter Dauerversuch auf Parabraunerde aus Löß. In den Jahren 1995 bis 1997 wurden physikalische, chemische und biologische Bodenkennwerte gemessen. Ertragsdaten standen seit Versuchsbeginn zur Verfügung.

Im Bodennutzungssystem mit reduzierter Bearbeitungsintensität, mit Stallmist- und Jauchedüngung und abwechslungsreicher, vergleichsweise langer Fruchtfolge (**IF**) unter Einschluß von Leguminosen war die Regenwurmbiomasse um durchschnittlich  $30 \text{ g m}^{-2}$  größer als im System mit regelmäßig tiefer Pflugarbeit, auf dem Feld verbleibenden Ernteresten und kurzer Fruchtfolge (**kF**) mit Marktfrüchten. Die Gesamtmenge an mikrobiell gebundenem Kohlenstoff in der Ackerkrume unterschied sich im Mittel über alle Feldfrüchte nicht zwischen den Systemen und betrug etwa  $1000 \text{ kg ha}^{-1}$ . Im Verlauf der 15 Versuchsjahre blieb durch Feldfutterbau und organische Düngung bei gleichzeitig reduzierter Bearbeitungsintensität die Menge an organisch gebundenem Kohlenstoff und Gesamtstickstoff im Mittel über alle Früchte in Höhe von  $48,5$  bzw.  $5,7 \text{ t ha}^{-1}$  in der Ackerkrume von IF erhalten. In der kF hingegen verringerten sich die entsprechenden Mengen um etwa  $4$  bzw.  $0,4 \text{ t ha}^{-1}$ . Als Folge intensiver Bodenlockerung und Einmischung der Erntereste war die im Felde gemessene durchschnittliche  $\text{CO}_2$ -Freisetzung in der kF um  $0,17 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  höher als in der IF. Die Systemwirkungen auf die Gefügekennwerte Lagerungsdichte und Eindringwiderstand waren gering und sich anbahnende günstige Gefügeentwicklungen in der IF wurden durch den periodischen Pflugeinsatz aufgehoben.

Die Ertragshöhe und die Ertragsstabilität waren in beiden Bodennutzungssystemen von der Höhe der mineralischen Stickstoffdüngung und von direkten Vorfruchteffekten geprägt. Bei unterlassener und "suboptimaler" mineralischer Stickstoffdüngung entwickelte sich das durch das Bodennutzungssystem beeinflusste Ertragsniveau über die Versuchsjahre zugunsten der IF. Diese Ertragsentwicklung weist gegenüber der kF auf eine mit der Zeit steigende Bodenfruchtbarkeit hin. Bei Verzicht auf mineralische Stickstoffdüngung, z. B. bei ökologischer Wirtschaftsweise, wird deshalb der Gestaltung des Bodennutzungssystems eine größere Bedeutung zukommen als in konventionell geführten Betrieben.

Wie alles sich zum Ganzen webt,  
Eins in dem andern wirkt und lebt!

(J. W. v. Goethe: Faust, der Tragödie erster Teil)

## 1 Einleitung

Ziel der Pflanzenproduktion ist die Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln sowie von Industrierohstoffen. Grundlage dieser Produktion ist der Boden, wobei eine schonende Bodennutzung die Aufgaben des Landbaus auch zukünftig sicherstellen muß. Die Gestaltung bodenschonender und umweltverträglicher Bodennutzungssysteme soll ermöglichen, einen Standort nachhaltig, daß heißt in Gegenwart und Zukunft, ohne Beeinträchtigungen der Bodenfruchtbarkeit nutzen zu können.

Die intensive Landwirtschaft, wie sie sich in den letzten Jahrzehnten entwickelte, zeichnet sich durch eine fortgeschrittene Entkopplung von Ackerbau und Viehzucht, durch kurze Fruchtfolgen mit ausschließlicher Mineraldüngerzufuhr und durch intensiv-lockernde Bodenbearbeitung aus. Diese Form der landwirtschaftlichen Nutzung führte u. a. dazu, daß die Gefährdung des Bodens durch Verdichtung, Erosion, Oberflächenverschlammung und Humusschwund zugenommen hat (EHLERS & CLAUPEIN 1994).

Neben der unmittelbaren Gefährdung des Bodens gibt es Hinweise dafür, daß die wenig bodenschonende Wirtschaftsweise eine Gefahr für die Fruchtbarkeit des Bodens darstellt (EHLERS 1991). Für eine nachhaltige Pflanzenproduktion ist die Bodenfruchtbarkeit von entscheidener Bedeutung. Unter Bodenfruchtbarkeit wird die natürliche und nachhaltige Fähigkeit des Bodens verstanden, den Pflanzen als Standort zu dienen und langjährig Pflanzenerträge von hoher Qualität zu erzeugen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1992, GISI et al. 1997). Bodenfruchtbarkeit beschreibt somit den Wirkungsanteil des Bodens an der Ertragsfähigkeit eines Standorts (KUNDLER 1989). Dabei können Bewirtschaftungsmaßnahmen langfristig zu einer Veränderung der Bodenfruchtbarkeit führen (BAEUMER 1992).

Der eher unauffällige Verlust des Bodens an fruchtbarkeitsbestimmenden Eigenschaften ist monokausal nicht zu erfassen. Vielmehr muß das komplexe Zusammenspiel zwischen Merkmalen der Bodenchemie, -physik und -biologie betrachtet werden.

Die chemischen, biologischen und physikalischen Eigenschaften des Bodens werden durch die Gesamtheit aller acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen sowie die Standort-

verhältnisse bestimmt. BAEUMER (1990) faßt alle Eingriffe des Landwirts im Rahmen der Pflanzenproduktion unter dem Begriff "Bodennutzungssystem" zusammen.

Die Nachhaltigkeit bestimmter Bodennutzungssysteme wird vor allem durch den Nährstoffgehalt, das Nährstoffnachlieferungsvermögen und durch gefügeabhängige Eigenschaften und Prozesse des Bodens beeinflusst. Mit zunehmendem Einsatz schwerer Maschinen haben Bodenverdichtungen und damit negative Auswirkungen eines geschädigten Bodengefüges auf das Pflanzenwachstum zugenommen. Ein verdichtetes Bodengefüge vermindert die Wasser- und Luftführung sowie die Durchwurzelung des Bodens. Folgen einer solchen Gefügeschädigung sind oftmals Ertragseinbußen (OUSSIBLE et al. 1992).

Neben Gefügemerkmalen werden Bodeneigenschaften maßgeblich von der organischen Bodensubstanz geprägt. Unter landwirtschaftlicher Nutzung hängt der Gehalt an organischer Bodensubstanz sehr stark von der Fruchtfolgegestaltung, der Düngung und der Bodenbearbeitung ab (SAUERBECK 1992, KÖRSCHENS 1997). Allerdings sind Veränderungen des organischen Substanzgehaltes durch Bewirtschaftungsmaßnahmen nur in engen Grenzen möglich (SAUERBECK 1992, KÖRSCHENS 1997). Die organische Bodensubstanz ist zugleich Nahrungsgrundlage des Edaphons und somit eng mit der biologischen Aktivität des Bodens verbunden.

Wesentliche Prozesse des Stoffkreislaufs sind abhängig von der mikrobiellen Biomasse des Bodens (Pilze, Bakterien, Algen und Protozoen) und ihrer Aktivität. Durch den mikrobiellen Abbau der leicht umsetzbaren organischen Substanz werden z. B. Pflanzennährstoffe in den Stoffkreislauf zurückgeführt. Darüber hinaus entstehen durch den mikrobiellen Abbau Umsetzungs- und Stoffwechselprodukte, welche durch Sorption an Mineralbodenbestandteile längerfristig auf die bodenphysikalischen Eigenschaften des Standortes wirken. Die mikrobielle Biomasse reagiert auf veränderte Umwelt- und Bewirtschaftungsbedingungen empfindlicher und schneller als die gesamte organische Bodensubstanz. Nach JÖRGENSEN (1995) ist die mikrobielle Biomasse ein wichtiger Indikator für die Bodenfruchtbarkeit. Um eventuelle Beeinträchtigungen der mikrobiologischen Komponente der Bodenfruchtbarkeit erkennen zu können, ist ein vertieftes Verständnis der Auswirkungen einzelner Bodennutzungssysteme auf die mikrobielle Biomasse des Bodens erforderlich.

Neben der mikrobiellen Biomasse beeinflussen die Lumbriciden durch ihre Größe und ihre Grabeaktivität den Boden und seine Eigenschaften. DARWIN (1881) erkannte als einer der ersten ihre Bedeutung für den Abbau des Bestandsabfalls und für die Verbesserung der Bodenstruktur. Die Regenwürmer tragen mit ihren Umsatzleistungen entscheidend zur Bodenfruchtbarkeit bei (BAUCHHENß 1983). In Untersuchungen wurde die positive Wirkung von Regenwürmern auf den Abbau der organischen Substanz sowie auf die Bodenstruktur gezeigt (BAUCHHENß 1983, JENSEN 1985, STOCKFISCH 1997, FRANCIS et al. 1998). Regenwürmer bewirken eine Bodendurchmischung und schaffen kontinuierliche, vertikal ausgerichtete Bioporen. Diese fördern den Gasaustausch im Boden und erhöhen die Wasserleitfähigkeit und Wasserinfiltration (EHLERS 1975, LEE 1985). Damit trägt der Regenwurm zur Stabilisierung und nachhaltigen Produktivität landwirtschaftlich genutzter Ökosysteme bei.

Aus den vorangestellten Ausführungen wird die zentrale Bedeutung bodenbiologischer, -chemischer und -physikalischer Eigenschaften für die Bodenfruchtbarkeit und der von ihr abhängigen Ertragshöhe und -stabilität deutlich. Durch die Wahl des Bodennutzungssystems können fruchtbarkeitsfördernde Bodeneigenschaften gezielt gesteuert werden. Allerdings lassen sich nicht alle Wirkungen von Bewirtschaftungsmaßnahmen in kurzfristigen Feldversuchen erfassen, da sich nach Bewirtschaftungsänderungen neu entstehende Fließgleichgewichte nur in langjährigen Dauerfeldversuchen entwickeln können (CLAUPEIN 1994).

Deshalb soll auf der Grundlage des seit 1981 bestehenden Ackerbau-Systemversuchs Reinshof bei Göttingen auf Parabraunerde aus Löß ein Vergleich unterschiedlicher Bodennutzungssysteme erfolgen. Bewertet werden soll der kombinierte Einfluß von Fruchtfolge, Bodenbearbeitung und organischer Düngung auf Kennwerte der Bodenfruchtbarkeit. Untersucht wurden physikalische, chemische und biologische Bodenkennwerte. Da alle betrachteten Kennwerte direkt oder indirekt Bodenfruchtbarkeit und Pflanzenwachstum beeinflussen können, wurde der Pflanzenertrag und die Ertragsstabilität über die Zeit analysiert. Abschließend soll der Versuch unternommen werden, Zusammenhänge zwischen Ertragsentwicklung und Bodeneigenschaften abzuleiten.

Der Feldversuch wurde genutzt, um folgende Hypothesen zu prüfen:

- \* Das Bodennutzungssystem mit sechs Feldfrüchten unter Einschluß von Feldfutterbau, Stallmist- und Jauchedüngung und vermehrter Bodenruhe (im folgenden lange Fruchtfolge **IF** genannt) besitzt eine höhere Reproduktion der organischen Substanz als das System mit drei Marktfrüchten und jährlich tief-wendender Bodenbearbeitung (im folgenden kurze Fruchtfolge **kF** genannt).
- \* In der IF wird das Bodenleben gefördert.
- \* Krumbasisverdichtungen werden nach periodischen Pflugverzicht im Verlauf der IF aufgelockert.
- \* Langfristige indirekte Fruchtfolgewirkungen werden durch kurzfristige direkte Fruchtfolgewirkungen überlagert.
- \* Die IF zeichnet sich bei den geprüften Feldfrüchten gegenüber der kF durch eine höhere Ertragsstabilität aus.

Zur Beantwortung der Hypothesen wurden im Ackerbau-Systemversuch jeweils im Frühjahr die Regenwurmaktivität, die Besatzdichte an Regenwurmgängen und die Fläche der Gänge bestimmt. Zur Charakterisierung der Bodenmikroflora wurde die Menge und Aktivität der mikrobiellen Biomasse zu ausgewählten Zeitpunkten während und nach der Vegetationsperiode erfaßt.

Als bodenphysikalische Kenngrößen wurden die Lagerungsdichte und der Eindringwiderstand gemessen. Zur Charakterisierung der organischen Bodensubstanz diente der organisch-gebundene Kohlenstoff und Gesamtstickstoff.

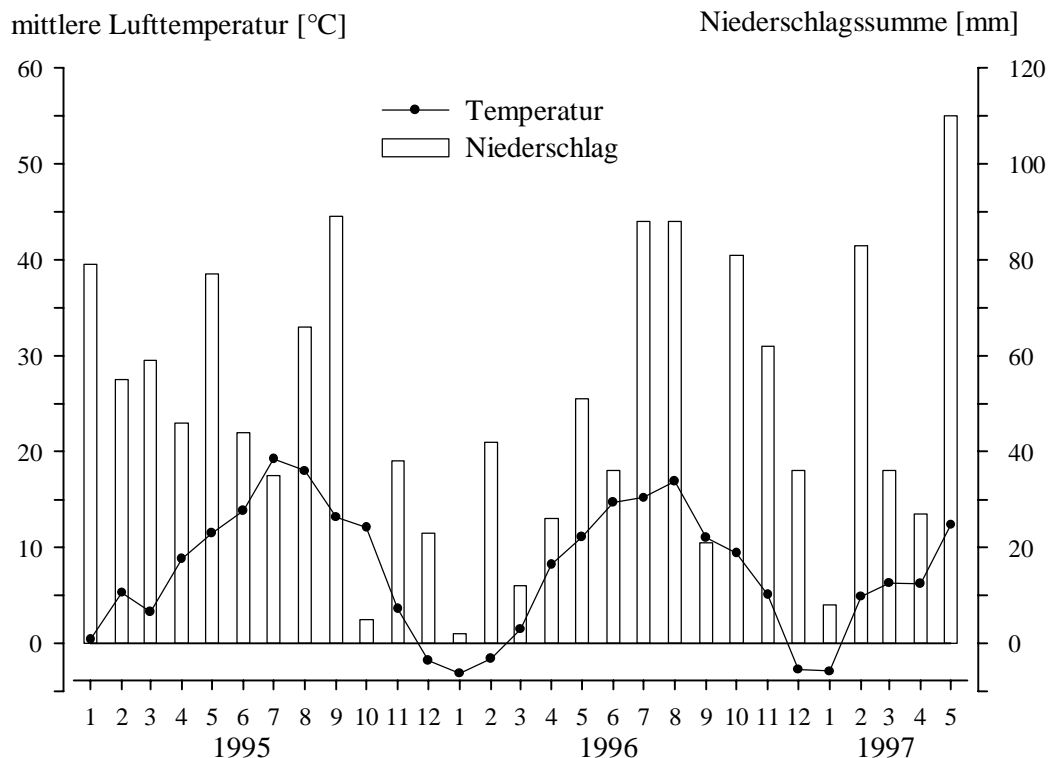
Für die Beschreibung der Ertragsstabilität der Bodennutzungssysteme wurden Ertragsdaten seit Versuchsbeginn im Jahre 1981 herangezogen.

## 2 Untersuchungsstandort und Versuchsanlage

### 2.1 Standortbeschreibung

Die Versuchsfläche liegt ca. 7 km südlich von Göttingen im Leinetalgraben, 160-164 m über NN. Der Bodentyp wurde als degradierte Schwarzerde und im höher gelegenen, südlichen Bereich als Parabraunerde mit Schwarzerde-Vergangenheit angesprochen (*BORNSCHEUER* 1984). Im Mittel lag die Korngrößenzusammensetzung in der Ackerkrume bei 11,3 % Sand, 70,9 % Schluff und 17,8 % Ton. Die Lößauflage besitzt eine Mächtigkeit von 70 bis über 170 cm (*BORNSCHEUER* 1984). Nach der Reichsbodenschätzung handelt es sich um einen Lehm-boden der Zustandsstufe 3, entstanden aus Löß mit der Bodenzahl 78 und der Ackerzahl 81 (L3 Lö 78/81).

Die langjährige Jahresniederschlagssumme beträgt in Göttingen durchschnittlich 645 mm, die langjährige Jahresdurchschnittstemperatur 8,7 °C (langjähriges Mittel 1961-1990, DEUTSCHER WETTERDIENST 1995-1997). Im Versuchsjahr 1995 entsprachen die Niederschlagssumme mit 616 mm und die durchschnittliche Jahrestemperatur mit 9,0 °C in etwa dem langjährigem



**Abb. 1:** Monatsmitteltemperaturen und Niederschläge (Monatssummen) während des Versuchszeitraumes 1995 bis 1997 (Deutscher Wetterdienst, Wetterstation Göttingen)

Mittel. Das Jahr 1996 war mit Niederschlägen von insgesamt 545 mm und einer Jahresdurchschnittstemperatur von 7,2 °C deutlich trockener und kühler als das langjährige Mittel.

## 2.2 Versuchsanlage

Der Ackerbau-Systemversuch wurde 1981 auf einer Fläche des Universitätsversuchsgutes Reinshof angelegt, um unter gleichen Standortbedingungen Auswirkungen unterschiedlicher Ackerbausysteme langfristig vergleichen zu können. Dabei wurden die Faktoren Bodennutzungssystem, Pflanzenschutzmitteleinsatz (mit und ohne chemischen Pflanzenschutz), Stickstoffdüngungsverfahren sowie die Höhe der mineralischen Stickstoffdüngung variiert. Beim Stickstoffdüngungsverfahren wurde die in der Höhe variierte N-Düngung entweder jährlich auf derselben Fläche ausgebracht (N-fix) oder es wurde die N-Düngung nur im Untersuchungsjahr variiert und in den beiden Jahren dazwischen auf mittlerem Niveau gehalten (N-rot).

Aus diesem komplexen Versuch wurde der Faktor Bodennutzungssystem in der Variante mit chemischem Pflanzenschutz ausgewählt, um die Wirkungen langjähriger unterschiedlicher Bodennutzungssysteme auf bodenbiologische, -chemische und -physikalische Kennwerte und auf den Pflanzenertrag zu untersuchen. Die zwei Bodennutzungssysteme unterscheiden sich in komplexen, durch verschiedene Anbaubedingungen charakterisierte, unveränderliche Faktorkombinationen, die sich aus Fruchtfolge, Bodenbearbeitungsintensität und organische Düngung zusammensetzen (Tab. 1).

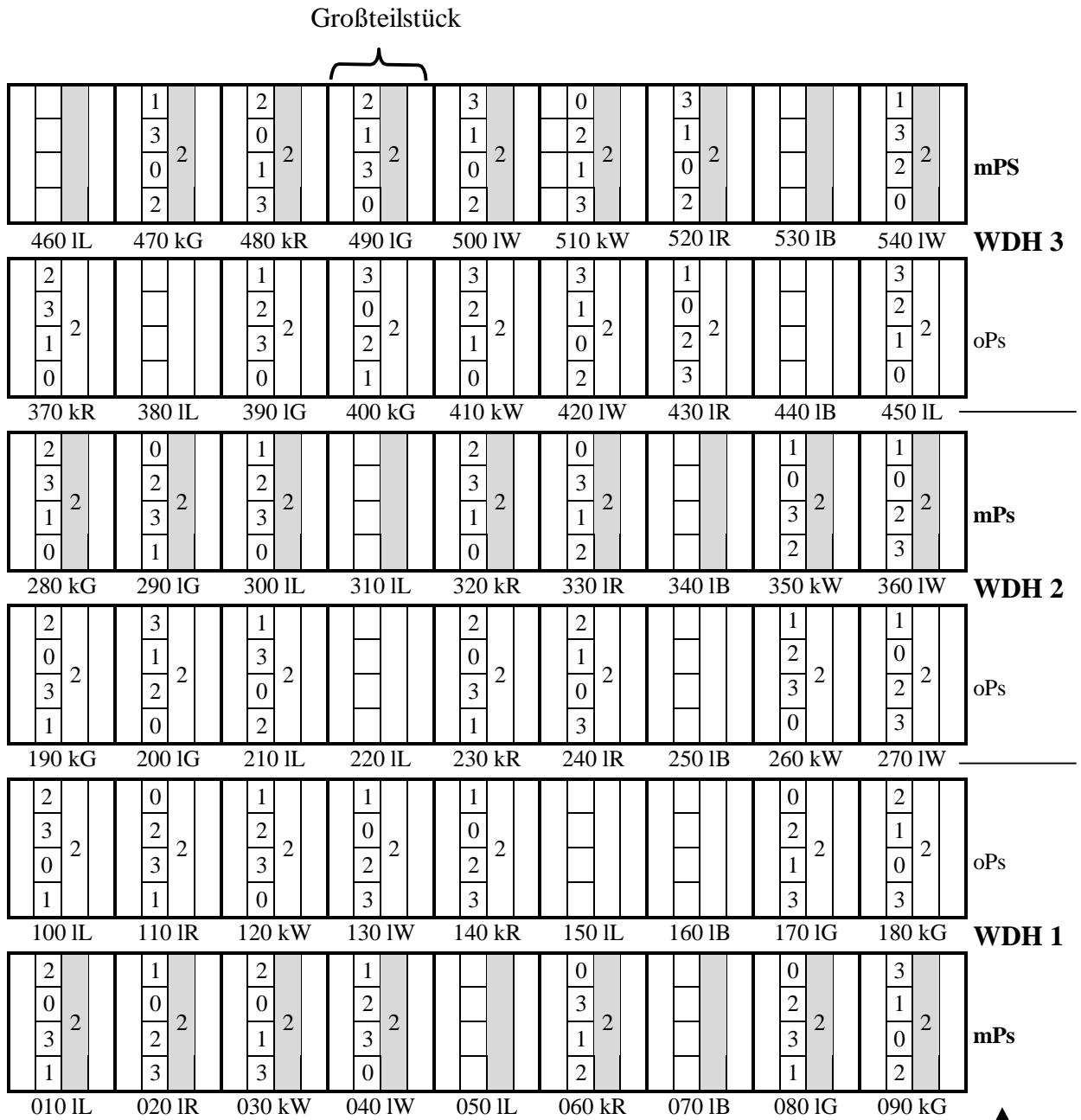
Verglichen wird ein System mit einer dreifeldrigen Fruchtfolge (Zuckerrübe - Winterweizen - Wintergerste) und regelmäßig tiefer Pflugarbeit bis 30 cm mit einem anderen System, welches durch eine sechsfeldrige Fruchtfolge mit flach-mulchender (5-8 cm) bis mitteltiefer Bodenbearbeitung (25 cm) gekennzeichnet ist. In der sechsfeldrigen Fruchtfolge werden außer den drei Marktfrüchten Zuckerrübe - Winterweizen - Wintergerste die Feldfrüchte Luzerne, Silomais und Ackerbohne angebaut. Die organische Düngung beschränkt sich in der dreifeldrigen Fruchtfolge auf Erntereste, welche auf dem Feld verbleiben und auf Wicken Gründüngung. In der sechsfeldrigen Fruchtfolge werden durch die Viehhaltung Rübenblatt, Weizenstroh, Luzerneaufwuchs, Silomais und Ackerbohnenkorn im Stall verwertet und dafür Stallmist und Jauche zurückgeführt. Im folgenden wird das Bodennutzungssystem mit dreifeldriger Fruchtfolge und entsprechender Bewirtschaftung als **kurze Fruchtfolge (= kF)**, das System mit sechsfeldriger Fruchtfolge und kontrastierender Bewirtschaftung als **lange Fruchtfolge (= lF)** bezeichnet (Tab. 1).



**Tab. 1:** Merkmale der beiden Bodennutzungssysteme, die sich in der organischen Düngung sowie der Art und Tiefe der Bodenbearbeitung unterscheiden. Die Abkürzung IF steht für lange Fruchtfolge, kF für kurze Fruchtfolge, BNS für Bodennutzungssystem

BNS	Kulturart	organische Düngung	Bodenbearbeitung (Tiefe in cm)	Zeitpunkt der Bearbeitung
	Zuckerrübe ( <i>Beta vulgaris</i> L.)	Rübenblatt	Pflug (25)	Oktober
<b>kF</b>	Winterweizen ( <i>Triticum aestivum</i> L.)	Weizenstroh	Pflug (20)	September
	Wintergerste ( <i>Hordeum vulgare</i> L.)	Gerstenstroh + Wickengründung ( <i>Vicia sativa</i> L.)	Pflug (30)	November
	Zuckerrübe ( <i>Beta vulgaris</i> L.)		Grubber (8)	Oktober
	Winterweizen ( <i>Triticum aestivum</i> L.)	Stallmist (330 dt ha <sup>-1</sup> ) auf Stoppeln	Pflug (20)	September
<b>IF</b>	Wintergerste ( <i>Hordeum vulgare</i> L.)	Gerstenstroh	Pflug (25)	Juli
	Luzerne ( <i>Medicago sativa</i> L.)	Stallmist (330 dt ha <sup>-1</sup> ) auf Stoppeln im Herbst; Jauche (36 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ) zu Silomais im Frühjahr	Fräse (8)	Oktober + April
	Mais ( <i>Zea mays</i> L.)		Fräse (5)	November
	Ackerbohne ( <i>Vicia faba</i> L.)	Bohnenstroh	Pflug (15)	November

Der Versuch war in drei Wiederholungen mit und ohne chemischen Pflanzenschutz angelegt worden, wobei jede Kulturart der beiden Fruchtfolgen (sechs in IF und drei in kF) in jedem Versuchsjahr in jeder der drei Feldwiederholungen angebaut wird (Abb. 2). Innerhalb jeder Feldwiederholung sind die neun Feldfrüchte in jeweils einem Großteilstück vertreten. (Abb. 2). Jedes Großteilstück ist in vier Nord-Süd-Streifen unterteilt, von denen zwei in jedem Jahr als Kleinteilstücke des N-Fix- und N-rot-Düngungssystems dienen. Seit Versuchsbeginn 1981 wird der mittlere westliche Streifen eines jeden Großteilstücks in vier Kleinstücke unterteilt, die mit gestaffelten N-Gaben (Tab. 2) gedüngt werden. Die zu Versuchsbeginn festgelegten N-Stufen verbleiben als fixierte (N-fix) N0-, N1-, N2- und N3-Parzellen permanent an der gleichen Stelle (Abb. 2 und 3). Die mittleren östlichen Streifen eines jeden Großteilstücks



Fruchtfolgen:

- k = kurze Fruchtfolge ohne Viehhaltung
- R = Zuckerrübe
- W = Winterweizen
- G = Wintergerste
- l = lange Fruchtfolge mit Viehhaltung
- R = Zuckerrübe      L = Luzerne
- W = Winterweizen    M = Silomais
- G = Wintergerste    B = Ackerbohne

Pflanzenschutz:

- mPs: mit betriebsüblichem prophylaktischem Pflanzenschutz
- oPs: ohne chemischen Pflanzenschutz; mechanische Unkrautbekämpfung

N-Düngungsstufen:

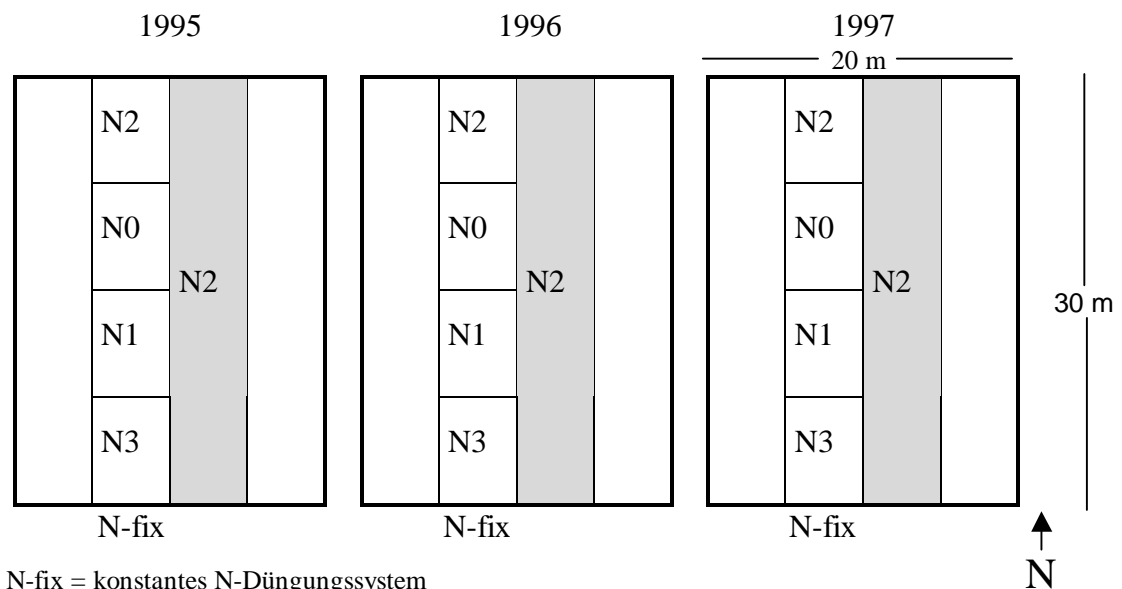
- 0 = N0; 1 = N1; 2 = N2; 3 = N3

WDH = Wiederholung; dreistellige Zahlen stehen für Großteilstück-Nummern  
Die ausgewählten Parzellen für die Bodenuntersuchungen sind grau schattiert

**Abb. 2:** Versuchsplan des Ackerbau-Systemversuches im Versuchsjahr 1995

wurden bis 1994 entsprechend dem rotierenden N-Düngungssystem (N-rot) gedüngt. Im rotierenden System wurde eine kumulative Wirkung der N-Düngung vermieden. In Abänderung der ursprünglichen Versuchsplanung wird dieser Parzellenstreifen seit 1995 mit einer einheitlichen N<sub>2</sub>-Gabe versorgt (Abb. 2 und 3). Eine ausführliche Beschreibung des Düngungssystems ist bei Clement (1991) zu finden. Die Leguminosen Luzerne und Ackerbohne erhalten keine mineralische N-Düngung.

Die Auswirkungen des Bodennutzungssystems auf bodenbiologische, -chemische und -physikalische Kennwerte wurde auf Probeflächen mit mittlerer Stickstoffversorgung (N<sub>2</sub>) untersucht, die in Tab. 2 als optimal gekennzeichnet werden. Eine intensive Beprobung der N<sub>2</sub>-Parzellen des N-fix-Düngungssystems verbot sich wegen der Flächenzerstörung. Für zukünftige Ertragsanalysen und andere Untersuchungen sollten die relativ kleinen N-fix-Parzellen erhalten bleiben. Aus diesem Grund wurden alle Bodenproben in den seit 1995 "fixierten" N<sub>2</sub>-Parzellenstreifen östlich der N-fix-Parzellen entnommen. Die N<sub>2</sub>-Parzellenstreifen sind in Abb. 2 und 3 grau schattiert.



**Abb. 3:** Verteilung der einzelnen N-Stufen (N<sub>0</sub>, N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub>) in einem Fruchtfolge-Großteilstück in den Jahren 1995 bis 1997; die ausgewählten Parzellen für die Bodenuntersuchungen sind grau schattiert

Für die Arbeit wurden Ertragsdaten der Feldfrüchte Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste aus den Jahren 1982 bis 1996 herangezogen. Diese Ertragsdaten stammen von den N-fix-Parzellen (N<sub>0</sub>, N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub> und N<sub>3</sub>). Um die langfristigen Auswirkungen der Bodennutzungssysteme auf ertragsbestimmende Bodeneigenschaften in den Vordergrund der

Untersuchungen zu stellen, wurden ausschließlich die Ertragsdaten der Faktorstufe mit chemischem Pflanzenschutz betrachtet. Ein möglicher Einfluß von Pflanzenkrankheiten, Schädlingen und Unkräutern auf die Erträge sollte auf diese Weise ausgeschlossen werden.

**Tab. 2:** Versuchsfaktoren und Faktorstufen des Ackerbau-Systemversuchs Reinshof; fett gedruckt sind die Faktorstufen, die für die bodenbiologischen, -chemischen und -physikalischen Untersuchungen herangezogen wurden. Die Ertragsdaten wurden auf den N-fix-Parzellen (N0, N1, N2 und N3) erhoben

1. Faktor:	Bodennutzungssystem mit der komplexen Faktorkombination Fruchtfolge, Bodenbearbeitungsintensität und organische Düngung						
kF	<b>dreifeldrige Fruchtfolge ohne Viehhaltung (Zuckerrübe - Winterweizen - Wintergerste), Erntereste verbleiben auf dem Feld, intensiv-wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug</b>						
	<b>sechsfeldrige Fruchtfolge (Zuckerrübe - Winterweizen - Wintergerste - Luzerne - Silomais - Ackerbohne), Verwertung der Ernterückstände (Rübenblatt, Weizenstroh) durch Viehhaltung, organische Düngung in Form von Stallmist und Jauche, reduzierte Bodenbearbeitungsintensität</b>						
2. Faktor:	Pflanzenschutz						
	<b>mit chemischem Pflanzenschutz zur vorbeugenden Bekämpfung</b>						
	ohne chemischem Pflanzenschutz, ausschließlich mechanische Unkrautbekämpfung						
3. Faktor:	Stickstoffdüngungsverfahren						
	kumulative Effekte der N-Düngung (N-fix)						
	<b>einjährige Differenzierung der Stickstoffdüngung (N-rot) bis 1995</b>						
4. Faktor:	Höhe der mineralischen N-Düngung (kg N / ha)						
	N-Stufe	Zuckerrübe	W-Weizen	W-Gerste	Luzerne	Mais	Ackerbohne
	N0	0	0	0	0	0	0
	N1	70 (30)*	60	60	0	40	0
	<b>N2</b>	<b>140 (100)*</b>	<b>120</b>	<b>120</b>	<b>0</b>	<b>80</b>	<b>0</b>
	N3	210 (170)*	180	180	0	120	0

N0 = ohne, N1 = suboptimal, N2 = optimal, N3 = hyperoptimal

\*seit 1988 ist die Düngung zu Zuckerrübe um jeweils 40 kg N ha<sup>-1</sup> verringert.

Ausgewählte Sorten im Ackerbau-Systemversuch Reinshof:

Zuckerrübe: "Novadima" (1982-1993), "Adonis" (1994-1996)

Winterweizen: "Granada" (1982-1987), "Herzog" (1988-1996)

Wintergerste: "Mammut" (1982-1996)

Luzerne: "Europe" (1982-1996)

Silomais: "Forla" (1982-1988), "Consul" (1989-1996)

Ackerbohne: "Minica" (1982-1996)

### 3 Methoden

#### 3.1 Untersuchungsprogramm

Alle Untersuchungen erfolgten unter den neun Feldfrüchten (sechs in IF und drei in kF) in allen drei Wiederholungen. Die Entnahme der Stechzylinderproben und die Bestimmung der Bodenatmung wurden wegen des hohen Arbeitsaufwands auf die erste Feldwiederholung im Süden des Versuchsfeldes (Großteilstücke 010 bis 090; Abb. 2) beschränkt.

Die Bodenproben für alle mikrobiologischen und bodenchemischen Untersuchungen wurden mit dem Pürkhauer-Bohrstock bis in eine Tiefe von 50 cm entnommen. Dabei wurde aus 12 Einstichen pro Parzellenstreifen eine Mischprobe je Entnahmetiefe hergestellt. Zu Anfang der Untersuchungen wurden vier Tiefenstufen gewählt: 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm und 30-50 cm. Die Entnahme von drei gestaffelten 10 cm-Schichten aus der 30 cm Krume sollte ermöglichen, die Tiefenverteilung verschiedener Kennwerte in Abhängigkeit von der Bodenbearbeitungsintensität möglichst genau zu erfassen. Bei späteren Probeterminen wurde auf Grund der sehr geringen biologischen Aktivität unterhalb der Ackerkrume auf die Tiefenstufe 30-50 cm verzichtet. Nach der Entnahme wurde der Boden im feldfeuchten Zustand auf 2 mm gesiebt. Für die mikrobiologischen Untersuchungen wurden die Proben bis zur Analyse bei 4 °C maximal 7 Tage gelagert. Die Bestimmung des Gesamtkohlenstoff-Gehaltes ( $C_t$ ) und des Gesamtstickstoff-Gehaltes ( $N_t$ ) erfolgte am luftgetrockneten Boden.

Bodenproben zur Bestimmung der mikrobiellen Biomasse und der Dehydrogenaseaktivität (DHA) wurden zu Zeiten entnommen, in denen eine ausgeprägte Dynamik der Kennwerte erwartet werden konnte. Daher wurden Zeitspannen mit hoher biologischer Aktivität (Herbst und Frühjahr) und Termine unmittelbar vor bzw. nach Bodenbearbeitungsmaßnahmen zur Probenentnahme gewählt. Proben zur Bestimmung der mikrobiellen Biomasse und der DHA wurden zu den Terminen 19.06.95, 31.07.95, 16.08.95, 06.09.95, 28.09.95, 12.10.95, 19.10.95, 14.11.95, 25.03.96, 25.04.96, 30.05.96, 18.07.96, 02.09.96, 05.09.96, 23.09.96, 11.10.96 und 15.10.96 gezogen. Gleichzeitig zu den Entnahmetermenen des Jahres 1996 wurde die Bodenatmung im Feld (in der ersten Feldwiederholung) bestimmt. Darüberhinaus wurde die Bodenatmung 1996 zu folgenden Terminen gemessen: 17.06.96, 19.08.96 und 23.10.96. Im Untersuchungsjahr 1997 wurde die  $CO_2$ -

Freisetzung von März bis November monatlich erfaßt. Gleichzeitig mit der Bodenatmung wurde die Bodentemperatur in 5 cm Tiefe gemessen. Die CO<sub>2</sub>-Entbindungsrate wurde an allen Probeterminen zwischen 13.00 und 15.00 Uhr ermittelt. Dabei wurde die Bodenatmung jeweils unter einer Feldfrucht (Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste) direkt nacheinander in beiden Fruchtfolgen bestimmt. Damit sollte der Zeiteinfluß auf die Bodenatmung minimiert und eine bessere Vergleichbarkeit der Bodenatmungsraten in beiden Systemen gewährleistet werden.

Zu allen Probenentnahmen für bodenbiologische Untersuchungen wurden parallel die Bodenwassergehalte in 10 cm-Schichten bis in 50 cm Tiefe in dreifacher Wiederholung pro Parzelle ermittelt.

Die Regenwurmaktivität wurde im späten Frühjahr 1995 und 1996 bestimmt. Die Wahl des Termins sollte eine hohe Regenwurmaktivität gewährleisten. Zusätzlich wurden 1995 die Bioporen (> 2 mm) in den Bodentiefen 5, 10, 20 und 35 cm ausgezählt.

Die Entnahme der Stechzylinderproben zur Bestimmung der Lagerungsdichte (LD) und anderer Kenngrößen erfolgte im April 1996 tiefendifferenziert (5-10 cm, 22-27 cm, 32-37 cm und 42-47 cm) in sechsfacher Wiederholung pro Tiefe mit Stechzylindern von 4 cm Höhe und 100 cm<sup>3</sup> Volumen. Zur Berechnung der Mengen an organisch-gebundenem Kohlenstoff, Gesamtstickstoff und mikrobieller Biomasse innerhalb der Krume wurde die Lagerungsdichte für die mittlere (10-20 cm) Schicht der Krume als Mittel der beiden beprobten Bodenschichten berechnet.

Im April 1995 und 1996 wurden die Bodenproben auf die Gehalte an Gesamtkohlenstoff (C<sub>t</sub>), anorganischem Kohlenstoff (C<sub>an</sub>) und Gesamtstickstoff (N<sub>t</sub>) untersucht. Die Proben zur Bestimmung der Gehalte an Kalium, Phosphor und Magnesium sowie des pH-Wertes wurden im April 1997 genommen.

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Methoden detailliert beschrieben.

### **3.2 Lagerungsdichte**

Zur Bestimmung der Lagerungsdichte (LD) wurden im April 1996 unter allen neun Feldfrüchten der ersten Versuchswiederholung ungestörte Bodenproben entnommen. Die Stechzylinderproben wurden bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, anschlie-

ßend gewogen und aus dem Netto-Gewicht die Lagerungsdichte mit Hilfe folgender Formel berechnet:

$$LD = \frac{TS}{V}$$

Dabei steht LD für Lagerungsdichte [ $\text{g cm}^{-3}$ ], TS für Trockensubstanz [g] des Bodens im Stechzylinder und V für das Stechzylindervolumen [ $\text{cm}^3$ ].

### 3.3 Gravimetrischer Wassergehalt und maximale Wasserhaltekapazität

Die Bodenwassergehalte der Feldbodenproben wurden gravimetrisch nach Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz ermittelt. Alle Angaben zum Wassergehalt (WG) beruhen auf der Trockensubstanz als 100%-Basis.

Als maximale Wasserhaltekapazität ( $\text{WHK}_{\text{max}}$ ) wird diejenige Wassermenge bezeichnet, die der Boden im gesiebten Zustand entgegen der Schwerkraft zu halten vermag. Die  $\text{WHK}_{\text{max}}$  wurde an gesiebttem (Maschenweite 2 mm), feldfrischem Boden bestimmt. Dazu wurde der Boden auf einen angefeuchteten Faltenfilter in einen Kunststofftrichter gegeben. Der Trichterhals wurde verschlossen und der Boden mit Wasser überstaut. Unter diesen Bedingungen konnte sich der Boden mit Wasser sättigen. Nach der Aufsättigung des Bodens wurde der Ablauf geöffnet und das überschüssige Wasser konnte abtropfen. Sobald keine Wasserabgabe mehr erfolgte, wurde der gravimetrische Wassergehalt der Proben bestimmt (entsprechend 100%  $\text{WHK}_{\text{max}}$ ) und daraus der WG für 60% WHK berechnet.

Zur Bestimmung der mikrobiellen Biomasse wurden die Bodenproben auf mindestens 60%  $\text{WHK}_{\text{max}}$  eingestellt, um die enzymatische Autolyse der Zellen zu gewährleisten (ROSS 1989). Wassergehalte oberhalb 60% maximaler Wasserhaltekapazität beeinflussen das Meßergebnis nicht (INUBUSHI et al. 1991).

### 3.4 Eindringwiderstand

Der Eindringwiderstand wurde im April 1996 und 1997 bei Feldkapazität mit einem elektronischen Penetrographen der Firma Eijkelkamp (PL.52 Penetrologger) bis in eine Bodentiefe von 75 cm bestimmt. Pro Parzellenstreifen wurden 16 Messungen durchgeführt. Die verwendete Kegelspitze besaß einen Winkel von 60 ° und eine Basisfläche

von 1 cm<sup>2</sup>. Die Eindringgeschwindigkeit wurde auf 8 cm s<sup>-1</sup> festgelegt. Zu allen Messungen wurde der Bodenwassergehalt bis in 80 cm Tiefe gravimetrisch bestimmt.

### 3.5 Kohlenstoff und Stickstoff im Boden

Für die Bestimmung von Gesamtkohlenstoff (C<sub>t</sub>), anorganischem, in Carbonaten enthaltenen Kohlenstoff (C<sub>an</sub>) und Gesamtstickstoff (N<sub>t</sub>) im Boden wurden im April 1995 und 1996 Proben gezogen. Zur Messung wurde der gesiebte (< 2 mm) Boden luftgetrocknet und feingemahlen. Die C<sub>t</sub>- und N<sub>t</sub>-Bestimmung erfolgte durch direkte Verbrennung bei ca. 1000 °C in einem CN-Analyser (CN Rapid der Fa. Heraeus). Der Anteil an C und N in den Verbrennungsgasen wurde mittels nachgeschaltetem Elementaranalysator gemessen. Der als Carbonat vorliegende Kohlenstoff (C<sub>an</sub>) wurde mit der Apparatur nach Scheibler (KNICKMANN 1955) bestimmt. Mit verdünnter Salzsäure wird CO<sub>2</sub> freigesetzt und volumetrisch gemessen. Der C<sub>org</sub>-Gehalt des Bodens wurde aus der Differenz zwischen C<sub>t</sub>- und C<sub>an</sub>-Gehalt berechnet. Zusätzlich wurde das C/N-Verhältnis ermittelt.

Die Gesamtmengen an C<sub>org</sub> und N<sub>t</sub> wurden aus den C<sub>org</sub>- und N<sub>t</sub>-Gehalten einzelner Tiefenabschnitte der Krume sowie der Lagerungsdichte und der Schichtdicke in der jeweils beprobten Bodentiefe berechnet.

### 3.6 Phosphor, Kalium und Magnesium im Boden sowie pH-Wert des Bodens

Die Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphors, Kaliums und Magnesiums sowie des pH-Wertes erfolgten am Institut für Agrikulturchemie der Universität Göttingen. Kalium und Magnesium wurden nach Extraktion mit CaCl<sub>2</sub> (0,0125 M), Phosphat nach Extraktion mit H<sub>2</sub>O bestimmt. Die Messung des pH-Wertes im Boden erfolgte elektrometrisch an einer Aufschwemmung lufttrockenen Bodens (10 g) in einer 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-Lösung (25 ml).

### 3.7 Regenwurmaktivität und Regenwurmporen

Die Regenwürmer wurden mit der Formalin-Methode (RAW 1959) im Frühjahr 1995 und 1996 aus dem Boden ausgetrieben. Mittels quadratischer Metallrahmen wurde eine Probe- fläche von 0,5 m<sup>2</sup> abgesteckt. Zum Austrieb wurden 10 l einer 0,1% (v/v) Formalinlösung in zwei Teilgaben von je 5 l auf die Beprobungsfläche gegossen. Vom ersten Aufguß an



wurden für 30 min. alle aus dem Boden kommenden Regenwürmer abgesammelt und bis zur Bestimmung in einem Gefäß mit Wasser aufbewahrt. Pro Parzellenstreifen wurden 4 Fänge durchgeführt. Noch am Fangtag wurde neben der Aktivitätsdichte das Artenspektrum, das Entwicklungsstadium (juvenil/adult) und das Lebendgewicht der Regenwürmer bestimmt. Anschließend wurden die Regenwürmer wieder ausgesetzt.

Parallel zur Ermittlung der Regenwurmaktivität wurde 1995 die Anzahl pro Flächeneinheit und der Durchmesser der Bioporen in vier Tiefen (0-5 cm, 10 cm, 20 cm und 35 cm) mit der Bruchflächenmethode nach WERNER (1995) unter den Früchten Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste bestimmt. Dazu wurde ein quadratischer Metallrahmen mit einer Kantenlänge von 10 cm und einer Höhe von 5 cm vertikal in den Boden geschlagen und anschließend herausgebrochen. An der Bruchfläche wurden die Regenwurm-poren der Größenklassen 2-3 mm, 3-5 mm und 5-8 mm ausgezählt. Die Zählung erfolgte in jeder Bodentiefe an einer Fläche von 0,1 m<sup>2</sup> (10 Einstiche). Der Anteil der Porenfläche an der Gesamtfläche wurde aus der Anzahl Poren und ihrem mittleren Durchmesser (2,5; 4 und 6,5 mm) berechnet.

### **3.8 Mikrobielle Biomasse ( $C_{\text{mik}}$ )**

Die Bestimmung der mikrobiellen Biomasse erfolgte unter Verwendung der von VANCE et al. (1987) entwickelten Chloroform-Fumigations-Extraktionsmethode (CFE). Im Gegensatz zur Chloroform-Fumigations-Inkubationsmethode nach JENKINSON & POWLSON (1976) erlaubt die CFE-Methode, organische N- und C-Verbindungen aus Mikroorganismen direkt im Extrakt zu messen. Ein weiterer Vorteil dieser Methode liegt darin, daß die Messung auch kurze Zeit nach Zufuhr frischer organischer Substanz erfolgen kann, ohne daß die frische organische Substanz das Meßergebnis beeinflusst (OCIO & BROOKES 1990, STOCKFISCH 1992, HARDEN et. al. 1993a). Dies ist für Untersuchungen während der Vegetationsperiode, in der dem Boden zwangsläufig frisches organisches Material über Wurzeln, Bestandesabfall oder Ernterückstände zugeführt wird, von großer Bedeutung.

Nach MUELLER et al. (1992) kann das Vorhandensein frischer, lebender Wurzeln im Boden auch bei der Anwendung der CFE-Methode dazu führen, daß der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt des Bodens überschätzt wird. Deshalb wurden die gesiebten Bodenproben vor der Chloro-

formierung für einige Tage bei 4 °C gelagert. Dadurch sollten im Boden vorhandene, noch lebende Feinwurzeln abgetötet werden.

Das Prinzip der CFE-Methode beruht darin, die Zellmembran der stoffwechselaktiven mikrobiellen Biomasse durch Chloroformbegasung zu lösen und durch fortlaufende enzymatische Prozesse soweit zu verändern, daß die in der Körpersubstanz fixierten Substanzen extrahierbar werden. Dadurch steigt der Anteil an extrahierbaren C-Verbindungen gegenüber der unbegasten Bezugsprobe (JENKINSON 1966). Dieser Anstieg ist proportional zum Gehalt des mikrobiellen Biomasse-Kohlenstoffs im Boden (VANCE et al. 1987).

Für die Untersuchungen wurden zwei Parallelproben feldfeuchten Bodens entsprechend 15 g Trockensubstanz (TS) in 100 ml Pulvergläser eingewogen. Der Wassergehalt in den Proben wurde unmittelbar vor der Inkubation auf mindestens 60%  $WHK_{max}$  eingestellt. Die Proben und ein Becherglas mit ca. 50 ml äthanolfreiem Chloroform wurden gemeinsam in einen mit feuchtem Papier ausgelegten Exsikkator gestellt. Der Exsikkator wurde so lange evakuiert, bis das Chloroform siedete. Im verschlossenen Exsikkator wurden die Proben dann für 24 h bei 25 °C im Dunkeln inkubiert. Danach wurde durch mehrmaliges Belüften und Evakuieren des Exsikkators das Chloroforms aus dem Boden vollständig entfernt. Im Anschluß wurden die Proben 30 min. lang mit 60 ml 0,5 M  $K_2SO_4$ -Lösung auf einem Rotationsschüttler bei 220 Upm extrahiert. Die Extraktion der nicht-chloroformierten Bezugsproben erfolgte am Tag der Fumigation in gleicher Weise. Danach wurden die Bodenextrakte filtriert (Schleicher & Schüll Papierfaltenfilter Nr. 595 1/2) und die Filtrate bis zur Analyse bei -20 °C gelagert.

Die Bestimmung des löslichen organischen Kohlenstoffs (D.O.C. = dissolved organic carbon) erfolgte photometrisch nach UV-Persulfat-Aufschluß in einem Continuous-Flow-Analysator (Perstorp Analytical Flow Solution 3).

Die  $C_{mik}$ -Gehalte der Proben errechnen sich aus der Differenz der D.O.C.-Gehalte in den  $K_2SO_4$ -Extrakten von fumigierten und unfumigierten Proben. Anschließend erfolgt eine Multiplikation mit dem von WU et al. (1990) ermittelten Proportionalitätsfaktor :

$$C_{mik} = (D.O.C. \text{ fumigierte Probe} - D.O.C. \text{ unfumigierte Probe}) * 2,22$$

Die Gesamtmengen an  $C_{\text{mik}}$  wurden aus den  $C_{\text{mik}}$ -Gehalten und den Lagerungsdichten der jeweiligen Bodenschichten bestimmt.

### **3.9 $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ - Verhältnis**

Das  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$  - Verhältnis ist der Quotient aus der mikrobiellen Biomasse ( $C_{\text{mik}}$ ) und dem  $C_{\text{org}}$ -Gehalt im Boden (ANDERSON & DOMSCH 1986). Angegeben wird das  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$  - Verhältnis als prozentualer Anteil des mikrobiell gebundenen Kohlenstoffs am Gesamtkohlenstoffgehalt des Bodens.

Nach JOERGENSEN (1995) ist der  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotient ein Indikator für die mikrobielle Verfügbarkeit des organischen Substrats. Danach bedeuten größere Quotienten eine höhere Verfügbarkeit der organischen Substanz für die Mikroorganismen. Der Quotient verdeutlicht, in welchem Ausmaß die Mikroorganismen den Bodenkohlenstoff zum Aufbau und zum Erhalt ihrer Biomasse nutzen können (ANDERSON & DOMSCH 1989). Böden unter Monokulturen und Schwarzbrachen weisen gegenüber Böden unter Fruchtfolgesystemen und Grünland ein geringeres  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis auf (JOERGENSEN 1995, ANDERSON & DOMSCH 1989, BECK 1989).

### **3.10 $\text{CO}_2$ -Freisetzung im Feld**

Die Bodenatmung wurde im Feld als  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates mit einem tragbaren Porometer der Firma PP-Systems (Hitchin, England) bestimmt. Eine Kurzzeitmessung vor Ort besitzt gegenüber anderen Methoden zur Bestimmung der biologischen Aktivität den großen Vorteil, daß die  $\text{CO}_2$ -Werte die aktuelle mikrobielle Aktivität im Feld widerspiegeln.

Das Porometer besteht aus einem  $\text{CO}_2$ -Meßgerät (CIRAS = Combined Infrared Gas Analysis System) und der Meßkammer (SRC-1 = Soil Respiration Chamber). Die Basisfläche der Meßkammer beträgt  $78,5 \text{ cm}^2$ , das Volumen  $1117 \text{ cm}^3$ . Für jede Messung wurde die Meßkammer etwa  $0,5 \text{ cm}$  tief in den Boden gepreßt und  $120 \text{ s}$  lang die  $\text{CO}_2$ -Anreicherung in der Kammer gegenüber der Außenluft ermittelt. Die Bodenatmungsrate wird über eine quadratische Gleichung nach Formeln von PARKINSON (1981) vom System berechnet und in  $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  angegeben. Pro Parzellenstreifen wurden 10 Messungen durchgeführt.

### 3.11 Metabolischer Quotient ( $q\text{CO}_2$ )

Der Quotient aus  $\text{CO}_2$ -Produktionsrate und mikrobieller Biomasse wird als metabolischer Quotient ( $q\text{CO}_2$ ) bezeichnet und ist ein Maß für die spezifische Aktivität der Mikroorganismen (ANDERSON & DOMSCH 1985). Nach KAISER (1992) ist der  $q\text{CO}_2$  eine Kenngröße für den physiologischen Zustand der Mikroorganismen und gibt einen Näherungswert für den Erhaltungsbedarf der Mikrobenzönose eines Bodens an. Je größer der  $q\text{CO}_2$  ist, desto mehr Substrat wird zu  $\text{CO}_2$  veratmet und desto kleiner ist der Substratanteil, der in die mikrobielle Biomasse inkorporiert wird. ANDERSON & DOMSCH (1990) fanden unter Monokulturen einen höheren  $q\text{CO}_2$  als in Böden mit Fruchtwechsel. Der  $q\text{CO}_2$  wurde aus den im Felde unmittelbar vor einer Messung der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte gemessenen  $\text{CO}_2$ -Entbindungsraten und den  $C_{\text{mik}}$ -Mengen im Boden bis 30 cm Tiefe berechnet. Der metabolische Quotient wird angegeben als  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrate pro Einheit mikrobieller Biomasse [ $\text{mg CO}_2\text{-C g}^{-1} C_{\text{mik}} \text{d}^{-1}$ ].

### 3.12 Dehydrogenaseaktivität (DHA)

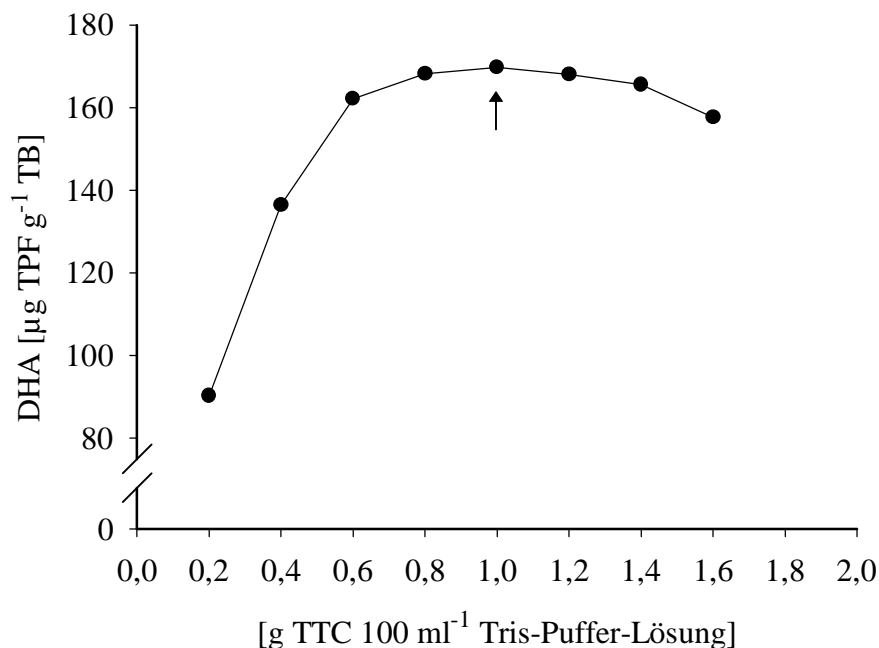
Enzymaktivitätsbestimmungen im Boden werden zur Beurteilung der Einflüsse verschiedener Umweltfaktoren und Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Mikroorganismen eingesetzt (ALEF 1991). Um Hinweise auf mögliche Veränderungen der mikrobiellen Stoffwechselaktivität bei differenzierter Bodennutzung zu erhalten, wurde neben der mikrobiellen Biomasse und der Bodenatmung die Dehydrogenaseaktivität (DHA) bestimmt. Da die Dehydrogenasen einen wesentlichen Bestandteil der Enzymsysteme sämtlicher Mikroorganismen darstellen, wird ihre Aktivität als Maß für die Intensität mikrobieller Stoffumsetzungen angesehen (ROSS 1970, TABATABAI 1982).

Die DHA wurde nach der Triphenyltetrazoliumchlorid (TTC)-Methode nach THALMANN (1968) bestimmt. Dabei dient TTC als Elektronenakzeptor anstelle von Sauerstoff. Durch die katalytische Wirkung der Dehydrogenasen wird farbloses TTC zu rotem Triphenylformazan (TPF) reduziert. Das rot gefärbte TPF kann nach der Extraktion kolometrisch gemessen werden. Die Intensität der Rotfärbung dient als Maß für die DHA.

Zur Messung der DHA wurden jeweils 5 g feldfeuchter Boden in dreifacher Wiederholung in Reagenzgläser eingewogen und mit je 5 ml TTC-Lösung versetzt. Die Reagenzgläser wurden mit Gummistopfen verschlossen, geschüttelt und anschließend 24 Stunden bei

30 °C inkubiert. Ein Ansatz ohne TTC-Zusatz diente als Blindprobe. Nach der Inkubation wurden die Proben mit 40 ml Aceton versetzt, kräftig geschüttelt und für zwei Stunden im Dunkeln stehen gelassen. Anschließend wurde filtriert (Schleicher & Schüll Papierfaltfilter Nr. 595 1/2). Die Filtrate wurden bei 546 nm photometrisch gemessen und die Ergebnisse in  $\mu\text{g TPF g}^{-1}$  trockenem Boden angegeben. Zur Eichung wurden 0, 5, 10, 20, 30 und 40  $\mu\text{g TPF ml}^{-1}$  Aceton angesetzt.

Da TTC in hoher Konzentration toxisch auf Mikroorganismen wirkt, gibt THALMANN (1968) grobe Richtwerte für die TTC-Konzentration in Abhängigkeit von Bodenart und Humusgehalt an. Diese Richtwerte wurden für den Ackerbau-Systemversuch in einem Vorversuch überprüft: Im Frühjahr 1995 wurde eine Mischprobe aus 0-30 cm Bodentiefe beider Bodennutzungssysteme genommen. Für diese Bodenprobe wurde die TTC-Konzentration bestimmt, bei der sich die maximale DHA nachweisen ließ. Dazu wurden 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4 und 1,6 g TTC in 100 ml Tris-HCl-Puffer gelöst. Für jede TTC-Konzentration wurde wie oben beschrieben der Gehalt an gebildetem TPF bestimmt. Die maximale DHA wurde bei einer TTC-Konzentration von 1 g TTC 100 ml<sup>-1</sup> Tris-HCl-Puffer gemessen (s. Abb. 4).



**Abb. 4:** Dehydrogenaseaktivität (DHA) des Versuchsbodens in Abhängigkeit von der TTC-Konzentration. Die "optimale" TTC-Konzentration ist mit einem Pfeil gekennzeichnet. TB ist trockener Boden

### 3.13 Bodentemperatur

Die Bodentemperatur wurde mit einem LCD-Thermometer (T1000 N) der Firma Eijkelkamp in 5 cm Bodentiefe erfaßt. Zu jedem Meßtermin wurden 4 Messungen pro Parzellenstreifen durchgeführt und der Mittelwert pro Parzelle berechnet.

### 3.14 Pflanzenertrag

Der Korn- und Strohertrag von Winterweizen und Wintergerste wurde über alle Versuchsjahre mit einer Teilflächenernte erfaßt. Pro Parzelle wurden 5 Reihen auf 5 m Länge (3,47 m<sup>2</sup>) mit einem Frontmäher geerntet. Die Getreidepflanzen wurden mit einem Versuchsmähdrescher stationär ausgedroschen und das Korn- und Strohgewicht bestimmt. An einem Aliquot von Stroh und Körnern wurde anschließend der Trockensubstanzgehalt ermittelt. Aus dem Verhältnis von Kornertrag zum Gesamtertrag (Korn- plus Strohertrag) wurde der Ernteindex berechnet.

Zur Ertragsfeststellung der Zuckerrübe wurden pro Parzelle 6 Reihen auf 5 m Länge von Hand gerodet. Der Reihenabstand betrug 0,48 m. Anschließend wurden die Zuckerrüben mit einem Messer geköpft. Die Trockenmasse der Rüben und der bereinigte Zuckerertrag wurden am Institut für Zuckerrübenforschung in Göttingen bestimmt. Das Rübenblatt wurde auf dem Feld im frischen Zustand gewogen und von einer Teilmenge wurde im Labor der Trockensubstanzgehalt bestimmt.

### 3.15 Statistische Auswertung

Statistische Analysen wurden mit Hilfe des SAS-Programms (Statistical-Analysis-System, SAS-INSTITUT INC. 1989, Version 6.11) nach dem allgemeinen linearen Modell ('GLM'-Prozedur) durchgeführt.

Tests auf Normalverteilung der Residuen wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test (SHAPIRO & WILK 1965) durchgeführt (SAS Prozedur UNIVARIATE option NORMAL).

Bei der Analyse von Zeitreihen wurde die 'GLM'-Prozedur um die 'repeated' Anweisung ergänzt. Multiple Vergleiche der Mittelwerte und simultane Vertrauensbereiche wurden mit Hilfe des Tukey-Tests ermittelt.

Bei allen Berechnungen galt ein Testniveau von  $p < 5\%$  als Widerlegung der Nullhypothese.

## 4 Ergebnisse

Der Einfluß zweier kontrastierender Bodennutzungssysteme auf Kennwerte der Bodenfruchtbarkeit soll anhand von bodenphysikalischen, -chemischen und -biologischen Kennwerten untersucht werden.

Da die organische Bodensubstanz bei der ackerbaulichen Betrachtung als Bodenfruchtbarkeitsmerkmal häufig im Vordergrund steht, wurde der organisch gebundene Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) und der Gesamtstickstoff ( $N_t$ ) erfaßt. Im Gegensatz zu den  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalten reagieren mikrobiologische Kenngrößen in der Regel schneller und empfindlicher auf veränderte Bewirtschaftungsmaßnahmen. Die mikrobiologische Aktivität wird zudem als eine wichtige Komponente der Bodenfruchtbarkeit angesehen (BURNS 1982), da der Umsatz der organischen Bodensubstanz vor allem durch Mikroorganismen und zellfreie Enzyme gesteuert wird (LOLL & BOLLAG 1983). Deshalb wurde neben  $C_{org}$  und  $N_t$  der mikrobiell gebundene Kohlenstoff ( $C_{mik}$ ) im Boden bestimmt. Zusätzlich wurden die Dehydrogenaseaktivität (DHA) und die Bodenatmung gemessen. Um langfristige Einflüsse unterschiedlicher Bodennutzung auf fruchtbarkeitsbestimmende Bodeneigenschaften zu erfassen, wurden die Biomasse und die Aktivität der Regenwürmer sowie die Anzahl der Regenwurmporen ermittelt. Ergänzt wurden diese Untersuchungen durch die Bestimmung des Eindringwiderstandes und der Lagerungsdichte.

Die Untersuchungen wurden in den Jahren 1995 bis 1997 gleichzeitig zu allen Fruchtarten der langen bzw. kurzen Fruchtfolge durchgeführt. Dieser direkte Vergleich der Früchte miteinander war möglich, da im Ackerbau-Systemversuch die Fruchtarten sowohl zeitlich nacheinander als auch räumlich nebeneinander angebaut werden.

### 4.1 Auswirkungen langjährig unterschiedlicher Bodennutzung auf physikalische Bodenkennwerte

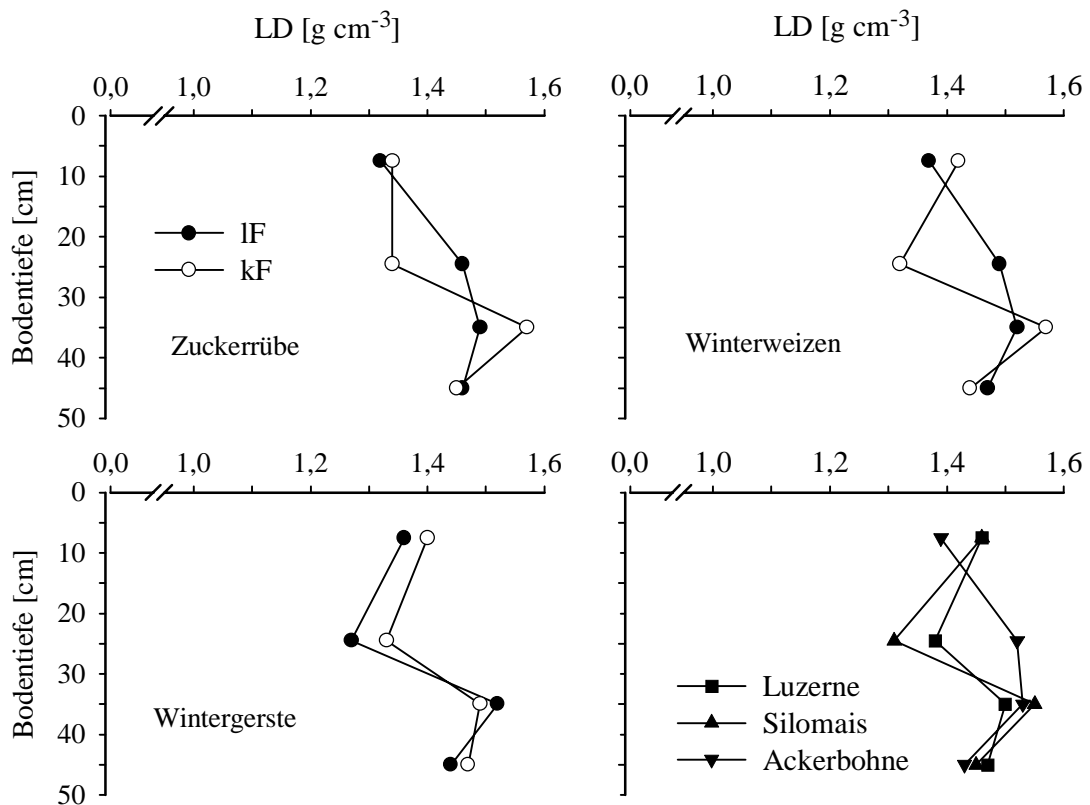
Es sollte geprüft werden, ob die langjährige differenzierte Bodennutzung Unterschiede im Bodengefüge bewirkt hat. Es besteht die Möglichkeit, daß die an Häufigkeit und Tiefe reduzierte Bodenbearbeitung sowie die lockernde Wirkung der Luzernepfahlwurzel in der IF die Lagerungsdichte des Bodens und den Eindringwiderstand im Bereich der Krumbasis gegenüber der kF verringert hat. Dies wiederum könnte sich möglicherweise positiv auf den Pflanzenertrag und die Bodenfruchtbarkeit in der IF auswirken.

#### 4.1.2 Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichten des Bodens unter den einzelnen Früchten der langen und kurzen Fruchtfolge sind in Abb. 5 dargestellt. In der IF wies die oberste Bodenschicht (5-10 cm) unter den Feldfrüchten Zuckerrübe und Winterweizen eine deutlich geringere Lagerungsdichte als die darunterliegenden Bodenschichten auf. Dies weist auf eine lockernde Wirkung der Bodenbearbeitung zu Zuckerrübe (Pflug; 15 cm tief) und zu Winterweizen (Grubber; 8 cm tief; s. Tab. 1) im Oberboden hin. Unterhalb der Bearbeitungstiefe lagerte der Boden in der IF unter den Früchten Zuckerrübe und Winterweizen gleichmäßig dicht. Im Gegensatz zu kF mit jährlich tiefwendender Bodenbearbeitung zeigten sich in der IF unter Zuckerrübe und Winterweizen bereits in einer Tiefe von 22-27 cm Lagerungsdichten von etwa  $1,45 \text{ g cm}^3$ . Dagegen wurden in der kF im Tiefenbereich 22-27 cm jeweils die geringsten Lagerungsdichten bestimmt. Möglicherweise wurde durch die tiefwendende Bodenbearbeitung ein Großteil der Erntereste in den unteren Krumenbereich verlagert. Der relativ hohe Anteil frischer organischer Substanz könnte eine verminderte Dichtlagerung des Bodens in 22-27 cm Tiefe verursacht haben. Unter allen Früchten der kF zeigte sich ein sprunghafter Anstieg der Lagerungsdichte im Tiefenbereich von 32-37 cm (Abb. 5). Der starke Anstieg in der Lagerungsdichte weist auf eine durch Pflugarbeit entstandene Krumenbasisverdichtung hin. Dagegen zeigte sich in der IF unter Zuckerrübe und Winterweizen keine sprunghafte Zunahme der Lagerungsdichte unterhalb der Krume. Ob im Bodennutzungssystem IF die Krumenbasisverdichtung unter den Kulturen Zuckerrübe und Winterweizen aufgrund einer hohen Grabeaktivität der Regenwürmer aufgelöst wurde oder durch den Anbau von Luzerne, die eine verdickte Pfahlwurzel entwickelt, kann nur vermutet werden.

Zu Wintergerste (IF) wird nach den beiden Vorfrüchten Zuckerrübe und Winterweizen erstmalig wieder eine tiefwendende Bodenbearbeitung durchgeführt (s. Tab. 1). Vermutlich zeigten deshalb die beiden Bodennutzungssysteme unter Wintergerste ähnliche Verläufe in der Dichtlagerung des Bodens. Dabei lagerte der Boden in der obersten Bodenschicht dichter, in der darunterliegenden lockerer als unter Zuckerrübe und Winterweizen in der IF. In 32-37 cm Tiefe stieg die Lagerungsdichte sprunghaft auf etwa  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ .





**Abb. 5:** Lagerungsdichte (LD) unter Zuckerrübe, Winterweizen, Wintergerste, Luzerne, Silomais und Ackerbohne in der langen (IF) und kurzen (kF) Fruchtfolge in unterschiedlichen Bodentiefen im Frühjahr 1996; angegebene Daten sind Mittelwerte (je Tiefe 6 Stechzylinder) aus allen Parzellen der ersten Wiederholung (Parzellen 010 bis 090)

Im Unterboden glichen sich die Lagerungsdichten beider Bodennutzungssysteme an. Die Böden unter Luzerne und Silomais lagerten im unteren Krumenbereich lockerer als in der obersten Bodenschicht (Abb. 5). In 32-37 cm Tiefe stieg die Lagerungsdichte unter Silomais deutlich auf  $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ . Unter Luzerne lagerte der Boden im unteren Bereich gleichmäßig dicht. Unter Ackerbohne wies die oberste Bodenschicht (5-10 cm) eine deutlich geringere Lagerungsdichte als der untere Krumenbereich (22-27 cm) auf. Die verhältnismäßig dichte Lagerung des Bodens in 22-27 cm Tiefe könnte auf die zweimalig aufeinanderfolgende reduzierte Bodenbearbeitung (Fräse; 8 cm tief) in der IF zu Silomais und Ackerbohne zurückzuführen sein.

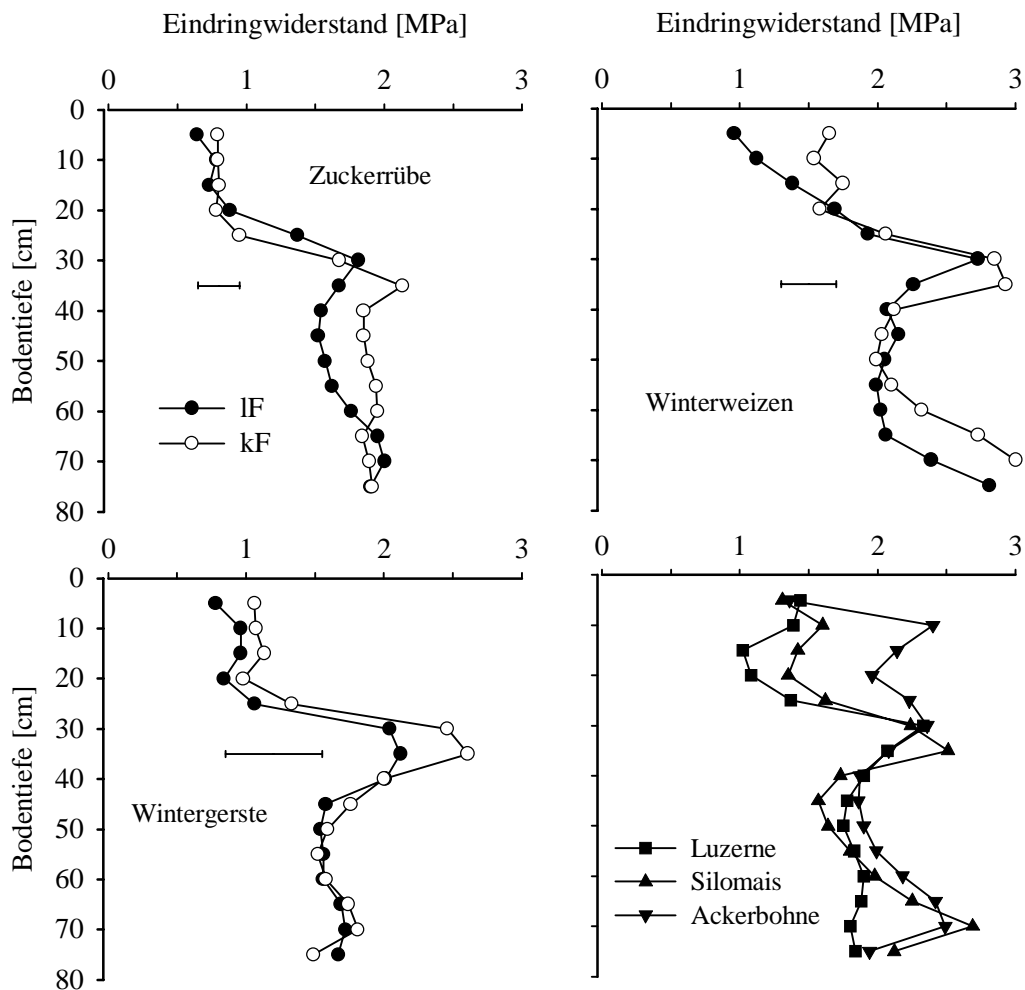
#### 4.1.3 Eindringwiderstand

Mit dem Bodeneindringwiderstand (EW) werden zeitgleich die Einflüsse vieler bodenphysikalischer Faktoren wie Körnung, Lagerungsdichte und Wasserspannung ermittelt (BORCHERT & GRAF 1988). Mit dem EW läßt sich somit die räumliche Verteilung

pysikalisch unterschiedlicher Bodenbereiche feststellen (SCHREY 1991). Hohe Eindringwiderstände hemmen das Wurzelwachstum der Pflanzen und können besonders in trockenen Jahren zu Ertragseinbußen führen. Somit kann der Eindringwiderstand als bodenphysikalische Kenngröße für eine nachhaltige Bodenfruchtbarkeit berücksichtigt werden. Da der Eindringwiderstand stark abhängig ist von der Bodenfeuchte (HORN 1984, DUMBECK 1986), wurden zeitgleich die Bodenwassergehalte bestimmt. Alle Messungen erfolgten im Frühjahr bei Feldkapazität des Bodens.

Die Eindringwiderstände des Jahres 1996 und 1997 sind in Abb. 6 und 7 unter den jeweiligen Kulturen der Bodennutzungssysteme IF und kF dargestellt. Um eine verdichtende Wirkung im Bereich der Krumenbasis durch den jährlichen Pflugeinsatz in der kF zu verdeutlichen, wurde die Grenzdifferenz in 35 cm Tiefe eingezeichnet. In beiden Untersuchungsjahren zeigten sich im jährlich gepflügten Boden der kF relativ geringe Eindringwiderstände bis 20 cm Bodentiefe. Im Tiefenbereich 25-35 cm kam es dagegen zu einer sprunghaften Zunahme der EW-Werte (Abb. 6 und 7). Dies deutet auf eine lockernde Wirkung des Pfluges im Oberboden und auf eine verdichtende im Bereich der Krumenbasis hin. In den periodisch reduziert bearbeiteten Böden der IF konnte ebenfalls im oberen Krumenbereich die lockernde Wirkung der Bodenbearbeitung nachgewiesen werden (Abb. 6 und 7). Im Bereich der Krumenbasis (25 - 35 cm) zeigten 1996 die Böden unter Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste der IF gegenüber der kF geringere EW-Werte (Abb. 6).

Unter Luzerne wird die lockernde Wirkung des Pfluges bis 20 cm Tiefe und die verdichtende im Tiefenbereich von 30 cm in beiden Versuchsjahren offensichtlich (Abb. 6 und 7). Der Boden unter Silomais wies 1996 trotz Verzicht auf tiefwendende Bodenbearbeitung einen ähnlichen EW wie bei Luzerne auf (Abb. 6). Demgegenüber bildete sich nach zweimalig aufeinanderfolgender pflugloser Bearbeitung unter Ackerbohnen in der IF ein zweigipfeliger Kurvenverlauf heraus. Infolge des Abstützens der flach arbeitenden Fräse traten dabei EW-Maxima in 10 cm Bodentiefe und zusätzlich in der Krumenbasis auf (Abb. 6).

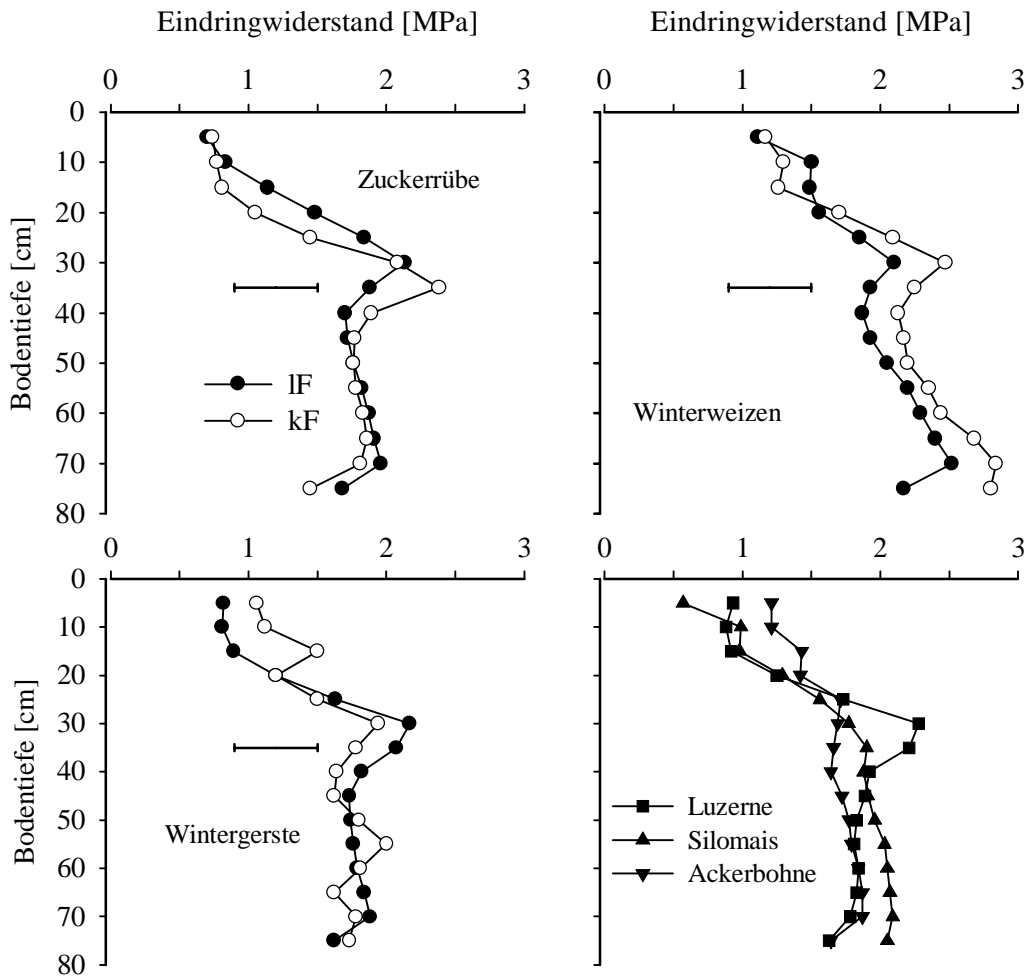


**Abb. 6:** Mittelwerte der Eindringwiderstände aller Parzellen der IF und kF in Abhängigkeit von der Bodentiefe im Frühjahr 1996; waagerechte Striche kennzeichnen die Grenzdifferenz in 35 cm Tiefe

Im Jahr 1997 führte die unterschiedliche Bewirtschaftung zu ähnlichen Kurvenverläufen wie im Vorjahr (Abb. 7). Eine Ausnahme bildete Wintergerste. Hier zeigen die EW-Werte 1997 für beide Bodennutzungssysteme einen starken Anstieg in 20 bis 25 cm Bodentiefe, wobei die IF im Gegensatz zum Jahr 1996 in der Tiefe 25 bis 45 cm höhere Eindringwiderstände aufwies als die kF. Der sprunghafte Anstieg im Bereich der Krumenbasis in der IF könnte durch den periodischen Einsatz des Pfluges zu Wintergerste (IF) herbeigeführt worden sein.

Auffallend bei den EW-Werten 1997 der drei übrigen Feldfrüchte der IF waren die im Verlauf der Fruchtfolge (Luzerne, Silomais und Ackerbohne) sinkenden Eindringwiderstände im Bereich der Krumenbasis (25 bis 35 cm Tiefe). Der zweigipfelige Kurvenverlauf unter Ackerbohne 1996 konnte 1997 nicht bestätigt werden.

Unter Silomais und Ackerbohne war 1997 der für eine Krumbasisverdichtung typische Anstieg der EW-Werte im Tiefenbereich von 25 - 35 cm nicht erkennbar, was als Hinweis für eine biologische Auflösung der Krumbasisverdichtung dienen kann (Abb. 7).



**Abb. 7:** Mittelwerte der Eindringwiderstände aller Parzellen der IF und kF in Abhängigkeit von der Bodentiefe im Frühjahr 1997; waagerechte Striche kennzeichnen die Grenzdifferenz in 35 cm Tiefe

## **4.2 Auswirkungen langjährig unterschiedlicher Bodennutzung auf chemische Bodenkennwerte**

Die Gesamtheit der organischen Substanzen eines Bodens bilden nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1992) den Humus. Dieser wird durch die Analyse des Kohlenstoffgehaltes quantitativ bestimmt. Der organische Kohlenstoff ( $C_{\text{org}}$ ) als Maß für den Humusgehalt steht bei der pflanzenbaulichen Betrachtung als Bodenfruchtbarkeitsmerkmal häufig im Vordergrund (RAUHE 1969, SCHNIEDER 1984, KÖRSCHENS 1989). Neben Standort- und Klimafaktoren beeinflusst das gewählte Bodennutzungssystem den Gehalt an organischer Substanz und deren mikrobiellen Umsatz im Boden. Das Bodennutzungssystem nimmt über die Intensität der Bodenbearbeitung, über Menge und Art der Düngung sowie über die Fruchtfolge einen direkten Einfluß auf die Versorgung des Bodens mit organischer Substanz. Da sich Veränderungen im Gehalt an organischer Substanz durch bestimmte Bewirtschaftungsweisen oft erst nach Jahrzehnten nachweisen lassen, sind zur Beurteilung von Langzeiteffekten Dauerversuche wie der Ackerbau-Systemversuch Reinshof besonders wertvoll.

### **4.2.1 Einfluß von Fruchtarten und Bodennutzung auf die Menge an organischem Kohlenstoff ( $C_{\text{org}}$ ) und Gesamtstickstoff ( $N_t$ ) im Boden**

Zur Beurteilung der Entwicklung der organischen Substanz über die Zeit können einerseits die beiden Bodennutzungssysteme im Vergleich zum Ausgangszustand betrachtet werden, andererseits können nach einer bestimmten Versuchsdauer die beiden Systeme miteinander verglichen werden.

In Tab. 3 sind die Mengen an organischem Kohlenstoff ( $C_{\text{org}}$ ) und Gesamtstickstoff ( $N_t$ ) nach 15 Versuchsjahren unter den jeweiligen Kulturen der Bodennutzungssysteme vergleichend gegenübergestellt. Die organische Düngung, die vermehrte Bodenruhe und der Anbau von Feldfutterfrüchten in der IF führte zu einer leichten Erhöhung der  $C_{\text{org}}$ - und  $N_t$ -Mengen gegenüber dem Bodennutzungssystem kF. Unter Winterweizen waren die Unterschiede signifikant.

Innerhalb der kF gab es keine signifikanten Unterschiede in den  $C_{\text{org}}$ -Mengen in Abhängigkeit von der Kulturart. Dagegen war die organische Bodensubstanz in der IF unter Ackerbohne signifikant höher als unter Zuckerrübe, Wintergerste und Luzerne. Die

$C_{\text{org}}$ -Menge unter Wintergerste war signifikant geringer als unter Winterweizen, Silomais und Ackerbohne. Zwischen den anderen Feldfrüchten wurden lediglich tendenzielle Unterschiede deutlich. Auffällig war der relativ starke Anstieg der  $C_{\text{org}}$ -Mengen von fast  $3 \text{ t ha}^{-1}$  von Zuckerrübe zu Winterweizen in der IF (Tab. 3). Dies widerspricht der Ansicht, daß Hackfrüchte eine humuszehrende Wirkung haben (RAUHE 1965, LEITHOLD 1984). Stallmistdüngung zu Wintergerste und Silomais im Bodennutzungssystem IF erhöhten die  $C_{\text{org}}$ -Menge nicht.

**Tab. 3:** Gesamtmenge an organischem Kohlenstoff ( $C_{\text{org}}$ ) und Gesamtstickstoff ( $N_t$ ) bis 30 cm Bodentiefe unter den Feldfrüchten der langen (IF) und kurzen (kF) Fruchtfolge sowie das  $C_{\text{org}}/N_t$ -Verhältnis; (Mittelwerte über die Beprobungstermine April 1995 und April 1996); unterschiedliche Großbuchstaben bedeuten signifikante Differenzen zwischen den Früchten innerhalb einer Fruchtfolge (senkrechte Betrachtung); unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bodennutzungssystemen (waagerechte Betrachtung)

Feldfrucht	$C_{\text{org}}$ [ $\text{t ha}^{-1}$ ]		$N_t$ [ $\text{t ha}^{-1}$ ]		$C_{\text{org}} / N_t$	
	IF	kF	IF	kF	IF	kF
Zuckerrübe	46,7 BC	43,0	5,4 B	5,1	8,6	8,4
Winterweizen	49,5 AB a	44,8 b	5,9 AB a	5,4 b	8,4	8,3
Wintergerste	45,5 C	45,5	5,4 B	5,5	8,4	8,3
Luzerne	48,0 BC		5,6 AB		8,6	
Silomais	49,5 AB		5,7 AB		8,7	
Ackerbohne	52,0 A		6,0 A		8,7	
Mittelwert	48,5	44,4	5,7	5,3	8,6	8,3

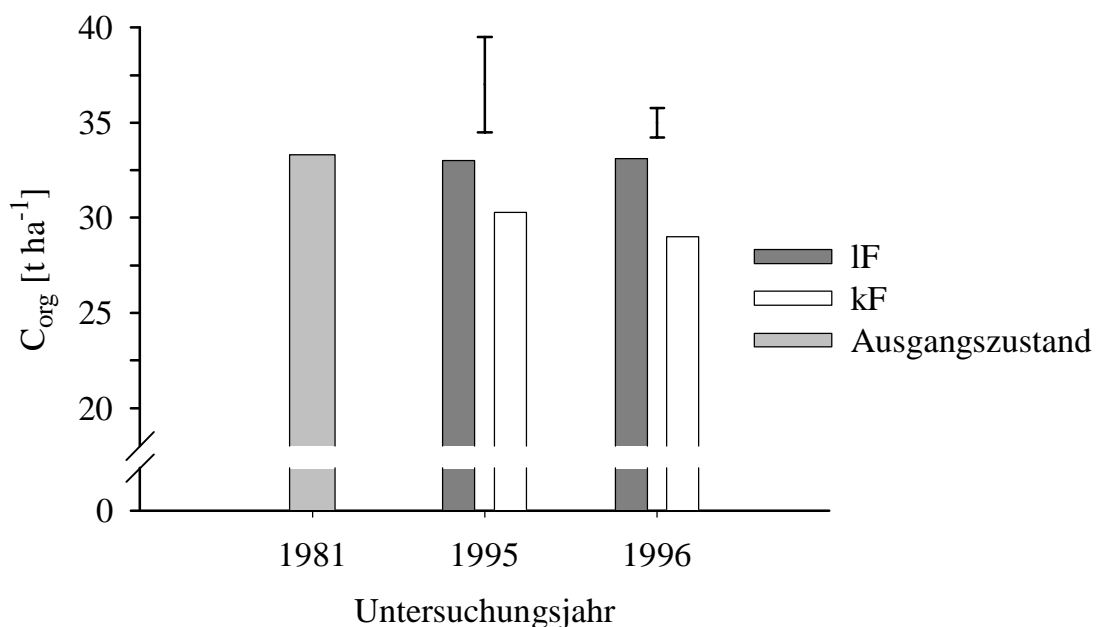
Die Mengen an Gesamtstickstoff ( $N_t$ ) differenzierten sich unter dem Bewirtschaftungseinfluß in der gleichen Weise wie die  $C_{\text{org}}$ -Mengen (Tab. 3). Die  $N_t$ -Mengen waren in der IF tendenziell höher als in der kF.

Das C/N-Verhältnis lag zwischen 8,3 und 8,7 (Tab. 3). Weder gab es signifikante Unterschiede zwischen den Kulturen der Bodennutzungssysteme noch innerhalb eines Bodennutzungssystems zwischen den Kulturen.

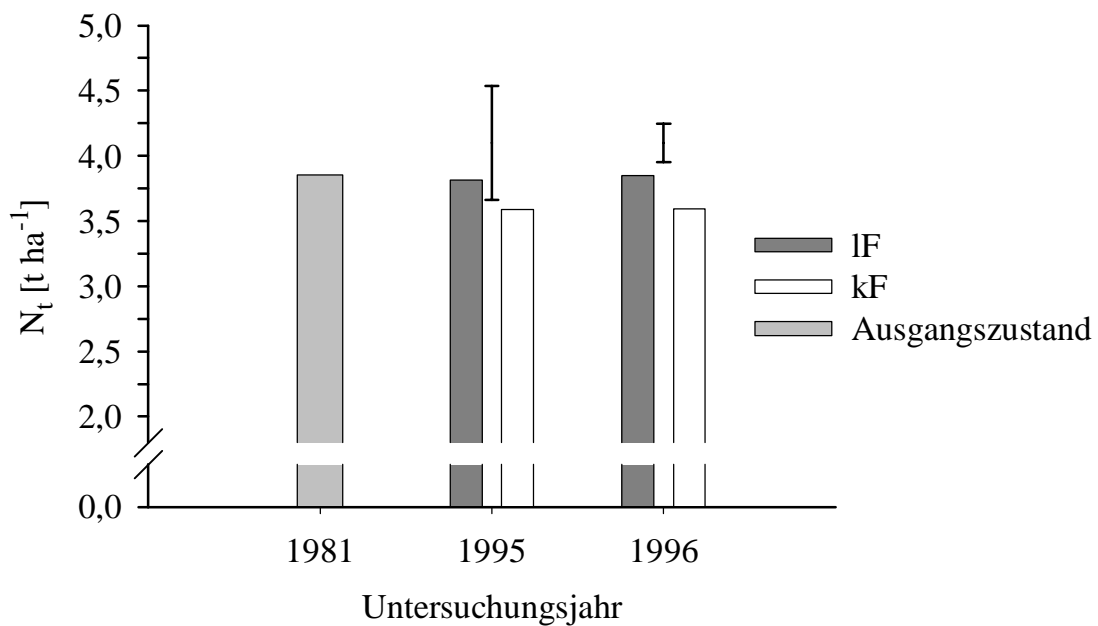
#### 4.2.2 Langjährige Veränderungen des organischen Kohlenstoffs und Gesamtstickstoffs im Boden bei unterschiedlicher Bodennutzung

Die bisher dargestellten Ergebnisse der  $C_{\text{org}}$ - und  $N_t$ -Untersuchungen spiegeln den Augenblickszustand nach 15 Versuchsjahren wieder. Die Abbildungen 8 und 9 zeigen die Mengenveränderungen an  $C_{\text{org}}$  und  $N_t$  seit Versuchsbeginn bis zum Untersuchungsjahr 1996. Für das Jahr 1981 lagen keine Meßwerte für die Bodenschicht 0-30 cm vor, so daß ein Vergleich mit dem Ausgangszustand nur für 0-20 cm Tiefe durchgeführt werden konnte.

Nach CLEMENT (1991) betrug die  $C_{\text{org}}$ -Menge (Abb. 8) zu Versuchsbeginn 1981 in 0-20 cm Bodentiefe  $33,3 \text{ t ha}^{-1}$  und die  $N_t$ -Menge  $3,9 \text{ t ha}^{-1}$  (Abb. 9). Nach 14 bzw. 15 Versuchsjahren zeigten sich im Bodennutzungssystem IF mit organischer Düngung und Feldfutterbau keine Veränderungen bezüglich der  $C_{\text{org}}$ - und  $N_t$ -Mengen im Vergleich zum Ausgangszustand 1981 (Abb. 8 und 9). Dagegen führte reiner Marktfruchtanbau im Bodennutzungssystem kF zu einer Abnahme bei den  $C_{\text{org}}$ - und  $N_t$ -Mengen (Abb. 8 und 9). Hierbei waren die  $C_{\text{org}}$ -Mengen 1996 in der kF signifikant geringer als in der IF (Abb. 8).



**Abb. 8:** Mengen an organischem Kohlenstoff ( $C_{\text{org}}$ ) in 0-20 cm Bodentiefe der Bodennutzungssysteme lange (IF) und kurze (kF) Fruchtfolge in den Untersuchungsjahren 1995 und 1996 im Vergleich zum Ausgangszustand 1981 (CLEMENT 1991); die Werte für 1995 und 1996 sind Mittelwerte aller Parzellen des jeweiligen Bodennutzungssystems; senkrechte Striche kennzeichnen die Grenzdifferenz innerhalb eines Jahres

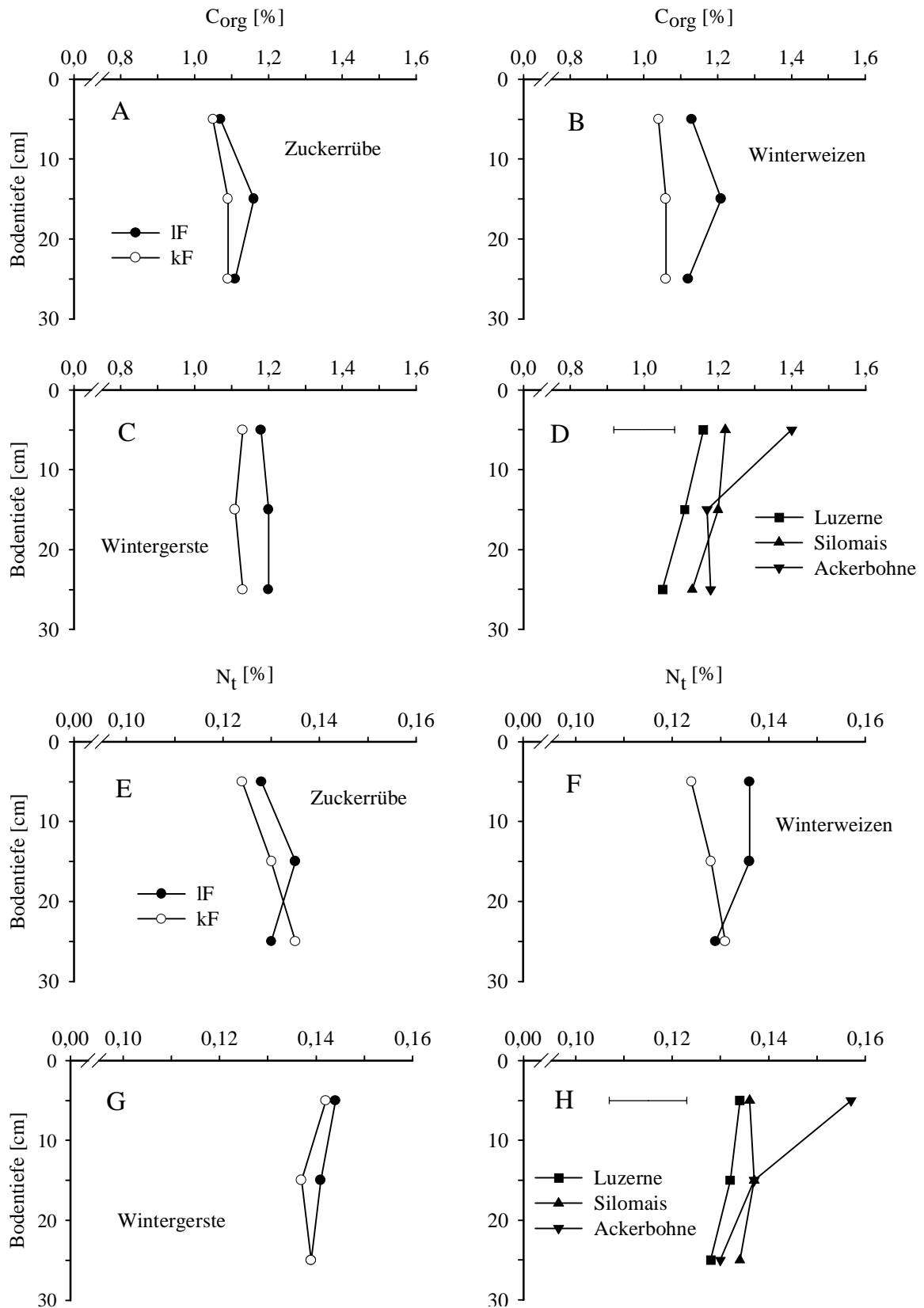


**Abb. 9:** Mengen an Gesamtstickstoff ( $N_t$ ) in 0-20 cm Bodentiefe der Bodennutzungssysteme lange (IF) und kurze (kF) Fruchtfolge in den Untersuchungsjahren 1995 und 1996 im Vergleich zum Ausgangszustand 1981 (CLEMENT 1991); die Werte für 1995 und 1996 sind Mittelwerte aller Parzellen der jeweiligen Bodennutzungssysteme; senkrechte Striche kennzeichnen die Grenzdifferenz innerhalb eines Jahres

#### 4.2.3 Tiefenverteilung der $C_{org}$ - und $N_t$ -Gehalte in Abhängigkeit vom Bodennutzungssystem

Infolge der unterschiedlich tiefen Einarbeitung der Pflanzenrückstände und der zu Wintergerste und Silomais verabreichten Stallmistdüngung wirkte sich die Bodenbearbeitung in starkem Maße auf die vertikale Verteilung der organischen Substanz im Boden aus (Abb. 10). Während in der IF unter Zuckerrübe (Abb. 10A) und Winterweizen (Abb. 10B) die höchsten  $C_{org}$ -Werte in 10 bis 20 cm Bodentiefe gefunden wurden, zeigte sich in der kF eine gleichmäßigere Verteilung der  $C_{org}$ -Gehalte über die gesamte Krumentiefe (Abb. 10A-C). Unter den Früchten Luzerne und Silomais nahmen die  $C_{org}$ -Gehalte mit der Tiefe leicht ab (Abb. 10D). Als Folge zweimalig aufeinanderfolgender flacher Bodenbearbeitung (Tab. 1) waren die  $C_{org}$ -Gehalte unter Ackerbohne in der obersten Bodenschicht (0-10 cm) gegenüber anderen Tiefen und Früchten leicht erhöht (Abb. 10D). Ständiges Pflügen in der kF bewirkte im Vergleich zu periodischem Pflügen in der IF eine insgesamt gleichmäßigere Verteilung der organischen Substanz in 0-30 cm Tiefe. Unter





**Abb. 10:** Gehalte an organischem Kohlenstoff (A-D) und Gesamtstickstoff (E-H) unter den Kulturen der langen und kurzen Fruchtfolge in unterschiedlichen Bodentiefen; (Mittelwerte über die Beprobungstermine April 1995 und April 1996); waagerechte Striche kennzeichnen bei signifikanten Unterschieden die Grenzdifferenz in einer Tiefe

den drei Feldfrüchten, die in beiden Fruchtfolgen angebaut werden, traten jeweils in der IF in allen Bodentiefen höhere  $C_{\text{org}}$ -Gehalte auf als in der kF (Abb. 10A-C).

Ähnliche Tendenzen wie bei  $C_{\text{org}}$  zeigten die Tiefenprofile der  $N_t$ -Gehalte (Abb. 10E-H). Während in der IF unter Zuckerrübe und Winterweizen die höchsten Werte für  $N_t$  in 10 bis 20 cm Bodentiefe nachgewiesen wurden, lagen in der kF unter den drei Feldfrüchten Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste die Werte gleichmäßiger über die Krumentiefe verteilt (Abb. 10E-F). Unter Wintergerste wurde in beiden Bodennutzungssystemen eine gleichmäßige Verteilung der  $N_t$ -Gehalte über die gesamte Krume festgestellt (Abb. 10G). Insgesamt lagen in der IF die  $N_t$ -Gehalte in 0 bis 20 cm Tiefe über denen der kF, während sich die  $N_t$ -Gehalte in der Bodenschicht 20 bis 30 cm weitgehend angleichen. Unter Luzerne und Silomais nahmen die  $N_t$ -Gehalte mit der Tiefe leicht, unter Ackerbohne stärker ab. Wie für die  $C_{\text{org}}$ -Gehalte wurde ebenfalls für  $N_t$  unter Ackerbohnen in der obersten Bodenschicht eine Anreicherung nachgewiesen (Abb. 10H).

#### 4.2.4 Gehalte an K, P und Mg und pH-Wert

Zur Charakterisierung der Nährstoffversorgung bei unterschiedlicher Bodennutzung wurden im Frühjahr 1997 die Gehalte an K, P und Mg und der pH-Wert bis in 30 cm Bodentiefe bestimmt. Beide Bodennutzungssysteme waren ausreichend mit den Grundnährstoffen Kalium, Phosphor und Magnesium versorgt (Tab. 4). Für alle drei Nährstoffe wurden die Gehaltsklassen D (sehr hoch) bzw. E (besonders hoch) erreicht (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER HANNOVER 1997).

Die Gehalte an K, P und Mg zeigten in beiden Fruchtfolgen keine Unterschiede in der Tiefenverteilung innerhalb der Krume. Deshalb wurde auf eine tiefendifferenzierte Darstellung der Nährstoffgehalte verzichtet.

Der pH-Wert lag im Frühjahr 1997 zwischen 6,9 und 7,3. Die geringe Spanne im pH-Wert wurde nicht durch einen systematischen Effekt der unterschiedlichen Fruchtfolgen hervorgerufen.

**Tab. 4:** Gehalte an K, P und Mg in den Bodennutzungssystemen (BNS) lange (lF) und kurze (kF) Fruchtfolge in 0-30 cm Bodentiefe; Mittelwerte aller Parzellen des jeweiligen Bodennutzungssystems; Probenahme Frühjahr 1997

BNS	K [mg kg <sup>-1</sup> Boden-TS]	P [mg kg <sup>-1</sup> Boden-TS]	Mg [mg kg <sup>-1</sup> Boden-TS]
lF	144	27	133
kF	157	28	123

### **4.3 Auswirkungen unterschiedlicher Bodennutzung auf die Regenwurmpopulation**

Nach SYERS & SPRINGETT (1984) leisten Regenwürmer durch die Veränderung chemischer und physikalischer Bodeneigenschaften einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit. Von Regenwürmern geschaffene kontinuierliche Makroporen reichen bis in den Unterboden und erhöhen somit die Wasserinfiltration und den Gasaustausch im Boden.

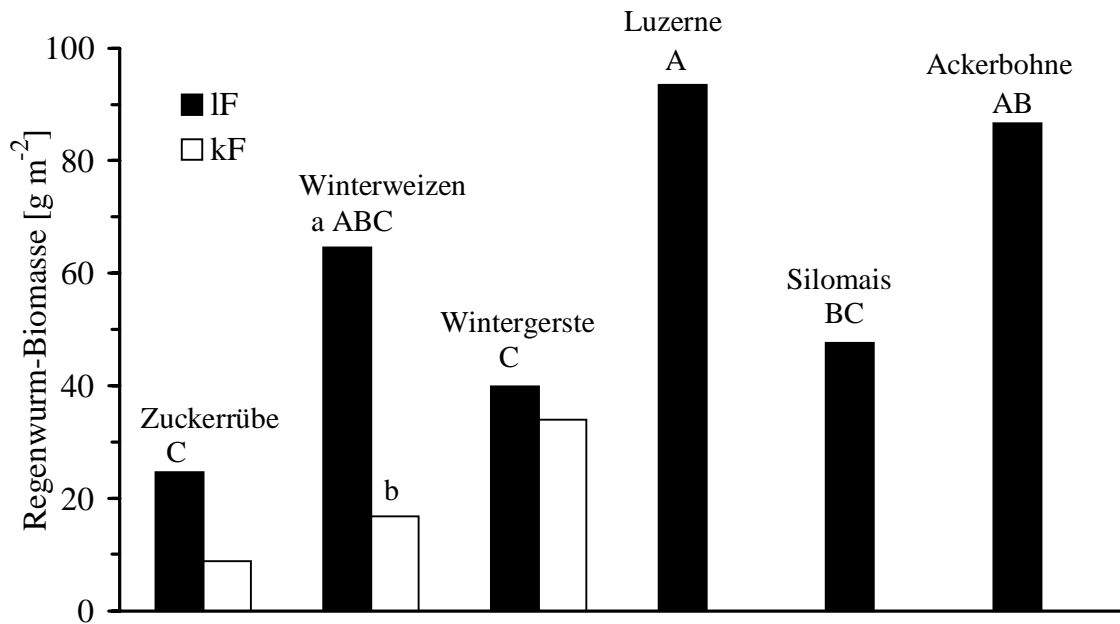
Die Regenwurm-Biomasse, die Aktivitätsdichte sowie die Anzahl der Bioporen pro Fläche wurden in Abhängigkeit vom Bodennutzungssystem charakterisiert.

#### **4.3.1 Regenwurm-Biomasse**

Die Biomasse der Regenwürmer je Flächeneinheit (Abb. 11 und 12) belegt einen deutlichen Einfluß des Bodennutzungssystems. In der IF war das Lebendgewicht der Regenwürmer zu den Fangterminen 1995 und 1996 unter den Früchten Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste deutlich höher als in der kF. In Mittel über alle Früchte und beider Fangtermine war die Regenwurm-Biomasse in der IF um  $30 \text{ g m}^{-2}$  größer als in der kF. Unter Winterweizen waren die Unterschiede in beiden Jahren zwischen den Bodennutzungssystemen signifikant (Abb. 11 und 12). Hier verursachte vermutlich der Einsatz des Pfluges in der kF eine durchschnittliche Reduzierung der Biomasse gegenüber der IF mit nur oberflächlicher (8 cm) Bodenbearbeitung um 58%. Im Durchschnitt der drei Früchte Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste wurde die Regenwurm-Biomasse in der kF gegenüber der IF 1995 und 1996 um 53 bzw. 47% vermindert.

Innerhalb der Bodennutzungssysteme variierte die Regenwurm-Biomasse zwischen den einzelnen Kulturen zu beiden Fangterminen erheblich. Dies dürfte vor allem auf den unterschiedlichen Grad der Bodenbedeckung durch die Feldfrüchte oder durch Mulchmaterial zum Untersuchungstermin zurückzuführen sein.

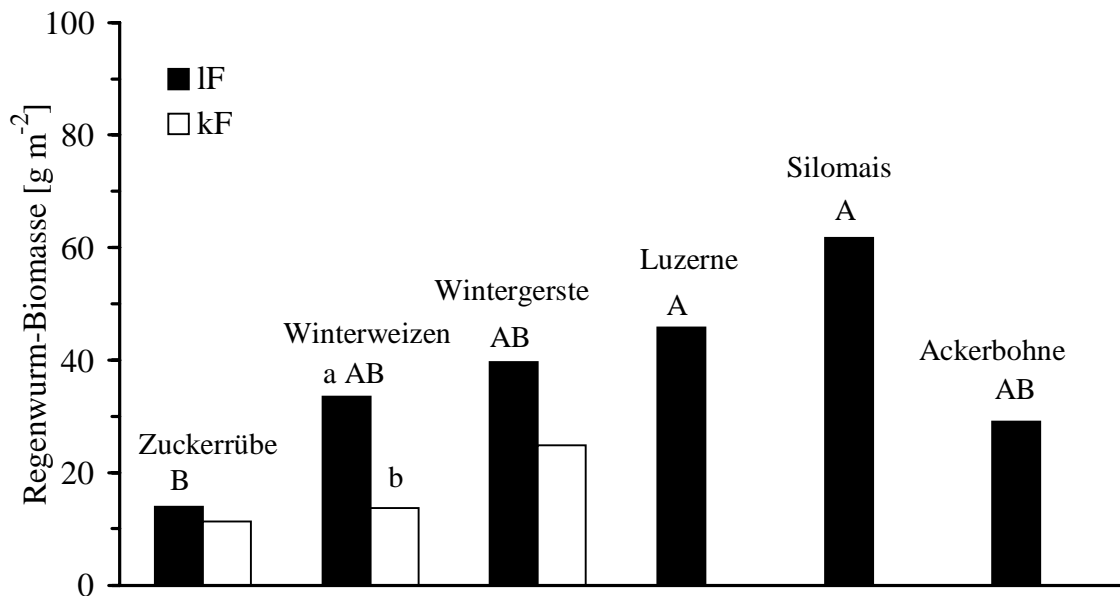
Unter Zuckerrübe wurde jeweils die geringste Regenwurm-Biomasse festgestellt. Gleichzeitig wurde zu den Fangterminen 1995 und 1996 in den Zuckerrübenparzellen die geringste Bodenbedeckung (2%) durch Kulturpflanzen oder Mulch im Vergleich zu den anderen Kulturen beobachtet.



**Abb. 11:** Regenwurm-Biomasse (Lebendgewicht) in der langen (IF) und kurzen (kF) Fruchtfolge im Frühjahr 1995; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bodennutzungssystemen; unterschiedliche Großbuchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Früchten innerhalb eines Bodennutzungssystems

In der kF stieg die Regenwurm-Biomasse 1995 in der Abfolge der Feldfrüchte Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste an (Abb. 11). Vermutlich ist dies mit der hohen Bodenbedeckung (90%) durch die Getreidepflanzen zu begründen. In der IF wuchs die Biomasse nach Zuckerrübe unter Winterweizen um das 2,5-fache an (Abb. 11). Anschließend sank die Biomasse unter Wintergerste. In der weiteren Abfolge der Feldfrüchte in der IF wurde unter Luzerne die höchste Regenwurm-Biomasse mit  $93 \text{ g m}^{-2}$  festgestellt, während sie zu Mais um 50% zurückging (Abb. 11). Vermutlich förderte die schon im vorhergegangenen Herbst durch Luzerne herbeigeführte hohe Bodenbedeckung die Regenwürmer, während der hohe Anteil an unbedecktem Boden zu Silomais die Biomasse reduzierte. Anschließend erreichte die Regenwurm-Biomasse unter Ackerbohne wieder in etwa das Niveau von Luzerne, trotz eines geringen Bodenbedeckungsgrads durch die Ackerbohnenpflanze im Frühjahr. Ob dies mit der relativ hohen Bodenbedeckung (15%) durch Mulchmaterial der Vorfrucht zu begründen war, kann vermutet werden.

Im Fangjahr 1996 stieg die Regenwurm-Biomasse in der IF stetig im Verlauf der Fruchtfolge bis zum Silomais (Abb. 12). In den Maisparzellen wurde 1996 gegenüber 1995 eine auffällig hohe Biomasse gefunden. Dies könnte in der positiven Vorfruchtwirkung von



**Abb. 12:** Regenwurm-Biomasse (Lebendgewicht) in der langen (IF) und kurzen (kF) Fruchtfolge im Frühjahr 1996; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bodennutzungssystemen; unterschiedliche Großbuchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Früchten innerhalb eines Bodennutzungssystems

Luzerne auf die Regenwürmer begründet sein. Weshalb dieser Effekt 1995 nicht beobachtet wurde, bleibt ungeklärt. Während die Regenwurm-Biomassen 1995 und 1996 in der kF ein ähnliches Niveau zeigten, war die Regenwurm-Biomasse 1996 in der IF unter Winterweizen, Luzerne und Ackerbohne um etwa 50% niedriger als im Vorjahr (Abb. 11 und 12).

#### 4.3.2 Aktivitätsdichten

In der Tab. 5 sind die Gesamtaktivitätsdichten sowie die Aktivitätsdichten juveniler und adulter Regenwürmer als Mittelwert über die beiden Fangtermine 1995 und 1996 dargestellt. Tendenziell wurden in der IF höhere Aktivitätsdichten festgestellt als in der kF. Der Anteil juveniler Regenwürmer an der Aktivitätsdichte war bei allen Feldfrüchten der beiden Fruchtfolgen deutlich höher als der Anteil adulter Tiere.

Auffällig war die höhere Aktivitätsdichte der Regenwurmpopulation in der kF gegenüber der IF unter Wintergerste. Die geringere Aktivitätsdichte in der IF war aber nicht mit einer niedrigeren Regenwurm-Biomasse verknüpft (Abb. 11 und 12). Dies lässt sich mit einem höheren Anteil adulter und somit schwereren Regenwürmern in der IF unter Wintergerste erklären (Tab. 5 und 6).

**Tab. 5:** Aktivitätsdichte juveniler und adulter Regenwürmer unter den Feldfrüchten der langen und kurzen Fruchtfolge. Mittelwerte über die Fangtermine 1995 und 1996. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bodennutzungssystemen; unterschiedliche Großbuchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Früchten innerhalb eines Bodennutzungssystems

Feldfrucht	Aktivitätsdichte [Ind. m <sup>-2</sup> ]	
	lange Fruchtfolge (IF)	kurze Fruchtfolge (kF)
Zuckerrübe gesamt	14,8 C	9,2 C
juvenil	12,7	8,4
adult	2,1	0,8
Winterweizen gesamt	71,2 A	55,5 A
juvenil	65,3	54,3
adult	5,9 a	1,2 b
Wintergerste gesamt	23,7 BC	32,6 B
juvenil	19,7	29,9
adult	4,0	2,7
Luzerne gesamt	55,8 BC	
juvenil	49,3	
adult	6,5	
Silomais gesamt	38,2 BC	
juvenil	33,2	
adult	5,0	
Ackerbohne gesamt	57,9 BC	
juvenil	51,5	
adult	6,4	

Die höchsten Aktivitätsdichten wurden in den Winterweizenparzellen der IF mit über 70 Regenwürmern pro m<sup>2</sup> festgestellt (Tab. 5). Die niedrigsten Aktivitätsdichten zeigten analog zu den geringen Regenwurm-Biomassen (Abb. 11 und 12) die Zuckerrübenparzellen mit 15 Regenwürmern pro m<sup>2</sup> in der IF bzw. 9 Regenwürmern in der kF. Tendenziell war die Anzahl adulter Regenwürmer in der IF höher als in der kF (Tab 5). Unter Winterweizen waren die Differenzen signifikant.

Die Einzelwurmgewichte aller Regenwürmer im Durchschnitt der Fangtermine 1995 und 1996 waren in der IF höher als in der kF (Tab. 6). Die Einzelwurmgewichte juveniler Regenwürmer zeigten bis auf Winterweizen ebenfalls erhöhte Werte in der IF. Dagegen

waren in der IF die Einzelwurmgewichte adulter Regenwürmer unter den Feldfrüchten Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste tendenziell geringer als in der kF.

**Tab. 6:** Einzelwurmgewichte unter den Feldfrüchten der langen und kurzen Fruchtfolge; Mittelwerte über die Fangtermine 1995 und 1996.

Feldfrucht	Einzelwurmgewicht [g Ind <sup>-1</sup> ]	
	lange Fruchtfolge (lF)	kurze Fruchtfolge (kF)
Zuckerrübe gesamt	1,31	1,09
juvenil	0,48	0,39
adult	6,17	8,34
Winterweizen gesamt	0,68	0,28
juvenil	0,29	0,40
adult	4,99	6,50
Wintergerste gesamt	1,68	0,90
juvenil	0,83	0,40
adult	5,84	6,50
Luzerne gesamt	1,25	
juvenil	0,40	
adult	7,65	
Silomais gesamt	1,44	
juvenil	0,69	
adult	6,45	
Ackerbohne gesamt	1,00	
juvenil	0,42	
adult	5,61	

### 4.3.3 Artenspektrum

Trotz unterschiedlicher Regenwurm-Biomasse und Aktivitätsdichten unterschied sich die Artenzusammensetzung der Regenwurmpopulation auf der Grundlage der Regenwurm-Biomasse nur gering zwischen den Bodennutzungssystemen (Tab. 7). In der lF wurden mit *Lumbricus terrestris*, *Allolobophora caliginosa*, *Allolobophora rosea* und *Octolasion cyaneum* vier Arten nachgewiesen, während in der kF nur die drei Arten *Lumbricus terrestris*, *Allolobophora caliginosa* und *Allolobophora rosea* gefunden wurden. In beiden Bodennutzungssystemen dominierte die Regenwurmart *Lumbricus terrestris* (89,3 - 99,3% Biomassenanteil).



**Tab. 7:** Artenzusammensetzung der Regenwurmpopulation in der langen und kurzen Fruchtfolge bezogen auf die Regenwurm-Biomasse; Mittelwerte über die Fangtermine 1995 und 1996

L. ter. = *Lumbricus terrestris*; A. ros. = *Allolobophora rosea*

A. cal. = *Allolobophora caliginosa*; O. cya. = *Octolasion cyaneum*

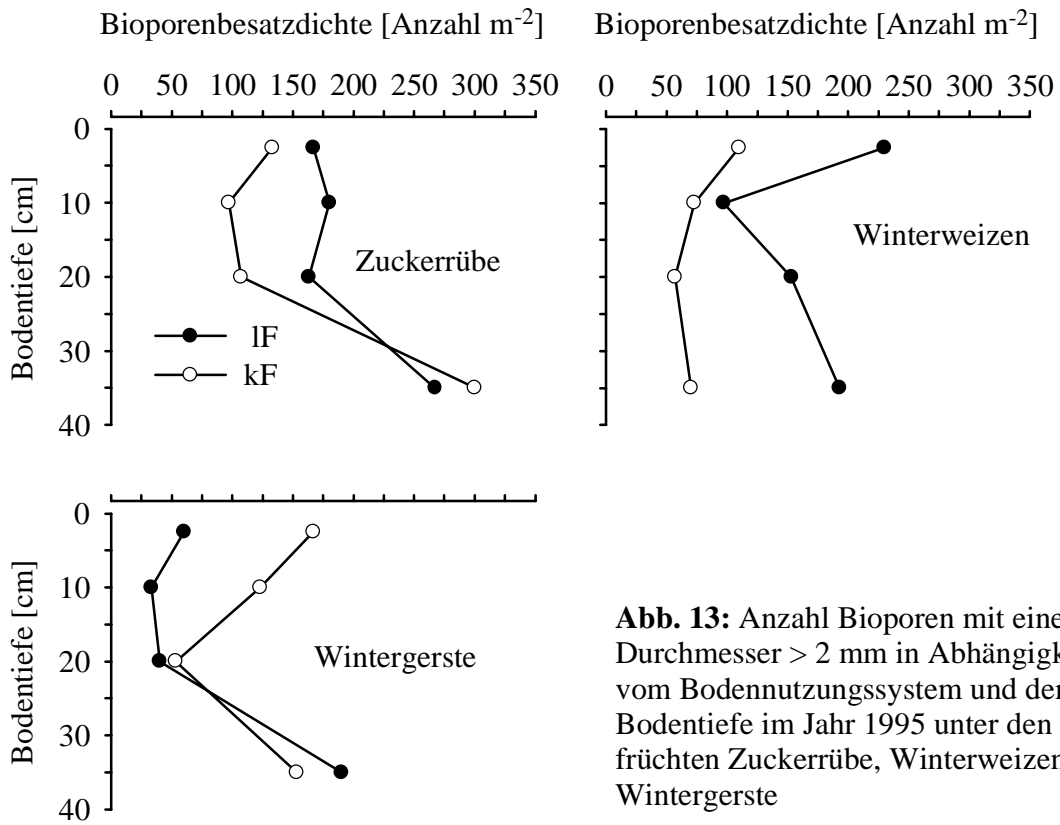
Feldfrucht	lange Fruchtfolge (lF)				kurze Fruchtfolge (kF)			
	L. ter.	A. cal.	A. ros.	O. cya.	L. ter.	A. cal.	A. ros.	O. cya.
Zuckerrübe	97,9%	1,9%	0,2%		99,2%	0,7%	0,1%	
Winterweizen	89,3%	1,4%	0,1%	9,2%	96,5%	3,5%		
Wintergerste	99,3%	0,6%	0,1%		98,6%	0,8%	0,6%	
Luzerne	96,6%	2,4%	0,2%	0,8%				
Silomais	95,2%	0,9%	0,6%	3,3%				
Ackerbohne	95,7%	1,2%	0,1%	3,0%				

#### 4.3.4 Regenwurmporen

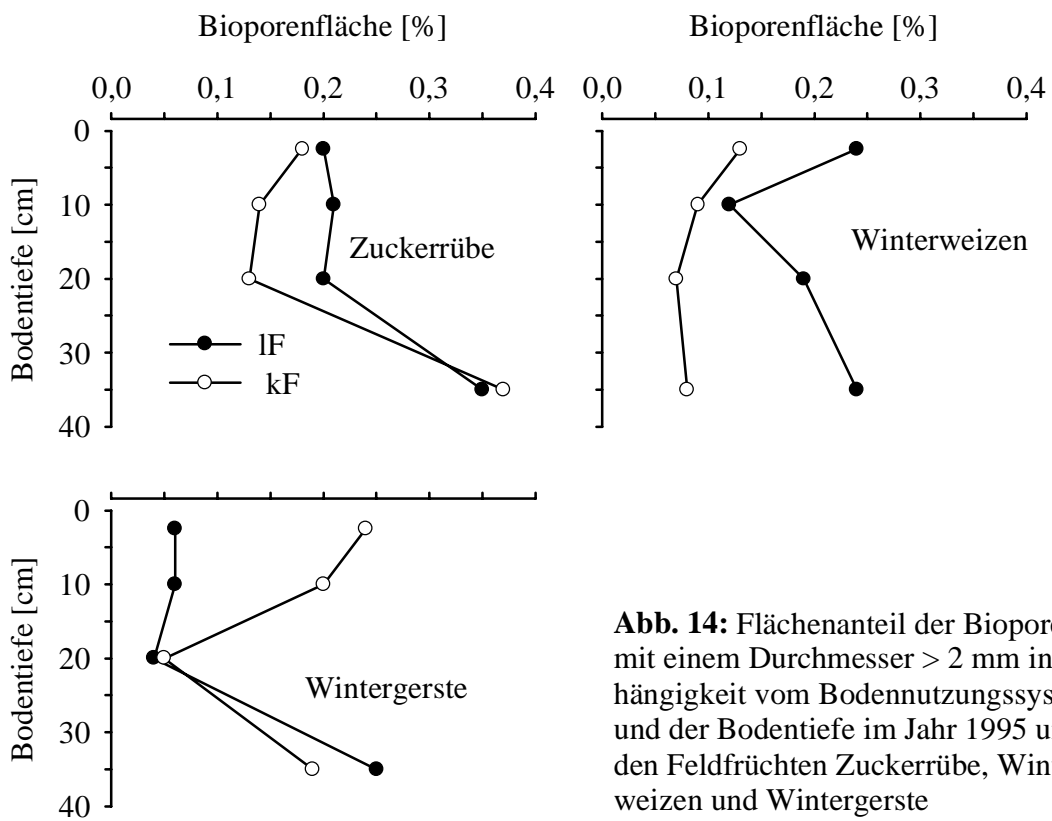
Die Abbildungen 13 und 14 zeigen die Bioporenanzahl und die Flächenanteile der Regenwurmporen in vier Bodentiefen in den Parzellen Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste der langen und kurzen Fruchtfolge.

In der langen Fruchtfolge war im oberen Bodenbereich (0-20 cm) sowohl unter Zuckerrübe als auch unter Winterweizen eine höhere Anzahl Bioporen vorhanden als in der kurzen Fruchtfolge. Mit durchschnittlich 170 Poren unter Zuckerrübe bzw. 160 unter Winterweizen pro m<sup>2</sup> in der lF gegenüber 112 bzw. 80 Poren pro m<sup>2</sup> in der kF waren die Unterschiede sehr deutlich (Abb. 13). Analog dazu war die Porenfläche im oberen Bodenbereich in lF mit ca. 0,2% ebenfalls höher als in kF mit 0,12%.

In den Wintergerstenparzellen zeigt sich ein entgegengesetzter Trend. Hier trat bis in 10 cm Bodentiefe in der kF eine höhere biogene Durchporung des Bodens als unter der lF auf. In der kF sank die Zahl der Bioporen bis in einen Tiefenbereich von 20 cm. Noch deutlicher als die Bioporen-Anzahl nahm unter Wintergerste (kF) die Porenfläche bis in 20 cm Tiefe ab (Abb. 14). Vor allem größere Poren mit einem Durchmesser von 5 bis 8 mm wurden durch die Bodenbearbeitung zerstört. Dieser Effekt konnte in der langen Frucht-



**Abb. 13:** Anzahl Bioporen mit einem Durchmesser > 2 mm in Abhängigkeit vom Bodennutzungssystem und der Bodentiefe im Jahr 1995 unter den Feldfrüchten Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste



**Abb. 14:** Flächenanteil der Bioporen mit einem Durchmesser > 2 mm in Abhängigkeit vom Bodennutzungssystem und der Bodentiefe im Jahr 1995 unter den Feldfrüchten Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste

folge unter Wintergerste nicht nachgewiesen werden. Allerdings war hier die mittlere Bioporen-Anzahl mit 45 pro m<sup>2</sup> im Bearbeitungshorizont sehr gering.

Mit Ausnahme der Winterweizenparzelle (kF) nahmen unterhalb des Bearbeitungshorizontes in allen untersuchten Parzellen Anzahl und Flächenanteil der Bioporen deutlich zu (Abb. 13 und 14). Ausgebildete Regenwurmgänge weisen eine hohe Stabilität auf und können zum Teil viele Jahre alt sein (WILCKE 1953). Wahrscheinlich wurden im Unterboden auch diese älteren Bioporen miteingefasst.

Im Unterboden wurde eine prozentuale Porenfläche zwischen 0,08 (Winterweizen kF) und 0,37 (Zuckerrübe kF) ermittelt (Abb. 14). Unter Annahme kontinuierlich und vertikal verlaufender Bioporen entspricht die Porenfläche in Prozent der Gesamtfläche dem Porenvolumen in Prozent des Gesamtvolumens. Damit nehmen Regenwurmporen selbst in Böden mit hohen Regenwurm-Aktivitätsdichten nur ein sehr geringes Volumen im Vergleich zum Gesamtporenvolumen eines Bodens ein.

## 4.4 Einfluß von Bodennutzung auf die mikrobielle Biomasse und mikrobielle Aktivität des Bodens

### 4.4.1 Gesamtmengen an mikrobieller Biomasse

Der Einfluß der Fruchtarten und des Bodennutzungssystems auf die Menge an mikrobieller Biomasse in den Untersuchungsjahren 1995 und 1996 ist in Tab. 8 dargestellt.

In beiden Jahren waren unter Zuckerrübe und Wintergerste jeweils höhere  $C_{\text{mik}}$ -Mengen in der kF als in der IF zu beobachten. Die Unterschiede waren aber nur unter Wintergerste 1995 und Zuckerrübe 1996 signifikant. Die  $C_{\text{mik}}$ -Mengen unter Winterweizen waren in beiden Fruchtfolgen annähernd gleich. Der niedrigere  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt in der IF unter Wintergerste 1995 läßt sich dadurch erklären, daß das Stroh der Vorfrucht Winterweizen geräumt wird. Im Gegensatz dazu bleibt das Weizenstroh in der kF auf dem Feld und wird eingearbeitet. Diese höhere Zufuhr leicht umsetzbarer organischer Substanz könnte die mikrobielle Biomasse in der kF erhöht haben. Der niedrige  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt in der IF unter Wintergerste von 1995 konnte im Untersuchungsjahr 1996 nicht bestätigt werden. Die niedrigen Mengen an mikrobieller Biomasse unter Zuckerrübe 1995 und 1996 in der IF im Vergleich zu der kF dürften ebenfalls auf die Vorfruchtwirkung zurückzuführen sein. Durch den relativ frühen Erntetermin der Vorfrucht Ackerbohne wird ein Großteil des leicht umsetzbaren Leguminosenstrohs bis zum Herbst mineralisiert und steht der Mikroorganismenpopulation im folgendem Frühjahr nicht mehr als Nahrungsquelle zur Verfügung. Dagegen wird durch die Wickengründung zu Zuckerrübe in der kF dem Boden im Spätherbst eine große Menge leicht abbaubarer organischer Substanz zugeführt. Hier ist eine kurzfristige Wirkung auf die mikrobielle Biomasse unmittelbar zur Hackfrucht im Frühjahr zu erwarten. In beiden Jahren übten in der kF die Fruchtarten keinen signifikanten Einfluß auf die mikrobielle Biomasse des Bodens aus. Alle Werte lagen bei etwa  $1000 \text{ kg } C_{\text{mik}} \text{ ha}^{-1}$ . In der IF wurden dagegen in beiden Jahren zwischen den einzelnen Früchten signifikante Unterschiede festgestellt. Eine direkte Wirkung der organischen Düngung in der IF - Stallmist zu Wintergerste und Stallmist plus Jauche zu Silomais - ist nur 1996 unter Silomais erkennbar. Die Früchte Zuckerrübe, Wintergerste und Ackerbohne der IF zeigten mit etwa  $800 - 900 \text{ kg } C_{\text{mik}} \text{ ha}^{-1}$  1995 signifikant niedrigere Werte als die übrigen Feldfrüchte der IF mit ca.  $1000 \text{ kg } C_{\text{mik}} \text{ ha}^{-1}$ . Im Untersuchungsjahr

1996 bestätigte sich in der IF die geringe Menge an mikrobieller Biomasse unter Zuckerrübe. Hier wurden mit  $770 \text{ kg } C_{\text{mik}} \text{ ha}^{-1}$  signifikant geringere  $C_{\text{mik}}$ -Mengen bestimmt als unter Getreide, Silomais und Ackerbohne.

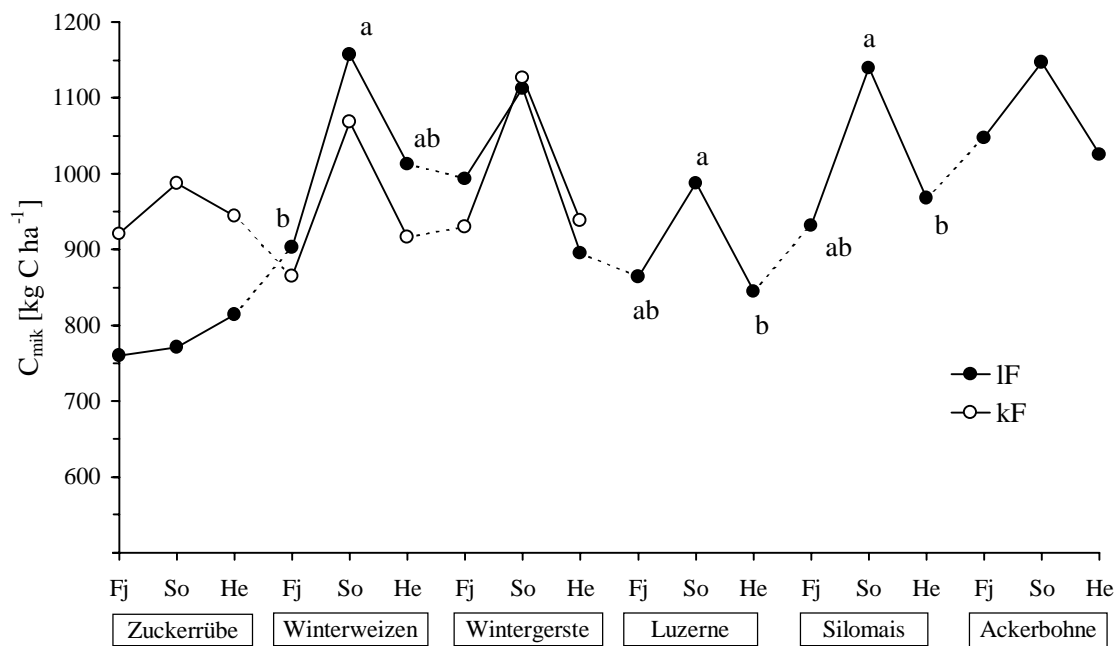
**Tab. 8:** Mengen an mikrobieller Biomasse ( $C_{\text{mik}}$ ) unter den Feldfrüchten der Bodennutzungssysteme (BNS) lange (IF) und kurze (kF) Fruchtfolge 1995 und 1996; Mittelwerte über mehrere Beprobungstermine; unterschiedliche Großbuchstaben bedeuten signifikante Unterschiede zwischen den Früchten innerhalb einer Fruchtfolge eines Untersuchungsjahres (waagerechte Betrachtung); unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Differenzen innerhalb eines Untersuchungsjahres zwischen den Bodennutzungssystemen (senkrechte Betrachtung)

Jahr	BNS	Feldfrucht					Mittelwert	
		Zucker- rübe	Winter- weizen	Winter- gerste ( $\text{kg } C_{\text{mik}} \text{ ha}^{-1}$ ; 0-30 cm Tiefe)	Luzerne	Silo- mais		Acker- bohne
1995	IF	908 C	1011 AB	848 CD b	1048 A	1059 A	770 D	941
	kF	1015	1014	1067 a				1032
1996	IF	769 B b	952 A	991 A	908 AB	1008 A	1075 A	950
	kF	936 a	933	1021				963

Dagegen wurden die relativ geringen  $C_{\text{mik}}$ -Mengen unter Ackerbohne von 1995 ein Jahr später nicht bestätigt. In der IF dürften die Vorfrucht- und/oder Düngungseinflüsse für die Variabilität der  $C_{\text{mik}}$ -Mengen unter den einzelnen Früchten verantwortlich gewesen sein.

#### 4.4.2 Zeitliche Dynamik der mikrobiellen Biomasse innerhalb der Fruchtfolge

Die Menge an mikrobieller Biomasse ist in Abb. 15 unter allen Fruchtarten der beiden Bodennutzungssysteme in der Reihenfolge ihres Anbaues zu drei Terminen des Jahres 1996 dargestellt. Mit der Art der Darstellung sollte für jedes Bodennutzungssystem der Einfluß der Früchte auf die zeitliche Entwicklung der mikrobiellen Biomasse verdeutlicht werden. Dieses Vorgehen war möglich, da im Ackerbau-Systemversuch die Fruchtarten sowohl zeitlich nacheinander als auch räumlich nebeneinander angebaut werden. Die Fruchtwirkung im zeitlichen Nacheinander eines Fruchtfolgeumlaufs sollte durch das örtliche Nebeneinander aufgedeckt werden. Diese Vorgehensweise besitzt den Vorteil, daß Jahreseffekte der Witterung auf die mikrobielle Biomasse ausgeschlossen werden können.



**Abb. 15:**  $C_{mik}$ -Mengen ( $\text{kg C ha}^{-1}$ ; 0-30 cm Tiefe) unter dem Einfluß von Fruchtart und Bodennutzungssystem zu unterschiedlichen Terminen 1996; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Differenzen zwischen den Terminen bei einer Fruchtart; Beprobungstermine: Fj = Frühjahr (April), So = Sommer (Juli), He = Herbst (Oktober)

Insbesondere unter Getreide und Silomais stiegen die  $C_{mik}$  - Mengen vom Frühjahr zum Sommer stark an. Die höchste und signifikante Zunahme von etwa  $250 \text{ kg C}_{mik} \text{ ha}^{-1}$  zeigte sich unter Winterweizen im Bodennutzungssystem IF. Im Vergleich dazu war die zeitliche Dynamik von  $C_{mik}$  unter Zuckerrübe mit einem maximalen Anstieg von etwa  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  gering. Diese Beobachtung verdeutlicht den großen Einfluß von Getreide auf die zeitliche Dynamik von  $C_{mik}$ . Ursächlich dafür könnte die Abgabe von wurzelbürtigen C-Verbindungen (Exsudate, Sekrete, abgestorbene Wurzeln) während der Hauptvegetationszeit sein. Der Anstieg der  $C_{mik}$ -Mengen vom Frühjahr zum Sommer unter Silomais dürfte in der hohen organischen Düngung in Form von Stallmist und Jauche begründet sein. Unter Zuckerrübe (kF), Luzerne, Silomais und Ackerbohne wurde im Herbst in etwa das Frühjahrsniveau wieder erreicht. Dagegen blieben die  $C_{mik}$ -Mengen unter Winterweizen im Herbst über dem Frühjahrsniveau.

Der im Vergleich zu allen anderen Varianten kontinuierliche Anstieg der  $C_{mik}$ -Mengen unter Zuckerrübe (IF) von  $760 \text{ kg ha}^{-1}$  im Frühjahr zu  $814 \text{ kg ha}^{-1}$  im Herbst ist möglicherweise durch die verstärkte Nutzung der organischen Substanz von den Vorfrüchten als Nahrungsgrundlage erklärbar. Unter der Vorfrucht Ackerbohne (IF) wurde in beiden

Versuchsjahren die höchste Menge an  $C_{\text{org}}$  festgestellt (Tab. 3). Somit ist vermutlich eine langfristige Wirkung der organischen Substanz auf die mikrobielle Biomasse unter der Nachfrucht Zuckerrübe (IF) zu erwarten.

#### 4.4.3 Vertikale Verteilung der mikrobiellen Biomasse

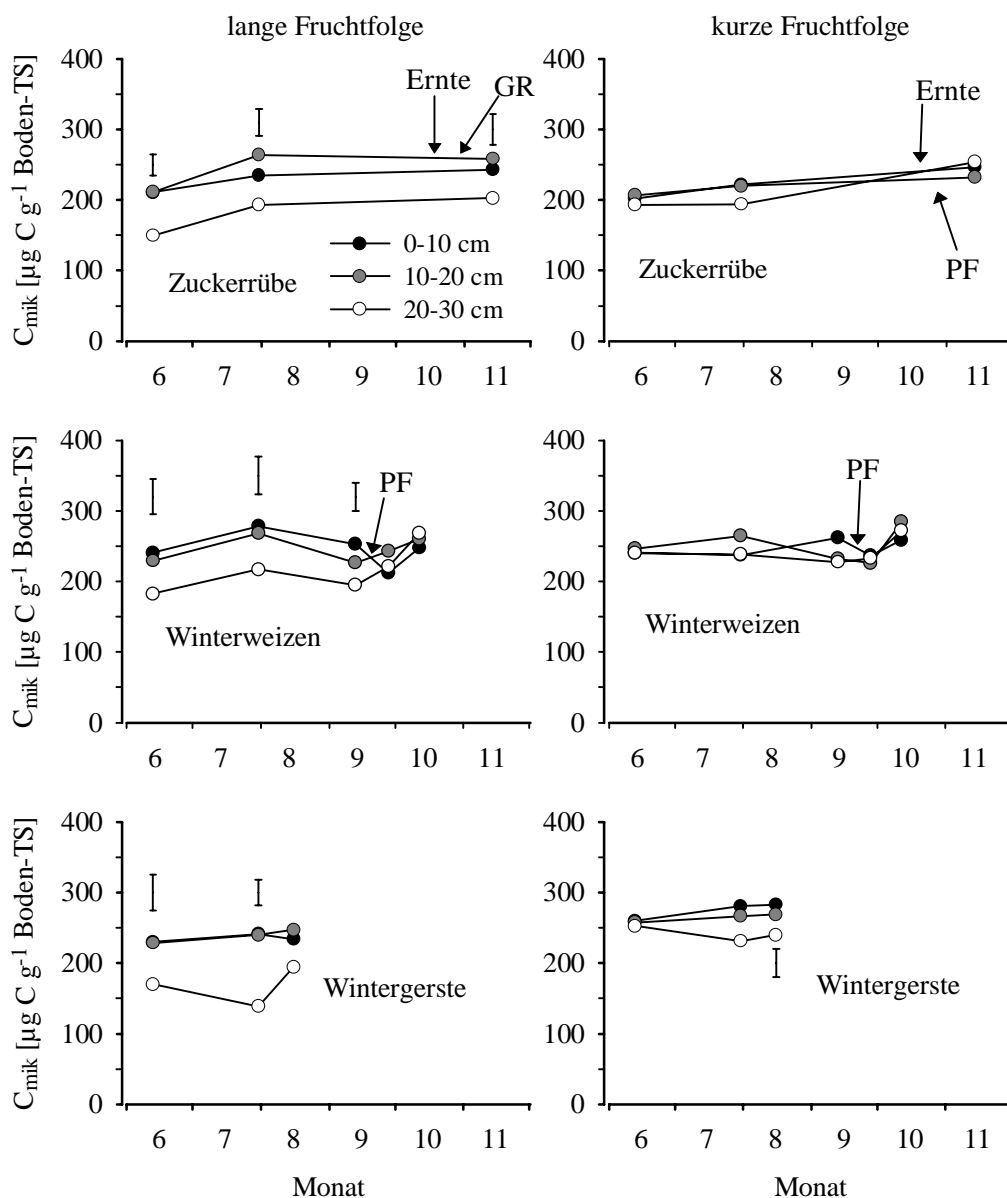
In den Untersuchungsjahren 1995 und 1996 zeigten sich zwischen den beiden Bodennutzungssystemen Unterschiede in der Tiefenverteilung der mikrobiellen Biomasse (Abb. 16, 17 und 18).

Im Gegensatz zur kurzen Fruchtfolge (jährlicher Pflugeinsatz) waren in der IF teilweise signifikante Unterschiede im  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt zwischen den einzelnen Bodenschichten festzustellen. Besonders deutlich waren die Unterschiede zwischen der Bodenschicht 0-10 cm und 20-30 cm unter den Früchten Winterweizen (Abb. 16 und 17), Silomais und Ackerbohne (Abb. 18).

Nach Winterweizen der IF kam es in beiden Jahren erst nach dem Pflugeinsatz im Herbst zu einer gleichmäßigeren Verteilung der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte von durchschnittlich  $247 \mu\text{g C g}^{-1}$  TS innerhalb der Krume (Abb. 16 und 17). Trotz wendender und mischender Bodenbearbeitung mit dem Pflug zu Wintergerste (IF und kF) waren die  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte 1995 in der Bodenschicht 20-30 cm teilweise signifikant niedriger als in der obersten Bodenschicht (Abb. 16). Allerdings betrug die Pflugtiefe in der IF und der kF nur 20 cm. Dagegen wurde im Versuchsjahr 1996 durch das Pflügen zu Wintergerste eine gleichmäßige Verteilung der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte über die gesamte Krume erzielt (Abb. 17).

Möglicherweise wurde die für Wintergerste vorgegebene Pflugtiefe von 20 cm (Tab. 1) nicht eingehalten. Für den Kennwert  $C_{\text{mik}}$  konnte in den Parzellen mit Winterweizen 1995 und 1996 und mit Zuckerrübe 1996 eine Wechselwirkung zwischen den Versuchsfaktoren Bodennutzungssystem und Bodentiefe nachgewiesen werden. Besonders deutlich zeigen dies die Ergebnisse aus dem Versuchsjahr 1996 (Abb. 17). Hier wurden in der Bodenschicht 20-30 cm im Bodennutzungssystem IF unter Zuckerrübe und Winterweizen während der Vegetationszeit im Durchschnitt die niedrigsten, in der kF die höchsten  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte gefunden. Dies dürfte in den unterschiedlichen Bodenbearbeitungstiefen der Bodennutzungssysteme begründet sein. Durch jährliches Pflügen in der kF wird frische organische Substanz in die unterste Bodenschicht der Krume eingebracht. Analog dazu

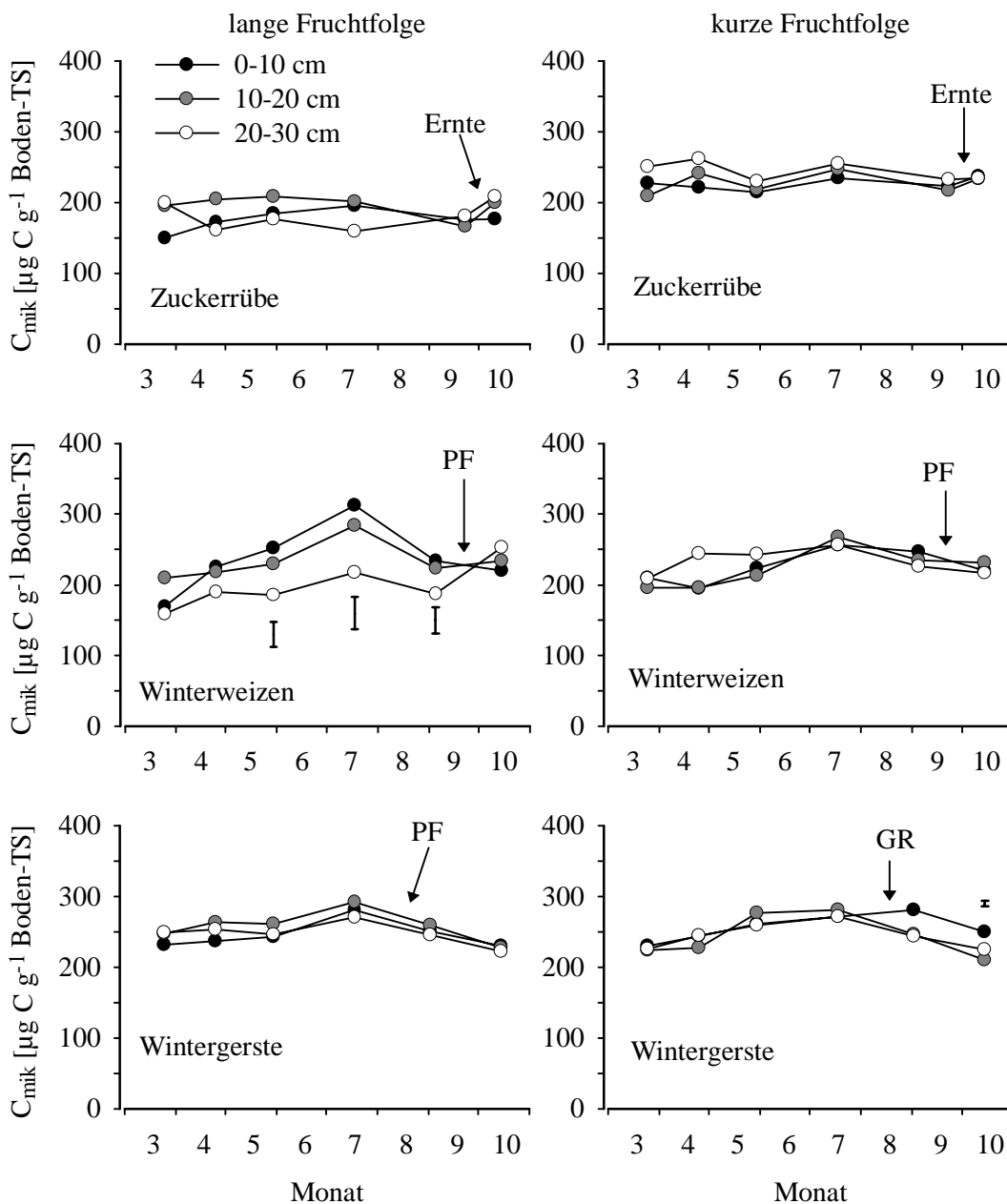
findet sich in 20-30 cm Bodentiefe ein hoher Gehalt an mikrobieller Biomasse. Dagegen verbleibt in der IF infolge der flachen Bodenbearbeitung (Tab. 1) zu Zuckerrübe (Pflug 15 cm) und Winterweizen (Grubber 8 cm) ein Großteil der Ernterückstände in der Bodenschicht 0-10 cm.



**Abb. 16:** Gehalte an mikrobieller Biomasse ( $C_{mik}$ ) in unterschiedlichen Bodentiefen unter Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste in der langen und kurzen Fruchtfolge zu verschiedenen Beprobungsterminen 1995; signifikante Unterschiede im  $C_{mik}$ -Gehalt zwischen einzelnen Bodentiefen sind durch senkrechte Striche (Grenzdifferenz) gekennzeichnet; PF = Wendepflug, GR = Grubber

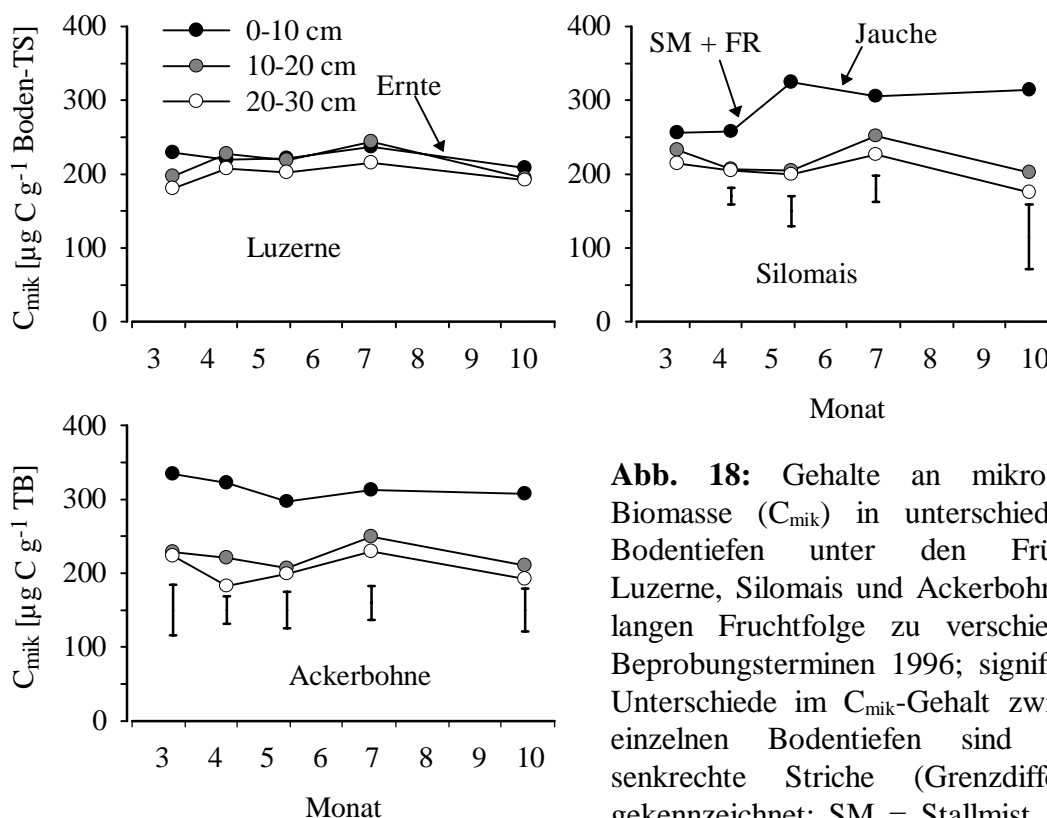


In der Krume unter Luzerne wurde keine unterschiedliche Tiefenverteilung der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte festgestellt (Abb. 18), eine Folge der Pflugfurche (25 cm) zu Luzerne. Im Jahresdurchschnitt über alle Bodentiefen wurde ein  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt von  $213 \mu\text{g C g}^{-1} \text{ TS}$  ermittelt. Auffällig war während des Untersuchungszeitraumes die sehr geringe Dynamik der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte.



**Abb. 17:** Gehalte an mikrobieller Biomasse ( $C_{\text{mik}}$ ) in unterschiedlichen Bodentiefen unter Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste in der langen und kurzen Fruchtfolge zu verschiedenen Beprobungsterminen 1996; signifikante Unterschiede im  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt zwischen einzelnen Bodentiefen sind durch senkrechte Striche (Grenzdifferenz) gekennzeichnet; PF = Wendepflug, GR = Grubber

Zu den Früchten Silomais und Ackerbohne wird auf eine tiefwendende Bodenbearbeitung verzichtet. Hier könnte das oberflächliche Einarbeiten (bis max. 10 cm Tiefe) der Ernterückstände zu einer Erhöhung der  $C_{\text{mik}}$ -Werte in den beiden oberen Bodenschichten geführt haben (Abb. 18).



**Abb. 18:** Gehalte an mikrobieller Biomasse ( $C_{\text{mik}}$ ) in unterschiedlichen Bodentiefen unter den Früchten Luzerne, Silomais und Ackerbohne der langen Fruchtfolge zu verschiedenen Beprobungsterminen 1996; signifikante Unterschiede im  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt zwischen einzelnen Bodentiefen sind durch senkrechte Striche (Grenzdifferenz) gekennzeichnet; SM = Stallmist, FR = Fräse

Unter Silomais stieg nach Stallmistdüngung am 6. 05. 1996 und flacher Bodenbearbeitung der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt in der Bodenschicht 0-10 cm um  $66 \mu\text{g C g}^{-1}$  TS sprunghaft an. Dagegen wiesen die beiden unteren Bodenschichten zum gleichen Beprobungstermin keinen Anstieg auf. Während die Jauchedüngung zwischen dem 3. und 4. Beprobungstermin zu keinem weiteren Anstieg im  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt in der 0-10 cm Bodenschicht führte, erhöhte sich der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt in der 10-20 cm und 20-30 cm Bodenschicht um 86 bzw.  $27 \mu\text{g C g}^{-1}$  TS. Möglicherweise versickert ein Großteil der organischen Bestandteile der Jauche in tiefere Bodenschichten und führt dort zu einem Anstieg der mikrobiellen Biomasse.

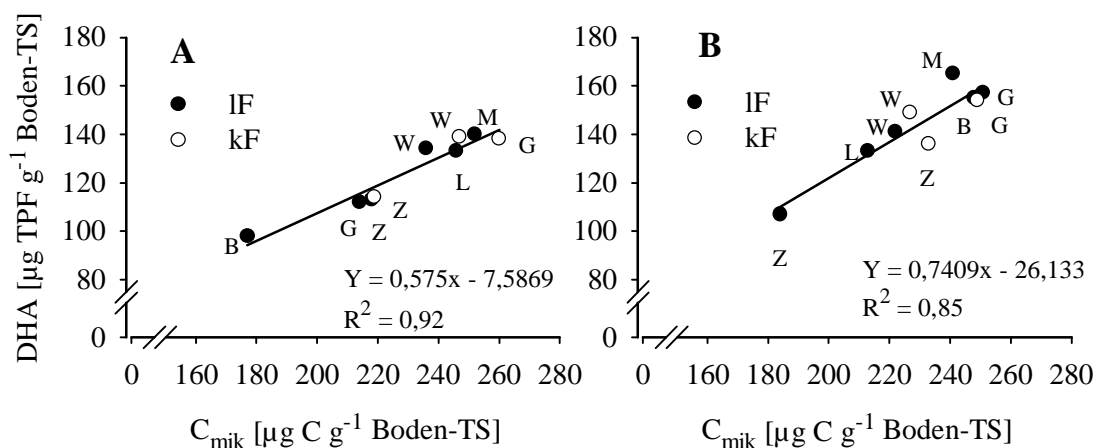
Unter Ackerbohne wurden mit durchschnittlich  $315 \mu\text{g C g}^{-1}$  TS in der obersten Bodenschicht der höchste  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt aller Früchte festgestellt (Abb. 18). Während des gesamten

Untersuchungszeitraums waren in der Bodenschicht 0-10 cm die  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte signifikant höher als im unteren Bereich der Krume mit durchschnittlich  $214 \mu\text{g C g}^{-1}$  TS. Nach Silomais werden zu Ackerbohne die Erntereste nur oberflächlich mit der Fräse eingearbeitet. Durch die geringe Bearbeitungstiefe wird die Tiefenverteilung der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte im Boden nicht verändert (Abb. 18). Unter den Feldfrüchten Luzerne, Silomais und Ackerbohne wurde  $C_{\text{mik}}$  im Versuchsjahr 1995 nur zwei Terminen bestimmt. Deshalb wurde auf eine Darstellung der Ergebnisse für das Jahr 1995 verzichtet.

#### 4.4.4 Dehydrogenaseaktivität

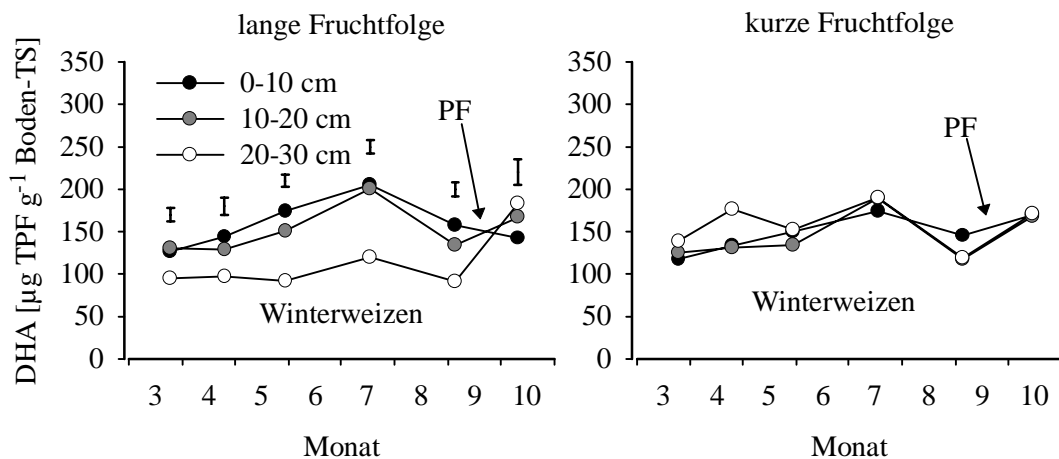
Zusätzlich zum  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt wurde die Dehydrogenaseaktivität (DHA) des Bodens als Maß für die mikrobielle Aktivität bestimmt. Die DHA entwickelte sich ganz ähnlich wie die  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte. Das ist auf die intrazelluläre Wirkungsweise der Dehydrogenasen zurückzuführen. In Abb. 19 sind die Zusammenhänge zwischen der mikrobiellen Biomasse und der DHA für die Untersuchungsjahre 1995 und 1996 mit Hilfe von Regressionsgeraden beschrieben.

Die dargestellten Werte sind Mittelwerte aller Beprobungstermine eines Jahres unter den jeweiligen Feldfrüchten der IF und kF. In beiden Untersuchungsjahren bestand eine sehr enge Korrelation zwischen der mikrobiellen Biomasse ( $C_{\text{mik}}$ ) und der DHA mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,92 bzw. 0,85 (Abb. 19).



**Abb. 19:** Zusammenhang zwischen der mikrobiellen Biomasse ( $C_{\text{mik}}$ ) und der Dehydrogenaseaktivität (DHA) unter den Früchten der langen und kurzen Fruchtfolge im Untersuchungsjahr 1995 (A) und 1996 (B); Durchschnittswerte aus 0 - 30 cm Tiefe im Mittel über alle Beprobungstermine; Z = Zuckerrübe, W = Winterweizen, G = Wintergerste, L = Luzerne, M = Silomais, B = Ackerbohne

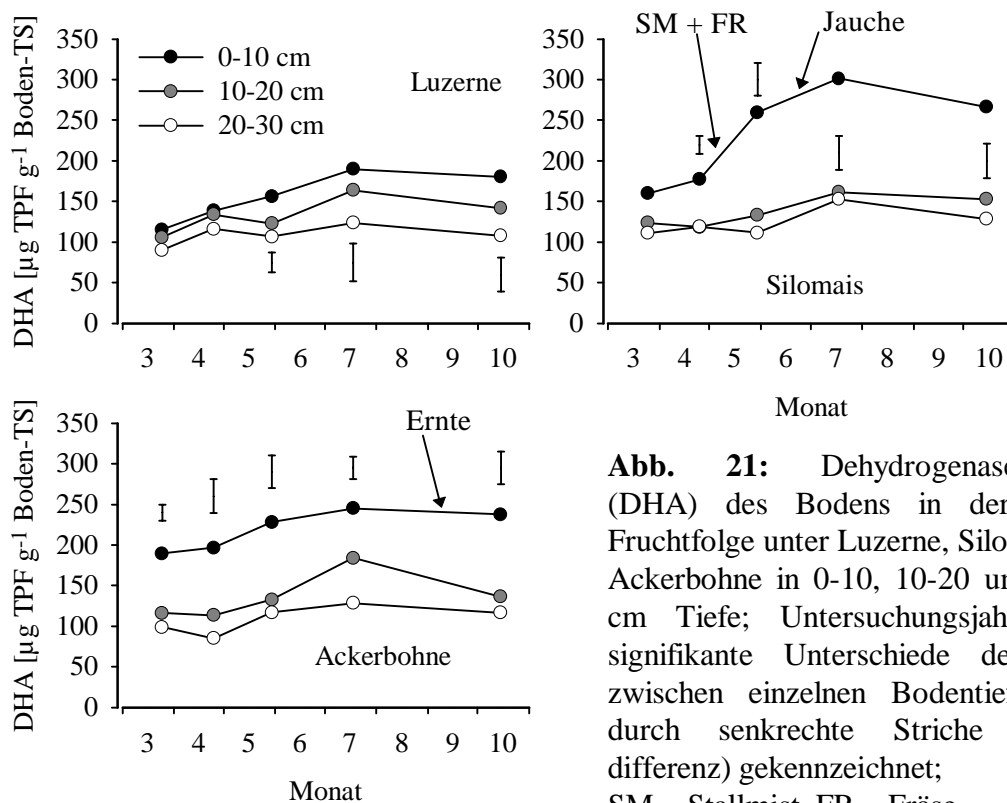
Entsprechend der engen Korrelation verlief die zeitliche Dynamik und die Tiefenverteilung der DHA 1995 und 1996 grundsätzlich analog zu den bereits dargestellten  $C_{\text{mik}}$ -Gehalten. Exemplarisch ist deshalb die DHA nur unter Winterweizen 1996 in Abb. 20 dargestellt.



**Abb. 20:** Einfluß des Bodennutzungssystems (lange und kurze Fruchtfolge) auf die Dehydrogenaseaktivität (DHA) des Bodens unter Winterweizen in 0-10, 10-20 und 20-30 cm Tiefe; Untersuchungsjahr 1996; signifikante Unterschiede im  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt zwischen den Bodentiefen sind durch senkrechte Striche (Grenzdifferenz) gekennzeichnet; PF = Wendepflug

Analog zum  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt 1996 (Abb. 17) bildete sich unter Winterweizen in der IF in der DHA ein deutlicher Tiefengradient (Abb. 20). Über die gesamte Vegetationsperiode wies die oberste Bodenschicht eine signifikant höhere DHA auf als die Bodenschicht 20-30 cm. Im Juli wurde in den Bodenschichten 0-10 cm und 10-20 cm eine um 70% höhere DHA bestimmt als in der untersten Bodenschicht. Erst durch den Pflugeinsatz im September kam es zu einer Umschichtung und somit auch zu einer gleichmäßigeren Verteilung der DHA auf die drei Bodenschichten. Dagegen zeigte sich in der kF über den gesamten Beprobungszeitraum eine relativ homogene Aktivitätsverteilung über die gesamte Krumentiefe, wobei die höchste DHA zu den ersten zwei Beprobungsterminen in der untersten Bodenschicht bestimmt wurde. Wie für  $C_{\text{mik}}$  konnte für die DHA unter Winterweizen 1996 eine Wechselwirkung zwischen den Versuchsfaktoren Bodennutzungssystem und Bodentiefe festgestellt werden.

Geringe Unterschiede in der Entwicklung von DHA und  $C_{\text{mik}}$  zeigten sich unter Luzerne und Silomais 1996 im Bodennutzungssystem lange Fruchtfolge (vgl. Abb. 21 mit Abb. 18).



**Abb. 21:** Dehydrogenaseaktivität (DHA) des Bodens in der langen Fruchtfolge unter Luzerne, Silomais und Ackerbohne in 0-10, 10-20 und 20-30 cm Tiefe; Untersuchungs-jahr 1996; signifikante Unterschiede der DHA zwischen einzelnen Bodentiefen sind durch senkrechte Striche (Grenzdifferenz) gekennzeichnet; SM = Stallmist, FR = Fräse

Im Gegensatz zum  $C_{mik}$ -Gehalt (Abb.18) bildete sich für die DHA unter Luzerne im Verlauf der Vegetation ein Tiefengradient. Die DHA stieg unter Luzerne in der Bodenschicht 0-10 cm vom Frühjahr bis zum Sommer kontinuierlich an, während in 20-30 cm Bodentiefe die DHA nahezu konstant blieb. Ab dem dritten Probetermin (30. Mai) wies die oberste Bodenschicht eine signifikant höhere DHA auf als in 20-30 cm Tiefe.

Während die mikrobielle Biomasse 1996 unter Silomais in der Schicht 0-10 cm im Verlauf der Vegetationszeit um etwa 20% zunahm (Abb. 18), zeigten die Werte für die DHA (0-10 cm) im gleichen Zeitraum ein Zunahme von ca. 90% (Abb. 21). In der Variante Silomais wurde also im Vergleich zum Gehalt an mikrobieller Biomasse ein überproportionaler Anstieg der DHA in der Bodenschicht 0-10 cm festgestellt. Offenbar reagierte die vorhandene mikrobielle Biomasse auf die organische Düngung zu Silomais stärker mit einer Aktivitätssteigerung als mit dem Aufbau neuer mikrobieller Biomasse.

#### 4.4.5 CO<sub>2</sub>-Freisetzung im Feld

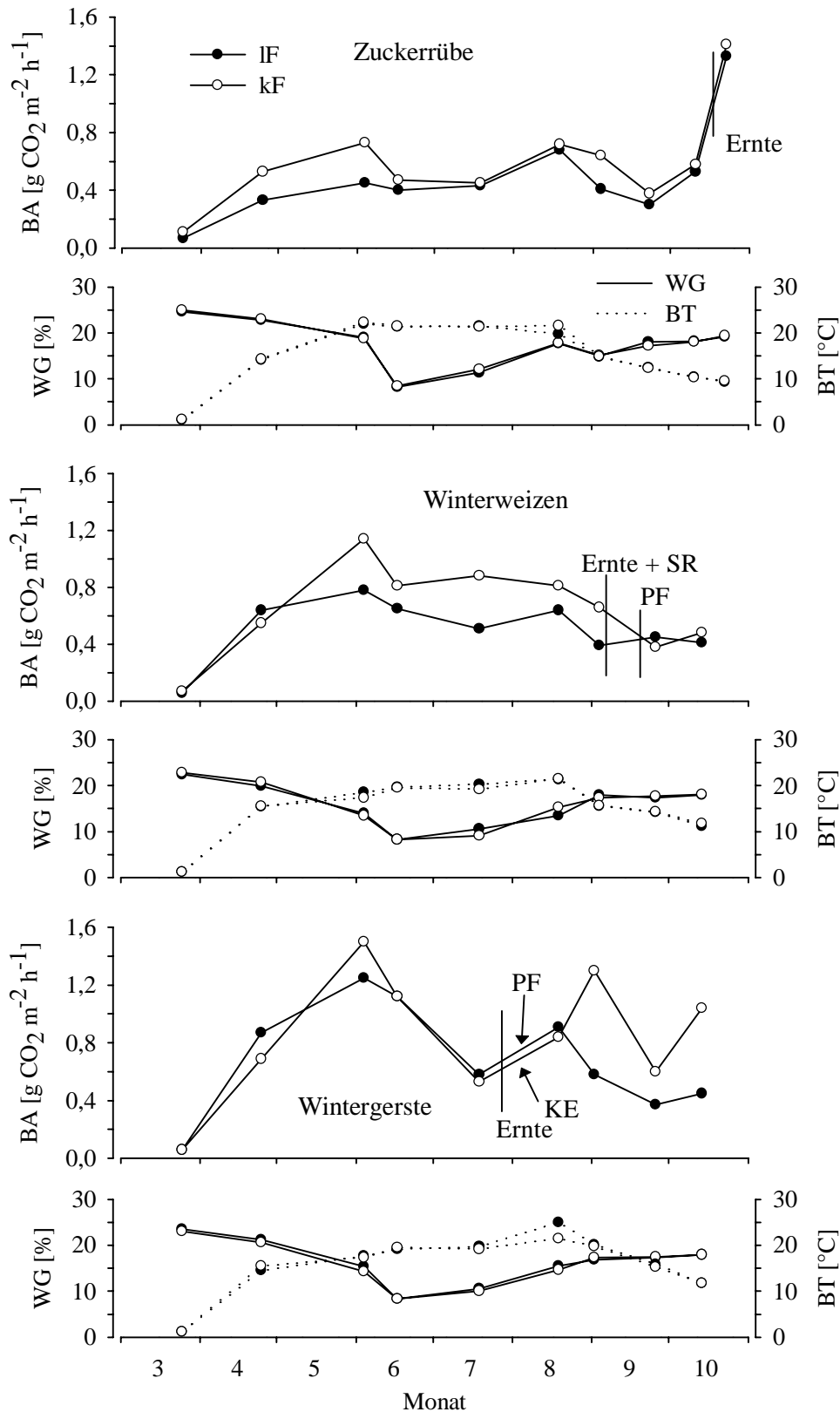
Während der Vegetationszeit 1996 und 1997 wurde in beiden Bodennutzungssystemen unter Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste die CO<sub>2</sub>-Freisetzung im Feld mittels tragbarem Porometer bestimmt. Die CO<sub>2</sub>-Produktion wird im Feld sowohl durch mikrobielle Abbauprozesse als auch durch die Wurzelatmung verursacht. Dabei wird im Freiland die CO<sub>2</sub>-Freisetzung eines Bodens stark von der Bodentemperatur und -feuchte sowie von der Zufuhr und Stabilität der organischen Substanz beeinflusst.

Die Bestimmung der Bodenatmung vor Ort mittels Kurzzeitmessungen besitzt gegenüber Labormessungen den großen Vorteil, daß die erfaßten CO<sub>2</sub>-Werte die aktuelle mikrobielle Aktivität einschließen. Allerdings läßt sich auf bewachsenen Böden kaum zwischen Bodenatmung und Wurzelatmung unterscheiden. Schätzungen über den Anteil der Wurzelatmung an der Gesamt-CO<sub>2</sub>-Entbindung schwanken daher in weiten Grenzen zwischen 15% (COLEMAN 1973) und mehr als 60% (WITKAMP & FRANK 1969). SAUERBECK et al. (1976) stellten in Klimakammerversuchen mit <sup>14</sup>C-markierten Weizen einen Anteil der Wurzelatmung von 20% an der Gesamtatmung fest.

Zu den Zeitpunkten der Bodenatmungsmessung befanden sich die Vergleichsfrüchte (Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste in IF und kF) in demselben Entwicklungsstadium. Somit dürfte das Wurzelsystem in beiden Bodennutzungssystemen jeweils ähnlich weit entwickelt gewesen sein. Daraus kann geschlossen werden, daß die Unterschiede in der Wurzelatmung zwischen den beiden Fruchtfolgen gering sein dürften, und gemessene Unterschiede in der gesamten CO<sub>2</sub>-Abgabe vornehmlich auf Unterschiede in der mikrobiellen Aktivität beruhen.

Bodenfeuchte und Bodentemperatur üben einen großen Einfluß auf die mikrobielle Aktivität aus. Deshalb wurde parallel zu jeder Bestimmung der Bodenatmung der Bodenwassergehalt und die Bodentemperatur erfaßt. Dabei traten zwischen den Bodennutzungssystemen keine nennenswerten Unterschiede in der Bodenfeuchte und -temperatur auf (Abb. 22 und 23).

Unterschiede im CO<sub>2</sub>-Flux zwischen den beiden Bodennutzungssystemen dürften somit überwiegend auf Unterschiede in der mikrobiellen Aktivität oder auf solche in der mikrobiellen Biomasse zurückzuführen sein.



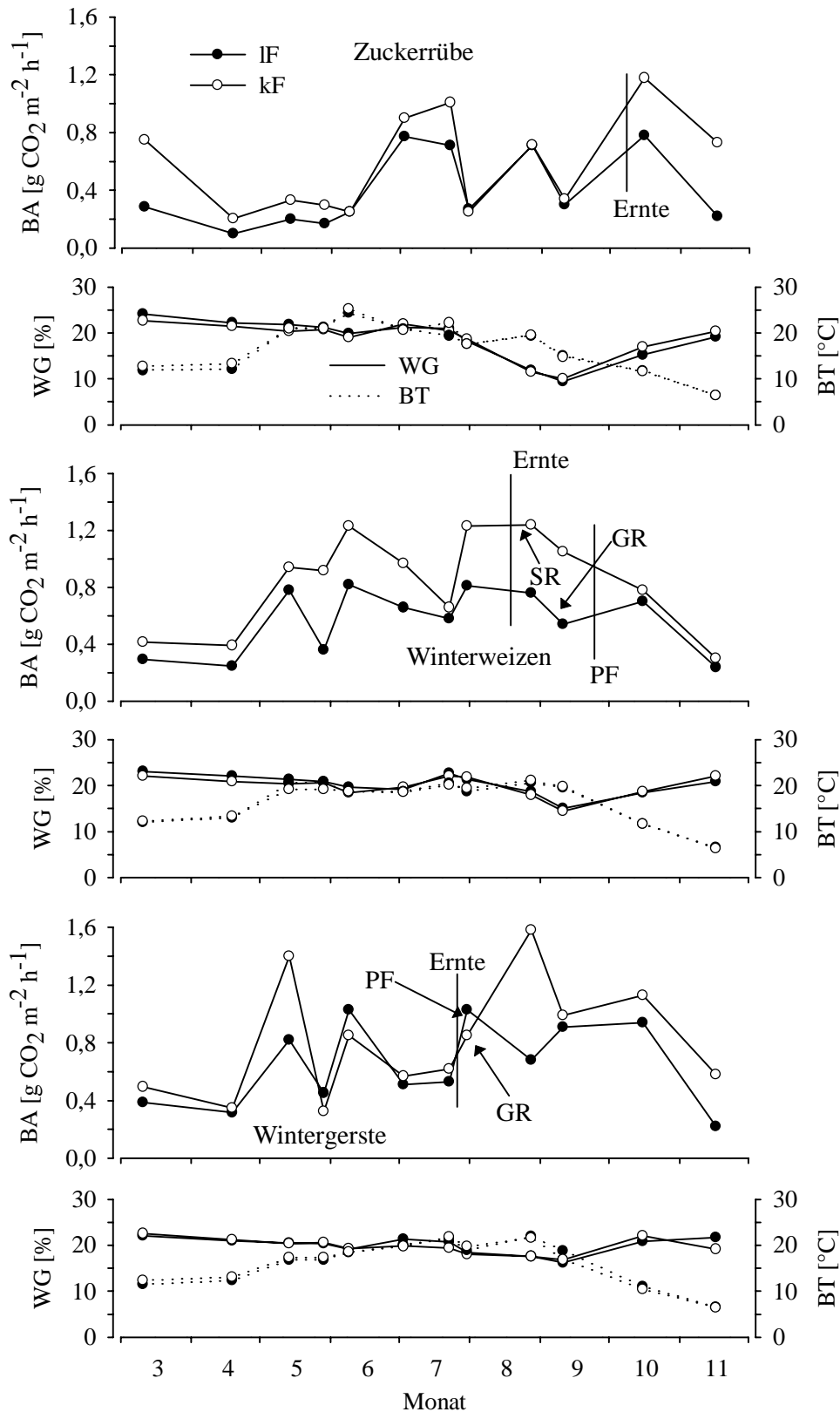
**Abb. 22:** Bodenatmung (BA) zu verschiedenen Untersuchungsterminen 1996 in den Zuckerrüben-, Winterweizen- und Wintergerstenparzellen der langen (lF) und kurzen (kF) Fruchtfolge; zusätzlich angegeben sind die gravimetrischen Bodenwassergehalte (WG) in 0-30 cm Tiefe und die Bodentemperatur (BT) in 5 cm Tiefe; SR = Spatenrollegge, PF = Wendepflug, KE = Kreiselegge

Der Verlauf der Bodenatmung unter Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste für die Jahre 1996 und 1997 ist in Abb. 22 und 23 dargestellt. Im Jahr 1996 stieg in den Zuckerrübenparzellen in beiden Bodennutzungssystemen die CO<sub>2</sub>-Freisetzung von März bis Anfang Juni an (Abb. 22). Die CO<sub>2</sub>-Entbindung war dabei bis zum dritten Untersuchungstermin (4.06.) in der kF deutlich höher als in IF. Im weiteren Verlauf des Jahres zeigten sich nur geringe Unterschiede in der Bodenatmung zwischen den Fruchtfolgen. In den Monaten Juni und Juli ging die Bodenatmungsrate unter Zuckerrübe vermutlich aufgrund der geringen Bodenfeuchte in beiden Fruchtfolgen leicht zurück. Nach der Rübenernte am 14.10. kam es zu einem sprunghaften Anstieg der CO<sub>2</sub>-Freisetzung trotz niedriger Bodentemperaturen von ca. 9 °C. Durch das Roden der Rüben wurde der Boden stark aufgelockert und durchmischt. Dies führte offensichtlich zu einem starken Anstieg der mikrobiellen Aktivität.

Unter Winterweizen und Wintergerste stieg die CO<sub>2</sub>-Freisetzung im Frühjahr 1996 ebenfalls deutlich an. Besonders ausgeprägt war der Anstieg in den Parzellen Winterweizen und Wintergerste in der kF. Die Werte stiegen von ca. 0,06 bis auf 1,14 bzw. 1,58 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Nach den höchsten CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten Anfang Juni nahm die CO<sub>2</sub>-Freisetzung unter Winterweizen und Wintergerste in beiden Fruchtfolgen ab. Vermutlich wurde die Mikroorganismenaktivität durch die geringen Bodenwassergehalte in den Monaten Juni und Juli gehemmt (Abb. 22). Unter Wintergerste war die Abnahme der Bodenatmung während der Jahresmitte im Vergleich mit Winterweizen und Zuckerrübe am höchsten. In den Winterweizenparzellen nahm die Bodenatmung ab Anfang Juni stetig bis in den Herbst ab. Dagegen stiegen nach der Trockenperiode im Sommer die CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten unter Wintergerste vorübergehend wieder an. Besonders ausgeprägt war der Anstieg in der Parzelle Wintergerste kF. Vermutlich führte die flache Bodenbearbeitung mit der Kreiselegge in der kF am 4.08. zu einem starken Anstieg der mikrobiellen Aktivität. Dagegen kam es in der Wintergerstenparzelle (IF) nach tiefwendender Bodenbearbeitung nur zu einem geringen Anstieg der Bodenatmung.

Der Verlauf der Bodenatmung im Untersuchungsjahr 1997 zeigt eine deutlich größere saisonale Variation als 1996 (Abb. 23). Die relativ hohe Bodentemperatur am ersten Probestern 1997 (Abb. 23) bewirkte unter allen drei Feldfrüchten gegenüber 1996 eine deutlich höhere Bodenatmung. Ähnlich wie 1996 zeigten die Zuckerrübenparzellen besonders bis





**Abb. 23:** Bodenatmung (BA) zu verschiedenen Untersuchungsterminen 1997 in den Zuckerrüben-, Winterweizen- und Wintergerstenparzellen der langen (lF) und kurzen (kF) Fruchtfolge; zusätzlich angegeben sind die gravimetrischen Bodenwassergehalte (WG) in 0-30 cm Tiefe und die Bodentemperatur (BT) in 5 cm Tiefe; SR = Spatenrolle, PF = Wendepflug, GR = Grubber

Anfang Juni eine Differenzierung der beiden Fruchtfolgen in der CO<sub>2</sub>-Freisetzung. Dabei wurden wie schon 1996 in der kF deutlich höhere Bodenatmungsraten bestimmt als in der IF. Die höhere CO<sub>2</sub>-Entbindung in der ersten Jahreshälfte dürfte in der kurzzeitigen Wirkung der Wickengründung zu Zuckerrübe in der kF begründet sein. Im weiteren Verlauf des Jahres glichen sich die beiden Fruchtfolgen unter Zuckerrübe in der Bodenatmung an. In den Winterweizenparzellen der kF lag die CO<sub>2</sub>-Freisetzung 1997 über den gesamten Beprobungszeitraum von März bis November höher als in der IF. Die höhere CO<sub>2</sub>-Entbindung ist möglicherweise eine Folge intensiver Bodenlockerung und Einmischung der Erntereste in der kurzen Fruchtfolge. In der Wintergerstenvariante war analog zu 1996 dagegen keine einheitliche Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung zu beobachten.

Obwohl über den gesamten Beprobungszeitraum 1997 ausgeglichene Bodenfeuchten und -temperaturen vorlagen, kam es zu deutlichen Unterschieden in der Höhe der CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten zwischen einzelnen Probeterminen. Vermutlich führten selbst kleine Veränderungen im Bodenwassergehalt zu großen Unterschieden im CO<sub>2</sub>-Flux. Die geringen Bodenatmungsraten Ende Juli 1997 könnten möglicherweise durch die hohen Bodenfeuchten von über 20% gravimetrischer Wassergehalt in 0-30 cm Tiefe verursacht worden sein. Die hohen Bodenwassergehalte könnten die Diffusion des CO<sub>2</sub> stark herabgesetzt und somit den CO<sub>2</sub>-Flux gesenkt haben. Während der Untersuchungszeiträume 1996 und 1997 wurden im Durchschnitt aller Untersuchungstermine in den Parzellen der kurzen Fruchtfolge (Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste) mit 0,55, 0,74 und 0,83 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> mehr CO<sub>2</sub> freigesetzt als in den entsprechenden Parzellen der langen Fruchtfolge mit 0,40, 0,55 und 0,67 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Damit war die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Freisetzung in der kurzen Fruchtfolge um etwa 0,17 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> höher als in der IF. Beim Vergleich der Feldfrüchte miteinander wurde unter Zuckerrübe die niedrigste, bei Wintergerste (+ Wickengründung bis Herbst) die höchste durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Entbindung festgestellt. Damit verlief die CO<sub>2</sub>-Entwicklung in der IF 1996 und 1997 annähernd parallel zu den C<sub>mik</sub>-Mengen 1996 (Tab. 8) und der DHA (nicht dargestellt). In der kF konnte diese Beziehung nicht festgestellt werden.

Der CO<sub>2</sub>-Flux variierte im Untersuchungszeitraum zwischen 0,02 und 1,58 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Die niedrigsten Bodenatmungsraten wurden im Frühjahr 1996 bei geringen Boden-

temperaturen nahe 0 °C festgestellt. Der Einfluß der Bodenwassergehalte auf die Bodenatmung zeigte sich besonders deutlich im Sommer 1996. Im Juni und Juli nahm die Bodenatmung unter allen Feldfrüchten durch fallende Bodenwassergehalte deutlich ab.

#### 4.4.6 $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis

Um Hinweise auf die Humusqualität und die mikrobielle Verfügbarkeit der organischen Substanz zu erhalten, wurde das  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis berechnet. Je größer dieser Quotient ist, desto höher ist der Anteil des mikrobiell verfügbaren Kohlenstoffs im Verhältnis zum Anteil des schwer abbaubaren Humus (ANDERSON & DOMSCH 1986).

Tabelle 9 zeigt die  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten (%) für die Bodennutzungssysteme lange und kurze Fruchtfolge. Nutzungsbedingte Unterschiede lassen sich anhand des  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnisses nur bedingt feststellen. Tendenziell war der Anteil mikrobieller Biomasse am organischen Kohlenstoff des Bodens in der kurzen Fruchtfolge mit einem durchschnittlichen Quotienten von 2,1% höher als in der langen Fruchtfolge mit 1,9%. Signifikant verschieden waren die Werte zwischen den Bodennutzungssystemen unter Zuckerrübe. Hier lag der durchschnittliche  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotient in der IF bei 1,6, in der kF bei 2,2. Der relativ hohe Wert für das  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis in der kF könnte auf die Zufuhr frischer organischer Substanz in Form von Wickengründung zu Zuckerrübe (kF) zurückzuführen sein. Im Gegensatz dazu wird in der IF durch die frühe Ernte der Ackerbohne bereits ein Großteil der mikrobiell leicht verfügbaren Fraktion der organischen Substanz im Bohnenstroh bis zum Frühjahr mineralisiert. Somit kommt es zu einem Abfall der mikrobiellen Biomasse im Verlauf der Fruchtfolge von Ackerbohne zu Zuckerrübe (Abb. 15), was sich in einem relativ niedrigen  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotient widerspiegelt (Tab 9).

Deutlich wird der Einfluß der Bodenbearbeitung in den beiden Bodennutzungssystemen wiedergegeben. Bei allen drei Früchten der kF ist das größte  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis mit durchschnittlich 2,3% in der untersten Bodenschicht zu finden. Durch das 30 cm tiefe Pflügen wird der größte Teil der jeweiligen Erntereste in die Schicht 20-30 cm eingebracht. Analog zum Maximum an leicht umsetzbarer organischer Substanz fand sich auch ein Maximum im  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis.

Umgekehrte Verhältnisse zeigen sich dagegen unter den drei Früchten Winterweizen, Silomais und Ackerbohne in der IF. Hier wurden die höchsten Werte jeweils in der Boden-

schicht 0-10 cm bestimmt. Zu allen drei Früchten wurde der Boden nur maximal 8 cm tief bearbeitet. Somit wurde der größte Teil der Ernterückstände in 0-10 cm Bodentiefe eingearbeitet. Dementsprechend zeigen die Bodenschichten 10-20 cm und 20-30 cm niedrigere  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnisse. Zweimalig aufeinanderfolgender Verzicht auf tiefwendende Bodenbearbeitung führte unter Ackerbohne zu besonders großen Differenzen im  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten zwischen oberster (2,3%) und unterster (1,6%) Bodenschicht. In Tab. 9 zeigt sich ein leichter Anstieg der Werte innerhalb der IF von Winterweizen zu Wintergerste. Möglicherweise führte die Stallmistdüngung zu Wintergerste (IF) zu einem im Vergleich zum  $C_{\text{org}}$ -Gehalt überproportionalen Anstieg der mikrobiellen Biomasse und somit zu einem höheren  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten.

**Tab. 9:**  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten in Abhängigkeit von Bodennutzungssystem (BNS), Feldfrucht und Bodentiefe; April 1996; Mittelwerte über drei Wiederholungen; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Bodennutzungssystemen (senkrechte Betrachtung); unterschiedliche Großbuchstaben bedeuten signifikante Differenzen zwischen den Früchten innerhalb einer Fruchtfolge (waagerechte Betrachtung); IF = lange Fruchtfolge, kF = kurze Fruchtfolge

BNS	Tiefe	Feldfrucht					
		Zucker- rübe	Winter- weizen	Winter- gerste	Luzerne	Silomais	Acker- bohne
		$C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ in %					
<b>IF</b>	0-10 cm	1,6	2,0	2,0	1,9	2,1	2,3
	10-20 cm	1,8	1,8	2,2	2,1	1,7	1,9
	20-30 cm	1,5	1,7	2,1	2,0	1,8	1,6
	<b>0-30 cm</b>	<b>1,6</b> B b	<b>1,8</b> AB	<b>2,1</b> A	<b>2,0</b> A	<b>1,9</b> AB	<b>1,9</b> AB
<b>kF</b>	0-10 cm	2,1	1,9	2,1			
	10-20 cm	2,2	1,9	2,0			
	20-30 cm	2,4	2,3	2,3			
	<b>0-30 cm</b>	<b>2,2</b> a	<b>2,0</b>	<b>2,1</b>			

#### 4.4.7 Einfluß der Bodennutzung auf den metabolischen Quotienten

Der metabolische Quotient ( $q\text{CO}_2$ ) ist ein wichtiger Kennwert zur physiologischen Charakterisierung der mikrobiellen Biomasse. Unter Gleichgewichtsbedingungen dient er

zur Beurteilung der Effizienz der mikrobiellen Substratnutzung (JOERGENSEN 1995). Unter Freilandbedingungen ist der  $qCO_2$  ein empfindlicher Parameter für den Einfluß von Bodennutzung (ANDERSON & DOMSCH 1990). Damit können die Wirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungsintensitäten auf die spezifischen Atmungsraten der mikrobiellen Biomasse im Boden untersucht werden. Unterschiedliche Bewirtschaftungsintensitäten wirken nicht nur auf die Menge an mikrobieller Biomasse, sondern auch auf die Effizienz der Substratnutzung. Der  $qCO_2$  errechnet sich aus der  $CO_2$ -Freisetzungsrate pro Einheit mikrobieller Biomasse (0-30 cm Tiefe).

Die ermittelten  $qCO_2$  der beiden Bodennutzungssysteme sind in Tab. 10 vergleichend gegenübergestellt. Der  $qCO_2$  (0-30 cm) war in der kF höher als in der IF. Dabei waren die Werte für den  $qCO_2$  im Verlauf der langen Fruchtfolge relativ konstant und erreichten Quotienten zwischen 35 und 47. Dagegen stiegen in der kF die Quotienten im Verlauf der Fruchtfolge Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste von 40 auf 70 deutlich an. Dieser Sachverhalt verdeutlicht noch einmal den großen Einfluß der Wickengründung zu Zuckerrübe. Durch den späten Umbruch der Wicke im Herbst stehen den Mikroorganismen im nachfolgenden Frühjahr relativ große Mengen leicht verfügbarer organischer Verbindungen zur Verfügung. Dies dürfte zu dem relativ niedrigen metabolischen Quotienten unter Zuckerrübe innerhalb der kurzen Fruchtfolge geführt haben. HAIDER & GRÖBLINGHOFF (1990) sowie BECK (1990) stellten ebenfalls niedrigere spezifische Aktivitäten der Bodenmikroorganismen in Böden mit leicht abbaubaren organischen Verbindungen fest.

Die niedrigeren metabolischen Quotienten in der IF gegenüber der kF deuten auf eine effizient und leicht nutzbare organische Bodensubstanz hin. Im Widerspruch hierzu stehen allerdings die relativ niedrigen  $C_{mik}/C_{org}$ -Verhältnisse in der langen Fruchtfolge (Tab. 9), besonders der Variante Zuckerrübe. Sie deuten auf einen geringeren Anteil mikrobiell verfügbaren Kohlenstoffs in IF gegenüber kF hin.

Nach ANDERSON & DOMSCH (1986) leitet sich aus dem  $C_{mik}/C_{org}$ -Verhältnis ab, in welchem Umfang der  $C_{org}$  der Verwertung durch Mikroorganismen zugänglich ist. Niedrige  $C_{mik}/C_{org}$ -Quotienten weisen auf eine schlechte Verfügbarkeit der organischen Substanz für die Mikroorganismen hin.

**Tab. 10:** Metabolischer Quotient in Abhängigkeit von Bodennutzungssystem (BNS) und Feldfrucht im Jahr 1996; Mittelwerte über mehrere Beprobungstermine; lange Fruchtfolge = lF, kurze Fruchtfolge = kF

BNS	Feldfrucht					
	Zuckerrübe	Winterweizen	Wintergerste	Luzerne	Silomais	Ackerbohne
	mg CO <sub>2</sub> -C g <sup>-1</sup> C <sub>mik</sub> d <sup>-1</sup>					
<b>lF</b>	35	36	47	47	44	47
<b>kF</b>	40	54	70			

Eine mögliche Ursache für die widersprüchlichen Befunde zwischen den  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten (Tab. 9) und den metabolischen Quotienten (Tab. 10) könnte eine unterschiedliche mikrobielle Populationsstruktur zwischen den beiden Bodennutzungssystemen sein. Die mikrobielle Biomasse baut offenbar die vorhandene organische Bodensubstanz unter den Früchten der kF stärker und ineffizienter ab als unter den Früchten der lF.

#### 4.5 Ertrag der Feldfrüchte

Zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit eines Systems ist neben der Produktivität (Ertragsleistung pro Fläche) die Stabilität der Erträge über die Zeit von großer Bedeutung (DABBERT 1994). Die Höhe der Ertragsschwankungen kann mit Hilfe des Variationskoeffizienten (VK), der die Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert charakterisiert, bestimmt werden. Der VK berücksichtigt dabei - anders als die Standardabweichung - die unterschiedlich hohen Mittelwerte.

Um Auswirkungen des Bodennutzungssystems auf die Stabilität der Erträge zu erfassen, wurde deshalb neben den einzelnen Jahreserträgen der Feldfrüchte der VK berechnet. Er gibt die prozentuale Streuung der Ertragswerte um den Mittelwert in den Versuchsjahren 1982 bis 1996 an.

Es werden die Ertragsdaten des N-Düngeverfahrens N-fix des Ackerbau-Systemversuches der Jahre 1982 bis 1996 dargestellt. Bei diesem Düngungssystem wird im Ablauf der Fruchtfolge stets die gleiche Düngungsstufe (N0 = ohne, N1 = suboptimal, N2 = optimal und N3 = hyperoptimal) auf der gleichen Parzelle angewendet. Die absolute Höhe der ausgebrachten N-Menge ist dabei der jeweils angebauten Feldfrucht angepaßt (Tab. 2).

Ein direkter Vergleich der beiden Bodennutzungssysteme miteinander war nur mit den Feldfrüchten möglich, die in beiden Fruchtfolgen angebaut wurden. Aus diesem Grund beschränkt sich die Darstellung der Ertragsdaten auf die Feldfrüchte Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste.

Im Ackerbau-Systemversuch wurde jede dieser Feldfrüchte jährlich unter identischen Witterungsbedingungen angebaut, so daß die Erträge jeder Vergleichsfrucht aus beiden Systemen direkt verglichen werden können. Größter Wert wurde darauf gelegt, die Bodennutzung (Tab. 1 und 2) in beiden Systemen über lange Zeit konstant zu halten, um akkumulierte Wirkungen und Langzeiteffekte zu erfassen. Jedoch macht es der Züchtungsfortschritt schwierig, gleiche Sorten über längere Zeit zu verwenden, weil sich der Sortenspiegel von Jahr zu Jahr verändert. Aus diesem Grund wurde im Ackerbau-Systemversuch bei Winterweizen nach Ablauf einer Rotation in der IF bzw. nach zwei Rotationen in der kF im Jahr 1988 die Sorte gewechselt (Kap. 2). Bei der Zuckerrübe fand nach der zweiten bzw. vierten Rotation im Jahr 1994 ein Sortenwechsel statt.

#### 4.5.1 Zuckerrübe

Wenn mineralischer Stickstoff zugeführt wurde, hatte das Bodennutzungssystem keinen Einfluß auf den bereinigten Zuckerertrag (BZE) (Tab. 11 und Abb. 24). Lediglich bei Verzicht auf mineralische Stickstoffdüngung (N0) fiel der bereinigte Zuckerertrag im 15-jährigen Durchschnitt in der IF um ca. 6 dt ha<sup>-1</sup> geringer aus als in der kF (Tab. 11). Die Höhe der mineralischen Stickstoffdüngung zeigte ebenfalls nur eine geringe Ertragswirksamkeit. So wurde schon mit einer mineralischen N-Gabe von 70 kg ha<sup>-1</sup> (N1) der Maximalertrag erreicht (Tab. 11).

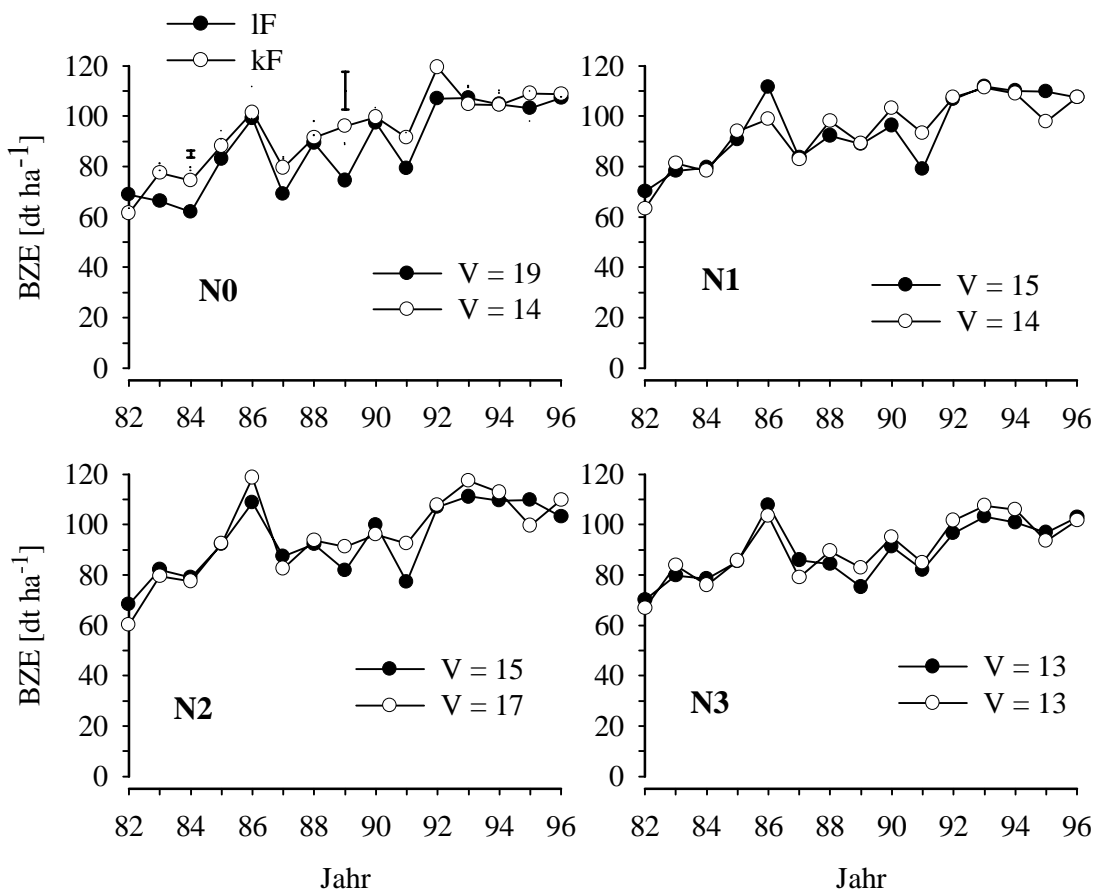
**Tab. 11:** Einfluß der langen (IF) und der kurzen (kF) Fruchtfolge sowie der mineralischen N-Düngung auf den bereinigten Zuckerertrag (BZE) und den Rüben- und Blattertrag; angegeben sind die Durchschnittserträge in Trockenmasse (TM) der Jahre 1982 bis 1996; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Differenzen zwischen den Bodennutzungssystemen; unterschiedliche Großbuchstaben bedeuten signifikante Differenzen zwischen den N-Düngungsstufen innerhalb einer Fruchtfolge

N-Stufe	BZE [dt ha <sup>-1</sup> ]		Rübenertrag [TM dt ha <sup>-1</sup> ]		Blattertrag [TM dt ha <sup>-1</sup> ]	
	IF	kF	IF	kF	IF	kF
N0	87,9 b	93,8 a	125,4 B b	133,0 a	45,5 D	48,0 C
N1	94,4	94,3	135,5 A	135,5	53,8 C	52,9 BC
N2	93,9	95,4	137,1 A	137,8	61,2 B	59,6 AB
N3	89,3	90,4	130,5 AB	132,8	66,1 A	65,8 A

Gleiche Ertragsentwicklungen zeigten die Rüben- und Blatterträge (Tab.11). Mit mineralischer Stickstoffdüngung (N1 bis N3) wurden in beiden Bodennutzungssystemen etwa gleich hohe Rüben- und Blatterträge erzielt. Dagegen wurde ohne mineralische Stickstoffdüngung in der kF im 15-jährigen Durchschnitt ein signifikant höherer Rübenertrag erzielt als in IF (Tab. 11). Vermutlich ist die direkte Vorfruchtwirkung von Sommerwicke-Gründung für die Zuckerrüben in der kF günstiger als die Vorfruchtwirkung von Ackerbohne in der IF. Durch den späten Umbruch der Gründungs (November) wird der in der Wicke gebundene Stickstoff besser konserviert als der Stickstoff in den Ernteresten der Ackerbohne nach deren vergleichsweise frühen Ernte (August). Nach der Ernte von Ackerbohne kommt es zu einer langen Zwischenbrachezeit bis zur Aussaat der Zucker-



rübe. Dabei wird möglicherweise bereits ein Großteil des in den Ernteresten gebundenen Stickstoffs mineralisiert und ausgewaschen. Somit dürfte der Zuckerrübe in der IF im Frühjahr weniger bodenbürtiger Stickstoff zur Verfügung stehen als in der kF.  $N_{\min}$ -Untersuchungen von WILDENHAYN (1990) bestätigen diese Vermutung. Besonders bei Verzicht auf mineralische Stickstoffdüngung wurde dieser unterschiedliche Vorfruchteffekt in den beiden Bodennutzungssystemen ertragswirksam.



**Abb. 24:** Bereinigter Zuckerertrag (BZE) von Zuckerrübe in der langen (IF) und kurzen (kF) Fruchtfolge in Abhängigkeit von der Höhe der mineralischen Stickstoffdüngung (N0, N1, N2 und N3) in den Jahren 1982 bis 1996; Durchschnittserträge aus drei Feldwiederholungen; signifikante Ertragsunterschiede zwischen den Fruchtfolgen sind durch die Grenzdifferenz (senkrechte Striche) gekennzeichnet; V = Variationskoeffizient in %

Die höchste Ertragsstabilität über die Jahre 1982 bis 1996 mit einem Variationskoeffizienten (VK) von 13% wurde bei höchster N-Düngung erreicht (Abb. 24). Wesentliche Unterschiede in der Ertragsstabilität zwischen den beiden Bodennutzungssystemen zeigten sich nur bei N0. Hier wies der bereinigte Zuckerertrag über die 15

Versuchsjahre mit einem VK von 14% in der kF eine höhere Stabilität auf als der Ertrag in der IF mit einem VK von 19%. Vermutlich wird den Zuckerrüben in der kF durch die Wicken-Gründung von Jahr zu Jahr Stickstoff während der gesamten Vegetationszeit angeboten, was sich in der relativ hohen Ertragsstabilität widerspiegelt. Dagegen kommt es möglicherweise besonders bei Verzicht auf mineralische Stickstoffdüngung in der IF phasenweise zu Stickstoffmangel. Dieser zeitweilige N-Mangel führt dann zu einer höheren Ertragsvariabilität.

Die Abbildung 24 zeigt in allen Stickstoffstufen beider Bodennutzungssysteme seit Versuchsbeginn eine deutliche Ertragssteigerung im bereinigten Zuckerertrag. Dabei stiegen die bereinigten Zuckererträge von ca. 80 dt ha<sup>-1</sup> zu Versuchsbeginn auf über 100 dt ha<sup>-1</sup> im Verlauf der 15 Versuchsjahre. Ein Sorteneffekt kann dabei ausgeschlossen werden, da bis 1993 einheitlich die Zuckerrübensorte "Novadima" angebaut wurde. Allerdings kann eine Leistungssteigerung aufgrund einer "Nachbesserung" von bereits zugelassenen Sorten durch den Züchter nicht ausgeschlossen werden (MÄRLÄNDER 1991).

#### 4.5.2 Winterweizen

Bei Winterweizen waren die Effekte des Bodennutzungssystems auf die Ertragsentwicklung deutlicher als bei Zuckerrübe. Die Abfuhr des Rübenblattes vom Feld und die reduzierte Bodenbearbeitung hatten in der IF Mindererträge bis zu 24% gegenüber der kF zur Folge. Im 15-jährigen Durchschnitt wurden in den Stickstoffstufen N0, N1, N2 und N3 in der Variante IF geringere Korn- und Stroherträge erzielt als in der kF (Tab. 12). Ohne mineralische N-Düngung waren die Unterschiede im Kornertrag signifikant. Der Strohertrag reagierte noch deutlicher auf den Einfluß des Bodennutzungssystems. Hier zeigten sich im Mittel der 15 Versuchsjahre signifikante Mindererträge in der IF gegenüber der kF bis zur N2-Düngungsstufe (Tab. 12).

In der ungedüngten Variante (N0) zeigte sich sehr deutlich die ertragssteigernde Wirkung des eingearbeiteten Zuckerrübenblattes. In 7 von 15 Versuchsjahren waren die Kornerträge in der kF signifikant höher als in der IF (Abb. 25). Dies dürfte auf eine in der kF gegenüber der IF höheren Stickstoff-Nachlieferung zurückzuführen sein. Mit dem Rübenblatt wird dem Boden etwa 100 kg N ha<sup>-1</sup> zugeführt, die in der N0-Düngungsstufe ertragswirksam

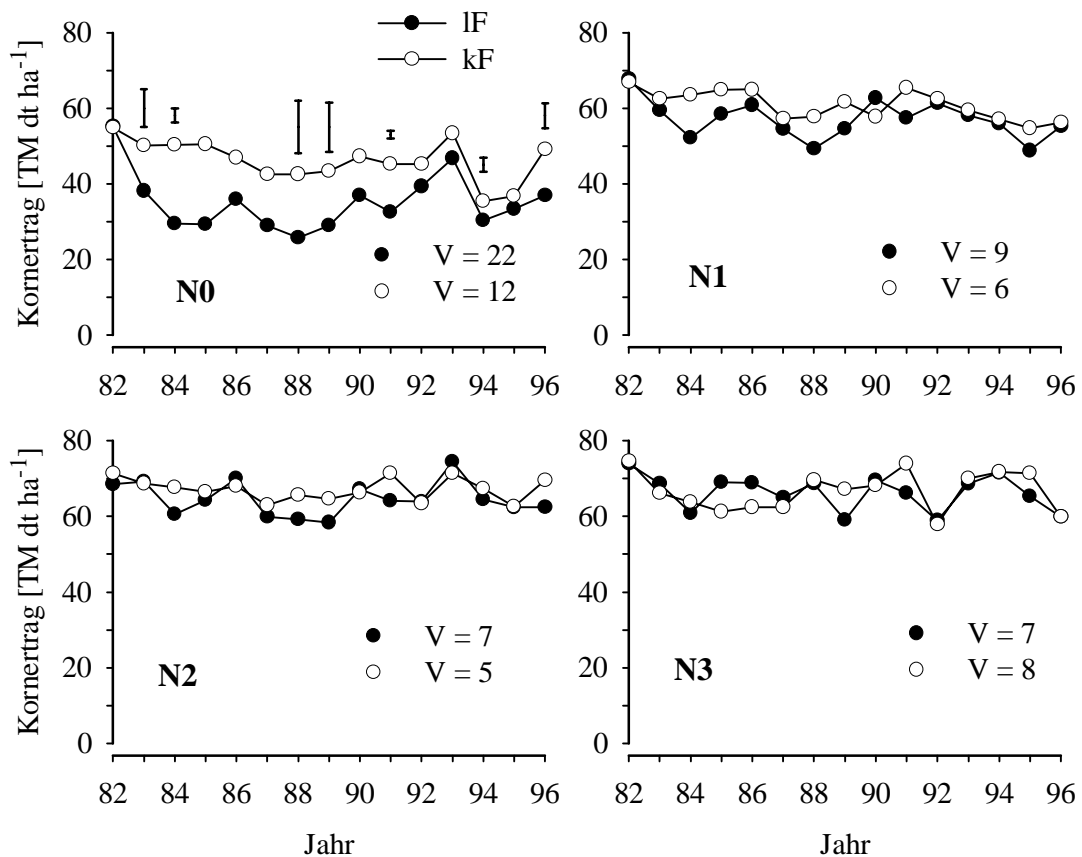
**Tab. 12:** Einfluß der langen (lF) und der kurzen (kF) Fruchtfolge sowie der mineralischen N-Düngung auf den Korn- und Strohertrag und den Ernteindex von Winterweizen; angegeben sind die Durchschnittserträge in Trockenmasse (TM) der Jahre 1982 bis 1996; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Differenzen zwischen den Bodennutzungssystemen; unterschiedliche Großbuchstaben bedeuten signifikante Differenzen zwischen den N-Düngungsstufen innerhalb einer Fruchtfolge

N-Stufe	Kornertrag [TM dt ha <sup>-1</sup> ]		Strohertrag [TM dt ha <sup>-1</sup> ]		Ernteindex	
	lF	kF	lF	kF	lF	kF
N0	35,1 B b	46,2 C a	46,4 C b	58,8 C a	0,43	0,44
N1	57,1 A	60,8 B	73,4 B b	80,9 B a	0,44	0,43
N2	64,6 A	67,2 A	79,6 AB b	89,3 A a	0,45	0,43
N3	66,3 A	66,7 A	89,7 A	93,0 A	0,43	0,42

werden. Das Rübenblatt trägt somit wesentlich zur N-Versorgung des Winterweizens bei, umso deutlicher, je weniger mineralischer Stickstoff gedüngt wird. Der relative N-Mangel in der lF gegenüber der kF ist auch in den ersten Versuchsjahren bei N1 angedeutet (Abb. 25). Durch die relativ hohe Zufuhr an organisch gebundenem Stickstoff in der kF wurde der Höchstkornertrag bereits in der N2-Düngungsstufe erzielt (Tab. 12). Höhere N-Mengen bewirkten keine Ertragssteigerung. Dagegen wirkte in der lF mit geringerer N-Nachlieferung aus den Ernteresten auch die höchste N-Düngungsstufe (N3) noch ertragssteigernd.

Weder das Bodennutzungssystem noch die Höhe der mineralischen N-Düngung zeigten einen signifikanten Einfluß auf den Ernteindex (Tab. 12).

Mineralische N-Düngung führte in beiden Bodennutzungssystemen zu ausgeprägt stabilen Erträgen mit einem VK von 5 bis 9% (Abb. 25). Ähnlich wie beim bereinigten Zuckerertrag wurden Unterschiede in der Ertragsstabilität zwischen den Varianten lF und kF nur bei Verzicht auf mineralische N-Düngung festgestellt. Ohne N-Düngung stieg der VK in der kurzen Fruchtfolge auf 12%, in der lF auf 22% an. Das Räumen des Zuckerrübenblattes in der lF führte zu einer hohen Variabilität der Winterweizenkornerträge im Versuchszeitraum von 15 Jahren. Dagegen konnte durch die Düngewirkung des Zuckerrübenblattes in der kF selbst in der N0-Parzelle eine relativ hohe Ertragsstabilität erreicht werden (Abb. 25).



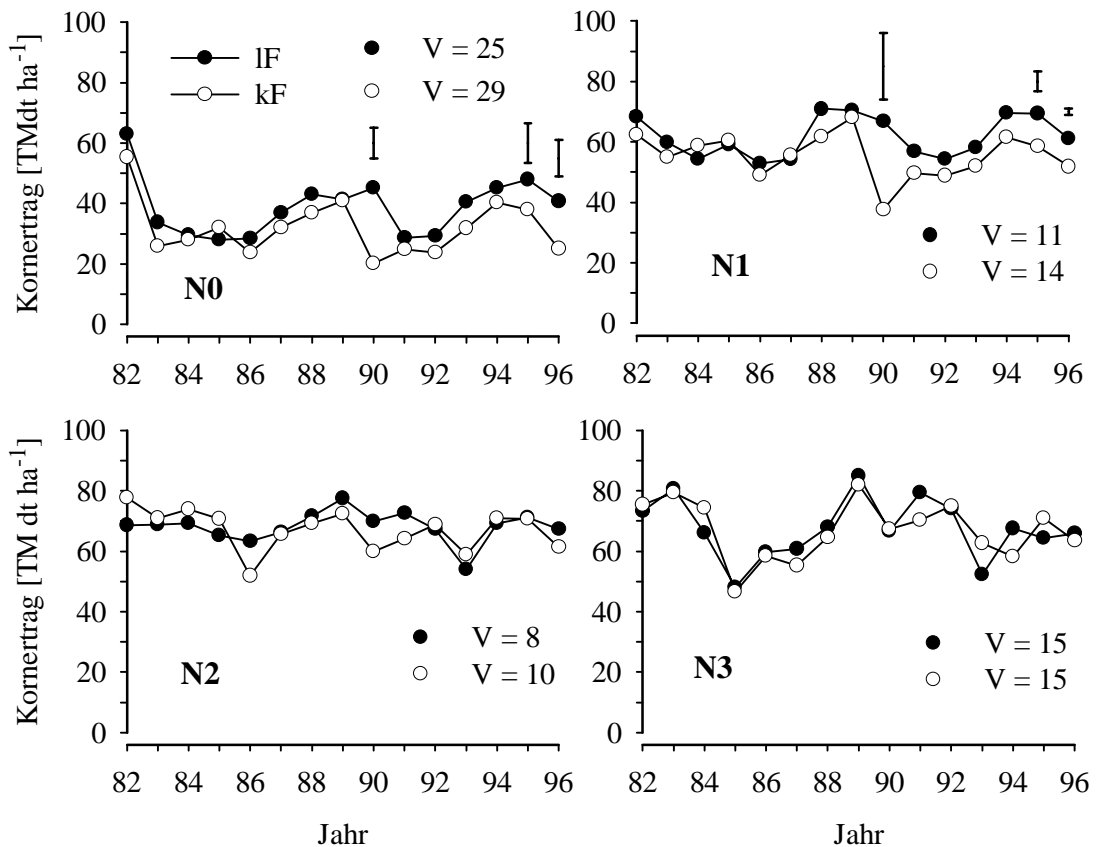
**Abb. 25:** Kornertrag von Winterweizen in der langen (IF) und kurzen (kF) Fruchtfolge in Abhängigkeit von der Höhe der mineralischen Stickstoffdüngung (N0, N1, N2 und N3) in den Jahren 1982 bis 1996; Durchschnittserträge in Trockenmasse aus drei Feldwiederholungen; signifikante Ertragsunterschiede zwischen den Fruchtfolgen sind durch die Grenzdifferenz (senkrechte Striche) gekennzeichnet; V = Variationskoeffizient in %

#### 4.5.3 Wintergerste

Das Bodennutzungssystem IF unterschied sich bei der Wintergerste vom System kF durch eine gegenüber Weizen geänderte Vorfruchtwirkung. Das Winterweizenstroh wurde vom Feld geräumt und eine Stallmistgabe von 165 dt ha<sup>-1</sup> (bis 1987) bzw. 330 dt ha<sup>-1</sup> (ab 1988) auf die Weizenstoppel gegeben. Die damit verbundenen Auswirkungen auf den Korn- und Strohertrag waren besonders ohne (N0) bzw. mit geringer (N1) mineralischer N-Düngung deutlich (Tab. 13). Im Mittel über 15 Versuchsjahre wurden in den N-Düngungsstufen N0 und N1 in der IF gegenüber kF signifikant höhere Kornerträge erreicht. Beim Strohertrag waren die Unterschiede nur bei N0 signifikant. Besonders ohne N-Düngung dürfte die

**Tab. 13:** Einfluß der langen (lF) und der kurzen (kF) Fruchtfolge sowie der mineralischen N-Düngung auf den Korn- und Strohertrag und den Ernteindex von Wintergerste; angegeben sind die Durchschnittserträge in Trockenmasse (TM) der Jahre 1982 bis 1996; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Differenzen zwischen den Bodennutzungssystemen; unterschiedliche Großbuchstaben bedeuten signifikante Differenzen zwischen den N-Düngungsstufen innerhalb einer Fruchtfolge

N-Stufe	Kornertrag [TM dt ha <sup>-1</sup> ]		Strohertrag [TM dt ha <sup>-1</sup> ]		Ernteindex	
	lF	kF	lF	kF	lF	kF
N0	38,8 B a	31,9 C b	28,4 C a	22,8 D b	0,58 A	0,58 A
N1	61,7 A a	55,4 B b	51,7 B	45,4 C	0,54 B	0,55 B
N2	68,1 A	67,2 A	57,0 AB	54,8 B	0,54 B	0,55 B
N3	67,5 A	66,9 A	64,7 A	63,5 A	0,51 C	0,51 C



**Abb. 26:** Kornertrag von Wintergerste in der langen (lF) und kurzen (kF) Fruchtfolge in Abhängigkeit von der Höhe der mineralischen Stickstoffdüngung (N0, N1, N2 und N3) in den Jahren 1982 bis 1996; Durchschnittserträge in Trockenmasse aus drei Feldwiederholungen; signifikante Ertragsunterschiede zwischen den Fruchtfolgen sind durch die Grenzdifferenz (senkrechte Striche) gekennzeichnet; V = Variationskoeffizient in %

Stallmistgabe ertragswirksam geworden sein. Mit steigender N-Düngung nahmen die Ertragsdifferenzen zwischen den Bodennutzungssystemen ab.

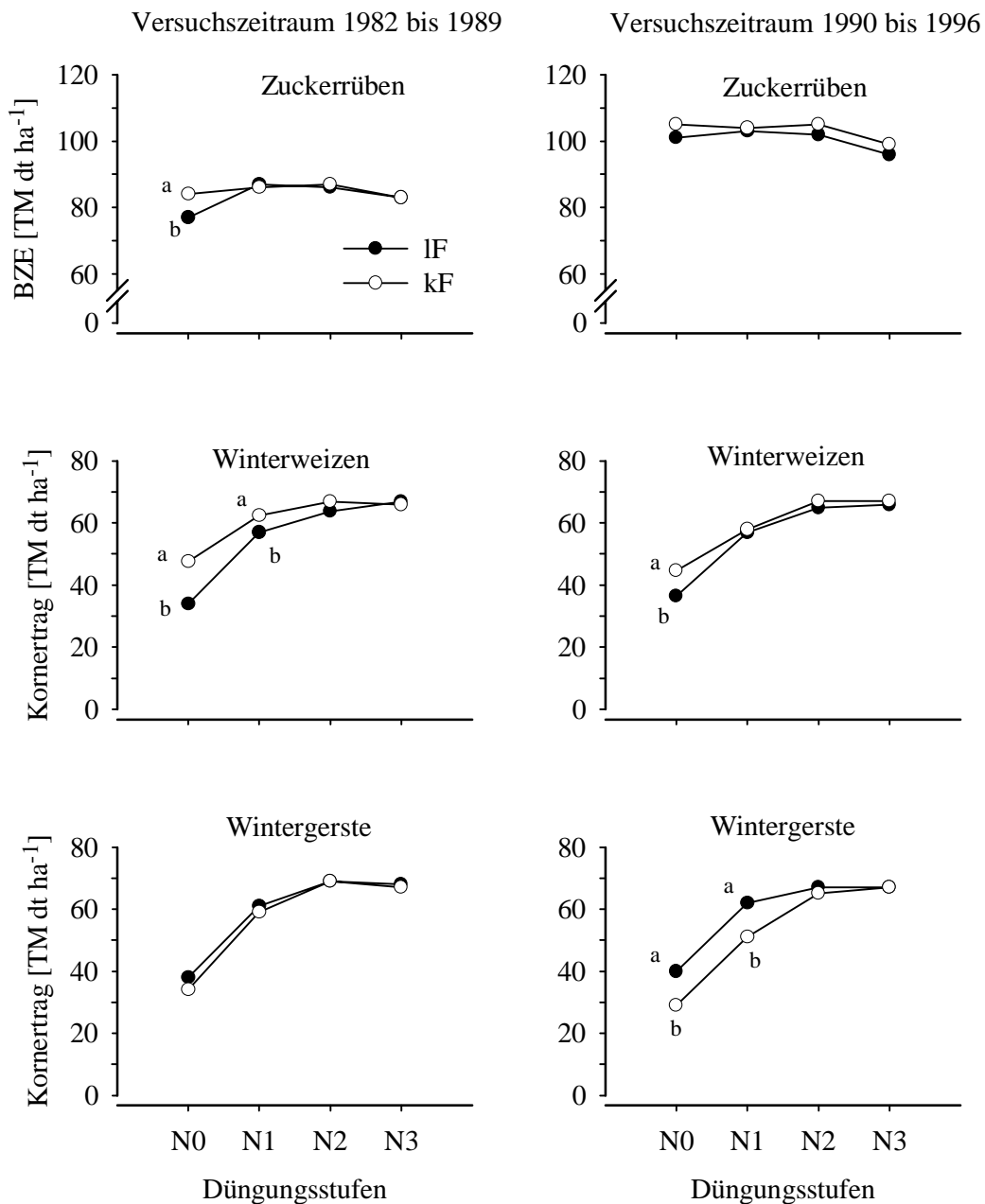
Steigende mineralische N-Düngung führte in beiden Fruchtfolgen zu sinkenden Ernteindizes (Tab. 13). Bei unterlassener mineralischer N-Düngung stieg der Ernteindex im Vergleich zu den mineralisch gedüngten Varianten (N1, N2 und N3) in beiden Fruchtfolgen signifikant an. Hyperoptimale mineralische N-Düngung führte gegenüber optimaler und suboptimaler mineralischer N-Düngung zu signifikant niedrigeren Ernteindizes. Ein Einfluß des Bodennutzungssystems auf den Ernteindex konnte nicht festgestellt werden.

Im Vergleich zu Zuckerrübe und Winterweizen reagierte Wintergerste in der Ertragsstabilität am empfindlichsten auf die Höhe der mineralischen N-Düngung. Ohne N-Düngung variierten die Kornerträge sehr deutlich und wiesen einen relativ hohen Variationskoeffizienten von 25 bis 29% auf (Abb. 26). Die höchste Ertragsstabilität wurde in der N2-Variante erreicht. Weiter steigende N-Düngung führte anders als bei Zuckerrübe und Winterweizen wieder zu einer höheren Ertragsvariabilität (Abb. 26).

#### **4.5.4 Langfristige Entwicklung der Bodennutzungssysteme und der Erträge in Abhängigkeit von der Höhe der mineralischen N-Düngung**

Bodenfruchtbarkeit im Sinne einer durchschnittlichen Ertragsfähigkeit eines Bodens ist eine dynamische Größe. Insbesondere kann die Bodenfruchtbarkeit durch Fruchtfolge, Düngung und Art und Intensität der Bodenbearbeitung verändert werden. Allerdings benötigt es viele Jahre bzw. Jahrzehnte, bis Veränderungen ertragsbestimmender Bodeneigenschaften festgestellt werden können.

Der Ackerbau-Systemversuch erscheint aufgrund seiner langjährigen Durchführung besonders gut geeignet, Wirkungsrichtungen von zwei Bodennutzungssystemen auf den Ertrag aufzuzeigen. Die im Ackerbau-Systemversuch gewählten Bewirtschaftungsunterschiede zwischen den Bodennutzungssystemen führen über die Zeit zu einer Änderung der Bodenkenngrößen, z. B. Änderung im  $C_{org}$ -Gehalt des Bodens (s. Tab. 3), da sich die Wirkungen der Faktoren (Bodenbearbeitung, organische Düngung u.a.) kumulieren. Damit ist die Zeit im Ackerbau-Systemversuch als weiteres Prüfglied aufzufassen. Dies bietet den Vorteil, zeitliche Änderungen der verschiedenen Bodennutzungssysteme beurteilen zu können.



**Abb. 27:** Bereinigter Zuckerertrag (BZE) von Zuckerrübe sowie Kernertrag von Winterweizen und Wintergerste in Abhängigkeit von Bodennutzungssystem (IF = lange Fruchtfolge; kF = kurze Fruchtfolge) und mineralischer Stickstoffdüngung (N0, N1, N2 und N3) nach unterschiedlicher Versuchsdauer; angegeben sind die jeweiligen Durchschnittserträge von 8 (Versuchszeitraum 1982 bis 1989) bzw. 7 Versuchsjahren (Versuchszeitraum 1990 bis 1996); unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen

Zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Erträge ist deshalb in Abbildung 27 der bereinigte Zuckerertrag sowie der Kernertrag von Winterweizen und Wintergerste in Abhängigkeit von Bodennutzungssystem und N-Düngung in zwei Zeitabschnitten (1982

bis 1989 und 1990 bis 1996) dargestellt. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, bei zeitlichen Veränderungen die Richtung der Ertragsentwicklung (Ertragszunahme oder -abnahme über die Zeit) in den Bodennutzungssystemen zu erkennen.

Während in der kF bei Verzicht auf mineralische Düngung im ersten Versuchszeitraum ein signifikant höherer bereinigter Zuckerertrag gegenüber IF festgestellt wurde, gab es im zweiten Versuchszeitraum zwischen den Fruchtfolgen in allen N-Stufen keine Ertragsunterschiede (Abb. 27). Die Entwicklung der Kornerträge von Winterweizen und Wintergerste in den Fruchtfolgen wurde ebenfalls deutlich von der Versuchsdauer beeinflusst. Im ersten Versuchsabschnitt (1982 bis 1989) lagen die durchschnittlichen Kornerträge von Winterweizen in der kF in den ersten drei N-Stufen über denen von IF. Bei fehlender und suboptimaler N-Versorgung (N0 und N1) waren die Ertragsunterschiede signifikant. Mit zunehmender Versuchsdauer (Versuchszeitraum 1990 bis 1996) glichen sich die beiden Fruchtfolgen in ihrer Ertragsleistung an. Dabei wurde der Weizenkornertrag in der IF mit zunehmender Versuchsdauer positiv beeinflusst. Die durchschnittlichen Erträge in der IF bei N0 und N1 stiegen im zweiten Versuchsabschnitt (1990 - 1996) gegenüber dem ersten Zeitabschnitt (1982 - 1989) leicht an (um 3 bzw. 1 dt ha<sup>-1</sup>). Dagegen gingen die durchschnittlichen Kornerträge in der kF bei N0 und N1 in den letzten 7 Versuchsjahren (1990 - 1996) gegenüber den ersten 8 Versuchsjahren (1982 - 1989) geringfügig zurück (um 3 bzw. 4 dt ha<sup>-1</sup>).

Für die Kornerträge von Wintergerste ließ sich ebenfalls ein Zeittrend erkennen. Im Mittel der ersten 8 Versuchsjahre zeigten die Fruchtfolgen keine Differenzierung im Kornertrag. Dagegen wurden im Mittel der 7 Versuchsjahre des zweiten Zeitabschnitts (1990 - 1996) in den ersten beiden N-Düngungsstufen (N0 und N1) unterschiedliche Kornerträge zwischen den Fruchtfolgen erzielt. Ursache waren sinkende Kornerträge in der kF, besonders bei N0 und N1 (um 5 bzw. 8 dt ha<sup>-1</sup>), bei gleichzeitig leicht steigenden Kornerträgen in der IF (um 2 bzw. 1 dt ha<sup>-1</sup>). Bei ausreichender N-Versorgung (N2 und N3) wurden in beiden Versuchszeiträumen keine Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen im Kornertrag festgestellt.

Die Gesamterträge von Zuckerrübe (Blatt und Rübe), Winterweizen und Wintergerste (Korn und Stroh) zeigten eine annähernd gleiche Entwicklung wie die in Abb. 27 dar-



gestellten bereinigten Zuckererträge und die Kornerträge. Deshalb wurde auf eine Darstellung der Gesamterträge verzichtet.

Für eine Trendanalyse, der Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Ertragshöhe und der Zeit, kann die Regressionsanalyse eingesetzt werden. In unserem Ansatz wurden die Ertragsunterschiede (lF minus kF) der beiden Fruchtfolgen bei einer N-Stufe über die Zeit betrachtet. In Tab. 14 ist die Entwicklung der Kornerträge von Winterweizen über die Zeit sowie die Berechnung der Ertragsdifferenz zwischen den beiden Fruchtfolgen für N0 beispielhaft dargestellt.

**Tab. 14:** Kornertrag von Winterweizen (TM dt ha<sup>-1</sup>) in der langen (lF) und kurzen (kF) Fruchtfolge sowie die Ertragsdifferenz (lF minus kF) zwischen den Fruchtfolgen in den Parzellen ohne mineralische N-Düngung (N0) in den Jahren 1982 bis 1996

Jahr	Kornertrag [TM dt ha <sup>-1</sup> ]		Differenz [TM dt ha <sup>-1</sup> ]
	lF	kF	lF minus kF
1982	55,2	54,8	0,4
1983	38,1	50,1	-12,0
1984	29,5	50,2	-20,7
1985	29,2	50,5	-21,3
1986	35,9	47,0	-11,1
1987	28,9	42,5	-13,6
1988	25,6	42,5	-16,9
1989	28,9	43,3	-14,4
1990	36,8	47,3	-10,5
1991	32,4	45,2	-12,7
1992	39,3	45,2	-5,8
1993	46,8	53,4	-6,7
1994	30,2	35,4	-5,1
1995	33,4	36,7	-3,3
1996	36,8	41,3	-4,5

Der Systemversuch bietet die Möglichkeit, die Erträge der beiden Fruchtfolgen direkt miteinander vergleichen zu können, da sie von derselben Jahreswitterung bestimmt werden. Bei der zeitlichen Entwicklung der Ertragsunterschiede zwischen den beiden Fruchtfolgen können somit systematische Einflüsse der Jahreswitterung ausgeschlossen werden.

Bei der Regressionsanalyse wurde auf Ertragsdaten des ersten Versuchsjahres (1982) verzichtet, da vor Versuchsbeginn auf der gesamten Versuchsfläche Körnererbsen angebaut wurden. Folglich führte die sehr gute Vorfruchtwirkung der Leguminose in beiden Bodennutzungssystemen zu hohen Erträgen. Systematische Einflüsse der Bodennutzungssysteme auf den Ertrag wurden damit überdeckt. Ohnehin müssen sich die Einflüsse der Bodennutzungssysteme erst über die Jahre entwickeln.

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Ertragsdifferenzen zwischen der IF und der kF in Abhängigkeit von der Versuchsdauer sind in Tab. 15 dargestellt.

**Tab. 15:** Die Differenz des bereinigten Zuckerertrages bzw. des Kornertrages von Winterweizen und Wintergerste zwischen IF und kF in Abhängigkeit von der Versuchsdauer (Versuchsjahr = x; 1983 = 1, 1984 = 2 .....1996 = 14) bei unterschiedlicher N-Düngung (N0, N1, N2 und N3);  $R^2$  = Bestimmtheitsmaß

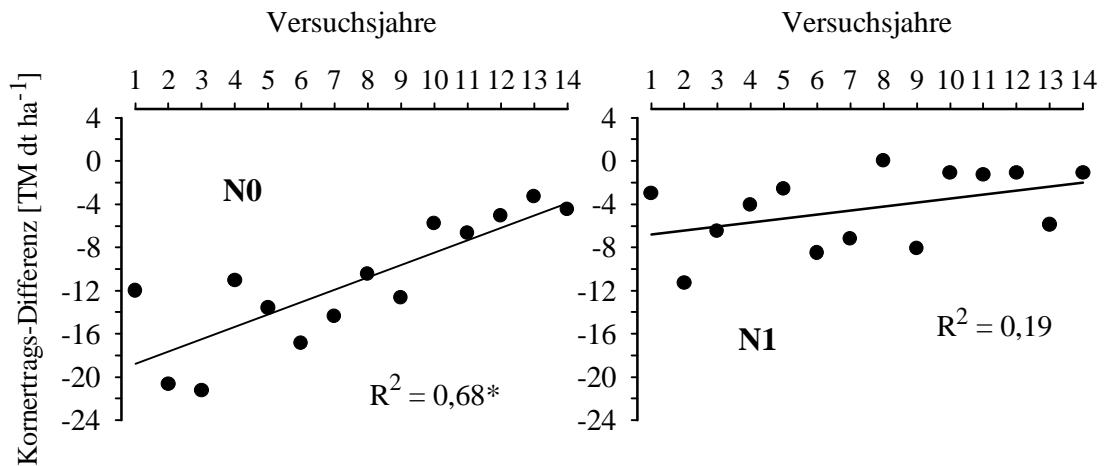
bereinigter Zuckerertrag bzw. Kornertrag ( $Y_E$ )						
N-Stufe	Zuckerrüben		Winterweizen		Wintergerste	
<b>N0</b>	$Y_E = 0,57x - 11,19$	$R^2 = 0,12$	$Y_E = 1,14x - 19,90$	$R^2 = 0,68^*$	$Y_E = 0,67x + 0,42$	$R^2 = 0,40^*$
<b>N1</b>	$Y_E = 0,15x - 1,52$	$R^2 = 0,01$	$Y_E = 0,38x - 6,91$	$R^2 = 0,19$	$Y_E = 0,77x - 1,11$	$R^2 = 0,53^*$
<b>N2</b>	$Y_E = 0,18x - 0,83$	$R^2 = 0,01$	$Y_E = 0,008x - 2,57$	$R^2 = 0,01$	$Y_E = 0,22x + 0,02$	$R^2 = 0,02$
<b>N3</b>	$Y_E = -0,15x - 0,28$	$R^2 = 0,02$	$Y_E = -0,47x + 3,08$	$R^2 = 0,17$	$Y_E = 0,01x + 0,64$	$R^2 = 0,01$

\* = signifikant ( $p < 0,05$ )

Die Ergebnisse der Regressionsanalyse (Tab. 15) zeigen, daß eine signifikante zeitliche Entwicklung der Ertragsdifferenz zwischen den Systemen beim bereinigten Zuckerertrag nicht zu erkennen war.

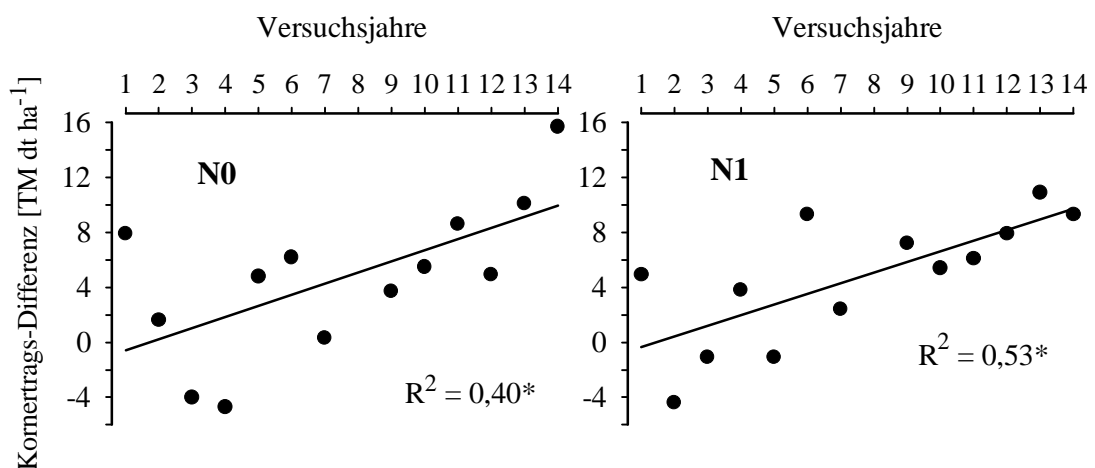
Dagegen belegen die Ergebnisse für Winterweizen bei Verzicht auf mineralische N-Düngung mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,68 einen signifikanten Einfluß der Zeit auf die Differenz im Kornertrag der beiden Fruchtfolgen (Tab. 15). Anfängliche Mindererträge in IF gegenüber kF von ca. 20 dt ha<sup>-1</sup> nahmen mit zunehmender Versuchsdauer ab (Abb. 28). Nach 15 Versuchsjahren wurden nur noch sehr geringe Ertragsdifferenzen zwischen IF und kF festgestellt. Auch bei geringer mineralischer N-Düngung (N1) konnte noch ein leichter Zeittrend ( $R^2 = 0,19$ ) beobachtet werden (Tab. 15). Bei optimaler (N2) bzw. hyper-

optimaler N-Düngung (N3) hatte dagegen die Versuchsdauer keinen Einfluß auf die Ertragsdifferenzen zwischen den Fruchtfolgen.



**Abb. 28:** Zusammenhang zwischen der Versuchsdauer und der Ertragsdifferenz zwischen der IF und kF bei unterschiedlicher N-Düngung (N0 und N1); angegeben sind die Kornträge von Winterweizen; \* = signifikant ( $p < 0,05$ )

Bei Wintergerste zeigte sich ebenfalls in der Entwicklung der Differenz der Kornträge der beiden Bodennutzungssysteme ein Zeiteffekt. Als zweite abtragende Frucht nach Zuckerrübe waren die Effekte bei Wintergerste auch noch bei geringer mineralischer N-Düngung (N1;  $R^2 = 0,53$ ) signifikant (Tab. 15).



**Abb. 29:** Zusammenhang zwischen der Versuchsdauer und der Ertragsdifferenz zwischen der IF und kF bei unterschiedlicher N-Düngung (N0 und N1); angegeben sind die Kornträge von Wintergerste; \* = signifikant ( $p < 0,05$ )

Während die Unterschiede im Ertrag zwischen IF und kF mit zunehmender Versuchsdauer bei Winterweizen abnahmen, setzte bei Wintergerste ein umgekehrter Trend ein (Abb. 29). Die Ertragsunterschiede nahmen zu.

Zeigt die Regressionsgerade in Abb. 29 zu Versuchsanfang zwischen den beiden Fruchtfolgen keine Unterschiede im Kornertrag, werden nach 15 Versuchsjahren Differenzen von etwa  $10 \text{ dt ha}^{-1}$  deutlich. Ursache hierfür dürften die in Abb. 27 beschriebenen Ertragsentwicklungen über die Zeit sein.

Für die beiden N-Düngungsstufen N2 und N3 konnte weder bei Wintergerste noch bei Winterweizen eine zeitliche Entwicklung der Ertragsdifferenzen zwischen den Fruchtfolgen festgestellt werden (Tab. 15). Die Unterschiede im Ertrag und in der Ertragsentwicklung über die Zeit zwischen IF und kF waren um so deutlicher, je geringer die Zufuhr von mineralischem Stickstoff war. Bei Zuckerrübe war dieser Effekt nicht so ausgeprägt wie bei den beiden Getreidearten. Dies dürfte mit der relativ guten Vorfruchtwirkung der Leguminosen und der damit verbundenen besseren Stickstoffversorgung der Nachfrucht Zuckerrübe zusammenhängen.

## 5 Diskussion

Die moderne Landwirtschaft, wie sie sich in den letzten Jahrzehnten in Deutschland entwickelte, ist geprägt durch eine sehr hohe Intensität. Sie ist gekennzeichnet durch eine weit fortgeschrittene Entkopplung von Ackerbau und Viehzucht, in der Feldwirtschaft durch kurze Fruchtfolgen mit ausschließlicher Mineraldüngerzufuhr und einer intensiv-lockernden Bodenbearbeitung.

Dies führte in der Vergangenheit zu Höchstertträgen, ohne daß bisher ein überzeugender Nachweis für eine gleichermaßen gestiegene Bodenfruchtbarkeit im Sinne einer nachhaltigen Produktivität gelungen wäre.

Die Bedeutung physikalischer, biologischer und chemischer Kennwerte des Bodens für die Bodenfruchtbarkeit ist durch viele wissenschaftliche Untersuchungen und praktische Erfahrungen belegt. Bis heute ist es allerdings nicht gelungen, alle Prozesse und Merkmale zu beschreiben, die ausgehend vom Edaphon und dessen Umsatzleistung die Faktoren der Bodenfruchtbarkeit und die Nachhaltigkeit eines Agrarökosystems umfassend kennzeichnen können (BECK 1991).

Im folgenden soll anhand der durchgeführten Untersuchungen der Frage nachgegangen werden, inwieweit sich aus verschiedenen bodenphysikalischen, -chemischen und -biologischen Kennwerten in Verbindung mit Ertragsdaten Aussagen über die langfristige Ertragsfähigkeit und -stabilität des Bodens ableiten lassen.

In der Diskussion wird zunächst auf Auswirkungen langjährig unterschiedlicher Bodennutzung auf einzelne bodenphysikalische, -chemische und -biologische Kennwerte eingegangen. Anschließend werden die über 15 Jahre erhobenen Ertragsdaten diskutiert. Auf dieser Grundlage erfolgt eine Diskussion über die Zusammenhänge zwischen den Bodenkennwerten und den langjährigen Ertragsdaten und ob Aussagen zur Bodenfruchtbarkeitsentwicklung möglich sind.

### 5.1 Auswirkungen langjährig unterschiedlicher Bodennutzung auf die Lagerungsdichte und den Eindringwiderstand

Mit zunehmendem Einsatz schwerer Maschinen haben Bodenverdichtungen und damit negative Auswirkungen ungünstiger Bodenstruktur auf das Pflanzenwachstum zugenommen. Besonders die Pflugarbeit kann zu einem sprunghaften Anstieg des Eindring-

widerstands und der Lagerungsdichte im Bereich der Krumenbasis führen. Die Ausbildung einer Krumenbasisverdichtung bei tiefwendender Bodenbearbeitung wird in zahlreichen Untersuchungen beschrieben (VETTER & LICHTENSTEIN 1968, EHLERS et al. 1983, EHLERS 1983, 1992, 1996, FENNER 1995, LIEBHARD et al. 1995, STOCKFISCH 1997).

Die Auswirkungen von hohen Druckbelastungen können durch Veränderungen bodenphysikalischer Eigenschaften wie Lagerungsdichte, Eindringwiderstand, Wasser- und Luftdurchlässigkeit bzw. Gasdiffusion erfaßt werden (MORSTEIN & WERNER 1984, WERNER & LEHFELDT 1985).

Die Lagerungsdichte des Bodens und der Eindringwiderstand wirken u.a. auf Wurzelmasse und -länge und damit auf die Wasser- und Nährstoffausschöpfung aus der Krume und dem Unterboden ein (EHLERS 1996). MÄHNER (1998) stellte in Untersuchungen fest, daß ein sprunghafter Anstieg der Eindringwiderstände im Bereich der Krumenbasisverdichtung zu einem verringerten Wurzelwachstum im Unterboden führt.

Nach KUNDLER & DRECHSLER (1983), ROGASIK (1990) und OUSSIBLE et al. (1992) kommt es auf verdichteten Böden zu Ertragseinbußen zwischen 10 und 30%. Als Ursachen werden in erster Linie der mechanische Bodenwiderstand und die eingeschränkte Durchlüftung genannt, da diese Effekte das Wurzelwachstum der Kulturpflanzen behindern.

HAUNZ et al. (1992) führten die negativen Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf das Pflanzenwachstum vor allem auf ein vermindertes N-Angebot zurück. In Untersuchungen mit  $^{15}\text{N}$ -markiertem Dünger konnten die Autoren nachweisen, daß auf verdichteten Parzellen bis zu 20% des Düngerstickstoffs durch Denitrifikation verloren gingen. Dagegen waren in der unverdichteten Kontrolle keine Denitrifikationsverluste von Düngerstickstoff festzustellen.

Verschiedene Versuche zeigen, daß nach mehrjähriger reduzierter Bodenbearbeitung die Lagerungsdichte in den obersten Bodenschichten höher, im Bereich der Krumenbasis dagegen niedriger ist als in der Pflugvariante (EHLERS et al. 1983, HOFMANN et al. 1990, STOCKFISCH 1997). Analoge Ergebnisse dokumentierten KNITTEL & STANZEL (1976) für den Eindringwiderstand.

Die langjährige differenzierte Bodennutzung im Systemversuch könnte ebenfalls Unterschiede in der Bodenstruktur hervorgebracht haben, was im folgenden diskutiert wird.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Primärbodenbearbeitung auf die Gefügekennwerte **Lagerungsdichte und Eindringwiderstand** waren gering (s. Abb. 5-7). Möglicherweise wurden die im Unterschied zu den jährlich gepflügten Flächen der kF sich anbahnende Gefügeentwicklungen in der IF durch den periodischen Pflugeinsatz nivelliert. Kennzeichnend für die kF mit jährlich tiefwendender Bodenbearbeitung war ein starker Anstieg der Lagerungsdichte und des Eindringwiderstandes im Bereich der Krumbasis (s. Abb. 5-7). Bei wechselnder Verwendung von Pflug, Grubber und Fräse in der Primärbodenbearbeitung in der IF zeigten sich im Vergleich zur kF überwiegend niedrigere Lagerungsdichten und Eindringwiderstände unterhalb der Krumbasis (32-37 cm). Der Effekt einer Dichtlagerung im Tiefenbereich 32-37 cm war in der IF nicht so deutlich zu erkennen wie in der kF. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit Untersuchungen von KLAGHOFER & EITZINGER (1990), die bei jahresweise wechselnder Verwendung von Pflug und Fräse im Vergleich zum jährlichen Pflugeinsatz geringere Eindringwiderstände im Bereich der Krumbasis feststellten. Auch CHRISTOPH et al. (1991) fanden geringere Eindringwiderstände im unteren Krumbereich im Vergleich zu jährlichem Pflugeinsatz, wenn der Boden nur einmal in vier Jahren gepflügt wurde.

Besonders kontinuierliche Verläufe der Eindringwiderstände konnten 1997 unter den Feldfrüchten Silomais und Ackerbohne in der IF beobachtet werden (s. Abb. 7). Der für eine Pflugsohle typische sprunghafte Anstieg der Eindringwiderstände im Tiefenbereich von 25-35 cm war nicht erkennbar.

Für eine **Auflösung der Krumbasisverdichtung** kommen zwei Prozesse in Betracht. Neben biotischen Effekten des Wurzelwachstums und der Grab- und Wühltätigkeit von Bodentieren können abiotische Effekte der Frostsprengung und Trockenrißbildung zu einer Auflockerung der Pflugsohle führen. Frostsprengung und Trockenrißbildung spielen auf den Löß-Parabraunerden in der Umgebung von Göttingen nur eine untergeordnete Rolle. Deshalb dürfte eine beginnende Auflösung der Krumbasisverdichtung hauptsächlich durch biotische Effekte stattfinden. VETTER & LICHTENSTEIN (1968) haben in Versuchen über die biologische Auflösung von Unterbodenverdichtungen infolge einer vermehrten Regenwurmaktivität eine Zunahme des Gesamtporenvolumens nachgewiesen. In verschiedenen Untersuchungen wurde über den lockernden Effekt vertikalgrabender Regenwürmer berichtet (ATLAVINYTE & ZIMKUVIENE 1985, RUSHTON 1986, JOSCHKO et al. 1989, BINET

1997). Bei der allmählichen biologischen Auflösung von Verdichtungen kommt vor allem der Grabeaktivität der Regenwürmer und der damit verbundenen Anlage von kontinuierlichen und stabilen Porensystemen große Bedeutung zu (FENNER 1995). Daneben nehmen Regenwürmer über die Abgabe großer Mengen Wurmlosung Einfluß auf das Bodengefüge. JOSCHKO (1989) konnte in Untersuchungen zeigen, daß die Dichte der Losungsaggregate unter der des Ausgangsbodens lag und diese zu einer Lockerung des Bodengefüges beitragen können.

Aufgrund der hohen Regenwurmaktivität (s. Kapitel 4.3) und dem Anbau der tiefwurzelnden Luzerne ist in der IF eine beginnende und neu induzierte biologische Auflockerung der Krumbasisverdichtung zu vermuten.

Ob dies bereits nach zweimalig aufeinanderfolgender reduzierter Bodenbearbeitung zu Silomais und Ackerbohne tatsächlich der Fall war, bleibt fraglich. CHRISTOPH et al. (1991) konnten nach vier Jahren reduzierter Bodenbearbeitung einer Tieflehm-Fahlerde noch keine Auflockerung der Pflugsohle finden. Ehlers et al. (1983) und Frede et al. (1994) berichteten von einer Auflockerung der Krumbasis in lößbürtigen Böden erst nach mehr als zehnjähriger reduzierter Bodenbearbeitung.

BLAKE et al. (1976) konnten 9 Jahre nach einer experimentellen Pflugsohlenverdichtung keine Lockerung trotz fortgesetzten Anbaus von Luzerne beobachten.

Dagegen berichteten VETTER & LICHTENSTEIN (1968) von einer Auflösung der Krumbasisverdichtung nach bereits neun Monaten. Auch EMANUEL (1977) erkannte in Göttingen auf Löß-Parabraunerde während einer zweijährigen Bodenruhe eine beginnende Auflösung der Pflugsohle.

Im Gegensatz zu den gepflügten Flächen wiesen die zweimal aufeinanderfolgend gefrästen Parzellen unter Ackerbohne 1996 bereits in 10 cm Bodentiefe einen relativ hohen Eindringwiderstand auf (s. Abb. 6). Ein zweites Maximum der Eindringwiderstände unter Ackerbohne im selbem Jahr wurde in 30 cm Bodentiefe beobachtet. HOFMANN et al. (1990) stellten ebenfalls bei periodischem Pflügen zur Hackfrucht und zweimalig aufeinanderfolgender pflugloser Bearbeitung unter Winterweizen einen typischen zweigipfligen Kurvenverlauf des Eindringwiderstandes fest. Die pfluglose Bearbeitung zu Silomais und Ackerbohne in der IF führte 1996 somit zu einer zweiten Bearbeitungssohle im oberen Krumbereich (10 cm; s. Abb. 6). Auch HERZOG (1986), KLAGHOFER &



EITZINGER (1990) und LIEBHARD et al. (1995) berichteten nach Einsatz der Fräse von einer Ausbildung eines starken Verdichtungshorizonts (Fräsbearbeitungssohle) unterhalb von 10 cm Bodentiefe. Untersuchungen von KAUDER (1984) zeigten, daß schon nach zweimaliger flacher Bearbeitung "Bearbeitungssohlen" im Krumbereich entstanden waren.

Durch die wechselnde Verwendung von Pflug, Fräse und Grubber in der IF werden allerdings die durch die Fräse verursachten Bearbeitungssohlen im oberen Krumbereich wieder aufgebrochen. Auch die höhere biologische Aktivität und das dichtere Wurzelsystem im oberen Krumbereich tragen zu einer stärkeren Auflockerung der Fräsohle bei. KNITTEL (1975) berichtete von einer Auflösung der Fräsohle bereits nach einem halben Jahr.

Somit ist ein Vorteil der Kombination von tiefwendender und flach-mulchender Bodenbearbeitung in der IF gegenüber der jährlichen Pflugarbeit in der überwiegend geringer ausgebildeten Krumbasisverdichtung zu sehen (s. Abb. 5-7). LIEBHARD & CLAUPEIN (1996) stellten bei einem jährlichen Wechsel der Bodenbearbeitung durch Fräse und Pflug im Vergleich zum jährlichem Pflügen bis in 50 cm Tiefe geringere Durchdringungswiderstände und somit günstigere Bedingungen für das Wurzelwachstum fest.

Ein kontinuierlicher Verlauf der Eindringwiderstände über die Tiefe ist für das Wurzelwachstum der Kulturpflanzen von Vorteil (FENNER 1995, MÄHNER 1998). Starke Änderungen innerhalb des durchwurzelbaren Raumes können auch bei relativ niedrigem Eindringwiderstand ein Hindernis für das Wurzelwachstum darstellen.

Insgesamt waren die im vorliegenden Versuch ermittelten Eindringwiderstände mit maximal 3 MPa relativ gering (s. Abb. 6 und 7). IBRAHIM & MILLER (1989) stellten in Untersuchungen mit verschiedenen Böden Werte von über 4 MPa fest. LOWERY & SCHULER (1994) und FENNER (1995) berichteten nach der Überfahrt von schweren Erntemaschinen von Eindringwiderständen über 5 MPa.

Trotz der festgestellten relativ geringen Eindringwiderstände von max. 3 MPa kann das Wurzelwachstum gehemmt werden. DEXTER (1986) ermittelte eine um 50 %-ige Abnahme des Wurzelwachstums, wenn der Eindringwiderstand den Wert von 2 MPa überstieg. Nach LIEBHARD et al. (1995) wurden bei einem Eindringwiderstand von  $> 2$  MPa das Wurzelwachstum von Zuckerrübe, Mais und Weizen stark behindert. Demnach ist

besonders in trockenen Jahren aufgrund gehemmter Wurzelentwicklung in Bodenschichten mit erhöhtem Eindringwiderstand mit Ertragseinbußen zu rechnen.

## 5.2 Wirkung unterschiedlicher Bodennutzung auf die organische Bodensubstanz

Durch die Art der Bewirtschaftung kann die Menge der organischen Bodensubstanz verändert werden. Somit bestimmt z. B. die Fruchtfolge im Bodennutzungssystem die Menge und Qualität der dem Boden zugeführten organischen Substanz (KUNDLER 1982). Zusätzlich wird durch die Intensität der Bodenbearbeitung der Umsatz der organischen Substanz beeinflusst. Eine tiefwendende und mischende Bodenbearbeitung beschleunigt den Abbau der organischen Substanz im Boden (DIEZ & BACHTHALER 1978, BALESIDENT et al. 1988, SCHINNER & SONNLEITNER 1996). Dagegen kommt es bei reduzierter Bodenbearbeitung zu einer Anreicherung der organischen Substanz nahe der Bodenoberfläche (RASMUSSEN & ROHDE 1988, GROCHOLL 1991, WOOD et al. 1991, CAMPBELL et al. 1995, HOFFMANN et al. 1996, LARNEY et al. 1997, STOCKFISCH 1997). Gleichzeitig werden die Umsetzungs- und Transformationsprozesse der an der Bodenoberfläche akkumulierten organischen Substanz verlangsamt (BALESIDENT et al. 1988, DOUGLAS & RICKMAN 1992). Jene durch tiefwendende Bodenbearbeitung inkorporierten Ernterückstände unterliegen infolge der relativ konstanten Temperatur- und Feuchtebedingungen und deren intensiverer Exposition gegenüber Bodenmikroorganismen- und Enzymen einem rascheren Umsatz als nahe der Bodenoberfläche verbleibende Rückstände.

Somit galt es, im Ackerbau-Systemversuch die Hypothese zu prüfen, ob im Vergleich zur kF der Feldfutterbau, die organische Düngung (Stallmist und Jauche) und die verminderte Bearbeitungsintensität eine Anreicherung von Kohlenstoff und Stickstoff im Boden der IF bewirkten.

Im Ackerbau-Systemversuch waren die  $C_t$ - und  $C_{org}$ -Gehalte nahezu identisch, da die in Form von Carbonaten gebundenen Kohlenstoffgehalte in der Ackerkrume vernachlässigbar gering waren ( $< 0,02\%$ ). Zur **Charakterisierung der organischen Bodensubstanz** dienten deshalb die  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalte des Bodens.

Die in Häufigkeit und Tiefe reduzierte Bodenbearbeitung in der IF änderte im Vergleich zur kF die Lagerungsdichte des Bodens (s. Abb. 5). In der kF beträgt die maximale Bearbeitungstiefe 30 cm, während in der IF nur einmal in sechs Jahren vor Luzerne der

Boden bis auf 25 cm Tiefe gepflügt wird. Der periodische Verzicht auf eine tiefe Lockerung des Bodens führte in der IF zu Sackungsprozessen und teilweise zu höheren Lagerungsdichten im unteren Krumbereich (s. Abb. 5).

Die Unterschiede in der Lagerungsdichte unterstreichen die Notwendigkeit, die Dynamik der organischen Bodensubstanz nicht allein anhand von Gehaltsveränderungen zu betrachten. CAMPBELL et al. (1995), MANZKE (1995) und STOCKFISCH (1997) empfahlen, bei Unterschieden in der Lagerungsdichte die Entwicklung der organischen Bodensubstanz anhand von Mengenänderungen zu beurteilen. Aus diesem Grund wurden zur Berechnung der  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Mengen die Lagerungsdichten der einzelnen Bodenschichten herangezogen.

Die  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Mengen der Versuchsjahre 1995 und 1996 wurden mit den Ausgangsmengen von 1981 verglichen, um die **Dynamik der organischen Bodensubstanz** zu erfassen (s. Abb. 8 und 9). Unter der Dynamik der organischen Bodensubstanz ist die quantitative Veränderung der Menge der organischen Substanz über die Zeit zu verstehen. Quantitative Veränderungen werden durch das Verhältnis von Zufuhr und Abfuhr sowie den Abbau der organischen Substanz bestimmt.

Beim Vergleich mit dem Ausgangszustand von 1981 ist jedoch zu beachten, daß Witterungsverhältnisse und Jahreszeit die  $C_t$ - und  $N_t$ -Gehalte stark beeinflussen (REICHELT 1990). Die jahreszeitlichen Änderungen im  $C_t$ -Gehalt liegen zwischen 0,1 und 0,2% (FLAIG 1976, REICHELT 1990, DEUBEL 1994). KÖRSCHENS (1982) stellte im Dauerversuch Bad Lauchstädt Veränderungen im  $C_t$ -Gehalt einer Löß-Schwarzerde um bis zu 0,2% während eines Jahres fest. Zu analogen Ergebnissen kam v. LÜTZOW (1993). Die Autorin konnte Unterschiede im Kohlenstoffgehalt einer konventionell bewirtschafteten Parabraunerde in der Friedberger Wetterau von bis zu 0,4% und im Stickstoffgehalt von bis zu 0,015% während der Vegetationszeit nachweisen. WACHENDORF (1996) berichtete von jahreszeitlichen Schwankungen im  $C_t$ -Gehalt von Ackerböden Norddeutschlands von über 0,3%. Nach KÖRSCHENS & SPITZEL (1978) und REICHELT (1990) sollte daher die Probenahme für  $C_t$ - und  $N_t$ -Untersuchungen jährlich zum gleichen Zeitpunkt, möglichst im Frühjahr, durchgeführt werden.

Ein Vergleich der  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Mengen der Versuchsjahre 1995 und 1996, die sich aus den  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalten und der Lagerungsdichte des Bodens ergeben, mit den Ausgangs-

mengen erscheint zulässig, da die Probenahme jeweils im Frühjahr erfolgte und die gleiche Analytik verwendet wurde. Für das Jahr 1981 lagen jedoch keine Meßwerte bis 30 cm Bodentiefe vor, so daß ein Vergleich mit den Ausgangsmengen nur für 0-20 cm Tiefe durchgeführt werden konnte (s. Abb. 8 und 9).

Nach 14 bzw. 15 Versuchsjahren sind in der IF bei optimaler N-Versorgung (N2) keine Veränderungen in den Gesamtmengen an  $C_{org}$  und  $N_t$  in 0-20 cm Tiefe gegenüber dem Ausgangszustand aufgetreten (s. Abb. 8 und 9). Durch Stallmistdüngung und legumen Feldfutterbau konnte das Ausgangsniveau der organischen Bodensubstanz gehalten werden.

In der Literatur wurde vielfach eine humusmehrende Wirkung von Luzerne beschrieben (KUNDLER 1982, LEITHOLD 1984, RAUHE et al. 1987, MICHEL 1991, DEUBEL 1994). Als Gründe werden der vermehrte Eintrag von organischen Stoffen in den Boden sowie die Bodenruhe durch die Mehrjährigkeit der Luzerne genannt (RAUHE 1969). Nach RAUHE et al. (1987) wurden einem sandigen Lehmboden bei Leipzig durch Luzerneanbau im Ansaatjahr Ernte- und Wurzelrückstände in Höhe von  $5,4 \text{ t ha}^{-1}$  und im Hauptnutzungsjahr in Höhe von ca.  $10,8 \text{ t ha}^{-1}$  zugeführt. Dadurch wurde nach 25 Versuchsjahren in einer Fruchtfolge mit zweijährigem Luzerneanbau die Humusmenge des Bodens gegenüber einer Fruchtfolge ohne Luzerneanbau bis in 60 cm Tiefe um bis zu  $25 \text{ t ha}^{-1}$  erhöht.

KLIMANEK (1990) berichtete dagegen, daß der  $C_t$ -Gehalt in der Krume durch einen zweijährigen Anbau von Luzerne nicht langfristig erhöht wird. KÖRSCHENS & WEBER (1984) beobachteten darüber hinaus, daß Luzerne den  $C_t$ - und  $N_t$ -Gehalt des Bodens nicht beeinflußt. RAUHE et al. (1987) führten diese Ergebnisse allerdings in erster Linie darauf zurück, daß die von KÖRSCHENS & WEBER (1984) untersuchten Standorte wegen des vorherrschenden Grundwassereinflusses nicht für den Luzerneanbau geeignet waren.

Die ortsübliche Fruchtfolge (kF) Zuckerrübe - Winterweizen - Wintergerste ohne Stallmistdüngung und Feldfutterbau hatte ein Absinken der  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Mengen in 0-20 cm Tiefe um ca. 10% gegenüber dem Ausgangszustand und der IF zur Folge (s. Abb. 8 und 9).

In der kF dürfte unter anderem der höhere Anteil von Zuckerrübe in der Rotation zu verminderten Mengen an  $C_{org}$  und  $N_t$  in 0-20 cm Bodentiefe geführt haben. Die humusmehrende Wirkung von Hackfrüchten ist seit langem bekannt und wird von vielen Autoren

beschrieben (KUNDLER 1982, ASMUS & VÖLKER 1984, LEITHOLD 1984, SCHNIEDER 1986, GALLER 1993, DEUBEL 1994). Als Ursache wird eine zum Boden verminderte Zufuhr an Ernte- und Wurzelrückständen im Vergleich zu anderen Feldfrüchten angegeben. Nach SCHINNER & SONNLEITNER (1996) wurden bei Kartoffel- und Rübenanbau die geringste Menge ( $< 10 \text{ dt ha}^{-1}$ ), bei Getreideanbau eine mittlere ( $12\text{-}17 \text{ dt ha}^{-1}$ ) und bei Klee-Gras- und Luzerneanbau ( $25\text{-}60 \text{ dt ha}^{-1}$ ) die höchste Menge an Wurzelrückständen dem Boden zugeführt.

Die Wirkung des Getreides auf die C-Bilanz des Bodens ist in der Literatur umstritten. SCHNIEDER (1986) berichtete von einem Dauerversuch auf Tieflehm-Fahlerde, in dem nach 12-jähriger Versuchsdauer eine Getreidemonokultur mit Strohdüngung eine annähernd humuserhaltende Wirkung zeigte. Dagegen kam es bei Hackfrucht-Getreide-Fruchtfolgen zu einem Humusabbau. KICK & POLETSCZNY (1974) stellten fest, daß nach 15-jähriger Versuchsdauer in einer getreidebetonten Fruchtfolge der Humusgehalt beibehalten werden konnte, wenn die Erntereste in den Boden eingearbeitet wurden. Bei Abfuhr der Koppelprodukte vom Feld und ausschließlicher mineralischer Düngung nahm der Humusgehalt ab. Auch KÄMPF (1983) berichtete von einer humuserhaltenden Wirkung des Getreides. Nach BECK (1984a) konnte in einer langjährigen Getreidemonokultur auf einer Parabraun-erde durch das Einarbeiten des anfallenden Stroh in Kombination mit einer Gründüngung eine positive Humusbilanz erreicht werden.

Andere Autoren beobachteten dagegen eine Humuszehrung durch den Anbau von Getreide mit Strohdüngung, ohne daß über den Verbleib der Ernterückstände Angaben gemacht wurden (WICKE et al. 1990, DEUBEL 1994). DEBRUCK (1981) berichtete von einer negativen Humusbilanz des Getreidebaus bei ausschließlicher organischer Düngung in Form der Stoppelrückstände. STEINBRENNER & SMUKALSKI (1984) wiesen im Fruchtfolgeversuch Dewitz mit Getreide-Hackfrucht- bzw. reinen Getreidefruchtfolgen im Verlauf von 15 Jahren einen Rückgang im Gehalt an organischer Bodensubstanz nach.

In der kF war die alleinige organische Düngung in Form der Koppelprodukte (Rübenblatt und Getreidestroh) und der Zwischenfrucht (Wicke) nicht geeignet, eine Abnahme der  $C_{\text{org}}$ - und  $N_{\text{t}}$ -Mengen gegenüber dem Ausgangszustand zu verhindern (s. Abb. 8 und 9). In der IF blieb hingegen durch Feldfutterbau und organischer Düngung bei gleichzeitig

reduzierter Bearbeitungstiefe die Menge an organischer Substanz erhalten (s. Abb. 8 und 9).

Neben dem Vergleich zum Ausgangszustand ist es sinnvoll, die Entwicklung der organischen Bodensubstanz anhand eines Vergleichs zwischen den Bodennutzungssystemen nach einer bestimmten Versuchsdauer zu beurteilen (horizontaler Vergleich). KÖRSCHENS (1982) bevorzugte diese Auswertung von Dauerversuchen auf Grundlage der Differenzen zwischen den Prüfgliedern nach einer bestimmten Versuchsdauer. Durch den horizontalen Vergleich der Bodennutzungssysteme innerhalb eines Jahres werden mögliche Einflüsse der Probenahme, Probenahmeterminen und der Untersuchungsmethode weitgehend eliminiert. Auch ist der Vergleich zwischen aktuellen Mengen und Ausgangsmengen auf der Basis der oberen 20 cm der Krume problematisch, da sich die Krume bis 30 cm Tiefe erstreckt und die organische Substanz in den untersuchten Bodennutzungssystemen einer unterschiedlichen Tiefenverteilung unterlag (s. Abb. 10). Aus den genannten Gründen wurde zusätzlich ein horizontaler Vergleich zwischen den Bodennutzungssystemen anhand der Gesamtmengen an  $C_{org}$  und  $N_t$  in 0-30 cm Tiefe angestellt (s. Tab. 3).

Nach 15jähriger Versuchsdauer waren die  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Mengen in 0-30 cm Tiefe im Mittel der Früchte in der IF im Vergleich zur kF um 4,1 bzw. 0,4 t ha<sup>-1</sup> erhöht. Unter Winterweizen war die Anreicherung mit 4,7 bzw. 0,5 t ha<sup>-1</sup> signifikant (s. Tab. 3). Somit führte die Kombination aus dem Anbau von Feldfutterpflanzen, der organischen Düngung und der vermehrten Bodenruhe zu einer größeren Menge organischer Bodensubstanz.

MANZKE (1995) wies nach 10jähriger Versuchsdauer des Ackerbau-Systemversuchs in der IF ebenfalls tendenziell höhere  $C_t$ -Mengen in der Bodenschicht 0-30 cm nach, konnte aber keine signifikanten Unterschiede zwischen den geprüften Bearbeitungsvarianten feststellen. Damit wird der langfristige Charakter von Humusgehaltsveränderungen deutlich (RASMUSSEN & COLLINS 1991). Nach WEISSKOPF (1986) ergaben sich erst nach mehr als zehn Jahren vereinzelt Unterschiede in den  $N_t$ - und  $C_{org}$ -Gehalten als humuschemische Kennwerte zwischen unterschiedlichen Bodennutzungssystemen.

Unter den drei Feldfrüchten der kF konnten ähnliche Mengen an  $C_{org}$  und  $N_t$  festgestellt werden (s. Tab. 3). Tendenziell zeigte sich unter Zuckerrübe in der kF die geringste Menge an organischer Bodensubstanz. Auch die Gründüngung (Sommerwicke) zu Zuckerrübe

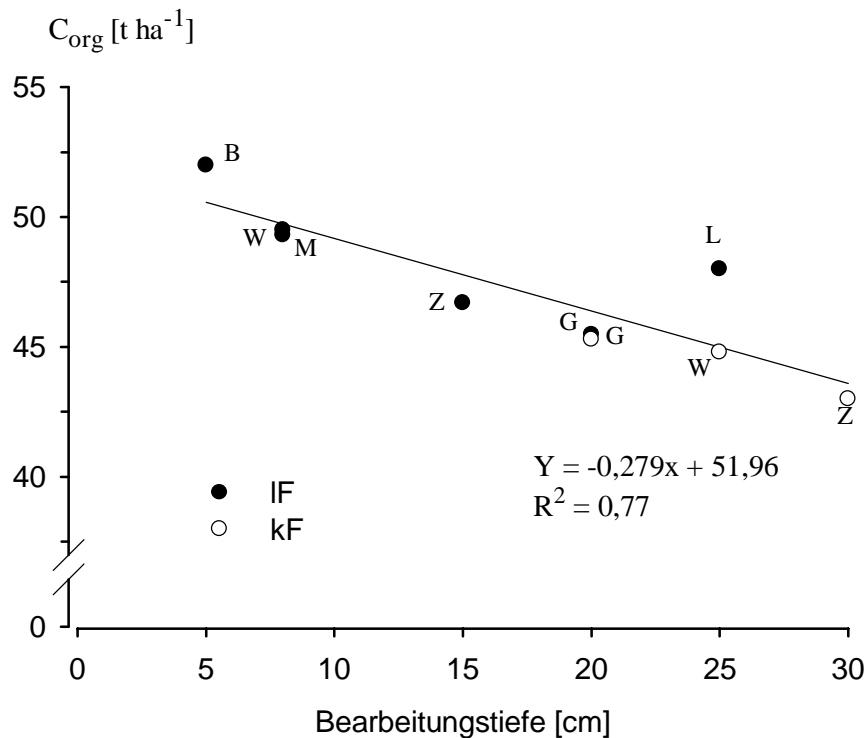
konnte den leichten Rückgang der  $C_{\text{org}}$ - und  $N_t$ -Mengen im Bodennutzungssystem kF nicht unterbinden. Nach DE HAAN (1980) und POWER (1990) besitzt eine Gründüngung eine geringere Reproduktionsleistung der organischen Bodensubstanz als Ernterückstände oder Stallmist. Die Autoren sehen die primäre Funktion der Gründüngung vielmehr in einer kurzfristigen "biologischen Festlegung" von leicht auswaschbarem Bodenstickstoff für die nachfolgende Feldfrucht. DE HAAN (1980) führte die geringere Humusreproduktionsleistung von Gründüngung auf den relativ geringen Ligningehalt der grünen Pflanzenmasse zurück. Streu mit geringen Ligningehalten unterliegt einem relativ raschen mikrobiellen Abbau (FLAIG 1964, DONELLY et al. 1990). Organische Substanz mit hohen Umsatzraten ist vor allem durch einen hohen Anteil an Kohlenhydraten gekennzeichnet (SKJEMSTAED et al. 1986, GOLCHIN et al. 1994). SCHINNER & SONNLEITNER (1996) gaben für die Abbaurate verschiedener Verbindungen in der organischen Bodensubstanz folgende Reihe an: Zucker, Aminosäuren > Protein > Cellulose > Ligninverbindungen.

KLIMANEK (1990) stellte in Inkubationsversuchen einen Zusammenhang zwischen dem Mineralisierungsgrad oberirdischen Pflanzenmaterials und dem Entwicklungsstadium der Pflanze fest. Die Sproßmasse grüner Pflanzen wurde schneller abgebaut als die reifer Pflanzen.

HALLAM & BARTHOLOMEV (1953) verwiesen auf einen verstärkten Humusabbau durch Gründüngung. Möglicherweise führt die Zufuhr von leicht abbaubarem organischem Material zu einem verstärkten Abbau der nativen organischen Bodensubstanz (Priming effect). Untersuchungen zum Einfluß des Zusatzes leicht abbaubaren Pflanzenmaterials auf den Abbau nativer organischer Substanz zeigten, daß die Mineralisierung von Stickstoff aus der Gründüngung von einer intensivierten Mineralisierung des bodeneigenen organischen Stickstoffs begleitet ist (DALENBERG & JAGER 1989).

In der IF führte die **vermehrte Bodenruhe** und der **Feldfutterbau** zu teilweise signifikanten Unterschieden zwischen den Feldfrüchten (s. Tab. 3). So konnte nach zweimalig aufeinanderfolgender flacher (8 und 5 cm) Bodenbearbeitung zu Silomais und Ackerbohne unter letzterer die höchste Menge an organischer Bodensubstanz in 0-30 cm Tiefe festgestellt werden. Die  $C_{\text{org}}$ - und  $N_t$ -Gehalte in 0-10 cm Tiefe unter Ackerbohne wurden durch den zweimaligen Verzicht auf eine tiefwendende Bodenbearbeitung im Vergleich zu den anderen Kulturen signifikant erhöht (s. Abb. 10).

Auffällig war der deutliche Zusammenhang zwischen der jeweiligen Bearbeitungstiefe und der Menge an organischer Substanz in 0-30 cm Tiefe unter den Früchten der lF und kF (s. Abb 30).



**Abb. 30:** Zusammenhang zwischen der Gesamtmenge an organischem Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) bis 30 cm Bodentiefe unter den Feldfrüchten der langen (lF) und kurzen (kF) Fruchtfolge (Mittelwerte über die Beprobungstermine April 1995 und April 1996) und der Bearbeitungstiefe; Z = Zuckerrübe, W = Winterweizen, G = Wintergerste, L = Luzerne, M = Silomais, B = Ackerbohne

Hinweise darauf, daß bereits eine kurze Dauer reduzierter Bodenbearbeitung die Gesamtmenge organischer Bodensubstanz in der Krume beeinflusst, ergaben sich aus Untersuchungen von HOFFMANN et al. (1996). Bereits nach zwei Jahren lagen die  $C_{org}$ -Gehalte des reduziert bearbeiteten Bodens in 0-10 cm Tiefe tendenziell über den  $C_{org}$ -Gehalten des gepflügten Bodens. Für die Bodenschichten 10-20 cm und 20-30 cm wurden dagegen keine Unterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten festgestellt (HOFFMANN et al. 1996).

Nach SCHINNER & SONNLEITNER (1996) und GREILICH & KLIMANEK (1976) beschleunigt eine tiefwendende und mischende Bodenbearbeitung den Abbau der organischen Bodensubstanz im Boden im Vergleich zu einer flachen und nichtwendenden Bearbeitung.



Möglicherweise führte eine höhere Umsatzrate der organischen Bodensubstanz bei tieferer Bearbeitung zu geringeren  $C_{\text{org}}$ -Mengen im Boden (s. Abb. 30).

Die Anreicherung der organischen Substanz während der Rotation unter Ackerbohne dürfte auf eine Anreicherung der labilen Fraktion der organischen Substanz zurückzuführen sein. Der Anteil leicht abbaubarer Verbindungen an der organischen Bodensubstanz nimmt mit abnehmender Intensität der Bewirtschaftung zu (SCHULTEN et al. 1990). ANGERS et al. (1993a) stellten nach vier Jahren praktizierter reduzierter Bodenbearbeitung im Vergleich zur Bearbeitung mit dem Scharpflug einen um 20% höheren organischen Substanzgehalt in der obersten Bodenschicht fest. Bei reduzierter Bearbeitung waren die Gehalte an heißwasserlöslichen sowie an säurehydrolysierbaren Kohlenhydraten um 40% höher als unter Bearbeitung mit dem Scharpflug. Die organische Substanz reicherte sich folglich in labilen Formen an (ANGERS et al. 1993a).

Die relativ hohe Abnahme von etwa  $5 \text{ t ha}^{-1} C_{\text{org}}$  bzw.  $0,6 \text{ t ha}^{-1} N_t$  zwischen dem Fruchtfolgepaar Ackerbohne und Zuckerrübe (s. Tab. 3) kann also vermutlich auf den raschen Abbau der labilen Fraktion der organischen Bodensubstanz nach 15 cm tiefer Pflugfurche zurückgeführt werden. Zusätzlich wirkte sich das relativ lange Brachliegen der Fläche nach der Ackerbohnernte bis zur Zuckerrübenaussaat im Frühjahr negativ auf die Humusbilanz aus.

Ein unmittelbarer Einfluß der **Stallmistdüngung** (jeweils in Höhe von 330 dt Frischmasse  $\text{ha}^{-1}$  zu Wintergerste und Silomais) auf die  $C_{\text{org}}$ - und  $N_t$ -Mengen ließ sich nicht erkennen (s. Tab. 3). Ebenso wie in der vorliegenden Untersuchung konnte DEUBEL (1994) in verschiedenen Fruchtfolgen keinen direkten Einfluß einer Stallmistdüngung von  $500 \text{ dt ha}^{-1}$  zu Hackfrüchten nachweisen.

In der IF beträgt der  $C_{\text{org}}$ -Gehalt (0-30 cm Tiefe) im Mittel über die Fruchtfolge 1,2% und die  $C_{\text{org}}$ -Menge ca.  $48 \text{ t ha}^{-1}$  (s. Abb. 10 und Tab. 3). Mit einer Stallmistgabe (Rottemist) von  $330 \text{ dt ha}^{-1}$  mit einem  $C_{\text{org}}$ -Gehalt von etwa 8,75% (KELLER et al. 1997) wird dem Boden ca.  $2,9 \text{ t ha}^{-1}$  organisch gebundener Kohlenstoff zugeführt. Diese Menge entspricht in etwa 0,07%  $C_{\text{org}}$  in 0-30 cm Tiefe. Da von der Ausbringung des Stallmistes bis zur Probenahme im Frühjahr bereits Abbauprozesse stattfanden, dürfte die Zufuhr von  $C_{\text{org}}$  durch Stallmist im Bereich der analytischen Fehlergrenzen liegen. Die Ergebnisse erscheinen somit plausibel.

Eine langfristig wirkende humusmehrende Wirkung von Stallmist ist hingegen unbestritten (DIEZ & BACHTHALER 1978, KÖRSCHENS 1978, WEISSKOPF 1986, RASMUSSEN & COLLINS 1991, GALLER 1993, DEUBEL 1994, MANZKE 1995). In einem Vergleich verschiedener organischer Dünger hatte Stallmist die größte Humusanreicherung pro Einheit Trockenmasse zur Folge (DEUBEL 1994). Vor allem durch den hohen Anteil schwer abbaubarer organischer Verbindungen im Stallmist kommt es zu einer Bildung von vergleichsweise abbauresistenten Dauerhumusbestandteilen.

Ein Einfluß der Bodennutzungssysteme auf das  $C_{\text{org}}/N_{\text{t}}$ -Verhältnis war nicht zu erkennen (s. Tab. 3). Hingegen berichteten ASMUS & VÖLKER (1984) nach 8-jähriger Versuchsdauer von einem Trend zu höheren C/N-Verhältnissen bei steigender Häufigkeit der Strohdüngung (bis zu dreimal in vier Jahren). Die Autoren begründeten die höheren C/N-Verhältnisse im Boden bei häufiger Strohdüngung mit der Zufuhr großer Mengen an Ernteresten mit weitem C/N-Verhältnis. Im Ackerbau-Systemversuch wird jedoch dem Boden in beiden Fruchtfolgen neben der Strohdüngung organisches Material mit einem relativ engen C/N-Verhältnis (Zuckerrübenblatt und Wickengründung in kF; Erntereste von Leguminosen, Stallmist und Jauche in IF) zugeführt. Auch dürfte aufgrund des höheren  $C_{\text{org}}$ -Gehaltes des Bodens im Ackerbau-Systemversuch (1,1-1,2%), im Vergleich zum  $C_{\text{org}}$ -Gehalt des von ASMUS & VÖLKER (1984) untersuchten sandigen Bodens (etwa 0,7%), der Einfluß der organischen Düngung auf das  $C_{\text{org}}/N_{\text{t}}$ -Verhältnis geringer ausfallen. Somit scheinen die in den beiden Bodennutzungssystemen festgestellten gleich hohen  $C_{\text{org}}/N_{\text{t}}$ -Verhältnisse trotz unterschiedlicher Bewirtschaftung plausibel.

Im Verlauf von 15 Jahren hat sich der Humusgehalt in der kF bei optimaler mineralischer N-Düngung ( $N_2$ ) durch intensive Bewirtschaftung gegenüber dem Ausgangszustand und der IF um etwa 10% verringert. Aufgrund des Alters des Ackerbau-Systemversuches kann davon ausgegangen werden, daß der Differenzierungsprozeß sehr weit fortgeschritten bzw. nahezu abgeschlossen ist. In Abhängigkeit von der Bewirtschaftung dürften sich zwischen den Bodennutzungssystemen Humusgleichgewichte auf gering verschiedenen Niveaus herausgebildet haben. Ein Humusgleichgewicht, hier betrachtet als Gehalte an  $C_{\text{org}}$  und  $N_{\text{t}}$ , bedeutet eine Übereinstimmung der im Fruchtfolgeumlauf durch Bodenorganismen abgebauten Menge organischer Substanz mit der dem Boden zugeführten (SAUERBECK & JOHNEN 1974). Diese Gleichgewichte können sich nur in Dauerversuchen wie dem

Ackerbau-Systemversuch einstellen, da die Bewirtschaftung über viele Jahre konstant gehalten wird. Dadurch wird die Bedeutung von Dauerversuchen zur Beurteilung der Entwicklung der organischen Bodensubstanz unterstrichen.

Unter den Voraussetzungen dieses Standortes zeichnet sich ein offensichtlich recht stabiler Gehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff von ca. 1,1% ab, der auch durch die intensive Wirtschaftsweise der kF wahrscheinlich nicht unterschritten wird.

### **5.3 Auswirkungen langjähriger differenzierter Bodennutzung auf die Regenwürmer**

Die Regenwurm-Biomassen und die Regenwurm-Aktivitätsdichten der langen und kurzen Fruchtfolge unterschieden sich deutlich (s. Abb. 11, 12 und Tab. 5). Im direkten Vergleich der Früchte Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste wurden im Mittel in der IF um den Faktor 2,0 höhere Regenwurm-Biomassen und um den Faktor 1,1 höhere Aktivitätsdichten als in der kF bestimmt. Im Mittel aller Feldfrüchte der IF (Zuckerrübe, Winterweizen, Wintergerste plus Silomais, Luzerne und Ackerbohne) zeigte der Vergleich der Bodennutzungssysteme in der IF um den Faktor 2,7 höhere Regenwurm-Biomassen und um den Faktor 1,3 höhere Aktivitätsdichten.

Wirkungen einzelner Faktoren aus dem Faktorenkomplex der Bodennutzungssysteme auf die Regenwurmpopulation konnten nicht detailliert herausgearbeitet werden, da die Intensität der Bodenbearbeitung, die organische Düngung und die Art der Kulturen in der Fruchtfolge nicht einzeln variiert wurden. Trotzdem werden Unterschiede in der Regenwurm-Biomasse und der Aktivitätsdichte zwischen den Bodennutzungssystemen im wesentlichen mit der **Intensität der Bodenbearbeitung** in Zusammenhang gebracht. JORDAN et al. (1997) untersuchten auf einem schluffigen Lehm den Einfluß von Bearbeitungssystem, Fruchtfolge und N-Düngung auf die Regenwurmpopulation. Sie fanden heraus, daß als wichtigster Faktor die Bodenbearbeitung die Anzahl der Regenwürmer pro Flächeneinheit veränderte. So wurde im System ohne Bearbeitung im Vergleich zur konventionellen Bewirtschaftung mit dem Wendepflug eine höhere Regenwurmdichte gefunden, unabhängig von Fruchtfolge und Höhe der N-Düngung. In Untersuchungen von KNÜSTING (1992) beeinflusste die Bodenbearbeitungsintensität die Regenwurmbiomasse stärker als angebaute Kulturpflanzen. WELLMANN (1991) sah

ebenfalls die Intensität der Bodenbearbeitung als eine wesentliche Einflußgröße für die Regenwurmpopulation an.

Mit zunehmender Bodenruhe in einem Bodennutzungssystem nahm die Aktivitätsdichte der Regenwürmer zu (WELLMANN 1991, GERSCHAU et al. 1992). Nach HENKE (1987) nahm dabei die Eingriffsintensität von Bearbeitungssystemen in ihrer Auswirkung auf die Regenwurmpopulation in folgender Reihenfolge ab: Pflug > Grubber > Fräse > Direktsaat. ZICSI (1969) gab ebenfalls als Hauptursache für die niedrige Regenwurmakktivität bei konventioneller Wirtschaftsweise die wendende Bodenbearbeitung an.

LANGMAACK et al. (1996) berichteten von der Auswirkung einer flächendeckend durch Überfahung mit schwerem Gerät (10 und 20 t Gesamtgewicht) erzeugten Bodenverdichtung auf die Lumbriciden in einem lehmigen Schluff. Dabei reagierten adulte Regenwürmer unter konventioneller Lockerbodenwirtschaft (Streichblechpflug) mit einer signifikanten Abundanzabnahme auf die Verdichtung. BOSTRÖM (1986) und PIZL (1992) konnten Abhängigkeiten zwischen der Lagerungsdichte des Bodens und dem Anteil juveniler Tiere in der Regenwurmgemeinschaft feststellen. Letzterer nimmt mit zunehmender Lagerungsdichte ab. In einem verdichteten Lößboden mit einer Lagerungsdichte von über  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$  wiesen SÖCHTING & LARINK (1992) eine um über 50% verringerte Regenwurm-Biomasse und Abundanz im Vergleich zur unverdichteten Kontrolle ( $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ ) nach.

Obwohl sich jede Bodenbearbeitung nachteilig auf die Regenwurmfauna auswirkt (BOSCH & MOURA-PEAO 1987), hat insbesondere das Pflügen nachhaltige Schädigungen der Regenwürmer zur Folge (KNÜSTING et al. 1991). Die Verwendung des Grubbers anstelle des Pfluges sowie der Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten führte zu höheren Regenwurm-Biomassen als in konventionell bewirtschafteten Flächen ohne Zwischenfruchtanbau (BOSCH & MOURA-PEAO 1987).

In flach bearbeitetem Boden wiesen FRIEBE & HENKE (1992) sowie STOCKFISCH (1997) eine um den Faktor 2 bzw. 2,2 höhere Aktivitätsdichte und eine um den Faktor 1,6 bzw. 2,9 höhere Regenwurm-Biomasse im Vergleich zu gepflügtem Boden nach.

DOUBE et al. (1994) berichteten dagegen von ähnlich hohen Regenwurmdichten in zwei australischen Steppenböden bei bearbeitetem Boden und Direktsaat-Systemen. Die

Autoren gingen davon aus, daß ein ausreichendes Nahrungsangebot den Einfluß der Bodenbearbeitung überlagern kann.

Als Ursache für geringere Regenwurmbiomassen und -aktivitätsdichten bei tiefwendender Bodenbearbeitung wird häufig ein verringertes Nahrungsangebot angegeben (EDWARDS & LOFTY 1982a, BRUNOTTE et al. 1992, GERSCHAU 1995). Durch eine tiefwendende Bodenbearbeitung wird die makroorganische Substanz vergraben und der an der Bodenoberfläche Nahrung aufnehmenden Art *Lumbricus terrestris* die Nahrungsgrundlage entzogen. ANDRASKI et al. (1985) bonitierten bei Pflugeinsatz 3% Mulchbedeckung, während der nicht bearbeitete Boden zu 66% mit Mulchmaterial bedeckt war. BORCHERT (1988) präsentierte ähnliche Ergebnisse aus einem seit 1980 laufenden Bodenbearbeitungsversuch. Dabei wurde auf fräsbearbeiteten Flächen eine Bodenbedeckung durch Pflanzenrückstände von 56%, durch das Einpflügen der Erntesterne hingegen nur eine Bodenbedeckung von ca. 10% erreicht.

Die oben genannten Gründe dürften auch für die Unterschiede des Regenwurmbesatzes zwischen den Bodennutzungssystemen in der vorliegenden Untersuchung verantwortlich sein. Der jährliche Wendepflugeinsatz in der kF führte zu einer tiefen Einarbeitung der Ernterückstände. Dagegen verblieb nach dem Verzicht auf eine tiefwendende Bodenbearbeitung zu Zuckerrübe, Winterweizen, Silomais und Ackerbohne in der IF eine Mulchschicht an der Bodenoberfläche. Folglich war das Nahrungsangebot für *Lumbricus terrestris* in der IF höher als in der kF und führte zu höheren Regenwurmbiomassen (s. Abb. 11 und 12).

Diese Vermutung wird durch Untersuchungen von EDWARDS & LOFTY (1982a) sowie NUUTINEN (1992) gestützt, die in langjährig reduziert bearbeiteten Böden höhere Individuenzahlen und Biomassen der tiefgrabenden, anözischen Arten fanden als in Pflugvarianten.

Weiterhin kann in der kF durch den intensiven Einsatz des Wendepfluges ein größerer Anteil der Regenwürmer direkt geschädigt worden sein als im Bodennutzungssystem IF mit teilweise reduzierter Bodenbearbeitung. So können die Regenwürmer durch die Bearbeitungsgeräte gequetscht und zerschnitten (ZICSI 1967) und ihre Gangsysteme zerstört werden. Nach BAUCHHENß & HERR (1988) wurden durch Bearbeitungsmaß-

nahmen vor allem die großen, adulten Tiere verletzt. Die Schädigung geschlechtsreifer Tiere kann zu einer verminderten Fortpflanzung führen.

Die Art der Bodenbearbeitung beeinflusst somit die Abundanz und die Biomasse einer Regenwurmpopulation. Im Ackerbau-Systemversuch konnte der Einfluß der Bodenbearbeitung am deutlichsten im direkten Vergleich der Bodennutzungssysteme unter Winterweizen nachgewiesen werden. Obwohl durch die Abfuhr des Rübenblattes in der IF das Nahrungsangebot für die Regenwürmer verringert war, lagen die Werte für die Regenwurmbiomasse unter Winterweizen in der IF signifikant über denen der kF (s. Abb. 11 und 12). Die positive Wirkung der IF auf die Regenwürmer resultierte aus der weniger intensiven Bodenbearbeitung mittels Grubber zum Winterweizenanbau. Auch ZICSI (1958) weist in seinen Untersuchungen auf die schonende Wirkung des Grubbers auf die Regenwürmer hin. GERSCHAU (1995) beobachtete ebenfalls ein Jahr nach dem Pflugeinsatz einen Anstieg der Regenwurmaktivität, soweit zur Folgefrucht der Boden reduziert bearbeitet wurde.

Neben der Bodenbearbeitung können bestimmte **Kulturen** auf die Zusammensetzung und Größe der Regenwurmpopulation wirken. Die geringsten Abundanzen und Biomassen im Vergleich zu den anderen Früchten wurden unter Zuckerrübe beobachtet (s. Abb. 11, 12 und Tab. 5). Auch Untersuchungen von KNÜSTING (1992) ergaben, daß Flächen mit Getreidekulturen 3 - 7 fach höhere Aktivitätsdichten aufwiesen als Zuckerrübenflächen. Schon EDWARDS (1983) ermittelte unter Zuckerrübe nur 20% der Abundanzen von *Lumbricus terrestris* unter Winterweizen. Ebenso wiesen WESTERNACHER & GRAFF (1987) und KNÜSTING et al. (1991) nach, daß sich Getreidekulturen günstig auf die Regenwurmpopulation auswirken.

Als Ursache könnte die geringe Bodenbedeckung in den Zuckerrübenflächen im Frühjahr in Betracht gezogen werden. Durch eine fehlende Pflanzendecke wird die Regenwurmpopulation negativ beeinflusst (EDWARDS 1983, WESTERNACHER-DOTZLER 1988). Besonders ungünstig wirken sich durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen im Boden auf die Regenwürmer aus (EIJACKERS & VAN DER DRIFT 1976, GRAFF 1984). CAIS (1992) berichtete ebenfalls von einem ungünstigen Mikroklima für Regenwürmer, wenn der Boden über längere Zeit unbedeckt bleibt. KNÜSTING (1992) sah die Ursache für die niedrigen Regenwurm-Biomassen unter

Zuckerrübe im geringeren Nahrungsangebot für die Regenwürmer im Vergleich zu überwinternden Feldfrüchten. So dürfte der Biomasseanstieg der Regenwürmer in der vorliegenden Untersuchung unter den nachfolgenden Feldfrüchten Winterweizen und Wintergerste (Abb. 11 und 12) im Zusammenhang mit dem verbesserten Nahrungsangebot stehen. Dieses setzt sich bis zum Frühjahr vor allem aus dem Bestandsabfall der Kulturpflanze und den Ernterückständen der Vorfrucht zusammen. Dagegen vermindern längere Zeiträume ohne Bodenbedeckung drastisch das Nahrungsangebot für die Regenwürmer (PETERS 1984).

Obwohl Silomais und Ackerbohne den Boden im Frühjahr ebenfalls nur gering bedeckten, wurden im Vergleich zu Zuckerrübe höhere Regenwurm-Biomassen und Aktivitätsdichten gefunden (s. Abb. 11, 12 und Tab. 5). Die Regenwurmpopulation unterlag dabei weniger dem Einfluß der aktuellen Feldfrucht, sondern vielmehr dem Einfluß der Vorfruchtwirkungen. Als Ursache für die hohen Regenwurm-Biomassen und Aktivitätsdichten unter Silomais und Ackerbohne können daher neben der reduzierten Bodenbearbeitung zu diesen Früchten auch die positive Vorfruchtwirkung von Luzerne genannt werden (DURST & KAHNT 1988). Aufgrund der langen Entwicklungszeit der Regenwürmer (*Lumbricus terrestris* 200 - 250 Tage; GRAFF 1984) können eventuelle Abundanz- und Biomasseänderungen unter Luzerne erst mit ca. einem Jahr Verzögerung auftreten (LOFS-HOLMIN 1983) und werden somit erst unter Silomais bzw. Ackerbohne nachweisbar.

Neben der Intensität der Bodenbearbeitung und der Fruchtfolge unterscheiden sich die Bodennutzungssysteme in der Art der **organischen Düngung**. Die Zufuhr an organischer Substanz ist für die Ernährung und Entwicklung der Regenwurmpopulation von großer Bedeutung (LOFS-HOLMIN 1983, PETERS 1984, DOUBE et al.1994). Die fördernde Wirkung der organischen Düngung, insbesondere von Stallmist und Ernterückständen, auf die Regenwurmpopulation wurde schon vielfach beschrieben (EDWARDS & LOFTY 1982b, LOFS-HOLMIN 1983, BAUCHHENB & HERR 1986, MAKESCHIN 1990, KNÜSTING 1992, ROTT 1992). MAKESCHIN (1990) führte die fördernde Wirkung von Stallmist auf die Zufuhr energiereicher organischer Verbindungen, und somit auf eine Verbesserung der Nahrungssituation für die Regenwürmer zurück. Der positive Effekt von Stallmistgaben auf die Regenwurmpopulation wird durch zusätzlich applizierte mineralische N-Düngung

noch deutlich verstärkt (EDWARDS & LOFTY 1982b). Diesen verstärkenden Effekt erklärt man sich mit nochmals gesteigerter Biomasseproduktion und höheren Ernterestmengen.

Die organische Düngung beschränkt sich in der kF auf die jährlich auf dem Feld verbleibenden Erntereste und einer Wickengründung zu Zuckerrübe. Dagegen wird in der IF das Zuckerrübenblatt und das Winterweizenstroh vom Feld geräumt und dafür Stallmist zu Wintergerste und Stallmist plus Jauche zu Silomais ausgebracht.

Die Wirkung der Stallmistdüngung zu Wintergerste in der IF war gering (s. Abb. 11 und 12). Offenbar wurden die Regenwürmer durch das tiefe Einarbeiten des ausgebrachten Stallmistes nicht gefördert (PETERS 1984). Durch die besondere Ernährungsweise, die makroorganische Substanz von der Bodenoberfläche in die Röhren hineinzuziehen, wirkt sich das Vergraben des Stallmistes nachteilig auf die Entwicklung der Art *Lumbricus terrestris* aus. Endogäische Arten wie *Allolobophora caliginosa* und *Allolobophora rosea* profitieren dagegen vom Einarbeiten der organischen Substanz (EDWARDS & LOFTY 1975, BARNES & ELLIS 1979, BAUCHHENß 1983). Diese Arten sind jedoch auf den Versuchsflächen des Ackerbau-Systemversuchs von zu geringer Bedeutung (s. Tab. 7), als daß durch sie ein positiver Einfluß des eingepflügten Stallmistes auf die Gesamtbiomasse und Gesamtaktivitätsdichte der Lumbriciden nachgewiesen werden konnte.

Zusätzlich wurde in der IF vor der Wintergersten-Saat das Stroh der Vorfrucht Winterweizen vom Feld geräumt. Dadurch wurde das verfügbare Nahrungsangebot gemindert. Das hatte unter Wintergerste einen deutlichen Rückgang der Aktivitätsdichte (s. Tab. 5) der Regenwürmer zur Folge.

Denkbar ist jedoch auch eine zeitliche Verzögerung der positiven Wirkung der Stallmistdüngung. Von vielen Autoren wird die nachhaltige Wirkung des Stallmistes auf die Regenwurmpopulation betont wird (KLAPP 1967, WILKE 1962, EDWARD & LOFTY 1977, LOFS-HOLMIN 1983). PETERS (1984) fand, daß die Hauptwirkung der Stallmistgabe erst mit sechs- bis achtmonatiger Verzögerung eintritt.

Die Stallmist- und Jauchedüngung zu Silomais fand in beiden Jahren erst kurz nach dem Regenwurmfang statt. Somit konnte die organische Düngung die Regenwurmpopulation in den Silomaisparzellen nicht beeinflussen. Aufgrund der nachhaltigen Wirkung von Stallmist ist aber eine positive Wirkung auf die Regenwurmpopulation unter der Nachfrucht Ackerbohne wahrscheinlich. Die hohen Regenwurmbiomassen und -aktivitätsdichten unter



den Ackerbohnen 1996 bekräftigen diese Vermutung (s. Abb. 11). Ähnliche Ergebnisse dokumentierte LOFS-HOLMIN (1983) für eine Stallmistdüngung zu Zuckerrübe, wobei ein deutlicher Anstieg der Abundanz von *Allolobophora caliginosa* erst unter der zweiten Nachfrucht Wintergerste beobachtet werden konnte.

Nach Wickengründüngung und Zuckerrübenblattdüngung in der kF konnten keine nachhaltig positiven Effekte auf die Regenwurmbiomasse festgestellt werden (s. Abb. 11 und 12). Die starke Abnahme der Einzelwurmgewichte unter Winterweizen in der kF deutet vielmehr auf einen akuten Nahrungsmangel hin (s. Tab. 6).

Ebenso wie in der vorliegenden Untersuchung konnte PETERS (1984) weder für eine Gründüngung noch für eine Zuckerrübenblattdüngung zu Winterweizen einen positiven Einfluß auf die Regenwurmbiomasse feststellen. Offensichtlich ist nicht nur die Menge, sondern auch die Qualität der organischen Düngung entscheidend. PETERS (1984) mutmaßte, daß durch Gründüngung dem Boden hauptsächlich mikrobiell leicht abbaubare organische Substanzen zugeführt werden. Somit würde eine Gründüngung kurzfristig zwar die Mikroorganismen, kaum aber die Regenwurmpopulation fördern.

Weiterhin dürfte das tiefe Einarbeiten der Wickengrünmasse und des Zuckerrübenblatts die positive Wirkung der Gründüngung auf *Lumbricus terrestris* verhindert haben.

In der vorliegenden Untersuchung wurden in Abhängigkeit vom Bodennutzungssystem keine wesentlichen Unterschiede in der **Artenzusammensetzung** und dem prozentualen Anteil verschiedener Regenwurmartens an der Gesamtpopulation deutlich (s. Tab.7). Einige Exemplare der Art *Octolasion cyaneum* wurden allerdings ausschließlich im Bodennutzungssystem IF nachgewiesen.

KULAGE (1992) und CLAUPEIN (1994) fanden dagegen auf derselben Versuchsfläche bei Anwendung einer kombinierten Handauslese-Formalin-Methode *Octolasion cyaneum* in beiden Bodennutzungssystemen.

Die nachgewiesenen Arten *Lumbricus terrestris*, *Allolobophora caliginosa* und *Allolobophora rosea* sind typische Vertreter einer Ackerbodenfauna (GRAFF 1953, SIMS & GERARD 1985). *Octolasion cyaneum* findet sich dagegen häufig auf Standorten mit niedriger Bewirtschaftungsintensität (KNÜSTING 1992).

In einem benachbarten Versuchsfeld stellte STOCKFISCH (1997) bei erheblicher Zunahme von Biomasse und Abundanz keinen Einfluß langjährig reduzierter Bodenbearbeitung auf die Artenzusammensetzung der Regenwurmpopulation fest. Auch FRIEBE (1994) konnte keinen Einfluß langfristig differenzierter Bodenbearbeitung auf die Artenzusammensetzung finden.

Dagegen beobachtete GERSCHAU (1995) eine zunehmende Artenvielfalt der Regenwurmpopulation bei abnehmender Bearbeitungsintensität. EDWARDS & LOFTY (1982a) wiesen in Direktsaat-Systemen einen höheren Anteil anözischer Regenwürmer an der Gesamtpopulation nach. Sie führten die veränderte Artenzusammensetzung darauf zurück, daß in Direktsaat-Systemen die an der Bodenoberfläche verbleibenden Ernterückstände eine bessere Nahrungsversorgung für anözische Regenwürmer gewährleisten.

BAUCHHENß & HERR (1986) wiesen in Fruchtfolgen mit einem hohen Anteil von Feldfutterbau mehr Regenwurmart nach als in Fruchtfolgen mit ausschließlich Marktfrüchten. WESTERNACHER-DOTZLER (1988) zeigte ebenfalls, daß sich Grünbrache bzw. Klee gras günstig auf die Regenwurmpopulation auswirken.

Es kann abschließend nicht beurteilt werden, ob das ausschließliche Auftreten von *Octolasion cyaneum* in der IF in beiden Untersuchungsjahren tatsächlich von Bewirtschaftungsmaßnahmen abhängig war, oder ob ein methodisches Problem beim Regenwurmfang mit der Formalin-Methode das geringere Arteninventar in der kF hervorbrachte. GERSCHAU (1995) berichtete von einer verringerten Fangquote der Formalin-Methode im Vergleich zur kombinierten Handauslese-Formalin-Methode. So könnte die sehr geringe Abundanz von *Octolasion cyaneum* auf den Untersuchungsflächen und die geringere Effizienz der Formalin-Methode gegenüber der von KULAGE (1992) und CLAUPEIN (1994) verwendeten kombinierten Handauslese-Formalin-Methode das Arteninventar in der kF unterschätzt haben.

In beiden Fruchtfolgen dominierte *Lumbricus terrestris* die Regenwurmpopulation hinsichtlich der Individuenzahl und der Biomasse. Diese Ergebnisse stimmen mit denen von STOCKFISCH (1997) überein, die auf benachbarten konventionell und reduziert bearbeiteten Ackerflächen ebenfalls die Dominanz dieser Art feststellte.

Zwischen der Regenwurmbiomasse und -aktivität und der Anzahl Regenwurmporen des Bodens ist ein Zusammenhang zu vermuten. Allerdings zeigt ein Vergleich der beiden

Fruchtfolgen anhand der **Bioporen** kein einheitliches Bild. Unter Zuckerrübe und Winterweizen der IF waren die Anzahl und die Porenfläche der Makroporen in der Ackerkrume höher als in der kF, was mit den Biomassenwerten der Regenwürmer übereinstimmt (s. Abb. 11, 12, 13 und 14). Dafür dürfte die vermehrte Bodenruhe in der IF verantwortlich sein. In den Wintergerstenparzellen zeigten sich allerdings umgekehrte Verhältnisse. WILKE (1962) wies darauf hin, daß die Anzahl an Regenwurmröhren keinen Anhaltspunkt für die aktuelle Regenwurmdichte im Boden biete. Auch HAINES & UREN (1990) beobachteten trotz niedriger Regenwurmaktivität bei konventioneller Bewirtschaftung eine höhere Anzahl an Regenwurmporen im Vergleich zur Direktsaat.

Im Gegensatz dazu konnten EHLERS (1975, 1992), EDWARDS et al. (1988) und SINGH et al. (1991) bei langjährigem Verzicht auf den Wendepflugeinsatz eine Zunahme von Regenwurmröhren beobachten. Ebenfalls berichteten FENNER (1995) und GERSCHAU (1995) von einer stärkeren biogenen Durchporung des Bodens bei reduzierter Bodenbearbeitung im Vergleich zu konventioneller Bewirtschaftung mit dem Pflug.

Die Effekte des Regenwurmangsystems auf physikalische Bodeneigenschaften wurden in verschiedenen Untersuchungen gezeigt (EHLERS 1975, KLADIVKO et al. 1986, MARINISSEN 1994).

Die Regenwurmporen stellen eine wichtige Verbindung vom Ober- zum Unterboden dar, da sie vornehmlich vertikal ausgerichtet sind und kontinuierlich bis weit in den Unterboden reichen (EHLERS 1975, EHLERS & CLAUPEIN 1994, Lee 1985, PITKÄNEN & NUUTINEN 1997). Nach EHLERS (1975, 1976, 1992), EDWARDS et al. (1988) und WILLOUGHBY et al. (1997) fördern durch Regenwürmer geschaffene Makroporen die Wasserinfiltration. Dabei ist die Kontinuität der Regenwurmporen für die Wasserleitung im Boden von größerer Bedeutung als das Gesamtporenvolumen (EHLERS & TEIWES 1987). Befinden sich an der Bodenoberfläche offene und stabile Regenwurmporen, so kann durch diese bei Starkregen Wasser schnell infiltrieren und dem Unterboden zugeführt werden (DIEZ et al. 1988). JOSCHKO et al. (1989) konnten in Laborversuchen zeigen, daß die Wasserleitfähigkeit um ein Vielfaches anstieg, wenn der Boden von Regenwurmgingen durchzogen war. Neben der verbesserten Wasserführung fördert die biogene Durchporung die Durchlüftung und die Durchwurzelung des Unterbodens (BARNES & ELLIS 1979, MCCOLL et al. 1982). PITKÄNEN & NUUTINEN (1997) stellten unter Getreide fest, daß in einer Tiefe von 15 cm

die Regenwurmporen zu 60% und in 80 cm Tiefe noch zu 15% von Pflanzenwurzeln durchzogen waren. Im Unterboden mit hohen Eindringwiderständen können die Pflanzenwurzeln möglicherweise nur durch kontinuierliche Regenwurmgänge in tiefere Bodenschichten vordringen (BÖHM & KÖPKE 1977).

#### **5.4 Auswirkungen unterschiedlicher Bodennutzung auf die mikrobielle Biomasse des Bodens und Dehydrogenaseaktivität**

An dieser Stelle soll der Frage nachgegangen werden, inwieweit verschiedene Bodennutzungssysteme die mikrobielle Biomasse des Bodens und deren Aktivität beeinflussen. Bewirtschaftungsmaßnahmen nehmen über die Quantität und Qualität der zugeführten organischen Substanz und deren Verteilung innerhalb der Ackerkrume großen Einfluß auf bodenmikrobiologische Kennwerte, da heterotrophe Mikroorganismen im Ackerboden in ihrem Stoffumsatz in erster Linie C-limitiert sind (LYNCH & PANTING 1980a, DOMSCH 1985). Systeme mit hohen Einträgen an organischer Substanz weisen tendenziell große mikrobielle Biomassen und eine hohe biologische Aktivität auf.

Veränderungen der Bewirtschaftung wirken sich viel rascher auf die mikrobielle Biomasse des Bodens ( $C_{\text{mik}}$ ) aus als auf die Gesamtmenge an organischer Bodensubstanz (ANDERSON & DOMSCH 1989, HAIDER 1992, JÖRGENSEN 1995). POWLSON et al. (1987) stellte fest, daß nach 18-jähriger Gerstenmonokultur mit Strohdüngung der  $C_{\text{org}}$ -Gehalt des Bodens um 5% gestiegen war. Der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt nahm dagegen im gleichen Zeitraum um 45% zu. Die Menge an mikrobieller Biomasse kann somit als empfindlicher und frühzeitiger Indikator für Veränderungen in der Menge der organischen Substanz als Folge veränderter Bewirtschaftungsmaßnahmen angesehen werden (POWLSON et al. 1987, BEESE et al. 1994, JÖRGENSEN 1995). Neben der mikrobiellen Biomasse kann durch eine veränderte Wirtschaftsweise die Aktivität der Mikroorganismen beeinflußt werden. Besonders sensibel auf solche Veränderungen reagiert die Dehydrogenaseaktivität (REDDY & FAZA 1989, TIWARI et al. 1989).

Jörgensen (1995) hält vier bis sechs Probenahmeterminen im Jahr aufgrund saisonaler Schwankungen mikrobieller Bodenkennwerte für notwendig, um verschiedene Bewirtschaftungssysteme vergleichen zu können.

Von vielen Autoren wird ein enger Zusammenhang zwischen mikrobiologischen Kenngrößen und dem organischen Kohlenstoffgehalt von Böden nachgewiesen (DUTZLER-FRANZ 1977, BECK 1984b, ALEF et al. 1988, SUTTNER & ALEF 1988, WINTER 1998). In dieser Untersuchung konnte kein enger Zusammenhang ( $R^2 = 0,19$ ) zwischen den  $C_{\text{org}}$ -Gehalten im Frühjahr 1995 und 1996 in 0-10, 10-20 und 20-30 cm Tiefe und den dazugehörigen  $C_{\text{mik}}$ -Gehalten festgestellt werden. Zu ähnlichen Ergebnissen im Ackerbau-Systemversuch kam auch MANZKE (1995). Die Autorin konnte allerdings zwischen dem heißwasserlöslichen Anteil der organischen Substanz, als Maß für den leicht umsetzbaren Anteil von  $C_{\text{org}}$ , und bodenmikrobiologischen Kennwerten einen engen Zusammenhang ermitteln.

Die mikrobielle Biomasse an einem Standort wird folglich weniger durch die gesamte im Boden vorhandene Menge an organischer Substanz, sondern viel stärker durch die Menge leicht umsetzbarer Substanz bestimmt (MANZKE 1995, FRIEDEL et al. 1996). Außer dem Gehalt an organischer Substanz wirkt somit besonders deren Qualität auf mikrobiologische Kenngrößen (DUTZLER-FRANZ 1977, FRIEDEL et al. 1996).

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Bodennutzung auf die **Gesamtmenge an mikrobieller Biomasse** in der Ackerkrume der beiden Fruchtfolgen waren gering (s. Tab. 8). Im Mittel über alle Feldfrüchte zeigten die Bodennutzungssysteme ein ähnliches Niveau in den  $C_{\text{mik}}$ -Mengen. Die Mittelwerte über die Früchte variierten in beiden Untersuchungsjahren und beiden Fruchtfolgen nur sehr gering und lagen zwischen 941 und 1032 kg ha<sup>-1</sup>  $C_{\text{mik}}$  (s. Tab. 8).

Eine erhöhende Wirkung der Leguminosen in der IF auf die  $C_{\text{mik}}$ -Mengen und die Dehydrogenaseaktivität wurde nicht beobachtet. Anscheinend reichte die Rübenblatt- und Strohdüngung sowie die zusätzliche Wickengründung in der kF aus, um ein ähnlich hohes Niveau an mikrobieller Biomasse wie in der abwechslungsreichen, sechsfeldrigen Fruchtfolge zu unterhalten. POWLSON et al. (1987) zeigten, daß selbst eine alleinige Strohdüngung eine Förderung der mikrobiellen Biomasse bewirkt. OCIO et al. (1991) stellten nach einer Weizenstrohdüngung innerhalb von drei Wochen beinahe eine Verdoppelung der mikrobiellen Biomassegehalte des Bodens fest.

Hingegen zeigten Untersuchungen von MCGILL et al. (1986), BECK (1990) und HAVLIN et al. (1990), daß Leguminosen enthaltende, abwechslungsreiche Fruchtfolgen höhere

mikrobielle Biomassen aufwiesen als reine Getreidemonokulturen bzw. Hackfrucht-Getreide-Rotationen. Höhere Hackfrucht-Anteile in der Fruchtfolge wirkten sich dagegen negativ auf die mikrobiellen Biomassegehalte aus (GRIMM & CAESAR 1988). Für die Dehydrogenaseaktivität konnten die gleichen fruchtfolgespezifischen Effekte gezeigt werden (BECK 1988, GRIMM & CAESAR 1988, FRANK & MALKOMES 1993).

Unterschiede in den  $C_{\text{mik}}$ -Mengen zwischen den Bodennutzungssystemen konnten aufgrund direkter Vorfruchteffekte zu einzelnen Feldfrüchten nachgewiesen werden (s. Tab. 8). In beiden Untersuchungsjahren waren die Werte für  $C_{\text{mik}}$  unter Zuckerrübe und Wintergerste in der IF deutlich niedriger als in der kF. Vermutlich führte die lange Brachezeit (bis zu acht Monaten) zwischen der Ackerbohnernte und der Zuckerrübenaussaat zu einem Nährstoffdefizit für die mikrobielle Biomasse unter der Zuckerrübe der IF. Diese Vermutung wird durch Untersuchungen von KAISER (1992) gestützt, der ebenfalls als Grund für geringe  $C_{\text{mik}}$ -Werte unter Zuckerrübe im Frühjahr eine lange Brachezeit (acht Monate) vor der Saat angab.

Dagegen sind die vergleichsweise hohen Werte unter Zuckerrübe in der kF auf die Zufuhr frischer organischer Substanz durch den späten Umbruch der Wickengründung zurückzuführen.

Die vergleichsweise geringere  $C_{\text{mik}}$ -Menge (s. Tab. 8) unter Wintergerste (IF) ist ebenfalls mit einer unterschiedlichen Zufuhr organischer Substanz verbunden. Während in der IF das Weizenstroh abgefahren wird, verbleibt es in der kF auf der Fläche. Offenbar ist das Weizenstroh in der kF wirksamer als der Stallmist in der IF.

Aufgrund der unterschiedlichen Versorgung der Systeme mit frischer organischer Substanz kommt es vermutlich - über das ganze Jahr gesehen - im Boden der IF unter Zuckerrübe und Wintergerste zu einem stärkeren Nährstoff- und Energiedefizit für die Mikroorganismen im Vergleich zur kF.

Ein unmittelbarer Einfluß der **Stallmistdüngung** zu Wintergerste und der **Jauchedüngung** zu Silomais (s. Tab. 1) in der IF konnte anhand der Gesamtmengen an  $C_{\text{mik}}$  nicht festgestellt werden (s. Tab. 8). Hiermit wird der langfristige Charakter einer Stallmistdüngung deutlich.

Die günstige Wirkung von Stallmist auf die mikrobielle Biomasse ist in der Literatur unbestritten. In Dauerversuchen konnten unter Flächen mit Stallmistdüngung höhere  $C_{\text{mik}}$ -

Gehalte gegenüber den ungedüngten Kontrollen festgestellt werden (BECK 1984a, GRIMM & CAESAR 1988, DEUBEL 1994). Nach langjähriger organischer Düngung von Versuchsfeldern mit Stalldung berichteten FRIEDEL (1993), SCHNÜRER et al. (1985) und WEISSKOPF (1986) von gesteigener mikrobieller Biomasse im Vergleich zu mineralisch gedüngten Flächen.

DEUBEL (1994) verglich die Wirkungen von verschiedenen Arten organischer Dünger pro Einheit Trockenmasse auf die mikrobielle Biomasse des Bodens und konnte zeigen, daß die Ausbringung von Gülle zu einer höheren mikrobiellen Biomasse führte als die Stallmistdüngung. Der Autor mutmaßte, daß in der Gülle mehr mikrobiell verfügbare Substanzen enthalten sind als im Stallmist.

Für die mikrobielle Biomasse wurde unter allen Feldfrüchten ein Anstieg vom Frühjahr bis zum Sommer beobachtet. Zum Herbst hin zeigten die  $C_{\text{mik}}$ -Werte eine fallende Tendenz (s. Abb. 15). Eine analoge **Dynamik der mikrobiellen Biomasse** unter Ackerflächen zeigte sich in Untersuchungen von LYNCH & PANTING (1980b), WIDMER (1993) und DEUBEL (1994). LYNCH & PANTING (1980b) wiesen in Feldversuchen nach, daß sich mit dem Beginn des Pflanzenwachstums (Winterweizen) auch die mikrobielle Biomasse vergrößerte und ihr Maximum zur Zeit maximalen Pflanzenwachstums erreichte. HAYNES & BEARE (1997) konnten in einem Gewächshausversuch mit sechs verschiedenen Kulturpflanzen einen Zusammenhang zwischen der Wurzellängendichte und Wurzelmasse einerseits und der mikrobiellen Biomasse andererseits feststellen.

WILDUNG et al. (1975) und HELAL & SAUERBECK (1989) führten den Anstieg der mikrobiellen Biomasse im Frühsommer unter Pflanzenbewuchs auf eine verstärkte Abgabe von leicht verfügbaren Wurzelexsudaten zurück.

Nach GUCKERT (1992) geben Pflanzen organische Verbindungen in Form von Exsudaten und Sekreten in den Boden ab. Der Autor nahm an, daß 20 - 40% des netto-assimilierten Kohlenstoffs zur Wurzel transportiert und davon wiederum 10 - 20% ausgeschieden werden. Wurzelexsudate und Sekrete machen zusammen bis zu 30% der Assimilate aus (GISI 1990). Dieser Rhizosphäreneffekt führt im wurzelnahen Bereich zu höheren mikrobiellen Biomassen und Stoffwechselaktivitäten als im wurzelfernen Bereich (SCHINNER et al. 1991).

Wahrscheinlich ist der Rhizosphäreneffekt unter Zuckerrübe geringer als unter allen anderen Früchten. Diese Vermutung stützt sich auf die Tatsache, daß der Anstieg von  $C_{\text{mik}}$  unter Zuckerrübe zum Sommer vergleichsweise gering ausfiel (s. Abb. 15). Die Zuckerrübe stellt durch ihre späte Aussaat und langsame Bestandes- und Wurzelentwicklung der mikrobiellen Biomasse weniger wurzelbürtige Kohlenstoffverbindungen als Nährstoffquelle bereit. Folglich wurde unter Zuckerrübe eine vergleichsweise geringe  $C_{\text{mik}}$ -Menge beobachtet (s. Abb. 15). Warum sich der Rhizosphäreneffekt nicht später in der Vegetation der Zuckerrübe am Anstieg der  $C_{\text{mik}}$ -Werte im Herbst bewahrheitete, ist unbekannt, mag aber mit der spätsommerlichen Austrocknung der Böden unter Zuckerrübe zu tun haben. Mit dem Ausbleiben des  $C_{\text{mik}}$ -Anstiegs während der Hauptvegetationszeit der Zuckerrübe blieb die  $C_{\text{mik}}$ -Menge unter Zuckerrübe über das Jahr gemittelt mit wenigen Ausnahmen unterhalb der Werte, die für andere Früchte gemessen wurden (s. Abb. 15). Das gilt für beide Untersuchungsjahre (s. Tab. 8).

Auch KAISER (1992) und RITZ et al. (1992) fanden im Frühjahr unter Hackfrüchten im Vergleich zu Getreide geringere Mengen mikrobieller Biomasse. Als Ursache vermuteten die Autoren eine verminderte Nährstoffversorgung der Mikroorganismen unter Hackfrüchten.

KAISER & HEINEMEYER (1993) berichteten von einer zunehmenden mikrobiellen Biomasse im Verlauf der Fruchtfolge Zuckerrübe - Winterweizen - Wintergerste. Diese Ergebnisse werden durch die vorliegende Untersuchung tendenziell bestätigt (s. Tab. 8 und Abb. 15).

BECK (1984a) beobachtete in einem Langzeitversuch mit Hackfrüchten und Getreide auf einer Parabraunerde aus Löß die geringsten mikrobiellen Biomassewerte bei Kartoffelmonokultur. Der Anbau von Getreide führte zu einer Erhöhung der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte, besonders im Rahmen einer Fruchtfolge. RODRIGUEZ-KABANA (1982a und b) kam zu dem Schluß, daß insbesondere der Rhizosphäreneffekt von entscheidender Bedeutung für die Aktivität von Bodenmikroorganismen sein dürfte. Neben der Quantität der Wurzelexsudate spielt vor allem auch die Qualität der Exsudate eine entscheidene Rolle (RODRIGUEZ-KABANA 1982a und b). Demzufolge waren nach Weizen mit einer großen Wurzel-dichte und einem breiten Spektrum an Wurzelexsudat-Kohlenhydraten höhere, nach Mais mit nur wenigen Wurzelexsudat-Kohlenhydraten geringere Aktivitätswerte zu finden.



Anhand der Ausführungen kann geschlossen werden, daß ein Großteil der Transformationsprozesse schon während der Vegetationszeit stattfindet und diese zusätzlich zu den Ernte- und Wurzelrückständen am Ende der Vegetationsperiode möglicherweise einen wesentlichen Beitrag zur Reproduktion der organischen Substanz liefern.

Deutliche Unterschiede zeigten die Bodennutzungssysteme hinsichtlich der **Tiefenverteilung der bodenmikrobiellen Kennwerte** aufgrund der teilweise differenzierten Bodenbearbeitung. Der Effekt differenzierter Bodenbearbeitungssysteme auf die mikrobielle Biomasse des Bodens wurde an einer Vielzahl verschiedener Böden untersucht (DORAN 1980, ANGERS et al. 1993a und b, ALVAREZ et al. 1995, STOCKFISCH et al. 1995, STOCKFISCH 1997).

Die Grubber- bzw. Frässaat zu Winterweizen, Silomais und Ackerbohne in der IF führte zu einer Akkumulation von Ernteresten und organischer Dünger in der oberen Krumenschicht. Nach BÖHM et al. (1991) erhöhte sich die im oberen Krumenbereich verbliebene Menge an Ernteresten bei Grubberbearbeitung um das fünffache gegenüber einem gepflügten Boden.

Da bodenmikrobiologische- und enzymatische Kennwerte durch die Verteilung der Erntereste innerhalb der Krume stark beeinflusst werden (MEYER et al. 1996, SCHINNER & SONNLEITNER 1996), führte die reduzierte Bearbeitungstiefe in der IF zu Winterweizen, Silomais und Ackerbohne zu einer Abnahme der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte und der DHA mit der Tiefe (s. Abb. 16, 17 und 20). Die bei reduzierter Bodenbearbeitungsintensität beobachtete Anreicherung von  $C_{\text{mik}}$  in 0-10 cm Tiefe führten GROCHOLL (1991) und FRIEDEL et al. (1996) vor allem auf eine Anreicherung junger, leicht umsetzbarer organischer Substanz zurück.

Demgegenüber waren die Gehalte an mikrobieller Biomasse bei regelmäßiger Pflugbearbeitung in der kF über die gesamte Krumentiefe gleichmäßiger verteilt. Auch JÖRGENSEN (1995), MEYER et al. (1996) und STOCKFISCH (1997) fanden in gepflügten Böden eine gleichmäßige Verteilung der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte innerhalb der Ackerkrume vor.

Von WINTER (1998) wurde dagegen ein Tiefengradient von mikrobiologischen Kennwerten in einem lößbürtigen Boden Süddeutschlands auch innerhalb des Pflughorizontes beschrieben, wobei die mikrobielle Biomasse und der  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotient mit zunehmender Tiefe abnahm.

Der Tiefengradient in der vorliegenden Untersuchung nahm in der IF mit fortschreitendem Abstand von der wendenden Bodenbearbeitung durch den Pflug zu. So konnte die deutlichste Abnahme im  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt zwischen oberster (0-10 cm) und unterster (20-30 cm) Bodenschicht nach zweimaliger aufeinanderfolgender flacher Bodenbearbeitung mit der Fräse zu Ackerbohne beobachtet werden (s. Abb. 18). Die Anreicherung von  $C_{\text{mik}}$  und eine erhöhte Dehydrogenaseaktivität nahe der Bodenoberfläche bei Verzicht auf tiefwendende Bodenbearbeitung wird in der Literatur zahlreich beschrieben (DORAN 1980, BECK 1984a, SEEVERS 1986, ELSNER & BLUME 1993, FRIEDEL 1993, FRANZLUEBBERS et al. 1995b, KANDELER & BÖHM 1996, MEYER et al. 1996, STOCKFISCH 1997, ALVAREZ et al. 1998). Oftmals kehrt sich dieser Effekt im unterem Krumenbereich (20-30 cm) um, und die  $C_{\text{mik}}$ -Werte liegen unter denen des gepflügten Bodens (GROCHOLL 1991, STOCKFISCH 1997). Anhand der Durchschnittsgehalte der mikrobiologischen Kennwerte  $C_{\text{mik}}$  und DHA über die gesamte Krumentiefe (0-30 cm) konnte kein Unterschied zwischen den beiden Fruchtfolgen festgestellt werden. Obwohl die  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte und die DHA unter Winterweizen in der IF bis zum Pflugeinsatz im Herbst mit der Tiefe abnahmen, zeigten die mikrobiellen Kennwerte im Mittel über die gesamte Ackerkrume ein ähnlich hohes Niveau wie die der kF (s. Abb. 16, 17 und 20). Auch die aus den  $C_{\text{mik}}$ -Gehalten und der Lagerungsdichte des Bodens resultierenden  $C_{\text{mik}}$ -Mengen unter Winterweizen waren nahezu identisch (s. Tab. 8). In Untersuchungen von POWLSON & JENKINSON (1981) und ALVAREZ et al. (1998) traten ebenfalls über die gesamte Krumentiefe betrachtet keine Unterschiede bei reduzierter Bodenbearbeitungsintensität gegenüber Pflugbearbeitung bezüglich der mikrobiellen Biomasse auf. Demgegenüber wies STOCKFISCH (1997) in der gesamten Krume (0-30 cm Tiefe) unter pflugbearbeiteten Flächen eine höhere mikrobielle Biomasse nach als unter Flächen, die seit 20 Jahren reduziert bearbeitet wurden.

Nach der Stallmistdüngung und der Fräsbearbeitung des Bodens zu Silomais kam es zu einem sprunghaften Anstieg der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte in der obersten Bodenschicht (um ca. 25%; s. Abb. 18). Die starke Reaktion der Mikroorganismen könnte auf den Umbruch der vitalen grünen Luzernestoppeln zurückzuführen sein, der unmittelbar nach der Ausbringung des Stallmistes mit der Fräse erfolgte. Neben den relativ schwer abbaubaren organischen Substanzen im Stallmist wird den Bodenmikroorganismen durch den Umbruch der

Luzernestoppel leicht umsetzbare organische Substanz zugänglich, die zum Aufbau neuer mikrobieller Biomasse genutzt werden kann.

Gestützt wird diese Vermutung durch Untersuchungsergebnisse von KLIMANEK (1990). Die Autorin stellte in Laboruntersuchungen eine sehr hohe Mineralisierung für Luzernestoppeln fest. Bereits nach 60 Tagen Inkubation waren mehr als 50% des Kohlenstoffs der Luzernestoppel abgebaut. Beim Getreide waren es hingegen erst ca. 30%.

Zwischen der zellgebundenen DHA und der mikrobiellen Biomasse zeigte sich in der vorliegenden Untersuchung ein sehr enger Zusammenhang (1995:  $R^2 = 0,92$ ; 1996:  $R^2 = 0,85$ ; s. Abb. 19). Analoge Ergebnisse dokumentierten PLATTE (1996) und TEIWES (1997). Die hohe positive Korrelation läßt die Vermutung zu, daß  $C_{\text{mik}}$  und DHA in sehr ähnlicher Weise auf Systemveränderungen reagieren. Eine weniger enge Korrelation wurde unter Silomais 1996 festgestellt (nicht dargestellt), wobei die DHA deutlicher stärker auf die Bewirtschaftungsmaßnahmen (Stallmist, Jauche, Flachbearbeitung, s. Tab. 1) zu Silomais reagierte als die  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte (vergl. Abb. 18 und 21). Nach MANZKE (1995) wurde die Enzymaktivität durch eine organische Düngung stärker erhöht als die  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte. Aus dem Vergleich der Abbildungen 18 und 21 läßt sich die Vermutung ableiten, daß nach organischer Düngung z.B. mit Jauche, die einen hohen Anteil leicht verfügbarer Verbindungen enthält, Mikroorganismen stärker mit einer Aktivitätssteigerung reagieren als mit dem Aufbau neuer Biomasse.

Neben der mikrobiellen Biomasse und der Dehydrogenaseaktivität wurde in den letzten Jahren dem  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -**Quotient** eine zunehmende Bedeutung für die Beschreibung von Bodenökosystemen zuerkannt.

Das Verhältnis des mikrobiell gebundenen Kohlenstoffgehaltes zum gesamten organischen Kohlenstoffgehalt des Bodens ist ein sensibler Indikator für Veränderungen der organischen Substanz. Der  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotient gibt den Anteil der organischen Bodensubstanz an, welcher in mikrobieller Biomasse gespeichert ist. Nach ANDERSON & DOMSCH (1986) leitet sich aus dem  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten ab, in welchem Umfang die organische Substanz der Verwertung durch Mikroorganismen zugänglich ist. Größere Quotienten bedeuten eine höhere Verfügbarkeit der organischen Substanz für die Mikroorganismen.

Der  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotient des Oberbodens (0-20 cm Tiefe) schwankt unter temperierten Klimabedingungen zwischen 0,3 und 7% (SPARLING 1985). Diese große Spanne ist einerseits auf unterschiedliche Böden und ihre Bewirtschaftung zurückzuführen (SPARLING 1985), andererseits auf den Probenahmezeitpunkt (LYNCH & PANTING 1980, MCGILL et al. 1986).

BECK (1984, 1990) ermittelte einen prozentualen Anteil des  $C_{\text{mik}}$  am Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff im Oberboden unter Dauerschwarzbrache von 1%, unter langjähriger Kartoffelmonokultur von etwa 2,0% und unter Fruchtfolgesystemen von 3,0%. SPARLING (1992) zeigte einen sinkenden  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten bei zunehmender Dauer einer Maismonokultur. Untersuchungen von JENKINSON & POWLSON (1976) an Oberböden (0-22 cm Tiefe) von Acker- und Grünlandflächen ergaben  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten von 1,7 bis 2,0.

Über die gesamte Ackerkrumentiefe (0-30 cm) betrachtet wurde in beiden Fruchtfolgen, wenn man einmal vom niedrigen Wert für Zuckerrübe (IF) absieht, ein relativ konstanter  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotient von ca. 2,0 ermittelt (s. Tab. 9).

Für das  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis ermittelten ANDERSON & DOMSCH (1989) sowie INSAM et al. (1989) Gleichgewichtskonstanten bzw. -funktionen. Von diesen Gleichgewichtswerten nach oben hin abweichende Quotienten geben Hinweis auf eine Anreicherung von organischer Bodensubstanz, nach unten abweichende Werte zeigen Verlust an organischer Bodensubstanz des betreffenden Bodens an.

Daraus folgt, daß sich über die gesamte Rotation betrachtet in beiden Bodennutzungssystemen aufgrund der stabilen  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten ein Humusgleichgewicht eingestellt hat. Die in der IF im Vergleich zur kF höhere Variabilität im  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten deutet auf humusaufbauende und -abbauende Prozesse im Verlauf der Rotation hin. Der geringe  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotient unter Zuckerrübe in der IF könnte auf eine Abreicherung der organischen Substanz in der Krume der IF hinweisen. Tatsächlich konnte im Verlauf der langen Fruchtfolge von Ackerbohne zu Zuckerrübe eine Abnahme der  $C_{\text{org}}$ -Mengen festgestellt werden (s. Tab. 3).

Als Ursache für den geringen  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten unter Zuckerrübe der IF dürfte eine fortschreitende Aufzehrung der leichtabbaubaren organischen Verbindungen in Frage kommen. Nach ANDERSON & DOMSCH (1986) deutete ein niedriger  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotient auf

einen geringen Anteil an leichtverfügbarem organischen Material am Gesamtgehalt organischer Bodensubstanz hin. Vermutlich wird durch die frühe Ernte der Ackerbohne bereits ein Großteil der mikrobiell leicht verfügbaren Fraktion in den Ernteresten bis zur Aussaat der Zuckerrübe im folgenden Frühjahr mineralisiert. Gestützt wird diese Vermutung durch  $N_{\min}$ -Untersuchungen im Ackerbau-Systemversuch von Claupein (1994). Nach der Ernte der Ackerbohne wurde ein kontinuierlicher Anstieg der  $NO_3$ -Konzentration im Boden gemessen.

Zusätzlich dürfte die lange Zwischenbrache von der Ackerbohnenernte bis zur Zuckerrübenaussaat auf das  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis gewirkt haben, in der dem Boden keine frische Pflanzensubstanz zugeführt wurde. INSAM et al. (1989) und JÖRGENSEN et al. (1989) berichteten von sehr niedrigen  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten in Böden unter Schwarzbrache, in die über längere Zeit keine frische organische Substanz eingetragen wurde.

Hingegen führte die Zufuhr frischer und leicht abbaubarer organischer Substanz (Wickengründung) zu Zuckerrübe in der kF mit einem Wert von 2,2 zu einem vergleichsweise hohen  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten gegenüber Zuckerrübe IF mit 1,6 (s. Tab. 9). ANDERSON & DOMSCH (1989) stellten in Böden mit Getreidefruchtfolgen ohne organische Düngung einen  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten von 2,4% fest. Durch die Zufuhr von organischer Düngung wurde das  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Verhältnis auf 3,3% erhöht.

Bei Verzicht auf eine tiefwendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug in der IF zu Winterweizen, Silomais und Ackerbohne (s. Tab. 1) lagen die  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten in 0-10 cm Bodentiefe über denen der unteren Bodenschichten (10-20 cm und 20-30 cm Tiefe; s. Tab. 9). Auch MEYER et al. (1996) und STOCKFISCH (1997) konnten bei reduziert bearbeiteten Ackerböden erhöhte  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotienten in oberen Bodenschichten nachweisen. Demgegenüber erhöhte sich nach Pflugfurche zu Wintergerste und Luzerne in der IF und besonders zu den drei Früchten der kF der  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotient in der Bodenschicht 20-30 cm (s. Tab.9). Durch das tiefe Einarbeiten der Erntereste mittels Pflug wird die Unterkrume mit frischer organischer Substanz versorgt. STOCKFISCH (1997) führte die unterschiedliche Tiefenverteilung bodenmikrobiologischer Kenngrößen ebenfalls auf eine unterschiedlich tiefe Einarbeitung der Ernterückstände zurück.

In beiden Fruchtfolgen hat sich nach 15 Versuchsjahren im Mittel über die gesamte Ackerkrume und Rotation betrachtet ein nahezu konstanter  $C_{\text{mik}}/C_{\text{org}}$ -Quotient eingestellt.

Bei einem solchen Gleichgewichtszustand entspricht der C-Input des Bodens dem durch mikrobiellen Abbau freigesetzten CO<sub>2</sub>-C. Voraussetzung für eine solche Gleichgewichtseinstellung ist, daß langfristig eine einheitliche Bewirtschaftung erfolgt. Diese Voraussetzung ist nach 15-jähriger Versuchsdauer für den Ackerbau-Systemversuch gegeben. Somit kann angenommen werden, daß sich die in Kap. 4 beschriebenen C<sub>org</sub>-Mengen unter den gegebenen Standortbedingungen und Bewirtschaftungsmaßnahmen nicht weiter verändern.

### **5.5 Auswirkung unterschiedlicher Bodennutzung auf die Bodenatmung und den metabolischen Quotienten**

Mit der Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung im Feld wurde neben der Dehydrogenaseaktivität (Laborversuch) ein zweiter Indikator für die mikrobielle Aktivität eingesetzt. Allerdings war die CO<sub>2</sub>-Freisetzung im Feld zu den einzelnen Probestritten weder mit der Dehydrogenaseaktivität (DHA) noch mit der mikrobiellen Biomasse korreliert. Zudem wurden bei der Bestimmung der DHA im Laborversuch im wesentlichen potentielle Werte bestimmt. Das heißt, die Bodenproben wurden nicht, wie bei der Messung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung (Felduntersuchung), in ihrer natürlichen Lagerung am Standort untersucht. Böden mit einer für die Bodenatmung ungünstigen Bodenstruktur (z. B. verdichtete Böden) können eventuell durch die Probenvorbehandlung (Sieben) im Laborversuch überdurchschnittlich bewertet werden. Mögliche Unterschiede in der Bodenstruktur werden im Laborversuch z. B. durch das Sieben der Proben nivelliert. FRIEDEL (1993) betonte, daß hohe mikrobielle Aktivitäten im Brutversuch nicht immer ein Zeichen für eine hohe C-Mineralisierungsrate unter Feldbedingungen sind.

JÖRGENSEN (1995) wies darauf hin, daß die mikrobielle Biomasse auf keinen Fall so schnell auf veränderte Witterungsbedingungen reagiert wie ihre Aktivität. Im Zeitgang eines Jahres oder sogar Tages sind die mikrobielle Biomasse und ihre Aktivität nicht korreliert (JÖRGENSEN 1995).

Da durch die Bestimmung der DHA im Labor nur wenige Aussagen über die Aktivität der Mikroorganismen unter Feldbedingungen möglich sind, wurde versucht, die beiden Bodennutzungssysteme zusätzlich anhand der CO<sub>2</sub>-Freisetzung im Feld zu charakterisieren.

Bei Feldmessungen der CO<sub>2</sub>-Freisetzung ist allerdings die Wurzelatmung eingeschlossen, und es ist nicht möglich, zwischen der Wurzelatmung und der mikrobiellen Respiration zu unterscheiden. Den Anteil der von Wurzeln produzierten CO<sub>2</sub>-Menge an der Gesamtkohlendioxidproduktion des Bodens gibt GISI (1990) mit durchschnittlich 10 bis 30% an (s. auch Kap. 4.4.5).

Das Ausmaß der mikrobiellen Kohlendioxidfreisetzung eines Bodens im Freiland wird vor allem durch die Menge und Zusammensetzung der organischen Substanz, dem quantitativen und qualitativen Besatz an Mikroorganismen sowie durch die jeweils herrschenden Feuchtigkeits- und Temperaturbedingungen bestimmt (WILSON & GRIFFIN 1975, KOWALENKO et al. 1978, SCHRÖDER & URBAN 1985).

Die in der vorliegenden Untersuchung im Feld gemessenen Bodenatmungsraten variierten zwischen 0,06 und 1,58 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (s. Abb. 22 und 23). Von ähnlichen Spannen in Freilandmessungen berichteten ROCHETTE et al. (1991) und KUTSCH (1994). Die von KUTSCH (1994) gemessenen Tagesmittel in zwei Ackerböden Norddeutschlands lagen zwischen 0,1 und 1,4 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. ROCHETTE et al. (1991) bestimmten in einem Feldversuch in Ontario (Canada) unter Sommerweizen in der Zeit von April bis August CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten zwischen 0,4 und 1,9 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.

Die Bodenatmungsraten lagen unter den Feldfrüchten in der kF infolge intensiverer Bodenlockerung und Einmischung von frischer Grünmasse um durchschnittlich 30% über denen der IF. Folglich müßte in der kF bei einem angenommenen Gleichgewichtszustand der C<sub>org</sub>-Mengen (s. Kap. 5.2 und 5.4) ein höherer C-Input vorliegen als in der IF. Es ist anzunehmen, daß in der kF durch den Verbleib sämtlicher Erntereste auf dem Feld (s. Tab. 2) die Zufuhr an mineralisierbaren Kohlenstoff höher ist als in der IF, in der Rübenblatt und Weizenstroh vom Feld geräumt werden. Zwar wird in der IF an Stelle von Winterweizenstroh Stallmist zurückgeführt, aber während der Rotte des Stallmistes wird nach SCHULTZ (1952) bereits 30-40% der organischen Substanz zu CO<sub>2</sub> veratmet.

Nach SCHINNER & SONNLEITNER (1996) nimmt die Bearbeitungsintensität Einfluß auf die Geschwindigkeit der Mineralisierung der organischen Substanz und somit auf die CO<sub>2</sub>-Freisetzung. Dabei zeigt sich ein Trend zur Zunahme der Mineralisierungsvorgänge von Direktsaat-Systemen in Richtung konventioneller Bodenbearbeitung.

Besonders ausgeprägt waren die Unterschiede in der CO<sub>2</sub>-Freisetzung zwischen den beiden Fruchtfolgen unter Winterweizen (s. Abb. 22 und 23). Die nahe an der Bodenoberfläche verbleibende organische Substanz in der IF (Verzicht auf tiefwendende Bodenbearbeitung) ist der Austrocknung und Wiederbefeuchtung sowie hohen Temperaturschwankungen stärker ausgesetzt als Material, welches in tiefere Bodenschichten mittels Pflug eingearbeitet wird. Die an der Oberfläche verbleibenden Rückstände in der IF unterliegen somit ungünstigen Umweltfaktoren für den mikrobiellen Abbau, was sich in den geringeren Bodenatmungsraten im Vergleich zur kF widerspiegelt (s. Abb. 22 und 23). TAMM & KRZYSCH (1964) und SAFFIGNA et al. (1989) stellten in langjährig nicht bzw. reduziert bearbeiteten Böden eine geringere CO<sub>2</sub>-Freisetzung fest als in konventionell bearbeiteten.

Zu anderen Ergebnissen kamen FRANZLUEBBERS et al. (1995b) und HENDRIX et al. (1988). FRANZLUEBBERS et al. (1995b) untersuchten während der Vegetationszeit die Bodenatmungsraten unter Weizen, Sojabohnen und Hirse in langjährig konventionell und nichtbearbeiteten Flächen in Texas. Dabei maßen die Autoren unter allen drei Feldfrüchten eine gleich hohe bzw. höhere jährliche CO<sub>2</sub>-Freisetzung pro Einheit organischer Bodensubstanz in den nichtbearbeiteten als in den konventionell bearbeiteten Flächen. HENDRIX et al. (1988) bestimmten in einem 5 Jahre alten Feldversuch in Georgia (USA) die Bodenatmung auf gepflügtem Boden und Direktsaat-Systemen und fanden für den größten Teil der Vegetationsperiode höhere CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten in den Direktsaat-Systemen.

Neben der fördernden Wirkung der tiefwendenden Bodenbearbeitung in der kF dürfte die organische Düngung von Koppelprodukten und Zwischenfrucht die CO<sub>2</sub>-Freisetzung gegenüber der IF durch eine verstärkte Mineralisation erhöht haben. Besonders auffällig waren im Frühjahr beider Untersuchungsjahre die Differenzen unter Zuckerrüben und Winterweizen. Zu beiden Früchten der kF wird im Gegensatz zur IF im Herbst frische und leicht abbaubare organische Substanz (Wickengrünmasse und Zuckerrübenblatt) in den Boden eingebracht. Die vor dem Winter dem Boden zugeführte Grünmasse steht den Mikroorganismen in der kF bereits im Frühjahr zur Verfügung und kann bei steigenden Bodentemperaturen verstärkt mineralisiert werden (s. Abb. 22 und 23). Auch FRANKO (1984) konnte während einer Untersuchungszeit von 126 Tagen nach einer Einarbeitung von Grünmasse im Winter eine deutliche Steigerung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung bis in den Monat



Mai gegenüber der ungedüngten Variante feststellen. MUELLER et al. (1998) erfaßten die CO<sub>2</sub>-Freisetzung auf einer ungedüngten Fläche und auf mit verschiedenem organischem Material (Mais, Gerste und Weidelgras) gedüngten Flächen. In jedem Falle, ganz unabhängig von der Art des Pflanzenmaterials, wurden nach Gründüngung höhere CO<sub>2</sub>-Freisetzungsraten gemessen als bei unterbliebener organischer Düngung.

Unter Wintergerste zeichnete sich erst nach der Ernte eine unterschiedliche Entwicklung in der Bodenatmungsrate zwischen den Bodennutzungssystemen ab (s. Abb. 22 und 23). Bis zur Getreideernte im Juli lag die CO<sub>2</sub>-Freisetzung im Durchschnitt beider Untersuchungsjahre in den Fruchtfolgen auf gleichem Niveau (IF = 0,68 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, kF = 0,71 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Nach der Wintergerstenernte und der Stoppelbearbeitung zeigte sich die Differenzierung in der Bodenatmung zwischen den Systemen, wobei die kF mit durchschnittlich 1,1 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> eine deutlich höhere CO<sub>2</sub>-Freisetzung aufwies als die IF mit 0,76 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Dieser Effekt ist vermutlich auf die unterschiedliche Begrünung der Untersuchungsflächen nach der Gerstenernte zurückzuführen. In der IF wurden die Strohreste sofort nach der Ernte untergepflügt und Luzerne gedrillt. Da Luzerne eine relativ langsame Jugendentwicklung aufweist, blieb der Boden für einige Zeit "brach". In der kF dagegen wurde nach Einarbeitung der Strohreste Sommerwicke als Zwischenfrucht gesät. Bei einer vergleichsweise schnellen Jugendentwicklung der Sommerwicke wurde in beiden Jahren bereits vier Wochen nach der Wickenaussaat eine Wuchshöhe von etwa 20 cm und eine vollständige Bodenbedeckung bonitiert. Die Luzerne wies dagegen zum gleichen Termin einen lückigen Bestand und eine Wuchshöhe von nur etwa 8 cm auf (K. Johne; Feldbuch des Ackerbau-Systemversuches).

Aufgrund der unterschiedlichen Entwicklung der Vegetation in den beiden Fruchtfolgen ist davon auszugehen, daß sich dieser Unterschied auch auf die mikrobielle Biomasse und Aktivität des Bodens auswirkte. So ist anzunehmen, daß die Sommerwicke durch ihr schnelles Wachstum (frühe Bodenbedeckung, vermehrte Abgabe von Wurzelexsudaten) die Bodenmikroorganismen und deren Mineralisationsleistung in der kF gegenüber der IF erhöhte. Diese Vermutung wird durch den kurzfristigen Anstieg der C<sub>mik</sub>-Gehalte in der Bodenschicht 0-10 cm unter Wintergerste in der kF unter der Sommerwicke 1996 bestärkt (s. Abb. 17).

Im Verlauf des Frühjahres wurde ein Anstieg der CO<sub>2</sub>-Freisetzung unter den meisten Feldfrüchten gemessen (s. Abb. 22 und 23). Dieser Anstieg ist einerseits mit der gleichzeitigen Erwärmung des Bodens, andererseits mit dem zunehmenden Einfluß der Kulturpflanzen auf die Bodenatmung begründbar (ROCHETTE et al. 1991, FRANZLUEBBERS et al. 1995a). Mit zunehmender Durchwurzelung durch die Nutzpflanzen tritt neben der mikrobiellen Atmung eine zusätzliche CO<sub>2</sub>-Quelle auf. Dabei trägt die Vegetation durch die Wurzelatmung direkt und über den Eintrag von Wurzelexsudaten (Rhizosphärenatmung) indirekt zur Bodenatmung bei (SAUERBECK & JOHNEN 1976, ROCHETTE et al. 1991).

Neben dem Bodenwassergehalt ist die Bodenatmung stark abhängig von der Bodentemperatur (ANDERSON 1975, ORCHARD & COOK 1983, BUYANOVSKY et al. 1986, KRÖCKEL & STOLP 1986). Für die Respiration von Bodenproben werden in der Literatur Q<sub>10</sub>-Werte (Faktor für den Anstieg der Bodenatmungsrate bei einer Erhöhung der Bodentemperatur um 10 °C) zwischen 1,3 und 4,0 angegeben (BUYANOVSKY et al. 1986, BLANKE 1996). KUTSCH (1994) untersuchte die Temperaturabhängigkeit der Bodenatmung zu verschiedenen Zeitpunkten im Jahr und fand heraus, daß der Q<sub>10</sub>-Wert im Jahresgang stark schwankt. Der Autor stellte im April einen hohen Q<sub>10</sub>-Wert von 2,5 fest, in der sommerlichen Trockenphase sank dieser dagegen auf ca. 1,3. Hieraus schloss er, daß im Sommer die CO<sub>2</sub>-Freisetzung vor allem durch niedrige Bodenwassergehalte gemindert wird.

Auch in dieser Untersuchung konnte im Jahr 1996 trotz günstiger Bodentemperaturen aufgrund geringer Bodenwassergehalte im Juni und Juli eine teilweise verminderte Bodenatmung beobachtet werden (s. Abb. 22). Im Untersuchungsjahr 1997 war dieser Effekt aufgrund relativ ausgeglichener Bodenwassergehalte über die gesamte Beprobungszeit nicht zu erkennen (s. Abb. 23).

Die beiden Bodennutzungssysteme, die ähnlich hohe Mengen an mikrobieller Biomasse aufwiesen (s. Tab. 8), unterschieden sich deutlich in der Bodenatmungsrate. Folglich müßte auch die CO<sub>2</sub>-Freisetzung pro Einheit mikrobieller Biomasse in den Bodennutzungssystemen unterschiedlich sein.

Der Quotient aus CO<sub>2</sub>-Produktionsrate und mikrobieller Biomasse wird als **metabolischer Quotient** (qCO<sub>2</sub>) bezeichnet (ANDERSON & DOMSCH 1985). Nach diesen Autoren (ANDERSON & DOMSCH 1990) wird der Quotient aus der im Labor unter standardisierten

Bedingungen ermittelten Basalatmung und der mikrobiellen Biomasse berechnet. Unter Basalatmung ist die gemessene CO<sub>2</sub>-Freisetzung einer Bodenprobe ohne den Zusatz von leicht abbaubaren organischen Substanzen zu verstehen.

Im Gegensatz zu allen bekannten Untersuchungen zum metabolischen Quotienten wurde in der vorliegenden Arbeit die im Feld bestimmte CO<sub>2</sub>-Produktionsrate für die Berechnung des metabolischen Quotienten verwendet. Diese Vorgehensweise ist mit vielen Schwierigkeiten verbunden und muß kritisch betrachtet werden (s. auch Kap. 4.4.5). Im folgenden Abschnitt werden einige Fehlerquellen angedeutet.

Im Gegensatz zur Basalatmung wird bei einer Freilandmessung unter bewachsenen Böden die Bodenatmung immer auch von einem Abbau leicht zersetzbarer organischer Substanzen (z. B. Wurzelexsudate) begleitet. Im Laborversuch wird durch eine Präinkubation der Bodenproben ein solcher Abbau vorweg induziert und so während der eigentlichen Meßperiode ausgeschlossen. Eine weitere Fehlerquelle bei der im Feld ermittelten CO<sub>2</sub>-Produktion des Bodens zur Berechnung des qCO<sub>2</sub> dürfte im Anteil der Wurzelrespiration an der gesamten CO<sub>2</sub>-Freisetzung des Bodens zu sehen sein. Eine Trennung von Wurzelatmung und mikrobieller Atmung im Feld ist nicht möglich. Weiter wurde davon ausgegangen, daß der überwiegende Teil der CO<sub>2</sub>-Bildung im Ap-Horizont, also in den obersten 30 cm stattfand (KUTSCH 1994). Folglich wurde die ermittelte CO<sub>2</sub>-Produktion der mikrobiellen Biomassemenge bis in 30 cm Tiefe zugeordnet. Trotzdem dürfte ein Teil der CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus dem Unterboden (>30 cm Tiefe) stammen. KUTSCH (1994) fand heraus, daß der Anteil der CO<sub>2</sub>-Freisetzung des Unterbodens (Bv-Horizont, 50 cm Tiefe) an der gesamten CO<sub>2</sub>-Bildung des Bodens etwa 10 bis 20% beträgt. Aus den oben angegebenen Gründen ist ein Vergleich der in dieser Untersuchung ermittelten metabolischen Quotienten mit Literaturwerten nur bedingt möglich. Ein Vergleich beider Bodennutzungssysteme anhand der im Systemversuch ermittelten qCO<sub>2</sub> erscheint aber sinnvoll und möglich, da für die qCO<sub>2</sub> beider Fruchtfolgen die gleichen Annahmen (s. oben) gelten dürften.

Der metabolische Quotient in der IF war geringer als in der kF (s. Tab. 10). Die ermittelten qCO<sub>2</sub> lagen zwischen 35 und 47 mg CO<sub>2</sub>-C g<sup>-1</sup> C<sub>mik</sub> h<sup>-1</sup> in der IF und zwischen 40 und 70 mg CO<sub>2</sub>-C g<sup>-1</sup> C<sub>mik</sub> h<sup>-1</sup> in der kF. Häufig in Ackerböden vorkommende und im Labor ermittelte Werte für den metabolischen Quotienten liegen zwischen 12 und

48 mg CO<sub>2</sub>-C g<sup>-1</sup> C<sub>mik</sub> h<sup>-1</sup> (MARTENS 1995, WINTER 1998). Damit liegen die anhand der CO<sub>2</sub>-Feldmessungen bestimmten qCO<sub>2</sub>-Werte (s. Tab. 10) in der IF im oberen Bereich der von MARTENS und WINTER angegebenen Quotienten.

Die höheren metabolischen Quotienten der kF im Vergleich zur IF können auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden. Zum einen könnte eine unterschiedliche Effizienz der Substratnutzung zwischen den beiden Bodennutzungssystemen vorliegen. Nach Untersuchungen von BECK (1990), INSAM et al. (1991) und JÖRGENSEN (1995) läßt ein erhöhter metabolischer Quotient unter Gleichgewichtsbedingungen (keine Zufuhr frischer organischer Substanz) auf einen energetisch ungünstigen Stoffwechsel mit einer ineffizienten Nutzung des Substratangebotes schließen. Dies würde bedeuten, daß die Mikroorganismen in der kF einen größeren Anteil der zur Verfügung stehenden Kohlenstoffverbindungen zur Aufrechterhaltung ihres Stoffwechsel verbrauchen und dementsprechend einen höheren Anteil an C-Verbindungen zu CO<sub>2</sub> veratmen.

Zum anderen könnten die unterschiedlichen qCO<sub>2</sub> auf ein unterschiedliches Substratangebot zurückzuführen sein. Untersuchungen ergaben, daß der qCO<sub>2</sub> der Mikroorganismen erhöht ist, wenn suboptimale Lebensbedingungen herrschen (ANDERSON & DOMSCH 1990, FILSER et al. 1995). Dies kann sowohl auf Nährstoffmangel als auch auf klimatische Faktoren (z. B. Trockenheit) zurückzuführen sein (JÖRGENSEN et al. 1990, ROBERTSON et al. 1988). Demnach wäre besonders unter Wintergerste der kF mit einem vergleichsweise hohen qCO<sub>2</sub> (s. Tab. 10) das Substratangebot für die Mikroorganismen ungünstig. Der in der Nachfrucht Zuckerrübe (kF) beobachtete deutlich geringere metabolische Quotient könnte dagegen auf ein für die Mikroorganismen günstiges Substratangebot durch die Wickengründungung zu Zuckerrüben (kF) beruhen.

Es ist aber auch möglich, daß eine unterschiedlich zusammengesetzte mikrobielle Gemeinschaft in den beiden Bodennutzungssystemen zu unterschiedlichen qCO<sub>2</sub> geführt hat. Für diese Hypothese gibt es in der Literatur ebenfalls Hinweise. Da davon auszugehen ist, daß sich die mikrobielle Biomasse in Abhängigkeit vom Nahrungsangebot nicht nur quantitativ sondern auch qualitativ verändert (ANDERSON & DOMSCH 1978, KAISER 1992), kann aufgrund der unterschiedlichen Bewirtschaftung in den beiden Fruchtfolgen auch eine Umschichtung in der Mikroorganismengesellschaft angenommen werden. GRAYSTON et al. (1998) konnten in Untersuchungen einen selektiven Einfluß von einzelnen Pflanzen auf

die Mikroorganismendiversität nachweisen. Nach DUNGER & FIEDLER (1989) sowie GISI (1990) ist die Zusammensetzung der Biozönose der Mikroorganismen im Boden von der Pflanzenart, der Durchwurzelung des Bodens sowie den Wurzelausscheidungen abhängig. So könnte möglicherweise in der verlängerten Fruchtfolge eine andere mikrobielle Populationsstruktur vorliegen als in der kF. KILLHAM et al. (1988) wiesen in Böden mit einem höheren Anteil an Strohdüngung ein weiteres Pilz/Bakterien-Verhältnis nach als in Böden ohne Strohdüngung. Nach den Beobachtungen von KILLHAM et al. (1988) könnte sich die mikrobielle Biomasse in der kF mit einem höheren Anteil an Strohdüngung zu einem größeren Anteil aus cellulytischen Pilzen zusammensetzen. In anderen Untersuchungen wird von einem Einfluß der Bodenbearbeitung auf das Pilz/Bakterien-Verhältnis berichtet (WOLFF-STRAUB 1970, GUPTA & GERMIDA 1988). Dabei wurde gezeigt, daß vor allem die pilzliche Biomasse durch eine Bodenbearbeitung geschädigt wird.

Die oben aufgestellten Hypothesen zum metabolischen Quotienten konnten im Rahmen dieser Untersuchung nicht geklärt werden. Aufgrund der großen Bedeutung der CO<sub>2</sub>-Freisetzung für die Humusbilanz in Böden wäre eine weitere Aufklärung anhand von Laboruntersuchungen zum metabolischen Quotienten im Ackerbau-Systemversuch wünschenswert. Weiter wäre zu klären, ob die im Systemversuch über CO<sub>2</sub>-Feldmessungen ermittelten metabolischen Quotienten mit denen im Labor mittels Basalatmung bestimmten metabolischen Quotienten zumindest in der Tendenz übereinstimmen.

## **5.6 Einfluß der Bodennutzung auf die Erträge von Zuckerrübe, Winterweizen und Wintergerste**

Die **Zuckerrübe** reagierte im 15-jährigen Mittel auf die mineralische N-Düngung nur mit einer geringen Variation des Rüben-ertrages und des bereinigten Zuckerertrages (s. Tab. 11). Unterschiede im Gehalt der Melassebildner in Abhängigkeit von der N-Düngung waren nicht signifikant (WILDENHAYN 1990). MÄRLÄNDER (1991) sowie HOFFMAN et al. (1996) berichteten ebenfalls von einem relativ geringen Einfluß der Stickstoffdüngung auf den bereinigten Zuckerertrag.

Offensichtlich war auch nach langjährigem Verzicht auf mineralische N-Düngung in der kF, nicht aber in der IF, die bodenbürtige N-Nachlieferung hoch genug, um ähnlich hohe Zuckererträge wie in den mineralisch gedüngten Parzellen zu erzielen (s. Tab. 11 und Abb.

24). In verschiedenen Untersuchungen wurde für den mitteleuropäischen Raum eine jährliche Mineralisationsrate der organischen Bodensubstanz von 1-3% ermittelt (RAUHE 1969, NEETESON & VAN VEEN 1987, ASMUS & GÖRLITZ 1991). Bei dem großen Vorrat an organisch gebundenem Stickstoff von etwa  $5500 \text{ kg N ha}^{-1}$  in 0-30 cm Tiefe auf diesem Standort (s.Tab. 3) und einer durchschnittlichen Abbaurrate von jährlich 2% resultieren somit  $110 \text{ kg N ha}^{-1}$  aus der Mineralisation. HOFFMANN et al. (1996) stellten mit einer Feldbebrütungsmethode während der Vegetationszeit auf einem lößbürtigen Boden in Südniedersachsen unter Zuckerrübe eine N-Nettomineralisation zwischen 120 und  $158 \text{ kg N ha}^{-1}$  fest.

Neben der bodenbürtigen Stickstoffnachlieferung erfolgt ein atmosphärischer N-Eintrag. GRÜNHAGE et al. (1988) geben für die jährlichen luftbürtigen Stickstoffeinträge aus Niederschlägen für den südniedersächsischen Raum Werte von weniger als  $20 \text{ kg N ha}^{-1}$  an.

Die Unterschiede im Ertrag zwischen den beiden Fruchtfolgen waren gering, zeigten sich aber bei Verzicht auf mineralische N-Düngung. Bei  $\text{N}_0$  fiel der bereinigte Zuckerertrag im 15-jährigen Durchschnitt in der IF um ca. 6% geringer aus als in der kF (s. Tab. 11).

Die Ursache der signifikanten Ertragsunterschiede zwischen den Bodennutzungssystemen bei Verzicht auf mineralische N-Düngung dürfte in einer unterschiedlichen direkten Vorfruchtwirkung zu sehen sein. Vermutlich steht der Zuckerrübe in der kF neben der bodenbürtigen N-Nachlieferung zusätzlich Stickstoff durch die Sommerwickenzwischenfrucht zur Verfügung, der in der IF nach der Vorfrucht Ackerbohne fehlt. CLAUPEIN (1994) vermutete, daß in der IF durch die lange Zwischenbrachezeit nach der Ernte der Ackerbohnen bis zur Aussaat der Zuckerrübe größere Stickstoffverluste durch Auswaschung von  $\text{NO}_3\text{-N}$  auftreten. Auf eine schlechtere N-Versorgung der Zuckerrübe in der IF gegenüber der kF wies auch WILDENHAYN (1990) hin. WILDENHAYN (1990) ermittelte im Rahmen von  $\text{N}_{\text{min}}$ -Untersuchungen (0-90 cm Bodentiefe) im Ackerbau-Systemversuch im Frühjahr 1984 unter Zuckerrübe bei unterlassener mineralischer N-Düngung in der IF  $64 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NO}_3\text{-N}$ , in der kF nach Wickengründung  $95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ NO}_3\text{-N}$ .

Danach wäre die in der IF zu erwartende höhere N-Versorgung der Zuckerrübe im Vergleich zur kF infolge der organischen Düngung mit Stallmist und Jauche und des Ackerbohnenanbaus bereits nach einer Zwischenbrache von ca. 8 Monaten nicht mehr

ertragswirksam. Offenbar werden die langfristigen positiven Fruchtfolgeeffekte in der IF durch die Wickengründüngung in der kF überdeckt. PRZEMECK et al. (1975) betonten die Gefahr einer Auswaschung von  $\text{NO}_3$ -Stickstoff im Winterhalbjahr, wenn durch einen fehlenden Zwischenfruchtanbau der mineralische Stickstoff nicht vorübergehend in Pflanzenmasse festgelegt wird.

Dagegen wird in der kF durch den Anbau von Sommerwicke als Zwischenfrucht die Auswaschung von  $\text{NO}_3$ -N vermutlich reduziert und durch deren späten Umbruch im November eine ausreichende Menge Stickstoff für die Nachfrucht konserviert (FLICK 1985). Über positive Effekte von Zwischenfrüchten auf den Ertrag von Zuckerrüben berichtete eine Vielzahl von Autoren (BRONNER 1976, BROUWER 1976, Märländer 1978, HEYLAND et al. 1988, HAMBÜCHEN 1990). Dabei ist eine herausragende Bedeutung des Zwischenfruchtanbaus in der veränderten Nährstoffdynamik des Bodens zu sehen. Durch den Einbau von Stickstoff in die organische Substanz der Zwischenfrucht wird  $\text{NO}_3$ -N über Winter vor der Auswaschung geschützt und steht nach dem Verrotten des Zwischenfruchtmaterials der folgenden Kultur wieder zur Verfügung (BECKER & FREDE 1976, ZITTERELL 1981).

Die im Vergleich zu anderen Feldfrüchten geringe Ertragswirksamkeit der mineralischen Stickstoffdüngung ist durch die Physiologie der Zuckerrübe begründet, bei der relativ wenig Stickstoff in das Ernteprodukt Rübenkörper eingelagert wird. Überschüssiger Stickstoff wird hingegen überwiegend in den Blattspreiten der älteren Blätter gespeichert (KELLEY & ULRICH 1966). Hohe Stickstoffgehalte im Rübenkörper sind sogar unerwünscht, da sie die technologische Qualität der Rüben mindern. Hinsichtlich der Zuckerausbeute ist neben der Höhe des Zuckergehaltes der Rüben besonders der Anteil der Melassebildner  $\alpha$ -Aminostickstoff, Kalium und Natrium von Bedeutung. Zunehmende Stickstoffaufnahme in den Rübenkörper steigert den Gehalt an Melassebildnern und führt zu sinkenden Zuckerausbeuten (WINNER 1979, BEIß 1985).

Der Blattertrag der Zuckerrübe reagierte dagegen deutlicher auf die mineralische N-Düngung (s. Tab. 11). Er stieg mit zunehmender N-Düngung in beiden Fruchtfolgen und war bei höchster N-Düngung ( $\text{N}_3$ ) gegenüber  $\text{N}_0$  um etwa 40% erhöht. Die geringere Blattmasse bei unterlassener und suboptimaler mineralischer N-Düngung im Vergleich zur  $\text{N}_3$ -Düngungsstufe war jedoch zumindest in der kF offensichtlich ausreichend, um gleich

hohe Rübenenerträge zu produzieren. Demnach hatte eine hohe N-Düngung lediglich eine übermäßige Entwicklung des Blattapparates zur Folge (s. Tab. 11).

Von ähnlichen Ergebnissen berichteten BEIß & WINNER (1985). In langjährigen Untersuchungen wurden bei geringer N-Düngung hohe Rübenenerträge mit relativ geringen Blatterträgen erzielt. Andererseits stellte KLOEPFER (1990) in Feldversuchen bei einem hyperoptimalen Stickstoffangebot eine übermäßig starke Blattbildung der Zuckerrübe bei gleichzeitig geringer Erhöhung des Rübenertrages fest.

Durch die Stallmist- und Jauchedüngung und den Leguminosenanbau wurden in der IF zwar die  $C_{org}$ -Mengen (s. Tab. 3) gegenüber der kF leicht erhöht. Eine Steigerung der Rübenenertrages und des bereinigten Zuckerertrages konnte nicht erzielt werden (s. Tab. 11).

Dagegen zeigten Untersuchungen von DEBRUCK & v. BOGUSLAWSKI (1979), DE HAAN (1980) und KLOEPFER (1990) eine Ertragssteigerung durch langjährige organische Düngung. Für die Ertragsüberlegenheit der organisch gedüngten Flächen wurden verschiedene Ursachen genannt. Eine Rolle spielte unter anderem die Zufuhr von P und K über die organischen Düngemittel (DE HAAN 1980). DEBRUCK & v. BOGUSLAWSKI (1979) verwiesen auf die Verbesserung der Bodenstruktur durch einen höheren Gehalt an organischer Substanz im Hinblick auf die besondere Empfindlichkeit von Zuckerrüben gegenüber Strukturschäden des Bodens.

Ein möglicher Einfluß der Stallmist- und Jauchedüngung auf die Gehalte der Pflanzennährstoffe P und K wurde in der vorliegenden Untersuchung durch die jährliche mineralische Düngung mit P, K, Mg und Ca überdeckt. Die P-, K-, Mg- und Ca-Düngung ist im Ackerbau-Systemversuch für alle Prüfglieder innerhalb einer Fruchtfolge so hoch bemessen, daß eine sehr gute Versorgung mit diesen Nährstoffen sichergestellt ist (s. Tab. 4).

Die Bewirtschaftung in der IF zu **Winterweizen** ist gekennzeichnet durch die Abfuhr des Rübenblattes vom Feld und eine reduzierte Grundbodenbearbeitung von 8 cm Tiefe. Dies führte bei unterlassener mineralischer N-Düngung im langjährigen Mittel zu Mindererträgen von bis zu 24% gegenüber der kF (s. Tab. 12). Mit steigender N-Düngung verminderten sich die Ertragsdifferenzen zwischen den Systemen.

Als Ursache der höheren Korn- und Stroherträge in der kF im Vergleich zur IF kann die ertragssteigernde Wirkung des eingearbeiteten Zuckerrübenblattes in der kF vermutet



werden. Mit dem Rübenblatt wird dem Boden zu Winterweizen mehr als  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  zugeführt (CLAUPEIN 1994). Der Einfluß der Rübenblattdüngung auf den Winterweizen-Kornertrag war bei unterbliebener und suboptimaler mineralischer Stickstoffdüngung größer als bei hohen mineralischen N-Gaben. Von ähnlichen Ergebnissen berichtete PAWLAK (1985). Der Autor stellte in Felduntersuchungen auf einem lößbürtigen Boden nach einer Rübenblattdüngung eine Ertragssteigerung bei Sommerweizen von 1 (hohe mineralische N-Düngung) bis  $9 \text{ dt ha}^{-1}$  (geringe mineralische N-Gabe) fest. Von Mehrerträgen bei Winterweizen nach einer Rübenblattdüngung berichteten BACHTHALER & KERN (1980) sowie FLICK (1985).

CLAUPEIN (1994) konnte in einer Ertragsanalyse im Ackerbau-Systemversuch (Untersuchungsjahre 1982-1991) zeigen, daß die geringeren Weizenkornerträge in der IF unabhängig von der Höhe der mineralischen N-Düngung durch eine deutlich geringere Bestandesdichte (Ähren  $\text{m}^{-2}$ ) bedingt sind. Dagegen wurden die Anzahl Körner/Ähre sowie das Tausendkorngewicht durch die Bodennutzungssysteme nicht beeinflusst.

Vermutlich stand dem Winterweizen in der IF bei unterlassener mineralischer N-Düngung in der Phase der Bestockung aufgrund noch nicht ausreichender Bodenerwärmung nur ungenügende Mengen mineralischen Stickstoffs aus der organischen Bodensubstanz zur Verfügung. Dieser Engpaß in der Stickstoffversorgung wurde in der kF durch die Zufuhr des stickstoffhaltigen Zuckerrübenblattes überbrückt. Das Rübenblatt wird wegen des engen C/N-Verhältnisses relativ schnell mineralisiert (BECKER 1979, DEBRUCK 1979). Demgegenüber liegt die Phase der Kornfüllung beim Winterweizen in einer Zeit, in der eine sehr viel größere Menge an Stickstoff mit hoher Rate mineralisiert wird. Die N-Verfügbarkeit scheint in dieser Entwicklungsphase des Winterweizens für die dann vorhandene Anzahl von Pflanzen in beiden Fruchtfolgen ausreichend zu sein.

Die Vermutungen werden durch Untersuchungen von WILDENHAYN (1990) im Ackerbau-Systemversuch unterstützt. Zu Vegetationsbeginn 1984 und 1985 wurden unter Winterweizen (N<sub>2</sub>-Düngungsstufe) der IF im Mittel über die zwei Untersuchungsjahre  $37 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$  (0-90 cm Tiefe) gefunden, in der kF mit Verbleib des Zuckerrübenblattes auf dem Feld  $55 \text{ kg NO}_3\text{-N ha}^{-1}$  (0-90 cm Tiefe).

Auch die Art der Bodenbearbeitung könnte zu einer unterschiedlichen N-Aufnahme geführt haben. In der kF wird der Boden zu Winterweizen mit dem Pflug auf 25 cm Tiefe

bearbeitet, in der IF erfolgt dagegen eine flache (8 cm), nichtwendende Bearbeitung mit dem Grubber (s. Tab. 1). Nach BAEUMER (1980, 1986) ist die N-Aufnahme aus reduziert bearbeiteten Böden aufgrund der langsameren Erwärmung im Frühjahr und der geringeren N-Nachlieferung aus dem Boden niedriger als bei konventioneller Bearbeitung. Dagegen berichteten HOFFMANN & KOCH (1998), daß die N-Mineralisation in 0-30 cm Tiefe bei reduzierter Bodenbearbeitung während der Vegetation weder verzögert erfolgte noch geringer war als im gepflügten Boden. EHLERS & CLAUPEIN (1994), BECKER & KOCH (1997), sowie STOCKFISCH (1997) fanden auf verschiedenen texturierten Böden einen ähnlichen Kornertrag von Winterweizen und Wintergerste bei langjährig differenzierter Bodenbearbeitung mit und ohne Pflug. HOFFMANN & KOCH (1998) untersuchten in einem Feldversuch (Parabraunerde aus Löß) mit drei Bodenbearbeitungsvarianten die Ertragsbildung von Winterweizen und Wintergerste bei vier N-Düngungsstufen. Unter den Versuchsbedingungen traten keine Unterschiede im Kornertrag durch die Bodenbearbeitung auf. Außerdem wurden keine Wechselbeziehungen zwischen der Bodenbearbeitung und der mineralischen N-Düngung festgestellt.

Als weitere Ursache für die Ertragsdifferenzen zwischen den beiden Bodennutzungssystemen könnte ein unterschiedlicher Krankheits- und Schädlingsbefall in den Bodennutzungssystemen in Betracht gezogen werden. Untersuchungen am Winterweizen im Ackerbau-Systemversuch zeigten jedoch beim Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln (Variante mPs; s. Abb. 2) keinen unterschiedlichen Krankheits- und Schädlingsbefall in der IF und der kF. Für detaillierte Ergebnisse sei auf WILDENHAYN (1990) verwiesen.

Somit kann die unterschiedliche Verwendung des Zuckerrübenblattes und dessen Beitrag zur N-Versorgung als wesentliche Einflußgröße auf den Ertrag der Nachfrucht Winterweizen angesehen werden.

Die Effekte der mineralischen Stickstoffdüngung waren bei Winterweizen deutlicher als bei Zuckerrübe (s. Tab. 11 und 12). Der bedeutende Einfluß der Stickstoffdüngung auf Wachstum und Ertrag von Getreide wird in der Literatur vielfach beschrieben (HANUS 1975, GOH & HAYNES 1986, FINCK 1994, STOCK et al. 1995). Völliger Verzicht auf mineralische N-Düngung führte in beiden Fruchtfolgen zu signifikanten Mindererträgen gegenüber mineralisch gedüngten Varianten, wobei der Ertragsabfall in der kF (Rüben-

blattdüngung) geringer war. Mit zunehmender mineralischer N-Düngung wurde die gute Vorfruchtwirkung des Zuckerrübenblattes kompensiert (s. Tab. 12). In der IF mit geringerer N-Nachlieferung aus den Ernteresten der Vorfrucht bewirkte auch noch die höchste N-Menge (N3) eine Ertragssteigerung. Dagegen zeigte die höchste N-Düngungsstufe (N3) in der kF bereits eine leichte Depression im Kornertrag. Vermutlich führte die hohe N-Nachlieferung aus dem Rübenblatt und die zusätzliche hyperoptimale mineralische N-Düngung (N3) in der kF im Vergleich zur N2-Düngungsstufe zu Mindererträgen infolge eines höheren Krankheitsbefalls. Die befallsverstärkende Wirkung einer hohen Stickstoffdüngung für verschiedene Pflanzenkrankheiten ist seit langem bekannt (HEITFUSS et al. 1977, GLIEMEROTH & KÜBLER 1977, DARWINKEL 1980 a und b, KUHLMANN et al. 1990). Nach HOPP (1957) haben steigende N-Gaben indirekt eine befallsfördernde Wirkung, da Veränderungen in der Gewebestruktur, bedingt durch ein N-Überangebot, eine Infektion mit Pflanzenpathogenen begünstigen.

Bei **Wintergerste** zeigte sich im Vergleich zu Winterweizen ein umgekehrter Effekt. Hier waren die Erträge (15-jähriges Mittel) bei allen N-Düngungsstufen in der IF höher als in der kF (s. Tab. 13). Die höheren Erträge in der IF dürften vor allem auf die Stallmistdüngung vor Wintergerste zurückzuführen sein (s. Tab. 1). Die ertragssteigernde Wirkung der Stallmistdüngung in der IF wurde besonders in den nicht bzw. nur wenig mineralisch gedüngten Varianten (N0 und N1) deutlich.

Die N-Wirkung der Winterweizenstrohdüngung in der kF zu Wintergerste ist hingegen naturgemäß durch das vergleichsweise weite C/N-Verhältnis (ca. 100) geringer (AMBERGER 1981). Verschiedene Autoren berichteten von einer N-Immobilisierung durch Stroh (SCHERER & MENGEL 1983, SCHMEER & MENGEL 1984). Dabei kommt es zu einer vorübergehenden biologischen Festlegung von Stickstoff (AMBERGER 1981).

Ähnliche Ergebnisse beschrieb auch DEUBEL (1994). Der Autor konnte in verschiedenen Fruchtfolgen auf einem sandigen Lehmboden bei Verzicht auf mineralische N-Düngung eine starke Ertragserhöhung durch Stallmist feststellen. Zunehmende N-Düngung überdeckte die Wirkung des Stallmistes. WICKE et al. (1990) untersuchten in einem Dauerfeldversuch auf einem sandigen Lehm die Wirkung von Stallmist auf die Erträge verschiedener Kulturpflanzen. Bei unterlassener mineralischer N-Düngung stellten sie bei Sommergerste eine Ertragssteigerung von etwa 10 dt ha<sup>-1</sup> durch Stallmistdüngung gegenüber unter-

lassener Stallmistdüngung fest. Bei zusätzlicher mineralischer N-Düngung in Höhe von  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  wurde der Mehrertrag durch die Stallmistdüngung auf etwa ein Drittel reduziert. Die mineralische Stickstoffdüngung führte bei Wintergerste in beiden Fruchtfolgen bis in Höhe der N<sub>2</sub>-Düngungsstufe zu einer Erhöhung der Kornerträge. Das Gerstenstroh reagierte dagegen auch noch auf eine hyperoptimale N-Düngung mit einem deutlichen Ertragszuwachs gegenüber N<sub>2</sub> (s. Tab. 13). Bei einer mineralischen N-Düngung in Höhe von  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  (N<sub>2</sub>; s. Tab. 13) war die zusätzliche Stallmistdüngung in der IF nicht mehr ertragswirksam.

Die durch die Stallmistdüngung erwartete bessere Stickstoffversorgung der Wintergerste in der IF gegenüber der ohne Stallmist gedüngten Wintergerste in der kF konnte in N<sub>min</sub>-Untersuchungen von WILDENHAYN (1990) in den N<sub>2</sub>-Parzellen nicht nachgewiesen werden. Allerdings fanden Wildenhayns N<sub>min</sub>-Untersuchungen 1984 und 1985 statt, also in den ersten Jahren des Dauerversuches. Möglicherweise wurde der Effekt der Stallmistdüngung auf die N<sub>min</sub>-Gehalte in den Anfangsjahren des Versuches durch die intensive Vornutzung der Versuchsfläche überlagert.

Es ist aber auch möglich, daß der verhältnismäßig große Mehrertrag von Wintergerste in der IF nicht nur allein auf das Mehrangebot von Stickstoff aus der Stallmistdüngung beruht. Denkbar wäre außer der Düngungswirkung eine durch Stallmist bewirkte Strukturverbesserung des Bodens, da Gerste diesbezüglich als besonders anspruchsvoll gilt. FLICK (1985) stellte in Untersuchungen zur Bodenstrukturverbesserung auf einer Parabraunerde aus Löß fest, daß Stallmistdüngung die Aggregatstabilität erhöht. Stabile Aggregate verhindern eine Verschlammung und Verkrustung der Bodenoberfläche, wodurch die Bestandsetablierung deutlich sicherer wird.

Die geringeren Gerstenkornerträge bei verminderter Stickstoffdüngung beruhen nach CLAUPEINS (1994) Untersuchungen im Ackerbau-Systemversuch im wesentlichen auf einer verringerten Bestandsdichte (Ähren  $\text{m}^{-2}$ ). Damit zeigte die Wintergerste in ihren ertragsbestimmenden Komponenten ein ähnliches Verhalten wie der Winterweizen.

Die hyperoptimale mineralische Stickstoffdüngung bewirkte in beiden Fruchtfolgen einen leichten Rückgang der Kornerträge gegenüber N<sub>2</sub>. Die ertragsmindernde Wirkung einer zu hohen N-Düngung wurde bereits beim Winterweizen diskutiert. Für die Wintergerste dürfte der Minderertrag auf einen höheren Krankheitsbefall und eine verstärkte Lager-

neigung bei übermäßiger Stickstoffversorgung zurückzuführen sein (WILDENHAYN 1990, KELLER et al. 1997).

Der Ernteindex bei Wintergerste wurde im Gegensatz zu Winterweizen von der Höhe der mineralischen N-Düngung beeinflusst (s. Tab. 12 und 13). Im Vergleich zur optimalen mineralischen N-Düngung (N2) führte die hyperoptimale N-Düngung (N3) in beiden Fruchtfolgen zu einem Anstieg der Stroherträge bei gleichzeitig sinkenden Kornträgen. Folglich zeigte sich in den N3-Düngungsstufen der signifikant niedrigste Ernteindex. FISCHBECK et al. (1990) berichteten ebenfalls von sinkenden Ernteindizes für Getreide bei hoher ( $170 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) mineralischer N-Düngung. Die Ergebnisse im Ackerbau-Systemversuch belegen, daß eine überhöhte mineralische N-Versorgung bei Wintergerste ein starkes vegetatives Wachstum bewirkte. Möglicherweise konnte aufgrund innerpflanzlicher Konkurrenz um Assimilate zwischen vegetativen und generativen Pflanzenteilen die Kornentwicklung nicht mehr in gleichem Maße gefördert werden wie in den übrigen N-Düngungsstufen. Neben den ansteigenden Risikofaktoren für vorzeitiges Lager und verstärkten Krankheitsbefall bei überhöhter mineralischer N-Düngung (N3) dürfte somit die Konkurrenz um Photosyntheseprodukte zu einer Abnahme der Kornträge im Vergleich zur N2-Düngungsstufe geführt haben (s. Tab. 13).

Bemerkenswert war, daß die Erträge in beiden Fruchtfolgen stärker durch direkte Vorfruchteffekte (in kF: Wickengründung zu Zuckerrübe und Rübenblattdüngung zu Winterweizen; in IF: Stallmistdüngung zu Wintergerste) als durch langfristige Fruchtfolgewirkungen beeinflusst wurden. Als dominierende Ursache für Ertragsdifferenzen zwischen den Früchten der Fruchtfolgen kamen in erster Linie Stickstoffwirkungen der unmittelbaren Vorfrüchte in Betracht. Langfristige Effekte der Fruchtfolgen auf die Erträge, wie sie z. B. bei der sechsfeldrigen Fruchtfolge durch die organische Düngung und dem Anbau von Leguminosen zu erwarten gewesen wären, wurden durch eine mineralische N-Düngung überlagert. Auch die erhöhte Humusmenge (s. Tab. 3) und die in Ansätzen erkennbare Verbesserung der physikalischen Bodeneigenschaften (Lagerungsdichte und Eindringwiderstand; s. Abb. 5-7) in der IF führten nicht zu Mehrerträgen gegenüber der kF. Mit einer Ausnahme wurden bei Zuckerrübe und Winterweizen in allen N-Düngungsstufen im 15-jährigen Mittel sogar höhere Erträge in der kF festgestellt.

Die Nährstoffwirkung der unmittelbaren Vorfrucht erscheint daher für die Ertragsleistung einzelner Früchte von größerer Bedeutung zu sein als der Aufbau der Gesamtertragsfolge (FISCHBECK et al. 1969).

### **5.7 Ertragsstabilität und langfristige Entwicklung des Ertragsniveaus**

Zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit eines Systems ist neben der Ertragshöhe die Ertragsstabilität (s. Kap. 4.5) über die Zeit von großer Bedeutung (DABBERT 1994). Die Ertragsstabilität einer Kulturpflanze hängt von ihren genetisch bestimmten Eigenschaften (BECKER 1993) sowie vom Witterungsgeschehen und dem Komplex der Bodenfruchtbarkeit ab. Dabei resultiert die Bodenfruchtbarkeit zum einen aus den bodenbiologischen, -physikalischen und -chemischen Eigenschaften des Standortes (v. BOGUSLAWSKI 1955). Zum anderen wirken Fruchtfolge und Bewirtschaftung modifizierend auf die Eigenschaften des Bodens. Somit können Bewirtschaftungsmaßnahmen langfristig zu einer Veränderung der Bodenfruchtbarkeit führen (BAEUMER 1992). Die Bodenfruchtbarkeit wird somit im übergeordneten Begriff "Standortertragsfähigkeit" zusammengefaßt (KELLER 1980).

Ertragsschwankungen zwischen den Jahren sind maßgeblich von Bodeneigenschaften abhängig. ROGASIK (1990) stellte fest, daß der Wirkungskomplex Bodenfruchtbarkeit die Ertragsleistung von Feldfrüchten in einzelnen Jahren stärker beeinflußt als die Witterung. Die Einflußmöglichkeiten des Landwirts zur Minderung der Ertragsvariation konzentrieren sich dabei auf die Verbesserung der Versorgungsfunktion des Bodens durch Düngung, Bewässerung, Bodenbearbeitung sowie Bestandspflege (GALES 1983, KUNDLER 1986).

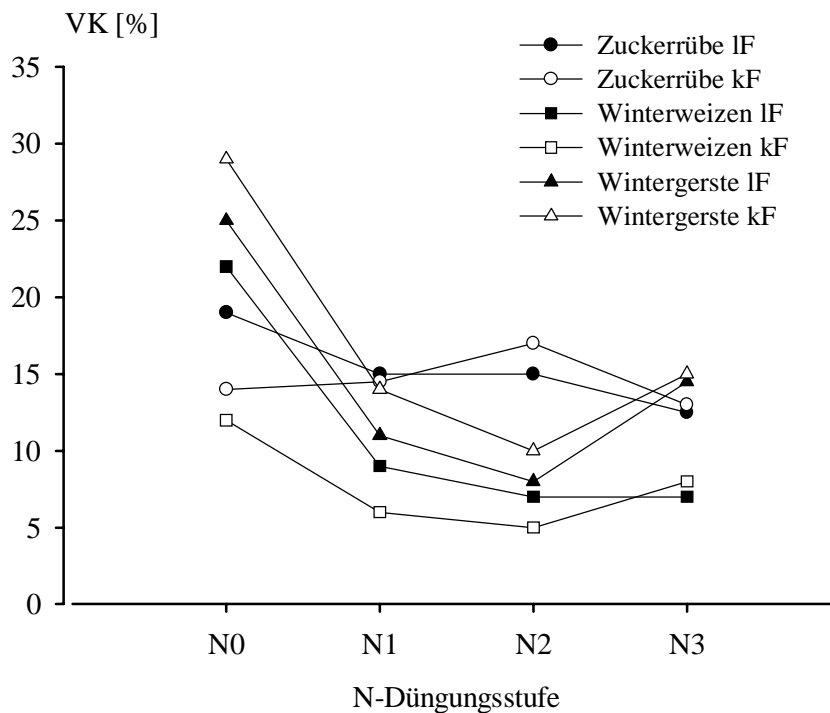
Im folgenden soll der Frage nachgegangen werden, welches Bodennutzungssystem die höhere Ertragsstabilität in Abhängigkeit von der Höhe der mineralischen N-Düngung besitzt.

Für die Analyse der **Ertragsstabilität** wurde der **Variationskoeffizient (VK)** herangezogen. Der VK besitzt gegenüber absoluten Streuungsmaßen (Standardabweichung, Variationsbreite, Standardfehler) den Vorteil der Dimensionslosigkeit und erlaubt damit den Vergleich der Variation von Ertragsdaten bei unterschiedlich hohen Mittelwerten. Dem VK für jede Kulturart liegen 15-jährige Ertragsdaten zugrunde.

Bei der Ertragsstabilität des **bereinigten Zuckerertrages** zeigte sich ein relativ einheitliches Bild (s. Abb. 24). Die Erträge streuten zwischen 13 und 19% um den Mittelwert. Sowohl zwischen den Bodennutzungssystemen als auch zwischen den N-Düngungsstufen war die Ertragsstabilität annähernd gleich verteilt. Lediglich die ungedüngte Variante der IF wies vermutlich als Folge der vergleichsweise geringeren N-Versorgung (s. Kap. 5.6) eine höhere Ertragsvariabilität über die Zeit im bereinigten Zuckerertrag auf. Bei unterlassener mineralischer N-Düngung stellt bodenbürtiger Stickstoff die wesentliche Quelle für die N-Versorgung der Pflanzen dar. Die N-Mineralisierung aus der organischen Substanz ist stark vom Witterungsverlauf eines Jahres abhängig (FISCHBECK et al. 1993). Daher kann sich die Höhe der bodenbürtigen N-Nachlieferung in Einzeljahren deutlich unterscheiden. Besonders kühle und feuchte Jahre können bei N<sub>0</sub> aufgrund verminderter oder verzögerter Mineralisation zu einer unzureichenden N-Versorgung der Zuckerrübe führen, was sich entsprechend im höheren VK bei N<sub>0</sub> in der IF gegenüber den mineralisch gedüngten Varianten zeigte (s. Abb. 24). Dagegen konnte in der kF bei Verzicht auf mineralische N-Düngung kein Anstieg im VK gegenüber den mineralisch gedüngten Parzellen festgestellt werden. In der kF wird gegenüber der IF vermutlich über die Wickengründung eine stabilere und zuverlässigere N-Versorgung der Zuckerrübe über die Jahre erreicht.

Mineralische N-Düngung führte bei **Winterweizen** im Vergleich zur ungedüngten Variante und im Vergleich zu den bereinigten Zuckererträgen zu einer ausgesprochen hohen Ertragsstabilität bei den Kornerträgen (s. Abb. 25 und 30). Steigende mineralische N-Düngung erhöhte die Ertragsstabilität des Winterweizens. Mit abnehmender N-Düngung ging die Ertragsstabilität zurück, und zwar stärker in der IF als in der kF, wo der höchste VK beim Winterweizen erreicht wurde (s. Abb. 30). Die Abfuhr des Rübenblattes vom Feld und die damit verbundene geringere N-Versorgung des Winterweizens in der IF war vermutlich Ursache der höheren Ertragsvariation im Vergleich zur kF. WALOSZCZYK (1991) stellte auf Lößschwarzerdeböden einen Einfluß der mineralischen Stickstoffdüngung auf den VK der Kornerträge von Winterweizen (8 Versuchsjahre) fest. Bei Verzicht auf mineralische N-Düngung betrug der VK 13,8%, während der VK bei einer mineralischen N-Düngung von 120 kg N ha<sup>-1</sup> auf 6,8% zurückging. In der kF konnte bei hyperoptimaler N-Düngung ein geringer Anstieg der Variabilität der Weizenkornerträge

gegenüber optimaler N-Düngung beobachtet werden. Möglicherweise bewirkte die hohe mineralische N-Düngung in Verbindung mit dem zugeführten Stickstoff aus dem Rübenblatt eine "Überdüngung" und führte zu einem verstärkten Krankheitsbefall des Winterweizens (s. Kap. 5.6).



**Abb. 31:** Variationskoeffizienten für den bereinigten Zuckerertrag von Zuckerrübe sowie für die Kornerträge von Winterweizen und Wintergerste in den Jahren 1982 bis 1996 in der langen (IF) und kurzen (kF) Fruchtfolge in Abhängigkeit von der Höhe der mineralischen N-Düngung (N0, N1, N2 und N3; s. Tab. 2)

Die Kornerträge von **Wintergerste** streuten im Vergleich zum Winterweizen in allen N-Düngungsstufen relativ stark (vgl. Abb. 25 und 26, s. Abb 30). Die geringere Ertragsstabilität der Wintergerste könnte fruchtartspezifisch sein. Besonders hohe VK zeigten sich in den N0-Parzellen. Hier deutet sich an, daß Wintergerste als zweite abtragende Frucht nach Zuckerrübe auf langjährig unterlassene mineralische N-Düngung stärker reagiert als Winterweizen. In beiden Systemen treten nach Angaben von CLAUPEIN (1994) mit der Winterweizenernte N-Entzüge in Höhe von etwa 80 kg ha<sup>-1</sup> (N0) bis ca. 200 kg ha<sup>-1</sup> (N3) auf. In der IF werden die N-Entzüge teilweise durch die Stallmistdüngung zu Wintergerste ausgeglichen, während in der kF nur die Erntereste (Stroh) mit einem weiten C/N-Verhältnis eingearbeitet werden. Mit Ausnahme von N3 bewirkte die Stall-



mistdüngung in der IF eine höhere Ertragsstabilität der Wintergerste als in der kF mit Strohdüngung. Vermutlich ist die geringere Variation in der IF auf eine höhere N-Versorgung aus Stallmist zurückzuführen. Andererseits führte in der kF möglicherweise die Einarbeitung des Weizenstrohs zu einem höheren VK in den N0, N1 und N2-Parzellen gegenüber der IF. Große Mengen an organischer Substanz mit einem weiten C/N-Verhältnis können zur N-Immobilisation bzw. zu einer verminderten oder verzögerten Mineralisation im Frühjahr führen und dadurch das Angebot an bodenbürtigem Stickstoff für die Kulturpflanzen verringern (SCHMEER & MENGEL 1984). Folge des Stickstoffmangels könnte ein Anstieg der Ertragsvariabilität sein. Mit einer Stickstoffdüngung bis zur Höhe von N2 (120 kg N ha<sup>-1</sup>) konnte die Ertragsvariation der Wintergerste in beiden Fruchtfolgen zunehmend gemindert werden. Eine hyperoptimale N-Versorgung führte dagegen zu einem Wiederanstieg der Ertragsvariation (Abb. 30). Als mögliche Ursache für diesen Anstieg können eine erhöhte Anfälligkeit der Wintergerste für vorzeitiges Lager und ein verstärkter Krankheitsbefall bei übermäßiger Stickstoffdüngung genannt werden. (s. Kap. 5.6).

Beim Getreide ging in der Regel unabhängig vom Bodennutzungssystem eine höhere Ertragsstabilität mit höheren Erträgen einher. BUHTZ (1971), ROGASIK (1990) und WALOSZCZYK (1991) konnten in Feldversuchen zeigen, daß mit steigenden Erträgen die relative Streuung der Ernteerträge abnimmt.

Der VK des bereinigten Zuckerertrages reagierte im Vergleich zum Getreide nur in geringem Maße auf die mineralische N-Düngung (Abb. 30).

BUHTZ (1971) und TASSIOPPOULOS (1977) fanden bei Zuckerrübe eine geringere Ertragsstabilität als bei Getreide, unabhängig vom N-Düngungsniveau. Diese Ergebnisse konnten im Ackerbau-Systemversuch nur in den N2-Parzellen bestätigt werden (s. Abb. 30). Dagegen konnten weder HAMBÜCHEN (1990) noch ROGASIK (1990) Unterschiede in der Ertragsstabilität zwischen Zuckerrübe und Winterweizen finden. Die oftmals beobachtete höhere Ertragsvariabilität der Hackfrüchte gegenüber Getreide beruht nach BUHTZ (1971) in Trockengebieten vorrangig auf höheren Ansprüchen (lange Sommer-Herbst-Vegetationszeit der Zuckerrübe) hinsichtlich der Versorgung mit pflanzenverfügbarem Wasser.

Das Niveau der Erträge wird u. a. durch die Jahreswitterung bestimmt und unterliegt daher jährlichen Schwankungen (TASSIOPOULOS 1977). Die **langfristige Ertragsentwicklung** wird dagegen primär durch Bewirtschaftungsmaßnahmen beeinflusst. Allerdings benötigt es viele Jahre, bis sich Merkmale der Bodenfruchtbarkeit soweit ändern, daß sie sich auf das Ertragsniveau auswirken (HAMBÜCHEN 1990, BAEUMER 1992). Der Ackerbau-Systemversuch scheint aufgrund seines Alters geeignet, Wirkungsrichtungen der Bodennutzungssysteme auf die Ertragsentwicklung aufzuzeigen.

Nach 15-jähriger Versuchsdauer galt es zu prüfen, ob durch die Kombination von schonender Bearbeitung, vermehrter Zufuhr organischer Düngemittel und einer verlängerten Fruchtfolge eine Steigerung der natürlichen Bodenfruchtbarkeit in der IF im Laufe der Zeit erreicht wurde oder nicht.

Steigern Bodennutzungssysteme die Bodenfruchtbarkeit, sollte das Ertragsniveau eine steigende Tendenz aufweisen. Andererseits können über die Zeit die Erträge sinken. In diesem Fall wäre von einer bodenfruchtbarkeitssenkenden Wirkung des Bodennutzungssystems auszugehen (s. auch Kap. 4.5.4).

Diese Effekte sind besonders bei unterlassener (N0) und geringer mineralischer N-Düngung (N1) zu erwarten. Denn hier findet bei Verzicht auf mineralische N-Düngung sowie bei suboptimaler N-Düngung im Laufe der Jahre eine Aushagerung des Standortes an Bodenstickstoff statt, besonders dann wenn auf organische Düngung ebenfalls verzichtet wird. Nach einer vereinfachten Stickstoffbilanz wird nach CLAUPEIN (1994) im Bodennutzungssystem kF (Variante mit chemischem Pflanzenschutz) während einer Rotation bei N0 Stickstoff in Höhe von  $128 \text{ kg N ha}^{-1}$  und bei N1 in Höhe von  $38 \text{ kg N ha}^{-1}$  entzogen. In der IF kommt es bei N0 zu einem N-Entzug von  $160 \text{ kg N ha}^{-1}$  und bei N1 von  $111 \text{ kg N ha}^{-1}$  während einer Rotation. Langfristig ist über die zunehmende Exhaustion auch eine Veränderung im Pflanzenertrag zu erwarten. Es ist davon auszugehen, daß die Wirkung langjährig unterlassener oder suboptimaler mineralischer N-Düngung auf das Ertragsniveau der Feldfrüchte in der IF aufgrund des Leguminosenanbaus und der Zufuhr organischer Düngemittel (Stallmist und Jauche) geringer ausfällt als in der kF. Dadurch bedingte Unterschiede im Ertrag zwischen den beiden Bodennutzungssystemen müßten im Laufe der Zeit immer größer werden (CLAUPEIN 1994).

Der bereinigte Zuckerertrag im Versuchszeitraum 1990 bis 1996 nahm um bis zu 25 dt ha<sup>-1</sup> gegenüber dem Versuchszeitraum 1982 bis 1989 zu (s. Abb. 27). Da Bewirtschaftungsmaßnahmen im Ackerbau-Systemversuch konstant gehalten werden, können Effekte des agrotechnischen Fortschritts der vergangenen 15 Jahre auf die positive Ertragsentwicklung weitgehend ausgeschlossen werden.

Ebenso scheidet ein Sorteneffekt als Ursache für den Ertragsanstieg aus, da zumindest bis einschließlich 1993 einheitlich die Zuckerrübensorte "Novadima" im Ackerbau-Systemversuch angebaut wurde. Allerdings ist es wahrscheinlich, daß eine Leistungssteigerung der gleichen Sorte aufgrund einer Nachbesserung durch den Züchter stattgefunden hat (KOCH 1998). Somit könnte der Ertragsanstieg im bereinigten Zuckerertrag trotz Anbau der gleichen Sorte bis einschließlich 1993 auf einen biologischen Fortschritt zurückzuführen sein.

Möglicherweise führten auch Anbaumaßnahmen in beiden Fruchtfolgen zu einer Steigerung des bereinigten Zuckerertrages im Laufe der Zeit. Es könnte sich durch die Wickengründung in der kF und den legumen Feldfutterbau sowie dem Anbau von Ackerbohne in der IF für Zuckerrüben langfristig ein verbesserter Fruchtbarkeitszustand des Bodens im Vergleich zum Ausgangszustand entwickelt haben. Das relativ niedrige Ertragsniveau zu Beginn des Versuches (s. Abb. 24) bei allen N-Stufen deutet auf ungünstige Bedingungen für den Zuckerrübenanbau vor Versuchsbeginn hin. Diese Vermutung wird durch den relativ starken Ertragszuwachs im bereinigten Zuckerertrag in den ersten fünf Versuchsjahren gestärkt (s. Abb. 24).

Mit Ausnahme der N0-Stufe hatte die Höhe der mineralischen N-Düngung sowie das Bodennutzungssystem keinen Einfluß auf den Ertragszuwachs vom ersten zum zweiten Versuchszeitraum (s. Abb. 27). Bei Verzicht auf mineralische Stickstoffdüngung war der durchschnittliche Ertragszuwachs vom ersten zum zweiten Versuchszeitraum in der IF mit 31% größer als in der kF mit einem Zuwachs von 24%. Zeigte sich bei N0 in der ersten Versuchshälfte (Versuchszeitraum 1982-1989) noch eine signifikante Differenz im bereinigten Zuckerertrag zwischen IF und kF, lagen die durchschnittlichen bereinigten Zuckererträge in der zweiten Versuchshälfte auf gleichem Niveau.

Möglicherweise sind die Mindererträge im ersten Versuchzeitraum bei N0 in der IF gegenüber der kF auf eine zeitweise verringerte bodenbürtige N-Nachlieferung in der IF

zurückzuführen. Es ist nicht auszuschließen, daß in einer Übergangszeit durch die vermehrte Bodenruhe in der IF (s. Tab. 1) Stickstoff in der organischen Substanz des Bodens festgelegt wurde (CLAUPEIN & BAEUMER 1990). Die geringere N-Nachlieferung in der IF ist jedoch nicht als systemimmanent zu betrachten, sondern nur durch einen zeitlichen Anpassungsprozeß bedingt (LIEBHARDT et al. 1989). Der relativ hohe durchschnittliche Ertragszuwachs in der IF bei N0 vom ersten Versuchszeitraum zum zweiten Versuchszeitraum könnte demnach auf eine im Zuge der Zeit verbesserte bodenbürtige N-Nachlieferung in der IF zurückzuführen sein.

Eine andere zeitliche Entwicklung wurde bei den Kornerträgen von Winterweizen und Wintergerste beobachtet (s. Abb. 27). Beide Getreidearten zeigten die gleiche Ertragsentwicklung. In der IF stiegen die Kornerträge von Winterweizen und Wintergerste in den Düngungsstufen N0 und N1 tendenziell mit der Zeit an. Die Kornerträge erhöhten sich im Versuchszeitraum 1990 bis 1996 um 2,5 bzw. 0,5 dt ha<sup>-1</sup> gegenüber dem Versuchszeitraum 1982 bis 1989. Die Bewirtschaftungsmaßnahmen der IF trugen also, wenn auch in geringem Maße, bei reduzierter bzw. unterlassener mineralischer N-Düngung zur langfristigen Erhöhung der Ertragsfähigkeit des Standortes bei.

Im Gegensatz dazu zeigte sich in der kF bei langjährig unterlassener bzw. suboptimaler mineralischer N-Düngung (N0 und N1) eine tendenzielle Abnahme der Kornerträge mit der Zeit. Die Kornerträge von Winterweizen und Wintergerste fielen in den N0 und N1 Varianten im Versuchszeitraum 1990 bis 1996 gegenüber dem ersten Zeitabschnitt (1982 - 1989) um 4 bzw. 6 dt ha<sup>-1</sup> (s. Abb. 27).

Während bei beiden Getreidearten die Ertragszuwächse nur gering ausfielen, zeichneten sich negative Ertragsentwicklungen klarer ab. Von ähnlichen Ertragsentwicklungen berichtete auch HAMBÜCHEN (1990). Während der Autor eine deutliche Reduktion der Ertragshöhe aufgrund eines Rückgangs der Bodenfruchtbarkeit (ungünstige Bodenstruktur) erkennen konnte, bewirkten fruchtbarkeitsfördernde Maßnahmen (vermehrte Bodenruhe, Gründüngung) nur einen geringen Anstieg der Erträge.

Somit sind in der kF bei unterlassener bzw. suboptimaler mineralischer N-Versorgung erste Ansätze eines Rückganges der Bodenfruchtbarkeit zu erkennen. Fruchtbarkeitsreduzierende Effekte in den N0- und N1-Düngungsstufen der kF könnten durch Humuschwund, Stickstoffmangel und durch die intensivere Bodenbearbeitung hervorgerufen

sein. Dieser Sachverhalt kann nicht abschließend geklärt werden, da bodenchemische und bodenphysikalische Untersuchungen nur bei optimaler mineralischer N-Düngung und auch nur nach längerer Versuchsdauer (15 Jahre) durchgeführt wurden. Jedoch lassen die im Vergleich zur IF in der kF bei N2 in Ansätzen erkennbare ungünstigere Bodenstruktur (s. Abb. 6 und 7) und die verminderte Humusmenge (s. Tab. 3) den Schluß zu, daß fruchtbarkeitsreduzierende Entwicklungen bei unterlassener bzw. suboptimaler N-Düngung ebenfalls eingetreten sind bzw. noch stärker ausgeprägt wurden.

Im Gegensatz dazu sind in der IF fruchtbarkeitssteigernde Wirkungen der Bewirtschaftungsmaßnahmen zu beobachten, welche langfristig betrachtet die Ertragsfähigkeit erhöhen. Dieses bedeutet, daß durch das Zusammenspiel aller Einzelmaßnahmen innerhalb des Bodennutzungssystems IF (reduzierte Bodenbearbeitung, organische Düngung, verlängerte Fruchtfolge) eine positive Systemwirkung existiert, die einen günstigen Einfluß auf den Komplex Bodenfruchtbarkeit ausübt.

Gab es also positive (IF) bzw. negative (kF) Systemwirkungen auf die Erträge über die Zeit bei unterlassener bzw. geringer mineralischer N-Düngung, so wurden diese bei höherer N-Düngung verwischt. Bei allen drei Feldfrüchten lagen die Erträge von der IF und der kF bei optimaler und hyperoptimaler mineralischer N-Düngung in beiden Zeiträumen 1982-1989 und 1990-1996 auf jeweils gleich hohem Niveau (s. Abb. 27). Mineralische N-Düngung in optimaler Höhe ist also in der Lage, die positive Systemwirkung auf die Erträge über die Zeit zu kompensieren.

Durch die Berechnung der Korrelation zwischen **Ertragsdifferenz** und dem Versuchsjahr konnten teilweise signifikante Einflüsse der Versuchsdauer auf die Ertragsdifferenzierung nachgewiesen werden (s. Tab. 15, Abb. 28 und 29). Der zu Versuchsbeginn festgestellte Minderertrag beim Winterweizenkorn in der IF (N0) von etwa 20 dt ha<sup>-1</sup> gegenüber der kF nahm mit zunehmender Versuchsdauer signifikant ab und lag nach 14 Versuchsjahren nur noch bei 4 dt ha<sup>-1</sup> (s. Abb. 28). Bei der Wintergerste dagegen nahmen die Ertragsdifferenzen zwischen den Systemen bei N0 und N1 zu: Im Laufe der Zeit wurde die IF im Ertrag immer überlegener (s. Abb. 29).

Bei den Getreidearten fiel die Ertragsdifferenzierung zwischen den Fruchtfolgen um so höher aus, je geringer die mineralische N-Düngung war. Mit Steigerung der mineralischen N-Düngung auf eine optimale bzw. hyperoptimale Stufe wurden die Differenzen zwischen

den Fruchtfolgen aufgehoben. Eine zeitabhängige Differenzierung zwischen den Systemen blieb aus (s. Tab. 15).

Die Hauptursache für die mit der Zeit zunehmenden bzw. abnehmenden Differenzen im Ertrag ist folglich in systembedingten Unterschieden in der zeitlichen Entwicklung der Nährstoff- und insbesondere in der Stickstoffversorgung zu suchen. FISCHBECK et al. (1969) zogen ebenfalls Nährstoffwirkungen als dominierende Ursache für die Ertragsdifferenzen verschiedener Fruchtfolgen in Betracht.

Allerdings dürften die Ertragsdifferenzen nicht ausschließlich auf die absolute Höhe der N-Zufuhr zurückzuführen sein, da sich trotz gleichbleibender N-Zufuhr in beiden Fruchtfolgen über die Zeit eine signifikante Ertragsdifferenzierung zwischen IF und kF gezeigt hat. Diese Aussage wird besonders durch die Entwicklung der Ertragsdifferenzen des Winterweizens gestützt (s. Abb. 28). Die zu Versuchsbeginn in der kF bei Verzicht auf mineralische N-Düngung ertragssteigernde Wirkung der Rübenblattdüngung von ca. 20 dt ha<sup>-1</sup> wird vermutlich im Laufe der Zeit durch systembedingte fruchtbarkeitsfördernde Effekte der IF (keine Rübenblattdüngung) kompensiert. So dürfte durch die Rübenblattdüngung in der kF nur eine kurzfristige dominierende Stickstoffwirkung vorgelegen haben. Dagegen ist in der IF neben der absoluten N-Zufuhr über Stallmist, Jauche und Leguminosen langfristig von weiteren Wirkungskomponenten auszugehen. Dabei kommen vor allem durch die langfristige Wirkung der Stallmistdüngung und der Leguminosen erhöhte mikrobielle Umsetzungsprozesse in Betracht. Durch eine gesteigerte mikrobielle Aktivität kann eine gleichmäßigere Nährstoffversorgung für die Pflanzen sowie eine Verbesserung der Bodenstruktur erreicht werden. Bei suboptimaler und besonders bei fehlender mineralischer Stickstoffdüngung kommt der bodenbürtigen Nährstoffversorgung der Pflanze eine größere Rolle zu. Der günstige Einfluß der IF auf die Bodenfruchtbarkeit bewirkt vermutlich eine langfristig höhere bodenbürtige Stickstoffnachlieferung und somit eine bessere Nährstoffversorgung der Pflanze.

Möglicherweise war im Bodennutzungssystem IF in den ersten Jahren nach Versuchsbeginn und der Umstellung auf vorwiegend organische Stickstoffquellen (Leguminosen und organische Düngemittel bei N0 und N1) Stickstoff weniger leicht verfügbar als in der kF. Von solch einer "Umstellungsphase" berichteten auch LIEBHARDT et al. (1989) und MAGDOFF et al. (1997). LIEBHARDT et al. (1989) stellten bei organischer Bewirtschaftung

mit Stallmist und Leguminosen als hauptsächliche Stickstoffquelle in den ersten 4 Jahren Mindererträge im Vergleich zum konventionellen System fest. Nach 5 Jahren hatten sich die Erträge beider Systeme angeglichen bzw. waren die Erträge im System mit Leguminosenanbau und Stallmistdüngung höher als im konventionellen System. Aus Untersuchungen von HARRIS et al. (1994) mit  $^{15}\text{N}$ -markiertem Stickstoff aus mineralischem Dünger und Leguminosen ist bekannt, daß von den Pflanzen mehr Düngerstickstoff und weniger Leguminosenstickstoff aufgenommen wird. Dagegen wurde der Leguminosenstickstoff vermehrt in die mikrobielle Biomasse inkorporiert, was kurzfristig zu einer Stickstoff-Festlegung im Boden, aber langfristig zu einer verbesserten bodenbürtigen N-Nachlieferung führte. Danach könnten zumindest in den ersten Jahren des Versuches die vergleichsweise geringen Erträge der IF bei unterlassener und suboptimaler mineralischer N-Düngung auf eine verringerte N-Verfügbarkeit zurückzuführen sein, bis sich ein neues Gleichgewicht in der N-Dynamik des Bodens eingestellt hat. Nach einigen Jahren dürfte das neue Fließgleichgewicht in der IF zu einer effizienteren Nährstoffversorgung der Pflanzen im Vergleich zur kF geführt haben, was sich in der positiven Ertragsentwicklung bei IF in den Varianten N0 und N1 zeigte (s. Abb. 27, 28 und 29).

Die Ertragsdifferenzierung über die Zeit im bereinigten Zuckerertrag (s. Tab. 15) fiel im Vergleich zum Getreide deutlich geringer aus. Vermutlich ist der wenig enge Zusammenhang zwischen der Ertragsdifferenz von IF und kF und der Versuchszeit darauf zurückzuführen, daß die Zuckerrübe in beiden Fruchtfolgen direkt nach einer Leguminose steht. Der N-Bedarf der Zuckerrübe ist vermutlich durch die Leguminosenvorfrucht soweit gedeckt, daß sich langfristig entwickelnde fruchtbarkeitsfördernde Tendenzen überlagert werden.

## 5.8 Zusammenfassende Diskussion und Schlußfolgerungen

Hohe und stabile Erträge sind das Ergebnis der Wirkung einer Vielzahl von Faktoren, die miteinander in wechselseitigen Beziehungen stehen. In diesem Wirkungsgefüge ist die Bodenfruchtbarkeit ein bedeutender Faktorenkomplex.

Als integraler Bestandteil der Bodenfruchtbarkeit beeinflußt die Bodenstruktur über das Transformations- und Speichervermögen und über die Durchwurzelbarkeit die Ertragsfähigkeit eines Standortes. Ertragseinbußen können durch Schadverdichtungen in der Krumenbasis in Extremfällen mehr als 50% betragen (ROGASIK 1990). Die Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen zeigten für die lange Fruchtfolge mit an Häufigkeit und Tiefe reduzierter Pflugarbeit eine tendenziell geringere Verdichtung der Krumenbasis als die kurze Fruchtfolge mit jährlich intensiver Pflugarbeit (s. Abb. 5-7). Eine Auflösung der Krumenbasisverdichtung kann durch biologische Prozesse als auch durch die Bildung von Schrumpfrissen im Boden erfolgen (EHLERS 1991).

Ähnlich wie bei der Bodenstruktur zeigten die Bewirtschaftungsmaßnahmen der IF einen günstigen Einfluß auf die Menge und den Gehalt an organischer Bodensubstanz (s. Tab. 3). Dabei dürfte in der IF eine komplexe Wirkung aus angebauten Fruchtarten, organischer Düngung und Bodenbearbeitung vorliegen, die im Vergleich zur kF zu tendenziell höheren Humusmengen führte. Wird durch die Fruchtfolge und die organische Düngung in erster Linie die zugeführte Menge an organischer Substanz bestimmt, so wirkt sich die Bodenbearbeitung vor allem auf die Umsetzungsrate aus. In vielen Untersuchungen wurden positive Auswirkungen der organischen Substanz des Bodens auf die Strukturstabilität, das Transformations- und Speichervermögen für Nährstoffe und die Pufferung negativer Einwirkungen extremer Witterungseinflüsse nachgewiesen (KELLER 1980, FISCHBECK 1981, SAUERBECK 1981). Durch die Komplexwirkung, die mit einer Erhöhung des Gehalts an organischer Bodensubstanz auftritt, wurden deutliche Ertragssteigerungen ausgelöst (SCHNIEDER 1984, DEUBEL 1994).

Das Bodenleben stellt ebenfalls eine wichtige Komponente des Komplexes Bodenfruchtbarkeit dar. Regenwürmer zerkleinern und durchmischen den Bestandesabfall und die Erntesterete, während die Mikroorganismen den enzymatischen Abbau der organischen Substanz und dadurch die Freisetzung von Nährstoffen bewirken. Die Beziehungen zwischen Regenwürmern und Mikroorganismen sind deshalb für die Stoffkreisläufe im



Boden sehr bedeutsam (WEIß 1994). Durch die Stickstoffmineralisation nehmen die Mikroorganismen starken Einfluß auf die Nährstoffverfügbarkeit und das Niveau der Bodenfruchtbarkeit.

Insgesamt gesehen zeigten sich in den bodenmikrobiologischen Kenngrößen nur sehr geringe Unterschiede zwischen den Bodennutzungssystemen (s. Tab. 8, Abb. 20). Es muß daher angenommen werden, daß durch intensive Bewirtschaftung der kF aus bodenmikrobiologischer Sicht gegenüber der IF, die durch Stallmist- und Jauchedüngung sowie durch vermehrte Bodenruhe gekennzeichnet ist, kein Nachteil entsteht. Aus bodenmikrobiologischer Sicht sind ackerbauliche Maßnahmen als günstig zu beurteilen, die langfristig eine stabile und umsetzungsaktive mikrobielle Biomasse hervorbringen. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigten deutlich, daß dieses Ziel auch ohne Zufuhr organischer Düngemittel (Stallmist und Jauche) durch ernterückstandsreiche Fruchtfolgen und Gründüngung erreicht werden kann (s. Tab. 8, Abb. 20, 22 und 23).

Die Bodenatmungsrate in der kF war tendenziell höher als der IF (s. Abb. 21 und 22). Eine höhere mikrobielle Aktivität ist in den meisten Fällen positiv zu beurteilen (GEHLEN & SCHRÖDER 1989, BEYER 1990, GROCHOLL 1991). Eine intensivere mikrobielle Aktivität bedeutet eine rasche Freisetzung von pflanzenverfügbaren Nährstoffen (GRÖBLINGHOFF et al. 1988). Für eine umfassende Bewertung müssen jedoch auch negative Folgen einer erhöhten mikrobiellen Aktivität, wie eine erhöhte Auswaschungsgefährdung von pflanzenverfügbarem  $\text{NO}_3\text{-N}$ , in Betracht gezogen werden. Möglicherweise führte die erhöhte Bodenatmungsrate in der kF auch zu einer ineffizienteren Substratnutzung, was sich im höheren metabolischen Quotienten im Vergleich zur IF andeutete (s. Tab. 10). Diese Ergebnisse sollten jedoch durch weitere Untersuchungen ergänzt und bestätigt werden.

Anders als bei den bodenmikrobiologischen Kennwerten kann eine eindeutige Abgrenzung der Bodennutzungssysteme anhand der Makrofauna vorgenommen werden. Die intensive Bewirtschaftung der kF in Form von jährlichem Pflügen verminderte die Regenwurmbiomasse im Vergleich zur IF deutlich (s. Abb. 11 und 12). Die Regenwurmpopulation ist folglich geeignet, Bewirtschaftungseinflüsse anzuzeigen.

Die Regenwürmer nehmen durch ihre Größe und Grabeaktivität großen Einfluß auf bodenphysikalische Eigenschaften (s. Kap. 5.3). Daneben spielen Regenwürmer eine wichtige Rolle bei der Umwandlung von Nährstoffen aus dem sich zersetzenden Pflanzen-

material und wirken daher positiv auf die Bodenfruchtbarkeit (EDWARDS & LOFTY 1977, LEE 1985). STOCKFISCH (1997) berichtete von einem gesteigerten Abbau der Ernterückstände durch Regenwürmer. Lumbriciden können zwar nicht die Menge der Nährstoffe im Boden erhöhen, aber sie können ihre Verfügbarkeit und die Umsatzrate steigern (BASKER et al. 1992, HELING 1997). Die vermehrte Bodenruhe in der IF dürfte somit über die Zunahme der Population von Regenwürmern zu fruchtbarkeitsfördernden Effekten beigetragen haben.

Zusammenfassend kann aus den bodenbiologischen, -chemischen und -physikalischen Kennwerten nach 15-jähriger Versuchszeit bei **optimaler mineralischer Stickstoffdüngung (N<sub>2</sub>)** keine exakte Differenzierung zwischen den Bodennutzungssystemen vorgenommen werden. Jedoch führte eine vermehrte Bodenruhe, organische Düngung (Stallmist und Jauche) sowie der Anbau von Leguminosen in der Mehrzahl der Bodenmerkmale zu einer "Verbesserung der Bodenqualität". Von den untersuchten Kennwerten kann die Regenwurmaktivität hervorgehoben werden, da sie die Bewirtschaftungsunterschiede am deutlichsten widerspiegelte.

Da alle betrachteten Kennwerte auf die Bodenfruchtbarkeit und auf das Pflanzenwachstum Einfluß nehmen, ist es naheliegend, nach der Beziehung zwischen Höhe und Stabilität des Pflanzenertrages und den ermittelten Bodenkennwerten zu fragen. Aussagen über die Beziehungen zwischen Bodenkennwerten und den Ertragsdaten im Ackerbau-Systemversuch können nur für die optimal gedüngten (N<sub>2</sub>) Parzellen getroffen werden, da nur hier fruchtbarkeitsbestimmende Bodenmerkmale untersucht wurden.

In verschiedenen Untersuchungen wurden enge Zusammenhänge zwischen Bodenkennwerten und dem Pflanzenertrag ermittelt (BECK 1974, DEUBEL 1994, WEIß 1994). JÖRGENSEN (1995) betonte dabei die Bedeutung der mikrobiellen Biomasse als Index für die Bodenfruchtbarkeit.

Die Ertragsdaten zeigten deutlich, daß durch eine optimale mineralische N-Düngung (N<sub>2</sub>) in beiden Bodennutzungssystemen gleich hohe und stabile Erträge erwirtschaftet werden konnten (s. Abb. 23-25). Auch bei intensiver Bodennutzung mit kurzer Fruchtfolge und Verzicht auf Zufuhr organischer Düngemittel konnte nach 15-jähriger Versuchszeit anhand der Ertragsdaten (N<sub>2</sub>) keine negative Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit beobachtet werden.

Die sich in der IF andeutenden fruchtbarkeitsfördernden Faktoren (günstigere Bodenstruktur, erhöhte Menge an organischer Bodensubstanz, erhöhte Regenwurmaktivität) wurden im Vergleich zur kF durch die Wirkung der mineralischen Stickstoffdüngung überlagert, so daß für sie kein quantifizierbarer Effekt auf den Pflanzenertrag feststellbar war. Das heißt, es bestand im Ackerbau-Systemversuch die Möglichkeit einer Kompensation des Einflusses suboptimaler Bodeneigenschaften auf den Ertrag durch mineralische N-Düngung.

Mit dem Ansatz der Quantifizierung von Bodenfruchtbarkeitskennwerten ist eine Einschätzung der Bodenfruchtbarkeit nur bedingt möglich. Kausale Beziehungen zwischen Bodenfruchtbarkeitskennwerten und pflanzlichen Kennwerten können nicht vorausgesetzt werden. Somit ist es auch nicht ohne weiteres möglich, Ertragswerte anhand von Bodenfruchtbarkeitskennwerten einzuschätzen. Obwohl die Regenwurmaktivität eine gute Indikatorfunktion bezüglich des Einflusses unterschiedlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Bodenfruchtbarkeit besitzt, korrespondierte sie in der vorliegenden Untersuchung wie auch in vielen anderen Versuchen nicht mit der Ertragsfähigkeit (DOUBE & SCHMIDT 1997).

Der Zusammenhang zwischen dem Einfluß der Bewirtschaftung auf die Bodenfruchtbarkeit und deren Beziehung zur Ertragsfähigkeit wird in der vorliegenden Untersuchung bei fehlender (N0) und suboptimaler (N1) mineralischer N-Düngung anhand der zeitlichen Entwicklung der Erträge und der Ertragsdifferenzen zwischen der IF und der kF deutlich. In diesem Fall zeigte sich in der kurzen Fruchtfolge langfristig ein Rückgang der Bodenfruchtbarkeit anhand der Ertragsdaten im Vergleich zur langen Fruchtfolge, bei der die Ertragsleistung zunahm. Dadurch änderten sich die Ertragsdifferenzen zwischen der IF und der kF zugunsten von IF (s. Kap. 4.5.4). Bei Reduzierung der mineralischen Stickstoffdüngung kommt der Zufuhr organischer Düngemittel (Stallmist und Jauche) und dem Anbau von Leguminosen eine größere Rolle für die Ertragsrealisierung zu. Die langfristige Entwicklung der Ertragsdifferenzen (s. Abb. 27 und 28) zeigte deutlich, daß in der IF neben der kurzzeitigen Nährstoffwirkung langfristige Komplexwirkungen aus Fruchtfolgeeffekten, unterschiedlicher Bodenbearbeitung und organischer Düngung hinzukommen. Sie dürften in erster Linie biologischer Natur und Folge von erhöhten Umsetzungsprozessen im Boden der IF im Vergleich zur kF sein, da bei fehlender und

suboptimaler mineralischer N-Düngung eine höhere bodenbürtige Stickstoffversorgung angenommen werden kann. ROGASIK (1990) stellte fest, daß die Beziehungen zwischen verschiedenen Bodenkennwerten und dem Ertrag bei niedrigem Düngungsniveau größer waren als bei hohem. Von einer korrelativen Beziehung der Regenwurmaktivität zum Ertrag bei Verzicht auf mineralische Stickstoffdüngung berichtete KRÜCK (1998). Bei Zufuhr von mineralischem Stickstoff wurden die Zusammenhänge zwischen Komponenten der Bodenfruchtbarkeit und der Ertragsbildung wie im vorliegenden Fall überlagert (ROGASIK 1990, KRÜCK 1998).

Somit ist zu vermuten, daß sich im Ackerbau-Systemversuch bei unterlassener bzw. suboptimaler mineralischer Stickstoffdüngung (N0 und N1) enge Zusammenhänge zwischen Bodenkennwerten und Ertragswerten im Laufe der Zeit entwickelt haben. Um diese Frage zu klären, ist es notwendig und wünschenswert, zukünftig auch in den Varianten mit suboptimaler mineralischer N-Versorgung Bodenfruchtbarkeitskennwerte zu erfassen. Dabei könnten vor allem Erkenntnisse über langfristige Auswirkungen bestimmter Extensivierungsmaßnahmen erwartet werden.

Die Beobachtungen im Ackerbau-Systemversuch nach 15-jähriger Versuchszeit deuten darauf hin, daß auch bei intensiver Bodennutzung mit kurzer Fruchtfolge und intensiver Bodenbearbeitung nachhaltig hohe und stabile Erträge erwirtschaftet werden können, wenn das System ausreichend mit mineralischem Stickstoff versorgt wird. Allerdings belegen die Ergebnisse der Ertragsmessungen bei Reduzierung der mineralischen Stickstoffdüngung die Bedeutung der biotischen Aktivität eines Bodens gegenüber der bloßen Zufuhr von Nährstoffen.

Beeinträchtigungen des Bodenlebens, besonders der Regenwürmer, bei intensiver Bodenbearbeitung weisen darauf hin, daß die biologische Fruchtbarkeit nicht voll ausgenutzt wird. Veränderungen der landwirtschaftlichen Bearbeitung in der kF hin zu regenwurm-schonenden Maßnahmen wären wichtig und könnten möglicherweise die Ertragsleistung noch verbessern. Dies könnte durch eine zumindest teilweise pfluglose Bearbeitung in der kF erreicht werden. Um die Ausbildung einer großen und auch langfristig stabilen Regenwurmpopulation zu gewährleisten, muß die Bewirtschaftung an die Bedürfnisse der Bodentiere angepaßt werden (GERSCHAU 1995, STOCKFISCH 1997). Als besonders Regenwurm-schonend haben sich pfluglose Bearbeitung, Direktsaat, Zwischenfruchtanbau

und eine ausreichende Bodenbedeckung durch Mulchmaterial erwiesen (EDWARDS 1983, GERSCHAU 1995, STOCKFISCH 1997).

Die mikrobiellen Bodenkennwerte (s. Tab. 8, Abb. 22 und 23) sowie die Erträge (s. Tab. 11, 12 und 13) wurden in beiden Fruchtfolgen sehr stark durch direkte Vorfruchteffekte beeinflusst. Ungünstig wirkte sich dabei besonders die Folge Ackerbohne - Zuckerrübe im Bodennutzungssystem IF aus, da zwischen August und April beträchtliche Stickstoff-Mengen aus den Ernteresten der Ackerbohne mineralisiert und in Form von  $\text{NO}_3$ -Stickstoff ausgewaschen werden können. Hier wäre eine Verbesserung der langen Fruchtfolge dringend erforderlich, um unerwünschte  $\text{NO}_3$ -N-Austräge in die Hydrosphäre zu vermindern und eine stabile mikrobielle Biomasse dauerhaft zu erhalten. Dies kann durch den Anbau einer schnellwüchsigen Zwischenfrucht oder dem Anbau von Untersaaten zu Ackerbohnen erreicht werden (JUSTUS & KÖPKE 1990, 1991). Damit würde gleichzeitig der Nährstoffkreislauf Boden-Pflanze weiter geschlossen und die Bodenfruchtbarkeit der IF verbessert werden.

Die mineralische Stickstoffdüngung ist heute zur Erzielung hoher Pflanzenerträge mit guter Qualität üblich. Jedoch ist die intensive Bewirtschaftung häufig mit Problemen wie der Auswaschung von Nitrat-Stickstoff in das Grundwasser begleitet (SRU 1996). Zur Minderung der Probleme sind Bodennutzungssysteme geeignet, welche auch bei geringer mineralischer Stickstoffdüngung hohe und stabile Erträge auf lange Sicht erzeugen können. Diese Systeme sind auf die Erhaltung und Förderung der Bodenfruchtbarkeit ausgerichtet. Das Bodennutzungssystem IF würde einer solchen Bewirtschaftungsweise eher entsprechen als das Bodennutzungssystem kF.

## 6 Zusammenfassung

Durch die Gestaltung des Bodennutzungssystems werden Bodeneigenschaften geprägt, die auf lange Sicht wichtig sein können für die Bodenfruchtbarkeit und Ertragsfähigkeit. Ziel dieser Untersuchung war zu zeigen, ob an einem einzigen Standort der Einfluß von zwei kontrastierenden Bodennutzungssystemen auf Bodeneigenschaften nachgewiesen werden kann und ob Auswirkungen auf das Ertragsgeschehen erkennbar werden.

Die Untersuchungen wurden auf dem 15 Jahre alten Ackerbau-Systemversuch Reinshof bei Göttingen auf Lößparabraunerde durchgeführt. Verglichen wurde eine dreifeldrige Fruchtfolge mit Zuckerrübe - Winterweizen - Wintergerste und tiefwendender (30 cm) Bodenbearbeitung mit einer sechsfeldrigen Fruchtfolge mit flach-mulchender (5-8 cm) bis mitteltiefer (25 cm) Bodenbearbeitung. In der sechsfeldrigen Fruchtfolge folgen den Marktfrüchten Zuckerrübe - Winterweizen - Wintergerste die Feldfrüchte Luzerne - Silomais - Ackerbohne. Die organische Düngung beschränkt sich in der dreifeldrigen Fruchtfolge auf den Verbleib der Erntereste auf dem Feld. In der sechsfeldrigen Fruchtfolge werden Rübenblatt und Weizenstroh geräumt und dafür Stallmist und Jauche zurückgeführt. Das Bodennutzungssystem mit der dreifeldrigen Fruchtfolge und den entsprechenden Bearbeitungsmaßnahmen wird als **kurze Fruchtfolge** (= **kF**) bezeichnet, das System mit der sechsfeldrigen Fruchtfolge und mit eingeschränkter Intensität der Bodenbearbeitung sowie mit Stallmist- und Jachezufuhr als **lange Fruchtfolge** (= **lF**). Untersucht wurden physikalische, chemische und biologische Bodeneigenschaften auf den Parzellen mit "optimaler" mineralischer Stickstoffdüngung. Zusätzlich wurden der Ertrag und die Ertragsstabilität über die Zeit in Abhängigkeit von der Stickstoffdüngung analysiert.

Die Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitung und anderer Systemeinflüsse auf die Gefügekenwerte Lagerungsdichte und Eindringwiderstand waren gering. Sich anbahnende günstige Gefügeentwicklungen in der lF wurden durch periodischen Pflugeinsatz aufgehoben. Im Verlauf der 15 Versuchsjahre verringerte sich in der kF die Menge an organisch gebundenem Kohlenstoff und Gesamtstickstoff in der Ackerkrume um etwa 4 bzw. 0,4 t ha<sup>-1</sup>. In der lF blieb hingegen durch Feldfutterbau und organische Düngung bei gleichzeitig reduzierter Bearbeitungsintensität die Menge an organisch gebundenem Kohlenstoff und Gesamtstickstoff im Boden in Höhe von 48,5 bzw. 5,7 t ha<sup>-1</sup> erhalten. Als Folge extensiverer Wirtschaftsweise, insbesondere aufgrund der reduzierten Bearbeitungsintensität, war die Regenwurm-Biomasse im Durchschnitt über alle Früchte in der lF um 30 g m<sup>-2</sup> höher als in der kF. Die Regenwurm-Aktivitätsdichte ließ dagegen keine einheitliche Systemwirkung erkennen. Sie war nur unter zwei von drei untersuchten Kulturen in der lF höher als in der kF. Die

Besatzdichte an Regenwurmängen und die Fläche der Gänge gingen mit der Aktivitätsdichte der Regenwürmer einher. Die Artenzusammensetzung unterschied sich nicht zwischen den beiden Bodennutzungssystemen. Die mikrobiologischen Kennwerte Dehydrogenaseaktivität und mikrobielle Biomasse reagierten auf den periodischen Pflugverzicht in der IF mit einer deutlichen Stratifikation in der Krume. Beide Kenngrößen korrelierten eng miteinander. Die Gesamtmenge an mikrobieller Biomasse in der Ackerkrume unterschied sich im Mittel über alle Feldfrüchte nicht zwischen den Systemen und betrug etwa  $1000 \text{ kg ha}^{-1}$ . Die tiefwendene Bodenbearbeitung in der kF bewirkte gegenüber der flacheren Bearbeitung in der IF eine um 20-30% höhere Bodenatmung in der Ackerkrume und führte zu höheren metabolischen Quotienten.

Die Ertragshöhe und die Ertragsstabilität waren in beiden Bodennutzungssystemen von der Höhe der mineralischen Stickstoffdüngung und von direkten Vorfruchteffekten geprägt. Stickstoffmangel war Ursache einer geringen Ertragsstabilität zwischen den Jahren. Steigende Stickstoffdüngung erhöhte diese Stabilität. Ebenso stieg mit der Stickstoffdüngung die Ertragshöhe, weniger ausgeprägt bei der Zuckerrübe als beim Getreide. Wesentliche Unterschiede in der Ertragshöhe und -stabilität zwischen den Bodennutzungssystemen ergaben sich nur bei unterlassener und "suboptimaler" mineralischer Stickstoffdüngung. Ohne oder mit geringer Stickstoffdüngung entwickelte sich das durch das Bodennutzungssystem beeinflusste Ertragsniveau über die Versuchsjahre zugunsten der IF.

Vermutlich werden in der IF unter diesen Bedingungen des Stickstoffmangels Komplexwirkungen aus Fruchtfolge, reduzierter Bearbeitungsintensität und organischer Düngung ertragswirksam und langfristig erkennbar. Gegenüber der kF weist diese Ertragsentwicklung auf eine zeitabhängige Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit hin. Eine solche relative Erhöhung war in den letzten Versuchsjahren bei "optimaler" Stickstoffzufuhr auch an einzelnen Bodenmerkmalen erkennbar, vor allem an der Menge organischer Substanz und an der Masse der Regenwürmer.

Durch das Bodennutzungssystem geprägte Bodenfruchtbarkeitsmerkmale verlieren ihre ertragsbestimmende Bedeutung bei mineralischer Stickstoffdüngung. In Betrieben mit ökologischer Wirtschaftsweise wird deshalb der Gestaltung des Bodennutzungssystems eine größere Bedeutung zukommen als in konventionell geführten Betrieben.

## 7 Literatur

- ALEF K. (1991): Methodenhandbuch Bodenmikrobiologie. ecomed, Landsberg/Lech.
- ALEF K., BECK T., ZELLES L. & KLEINER D. (1988): A comparison of methods to estimate microbial biomass and N-mineralization in agricultural and grassland soils. *Soil Biology & Biochemistry* **20**, 561-565.
- ALVAREZ C. R., ALVAREZ R., GRIGERA M. S. & LAVADO R. S. (1998): Associations between organic matter fractions and the activity soil microbial biomass. *Soil Biology & Biochemistry* **30**, 767-773.
- ALVAREZ R., DIAZ R. A., BARBERO N., SANTANATOGLIA O. J. & BLOTTA L. (1995): Soil organic carbon, microbial biomass and CO<sub>2</sub>-C production from three tillage systems. *Soil & Tillage Research* **33**, 17-28.
- AMBERGER A. (1981): Einsatz und Ausnutzung von N-Düngemitteln. Bayerisches landwirtschaftliches Jahrbuch **58**, 80-88.
- ANDERSON J. P. E. (1975): Einflüsse von Temperatur und Feuchte auf Verdampfung, Abbau und Festlegung von Diatomeen im Boden. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* **7**, 141-146.
- ANDERSON J. P. E. & DOMSCH K. H. (1978): A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biology & Biochemistry* **10**, 215-221.
- ANDERSON T.-H. & DOMSCH K. H. (1985): Maintenance carbon requirements of actively-metabolizing microbial populations under *in situ* conditions. *Soil Biology & Biochemistry* **17**, 197-203.
- ANDERSON T.-H. & DOMSCH K. H. (1986): Carbon link between microbial biomass and soil organic matter. In: Proceedings of the fourth International Symposium of Microbial Ecology (Megusar F. & Gantar M., Hrsg.). Slovene Society for Microbiology, Ljubljana, 467-471.
- ANDERSON T.-H. & DOMSCH K. H. (1989): Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biology & Biochemistry* **21**, 471-479.
- ANDERSON T.-H. & DOMSCH K. H. (1990): Application of eco-physiological quotients ( $q_{CO_2}$  and  $q_D$ ) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology & Biochemistry* **22**, 251-255.
- ANDRASKI B.J., MUELLER D.H. & DANIEL T.C. (1985): Effects of tillage and rainfall simulation date on water and soil losses. *Soil Science Society of America Journal* **49**, 1512-1517.
- ANGERS D. A., BISSONNETTE N., LÉGÈRE A. & SAMSON N. (1993a): Microbial and biochemical changes induced by rotation and tillage in a soil under barley production. *Canadian Journal of Soil Science* **73**, 39-50.
- ANGERS D. A., NDAYAGAMIYE A. & CÔTÉ D. (1993b): Tillage-induced differences in organic matter of particle-size fractions and microbial biomass. *Soil Science Society of America Journal* **57**, 512-516.



- ASMUS F. & GÖRLITZ H. (1991): N-Bilanzen aus Dauerversuchen mit Stallmist- und Gülledüngung auf diluvialen sandigen Böden. VDLUFA-Schriftenreihe **33**, 684-689.
- ASMUS F. & VÖLKER U. (1984): Einfluß der Strohdüngung auf Ertrag und Bodeneigenschaften in Fruchtfolgen mit unterschiedlichem Getreideanteil. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde **28**, 411-417.
- ATLAVINYTE O. & ZIMKUVIENE A. (1985): The effect of earthworms on barley crop in the soil of various density. Pedobiologia **28**, 305-310.
- BACHTHALER G. & KERN H. (1980): Ertragsbeeinflussung durch Bodenbearbeitung in Abhängigkeit von Fruchtfolge und Standort. Kali-Briefe (Büntehof) **15**, 91-98.
- BAEUMER K. (1980): Stickstoffdüngung zu Getreide bei reduzierter Bodenbearbeitung. Kali-Briefe (Büntehof) **15**, 77-90.
- BAEUMER K. (1986): Bodenbearbeitung mit reduziertem Aufwand. Acker- und pflanzenbauliche Gesichtspunkte. Landtechnik von morgen **24**, 20-31.
- BAEUMER K. (1990): Verfahren und Wirkungen der Bodenbearbeitung. In: Integrierter Landbau (Dierks R. & Heitefuß R., Hrsg.), BVL Verlagsgesellschaft München.
- BAEUMER K. (1992): Allgemeiner Pflanzenbau. Ulmer, Stuttgart.
- BALESDENT J., WAGNER G. H. & MARIOTTI H. A. (1988): Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by carbon-13 natural abundance. Soil Science Society of America Journal **52**, 118-124.
- BARNES B. T. & ELLIS F. B. (1979): Effects of different methods of cultivation and direct drilling, and disposal of straw residues, on populations of earthworms. Journal of Soil Science **30**, 669-679.
- BASKER A., MACGREGOR A. N. & KIRKMAN J. H. (1992): Influence of soil ingestion by earthworms on the availability of potassium in soil - an incubation experiment. Biology & Fertility of Soils **14**, 300-303.
- BAUCHHENß J. & HERR S. (1986): Vergleichende Untersuchungen der Individuendichte, Biomasse, Artendichte und Diversität von Regenwurmpopulationen auf konventionell und alternativ bewirtschafteten Flächen. Bayerisches landwirtschaftliches Jahrbuch **8**, 1002-1012.
- BAUCHHENß J. & HERR S. (1988): Funktion der Bodentiere auf Flächen mit extensiver Bodenbearbeitung. Schule und Beratung, **1-2**, 10-12.
- BAUCHHENß J. (1983): Die Bedeutung der Bodentiere für die Bodenfruchtbarkeit und die Auswirkungen landwirtschaftlicher Maßnahmen auf die Bodenfauna. Kali-Briefe (Büntehof) **16**, 529-548.
- BECK T. (1974): Der Einfluß langjähriger Monokultur auf die Bodenbelebung im Vergleich zur Fruchtfolge. Landwirtschaftliche Forschung **31** (Sonderheft), 268-276.
- BECK T. (1984a): Der Einfluß unterschiedlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf bodenmikrobiologische Eigenschaften und Stabilität der organischen Substanz. Kali-Briefe (Büntehof) **17**, 331-340.

- BECK T. (1984b): Mikrobiologische und biochemische Charakterisierung landwirtschaftlich genutzter Böden. II. Mitteilung: Beziehungen zum Humusgehalt. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde **147**, 467-475.
- BECK T. (1988): Einfluß langjährig unterschiedlicher Bewirtschaftungsweisen auf bodenmikrobiologische Eigenschaften. VDLUFA-Schriftenreihe **28**, 879-891.
- BECK T. (1990): Der Einfluß langjähriger Bewirtschaftungsweise auf bodenmikrobiologische Eigenschaften. Kali-Briefe (Büntehof) **20**, 17-29.
- BECK T. (1991): Forschungsbedarf im Zusammenhang mit Zielvorstellungen der Meß- und Voraussagbarkeit von Elementen und Prozessen der Bodenfruchtbarkeit: Bodenbiologische Prozesse. Berichte über Landwirtschaft **203** (Sonderheft), 85-99.
- BECKER C. & KOCH H.-J. (1997): Ertrag und Qualität von Winterweizen, Triticale und Körnerleguminosen nach unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf Großflächen verschiedener Standorte. Pflanzenbauwissenschaften **1**, 183-191.
- BECKER H. (1993): Pflanzenzüchtung. Ulmer, Stuttgart.
- BECKER K. W. & FREDE H. G. (1976): Was kann der Ackerbauer vom Zwischenfruchtanbau erwarten? Mitteilungen der DLG **91**, 778-779.
- BECKER K.-W. (1979): Rübenblatt als Dünger. Mitteilungen der DLG **94**, 1033-1035.
- BEESE F., HARTMANN A., BECK TH., RACKWITZ R. & ZELLES L. (1994): Microbial community structure and activity in agricultural soils under different management. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde **157**, 187-195.
- BEIß U. & WINNER C. (1985): Ertragsbildung und Qualität der Zuckerrübe im Verlauf des Wachstums. Zuckerindustrie **110**, 199-209.
- BEIß U. (1985): Inhaltsstoffe der Zuckerrübe und Nährstoffvorräte im Boden. Die Zuckerrübe **34**, 40-44.
- BEYER L. (1990): Die Standortbewertung der biologischen Aktivität von Böden über Ermittlung der Bodenatmung und der zellulolytischen Aktivität im Feld. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde **153**, 261-269.
- BINET F., HALLAIRE V. & CURMI P. (1997): Agricultural practices and the spatial distribution of earthworms in maize fields. Relationships between earthworm abundance, maize plants and soil compaction. Soil Biology & Biochemistry **29**, 577-583.
- BLAKE G. R., NELSON W. W. & ALLMARAS R. R. (1976): Persistence of subsoil compaction in a Mollisol. Soil Science Society of America Journal **40**, 943-948.
- BLANKE M. M. (1996): Soil respiration in an apple orchard. Environmental and Experimental Botany **36**, 339-348.
- BOGUSLAWSKI E. v. (1955): Was ist Bodenfruchtbarkeit? In: Bodenfruchtbarkeit (Beiträge) (Deutsche Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalten, Hrg.), Verlag Praxis und Forschung, Oldenburg.

- BÖHM H., GROCHOLL J. & AHRENS E. (1991): Mikrobiologische Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen am Beispiel dreier Bodentypen. Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung **32**, 114-120.
- BÖHM W. & KÖPKE U. (1977): Comparative root investigations with two profile wall methods. Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau **144**, 297-303.
- BORCHERT H. (1988): Bodenschutz durch Minimalbodenbearbeitung (Flache Fräsbearbeitung). Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft **57**, 37-42.
- BORCHERT H. & GRAF R. (1988): Zum Vergleich von Penetrometermessungen, durchgeführt bei unterschiedlichem Wassergehalt. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde **151**, 69-71.
- BORNSCHEUER H. (1984): Die Bodengesellschaft auf dem Systemversuch Reinshof. Diplomarbeit, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität Göttingen.
- BOSCH J. & MOURA-PEAO C. (1987): Integrierter Pflanzenschutz im Ackerbau: Das Lautenbach-Projekt. IV. Die Auswirkungen von integrierter und konventioneller Bewirtschaftung auf die Abundanz des Großen Regenwurms *Lumbricus terrestris* L.. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz **94**, 322-327.
- BOSTRÖM U. (1986): The effect of soil compaction on earthworms in a heavy clay soil. Swedish Journal of Agriculture Research **16**, 137-141.
- BRONNER H. (1976): Kenndaten des pflanzenverfügbaren Bodenstickstoffs in Beziehung zum Wachstum der Zuckerrübe. Die Bodenkultur **27**, 18-59, 120-161.
- BROUWER W. (1976): Handbuch des Speziellen Pflanzenbaues. II, Parey, Berlin & Hamburg.
- BRUNOTTE J., GERSCHAU M.-B., JOSCHKO M., KNÜSTING E. & SOMMER C. (1992): Zum Einfluß von Mulchsaat zu Zuckerrüben auf den Regenwurmbestand. Die Zuckerrübe **42**, 116-119.
- BUHTZ E. (1971): Ertragsstabilität im Statischen Versuch Lauchstädt. Archiv für Bodenfruchtbarkeit und Pflanzenproduktion **15**, 289-298.
- BURNS R. K. (1982): Enzyme activity in Soil: Location and possible role in microbial ecology. Soil Biology & Biochemistry **14**, 423-427.
- BUYANOVSKY G. A., WAGNER G. H. & GANTZER C. J. (1986): Soil respiration in a winter wheat ecosystem. Soil Science Society of America Journal **50**, 338-344.
- CAIS R. (1992): Besatz und Artenzusammensetzung von Regenwürmern in Abhängigkeit von acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen. Diplomarbeit, Fachhochschule Weihenstephan.
- CAMPBELL C. A., MCCONKEY B. G., ZENTNER R. P., DYCK F. B., SELLES F. & CURTIN D. (1995): Carbon sequestration in a Brown Chernozem as affected by tillage and rotation. Canadian Journal of Soil Science **75**, 449-458.
- CHRISTOPH H., KÜHN G. & KUNZE A. (1991): Bewertung des physikalischen Bodenzustandes nach strukturschonender Bodenbearbeitung auf einem D4a-Standort. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde **35**, 443-450.

- CLAUPEIN W. (1994): Möglichkeiten und Grenzen der Extensivierung im Ackerbau - Wirkungen der Bewirtschaftungsintensität auf die langfristige Produktivität und Stabilität von Agrarökosystemen und deren Umweltwirkungen. Habilitationsschrift, Universität Göttingen.
- CLAUPEIN W. & BAEUMER K. (1990): Einfluß der Bodenbearbeitung auf den Stickstoffumsatz in Ackerböden. Tagungsbericht der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften **295**, 145-159.
- CLEMENT N. (1991): Ackerbau-Systemversuch Reinshof - Ausgangszustand und erste Ergebnisse. Dissertation, Universität Göttingen.
- COLEMAN D. C. (1973): Soil carbon balance in a successional grassland. *Oikos* **24**, 195-199.
- DABBERT S. (1994): Ökonomik der Bodenfruchtbarkeit. Ulmer, Stuttgart.
- DALENBERG J. W. & JAGER G. (1989): Priming effect of some organic additions to <sup>14</sup>C-labelled soil. *Soil Biology & Biochemistry* **21**, 443-448.
- DARWIN C. (1881): The formation of vegetable mould through the action of worms with observations of their habits. Murray, London.
- DARWINKEL A. (1980a): Grain production of winter wheat in relation to nitrogen and diseases. I: Relationship between nitrogen dressing and yellow rust infection. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* **149**, 299-308.
- DARWINKEL A. (1980b): Grain production of winter wheat in relation to nitrogen and diseases. II: Relationship between nitrogen dressing and mildew infection. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* **149**, 309-317.
- DEBRUCK J. (1979): Rübenblatt - so wertvoll wie eine Stallmistgabe. *Mitteilungen der DLG* **94**, 1030-1032.
- DEBRUCK J. (1981): Organische Düngung und Bodenfruchtbarkeit. *Der Förderungsdienst* **29**, 34-42.
- DEBRUCK J. & BOGUSLAWSKI E. v. (1979): Die Wirkung der Kombination von organischer und mineralischer Düngung auf Grund von langjährigen Versuchen. *Landwirtschaftliche Forschung* **36** (Sonderheft), 405-419.
- DEUBEL W.-D. (1994): Einfluß verschiedener Ackerflächenverhältnisse, Düngungsmaßnahmen und Fruchtarten auf die mikrobielle Biomasse des Bodens und Beziehungen zur Reproduktion der organischen Substanz. Dissertation, Universität Halle.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (1995-1997): Monatlicher Witterungsbericht 43-45, Offenbach/Main.
- DEXTER A. R. (1986): Model experiments on the behavior of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil. I. Effects of seed-bed-aggregate size and sub-soil strength on wheat roots. *Plant and Soil* **95**, 123-133.
- DIEZ T. & BACHTHALER G (1978): Auswirkungen unterschiedlicher Fruchtfolge, Düngung und Bodenbearbeitung auf den Humusgehalt der Böden. *Bayrisches Landwirtschaftliches Jahrbuch* **3**, 368-377.

- DIEZ T., KREITMAYER J., WEIGELT H., BAUCHHENß J., BECK T. & BORCHERT H. (1988): Einfluß langjähriger pflugloser Ackerbewirtschaftung (System Horsch) auf Pflanzenwachstum, Wirtschaftlichkeit und Boden. Bayerisches landwirtschaftliches Jahrbuch **65**, 789-812.
- DOMSCH K. H. (1985): Funktion und Belastbarkeit des Bodens aus der Sicht der Bodenmikrobiologie. Materialien zur Umweltforschung. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart.
- DONNELLY P., ENTRY J. E., CRAWFORD D. L. & CROMACK K. (1990): Cellulose and lignin degradation in forest soils: Response to moisture, temperature, and acidity. *Microbial Ecology* **20**, 289-295.
- DORAN J. W. (1980): Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Science Society of America Journal* **44**, 765-771.
- DOUBE B. M., BUCKERFIELD J. C. & KIRKEGAARD K. A. (1994): Short-term effects of tillage and stubble management on earthworm populations in cropping systems in southern New South Wales. *Australian Journal of Agriculture Research* **45**, 1587-1600.
- DOUBE B. M. & SCHMIDT O. (1997): Can the abundance or activity of soil macrofauna be used to indicate the biological health of soils? In: *Biological Indicators of Soil Health* (Pankhurst C. E., Doube B. M. & Gupta V. V. S. R., Hrsg.), 265-295.
- DOUGLAS C. L. & RICKMAN R. W. (1992): Estimating crop residue decomposition from air temperature, initial nitrogen content, and residue placement. *Soil Science Society of America Journal* **56**, 272-278.
- DUMBECK G. (1986): Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden. *Gießener Bodenkundliche Abhandlungen*, Band 3.
- DUNGER W. & FIEDLER H. J. (1989): *Methoden der Bodenbiologie*. Fischer, Jena.
- DURST L. & KAHNT G. (1988): Der Regenwurm, ein Wachstumsfaktor? *DLG-Mitteilung* **17**, 910-911.
- DUTZLER-FRANZ G. (1977): Der Einfluß einiger chemischer und physikalischer Bodenmerkmale auf die Enzymaktivität verschiedener Bodentypen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **140**, 329-350.
- EDWARDS C. A. (1983): Earthworm ecology in cultivated soils. In: *Earthworm ecology from Darwin to vermiculture* (Satchell J. E., Hrsg.), Chapman and Hall, London.
- EDWARDS C. A. & LOFTY J. R. (1975): The influence of cultivations on soil animal populations. - *Progress in Soil Zoology*, Proc. 5th Int. Coll. Soil Zool. (Vanek J., Hrsg.), Den Haag, 399-407.
- EDWARDS C. A. & LOFTY J. R. (1977): *Biology of earthworms*. Chapman and Hall, London.
- EDWARDS C. A. & LOFTY J. R. (1982a): The effect of direct drilling and minimal cultivation on earthworm populations. *Journal of Applied Ecology* **19**, 723-734.

- Edwards C. A. & Lofty J. R. (1982b): Nitrogenous fertilizers and earthworm populations in agricultural soils. *Soil Biology & Biochemistry* **14**, 515-521.
- EDWARDS W. M., NORTON L. D. & REDMOND C. E. (1988): Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil. *Soil Science Society of America Journal* **52**, 483-487.
- EHLERS W. (1975): Observations on earthworms channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Science* **119**, 242-249.
- EHLERS W. (1976): Water infiltration and redistribution in tilled and untilled loess soil. *Göttinger Bodenkundliche. Berichte* **44**, 137-156.
- EHLERS W. (1983): Auswirkungen der Bodenbelastung mit schwerem Gerät und der Bodenbearbeitung auf das Bodengefüge und das Pflanzenwachstum. *Kali-Briefe (Büntehof)* **16**, 499-516.
- EHLERS W. (1991): Wirkung von Bodenbearbeitungssystemen auf gefügeabhängige Eigenschaften verschiedener Böden. *Berichte über Landwirtschaft* **204** (Sonderheft), 118-137.
- EHLERS W. (1992): Reduzierte Bodenbearbeitung - Ökologische Folgen und ackerbauliche Grenzen. *VDLUFA-Schriftenreihe* **35**, 35-58.
- EHLERS W. (1996): Wasser in Boden und Pflanze : Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag. Ulmer, Stuttgart.
- Ehlers W. & Claupein W. (1994): Approaches toward conservation tillage in Germany. In: *Conservation tillage in temperate agroecosystems* (Carter M. R., Hrsg.), Lewis Publishers, Chelsea, Michigan (USA), 141-165.
- EHLERS W., KÖPKE U., HESSE F. & BÖHM W. (1983): Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soils. *Soil & Tillage Research* **3**, 261-275.
- EHLERS W. & TEIWES K. (1987): Der Einfluß der Bodenbearbeitung auf Porenraumgliederung, ungesättigte Wasserleitung und Gasdiffusion: I. Porenraumgliederung und Wasserleitung. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **53**, 381-386.
- EIJSACKERS H. & VAN DER DRIFT J. (1976): Effects on the soil Fauna. In: *Herbicides. Physiology, Biochemistry, Ecology* 2nd. Edition (Audus L. J., Hrsg.), Academic Press London **2**, 149-174.
- ELSNER D. & BLUME H.-P. (1993): Einfluß von Bearbeitung und Düngung auf die mikrobielle Aktivität typischer Böden Schleswig-Holsteins. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **71**, 319-322.
- EMANUEL C. (1977): Untersuchungen zur biogenen Auflösung einer Pflugsohlenverdichtung während zweijähriger Bodenruhe. Dissertation, Universität Göttingen.
- FENNER S. (1995): Wirkung und Nachhaltigkeit mechanischer Lockerung von Krumenbasisverdichtungen unter Wendepflug- und Mulchwirtschaft. Dissertation, Universität Göttingen.

- FILSER J., FROMM H., NAGEL R. & WINTER K. (1995): Effects of previous intensive agricultural management on microorganisms and the biodiversity of soil fauna. *Plant and Soil* **170**, 123-129.
- FINCK M. (1994): Einfluß der Wechselwirkungen zwischen Gülledüngung, mineralischer N-Düngung, Bodenbearbeitung und Fungizidbehandlung auf Wachstum, N-Aufnahme, Ertrag und N-Verwertung bei Winterweizen. Dissertation, Universität Kiel.
- FISCHBECK G. (1981): Bodenfruchtbarkeit im Lichte pflanzenbaulicher Entwicklungstendenzen. *Bayerisches landwirtschaftliches Jahrbuch* **58**, 58-74.
- FISCHBECK G, DENNERT J. & MÜLLER R. (1990): N-Dynamik des Bodens, Ertragsbildung und Stickstoffentzug von Winterweizen bei unterschiedlicher Höhe und Verteilung der mineralischen N-Düngung. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* **164**, 297-311.
- FISCHBECK G, DENNERT J. & MÜLLER R. (1993): Untersuchungen zur Optimierung der N-Aufnahme von Winterweizenbeständen durch ergänzende Düngungsmaßnahmen. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* **171**, 82-95.
- FISCHBECK G., HANUS H. & FRANKEN H. (1969): Systemwirkungen von Fruchtfolgen. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* **129**, 310-324.
- FLAIG W. (1964): Effect of microorganisms in the transformation of lignin into humic substance. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **28**, 1523-1535.
- FLAIG W. (1976): Die organische Bodensubstanz als nachliefernde Stickstoffquelle für die Ernährung der Pflanze und einige Modelle zur technischen Verwirklichung. *Landbauforschung Völkenrode* **26**, 117-121.
- FLICK G. (1985): Einfluß von Anbaumaßnahmen zu Silomais und Zuckerrüben auf deren Vorfruchtwirkung zur nachfolgenden Testfrucht Winterweizen. Dissertation, Universität Hohenheim.
- FRANCIS G., TABLEY F. & WHITE K. (1998): Soil structure changes in new zealand mixed rotations. *Summaries of the 16<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Montpellier, France 1998*. Volume I, 47.
- FRANK T. & MALKOMES H.-P. (1993): Mikrobielle Aktivitäten in landwirtschaftlich genutzten Böden Niedersachsens. I. Einfluß der ackerbaulichen Nutzung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **156**, 485-490.
- FRANKO U. (1984): Einfluß niedriger Temperaturen auf die Umsetzung der organischen Substanz im Boden. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **28**, 533-536.
- FRANZLUEBBERS A. J., HONS F. M. & ZUBERER D. A. (1995a): Tillage and crop effects on seasonal dynamics of soil CO<sub>2</sub> evolution, water content, temperature, and bulk density. *Applied Soil Ecology* **2**, 95-109.
- FRANZLUEBBERS A. J., HONS F. M. & ZUBERER D. A. (1995b): Tillage-induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO<sub>2</sub> evolution under intensive cropping. *Soil & Tillage Research* **34**, 41-60.

- FREDE H.-G., BEISECKER R. & GÄTH S. (1994): Long-term impacts of tillage on the soil ecosystem. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **157**, 197-203.
- FRIEBE B. (1994): Einfluß langfristig differenzierter Bodenbearbeitung auf die Entwicklung der Meso-, Makro- und Megafauna. In: *Beurteilung von Bodenbearbeitungssystemen hinsichtlich ihrer Arbeitseffekte und deren langfristiger Auswirkungen auf den Boden* (Tebrügge F. & Dreier M., Hrsg.), Wiss. Fachverlag Dr. Fleck, Gießen, 191-203.
- FRIEBE B. & HENKE W. (1992): Regenwürmer und deren Abbauleistungen bei abnehmender Bearbeitungsintensität. In: *Wechselwirkungen von Bodenbearbeitungssystemen auf das Ökosystem Boden* (Friebe B., Hrsg.), Wiss. Fachverlag Dr. Fleck, Gießen, 139-145.
- FRIEDEL J. (1993): Einfluß von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf mikrobielle Eigenschaften im C- und N-Kreislauf von Ackerböden. *Hohenheimer Bodenkundliche Hefte* **11**.
- FRIEDEL J. K., MUNCH J. C. & FISCHER W. R. (1996): Soil microbial properties and the assessment of available soil organic matter in a haplic luvisol after several years of different cultivation and crop rotation. *Soil Biology & Biochemistry* **28**, 479-488.
- GALES K. (1983): Yield variation of wheat and barley in Britain in relation to crop growth and soil conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **34**, 1085-1104.
- GALLER J. (1993): Humusbilanz in Abhängigkeit von Düngung und Fruchtfolge. *Der Förderungsdienst* **11**, 328-332.
- GEHLEN P. & SCHRÖDER D. (1989): Bedeutung von pH-Wert, Corg-Gehalt, Kultur-, Substrat- und Jahreseinfluß für bodenmikrobiologische Eigenschaften in einheitlich genutzten Ackerböden. *VDLUFA-Schriftreihe* **30**, 467-472.
- GERSCHAU M.-B. (1995): Auswirkung von Standortbedingungen und Extensivierungsmaßnahmen auf die Regenwurmaktivität und abhängige bodenphysikalische Kenngrößen. Dissertation, Universität Göttingen.
- GERSCHAU M.-B., GROTHUES L. & CLAUPEIN W. (1992): Einfluß der Bewirtschaftungsintensität auf die Regenwurmaktivität in einem Lößboden. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* **5**, 217-220.
- GISI U. (1990): *Bodenökologie*. Thieme, Stuttgart.
- GLIEMEROTH G. & KÜBLER E. (1977): Ertragsaufbau von Winterweizen bei unterschiedlich aufgeteilten Stickstoffmengen in Abhängigkeit von dem N-Mineralisationsvermögen pseudovergleyter Parabraunerden. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* **144**, 165-186.
- GOH K. M. & HAYNES R. J. (1986): Nitrogen and agronomic practice. In: *Mineral nitrogen in the plant - soil system* (Haynes R. J., Hrsg.), Academic Press, Orlando, 379-468.
- GOLCHIN A., OADES J. M., SKJEMSTAD J. O. & CLARKE P. (1994): Studies of free and occluded particular organic matter in soils by solid state <sup>13</sup>C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *Australian Journal of Soil Research* **32**, 285-309.



- GRAFF O. (1953): Die Regenwürmer Deutschlands. Ein Bilderatlas für Bauern, Gärtner, Forstwirte und Bodenkundler. Schriftenreihe der FAL, Braunschweig, Völkenrode.
- GRAFF O. (1984): Unsere Regenwürmer. Lexikon für Freunde der Biologie. Schaper, Hannover.
- GRAYSTON S. J., WANG S., CAMPBELL C. D. & EDWARDS A. C. (1998): Selective influence of plant species on microbial diversity in the rhizosphere. *Soil Biology & Biochemistry* **30**, 369-378.
- GREILICH J. & KLIMANEK E.-A. (1976): Zum Einfluß unterschiedlicher Intensität der Bodenbearbeitung auf den O<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Gehalt der Bodenluft sowie auf einige bodenbiologische Kennwerte. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **20**, 177-186.
- GRIMM J. & CAESAR K. (1988): Der Einfluß langjähriger differenzierter Bewirtschaftungsmaßnahmen auf bodenmikrobiologische Eigenschaften eines lehmigen Sandbodens. *VDLUFA-Schriftenreihe* **28**, 909-920.
- GRÖBLINGHOFF F. F., HAIDER K. & BECK T. (1988): Einfluß unterschiedlicher Bodenbewirtschaftungssysteme auf biochemische Stoffumsetzungen. *VDLUFA-Schriftenreihe* **28**, 893-908.
- GROCHOLL J. (1991): Der Einfluß verschiedener Bodenbearbeitungssysteme auf den mikrobiologischen Status von Böden verschiedener Standorte unter besonderer Berücksichtigung der C-Umsetzung. Dissertation, Universität Gießen.
- GRÜNHAGE L., DÄMMGEN U. & JÄGER H.-J. (1988): Auswirkungen luftgetragener Stoffe auf Vegetation und Boden von Grünlandökosystemen . II. Die Konzentrationen ausgewählter Luftinhaltsstoffe in Südniedersachsen in den vergangenen zwei Jahrzehnten. *Landbauforschung Völkenrode* **38**, 196-210.
- GUCKERT A. (1992): Bedeutung der Pflanzenwurzeln und ihrer Ausscheidungen als Quelle organischer Stoffe im Boden. *Berichte über Landwirtschaft* **206** (Sonderheft), 97-113.
- GUPTA G. & GERMIDA J. J. (1988): Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biology & Biochemistry* **20**, 777-786.
- HAAN S. DE (1980): Einfluß von organischer Düngung auf das maximal erreichbare Ertragsniveau in langjährigen niederländischen Feldversuchen. *Landwirtschaftliche Forschung* **36** (Sonderheft); 389-404.
- HAIDER K. (1992): Biochemische Prozesse der Bildung und der Dynamik von Huminstoffen im Boden. *Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Berichte über Landwirtschaft* **206** (Sonderheft), 45-62).
- HAIDER K. & GRÖBLINGHOFF F.-F. (1990): Biochemische Umsetzungen und Humusbildung in Böden unterschiedlicher Bewirtschaftung. *Kali-Briefe (Büntehof)* **20**, 31-48.
- HAINES P. J. & UREN N. C. (1990): Effects of conservation tillage on soil microbial biomass, organic matter and earthworm populations, in north-eastern Victoria. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **30**, 365-371.

- HALLAM M. & BARTHOLOMEW W. V. (1953): Influence of rate of plant residue addition in accelerating the decomposition of soil organic matter. *Soil Science Society of America Proceedings* **17**, 365-368.
- HAMBÜCHEN W. A. (1990): Effekte anbautechnischer Maßnahmen auf Leistungsparameter einer dreifeldrigen Fruchtfolge mit Zuckerrübe und Winterweizen. Dissertation, Universität Bonn.
- HANUS H. (1975): Aktuelle Fragen der Stickstoffdüngung zu Getreide. Schriftenreihe der Agrarwissenschaftlichen Fakultät der Universität Kiel **54**, 28-39.
- HARDEN T., JOERGENSEN R. G., MEYER B. & WOLTERS V. (1993a): Soil microbial biomass estimated by fumigation-extraction and substrate induced respiration in two pesticide treated soils. *Soil Biology & Biochemistry* **25**, 679-683.
- HARDEN T., JOERGENSEN R. G., MEYER B. & WOLTERS V. (1993b): Mineralization of straw and formation of soil microbial biomass in a soil treated with simazine and dinoterb. *Soil Biology & Biochemistry* **25**, 1273-1276.
- HARRIS G. H., HESTERMAN O. B., PAUL E. A., PETERS S. E. & JANKE R. (1994): Fate of legume and fertilizer nitrogen-15 in a long-term cropping systems experiment. *Agronomy Journal* **86**, 910-915.
- HAUNZ F. X., MAIDL F.-X. & FISCHBECK G. (1992): Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf die Dynamik von Boden- und Düngerstickstoff unter Winterweizen. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **155**, 129-134.
- HAVLIN J. L., KISSEL D. E., MADDUX L. D., CLAASSEN M. M. & LONG J. H. (1990): Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Science Society of America Journal* **54**, 448-452.
- HAYNES R. J. & BEARE M. H. (1997): Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology & Biochemistry* **29**, 1647-1653.
- HEITFUSS R., BODENDÖRFER H. & PAESCHKE R.-R. (1977): Einzel- und Kombinationswirkungen von N-Formen, N-Mengen, CCC, Herbiziden und Fungiziden auf Unkraut, Pflanzenkrankheiten, Lager und Kornertrag von Weizen. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* **84**, 641-662.
- HELAL H. M. & SAUERBECK D. (1989): Carbon turnover in the rhizosphere. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **152**, 211-216.
- HELLING B. (1997): Einfluß der Regenwürmer auf die Stickstoff-Mineralisation und die bodenbiologische Aktivität landwirtschaftlich genutzter Flächen bei verschiedenen N-Düngern. Dissertation, Universität Braunschweig.
- HENDRIX P. F., HAN C. R. & GROFFMAN P. M. (1988): Soil respiration in conventional and no-tillage agroecosystems under different winter cover crop rotations. *Soil & Tillage Research* **12**, 135-148.
- HENKE W. (1987): Einfluß der Bodenbearbeitung auf die Regenwurmaktivität. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **55**, 885-889.

- HERZOG R. (1986): Auswirkungen langjährig differenzierter Grundbodenbearbeitung auf den Humus- und Nährstoffgehalt und den Durchdringungswiderstand eines anlehmigen Sandbodens bei Getreidedaueranbau. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **30**, 655-660.
- HEYLAND K.-U., WERNER A. & HEINEN-DEBRUS A. (1988): Einfluß der Anbautechnik von Kruziferen-Zwischenfrüchten auf die Population des Rübenzystenälchens *Heterodera schachtii* (Schmidt) sowie Ertrag und Qualität der Zuckerrübe. *Die Bodenkultur* **39**, 309-328.
- HOFFMANN C. & KOCH H.-J. (1998): Einfluß reduzierter Bodenbearbeitung auf Ertrag und N-Aufnahme von Weizen und Gerste bei unterschiedlicher N-Düngung. *Pflanzenbauwissenschaften* **2**, 69-75.
- HOFFMANN C., LINDÉN S. & KOCH H.-J. (1996): Influence of soil tillage on net N-mineralization under sugar beet. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **159**, 79-85.
- HOFMANN B., ERMICH D. & RÄBIGER H. (1990): Bodenbearbeitungsversuch Seehausen. In: Dauerfeldversuche: Übersicht, Entwicklung und Ergebnisse von Feldversuchen mit mehr als 20 Jahren Versuchsdauer (Autorenkollektiv unter Ltg. von Körschens M., Hrsg.), Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, Berlin, 2. Aufl., 195-203.
- HOPP H. (1957): Untersuchungen über die Braunfleckigkeit des Weizens und ihren Erreger *Septoria nodorum* Berk. (Syn. *Macrophoma hennebergii* Kühn). *Phytopathologische Zeitschrift* **29**, 395-412.
- HORN R. (1984): Die Vorhersage des Eindringwiderstands von Böden anhand von multiplen Regressionsanalysen. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* **25**, 377-380.
- IBRAHIM B. A. & MILLER D. E. (1989): Effect of subsoiling on yield and quality of corn and potatoe at two irrigation frequencies. *Soil Science Society of America Journal* **53**, 247-251.
- INSAM H., MITCHELL C. C. & DORMAAR J. F. (1991): Relationship of soil microbial biomass and activity with fertilization practice and crop yield of three ultisols. *Soil Biology & Biochemistry* **23**, 459-464.
- INSAM H., PARKINSON D. & DOMSCH K. H. (1989): Influence of macroclimate on soil microbial biomass. *Soil Biology & Biochemistry* **21**, 211-221.
- INUBUSHI K., BROOKES P. C. & JENKINSON D. S. (1991): Soil microbial biomass C, N and ninhydrin-N in aerobic and anaerobic soils measured by the fumigation-extraction method. *Soil Biology & Biochemistry* **24**, 737-741.
- JENKINSON D. S. (1966): Studies on the decomposition of plant material in soil. II. Partial sterilization of soil and the soil biomass. *Journal of Soil Science* **17**, 280-302.
- JENKINSON D. S. & POWLSON D. S. (1976): The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biology & Biochemistry* **8**, 209-213.

- JENSEN B. (1985): Interactions between soil invertebrates and straw in arable soil. *Pedobiologia* **28**, 59-69.
- JORDAN D., STECKER J. A., CACNIO-HUBBARD F., LI F., GANTZER C. J. & BROWN C. R. (1997): Earthworm activity in no-tillage and conventional tillage systems in Missouri soils: a preliminary study. *Soil Biology & Biochemistry* **29**, 489-491
- JÖRGENSEN R. G. (1995): Die quantitative Bestimmung der mikrobiellen Biomasse in Böden mit der Chloroform-Fumigations-Extraktions-Methode. *Göttinger Bodenkundliche Berichte* **104**, 1-229.
- JÖRGENSEN R. G., BROOKES P. C. & JENKINSON D. S. (1989): Some relationships between microbial ATP and soil microbial biomass, measured by the fumigation-extraction procedure, and soil organic matter. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **59**, 585-588.
- JÖRGENSEN R. G., BROOKES P. C. & JENKINSON D. S. (1990): Survival of the soil microbial biomass at elevated temperatures. *Soil Biology & Biochemistry* **22**, 1129-1136.
- JOSCHKO M., DIESTEL H. & LARINK O. (1989): Assessment of earthworm burrowing efficiency in compacted soil with a combination of morphological and soil physical measurements. *Biology & Fertility of Soils* **8**, 191-196.
- JUSTUS M. & KÖPKE U. (1990): Drei Strategien zur Reduzierung von Nitratverlusten beim Anbau von Ackerbohnen. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* **3**, 187-190.
- JUSTUS M. & KÖPKE U. (1991): Ackerbohnen: Anbauverfahren zur Reduzierung von Nitratverlusten und Steigerung der Vorfruchtwirkung. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* **4**, 331-334.
- KAISER E.-A. (1992): Auswirkungen von Bodenverdichtung durch landwirtschaftliche Bodennutzung auf die mikrobielle Biomasse. Dissertation, Universität Göttingen. *Landbauforschung Völkenrode* **134** (Sonderheft), 1-120.
- KAISER E.-A. & HEINEMEYER O. (1993): Seasonal variations of soil microbial biomass carbon within the plough layer. *Soil Biology & Biochemistry* **25**, 1649-1656.
- KÄMPF R. (1983): Grenzen der Intensivierung im Ackerbau. *Bayerisches landwirtschaftliches Jahrbuch* **5**, 939-945.
- KANDELER E. & BÖHM K. E. (1996): Temporal dynamics of microbial biomass, xylanase activity, N-mineralisation and potential nitrification in different tillage systems. *Applied Soil Ecology* **4**, 181-191.
- KAUDER R. (1984): Einfluß unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung bei differenzierter Stickstoffdüngung, Beregnung und Humusversorgung auf Ernteertrag und bodenphysikalische Eigenschaften eines sandigen Lehmstandortes. Dissertation, Universität Halle.
- KELLER E. R. (1980): Der Boden als Grundlage für die Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln - Erhaltung seiner Ertragsfähigkeit auf lange Sicht. *Schweizerische landwirtschaftliche Forschung* **19**, 209-222.

- KELLER E. R., HANUS H. & HEYLAND K.-U. (1997): Grundlagen der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion. In: Handbuch des Pflanzenbaues, Band 1 (Hanus H., Hrsg.), Ulmer, Stuttgart.
- KELLEY J. D. & ULRICH A. (1966): Distribution of nitrate nitrogen in the blades and petioles of sugar beets grown at deficient and sufficient levels of nitrogen. *Journal of the American Society of Sugar Beet Technologists* **14**, 106-116.
- KICK H. & POLETSCHNY H. (1974): Erfahrungen mit langjähriger kontinuierlicher Strohdüngung. *Landwirtschaftliche Forschung* **27** (Sonderheft), 146-152.
- KILLHAM K., SINCLAIR A. H. & ALLISON M. F. (1988): Effect of straw addition on composition and activity of soil microbial biomass. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* **94b**, 135-143.
- KLADIVKO E. J., MACKAY A. D. & BRADFORD J. M. (1986): Earthworms as a factor in the reduction of soil crusting. *Soil Science Society of America Journal* **50**, 191-196.
- KLAGHOFER E. & EITZINGER J. (1990): Einfluß unterschiedlicher Primärbodenbearbeitungssysteme auf Eindringwiderstand und Infiltration. *Landtechnik* **45**, 231-233.
- KLAPP E. (1967): Lehrbuch des Acker- und Pflanzenbaues. Parey, Berlin & Hamburg.
- KLIMANEK E.-M. (1990): Umsetzungsverhalten von Ernterückständen. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **34**, 559-567.
- KLOEPFER F. (1990): Zur Frage der Anpassung der Stickstoffdüngung an den Bedarf der Zuckerrüben insbesondere unter Berücksichtigung von Gülle. Dissertation, Universität Bonn.
- KNICKMANN E. (1955): Die Untersuchung von Böden. In: Handbuch der landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (Herrmann R., Hrsg.), Bd. 1, .
- KNITTEL H. (1975): Auswirkungen der Minimalbestelltechnik auf physikalische Bodeneigenschaften. Dissertation, Universität Weihenstephan.
- KNITTEL H. & STANZEL H. (1976): Untersuchungen des Bodengefüges mit Penetrometer und Rammsonde. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* **142**, 181-193.
- KNÜSTING E. (1992): Regenwürmer auf Ackerflächen mit abgestufter Bewirtschaftungsintensität. Dissertation, Universität Braunschweig.
- KNÜSTING E., BARTELS G. & BÜCHS W. (1991): Untersuchungen zu Artspektrum, fruchtartspezifischer Abundanz und Abundanzdynamik von Regenwürmern bei unterschiedlich hohen landwirtschaftlichen Produktionsintensitäten. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie* **20**, 21-27.
- KÖRSCHENS M. (1978): Der Einfluß unterschiedlicher organischer und mineralischer Düngung auf C<sub>t</sub>- und N<sub>t</sub>-Gehalt von Schwarzerde. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **22**, 175-183.
- KÖRSCHENS M. (1982): Untersuchungen zur zeitlichen Variabilität der Prüfmerkmale C<sub>t</sub> und N<sub>t</sub> auf Löß-Schwarzerde. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **26**, 9-13.

- KÖRSCHENS M. (1989): Humusgehalt, Humusbilanz, N-Nachlieferung. *Feldwirtschaft* **30**, 368-369.
- KÖRSCHENS M. (1997): Abhängigkeit der organischen Bodensubstanz (OBS) von Standort und Bewirtschaftung sowie ihr Einfluß auf Ertrag und Bodeneigenschaften. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **41**, 435-463.
- KÖRSCHENS M. & SPITZEL M. (1978): Methodische Untersuchungen zur Bestimmung des C<sub>t</sub>- und N<sub>t</sub>-Gehaltes im Boden. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **22**, 705-711.
- KÖRSCHENS M. & SPITZEL M. (1978): Methodische Untersuchungen zur Bestimmung des C<sub>t</sub>- und N<sub>t</sub>-Gehaltes im Boden. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **22**, 705-711.
- KÖRSCHENS M. & WEBER C. (1984): Einfluß von Luzerne auf die N-Ausnutzung und den C<sub>t</sub>- und N<sub>t</sub>-Gehalt von Schwarzerde. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **28**, 271-278.
- KOWALENKO C. G., IVARSON K. C. & CAMERON D. R. (1978): Effect of moisture content, temperature and nitrogen fertilization on carbon dioxide evolution from fields. *Soil Biology & Biochemistry* **10**, 417-423.
- KRÖCKEL L. & STOLP H. (1986): Influence of the water regime on denitrification and aerobic respiration in soil. *Biology & Fertility of Soils* **2**, 15-21.
- KRÜCK S. (1999): Einfluß der Nutzung auf Bodenfruchtbarkeitsparameter, Humushaushalt und Regenwurmaktivität, und deren Beziehung zur Ertragsfähigkeit sandiger Böden in Brandenburg. Dissertation, Humboldt-Universität Berlin.
- KUHLMANN J., SPRINGER B. & HEITEFUSS R. (1990): Ertragsbildung und Mehлтаubefall von Winterweizen in Abhängigkeit von Stickstoffdüngung, Herbiziden, Fungiziden und Sorten. In: Integrierte Pflanzenproduktion - Bericht zum Schwerpunktprogramm "Entwicklung eines integrierten Systems der Pflanzenproduktion unter Beachtung ökonomischer und ökologischer Aspekte des Pflanzenschutzes im Weizen" (Heitefuss R., Hrsg.), VCH Verlagsgesellschaft Weinheim, 72-75.
- KULAGE E. (1992): Einfluß von Fruchtfolge und Pflanzenschutz auf die Regenwurmpopulation im Ackerbau-Systemversuch Reinshof. Diplomarbeit, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität Göttingen.
- KUNDLER P. (1982): Die wichtigsten Aussagen der Dauerversuche zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit. Tagungsbericht der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften **205**, 5-16.
- KUNDLER P. (1986): Ursachen der Ertragsvariation und Maßnahmekombinationen für hohe Erträge. Symposium "Die Methoden für die Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit", Pulawy.
- KUNDLER P. (1989): Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit. 1 Auflage, VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.
- KUNDLER P. & DRECHSLER S. (1983): Ergebnisse und Erfahrungen bei der Anwendung komplexer Verfahren zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit. *Feldwirtschaft* **24**, 3-5.

- KUTSCH L. (1994): Untersuchungen zur Bodenatmung zweier Ackerstandorte im Bereich der Bornhöveder Seenkette. Dissertation, Universität Kiel.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER HANNOVER (1997): Empfehlungen für die Grunddüngung mit Kalk, Phosphor, Kalium, Magnesium und Spurenelementen aufgrund von Bodenuntersuchungsergebnissen 1997.
- LANGMAACK M., RÖHRIG R. & SCHRADER S. (1996): Einfluß der Bodenbearbeitung und Bodenverdichtung auf terrestrische Oligochaeten (Enchytraeidae und Lumbricidae) landwirtschaftlicher Flächen. Braunschweiger naturkundliche Schriften **5**, 105-123.
- LARNEY F. J., BREMER E., JANZEN H. H., JOHNSTON A. M. & LINDWALL C. W. (1997): Changes in total, mineralizable and light fraction soil organic matter with cropping and tillage intensities in semiarid southern Alberta, Canada. *Soil & Tillage Research* **42**, 229-240.
- LEE K. E. (1985): Earthworms - their ecology and relationships with soil and land use. Academic Press, Australia.
- LEITHOLD G. (1984): Untersuchung der Beziehung zwischen acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen, Ertrag und Humusreproduktion sowie Erarbeitung einer Methode zur Berechnung des Bedarfs des Bodens an organischer Primärschubstanz. Dissertation, Universität Halle.
- LIEBHARDT W. C., ANDREWS R. W., CULIK M. N., HARWOOD R. R., JANKE R. R., RADKE J. K. & RIEGER-SCHWARTZ S. L. (1989): Crop production during conversion from conventional to low-input methods. *Agronomy Journal* **81**, 150-159.
- LIEBHARD P. & CLAUPEIN W. (1996): Einfluß unterschiedlicher Primärbodenbearbeitung auf ausgewählte Bodenparameter im semihumiden Klimaraum Österreichs. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* **9**, 271-272.
- LIEBHARD P., EITZINGER J. & KLAGHOFER E. (1995): Einfluß der Primärbodenbearbeitung auf Aggregatstabilität und Eindringwiderstand im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 5). *Die Bodenkultur* **46**, 1-18.
- LOFS-HOLMIN A. (1983): Earthworm population dynamics in different agricultural rotations. In: *Earthworm Ecology - From Darwin to Vermiculture* (Satchell J. E., Hrsg.), Chapman and Hall, 151-160.
- LOLL M. J. & BOLLAG J. M. (1983): Protein transformation in soil. *Advances in Agronomy* **36**, 351-382.
- LOWERY B. & SCHULER R. T. (1994): Duration and effects of compaction on soil and plant growth in Wisconsin. *Soil & Tillage Research* **29**, 205-210.
- LÜTZOW M. v. (1993): Jahreszeitliche Fluktuation der mikrobiellen Biomasse und ihres Stickstoff-Gehaltes in konventionell und biologisch-dynamisch bewirtschafteten Parabraunerden der Friedberger Wetterau. Dissertation Universität Gießen.
- Lynch J. M. & Panting L. M. (1980a): Cultivation and the soil biomass. *Soil Biology & Biochemistry* **12**, 29-33.
- LYNCH J. M. & PANTING L. M. (1980b): Variations in the size of the soil biomass. *Soil Biology & Biochemistry* **12**, 547-550.

- MAGDOFF F., LANYON L. & LIEBHARDT B. (1997): Nutrient cycling, transformations, and flows: implications for a more sustainable agriculture. *Advances in Agronomy* **60**, 2-66.
- MÄHNER K.-T. (1998): Mündliche Mitteilung. Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität Göttingen.
- MAKESCHIN F. (1990): Die Regenwurmfauna forstlich und landwirtschaftlich genutzter Böden und deren Beeinflussung durch Düngung. *Kali-Briefe (Büntehof)* **20**, 49-63.
- MANZKE F. (1995): Bodenmikrobiologische und bodenchemische Kenngrößen zur Beurteilung des Umsatzes organischer Bodensubstanz in unterschiedlichen Bodennutzungssystemen. Dissertation, Universität Göttingen.
- MARINISSEN J. C. Y. (1994): Earthworm populations and stability of soil structure in a silt loam soil of a recently reclaimed polder in the Netherlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **51**, 75-87.
- MÄRLÄNDER B. (1978): Wirkung reduzierter Grundbodenbearbeitung auf die Ertragsbildung von Zuckerrüben. Dissertation, Universität Göttingen.
- MÄRLÄNDER B. (1991): Zuckerrüben - Produktionssteigerung bei Zuckerrüben als Ergebnis der Optimierung von Anbauverfahren und Sortenwahl sowie durch Züchtungsfortschritt. U. Bernhardt-Pätzold Verlag, Stadthagen.
- MARTENS R. (1995): Current methods for measuring microbial biomass C in soil: Potentials and limitations. *Biology & Fertility of Soils* **19**, 87-99.
- MCCOLL H. P., HART P. B. S. & COOK F. J. (1982): Influence of earthworms on some chemical and physical properties, and the growth of ryegrass on soil after topsoil stripping - a pot experiment. *New Zealand Journal of Agricultural Research* **25**, 229-237.
- MCGILL W. B., CANNON K. R., ROBERTSON J. A. & COOK F. D. (1986): Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton L after 50 years of cropping to two rotations. *Canadian Journal of Soil Science* **66**, 1-19.
- MEYER K., JOERGENSEN R. G. & MEYER B. (1996): The effects of reduced tillage on microbial biomass C and P in sandy loess soils. *Applied Soil Ecology* **5**, 71- 79.
- MICHEL D. (1991): Leistungen von Luzerne und Klee gras im Mitteldeutschen Agrarraum zur Verbesserung der Humus- und Stickstoffbilanz in der Fruchtfolge bei Erhöhung der Ertragsfähigkeit des Bodens. In: *Stoffkreisläufe - Grundlagen umweltgerechter Landbewirtschaftung* (Leithold G., Hrsg.), *Wissenschaftliche Beiträge der Universität Halle 1991/22*, 41-51.
- MORSTEIN K.-H. & WERNER D. (1984): Ackerbauliche, technische und technologische Lösungen zur nachhaltigen Melioration von verdichteten krumennahen Unterböden auf D-, Lö- und V-Standorten. F/E-Bericht Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR.



- MUELLER T., JENSEN L. S., NIELSEN N. E. & MAGID J. (1998): Turnover of carbon and nitrogen in a sandy loam soil following incorporation of chopped maize plants, barley straw and blue grass in the field. *Soil Biology & Biochemistry* **30**, 561- 571.
- MUELLER T., JOERGENSEN R. G. & MEYER B. (1992): Estimation of soil microbial biomass C in the presence of fresh roots by fumigation-extraction. *Soil Biology & Biochemistry* **24**, 179-181.
- NANIPIERI P., JOHNSON R. L. & PAUL E. A. (1978): Criteria for measurement of microbial growth and activity in soil. *Soil Biology & Biochemistry* **10**, 223-229.
- NEETESON J. J. & VAN VEEN J. A. (1987): Mechanistic and practical modelling of nitrogen mineralization-immobilization in soils. In: *Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems* (Wilson J. R., Hrsg.), Proc. of the Symp. in Brisbane, Australia, 145-155.
- NUUTINEN V. (1992): Earthworm community response to tillage and residue management on different soil types in southern Finland. *Soil & Tillage Research* **23**, 221-239.
- OCIO J. A. & BROOKES P. C. (1990): An evaluation of methods for measuring the microbial biomass in soils following recent additions of wheat straw and the characterization of the biomass that develops. *Soil Biology & Biochemistry* **22**, 685-694.
- OCIO J. A., BROOKES P. C. & JENKINSON D. S. (1991): Field incorporation of straw and its effects on soil microbial biomass and soil inorganic N. *Soil Biology & Biochemistry* **23**, 171-176.
- ORCHARD V. A. & COOK F. J. (1983): Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology & Biochemistry* **15**, 447-454.
- OUSSIBLE M., CROOKSTON R. K. & LARSON W. E. (1992): Subsurface compaction reduces root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agronomy Journal* **84**, 34-38.
- PARKINSON K. J. (1981): An improved method for measuring soil respiration in the field. *Journal of Applied Ecology* **18**, 221-228.
- PAWLAK J. A. (1985): Wirkung der organischen Düngung (Stroh-Gründüngung und Rübenblattdüngung) auf Pflanzenertrag und Bodenproduktivität. Dissertation, Universität Gießen.
- PETERS D. (1984): Faunistische und ökologische Untersuchung der Lumbriciden, Diplopoden und Chilopoden auf verschieden bewirtschafteten Flächen der Niederrheinischen Tiefebene. Dissertation, Universität Bonn.
- PITKÄNEN J. & NUUTINEN V. (1997): Distribution and abundance of burrows formed by *Lumbricus terrestris* L. and *Aporrectodea calliginosa* Sav. in the soil profile. *Soil Biology & Biochemistry* **29**, 463-467.
- PIZL V. (1992): Effect of soil compaction on earthworms (*Lumbricidae*) in apple orchard soil. *Soil Biology & Biochemistry* **24**, 1573-1575.
- PLATTE H. (1996): Über den Einfluß der mikrobiellen Biomasse eines Auenbodens während und nach mehrjähriger Grünbrache auf die N-Versorgung der Feldfrüchte. Dissertation, Universität Göttingen.

- Power J. F. (1990): Great plains soil fertility Conference. Kansas State University, Manhattan.
- POWLSON D. S., BROOKES P. C. & CHRISTENSEN B. T. (1987): Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology & Biochemistry* **19**, 159-164.
- POWLSON D. S. & JENKINSON D. S. (1981): A comparison of the organic matter, biomass, adenosin triphosphate and mineralizable nitrogen contents of ploughed and direct-drilled soils. *Journal of Agriculture Science* **97**, 713-721.
- PRZEMECK E., WINKELMANN K. H. & TIMMERMANN F. (1975): Veränderungen des Nitratgehaltes im Profil eines Lößlehmstandortes während des Winterhalbjahres 1974/75 nach unterschiedlicher mineralischer und organischer Düngung. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **22**, 301-310.
- RASMUSSEN P. & COLLINS H. P. (1991): Long-term impacts of tillage, fertilizer, and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. *Advances in Agronomy* **45**, 93-134.
- RASMUSSEN P. & ROHDE C. (1988): Long-term tillage and nitrogen fertilization effects on organic nitrogen and carbon in a semiarid soil. *Soil Science Society of America Journal* **52**, 1114-1117.
- RAUHE K. (1969): Der Einfluß des Futterbaus sowie der organischen und mineralischen Düngung auf C- und N-Gehalt des Bodens im Fruchtfolgeversuch Seehausen. *Albrecht-Thaer-Archiv* **13**, 455-462.
- RAUHE K. (1969): Humusersatzwirtschaft unter besonderer Berücksichtigung der Düngung und des Ackerflächenverhältnisses. *Albrecht-Thaer-Archiv* **9**, 349-364.
- RAUHE K., LEITHOLD G. & MICHEL D. (1987): Untersuchungen zur Ertrags- und Humusreproduktionsleistung der Luzerne auf sandigem Lehmboden in Trockenlagen. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **31**, 695- 702.
- RAW F. (1959): Estimating earthworm populations by using formalin. *Nature* **184**, 1661-1662.
- REDDY G. B. & FAZA A. (1989): Dehydrogenase activity in sludge amended soil. *Soil Biology & Biochemistry* **21**, 327.
- REICHEL T. H. (1990): Dauerversuche auf Berglehm-Braunerde im Erzgebirge. In: *Dauerfeldversuche: Übersicht, Entwicklung und Ergebnisse von Feldversuchen mit mehr als 20 Jahren Versuchsdauer (Autorenkollektiv unter Ltg. von Körschens M., Hrsg.)*, Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, Berlin, 2. Aufl., 275-318.
- RITZ K., GRIFFITHS B. S. & WHEATLEY R. E. (1992): Soil microbial and activity under a potato crop fertilised with N with and without C. *Soil Biology & Biochemistry* **12**, 265-271.
- ROBERTSON K., SCHNÜRER J., CLARHOLM M., BONDE T. A. & ROSSWALL T. (1988): Microbial biomass in relation to C and N mineralization during laboratory incubations. *Soil Biology & Biochemistry* **20**, 281-286.

- ROCHETTE P., DESJARDINS R. L. & PATTEY E. (1991): Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields. *Canadian Journal of Soil Science* **71**, 189-196.
- RODRIGUEZ-KABANA R. (1982a): The effects of crop rotation and fertilization on catalase activity in a soil of the southeastern United States. *Plant and Soil* **64**, 97-104.
- RODRIGUEZ-KABANA R. (1982b): The effects of crop rotation and fertilization on soil xylanase activity in a soil of the southeastern United States. *Plant and Soil* **64**, 237-247.
- ROGASIK J. (1990): Beziehungen zwischen Faktoren der Bodenfruchtbarkeit und Pflanzen-ertrag auf Ackerland. Dissertation, Universität Berlin.
- ROSS D. J. (1970): Effects of storage on dehydrogenase activity of soils. *Soil Biology & Biochemistry* **2**, 55-61.
- ROSS D. J. (1989): Estimation of soil microbial C by a fumigation-extraction procedure: influence of moisture content. *Soil Biology & Biochemistry* **21**, 767-772.
- ROTT A. (1992): Entwicklung der endogäischen Fauna bei extensiver Grünlandnutzung. *LÖLF-Mitteilung* **3**, 36-37.
- RUSHTON S. P. (1986): The effects of soil compaction on *Lumbricus terrestris* and its possible implications for populations on land reclaimed from open-cast coal mining. *Pedobiologia* **29**, 85-90.
- SAFFIGNA P. G., POWLSON D. S., BROOKES P. C. & THOMAS G. A. (1989): Influence of sorghum residues and tillage on soil organic matter and soil microbial biomass in an Australian vertisol. *Soil Biology & Biochemistry* **21**, 759-765.
- SAS-INSTITUTE INC. (1989): Statistical analysis system, Release 6.08. Cary, NC USA.
- SAUERBECK D. (1981): Einfluß der Humusversorgung und Düngung auf Bodenleben und Bodenstruktur. *Landwirtschaftliche Forschung* **37** (Sonderheft), 146-156.
- SAUERBECK D. (1992): Funktionen und Bedeutung der organischen Substanzen für die Bodenfruchtbarkeit - ein Überblick. *Berichte über Landwirtschaft (Sonderheft)* **206**, 13-29.
- SAUERBECK D. & JOHNEN B. (1974): Radiometrische Untersuchungen zur Humusbilanz. *Landwirtschaftliche Forschung* **30**, 137-144.
- SAUERBECK D. & JOHNEN B. (1976): Der Umsatz von Pflanzenwurzeln im Laufe der Vegetationsperiode und dessen Beiträge zur „Bodenatmung“. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **3**, 315-328.
- SAUERBECK D., JOHNEN B. & SIX R. (1976): Atmung, Abbau und Ausscheidungen von Weizenwurzeln im Laufe ihrer Entwicklung. *Landwirtschaftliche Forschung* **32**, 49-58.
- SCHEFFER F. & SCHACHTSCHABEL P. (1992): Lehrbuch der Bodenkunde, 13. Auflage. Enke, Stuttgart.
- SCHERER H. W. & MENGEL K. (1983): Umsatz von <sup>15</sup>N markiertem Nitratstickstoff im Boden in Abhängigkeit von Strohdüngung und Bodenfeuchte. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **146**, 109-117.

- SCHINNER F., ÖHLINGER R. & KANDELER E. (1991): Bodenbiologische Arbeitsmethoden. Springer, Berlin.
- SCHINNER F. & SONNLEITNER R. (1996): Bodenökologie: Mikrobiologie und Bodenzymatik. II. Bodenbewirtschaftung, Düngung und Rekultivierung. Springer, Berlin.
- SCHMEER H. W. & MENGEL K. (1984): Der Einfluß der Strohdüngung auf die Nitratgehalte im Boden im Verlaufe der Wintermonate. *Landwirtschaftliche Forschung* **37**, 214-229.
- SCHNIEDER E. (1984): Untersuchungen über den Einfluß unterschiedlicher Humusgehalte auf den Pflanzenertrag eines Sandbodens. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **28**, 59-66.
- SCHNIEDER E. (1986): Einfluß der Strohdüngung und der Fruchtfolge auf den Ertrag und die Humusdynamik im Dauerversuch auf der Tieflehm-Fahlerde in Thyrow. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **30**, 705-711.
- SCHNÜRER J., CLARHOLM M. & ROSSWALL T. (1985): Mikrobiell biomass and activity in an agricultural soil with different organic matter contents. *Soil Biology & Biochemistry* **17**, 611-618.
- SCHREY H. P. (1991): Die Interpretation des Eindringwiderstands zur flächenhaften Darstellung physikalischer Unterschiede in Böden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **154**, 33-39.
- SCHRÖDER D. & URBAN B. (1985): Bodenatmung, Celluloseabbau und Dehydrogenaseaktivität in verschiedenen Böden und ihre Beziehungen zur organischen Substanz sowie Bodeneigenschaften. *Landwirtschaftliche Forschung* **38**, 166-172.
- SCHULTEN H.-R., HEMPFLING R., HAIDER K., GRÖBLINGHOFF F. F., LÜDEMANN H.-D. & FRÜND R. (1990): Characterization of cultivation effects on soil organic matter. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **153**, 97-105.
- SCHULTZ W. (1952): Ergebnisse vergleichender Lagerungsversuche an Erd- und Stappelmisten. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **57**, 244-261.
- SEEVERS A.-E. (1986): Nichtwendende Bodenlockerung mit dem Parapflug im Vergleich zu konventioneller und reduzierter Bearbeitung: Wirkung auf Humusgehalt, Enzymaktivität und Aggregatstabilität. Diplomarbeit, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität Göttingen.
- SHAPIRO S. S. & WILK M. B. (1965): An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* **52**, 591-611.
- SIMS R. W. & GERARD B. M. (1985): Earthworms. The Linnean Society of London.
- SINGH P., KANWAR R. S. & THOMPSON M. L. (1991): Macropore characterization for two tillage systems using resin-impregnation technique. *Soil Science Society of America Journal* **55**, 1674-1679.
- SKJEMSTAD J. O., DALAL R. C. & BARRON P. F. (1986): Spectroscopic investigations of cultivation on organic matter of vertisols. *Soil Science Society of America Journal* **50**, 354-359.

- SÖCHTING W. & LARINK O. (1992): Effect of soil compaction on activity and biomass of endogeic lumbricids in arable soils. *Soil Biology & Biochemistry* **24**, 1595-1599.
- SÖCHTING W. & LARINK O. (1992): Effect of soil compaction on activity and biomass of endogeic Lumbricids in arable Soils. *Soil Biology & Biochemistry* **24**, 1595- 1599.
- SPARLING G. P. (1985): The soil biomass. In: *Soil organic matter and biological activity* (Vaughan D. & Malcolm R. E. Hrsg.), 223-247.
- SPARLING G. P. (1992): Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Australian Journal of Soil Research* **30**, 195-207.
- SRU (Rat von Sachverständigen für Umweltfragen) (1996): *Umweltgutachten 1996. Zur Umsetzung einer dauerhaften umweltgerechten Entwicklung*. Metzler-Poeschel Verlag, Stuttgart.
- STEINBRENNER K. & SMUKALSKI M. (1984): Einfluß von Anbaustruktur und Fruchtfolge auf einige Bodeneigenschaften, dargestellt an Ergebnissen des Internationalen Fruchtfolgeversuches Dewitz. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* **28**, 611-616.
- STOCK H.-G., SPECHT M. & DIEPENBROCK W. (1995): Wirkungen eines differenzierten Stickstoffangebotes im Dauerversuch auf Ertrag und Qualität, Bodennitratgehalte und optimale spezielle Intensität bei Winterweizen (*Triticum aestivum* L.). *Kühn-Archiv* **89**, 195-204.
- STOCKFISCH N. (1992): Bestimmung des ATP-Gehaltes von Auflagehorizonten (Waldböden) und Vergleich mit Methoden zur Biomassebestimmung. Diplomarbeit, Isotopenlaboratorium für biologische und medizinische Forschung, Universität Göttingen.
- STOCKFISCH N. (1997): Strohabbau durch Mikroorganismen und Regenwürmer in zwei Bodenbearbeitungssystemen. Dissertation, Universität Göttingen.
- STOCKFISCH N., EHLERS W. & EBERHARDT U. (1995): Einfluß reduzierter Bodenbearbeitung auf biologische und chemische Kennwerte in verschiedenen Tiefen einer Löß-Parabraunerde. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **76**, 697-700.
- SUTTNER T. & ALEF K. (1988): Correlation between arginine ammonifikation, enzyme activities, microbial biomass, physical and chemical properties of different soils. *Zentralblatt für Mikrobiologie* **143**, 569-573.
- SYERS J. K. & SPRINGETT J. A. (1984): Earthworms and soil fertility. *Plant and Soil* **76**, 93-104.
- TABATABAI M. A. (1982): Soil enzymes. In: *Methods of Soil Analysis, Part 2* (Page A. L., Miller R. H. & Keeney D. R., Hrsg.), American Society of Agronomy 903.
- TAMM E. & KRZYSCH G. (1964): Veränderungen der chemischen und biologischen Bodeneigenschaften im Profil eines lehmigen Sandbodens durch langjährig differenzierte Bodenbearbeitungs- und Düngungsmaßnahmen. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* **121**, 1-28.

- TASSIOPOULOS D. (1977): Ertragsbildung, Nährstoffbilanz und Faktoren der Bodenfruchtbarkeit in einem langjährigen Erschöpfungsversuch in Gießen. Dissertation, Universität Gießen.
- TEIWES K. (1997): Auswirkungen von Extensivierungsmaßnahmen auf Bodenleben und Bodengefüge. In: Ökologische und ökonomische Auswirkungen von Extensivierungsmaßnahmen im Ackerbau (Gerowitt B. & Wildenhayn M., Hrsg.).
- THALMANN A. (1968): Zur Methodik der Bestimmung der Dehydrogenaseaktivität im Boden mittels Triphenyltetrazoliumchlorid (TTC). *Landwirtschaftliche Forschung* **21**, 249-258.
- TIWARI S. C., TIWARI B. K. & MISHRA R. R. (1989): Microbial populations, enzyme activities and nitrogen-phosphorous-potassium enrichment in earthworm casts and the surrounding soil of a pineapple plantation. *Biology & Fertility of Soils* **8**, 178-182.
- VANCE E. D., BROOKES P. C. & JENKINSON D. S. (1987): An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology & Biochemistry* **19**, 703-707.
- VETTER H. & LICHTENSTEIN H. (1968): Die biologische Auflockerung von Unterbodenverdichtungen. *Landwirtschaftliche Forschung* **22** (Sonderheft), 85-88.
- WACHENDORF C. (1996): Eigenschaften und Dynamik der organischen Bodensubstanz ausgewählter Böden unterschiedlicher Nutzung einer norddeutschen Moränenlandschaft. Dissertation, Universität Kiel.
- WALOSZCZYK K. (1991): Ergebnisse zur Ertragsbildung bei ökologisch orientierten Winterweizenanbau auf Lößschwarzerdeböden in trockenen Lagen. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* **166**, 238-248.
- WEIß B. (1994): Einfluß von Regenwürmern auf ausgewählte Enzymaktivitäten und den Stickstoff-Haushalt in landwirtschaftlich genutzten Böden. Dissertation, Universität Braunschweig.
- WEISSKOPF P. (1986): Erhaltung der Ertragsfähigkeit des Bodens auf lange Sicht unter dem Einfluß von Fruchtfolge, Düngung und Herbizideinsatz. III. Vergleich verschiedener humuschemischer und bodenbiologischer Parameter sowie Beeinflussung von Qualitätsmerkmalen der Vergleichskulturen Winterweizen nach zehn Versuchsjahren. Dissertation, ETH Zürich.
- WELLMANN W.-H. (1991): Einfluß von Bodenbearbeitung und Fruchtfolge auf das Vorkommen und die Abundanz von Regenwurmarten. Diplomarbeit, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Universität Göttingen.
- WERNER D. (1995): Mündliche Mitteilung. Thüringische Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena.

- WERNER D. & LEHFELDT J. (1985): Grundlagen und Prinziplösung zur rationellen und ertragswirksamen Beseitigung krumennaher Verdichtungszone. F/E-Bericht Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR.
- WESTERNACHER E. & GRAFF O. (1987): Orientation behaviour of earthworms (*Lumbricidae*) towards different crops. *Biology & Fertility of Soils* **3**, 131-133.
- WESTERNACHER-DOTZLER E. (1988): Abundanz von Regenwürmern (*Lumbricidae*, *Oligochaeta*) unter verschiedenen Kulturpflanzen. Dissertation, Universität Gießen.
- WICKE H.-J., MICHEL D., LEITHOLD G. & MATTHIES H. (1990): Fruchtfolgedüngungsversuch Seehausen. In: Dauerfeldversuche: Übersicht, Entwicklung und Ergebnisse von Feldversuchen mit mehr als 20 Jahren Versuchsdauer (Autorenkollektiv unter Ltg. von Körschens M., Hrsg.), Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, Berlin, 2. Aufl., 139-154.
- WIDMER P. (1993): Zeitliche und räumliche Variabilität der mikrobiellen Biomasse in niedersächsischen Böden. Dissertation, Universität Hannover.
- WILCKE D. E. (1953): Über die vertikale Verteilung der Lumbriciden im Boden. *Zeitschrift für Morphologie und Ökologie der Tiere* **41**, 372-385.
- WILDENHAYN M. (1990): Auswirkungen der Extensivierung auf Pflanzenkrankheiten und Erträge verschiedener Feldfrüchte im Ackerbausystemversuch Reinshof. Dissertation, Universität Göttingen.
- WILDUNG R. E., GARLAND T. R. & BUSCHBOM R. L. (1975): The interdependent effects of soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils. *Soil Biology & Biochemistry* **7**, 373-378.
- WILKE D. E. (1962): Untersuchungen über die Einwirkung von Stallmist und Mineraldüngung auf den Besatz und die Leistungen der Regenwürmer im Ackerboden. Monographie zur angewandten Entomologie **18**, 121-167.
- WILLOUGHBY G. L., KLADIVKO E. J. & SAVABI M. R. (1997): Seasonal variations in infiltration rate under no-till and conventional (disk) tillage systems as affected by *Lumbricus terrestris* activity. *Soil Biology & Biochemistry* **29**, 481-484.
- WILSON J. M. & GRIFFIN D. M. (1975): Water potential and respiration of microorganisms in the soil. *Soil Biology & Biochemistry* **7**, 269-274.
- WINNER C. (1979): Neue Wege zur standortspezifischen Stickstoffdüngung. Die Zuckerrübe **28**, 17-18.
- WINTER K. (1998): Räumliche und zeitliche Variabilität der mikrobiellen Biomasse und ihrer Aktivität in einer heterogenen Agrarlandschaft. Dissertation, Universität München.
- WITKAMP M. & FRANK M. L. (1969): Evolution of CO<sub>2</sub> from litter, humus, and subsoil of a pine stand. *Pedobiologia* **9**, 358-365.
- WOLFF-STRAUB R. (1970): Überblick über den Mikrobenbesatz verschiedener Bodentypen. *Zentralblatt für Bakteriologie* **124**, 263-270.

- WOOD C. W., WESTFALL D. G. & PETERSON G. A. (1991): Soil carbon and nitrogen changes on initiation of no-till cropping systems. *Soil Science Society of America Journal* **55**, 470-476.
- WU J., JOERGENSEN R. G., POMMERENING B., CHAUSSOD R. & BROOKES P. C. (1990): Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction - an automated procedure. *Soil Biology & Biochemistry* **22**, 1167-1169.
- ZICSI A. (1958): Einfluß von Trockenheit und Bodenbearbeitung auf das Leben der Regenwürmer in Ackerböden. *Acta Agronomica* **8**, 68-75.
- ZICSI A. (1967): Die Auswirkung von Bodenbearbeitungsverfahren auf Zustand und Besatzdichte einheimischer Regenwürmer. *Progress in Soil Biology. Proceedings of the Colloquium on Dynamics of Soil Communities* (Graff O. & Satchell J. E., Hrsg.). Braunschweig: Vieweg & Sohn; Amsterdam: North- Holland Publishing Company, 290-298.
- ZICSI A. (1969): Über die Auswirkung der Nachfrucht und Bodenbearbeitung auf die Aktivität der Regenwürmer. *Pedobiologia* **9**, 141-145.
- ZITTERELL K. (1981): Wirkung von Zwischenfruchtextrakten auf Getreidepflanzen in Hydrokultur und Gründüngungswirkung im Feldversuch. Dissertation, Universität Hohenheim.



## **Danksagung**

Mein herzlicher Dank gilt den vielen Menschen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Der allererste Dank geht an meine Eltern und an Geli Forstreuter, deren stete Unterstützung vor und während der Doktorandenzeit mir einen großen Rückhalt gaben.

Herrn Prof. Dr. W. Ehlers danke ich ganz herzlich für die Überlassung des Themas, die dabei gewährte Freiheit während der Bearbeitung und für die wertvollen Anregungen und Diskussionen.

Herrn Prof. Dr. W. Römer danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Liebe Nicol Stockfisch, vielen Dank für die unermüdliche Diskussionsfreude, die zahlreichen Ratschläge und Tips, die einen großen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geliefert haben. Torsten Harden sei für die vielen Computertips und für die oft vorzügliche Beköstigung während vieler Diskussionsabende gedankt.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung danke ich für die gute Unterstützung während der praktischen Arbeiten. Besonders bedanke ich mich bei Frau Anita Bartlitz für die engagierte Hilfe bei vielen Probenahmen und Arbeiten im Labor. Bedanken möchte ich mich auch ganz herzlich bei dem Versuchstechniker des Ackerbau-Systemversuches Reinshof, Herrn Konrad Johne, für die stets sorgfältige Betreuung des Versuches und die von Ihm erhobenen Ertragsdaten.

Eine große Hilfe bei der Beseitigung von Tippfehlern und unglücklichen Formulierungen waren Ingrid Rohde, Wolfgang Forstreuter, Geli Forstreuter und Nicol Stockfisch. Meine Kumpels aus Lünne sorgten dafür, daß ich immer eine angenehme Anlaufstelle außerhalb Göttingens behielt.

Helmut Kimpel-Freund danke ich herzlich dafür, daß er mit seinen Erklärungen viel zu meinem Verständnis der praktischen Landwirtschaft beigetragen hat.

Schließlich geht ein riesengroßes Dankeschön an "Zimmer 6". Liebe Barbara Hohlmann und lieber Theo Mähner, als besonders schöne Erfahrung wird mir die stets gute Zusammenarbeit und die freundschaftliche Atmosphäre in Erinnerung bleiben.

## Lebenslauf

### **Persönliche Daten:**

Name: Thomas Forstreuter  
Anschrift: Vorbrückenstr. 9  
48480 Lünne  
geboren am: 20. 2. 1967 in Spelle

### **Schulausbildung:**

1973 - 1976 Grundschule Lünne  
1976 - 1983 Realschule mit Orientierungsstufe Spelle  
1983 - 1986 Gymnasium Georgianum Lingen  
Abschluß: Allgemeine Hochschulreife  
  
1986 - 1988 Zivildienst beim Christophorus Werk Lingen

### **Hochschulausbildung:**

1988 - 1990 Universität Gießen, Grundstudium der Agrarwissenschaften  
1990 - 1991 CSIRO-Plant Industry Canberra, Australien  
Praktisches Studiensemester  
1991 - 1994 Universität Gießen, Studium der Umweltsicherung und  
Entwicklung ländlicher Räume  
Diplomarbeit am Institut für Mikrobiologie und Landeskultur  
Abschluß: Dipl.-Ing. agr.

### **Wissenschaftliche Tätigkeit:**

April 1995 - März 1998 Stipendiat im DFG-geförderten Graduiertenkolleg  
"Landwirtschaft und Umwelt"