

ERFASSUNG VON ZUSTANDSGRÖßEN UND INDIKATORENENTWICKLUNG

(Kapitel 7, 8, 9 und 10)

7 Ertragsentwicklung sowie Richtwerte für den C- und N-Gehalt ackerbaulich genutzter Böden

M. Körschens

UFZ Leipzig-Halle GmbH, Sektion Bodenforschung, Halle/Saale

Abstract

Yield development and target values for the C and N levels of agricultural soil

Soil organic matter (SOM) is the main precondition for soil formation, soil fertility and yields. The aim of sustainable land use is to produce increasingly high yields to safeguard the nutrition of the permanent world's permanently growing population. The results of the Bad Lauchstädt Static Fertilization Experiment over the last 50 years are summarized.

In the period studied, the yields of winter wheat increased by approx. 60 dt/hectare, i.e. 150 %. The reasons are manifold. A decisive role is played by the progress made in crop breeding, especially concerning winter wheat. Other factors include improvements in plant protection in the mid-1980s, higher mineral N-fertilization, and better control of the fertilization regime.

The yields of spring barley have increased by 1 dt/ha annually, amounting to a rise of approx. 50 dt/ha during the entire period. In contrast to cereals, the yields of sugar beet or sugar are significantly lower. In 1950, sugar yields amounted to 100 dt/ha, and only began increasing to a significantly higher level in 1993. The yields of potato starch have increased by 44 kg/ha annually, i. e. approx. 20 dt/ha within the last 50 years. Comparison between the optimum exclusively mineral fertilization and the optimum combination between organic and mineral fertilization, i.e. the soil-improving effect of SOM, amounts on average to 3 %. The results of the carbon and nitrogen dynamics in this experiment as well as nitrogen and carbon balances are shown and optimum values are derived for decomposable carbon and nitrogen for arable soils. C extractable in hot water has proved to be an appropriate criterion for calculating the decomposable C and thus for N release from soil. These results indicate that "ecological agriculture" is no alternative to "integrated plant production".

Zusammenfassung

Die organische Substanz ist eine Vorbedingung für die Bodenbildung. Sie bestimmt entscheidend die ertragsrelevanten Bodeneigenschaften und damit die Bodenfruchtbarkeit.

Ziel einer nachhaltigen, landwirtschaftlichen Bodennutzung sind hohe und steigende Erträge je Flächeneinheit zur Sicherung der Ernährung der ständig wachsenden Weltbevölkerung. Es werden die Erträge der letzten fünfzig Jahre des Statischen Düngungsversuches Bad Lauchstädt dargestellt. Die Erträge des Winterweizens sind im untersuchten Zeitraum um ca. 60 dt/ha, d.h. um ca. 150 % von 38 auf 98 dt/ha angestiegen. Die Ursachen dafür sind vielfältig. Der Züchtungsfortschritt, gerade bei Getreide und ganz besonders bei Winterweizen, spielt hierbei eine entscheidende Rolle, aber auch der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, insbesondere ab Mitte der achtziger Jahre, die höhere Mineral-N-Düngung und die bessere Beherrschung des Düngungsregimes. Die Erträge der

Sommergerste steigen jährlich um annähernd 1 dt/ha, im gesamten Zeitraum um rd. 50 dt/ha. Im Gegensatz zu Getreide ist der Anstieg der Zuckerrüben- bzw. Zuckererträge wesentlich geringer. Bereits 1950 lagen die Zuckererträge bei 100 dt/ha und sind erst seit 1993 auf ein deutlich höheres Niveau angestiegen. Insgesamt beträgt der Ertragsanstieg in diesen 50 Jahren nur rd. 15 dt/ha Zucker. Der Kartoffelstärkeertrag ist um jährlich 0,44 dt/ha, d.h. ca. 20 dt/ha in den vergangenen 50 Jahren angestiegen bei z.T. großen Schwankungen zwischen den Jahren.

Der Vergleich zwischen der optimalen, ausschließlichen Mineraldüngung mit der optimalen Kombination organischer und mineralischer Düngung, d.h. die bodenverbessernde Wirkung der organischen Bodensubstanz (OBS), beträgt im Durchschnitt 3 %. Er werden die Ergebnisse der Kohlenstoff(C)- und Stickstoff(N)-Dynamik im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt ebenso wie die C- und N-Bilanzen dargestellt und Optimalwerte für den umsetzbaren C und N abgeleitet. Der heißwasserlösliche Kohlenstoff wird als Kriterium für die Berechnung des umsetzbaren C und damit für die N-Freisetzung verwendet. Der sogenannte „Ökologische Landbau“ ist nach den vorgestellten Untersuchungsergebnissen keine Alternative zum „integrierten Pflanzenbau“.

7.1 Einleitung

Die organische Substanz ist eine Vorbedingung für die Bodenbildung. Sie bestimmt entscheidend die ertragsrelevanten Bodeneigenschaften und damit die Bodenfruchtbarkeit. Sie beeinflusst aber auch den C- und N-Kreislauf Boden-Pflanze-Wasser-Atmosphäre und besitzt damit eine hohe Umweltrelevanz. Die Forschungen auf dem Gebiet der „Humuschemie“, die seit etwa 50 Jahren national und international sehr intensiv betrieben werden, haben zu sehr interessanten Erkenntnissen und Fortschritten geführt, insbesondere gefördert durch die schnelle Entwicklung der Analysentechnik. Diese Arbeiten haben jedoch bisher keinerlei anwendbare Ergebnisse für die Praxis ergeben. Unabhängig von den Forschungen auf dem Gebiet der Humuschemie wurde in den letzten zwei Jahrzehnten versucht, auf empirischem Wege über die Auswertung von Dauerfeldversuchen zahlreicher Standorte die Ertragswirksamkeit der organischen Bodensubstanz aufzuklären, die C- und N-Dynamik unter Feldbedingungen zu quantifizieren und erste Orientierungswerte für den Gehalt an organischer Bodensubstanz (OBS-Gehalt) von Ackerböden abzuleiten. Für die Ableitung optimaler Gehalte an organischem Kohlenstoff (C_{org} -Gehalte) werden dabei folgende Kriterien herangezogen:

- ⇒ Ertrag
- ⇒ Nährstoffeffizienz
- ⇒ Kohlenstoffgewinn

Um die Auswirkungen unterschiedlicher Düngungssysteme auf Ertrag und Umwelt abschätzen und quantifizieren zu können, sind langjährige Untersuchungsreihen erforderlich. Diese liefern nur Dauerfeldversuche und auch dies nur unter der Voraussetzung, dass

- ⇒ sie eine Vielzahl von Düngungsvarianten enthalten

⇒ die Ergebnisse lückenlos dokumentiert sind

⇒ keine grundsätzlichen Änderungen der Prüfglieder vorgenommen worden sind

Hinsichtlich Versuchsdauer, Variantenvielfalt und Ergebnisdokumentation gehört der Statische Düngungsversuch Bad Lauchstädt zu den bedeutendsten Dauerfeldversuchen der Welt. Er ist auf Grund seiner Versuchsdauer und seiner Variantenvielfalt in idealer Weise für derartige Untersuchungen geeignet. Standort und Versuch sind mehrfach und umfassend beschrieben und können als bekannt vorausgesetzt werden (KÖRSCHENS et al. 1994 u.a.). Nachfolgend wird zunächst über einen Zeitraum von 50 Jahren, von 1950 bis 1999, nur der jeweilige Höchstertag in die Auswertung einbezogen, unabhängig davon, mit welcher Düngungskombination er erzielt wurde. Dies hat den Vorteil, dass bei der gegebenen Vielfalt der Düngungsvarianten mit großer Wahrscheinlichkeit eine der Jahreswitterung weitgehend angepasste, optimale Düngung unterstellt werden kann. Damit wird der jeweilige Höchstertag auch ein Kriterium für das Ertragspotenzial und ermöglicht gleichzeitig eine zutreffendere Aussage zur Ertragsentwicklung und den Einfluss der Jahreswitterung über den untersuchten Zeitraum.

7.2 Ergebnisse und Diskussion

7.2.1 Ertragsentwicklung

Ziel einer nachhaltigen, landwirtschaftlichen Bodennutzung sind hohe und steigende Erträge je Flächeneinheit zur Sicherung der Ernährung der ständig wachsenden Weltbevölkerung und zur Produktion von Energie und Rohstoffen. Gleichzeitig und gleichberechtigt steht jedoch die Forderung nach Vermeidung von Umweltbelastungen durch Eintrag von Nähr- und Schadstoffen in das Grundwasser, beispielsweise NO_3 , oder in die Atmosphäre, wie z.B. N_2O .

Hohe Erträge bei guter Qualität sowie guten Verarbeitungseigenschaften der Ernteprodukte sind Voraussetzung für eine ökonomische und ökologische Wirtschaftsweise. Die Ökonomie hoher Erträge unterliegt keinem Zweifel. Die Ökologie resultiert u. a. aus der Tatsache, dass

⇒ hohe Erträge zur Minderung der CO_2 -Konzentration der Atmosphäre beitragen. Zum Beispiel verringern 10 t Zuckerrüben den Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre um ca. 1 t

⇒ mit hohen Erträgen gleichzeitig auch große Mengen an Ernte- und Wurzelrückständen (einschließlich Rübenblatt, Stroh, etc.) in den Boden gelangen und damit organische Substanz zugeführt wird

⇒ ein Hektar intensiv genutztes Ackerland die Rodung von zehn Hektar Regenwald verhindert

Winterweizenerträge

Die Erträge des Winterweizens sind im untersuchten Zeitraum um ca. 60 dt/ha, d.h. um ca. 150 % von 38 auf 98 dt/ha angestiegen (Abb. 7.1).

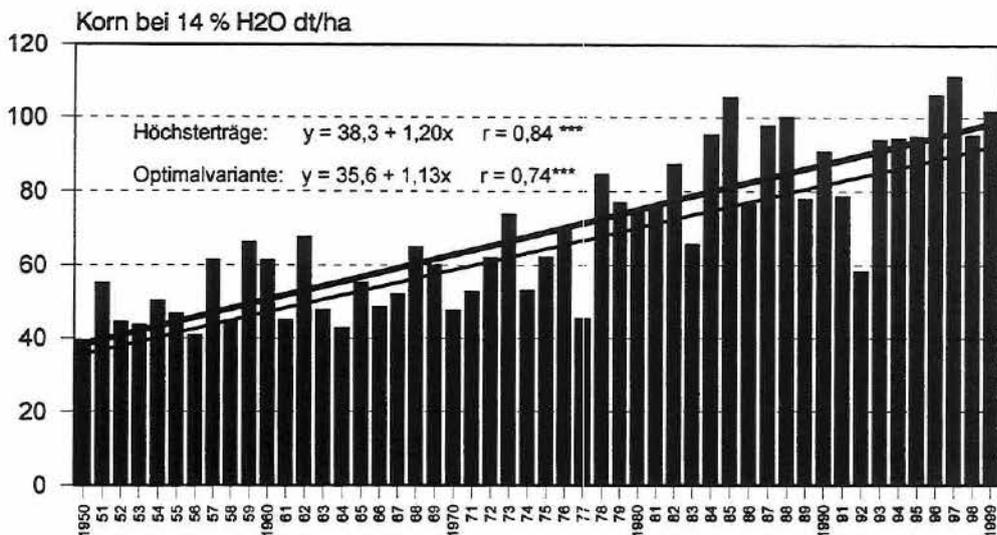


Abb. 7.1)

Höchstserträge bei Winterweizen im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt im Zeitraum 1950 bis 1999, unabhängig von der Düngung

Die Ursachen dafür sind vielfältig. Der Züchtungsfortschritt, gerade bei Getreide und ganz besonders bei Winterweizen, spielt hierbei eine entscheidende Rolle, aber auch der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, insbesondere ab Mitte der achtziger Jahre, die höhere Mineral-N-Düngung und die bessere Beherrschung des Düngungsregimes. Letzteres begründet sich hauptsächlich mit einer Festlegung der Düngung nach Bestimmung des anorganischen Stickstoffs im Frühjahr.

Tab. 7.1 enthält die jährlich verabreichten N-Mengen während des gesamten Versuchszeitraumes. Ab 1950 sind die Gaben von 30 kg/ha*a (mit Stalldung) auf 80 kg/ha*a bzw. von 60 kg/ha*a auf 100 kg/ha*a (ohne Stalldung) angestiegen. Außerdem haben sich im gleichen Zeitraum die atmosphären N-Einträge $x \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ erhöht (vgl. 7.2.5) und müssen zur Zeit mit rd.50 kg/ha*a einkalkuliert werden.

Tab. 7.1)

Mineral-N-Düngung (kg/ha.a) im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt; Zeitraum 1903–1999

	Zuckerrüben		Sommergerste		Kartoffeln		Winterweizen	
	mit Stalldung	ohne Stalldung						
1903 – 1909	60	90	20	40	40	60	40	60
1910 – 1925	60	90	20	40	20	40	20	40
1926 – 1928	60	90	20	40	20	40	30	60
1929 – 1951	90	120	20	40	20	40	30	60
1952 – 1970	90	120	20	40	40	60	30	60
1971 – 1977	200	240	30	50	120	160	80	100
1978 – 1992	150	170	36	51	120	140	55	74
1993 – 1999	150	170	60	80	120	140	80	100

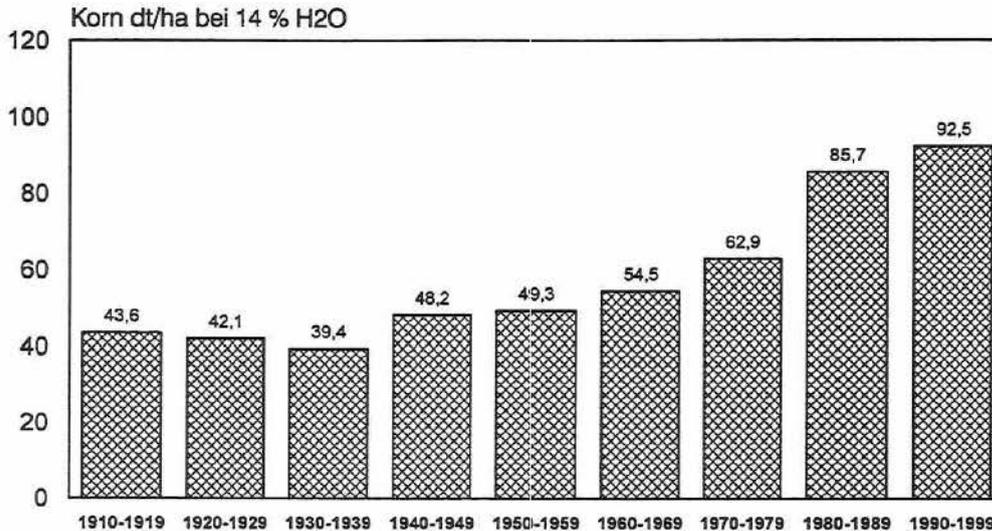


Abb. 7.2)

Höchstertträge bei Winterweizen im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt;
Mittelwerte über jeweils 10 Jahre

Abb. 7.2 zeigt zum Vergleich die Ertragsentwicklung über den gesamten Versuchszeitraum der letzten neun Dekaden. Bis 1940 ist praktisch keine Veränderung eingetreten, danach steigen die Erträge deutlich progressiv an. In der Trockenperiode 1988 bis 1991 mit nur 353 mm Jahresniederschlag wurden im ersten Jahr noch 100 dt/ha Weizen geerntet, der Rückgang setzte ab 1989 ein und war noch 1992 stark zu spüren. Relativ konstant bleiben die Erträge ab 1993. Der Vergleich zwischen den Höchstertträgen und den Erträgen der Optimalvariante, die in diesem Versuch unter Berücksichtigung des Ertrages und der Nährstoffeffizienz hier mit 10 t/ha*^a Stallung + NPK ermittelt wurde (vgl. Tab. 7.3) zeigt, dass letztere ca. 8 dt/ha darunter liegen.

Sommergerstenerträge

Die Erträge der Sommergerste (Abb. 7.3) steigen jährlich um annähernd 1 dt/ha, im gesamten Zeitraum um ca. 50 dt/ha. Die Reaktionen auf die Witterung sind vergleichbar mit denen des Weizens. Einzelne Trockenjahre bewirken auch hier, mit Ausnahme des Jahres 1976 mit nur 320 mm Niederschlag, keine Ertragseinbußen, allerdings bewirkt die Trockenperiode Anfang der neunziger Jahre größere Ertragseinbußen in den Jahren 1990 bis 1992. Der entscheidende Ertragsanstieg setzt in der zweiten Periode des Untersuchungszeitraumes ein. Die Durchschnittserträge der letzten beiden Jahrzehnte betragen 70 dt/ha. Die Stickstoffgaben bleiben allerdings bei Sommergerste wegen der angestrebten Braugerstenqualität sehr gering und steigen erst ab 1993 merklich an, was offensichtlich zu einem nochmaligen Ertragsanstieg geführt hat.

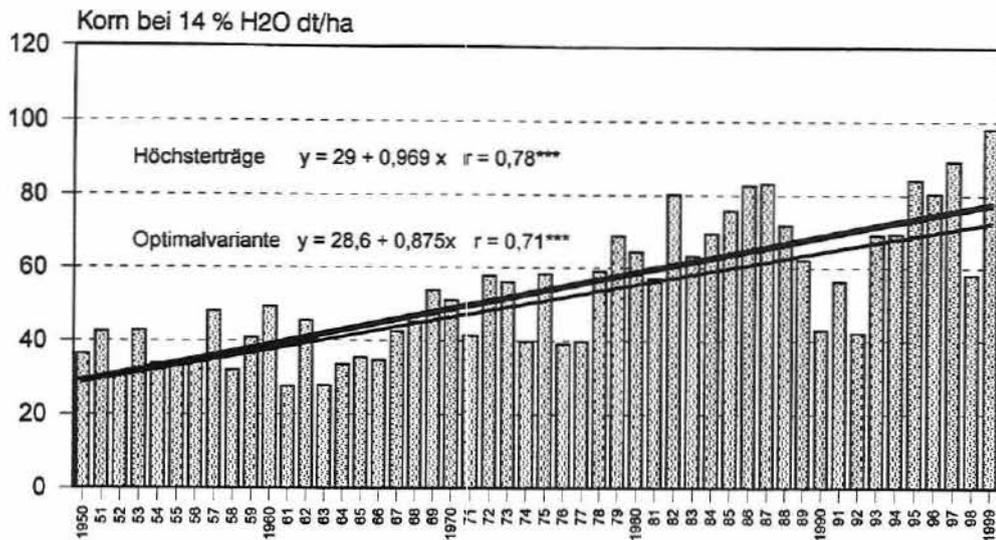


Abb. 7.3)

Höchsterträge bei Sommergerste im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt im Zeitraum 1950 bis 1999; unabhängig von der Düngung

Zuckererträge

Im Gegensatz zu Getreide ist der Anstieg der Zuckerrüben- bzw. Zuckererträge (Abb. 7.4) wesentlich geringer. Bereits 1950 lagen die Zuckererträge bei 100 dt/ha und sind erst seit 1993 auf ein deutlich höheres Niveau angestiegen. Insgesamt beträgt der Ertragsanstieg in diesen 50 Jahren nur rd. 15 dt/ha Zucker. Die überhöhten Mineral-N-Gaben, die zwischen 1971 und 1977 verabreicht worden sind, haben sich eher negativ auf den Zuckerertrag ausgewirkt. Seit 1978 werden mit 150 kg N/ha mit organischer Düngung und 170 kg N/ha ohne organische Düngung den Erträgen angemessene Mineral-N-Gaben gegeben. Deutlich negativ wirkt sich die schon oben erwähnte Trockenperiode zwischen 1988 und 1991 aus. Der bisherige Maximalertrag wurde 1993 mit 158,6 dt/ha erreicht.

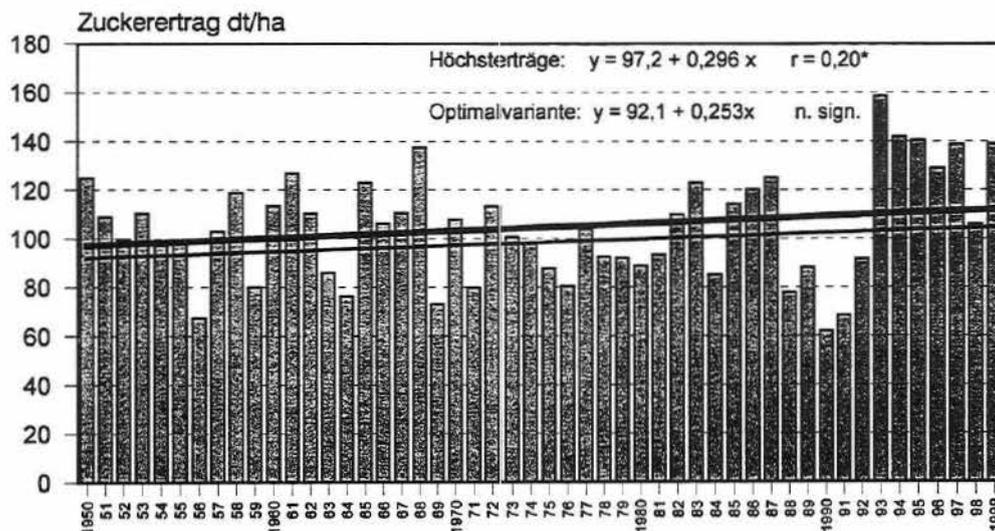


Abb. 7.4)

Höchsterträge bei Zucker im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt im Zeitraum 1950 bis 1999; unabhängig von der Düngung

Stärkeerträge

Der Kartoffelstärkeertrag (Abb. 7.5) ist um jährlich 0,44 dt/ha, d.h. rd. 20 dt/ha in den vergangenen 50 Jahren angestiegen bei z.T. großen Schwankungen zwischen den Jahren. Ähnlich wie bei Zuckerrüben und Winterweizen werden ab 1993 höhere Erträge und eine größere Ertragsstabilität erreicht. Eine Ursache dafür könnte die Sortenwahl sein, aber auch die Tatsache, dass die Schwankungen der Niederschlagsmengen in diesem Zeitraum vergleichsweise gering waren.

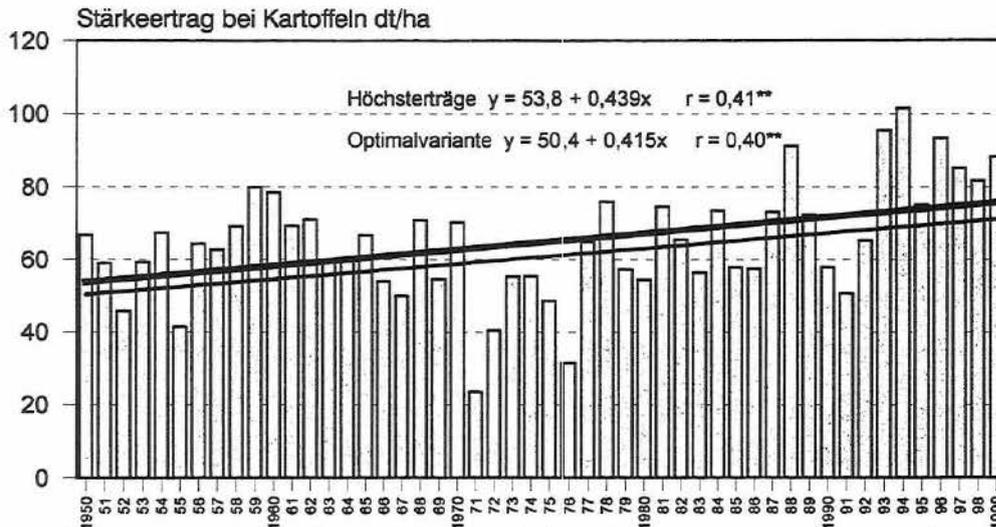


Abb. 7.5) Höchsterträge an Stärke bei Kartoffeln im Statischen Düngerversuch Bad Lauchstädt im Zeitraum 1950 bis 1999; unabhängig von der Düngung

Mit der Auswahl der jährlichen Höchsterträge für die vorliegende Auswertung kann davon ausgegangen werden, dass bei der gegebenen Vielfalt der Düngungsvarianten in diesem Versuch jeweils eine für die Jahreswitterung optimale Düngung gegeben ist. Im Vergleich zu den Erträgen der Optimalvarianten liegen die Höchsterträge um 5 bis 8 dt/ha höher. Bei Getreide entsprechen die relativen Ertragssteigerungen denen, die auch unter Praxisbedingungen erreicht werden, sie liegen allerdings auf einem höheren absoluten Niveau (Abb. 7.6).

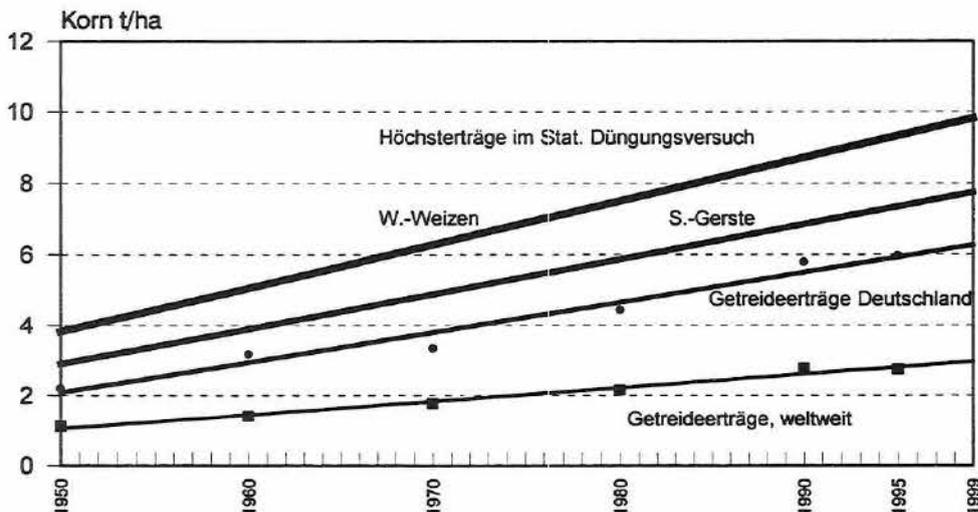


Abb. 7.6) Ertragsentwicklung bei Getreide (t/ha)

7.2.2 Ertragswirksamkeit der OBS

Für die Erarbeitung von Richtwerten für den Gehalt des Boden an organischem Kohlenstoff und Stickstoff sind Untersuchungen zum Einfluss der OBS auf den Ertrag notwendig. Dieser unterteilt sich in eine Nährstoffwirkung, die u.U. auch durch die Zufuhr von Nährstoffen in Form von Mineraldünger erreicht werden kann, und in eine bodenverbessernde Wirkung. Die Quantifizierung der bodenverbessernden Wirkung erfolgt durch den Vergleich der Erträge der optimalen Mineraldüngung mit denen der optimalen Kombination organischer und mineralischer Düngung mit Hilfe von Ergebnissen aus Dauerfeldversuchen.

Der bodenverbessernde *Einfluss der OBS auf den Ertrag* kann auf Grund der umfangreichen Ergebnisse als weitgehend quantifiziert betrachtet werden. Dazu wurden Dauerfeldversuche mit mehr als 1500 Versuchsjahren ausgewertet. Allein in den Bundesländern Sachsen-Anhalt und Brandenburg gibt es gegenwärtig noch 12 Dauerdüngungsversuche mit einer Versuchsdauer von über 600 Jahren insgesamt (Versuchsorte x Versuchsjahre). Fasst man alle vorliegenden Ergebnisse zusammen, so bedeutet dies, dass mit ausschließlicher, optimaler Mineraldüngung mindestens 90 % des Ertragspotentials ausgeschöpft werden können (ASMUS 1990, ASMUS 1995, GERICKE 1948, KLASINK & STEFFENS 1995, KÖRSCHENS 1997; LANG et al. 1995, SCHOLZ 1978, u.a.). Ein Beispiel zeigt die Auswertung der Ergebnisse der Hauptvarianten des Statischen Düngungsversuches Bad Lauchstädt (Abb. 7.7).

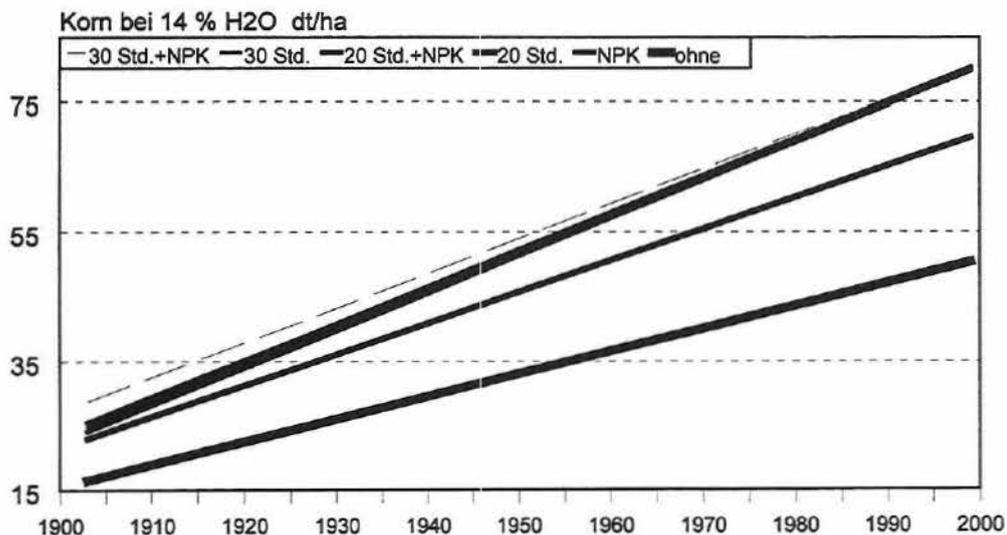


Abb. 7.7)

Entwicklung des Kornertrages bei Winterweizen in Abhängigkeit von der Düngung in den Hauptvarianten des Statischen Düngungsversuches Bad Lauchstädt im Zeitraum 1903 bis 1999

Neuere Ergebnisse aus der Serie der Internationalen Organischen Stickstoffdauerdüngungsversuche (IOSDV) bestätigen diese Aussagen (Tab. 7.2). Die Ergebnisse von 6 Standorten und 78 Versuchsjahren zeigen auch hier einen Mehrertrag der kombinierten organisch-mineralischen Düngung zwischen 0 und 12 % mit einem Mittelwert von 3 %, wobei die Sommergerste und die Kartoffeln am deutlichsten positiv auf die organische Düngung reagieren.

Tab. 7.2)

Relativerträge der optimalen Mineraldüngung im Vergleich zur optimalen Kombination organischer + mineralischer Düngung (=100) in ausgewählten IOSDV

Versuchsort	Zeitraum	Z.-Rüben	W.-Weizen	S.-Gerste	W.-Gerste	Kart.	Mais
Bad Lauchstädt ¹⁾	1978-1999	96	98	96	-	93	-
Berlin-Dahlem ²⁾	1986-1999	-	94	93	-	88	-
Rauischholzhausen ³⁾	1991-1997	97	95	-	100	-	-
Speyer ⁴⁾	1984-1999	98	98	-	99	-	-
Jabel/Slovenien ⁵⁾	1993-1999	-	102	-	100	-	103
Keszthely/Ungarn ⁶⁾	1984-1995	-	91	-	103	-	99

¹⁾PFEFFERKORN & KÖRSCHENS 2000 ²⁾KÖHN et al. 2000 ³⁾BEHLE-SCHALK & HONERMEIER 2000 ⁴⁾BISCHOFF 2000
⁵⁾TAJNSEK 2000 ⁶⁾HOFFMAN et al. 2000

7.2.3 C- und N-Dynamik

Veränderungen in den C_{org}- und Gesamtstickstoff(N_t)-Gehalten im Boden verlaufen sehr langsam und sind bei Bewirtschaftungsumstellungen in praxisrelevanten Größenordnungen erst nach mehr als 10 Jahren nachzuweisen. Aufgrund der großen zeitlichen und räumlichen Variabilität der C- und N-Gehalte ist es für Untersuchungen zur Dynamik dieser Merkmale notwendig, möglichst jährlich von jeder Parzelle Proben zu untersuchen.

Im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt war nach Erweiterung der Versuchsfrage im Jahre 1978 die Möglichkeit gegeben, Veränderungen der C- und N-Gehalte nach extremen Änderungen des Düngungsregimes zu quantifizieren. Abb. 7.8 zeigt für zwei ausgewählte Varianten (1902 bis 1977, 30 t/ha.2a Stalldung; ab 1978 ohne jede Düngung bzw.umgekehrt, bis 1977 ohne jede Düngung und ab 1978, 30 t/ha*2a Stalldung+ NPK) die Entwicklung der Gehalte im Verlaufe von 18 Jahren.Die Verringerung bei einem hohen Ausgangsniveau beträgt jährlich 0,013 % C_{org}, entsprechend 520 kg C/ha, bzw. 0,0011 % N entsprechend 44 kg/ha. Diese Menge stimmt sehr gut mit der Differenz im N-Entzug zwischen der Nullvariante und der ehemaligen Volldüngungsvariante überein. Der Anstieg der ehemals ungedüngten Variante ist beim Kohlenstoff

geringer und macht 0,0081 %, bei Stickstoff 0,0012 % jährlich aus. Es wird gleichzeitig deutlich, dass bis zum Erreichen des neuen Fließgleichgewichtes noch einige Jahrzehnte notwendig sind.

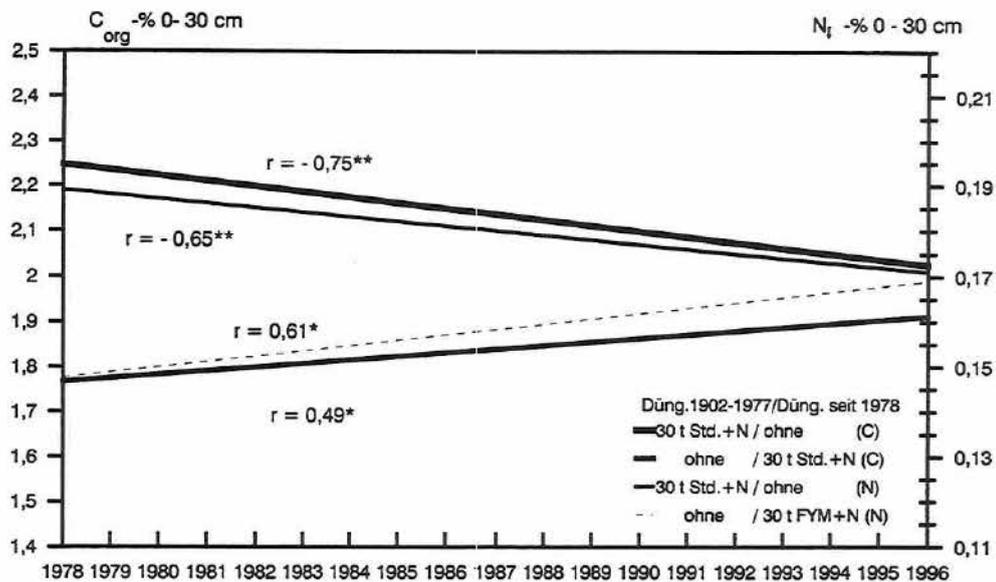


Abb. 7.8)

Entwicklung der C- und N-Gehalte im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt (Fruchtfolge: Kartoffeln, Winterweizen, Zuckerrüben, Sommergerste) nach Änderung der seit 1902 praktizierten Düngung im Jahre 1977

7.2.4 N- und C-Bilanzen

Für die Beurteilung der Nachhaltigkeit und dementsprechend der Umweltverträglichkeit ist vor allem die N-Verwertung von Bedeutung. Die N-Bilanz ist dafür das geeignete Kriterium, wenn das Fließgleichgewicht im Versuch erreicht ist, keine Veränderungen mehr eintreten und eine korrekte Bilanz durch einfache Gegenüberstellung von Eintrag und Austrag aufgestellt werden kann. Abb. 7.9 enthält die N-Bilanzen ausgewählter Varianten des Statischen Düngungsversuches über einen Zeitraum von 27 Jahren. In diesem Zeitraum wurden auf der Nullparzelle 56 kg N/ha*a entzogen, der als N-Eintrag aus der Atmosphäre, einschließlich asymbiotischer N-Bindung und Direktaufnahme durch die Pflanze, gewertet wird. Diese Größenordnung wurde auch durch direkte Messungen des atmogenen N-Eintrages ermittelt (MEHLERT 1996, RUSSOW et al. 1995, WEIGEL et al. 2000).

Die ausschließliche Mineraldüngung ergibt das "umweltfreundlichste" Ergebnis, es werden langfristig 49 kg/ha*a mehr entzogen, als mit der Düngung verabreicht wurden. Ein großer Teil des atmogenen N-Eintrages konnte somit von den Pflanzen genutzt werden unter der Voraussetzung einer nach Art, Menge und Zeitpunkt optimalen Applikation der Düngung. Mit organischer Düngung verringert sich dieser Vorteil, da die N-Freisetzung aus der organischen Substanz nur sehr begrenzt den möglichen Entzügen der Pflanzen angepasst werden kann. Dieses sehr positive

Ergebnis ist der Gunst des Standortes zu danken. Bei 2 m Durchwurzelungstiefe und nur 484 mm Jahresniederschlag bleiben die Verluste bei optimaler Gestaltung des Düngungsregimes sehr gering. Die Relationen zwischen den Prüfgliedern werden durch zahlreiche weitere Dauerfeldversuche bestätigt (KLIR et al. 1995, KÖRSCHENS 1997, SCHNIEDER 1990, WEIGEL et al. 1996).

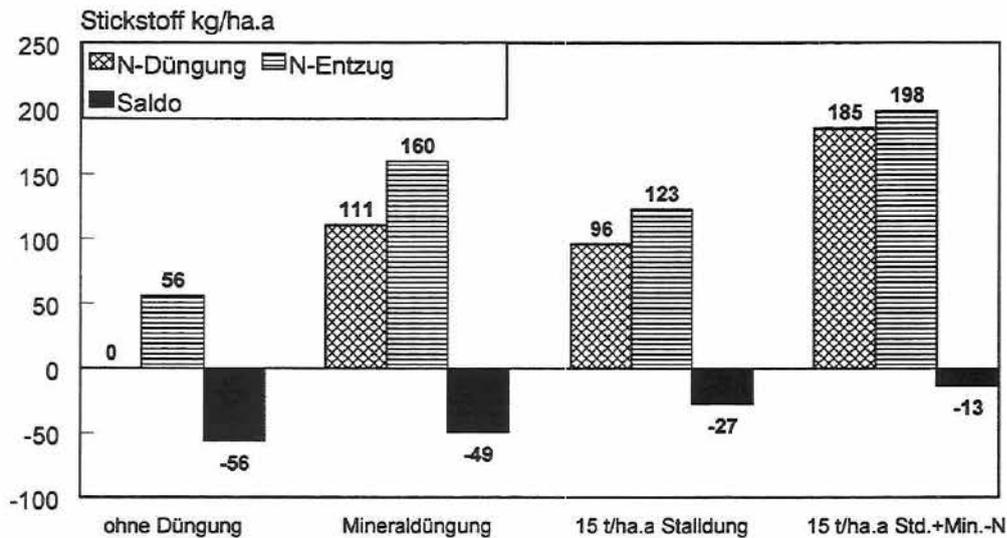


Abb. 7.9)

Stickstoffbilanzen – Statischer Düngungsversuch Bad Lauchstädt – Mittelwerte über alle Fruchtarten im Durchschnitt der Jahre 1968-1994

Die Kohlenstoffbilanzen bleiben meist unberücksichtigt, sie sind jedoch im Hinblick auf die CO₂-Konzentration der Atmosphäre und die Nutzung des CO₂-Minderungspotentials ebenfalls von großer Bedeutung (Abb. 7.10). Ähnlich wie die Stickstoffbilanzen weisen sie einen positiven Einfluss der Mineraldüngung auf den C-Gewinn und damit eine bessere Ausnutzung des CO₂-Minderungspotentials nach (KÖRSCHENS 1997). Als entscheidendes Kriterium gilt hierbei der C-Gewinn, nicht das Verhältnis zwischen Eintrag und Austrag. Letzteres sagt nichts über die absoluten Werte aus und negiert die Notwendigkeit hoher Erträge bzw. die Nutzung des CO₂-Minderungspotentials. Vielfach wird die Möglichkeit erwogen, den Boden als Kohlenstoffsенke zur Verringerung der CO₂-Konzentration der Atmosphäre zu nutzen. Für ackerbaulich genutzte Böden kann diese Möglichkeit weitgehend ausgeschlossen werden, wie folgendes Beispiel zeigt:

Im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt hat sich nach ca. 70 Jahren auf allen Düngungsstufen ein Fließgleichgewicht eingestellt. Durch die Anwendung von 20 t/ha Stalldung jedes 2. Jahr wurde der C_{org}-Gehalt gegenüber der Nullvariante um 0,35 % bzw. 14 t/ha (bezogen auf den Bearbeitungshorizont von 30 cm) angehoben. Für diese Erhöhung mussten im Verlaufe der 70 Jahre insgesamt ca. 60 t/ha C in Form von Stalldung aufgewendet werden.

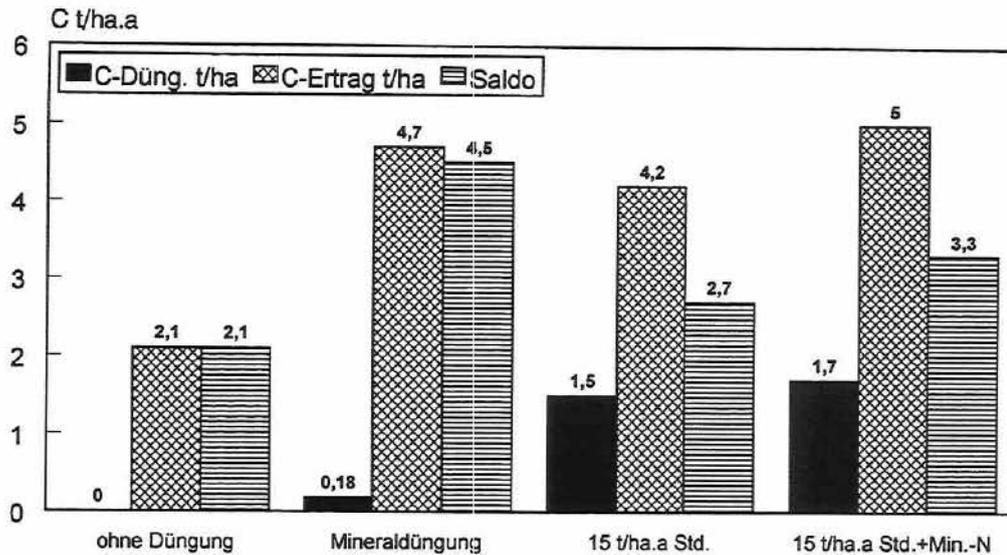


Abb. 7.10)

Kohlenstoffbilanzen – Statischer Düngungsversuch Bad Lauchstädt – Mittelwerte über alle Fruchtarten im Durchschnitt der Jahre 1968-1994

Der gleiche Effekt kann auch mit Strohdüngung erreicht werden. Dies erfordert jedoch deutlich größere C- und damit Stroh-Mengen, da die C-Verbindungen im Stroh im Vergleich zu Stallung weniger stabil sind und dementsprechend auch zu einem geringeren Anteil akkumuliert werden. Nach Erreichen des Fließgleichgewichtes wird keine organische Substanz mehr akkumuliert. Die zugeführte Menge an organischer Primärschubstanz (OPS) wird veratmet bzw. der gleiche Anteil, der humifiziert wird und in die OBS übergeht, wird mengenmäßig aus der OBS freigesetzt. Auf Sandböden ist die Akkumulation, bedingt durch die höhere Mineralisierungsintensität, merklich geringer, d.h. der Aufwand an OPS deutlich höher. Eine Erhöhung des C_{org} -Gehaltes im Boden über das o.g. Optimum hinaus bringt demnach keinen vertretbaren Akkumulationseffekt, erhöht die Gefahr von N-Verlusten (da an den Kohlenstoff der OBS immer Stickstoff im Verhältnis von ca. 10:1 gebunden ist) und stellt letztlich eine weitgehend unproduktive „Verbrennung“ von Kohlenstoff dar.

7.2.5 Ableitung optimaler OBS-Gehalte

Die gegenwärtige Situation in der Landwirtschaft fordert, insbesondere im Hinblick auf die Vermeidung von Umweltbelastungen, die Kenntnis optimaler OBS-Gehalte.

Noch in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts gab es kaum Widersprüche zwischen landwirtschaftlicher Nutzung und Umwelt. Die Stoffkreisläufe waren weitgehend geschlossen, die Tierproduktion vergleichsweise gering und überwiegend gleichmäßig verteilt. Stallung und organische Abfälle wurden optimal appliziert, die Mineraldüngung nur in geringem Maße angewendet. Bis in die Mitte dieses Jahrhunderts betrug der Aufwand an

Mineraldüngerstickstoff in Deutschland weniger als 30 kg/ha. Die organischen Dünger und damit auch der Humus, stellten die Hauptquelle der Nährstoffe für die Pflanzenproduktion dar und waren wichtigste Voraussetzung für die Ertragsbildung. Überdüngung war praktisch ausgeschlossen. Unter diesen Bedingungen galt der Grundsatz: „je mehr, um so besser“. In den letzten Jahrzehnten hat sich ein grundlegender Wandel vollzogen. Mit dem zunehmenden Einsatz von Mineraldüngung sind die Erträge weltweit drastisch angestiegen, damit auch die auf dem Felde verbleibenden Ernte- und Wurzelrückstände als eine wichtige Quelle für die organische Bodensubstanz (OBS). Teilweise wurden bei Nichtbeachtung der Düngeempfehlungen überhöhte Mineraldüngermengen verabreicht und damit Umweltschäden durch Erhöhung der Nitratkonzentration im Grundwasser und der CO₂- und N₂O-Konzentration in der Atmosphäre verursacht. Im Zusammenhang mit der Spezialisierung und Konzentration in der Landwirtschaft, insbesondere in der Tierproduktion, kam es zu großen Differenzierungen im Viehbesatz, die im Bereich großer Tierproduktionsanlagen bis zu 4 Großvieheinheiten/ha, teilweise auch darüber, erreichten. Die Beispiele hierfür im Raum Vechta und Eberswalde sind bekannt. Die Überdüngung vieler Flächen mit Stalldung und/oder Gülle führte, ebenso wie die unsachgemäße Anwendung von Mineraldünger, zu erheblichen Umweltschäden. Für beides gilt der Satz von Paracelsus:

„Alle Dinge sind Gift und nichts ist ohne Gift. Die Menge allein macht, daß ein Ding kein Gift ist.“

Mit anderen Worten: Der Stickstoff im Stalldung oder in der Gülle ist genauso „giftig“ wie der Stickstoff im Kalkammonsalpeter. Der Unterschied ist nur, dass die N-Menge im Kalkammonsalpeter bekannt ist und wesentlich genauer dosiert werden kann.

Die Notwendigkeit, ökonomisch zu wirtschaften, d.h. hohe Erträge zu erzielen und gleichzeitig ökologische Gesichtspunkte zu berücksichtigen, rückte die Frage nach optimalen Gehalten an organischer Substanz in Ackerböden in den Vordergrund. Während auf dem Gebiet der Mineraldüngung im Ergebnis einer jahrzehntelangen Forschung Richtlinien für eine nach Menge, Art und Anwendungszeitpunkt optimale Ausbringung bereits seit langem bekannt sind und auch zuverlässige Richtwerte für Gehalte im Boden vorliegen, gab es bisher keine vergleichbaren Empfehlungen für die Gehalte des Bodens an organischer Substanz, d.h. für die nunmehr ungleich wichtigeren Parameter Kohlenstoff und Stickstoff. Es bleibt deshalb die dringende Frage offen: wieviel umsetzbarer C ist notwendig, um das Ertragspotential eines Standortes auszuschöpfen. Die Lösung der Aufgabe erfordert langjährige Dauerfeldversuche. Es war ein glücklicher Umstand, dass rd. 20 Dauerfeldversuche auf sehr unterschiedlichen Standorten als experimentelle Basis zur Verfügung standen (KÖRSCHENS 1984). Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Versuche in Verbindung mit intensiven Untersuchungen wurde eine *Humusbilanzmethode* erarbeitet, 1977 veröffentlicht (AUTORENKOLLEKTIV 1977) und flächendeckend in die Praxis eingeführt. Sie ist

bekannt und wird heute noch (oder wieder) in mehreren Bundesländern angewendet. Diese Bilanzmethode weist jedoch nur den notwendigen Bedarf an organischen Düngern für die Erhaltung eines optimalen Versorgungszustandes aus und sagt nichts über den augenblicklichen Versorgungsgrad, es sei denn, man kann rückwirkend über einen Zeitraum von mindestens 10 Jahren bilanzieren. Die weiteren Arbeiten auf diesem Gebiet verfolgten deshalb das Ziel, *Richtwerte für den Gehalt an organischer Substanz* zu erarbeiten (KÖRSCHENS 1980).

1986 wurden die ersten „Orientierungswerte für die Einstufung grundwasserferner D- und Lößstandorte nach dem Grad ihrer Versorgung mit organischer Substanz“ publiziert (KÖRSCHENS et al. 1986). Sie beruhten auf der Korrelation zwischen dem Feinanteilgehalt des Bodens (Korngrößen $\leq 6 \mu\text{m}$) und dem stabilen oder inerten C-Gehalt, abgeleitet aus den Ergebnissen zahlreicher Dauerfeldversuche. Dabei wurden neben dem Ertrag auch ökologische Gesichtspunkte berücksichtigt und außer den Mindestgehalten auch Obergrenzen angegeben. In der Folgezeit konnten diese Arbeiten, auf den vorhandenen Ergebnissen und Erfahrungen aufbauend, kontinuierlich fortgesetzt werden. Die experimentelle Basis verbreiterte sich durch Einbeziehung weiterer Dauerversuche des In- und Auslandes, durch internationale Kontakte und die verbesserten analytischen Möglichkeiten. Da für weitere Untersuchungen nur noch der umsetzbare Kohlenstoff von Bedeutung war, mußte eine einfache und praktikable Methode gefunden werden, um diese Fraktion zu bestimmen. Schließlich haben sich der heißwasserlösliche Kohlenstoff und Stickstoff als geeignete Kriterien erwiesen. Auf der Grundlage der Arbeiten von BRONNER (1976) und BEHM (1988) wurde im Verlaufe von mehr als 10 Jahren an der Präzisierung und Erprobung der Methode zur Bestimmung des heißwasserlöslichen C und N gearbeitet, u.a. im Rahmen eines vom Umweltbundesamt finanzierten Forschungsprojektes. Seit zwei Jahren sind diese Untersuchungen auch Gegenstand der Arbeiten einer internationalen Arbeitsgemeinschaft. Diese Erprobung, in die mehrere tausend Proben sehr unterschiedlicher Standorte einbezogen waren, ist inzwischen weitgehend abgeschlossen und zur Bestätigung als LUFA-Methode eingereicht (SCHULZ 2000). Sie wird danach als Standardmethode in den Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten angewendet.

Nachdem nun mit dem heißwasserlöslichen C und N die Möglichkeit besteht, die umsetzbare OBS zu bestimmen, muss noch nachgewiesen werden, wieviel umsetzbare OS optimal ist. Dazu werden die Ergebnisse von Dauerfeldversuchen und die jahrzehntelangen Erfahrungen der Versuchsansteller genutzt. Als Entscheidungskriterien werden der Ertrag, die Nährstoffeffizienz und die Kohlenstoffakkumulation verwendet. Tab. 7.3 zeigt die Ableitungen *optimaler Aufwandmengen an Stalldung* und davon abhängige C_{org} -Gehalte von 7 Dauerfeldversuchen. Die optimalen Aufwandmengen liegen zwischen 8 t/ha.a und 12 t/ha.a. Die daraus resultierenden

Differenzen zur ungedüngten Variante machen 0,11 bis 0,51 % C_{org} mit deutlicher Abhängigkeit vom Tongehalt aus. Ein Vergleich zwischen den Aussagen der Bilanzmethode und der Ableitung optimaler Aufwandmengen zeigt eine gute Übereinstimmung, im Durchschnitt der 7 untersuchten Standorte wird mit der Bilanzmethode ein um ca. 25 % höherer Bedarf ausgewiesen.

Tab. 7.3)

Optimale Aufwandmengen an organischer Düngung sowie optimale C_{org} -Gehalte unterschiedlicher Standorte, abgeleitet aus Dauerfeldversuchen

	Versuchsort	Tongeh. %	Optim. Stalldungaufwandmenge	C_{org} -% ohne Düng.	C_{org} -% Optim. D.	C_{org} -% Differ	Autor
1.	Bad Lauchstädt	21	10	1,61	2,12	0,51	KÖRSCHENS et al. 1994
2.	Methau	16	10	1,00	1,40	0,40	ALBERT 1999
3.	Seehausen	8	12	0,81	1,15	0,34	LEITHOLD et al. 1996
4.	Spröda	6	10	0,70	0,81	0,11	ALBERT 1999
5.	Müncheberg	5	8	0,48	0,62	0,14	ROGASIK 1998
6.	Groß Kreuz	5	10	0,42	0,64	0,22	ASMUS 1995
7.	Thyrow	3	10	0,37	0,65	0,28	LETTAU & ELLMER 1997

Tab. 7.4 zeigt einen Vorschlag für die Klassifikation von Böden nach ihrem Gehalt an heißwasserlöslichen Kohlenstoff (C_{hwl}). Aufgrund der bekannten großen Variabilität können Toleranzgrenzen von +/- 50 % akzeptiert werden. Bei den vorgestellten Beispielen heißt dies, dass 5 t/ha.a Stalldung auf keinen Fall unterschritten und 15 t/ha.a nicht überschritten werden sollten.

Tab. 7.4)

Bereiche von C_{hwl} für die Klassifikation von Böden nach ihrem Gehalt an umsetzbarer organischer Substanz für grundwasserferne Sand- und Lehmböden mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 6-10 °C und 400-800 mm Jahresniederschlag (KÖRSCHENS & SCHULZ 1999).

C_{hwl} - Bereich [$mg(100g)^{-1}$]	Gehaltsklasse
> 40	1 (sehr hoch)
30 ... 40	2 (hoch)
25 ... 30	3 (mittel; anzustreben)
20 ... 25	4 (gering)
< 20	5 (sehr gering)

7.2 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit der Ertragssteigerung von bis zu 250 % in den letzten 50 Jahren in Deutschland und in einigen anderen Ländern hat sich gleichzeitig die Fläche für die Ernährung eines Menschen weltweit um 50 % von 0,5 ha/Kopf der Bevölkerung auf 0,26 ha/Kopf der Bevölkerung verringert. In den nächsten 25 Jahren wird sie sich weiter auf 0,17 ha/Kopf der Bevölkerung reduzieren. Vor 200 Jahren betrug sie in Deutschland noch 2,5 ha/Kopf der Bevölkerung. Daraus resultiert die Forderung nach weiterhin steigenden Erträgen

Eine lineare Extrapolation der nachgewiesenen Ertragssteigerungen in das nächste Jahrhundert ist sicherlich nicht gerechtfertigt. Trotzdem ist es erforderlich, eine Ertragssteigerung von 2 bis 3 % jährlich zu erreichen, um ausreichende Mengen an Nahrungsmitteln zu produzieren. Der Einsatz der Gentechnik wird hierzu weitere Möglichkeiten eröffnen. Der sogenannte „Ökologische Landbau“ mit seinen verschiedenen Spielarten ist für die o.g. Zielstellung im Vergleich zum integrierten Pflanzenbau keine Alternative, weil

- er keine ökologische Wirtschaftsweise darstellt
- im Vergleich zum integrierten Pflanzenbau keine Vorteilswirkungen aufzuweisen hat
- einen um ca. 30 % geringeren Ertrag erzielt

Schlussfolgernd aus den Ergebnissen der letzten 25 Jahre zum Einfluß der OBS auf Ertrag sowie auf Nährstoffeffizienz und C-Bilanzen, können folgende Aussagen getroffen werden:

Eine Erhöhung des C_{org} -Gehaltes im Boden über das ertraglich und nährstoffmäßig begründete Optimum hinaus bringt keinen vertretbaren Akkumulationseffekt, erhöht die Gefahr von N-Verlusten und stellt letztlich eine weitgehend unproduktive „Verbrennung“ von Kohlenstoff dar. Mit Richtwerten für optimale C_{org} -Gehalte, der Bestimmung des heißwasserlöslichen C und der Humusbilanzmethode ist die Möglichkeit gegeben, den Gehalt der Ackerböden an organischer Substanz einzuschätzen und so zu steuern, dass hohe Erträge bei weitgehender Vermeidung von Umweltbelastungen erreicht werden. Die Aussagen dieser Methoden beruhen auf den Ergebnissen zahlreicher Dauerfeldversuche und gehen weitgehend konform.

Die Forschungen auf diesem Gebiet erfordern die Erhaltung von Dauerfeldversuchen, da nur sie den experimentellen Nachweis einer nachhaltigen Landnutzung ermöglichen.

UFZ-Bericht

**Einfluß der Landnutzung auf Landschaftshaushalt
und Biodiversität in agrarisch dominierten Räumen**

Heidrun Mühle (Hrsg.)

UFZ - Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH