

Experimentelle Möglichkeiten zur Ableitung optimaler C_{org} -Gehalte in Ackerböden

Martin Körschens

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-Haushalt der Atmosphäre und besitzt damit eine hohe Umweltrelevanz.

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 die Aufwandmengen 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 um teilweise mehr als 100 % 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 Düngungsempfehlungen überhöhte Mineraldüngermengen verabreicht und damit Umweltschäden durch Erhöhung der Nitratkonzentration im Grundwasser und der CO_2 - und N_2O -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 GV/ha, teilweise auch darüber, erreichten. Die Beispiele hierfür im Raum Vechta einerseits und Eberswalde andererseits sind bekannt.

Prof. Dr. habil. Dr. h.c. Martin Körschens, Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH, Sektion Bodenforschung, Theodor-Lieser-Str. 4, D-06120 Halle/S. e-mail: mkoersch@bdf.ufz.de

Die Ausbringung, oder auch Beseitigung der organischen Dünger bereitete und bereitet große Schwierigkeiten. 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 Folge dieser Entwicklung war eine sehr große Differenzierung in der Versorgung der Böden mit organischer Substanz. Stark überdüngten Flächen im Bereich hoher Tierkonzentrationen standen weitgehend an organischer Substanz verarmte Schläge in „Außenrotationen“ gegenüber.

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 ungleich wichtigeren Parameter Kohlenstoff und Stickstoff.

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 Analysetechnik. Diese Arbeiten haben jedoch bisher in keinem Falle zu Ergebnissen geführt, die eine Einschätzung oder Bewertung der Qualität oder Quantität der OBS in Ackerböden im Hinblick auf Optimalwerte ermöglichen.

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 von Ackerböden an organischer Substanz abzuleiten.

Im Ergebnis der bisherigen Arbeiten können zunächst folgende Prämissen formuliert werden:

1. Alle Betrachtungen zur organischen Substanz des Bodens erfordern ihre Differenzierung in mindestens zwei Fraktionen:
 - eine quasi „inerte“ Fraktion, die an den Mineralisierungsvorgängen weitgehend unbeteiligt und von den Standortbedingungen abhängig ist,
 - eine umsetzbare Fraktion, die überwiegend von den Bewirtschaftungsbedingungen bestimmt wird.
2. Veränderungen des Fließgleichgewichtes des C_{org} -Gehaltes im Boden betreffen nahezu ausschließlich den umsetzbaren Anteil und verlaufen sehr langsam. In Abhängigkeit vom Ausgangsniveau können mehr als 50 Jahre bis zum Erreichen eines neuen Fließgleichgewichtes vergehen.
3. Der Einfluß der OBS auf den Ertrag beruht einmal auf ihrer Nährstoffwirkung, zum anderen auf der Verbesserung der Bodeneigenschaften. Letztere wird quantifiziert über den Vergleich der ausschließlichen, hinsichtlich Art, Menge und Zeitpunkt optimal angewendeten Mineraldüngung mit der optimalen Kombination organisch/mineralischer Düngung. Diese beträgt auf Sandböden bis zu 10 %, auf Lehm Böden bis zu 5 %.
4. Kohlenstoff und Stickstoff haben im Boden einen relativ eng begrenzten ökologischen Optimalbereich, der unter den Bedingungen Mitteldeutschlands und vergleichbarer Standorte in praxisüblichen, ackerbaulichen Produktionssystemen zwischen 0,2 % und 0,6 % umsetzbarem C bzw. 0,02 % und 0,06 % N liegt.

Für die Ableitung optimaler C_{org} -Gehalte können folgende Kriterien herangezogen werden:

- Ertrag,
- Nährstoffeffizienz
- Kohlenstoffgewinn bzw. -Akkumulation.

2. Ertragswirksamkeit der OBS

Ziel einer nachhaltigen, landwirtschaftlichen Bodennutzung sind hohe und steigende Erträge je Flächeneinheit, wie sie u. a. in der Agenda 21 und im Jahresgutachten 1994 des „Wissenschaftlichen Beirates der Bundesregierung - Globale Umweltveränderungen“ gefordert werden.

Dabei geht es, wie anlässlich des 15. Bodenkundlichen Weltkongresses formuliert wurde, um „Research for Maximum Yield in Harmonie with Nature“.

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.

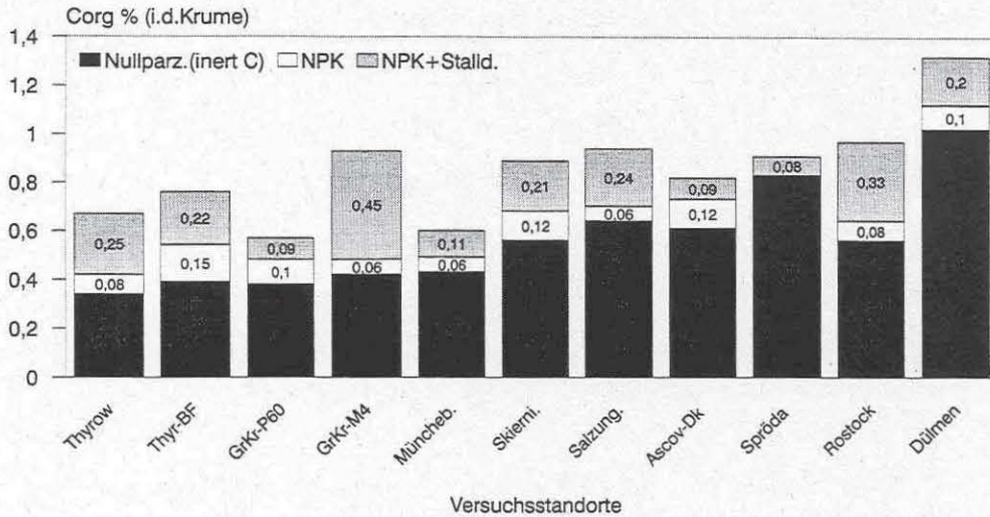


Abb. 1: Einfluß unterschiedlicher Düngung auf den C-Gehalt in ausgewählten Dauerversuchen auf Böden mit einem Tongehalt bis zu 6 %

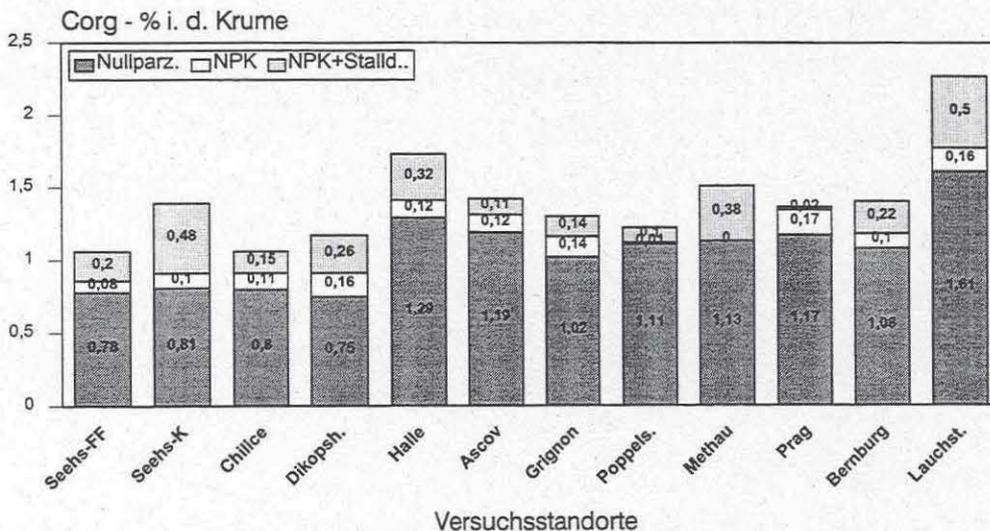


Abb. 2: Einfluß unterschiedlicher Düngung auf den Corg-Gehalt in ausgewählten Dauerversuchen mit mehr als 6 % Ton

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 und Steffens, 1995; Körschens, 1997; Lang, et al. 1995; Scholz, 1978, u. a.).

Die ausschließliche Anwendung von Mineraldüngung hat im Durchschnitt von 23 Dauerfeldversuchen im Vergleich zur ungedüngten Variante eine Erhöhung des umsetzbaren C (C_{ums}) von 0,10 % ergeben. Differenziert nach Bodenart sind dies auf Böden bis zu 6 % Ton 0,09 % C_{ums} , (11 Versuche, Konfidenzintervall ($\alpha=5\%$) = 0,02) und auf Böden > 6 % Ton 0,11 % C_{ums} (12 Versuche, Konfidenzintervall ($\alpha=5\%$) = 0,033) (Abb. 1 und 2).

Bleibt die Frage, wieviel C_{ums} ist notwendig, um die restlichen 5 - 10 % des Ertragspotentials eines Standortes auszuschöpfen. Dazu können einerseits die Dauerfeldversuche, andererseits die über Jahrzehnte gesammelten Erfahrungen der Versuchsansteller genutzt werden.

Zunächst wird nachfolgend der Einfluß unterschiedlicher OBS-Gehalte in Kombination mit differenzierter organischer Düngung und abgestufter Mineral-N-Düngung auf Löß-Schwarzerde im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt über einen Zeitraum von 20 Jahren am Beispiel des Winterweizens geprüft (Abb. 3). Diese Möglichkeit ist einmalig, da kein anderer Dauerversuch die Voraussetzungen bietet, den Einfluß derart großer Abstufungen im C_{org} -Gehalt in Kombination mit Stalldung und Mineral-N zu prüfen.

Winterweizen bringt hohe Erträge, sowohl ohne als auch mit Stalldung (Abb. 3), auf den unteren C-Stufen bei nur geringen Ertragsunterschieden zwischen den verschiedenen Prüfgliedkombinationen. Für den Höchstertrag von 8,65 t/ha werden bei 1,83 % C_{org} 120 kg/ha Mineraldüngerstickstoff benötigt, auf der Stufe mit 2,16 % C_{org} und 80 kg/ha Mineral-N liegt der Ertrag nur 0,25 t/ha darunter. In diesem Bereich ist das ökologische Optimum zu sehen. Von insgesamt 30 Prüfgliedkombinationen erreichen 18 einen Ertrag > 8 t/ha.

Vergleichbare Ergebnisse werden mit Stalldung erzielt. Der Höchstertrag liegt mit 8,57 t/ha nur 0,08 t/ha unter dem ohne Stalldung, in 17 Prüfgliedern wird der Ertrag von 8 t/ha überschritten. Lediglich der Mineral-N-Bedarf, der ohne Stalldung 80 bis 120 kg/ha für den Höchstertragsbereich beträgt, verringert sich mit Stalldung auf 40 bis 80 kg/ha. Damit beschränkt sich die Wirkung von Stalldung und der organischen Bodensubstanz unter den untersuchten Bedingungen weitgehend auf die Stickstoffwirkung.

Auf der ersten C-Stufe mit 1,69 % C_{org} erzielt der Stalldung ohne Mineral-N einen Mehrertrag von 1,98 t/ha, auf der sechsten C-Stufe beträgt die Differenz noch 1,24 t/ha. Wie bereits frühere Auswertungen gezeigt haben, läßt sich die Wirkung der organischen Bodensubstanz und/oder der organischen Düngung auf den Ertrag durch entsprechende Mengen an Mineraldüngung weitgehend substituieren.

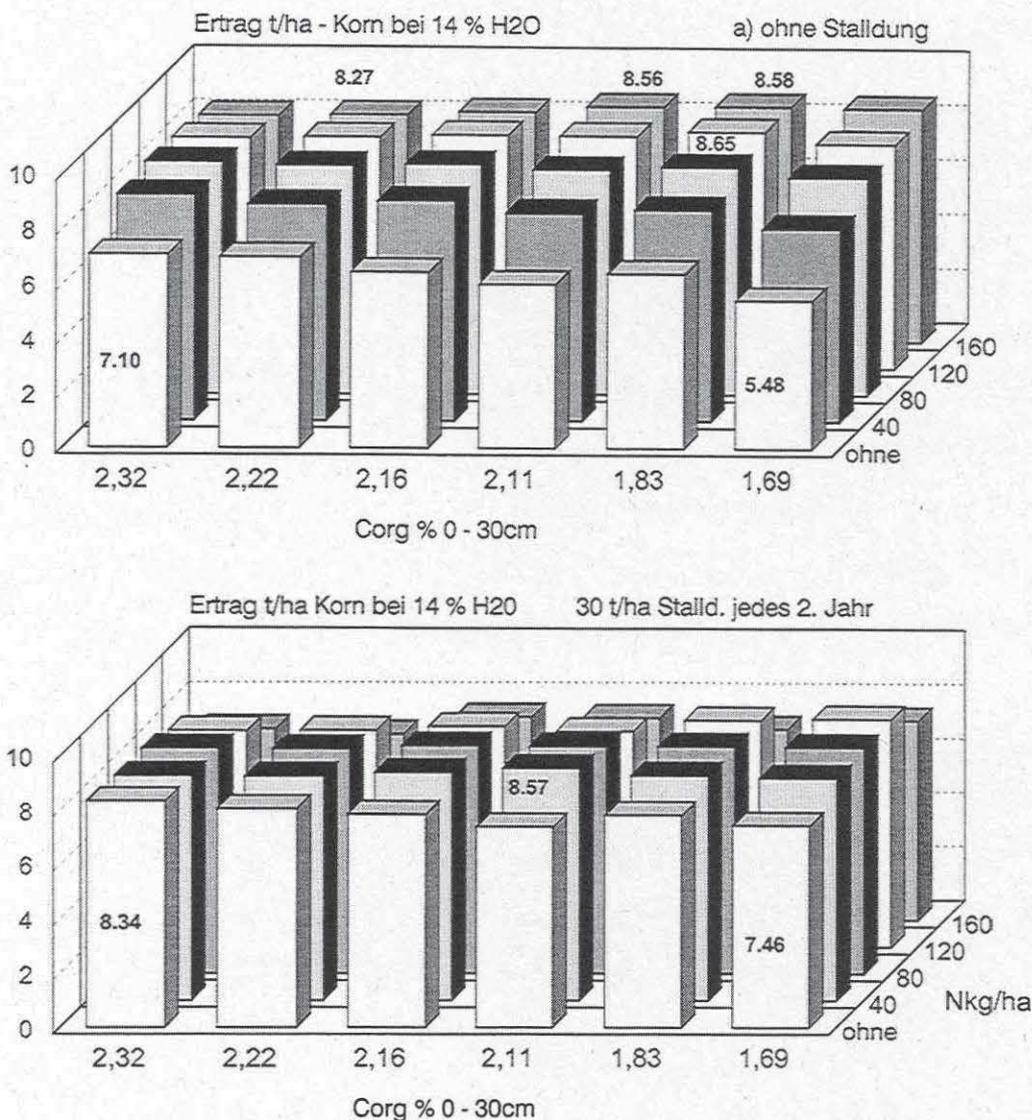


Abb. 3: Winterweizenertrag in Abhängigkeit vom C_{org} -Gehalt und der Mineral- N-Düngung im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt nach Erweiterung der Versuchsfrage. Durchschnitt der Jahre 1980, 1984, 1988, 1992 und 1996.

In Tab. 1 sind die Aussagen verschiedener Autoren für fünf sehr unterschiedliche Standorte zusammengestellt. Die Angaben bewegen sich, trotz sehr großer Standortunterschiede, innerhalb geringer Spannen. Das Anbauverhältnis der verschiedenen Standorte ist mit 40 - 50 % Hackfrucht bzw. 50 - 60 % Halmfrucht vergleichbar. Der für den Höchstertrag erforderliche Stalldungaufwand schwankt nur zwischen 8 und 12 t/ha.a, die damit erreichten

Gehalte an C_{ums} liegen zwischen 0,14 bis 0,51 %. Der Standort Müncheberg reagiert am geringsten auf die Düngung.

Diese Größenordnung entspricht den in Abb. 1 und 2 dargestellten Ergebnissen von insgesamt 23 Dauerfeldversuchen vergleichbarer Standortbedingungen. Lediglich in Höhenlagen und/oder bei sehr hohen Niederschlagsmengen, d. h. bei einer wesentlich verringerten Mineralisierungsintensität, werden z. T. deutlich höhere C_{ums} -Gehalte nachgewiesen.

Tabelle 1

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

Versuchsort	Ton- geh. %	Optim. Düngung	C_{org} - % ohne Düng.	C_{org} - % Optim. D.	C_{org} - % Differ.	Autor
Bad Lauchstädt	21	10 t/ha.a Std.+ NPK	1,61	2,12	0,51	Körschens et al., 1994
Seehausen	8	12 t/ha.a Std.+ NPK	0,81	1,15	0,34	Leithold et al., 1996
Müncheberg	5	8 t/ha.a Std.+NPK	0,48	0,62	0,14	Rogasik, 1998
Groß Kreuz	5	10 t/ha.a Std.+NPK	0,42	0,64	0,22	Asmus, 1995
Thyrow	3	10 t/ha.a Std.+NPK	0,37	0,65	0,28	Lettau/Ell- mer, 1997

Bemerkenswert ist, daß selbst unter indischen Bedingungen vergleichbare Werte festgestellt werden konnten. Im Durchschnitt von 6 Dauerfeldversuchen betragen die C_{ums} -Gehalte 0,33 % bei einer Spannweite von 0,11 bis 0,83 % (Abb. 4).

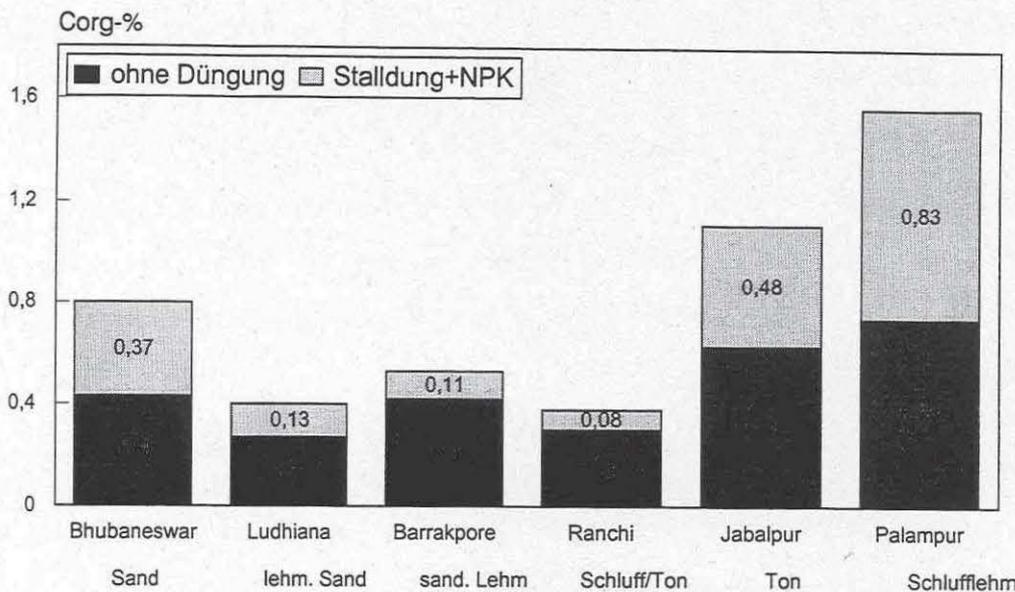


Abb. 4: Corg-Gehalt in der Krume der ungedüngten und der mit Stalldung +NPK gedüngten Prüfglieder nach 19 Versuchsjahren in 6 indischen Dauerfeldversuchen (n. Nambiar, 1992)

Aus den in den Abbildungen 1 und 2 dargestellten Ergebnissen kann abgeleitet werden, daß mit 10 t/ha.a Stalldung der C_{org} -Gehalt im Durchschnitt von 20 Versuchen um 0,22 % im Vergleich zu „ohne“ ansteigt, davon auf Sandböden 0,19 % C_{org} (Spannweite 0,11 - 0,35 %) und auf Lehm Böden 0,25 % (Spannweite 0,05 - 0,46 %).

3. Nährstoffeffizienz

3.1 Stickstoff

Nach der Berücksichtigung der Ertragswirksamkeit der OBS spielt die N-Effizienz eine wichtige Rolle. Sie kann über N-Bilanzen aus Dauerfeldversuchen im Fließgleichgewicht abgeleitet werden. In zahlreichen Arbeiten konnte der Nachweis gebracht werden, daß die Mineraldüngung die höchste Ausnutzung, d. h. die ökologisch günstigste Wirkung hat (Klir et al., 1995; Körschens, 1997; Körschens, et al., 1998; Schnieder, 1990; Weigel et al., 1996). Mit der, im Hinblick auf den Ertrag optimalen Aufwandmenge von 10 t/ha.a Stalldung werden rd. 60 kg N/ha.a appliziert. Zusammen mit dem atmosphärischen N-Eintrag von 50 kg/ha.a (Körschens, et al., 1995; Mehler, 1996; Russow, et al., 1995) sind dies 110 kg/ha. Bezogen auf den durchschnittlichen N-Entzug von 137 kg/ha LF.a in Deutschland (Fleischer, 1998) werden damit bereits 80 % des Entzuges abgedeckt.

Auf dem Standort Bad Lauchstädt wird mit der optimalen Aufwandmenge von 10 t/ha Stalldung jährlich + Mineraldüngung nach Erreichen des Fließgleichgewichtes ein Gehalt an

umsetzbarem C_{org} von 0,5 %, entsprechend 20 t/ha C bzw. 2000 kg/ha N, erreicht. Von dieser Menge werden nach bisherigen Erfahrungen und Berechnungen jährlich 4 %, d. h. 0,8 t C bzw. 80 kg N mineralisiert, die wiederum durch entsprechende Mengen an organischer Primärschubstanz (Ernte- und Wurzelrückstände, Stallung etc.) ersetzt werden müssen. Den experimentellen Nachweis dazu liefern die N-Entzüge ungedüngter Teilstücke mit unterschiedlichen C_{org} -Gehalten des Statischen Düngungsversuches nach Erweiterung der Versuchsfrage (Tab. 2).

Es zeigt sich, daß der Stickstoffentzug ab 2,16 % C_{org} , der einer langjährigen Düngung von 10 t/ha.a Stallung + NPK entspricht, praktisch nicht mehr ansteigt. Gleichzeitig wird deutlich, daß nach ausschließlicher Mineraldüngung im Zeitraum 1902 bis 1977 bei einem vergleichsweise geringen C_{org} -Gehalt relativ mehr N freigesetzt wird als nach Stallung. Dieses Ergebnis spricht für eine andere Qualität der OBS in Richtung einer leichteren Umsetzbarkeit.

Ein Beispiel für die N-Freisetzung (einschließlich atmogener N-Eintrag) bei einem überhöhten Gehalt an C_{ums} zeigt die Abb. 5.

Tabelle 2

Einfluß unterschiedlicher C_{org} -Gehalte des Bodens auf den N-Entzug im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt nach Erweiterung der Versuchsfrage - ohne Düngung

Düngung 1902-1977	C_{org} -% 1977	N-Entzug kg/ha Durchschn.1978-81	N-Entzug kg/ha Summe 1978-1997
ohne	1,69	62	1068
NPK	1,83	104	1524
10 t/ha.a Std.	2,11	101	1480
10 t/ha.a Std. + N	2,16	130	1740
15 t/ha.a Std.	2,22	105	1688
15 t/ha.a Std. +N	2,32	132	1816

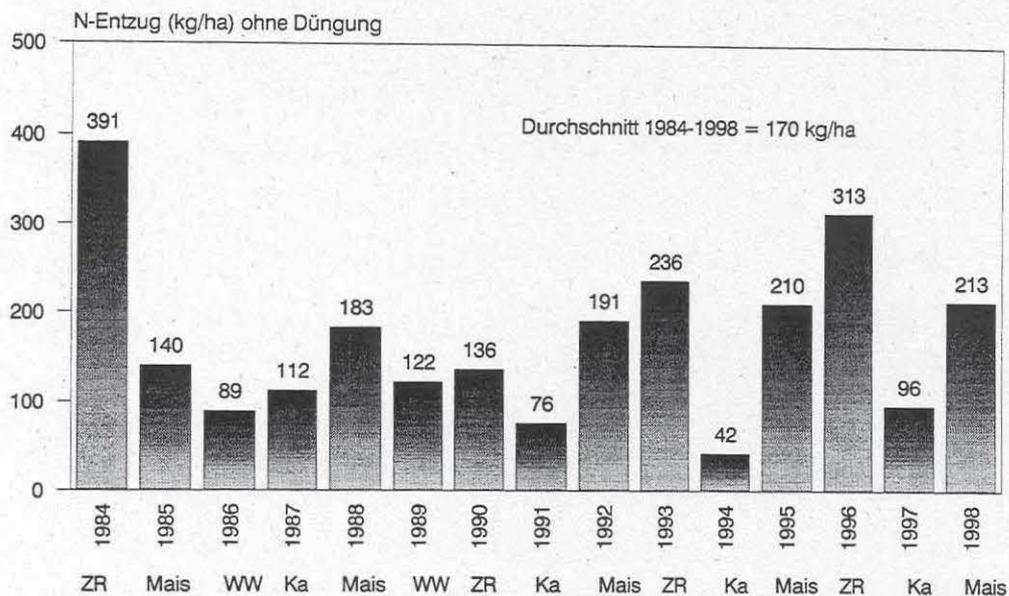


Abb. 5: N-Entzüge der ungedüngten Variante eines 1984 auf Löß-Schwarzerde angelegten Dauerversuches

Im Durchschnitt von 15 Versuchsjahren werden ohne jede Düngung in Abhängigkeit von Fruchtart und Jahreswitterung 170 kg N/ha.a, bei Schwankungen von 42 bis 319 kg/ha, entzogen. Diese N-Freisetzung ist nicht steuerbar und zwangsläufig mit Verlusten verbunden. Die N-Verluste treten insbesondere auf normal oder hoch versorgten Flächen auf, wenn im Falle einer Brache keine N-Aufnahme und N-Abfuhr durch die Pflanzen erfolgt.

3.2 Phosphor und Kalium

Nicht nur der Stickstoff wirkt bei der Anwendung nährstoffreicher Dünger aus der Tierproduktion limitierend im Hinblick auf die Vermeidung von Umweltbelastungen. Auch Phosphor und Kalium werden verschwendet, wenn die aus Gründen der Ertragswirksamkeit als optimal erkannte Menge von 10 t/ha.a überschritten wird. Der P-Entzug je Hektar beträgt im Durchschnitt der Bundesrepublik Deutschland rd. 25 kg/ha LF.a (Fleischer, 1998). Dies entspricht mengenmäßig etwa der Zufuhr von einer Dungeinheit (DE) bzw. einer GV. Im Statischen Düngungsversuch liegen die P-Gehalte im Boden nach 95 Versuchsjahren bei ausschließlicher Düngung mit 10 t/ha.a Stalldung mit 12 mg/100g Boden bereits deutlich über den Optimalwerten der Gehaltsklasse C mit 7 mg/100 g Boden (vgl. Abb. 6). Dies entspricht exakt den Angaben von Fleischer (1998), nachdem mit einer DE bereits die Obergrenze überschritten wird.

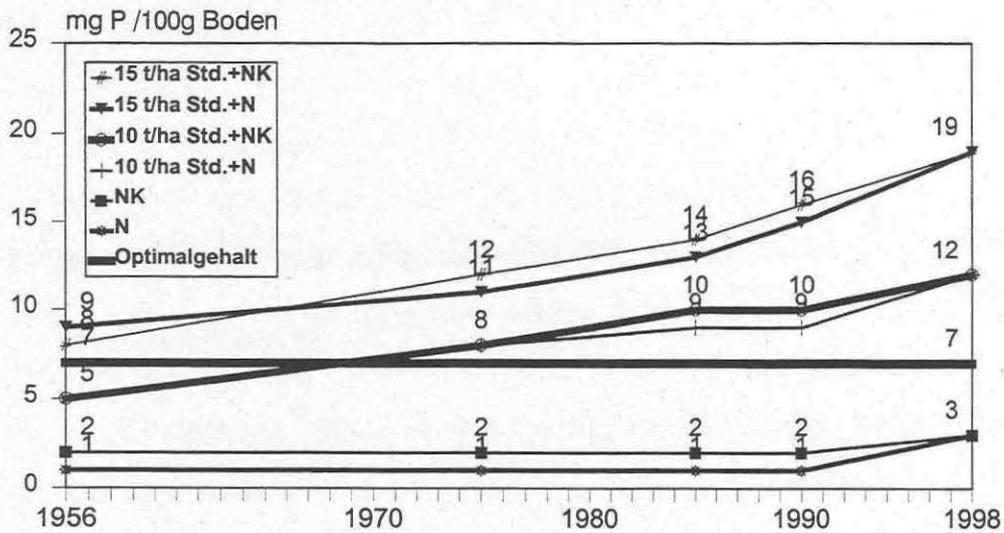


Abb. 6: Einfluß unterschiedlicher Düngung auf den Gehalt des Bodens an Phosphor (DL-Methode) im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt

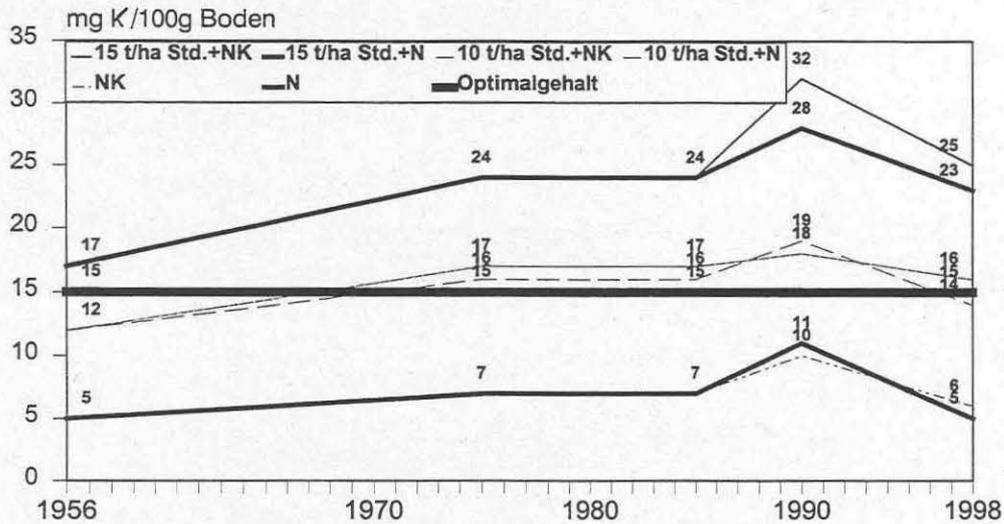


Abb. 7: Einfluß unterschiedlicher Düngung auf den K - Gehalt des Bodens (DL-Methode) im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt

Vergleichbare Ergebnisse zeigen auch die Kaliumgehalte (Abb. 7). Mit 10 t/ha.a Stalldung werden Gehalte im Optimalbereich erreicht, mit 15 t/ha.a Stalldung werden diese bereits deutlich überschritten. Allerdings muß hier die in früheren Jahrzehnten am Standort Bad Lauchstädt nachgewiesene Kaliumdeposition einkalkuliert werden, die sich auch im Anstieg bis 1990 und der darauffolgenden Verringerung des K-Gehaltes bemerkbar macht.

3.3 Kohlenstoff

Die Kohlenstoffbilanzen weisen, ähnlich wie die Stickstoffbilanzen, 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 input und output. 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. In den USA wird dazu eine Serie von Konferenzen zum Thema „Management of Carbon Sequestration in Soil“ durchgeführt. Für ackerbaulich genutzte Böden kann diese Möglichkeit weitgehend ausgeschlossen werden, wie folgendes Beispiel zeigt:

Im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt hat sich nach rd. 70 Jahren auf allen Düngungsstufen ein Fließgleichgewicht eingestellt (Abb. 8). 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 rd. 60 t/ha C in Form von Stalldung aufgewendet werden.

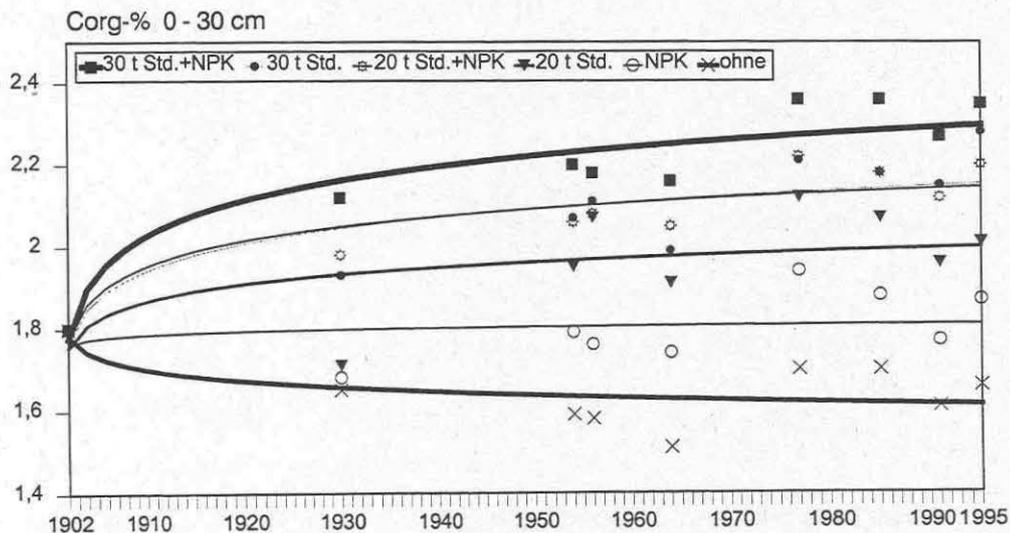


Abb. 8: Dynamik der Corg-Gehalte in Abhängigkeit von der Düngung im Statischen Düngungsversuch Bad Lauchstädt (Messpunkte und Regressionslinie)

Der gleiche Effekt kann auch mit Strohdüngung erreicht werden. Dies erfordert jedoch deutlich größere C-Mengen, da die C-Verbindungen im Stroh im Vergleich zu Stalldung 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 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 ertraglich und nährstoffmäßig begründete Optimum hinaus bringt demnach keinen vertretbaren Akkumulationseffekt, erhöht die Gefahr von N-Verlusten (da an dem Kohlenstoff der OBS immer Stickstoff im Verhältnis von rd. 10:1 gebunden ist) und stellt letztlich eine weitgehend unproduktive „Verbrennung“ von Kohlenstoff dar.

4. Humusbilanz

In den 70er Jahren wurde eine Methode zur Bilanzierung der organischen Substanz des Bodens zur Sicherung der einfachen Reproduktion der OBS erarbeitet und in die Praxis eingeführt (Autorenkollektiv, 1977; Körschens, 1997). Diese Methode basiert ebenfalls auf umfangreichen Ergebnissen zahlreicher Dauerfeldversuche und kann daher als sehr zuverlässig gelten. Sie wird heute u. a. in den Ländern Thüringen und Bayern angewendet.

Berechnet man für die in Tab. 1 ausgewiesenen Optimalgehalte bzw. optimalen Aufwandmengen die Humusbilanz, so ergibt sich der nachstehend ausgewiesene Bedarf an Reproduktionswirksamer Organischer Substanz (ROS) bzw. Stalldung:

Bedarf an ROS bzw. Stalldung zum Ausgleich der Humusbilanz:

Bad Lauchstädt	2 t/ha.a	ROS = 10 t/ha.a	Stalldung
Seehausen	2,5 t/ha.a	ROS = 12,5 t/ha.a	Stalldung
Müncheberg	2,5 t/ha.a	ROS = 12,5 t/ha.a	Stalldung
Groß Kreutz	2,5 t/ha.a	ROS = 12,5 t/ha.a	Stalldung
Thyrow	2,3 t/ha.a	ROS = 11,5 t/ha.a	Stalldung

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Aussagen der Richtwerte mit denen der Humusbilanzmethode. Die Abweichungen liegen zwischen 0 und 4,5 t/ha.a Stalldung und betragen im Durchschnitt nur 1,8 t/ha.a Stalldung.

Diskussion und Schlußfolgerungen

Die Ergebnisse zahlreicher Dauerfeldversuche bestätigen zunächst die Richtigkeit der methodischen Vorgehensweise und die Größenordnung bisheriger Aussagen zum Optimalbereich für den C_{ums} -Gehalt. Letztlich können als experimentelle Grundlage zur Lösung dieses Problems ausschließlich Dauerfeldversuche genutzt werden, die das Fließgleichgewicht annähernd erreicht haben. Grund dafür ist die Tatsache, daß die Veränderungen des C_{org} -Gehaltes im Boden sehr langsam verlaufen und selbst bei extremer Änderung des Düngungsregimes nur etwa 0,01 % C_{org} jährlich betragen, der Fehler mit 0,1 % C_{org} jedoch das 10fache dieser Menge ausmacht (Körschens, et al., 1998).

Nicht alle Versuche konnten in die Auswertung zur Quantifizierung des Einflusses unterschiedlicher Düngung auf den C_{ums} -Gehalt einbezogen werden, weil von einigen Versuchen

- keine oder keine ausreichend genauen Angaben zum C- und N-Gehalt im Boden vorliegen,
- keine ausreichende Abstufung der Düngung gegeben ist (im Broadbalkfield in Rothamsted ist z. B. nur eine organische Düngungsstufe mit 35 t/ha.a Stalldung vorhanden, die außerhalb praxisrelevanter Größenordnungen liegt),
- die Klimabedingungen nicht vergleichbar sind (so kann z. B. der Standort Lauterbach mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 6,3 °C und einer Niederschlagsmenge von 900 mm nicht in die betrachtete Grundgesamtheit einbezogen werden).

Die abgeleiteten Aussagen beziehen sich auf die Standortbedingungen Mitteldeutschlands und vergleichbarer Standorte mit etwa 400 bis 800 mm Jahresniederschlag und einer Jahresdurchschnittstemperatur zwischen 6 und 10 °C.

Die Ergebnisse im Einzelnen unterliegen starken Schwankungen, bedingt durch unterschiedliche Bodentypen und -arten, Fruchtfolge, Leguminosenanteile in der Fruchtfolge, Jahreswitterung etc. Deshalb muß und kann mit relativ großen Toleranzbereichen gerechnet werden, wobei 50 % durchaus akzeptabel sind. So kann zum Beispiel bei einer optimalen Stalldungaufwandmenge von 10 t/ha.a eine Spannweite von 5 t/ha bis 15 t/ha.a durchaus toleriert werden. 5 t/ha.a sind in der Langzeitwirkung 0,1 % C_{org} gleichzusetzen und bewirken

nur einen kaum meßbaren Ertragsabfall, 15 t/ha.a wirken sich ertraglich nicht aus, bringen aber bereits, wenn auch geringe, Nährstoffverluste mit sich. Größere Mengen haben negative Folgen für die Umwelt.

Es zeigt sich, daß aus der Sicht der Nährstoffeffizienz und damit der Umweltrelevanz die oberen Grenzen schnell erreicht werden.

Unter Einbeziehung umfangreicher Auswertungen von Dauerfeldversuchen, die hier nicht dargestellt sind, kann geschlußfolgert werden, daß hohe Erträge durchaus auf ökologische Weise erreicht werden können. Ausschließliche Mineraldüngung ermöglicht mindestens 90 % der Höchsterträge, ausschließliche organische Düngung nur etwa 70 % (Besson, et al., 1991; Piorr u. Werner, 1998, u. a.).

Es gilt auch als nachgewiesen, daß eine Brache negativ auf den C- und N-Kreislauf wirkt.

Trotzdem gibt die EU jährlich viele Milliarden EURO für den Import von 50 Millionen Tonnen Futtermittel aus und zahlt gleichzeitig den Landwirten viele Milliarden EURO für die Brachlegung von Ackerland, d.h. dafür, daß sie die importierten Futtermengen nicht selbst produzieren. Die politischen Hintergründe für diese Maßnahmen sind schwer zu begreifen. Ökologisch, moralisch und auch ökonomisch sind sie sinnlos. Desgleichen ist die Empfehlung des Wuppertal-Instituts, für ein zukunftsfähiges Deutschland bis zum Jahre 2010 flächendeckend den sogenannten ökologischen Landbau einzuführen, wissenschaftlich nicht zu begründen.

Häufig werden, insbesondere im Zusammenhang mit dem organischen Landbau, geschlossene Stoffkreisläufe gefordert. Dies war vor 50 Jahren richtig und notwendig, kann aber heute als weitgehend überholt angesehen werden. Z. B. exportiert ein Marktfruchtbetrieb jährlich je Hektar Ackerland u. a. etwa

3 bis 4 t	Kohlenstoff
100 bis 150 kg	Stickstoff
20 bis 25 kg	Phosphor
100 bis 150 kg	Kalium.

Diese Nährstoffe verlassen die betrieblichen und auch regionalen Kreisläufe, trotzdem gelangen über die Ernte- und Wurzelrückstände, Stroh und Rübenblatt mehr als ausreichende Mengen an organischer Substanz zurück in den Boden, die Entzüge der übrigen Nährstoffe können sehr gezielt über Mineraldünger ausgeglichen werden.

Demgegenüber ist in einem viehhaltenden Betrieb bei einem Viehbesatz ab 1,5 GV/ha AL bei einem geschlossenen Stoffkreislauf, bezogen auf die organischen Dünger der Tierproduktion, die Umweltverträglichkeit nicht mehr gegeben.

Hier gilt auch heute noch der Satz von **Liebig**:

„Als Prinzip des Ackerbaus muß angenommen werden, daß der Boden in vollem Maße wieder erhalten muß, was ihm genommen wird.....in welcher Form dieses Wiedergeben geschieht, ob in Form von Exkrementen oder von Asche oder Knochen, dies ist wohl ziemlich gleichgültig“.

Es geht also vielmehr darum, die globalen Stoffkreisläufe sinnvoll zu gestalten.

Die unter Pkt. 4 angeführte Humusbilanzmethode hat sich bewährt und ist in der Praxis eingeführt. Die Aussagen dieser Bilanzmethode laufen weitgehend konform mit den optimalen C_{ums} -Gehalten. Eine ausgeglichene Bilanz über einen längeren Zeitraum von 10, besser von 20 Jahren muß demnach zwangsläufig zu optimalen Gehalten führen.

Eine direkte Bestimmung der C_{ums} -Gehalte und ihre Veränderungen über mehrere Jahre ist, u. a. bedingt durch die bekannte große Variabilität dieses Parameters, schwer möglich.

Als geeignetes Kriterium für den umsetzbaren Kohlenstoff hat sich der heißwasserlösliche Kohlenstoff (C_{hwl}) erwiesen. Im Vergleich der analytisch bestimmten C_{hwl} -Werte mit den vorgegebenen Tabellenwerten (Gehaltsklassen) kann der Versorgungszustand des Bodens mit umsetzbarer organischer Substanz ermittelt werden (Körschens, 1990; Schulz, 1990; Körschens et al., 1997). Diese Methode geht 1999 in die Praxiserprobung.

Die bisherigen Ergebnisse erlauben folgende zusammenfassende Schlußfolgerungen:

- Ziele einer nachhaltigen, landwirtschaftlichen Bodennutzung sind hohe und steigende Erträge bei Vermeidung von Umweltbelastungen.
- Höchsterträge sind auf umweltverträgliche Art nur in der Kombination organischer und mineralischer Düngung zu erreichen.
- Der Einsatz von Mineraldüngung hat, bei konsequenter Beachtung des gegenwärtigen Kenntnisstandes, keinen negativen Einfluß auf die Umwelt.
- Überhöhte Humusgehalte können zu Umweltbelastungen, insbesondere durch Beeinflussung des C- und N-Haushaltes der Atmosphäre und der Beeinträchtigung der Qualität des Grundwassers beitragen.
- Mit den Richtwerten für optimale C_{org} -Gehalte und der „Humusbilanzmethode“ ist die Möglichkeit gegeben, den Gehalt der Ackerböden an organischer Substanz so zu steuern, daß hohe Erträge bei weitgehender Vermeidung von Umweltbelastungen erreicht werden.

Literatur

Asmus, F.: Versuch M 4 Groß Kreuz - Wirkung organischer und mineralischer Düngung und ihrer Kombination auf Pflanzenertrag und Bodeneigenschaften. In: Akademie der Landwirtschaftswissenschaften (ed.): Dauerfeldversuche. Terra-Druck GmbH Olbernhau, 245-250 (1990a)

Asmus, F.: Ergebnisse aus einem langjährigen Dauerfeldversuch zur organisch-mineralischen Düngung auf Tieflehm-Fahlerde. Arch. Acker-Pfl. Boden., Berlin 39, 359-367 (1995)

Autorenkollektiv: Empfehlungen zur effektiven Versorgung der Böden mit organischer Substanz. Hrsg.: Akad. d. Landw.-Wissensch. der DDR, agrabuch, Leipzig, 6 (1977)

Besson, J. M.; Meyre, S.; Niggli, U.: DOK-Versuch: vergleichenden Langzeit-Untersuchungen in den drei Anbausystemen biologisch-dynamisch, organisch-biologisch und konventionell. II. Ertrag der Kulturen: Kartoffeln, 1. und 2. Fruchtfolgeperiode. Schweiz. Landw. Fo., Recherche agronom en Suisse 31 (4), 127 - 155 (1991)

Fleischer, E.: Nutztierhaltung und Nährstoffbilanzen in der Landwirtschaft. 1. Aufl., Berlin: Analytica, 1998, (Angewandte Umweltforschung; Bd. 10)

Gericke, S.: Probleme der Humuswirtschaft.- In: Probleme der Wissenschaft in Vergangenheit und Gegenwart. Wiss. Editions-gesellschaft Berlin, Berlin, 51 - 168 (1948)

Klasink, A. and Steffens, G.: Der Internationale Organische Stickstoffdauerdüngungsversuch (IOSDV) Oldenburg nach neun Versuchsjahren. Arch. Acker-Pfl. Boden., Berlin 39, 449 - 460 (1995)

Klir, J.; Kubat, J. and Pova, D.: Stickstoffbilanzen der Dauerfeldversuche in Prag. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 67, 831 - 834 (1995)

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

Körschens, M.; Stegemann, K.; Pfefferkorn, A.; Weise, V. and Müller, A.: Der Statische Düngungsversuch Bad Lauchstädt nach 90 Jahren. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart-Leipzig, 179 S. (1994)

Körschens, M.; Müller, A.; Kunschke, A.; Klimanek, E.-M.; Pfefferkorn, A.; Waldschmidt, U.: Aufklärung und quantitative Erfassung der C- und N-Dynamik auf Lößschwarzerde als Voraussetzung für eine ökologisch begründete N-Düngung und Ausnutzung unter Vermeidung von Umweltbelastungen.- In: Körschens, M. u. Mahn, E.-G. (Hrsg.): Strategien zur Regeneration belasteter Agrarökosysteme des mitteldeutschen Schwarzerdegebietes. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart - Leipzig, 167 – 202 (1995)

Körschens, M.: Abhängigkeit der organischen Bodensubstanz (OBS) von Standort und Bewirtschaftung sowie ihr Einfluß auf Ertrag und Bodeneigenschaften. Arch. Acker-Pfl. Boden., Berlin 41, 435 - 463 (1997)

Körschens, M.; Schulz, E.; Klimanek, E.-M. and Franko, U.: Die organische Bodensubstanz - Bedeutung, Definition, Bestimmung. Arch. Acker-Pfl. Boden., Berlin 41, 6, 427 - 433 (1997)

Körschens, M.; Schulz, E.; Titova, N. A.: Humusdynamik auf Löß-Schwarzerde. Eurasian Soil Science, (1998) (im Druck)

Lang, H.; Dressel, J. and Bleiholder, H.: Langzeitwirkung der Stickstoffdüngung IOSDV-Standort Limburgerhof (Deutschland) in der Reihe „Internationale organische Stickstoff-dauerdüngungsversuche“. Arch. Acker- Pfl. Boden., Berlin 39, 429-448 (1995)

Leithold, G.; Hülsbergen, K. J.; Michel, D. and Schönmeier, H.: Humusbilanzierung. Methoden und Anwendung als Agrar-Umweltindikator. Initiativen zum Umweltschutz. Osnabrück, Deutsche Bundesstiftung Umwelt 3, (1996)

Lettau, T. and Ellmer, F.: Kohlenstoffgehalte und -bilanzen nach langjährig differenzierter Düngung eines Sandbodens - Ergebnisse aus einem Dauerfeldversuch. 109. VDLUFA-Kongress 15. bis 19. September 1997 in Leipzig, VDLUFA-Verlag Darmstadt, S. 99 (1997)

Mehlert, S.: Untersuchungen zur atmosphärischen Stickstoffdeposition und zur Nitratverlagerung. Dissertation, UFZ-Bericht, 143 S. (1996)

Nambiar, K. K. M.: Annual Report 1987-1988 u. 1988-1989 All India Coordinated Research Project on Long-Term Fertilizer Experiments (IACR). Indian Agriculture Research Institute New Delhi, (1992)

Pierr, A.; Werner, W.: Nachhaltige landwirtschaftliche Produktionssysteme im Vergleich: Bewertung anhand von Umweltindikatoren. Agrarspectrum, Schriftenreihe des Dachverbandes Wissenschaftlicher Gesellschaften der Agrar-, Forst-, Ernährungs-, Veterinär- und Umweltforschung e. V., Bd. 28 (1998)

Rogasik, J.: mündliche Mitteilung

Russow, R.; Faust, H.; Dittrich, P.; Schmidt, G.; Mehlert, S. and Sich, I.: Untersuchungen zur N-Transformation und zum N-Transfer in ausgewählten Agrarökosystemen mittels der Stabilisotopentechnik.- In: Körschens, M.; Mahn, G. (Hrsg.) Strategien zur Regeneration belasteter Agrarökosysteme des mitteldeutschen Schwarzerdegebietes. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart - Leipzig, 131 - 166 (1995)

Schnieder, E.: Die Dauerversuche in Thyrow, in Akademie der Landwirtschaftswissenschaften (ed.): Dauerfeldversuche. Terra-Druck GmbH Olbernhau, 205 - 229 (1990)

Scholz, S.: Beziehung zwischen OBS-Gehalt und Ertrag, abgeleitet aus Dauerversuchen. Synthetische Information, Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg, Bereich Bad Lauchstädt (1978)

Schulz, E.: Die heißwasserextrahierbare C-Fraktion als Kenngröße zur Einschätzung des Versorgungszustandes der Böden mit organischer Substanz (OS). Tag.-Ber. Akad. Landwirtsch.-Wiss., Berlin 295, 269 - 275 (1990)

Weigel, A.; Mercik, S.; Körschens, M.; Ritzkowski, E.-M.: Stickstoff- und Kohlenstoffbilanzen ausgewählter Varianten siebzigjähriger Dauerfeldversuche auf Sandboden in Skierniwece (Polen) im Vergleich zur Löß-Schwarzerde in Bad Lauchstädt. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 79, 227 - 230 (1996)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 0339697 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

**Beziehungen zwischen organischer Bodensubstanz
und bodenmikrobiologischen Prozessen**

**Ehrenkolloquium
anlässlich des 60. Geburtstages von
Frau Dr. habil. Eva-Maria Klimanek**

Martin Körschens (Hrsg.)