

Aus dem Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde

**Rogasik J
Obenauf S
Lüttich M
Ellerbrock R**

Faktoreinsatz in der Landwirtschaft

Manuskript, zu finden in www.fal.de

**Braunschweig
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
Erscheinungsjahr 1997**

Also available at: <http://www.pb.fal.de/en/library/publications/pb.1600pdf>

FAKTOREINSATZ IN DER LANDWIRTSCHAFT – EIN BEITRAG ZUR RESSOURCENSCHONUNG (DATEN UND ANALYSEN AUS DEM MÜNCHEBERGER NÄHRSTOFF- STEIGERUNGSVERSUCH)

JUTTA ROGASIK^a, SUSANNE OBENAUF^a, MANFRED LÜTTICH^a
and RUTH ELLERBROCK^{b,*}

^a*Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode, Institut für
agrarrelevante Klimaforschung, Müncheberg, Germany*

^b*Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e. V., Institut für
Bodenlandschaftsforschung, Müncheberg, Germany*

(Received 17 August 1997)

Dargestellt werden ausgewählte Ergebnisse des Müncheberger Nährstoffsteigerungsversuches unter dem Aspekt des Ressourcenschutzes – Energie, Boden, Wasser und Luft.

Energie/CO₂: Durch den verantwortungsvollen Faktoreinsatz in der Landwirtschaft (mineralische und organische Düngemittel, Treib- und Schmierstoffe) kann der Energieeinsatz und damit die CO₂-Emission im Vorleistungsbereich der Landwirtschaft reduziert werden.

Boden: Die Untersuchungen haben gezeigt, daß kombinierte organisch-mineralische Düngung eine wesentliche Maßnahme ist, optimale Humusgehalte im Boden zu sichern. Menge und Qualität der organischen Bodensubstanz werden durch das Management beeinflusst.

Luft, Wasser: Die Höhe der Düngung beeinflusst über die NO₃-Konzentration im Boden entscheidend die N₂O-Abgaberraten in die Atmosphäre bzw. Nitrat austräge ins Grundwasser. Erfolgreiche N₂O-Vermeidungsstrategien sind in Managementmaßnahmen zu sehen, die ein optimales Pflanzenwachstum gewährleisten und N-Verluste aus dem System Boden-Pflanze verhindern.

STICHWORTE: Dauerversuch, Energieeinsatz, CO₂-Emission, Boden, C-Speicherung, N-Bilanz, N₂O-Emission

USE OF AGRICULTURAL INPUTS – A CONTRIBUTION TO PROTECTING THE NATURAL RESOURCES (DATA AND ANALYSIS OF THE MÜNCHEBERG LONG-TERM FERTILIZER EXPERIMENT)

Selected results of the Müncheberg Long-Term Fertilizer Experiment are reported with regard to protecting the natural resources energy, soil, water, and atmosphere.

Energy/CO₂: Reasonable use of agricultural inputs (mineral fertilizer, animal manure, fuel and oil) will reduce the CO₂ emissions without diminishing yields.

*Jutta Rogasik, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode, Institut für agrarrelevante Klimaforschung, Müncheberg, Eberswalder Straße 84 F, 15374 Müncheberg, Germany

Soils: The investigations showed that organic manuring in combination with mineral N fertilization are main measures to ensure optimal carbon contents in soil. Quantity (amount of SOM) and quality (molecular weight, functionality) are influenced by management.

Water, atmosphere: N surplus due to high amounts of fertilizer is the primary cause of increased NO_3 concentration in soil and enhanced N_2O emissions from N-fertilized fields. A successful N_2O mitigation strategy is achieved by a management directed to provide N at the time and place required by the plant to optimize growth and decrease the amount of N that is lost from the soil-plant system.

KEY WORDS: Long-term experiment, agricultural input, energy use, CO_2 emission, soil, C-sequestration, N balance, N_2O emission

EINLEITUNG

Der Müncheberger Nährstoffsteigerungsversuch V 140/00 gehört zu den wenigen in der Bundesrepublik Deutschland auf sandigen Ackerstandorten mit mehr als 30 Versuchsjahren erhaltenen Dauerversuchen. Er ist eine wichtige Forschungsgrundlage, vor allem, wenn es um Konzepte nachhaltiger Bodennutzung geht.

Neben den Untersuchungen zur Langzeitwirkung kombinierter mineralisch-organischer Düngung im Vergleich zu alleiniger Mineraldüngung auf Ertragsentwicklung, Nährstoffbilanzen und Bodenfruchtbarkeit wurden zunehmend Aspekte des ressourcenschonenden Einsatzes von Produktionsmitteln in die Prüfung einbezogen. Die gegenwärtige Diskussion um umwelt- und klimarelevante Wirkungen von landwirtschaftlichen Produktionsverfahren und um Nutzungsalternativen wirft vor allem Fragen nach

- dem Verhältnis von eingesetzter und erzeugter Energie
- dem Erhalt der Regelungs-, Nutzungs- und Kulturfunktionen der Böden,
- den Wirkungen auf die CO_2 -Produktion und dem dadurch verursachten Treibhauseffekt,
- der "Belastbarkeit" von Ökosystemen und natürlichen Ressourcen in Bezug auf Nachhaltigkeit von Landnutzungssystemen

auf. Auch hier gehören Dauerfeldversuche zu den grundlegenden Erkenntnismitteln. Sie sind für die Agrar- und Umweltforschung zur Quantifizierung dieser Langzeiteffekte unentbehrlich. Dieser Feststellung folgend, sollen anhand ausgewählter Ergebnisse des Müncheberger Dauerversuches die Wirkungen von organischer und mineralischer Düngung auf Energieverbrauch im Vorleistungsbereich der Landwirtschaft und CO_2 -Emission, Änderungen der C-Speicherung im Boden sowie auf Nährstoffbilanzierung und die Emissionen klimarelevanter Spurengase aus Böden bei unterschiedlicher Nutzungsintensität einschließlich der Aufklärung von Regulationsmechanismen quantifiziert werden.

MATERIAL UND METHODEN

Allgemeine Standortbedingungen

Physisch-geographische Lage

14° 7,4'E, 52° 31,0' N, Ostbrandenburger
Platte; Untereinheit Lebus-Platte; 62 m über
NN

| | |
|---|--|
| Geologische Entstehung / Geologische Formation | Grundmoräne aus fennoskandinavischem Ausgangsmaterial / Jungpleistozän |
| Geologisches Ausgangssubstrat der Bodenbildung | Geschiebesand über Unterem Diluvialsand und Geschiebemergel des Frankfurter Stadi- als der Weichselvereisung |
| Bodenart | lehmiger Sand |
| Bodenformen-Gesellschaft | Rosterde, Braunerde, Parabraunerde, Sandtieflehm-Fahlerde |
| FAO-Bodenklassifikation | Leptic Podzol, Luvic und Cambic Arenosol, Eutric Podzoluvisol |
| Klassenzeichen der Bodenschätzung | S1 4 D |

Bodeneigenschaften im Versuch (Durchschnittswerte, Krume)

Bodeneigenschaften

Korngrößenzusammensetzung:

| | | | |
|------------------------------|------------------------|---------------------------------|------|
| Ton | < 2,0 μm | % | 5 |
| Feinschluff | 6,3–2,0 μm | % | 3 |
| Mittelschluff | 20–6,3 μm | % | 5 |
| Grobschluff | 63–20 μm | % | 13 |
| Feinsand | 200–63 μm | % | 44 |
| Mittelsand | 630–200 μm | % | 24 |
| Grobsand | 2000–630 μm | % | 6 |
| Trockenrohddichte (d_p) | | $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | 1,5 |
| Festsubstanzdichte (d_f) | | $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ | 2,62 |
| Hygroskopizität | | Masse % | 0,98 |
| nutzbare Feldkapazität | | Vol. % | 12,5 |
| Ct | | % | 0,60 |
| Nt | | % | 0,05 |
| (N) | | | 12 |
| pH | | | 5,4 |
| P (DL) | | $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 68 |
| K (DL) | | $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 112 |
| Mg | | $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 44 |
| Sorptionskapazität | | $\text{meq}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 41 |

Klimatisch-meteorologische Standortbedingungen (Abb. 1)

| | |
|------------------------------------|---|
| Klimagebiet nach BOER | 3 – stark kontinental beeinflusstes Binnenlandklima (ostdeutsches Binnenlandklima), Grenzbereich zum mecklenburgisch-brandenburgischen Übergangsklima |
| Kontinentalitätsgrad nach JOHANSON | 50 |

Mittlere Windrichtungsverteilung in %

| | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|---|---|----|-------|
| W | SW | NW | SO | S | O | N | NO | Still |
| 20 | 19 | 11 | 12 | 11 | 9 | 7 | 6 | 5 |

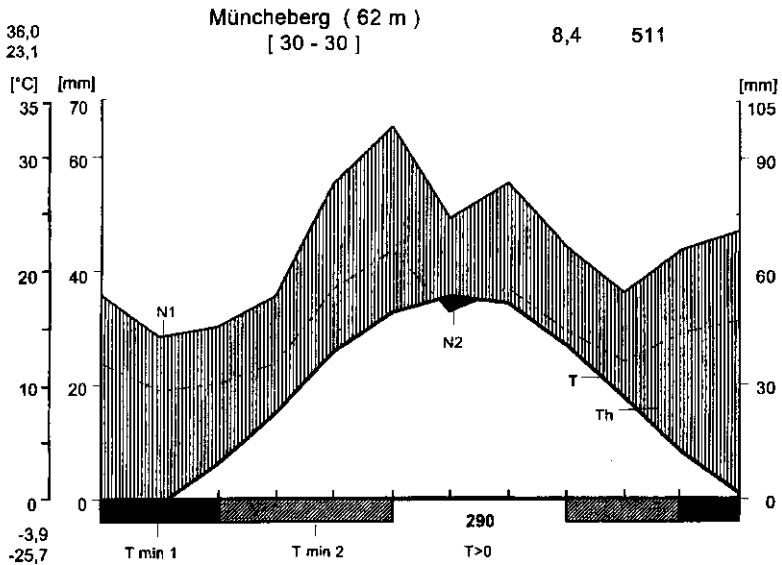
Mittlere relative Luftfeuchte 80 %
 Mittlere Sonnenscheindauer 1648 h·a⁻¹
 Mittlerer Wasserdampfdruck 9,3 kPa
 Vegetationszeit 215 Tage (> 5°C), 154 Tage (> 10°C)

Versuchsbeschreibung

Prüffaktoren und Stufen

Die 21 nachfolgend aufgeführten Düngewarianten werden in einer zweifaktoriellen Blockanlage (AxB)-R mit 8 Wiederholungen (168 Teilstücke, total randomisiert) geprüft (Tab. 1, 2, 3).

Der Versuch lief bis 1993 in einer Hackfrucht-Getreide-Rotation ohne Landwechsel (Smukalski *et al.*, 1990). Ab 1994 wurden Öllein und Erbsen in die



- T Kurve der mittleren Monatstemperaturen
- Th relativ humide Jahreszeit (vertikal schraffiert)
- N₁ Kurve der mittleren monatlichen Niederschläge (im Verhältnis 10°C = 20 mm)
- N₂ erniedrigte Niederschlagskurve (10°C = 30mm; schwarze Fläche = Trockenzeit)
- T_{min1} Monate mit mittlerem Tagesminimum unter 0°C
- T_{min2} Monate mit absolutem Minimum unter 0°C
- T>0 mittlere Dauer von Tagesmitteln über 0°C

Abb. 1 Klimadiagramm nach Walter für den Versuchsstandort Müncheberg (Beobachtungsjahre 1961 bis 1990)
 Fig. 1 Climatic observations of the Müncheberg site (1961–1990)

Tabelle 1 Prüffaktoren und Stufen des Müncheberger Nährstoffsteigerungsversuches V 140/00 bis 1993

Table 1 Treatments and summary of fertilizer inputs of the Müncheberg Long Term Fertilizer Experiment V 140/00 until 1993

| PG. | Düngungs- variante | Organische Düngung | Mineraldüngung [$kg \cdot ha^{-1}$] ¹ | | |
|-----|-----------------------|--|--|----|-----|
| | | TM [$dt \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$] | N | P | K |
| 0 | ohne | 0 | 0 | 7 | 26 |
| 1.1 | NPK | 0 | 52 | 30 | 122 |
| 1.2 | NPK | 0 | 89 | 35 | 140 |
| 1.3 | NPK | 0 | 118 | 38 | 150 |
| 1.4 | NPK | 0 | 157 | 43 | 171 |
| 1.5 | NPK | 0 | 193 | 48 | 188 |
| 2.1 | NPK+Stm 1 | 12 | 32 | 26 | 104 |
| 2.2 | NPK+Stm 1 | 12 | 68 | 30 | 122 |
| 2.3 | NPK+Stm 1 | 12 | 116 | 36 | 145 |
| 2.4 | NPK+Stm 1 | 12 | 139 | 39 | 156 |
| 2.5 | NPK+Stm 1 | 12 | 169 | 42 | 167 |
| 3.1 | NPK+Stm 2 | 32 | 9 | 24 | 100 |
| 3.2 | NPK+Stm 2 | 32 | 52 | 30 | 121 |
| 3.3 | NPK+Stm 2 | 32 | 77 | 31 | 126 |
| 3.4 | NPK+Stm 2 | 32 | 118 | 37 | 149 |
| 3.5 | NPK+Stm 2 | 32 | 150 | 42 | 164 |
| 4.1 | NPK+Stroh | 20 | 65 | 34 | 123 |
| 4.2 | NPK+Stroh | 20 | 101 | 38 | 141 |
| 4.3 | NPK+Stroh | 20 | 138 | 43 | 159 |
| 4.4 | NPK+Stroh | 20 | 161 | 45 | 163 |
| 4.5 | NPK+Stroh | 20 | 191 | 47 | 169 |

¹Düngungsstufen \bar{x} bis 1993 der Fruchtfolge: Silomais (1963), Winterroggen (1964), Kartoffeln, Winterroggen, Kartoffeln, Sommerweizen, Zuckerrüben, Sommergerste, Silomais, Winterroggen, Kartoffeln, Winterweizen, Zuckerrüben, Sommergerste, Zuckerrüben, Sommergerste, Zuckerrüben, Sommergerste, Kartoffeln, Winterweizen, Zuckerrüben, Sommergerste, Kartoffeln, Winterweizen, Zuckerrüben, Sommergerste, Kartoffeln, Winterweizen, Zuckerrüben (1993)

Tabelle 2 Prüffaktoren und Stufen des Müncheberger Nährstoffsteigerungsversuches V 140/00 ab 1994
Table 2 Treatments and fertilizer inputs of the Müncheberg Long Term Fertilizer Experiment V 140/00 from 1994

| PG. | Düngungs- variante | mineralische N-Düngung [kg·ha ⁻¹] | | | | | | | |
|-----|-----------------------|---|------|------------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|
| | | WW ² | Mais | HWR ³ | Öllein | WR ⁴ | ZR ⁵ | SG ⁶ | Erbsen |
| 0 | ohne | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.1 | NPK | 35 | 40 | 35 | 20 | 35 | 50 | 25 | 0 |
| 1.2 | NPK | 70 | 80 | 70 | 40 | 70 | 100 | 50 | 20 |
| 1.3 | NPK | 105 | 120 | 105 | 60 | 105 | 150 | 75 | 40 |
| 1.4 | NPK | 140 | 160 | 140 | 80 | 140 | 200 | 100 | 60 |
| 1.5 | NPK | 175 | 200 | 175 | 100 | 175 | 250 | 125 | 80 |
| 2.1 | NPK + Stm 1 | 35 | 40 | 35 | 20 | 35 | 50 | 25 | 0 |
| 2.2 | NPK + Stm 1 | 70 | 80 | 70 | 40 | 70 | 100 | 50 | 20 |
| 2.3 | NPK + Stm 1 | 105 | 120 | 105 | 60 | 105 | 150 | 75 | 40 |
| 2.4 | NPK + Stm 1 | 140 | 160 | 140 | 80 | 140 | 200 | 100 | 60 |
| 2.5 | NPK + Stm 1 | 175 | 200 | 175 | 100 | 175 | 250 | 125 | 80 |
| 3.1 | NPK + Stm 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.2 | NPK + Stm 2 | 35 | 40 | 35 | 20 | 35 | 50 | 25 | 0 |
| 3.3 | NPK + Stm 2 | 70 | 80 | 70 | 40 | 70 | 100 | 50 | 20 |
| 3.4 | NPK + Stm 2 | 105 | 120 | 105 | 60 | 105 | 150 | 75 | 40 |
| 3.5 | NPK + Stm 2 | 140 | 160 | 140 | 80 | 140 | 200 | 100 | 60 |
| 4.1 | NPK + Stroh | 35 | 40 | 35 | 20 | 35 | 50 | 25 | 0 |
| 4.2 | NPK + Stroh | 70 | 80 | 70 | 40 | 70 | 100 | 50 | 20 |
| 4.3 | NPK + Stroh | 105 | 120 | 105 | 60 | 105 | 150 | 75 | 40 |
| 4.4 | NPK + Stroh | 140 | 160 | 140 | 80 | 140 | 200 | 100 | 60 |
| 4.5 | NPK + Stroh | 175 | 200 | 175 | 100 | 175 | 250 | 125 | 80 |

²Winterweizen

³Hybridwinterroggen

⁴Winterroggen

⁵Zuckerrüben

⁶Sommergerste

Tabelle 3 Organische und mineralische Grunddüngung des Müncheberger Nährstoffsteigerungsversuches V 140/00

Table 3 Organic manure and P, K, Ca fertilizer input of the Müncheberg Long Term Fertilizer Experiment V 140/00

| Düngerart | Fruchart | WW | Mais | HWR | Öllein | WR | ZR | SG | Erbsen |
|--|--------------------------------|------|------|-----|--------|-----|------|-----|--------|
| Organische Düngung [t · ha ⁻¹ · a ⁻¹ TM] | | | | | | | | | |
| Stm 1 | 0 | 4,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4,8 | 0 | 0 |
| Stm 2 | 0 | 12,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12,8 | 0 | 0 |
| Stroh | 0 | 4,0 | 0 | 4,0 | 0 | 0 | 4,0 | 0 | 4,0 |
| mineralische Grunddüngung [kg · ha ⁻¹ · a ⁻¹] | | | | | | | | | |
| Kalium | 100 | 160 | 100 | 100 | 100 | 100 | 160 | 100 | 100 |
| Phosphor | 30 | 45 | 30 | 30 | 30 | 30 | 45 | 30 | 30 |
| Calcium | Kalkung nach Bedarf (pH < 5,5) | | | | | | | | |

Fruchfolge eingegliedert. Die organische Düngung wird zu Hackfrüchten gegeben. Getreide, Öllein und Erbsen erhalten nur mineralische Düngung.

Die Größe der Einzelparzellen beträgt 30 m², davon lassen sich 10 bis 12 m² beproben.

Untersuchungen und Prüfmerkmale

• Boden

| | | |
|--|----------------------|--|
| Textur | % | Pipett-Methode nach KÖHN |
| Trockenrohddichte | g·cm ⁻³ | Stechzylindermethode |
| C _t | % | trockene Verbrennung |
| Carbonatgehalt | % | Wösthoff / Elementaranalyse |
| N _t | % | Kjeldahl, ab 1995 trockene Verbrennung |
| P, K | mg·kg ⁻¹ | P-colorimetrisch, K-Flammen Emission |
| Mg | mg·kg ⁻¹ | CaCl ₂ -Extraktion, AAS |
| pH | | KCl |
| NO ₃ -N, NH ₄ -N | mg·kg ⁻¹ | KCl-Extraktion, colorimetrisch |
| Austauschkapazität | meq·kg ⁻¹ | BaCl ₂ -TEA Perkolatation, pH 8,1 |
| Mikronährstoffe | mg·kg ⁻¹ | Atom-Absorption, ab 1996 ICP |
| N ₂ O Konzentration | ppb | Gas-Chromatographie |
| Molekulargewichtsverteilung der OBS | Dalton | GPC |
| Funktionelle Gruppen der OBS | rel. | FT-IR |

• Pflanzen

| | | | |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Erträge | dt·ha ⁻¹ | Bodendurchwurzelung | cm·cm ⁻³ |
| Inhaltsstoffe | % | Biomasseentwicklung | kg·ha ⁻¹ |
| Entzüge - N, P, K, Mg | kg·ha ⁻¹ | Bestandesbonituren | DC |

ERGEBNISSE

Faktoreinsatz und Schutz der Ressource Energie

Der Verbrauch fossiler Energie im Vorleistungsbereich durch den agronomischen Faktoreinsatz (Düngung, Bodenbearbeitung, Pflanzenschutz ...) verursacht CO₂-Emissionen und trägt somit zum Treibhauseffekt bei.

Die Emissionsraten für ausgewählte Faktorkombinationen des Müncheberger Nährstoffsteigerungsversuches wurden berechnet nach

$$q_m(\text{CO}_2) = E(\text{Faktor}) \cdot Q_{m,E}(\text{Faktor})$$

| | | |
|-----|--------------------------|---|
| mit | $q_m(\text{CO}_2)$ | Emissionsrate (Massenstromdichte) von CO ₂ (in kg·ha ⁻¹) |
| | $E(\text{Faktor})$ | Emissionsfaktor (in kg CO ₂ je Einheit der Bezugsgröße des eingesetzten Faktors) |
| | $Q_{m,E}(\text{Faktor})$ | Faktoreinsatz (in Einheiten der Bezugsgröße) |

Eine ausführliche Darstellung der Berechnungsgrundlagen (Energiewerte, CO₂-Emissionsfaktoren) wird bei Dämmgen und Rogasik (1996) gegeben.

Der flächenbezogene Ausstoß von CO₂ wird bei reduziertem Produktionsmittlereinsatz vermindert. Die produktmengenbezogene CO₂-Emission wird entscheidend vom Ertrag beeinflusst. Auf der Grundlage von Ergebnissen aus dem Müncheberger Dauerfeldversuch kann der Schluß gezogen werden, daß eine produktmengenbezogene Reduktion der CO₂-Emission nicht zu erwarten ist, wenn die Erträge durch Reduzierung des Faktoreinsatzes um mehr als 20 % absinken. In den Versuchspartellen mit praktisch ausschließlicher organischer Düngung (N1+Stm 2) ist die GE-Leistung der Fruchtfolge etwa um 30% geringer verglichen mit Varianten des konventionellen oder integrierten Landbaus (Abb. 2). Die CO₂-Freisetzung bezogen auf das erzeugte Produkt steigt an (Tab. 4).

Wie die kumulativen GE Erträge in Abhängigkeit von der Mineraldüngung bei differenzierter organischer Düngung zeigen, muß ein reduzierter Düngemitelesatz nicht mit signifikanten Ertragsminderungen verbunden sein (Abb. 2). Für sandige Ackerstandorte liegt das N - Optimum für ausschließliche Mineraldüngung bei 120 kg·ha⁻¹, für hohe organische Düngung bei 50 kg·ha⁻¹ im Mittel der Fruchtfolge (vgl. Abb. 2).

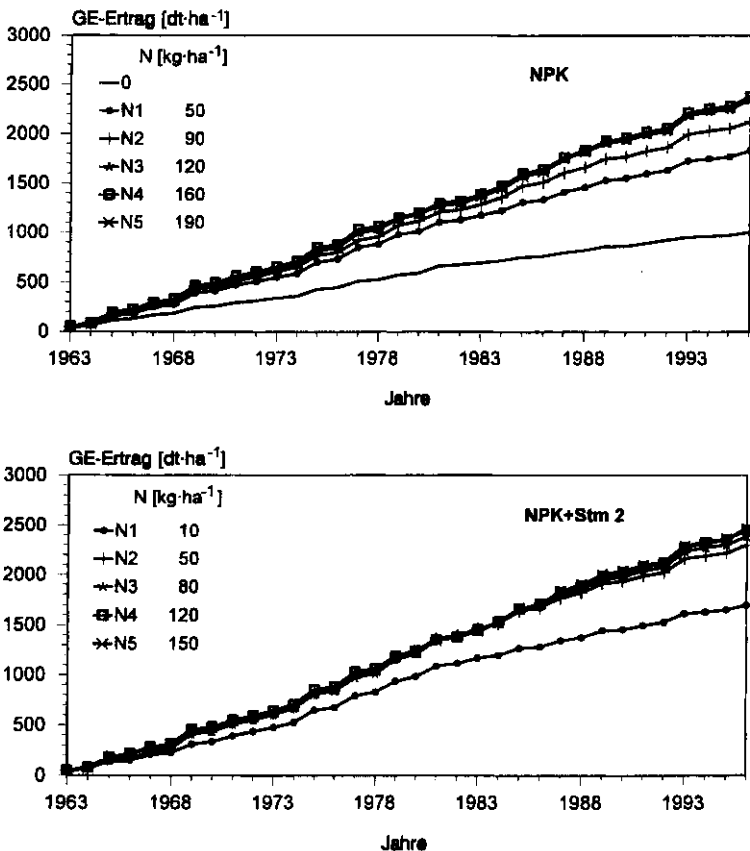


Abb. 2 Kumulative GE-Erträge in Abhängigkeit von der Mineraldüngung bei differenzierter organischer Düngung
 Fig. 2 Cumulative yield of cereal units in relation to mineral fertilization and organic manure

Tabelle 4 Produktmengenbezogene CO₂-Emission bei unterschiedlichen Wirtschaftsweisen für sandige Böden Ostbrandenburgs (DÄMMGEN und ROGASIK, 1996) k: konventionell, e: extensiv, ö: ökologisch
Table 4 Crop yield related CO₂ production under different farming systems sandy soils of Brandenburg (DÄMMGEN and ROGASIK, 1996) k: conventional, e: extensive, ö: ecological

| Kartoffel | | | Zuckerrübe | | | Winterweizen | | | Sommergerste | | |
|---|-------|-------|------------|-------|-------|--------------|------|------|--------------|------|------|
| k | e | ö | k | e | ö | k | e | ö | k | e | ö |
| mittlere Ertrag in t · ha ⁻¹ | | | | | | | | | | | |
| 36 | 32 | 24 | 52 | 45 | 36 | 5,0 | 4,3 | 2,5 | 4,3 | 3,5 | 3,1 |
| Standardabweichung in t · ha ⁻¹ | | | | | | | | | | | |
| 14 | 10 | 5 | 10 | 9 | 9 | 1,9 | 1,4 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 1,3 |
| Emissionsdichte in t · ha ⁻¹ · a ⁻¹ CO ₂ | | | | | | | | | | | |
| 1,7 | 1,5 | 1,5 | 1,0 | 0,83 | 0,7 | 0,93 | 0,76 | 0,56 | 0,75 | 0,57 | 0,39 |
| Emission in t CO ₂ je t Ernteprodukt | | | | | | | | | | | |
| 0,046 | 0,047 | 0,062 | 0,020 | 0,018 | 0,020 | 0,19 | 0,18 | 0,23 | 0,18 | 0,16 | 0,13 |

Faktoreinsatz und Schutz der Ressource Boden

Der Schutz der Ressource Boden ist eng verbunden mit der Aufgabe, die Senkenwirkung der Böden für Kohlenstoff und Stickstoff zu erhalten und somit die negativen Wirkungen auf die Produktion klimarelevanter Spurengase und den dadurch verursachten Treibhauseffekt zu minimieren. Quantitative Aussagen erfordern Untersuchungen der Nährstoffkonzentrationen im Boden, Bilanzierung der Stoffein- und -austräge sowie die Aufklärung der Ursachen, die zu vermehrter N₂O-Emission führen.

Möglichkeiten der Speicherung von Kohlenstoff im Boden

Der Kohlenstoff der organischen Bodensubstanz ist mit $1,5-2,0 \cdot 10^{12}$ t eine bedeutende Komponente des Welt-Kohlenstoff-Reservoirs (Dixon und Turner, 1991; Kuikman und Gorissen, 1993). Der Verlust an Kohlenstoff aus der organischen Substanz in den letzten 200 Jahren vor allem als Folge von Landnutzungsänderungen und Managementmaßnahmen ist bedeutend. Gegenwärtig wird mit einer mittleren C-Freisetzung von Boden und Bestand in Höhe von $10 \cdot 10^9$ t a⁻¹ C gerechnet. Die Werte schwanken in weiten Grenzen.

Der C-Pool wird in Abhängigkeit von Standort, Bodenfruchtbarkeitszustand und Management für die Hauptbodengesellschaften der Bundesrepublik Deutschland auf 3 bis 20 kg · m⁻² C_{org} geschätzt. Von Van Breemen und Feijtel (1990) wird eine Speicherkapazität von 5 bis 35 kg · m⁻² C_{org} angegeben.

Das Management hat den dominierenden Einfluß auf die Veränderung der organischen Bodensubstanz. Ein Effekt im Sinne einer CO₂-Senke wird durch Zufuhr organischer Düngetrockenmasse erreicht. Eine mittelfristig anhaltende C-Akkumulation besonders auf sandigen Ackerstandorten ist jedoch nur mit hohen Inputs möglich (Tab. 5). Kurzfristige Änderungen im Gehalt des Bodens an organi-

scher Substanz betreffen im wesentlichen die leichtumsetzbaren Bestandteile (Körschens, 1992; Smukalski und Rogasik, 1992).

Tabelle 5 Gehalte, Verluste und Akkumulation an organischer Substanz als Funktion des Managements auf einem Podzoluvisol/Arenosol (1963 bis 1990) (ROGASIK *et al.*, 1994)

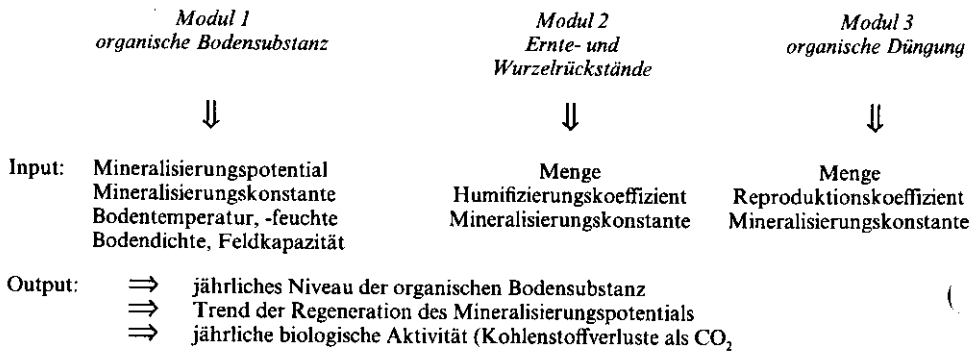
Table 5 Concentrations, losses and gains of organic carbon as a function of management (podzoluvisol/arenosol at Müncheberg/Germany, 1963–1990) (ROGASIK *et al.*, 1994)

| Düngungsvariante | C_{org} -Vorrat im Ober- | | Kohlenstoff-Bilanz ΔC_{org} | |
|---|----------------------------|--|-------------------------------------|------------------------|
| | und Unterboden | | jährlich | kum. nach 28 Jahren |
| | [$kg \cdot m^{-2} C$] | | [$g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1} C$] | [$g \cdot m^{-2} C$] |
| NPK+3,2 t · ha ⁻¹ · a ⁻¹ TM | 3,65 | | +7 | +196 |
| NPK+1,2 t · ha ⁻¹ · a ⁻¹ TM | 3,26 | | -7 | -196 |
| NPK | 2,91 | | -17 | -476 |
| ungedüngt | 2,77 | | -23 | -644 |

Verluste: $\Delta C_{org} < 0$, Akkumulation: $\Delta C_{org} > 0$

Die Umsetzungsprozesse der organischen Bodensubstanz wurden auf der Basis der im Müncheberger Dauerversuch erhobenen Parameter mit einem einfachen Modell (Kinetik 1. Ordnung) kalkuliert (Lüttich und Rogasik, unveröffentlicht):

Modellstruktur zur Quantifizierung der Umsetzungsprozesse der organischen Bodensubstanz



Veränderungen der organischen Bodensubstanz am Standort Müncheberg können wie folgt zusammengefaßt werden (Rogasik *et al.*, 1995):

- Die Zufuhr von 3,2 t · ha⁻¹ · a⁻¹ organische Düngetrockenmasse (NPK+Stm2) bewirkte einen Anstieg von etwa 0,1% C_{org} im Oberboden im 30-jährigen Versuchszeitraum. Demgegenüber steht eine Verminderung der organischen Bodensubstanz durch reduzierte organische Düngung bzw. ausschließliche Mineraldüngung im gleichen Versuchszeitraum (Abb. 3).

Qualität der organischen Bodensubstanz

Neben der quantitativen Ausprägung des Senkenpotentials des Bodens für Kohlenstoff und damit für CO₂ werden auch qualitative Merkmale wie Molekulargewichtsverteilung und Funktionalität der OBS vom Management entscheidend

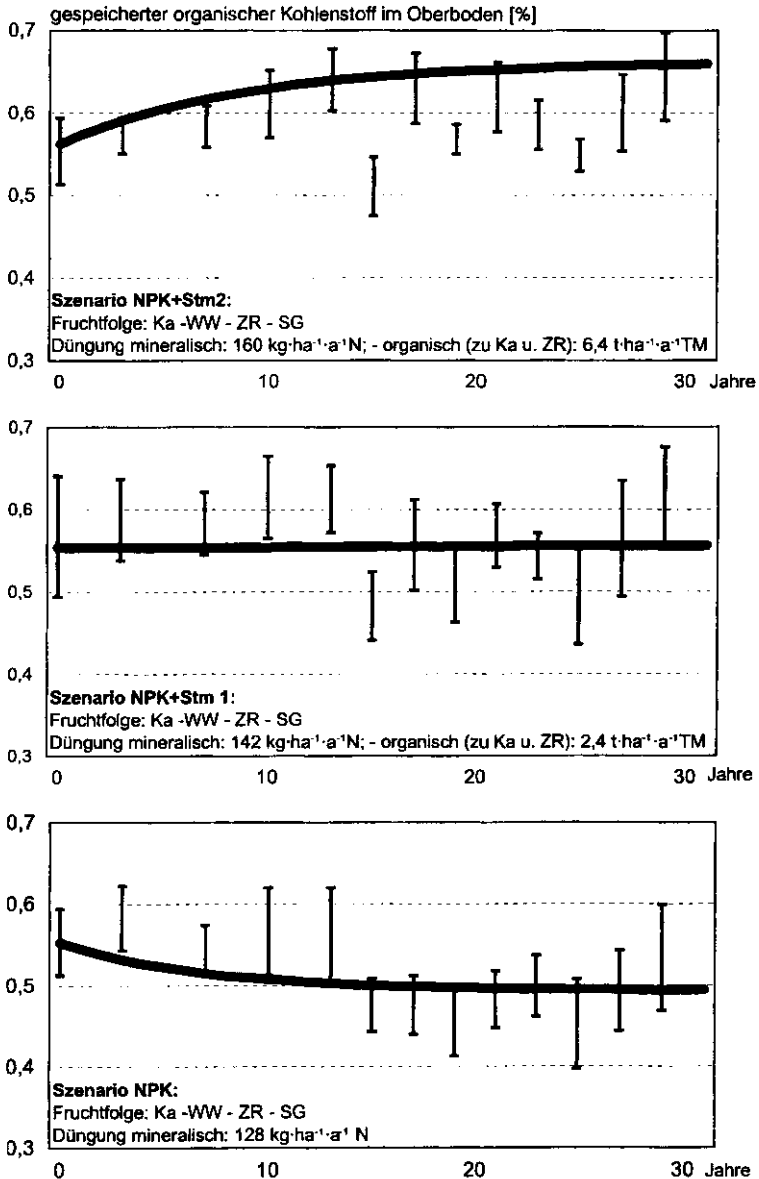


Abb. 3 Kalkulation der organischen Bodensubstanz für den Oberboden (0...25 cm)
Fig. 3 Model calculations of organic matter in the topsoil (0...25 cm)

beeinflusst (Capriel *et al.*, 1992; Ellerbrock *et al.*, 1997; Rogasik *et al.*, 1996, 1997). Abbildung 4 demonstriert anhand von Chromatogrammen die unterschiedliche Molekulargewichtsverteilung der organischen Bodensubstanz in den Varianten "ungedüngt" und "NPK+Stm2". Letztere zeichnet sich durch einen größeren Anteil von Komponenten mit höherem Molekulargewicht aus.

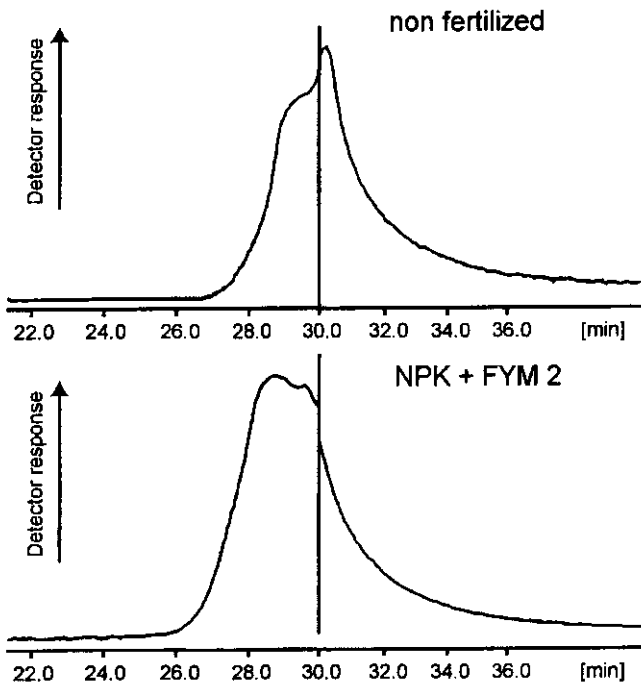


Abb. 4 Molekulargewichtsverteilung der organischen Bodensubstanz in den Varianten ungedüngt und NPK+Stm 2 (Gelpermeations-Chromatogramme der Na-Pyrophosphat-Extrakte, Dauerversuch V140/00, Müncheberg)
Fig. 4 Molecular weight distribution of soil organic matter of non fertilized and NPK+FYM 2 plot (Gel permeation chromatograms of the sodium pyrophosphate extracts, Long Term Fertilizer Experiment V140/00, Müncheberg)

Kombinierte organisch-mineralische Düngung (NPK+Stm 2) erhöht außerdem die Anzahl der Carboxylgruppen in der organischen Bodensubstanz (siehe Abb. 5, Wellenzahl = 1636 cm^{-1}). Langjährige Strohdüngung (NPK+Stroh) hat einen vergleichsweise geringeren Anteil von Carboxylgruppen in der organischen Bodensubstanz zur Folge. Der Gehalt an Carboxylgruppen in der organischen Bodensubstanz ist mit dem Bindungsvermögen gegenüber Kationen korreliert. Diese Verknüpfung wird durch das Düngemanagement beeinflusst und damit die Austauschfähigkeit für Nährstoffe entscheidend mitbestimmt (Tab. 6).

Faktoreinsatz und Schutz der Ressourcen Luft und Wasser

Stickstoffbilanzen

Allgemein bekannt ist, daß das Risiko von N-Verlusten mit zunehmendem Nährstoffangebot ansteigt. Bei der Stickstoffbilanzierung sind deshalb neben der Zufuhr aus organischer und mineralischer Düngung, die N- und C-Vorräte im Boden sowie deren Umsetzungsbedingungen zu berücksichtigen. NO_3 -Austräge oder N_2O -Emissionen können durch das Einbeziehen möglichst vieler Bilanzgrößen bei der Kalkulation des Nährstoffbedarfs reduziert werden (Smukalski *et al.*, 1993).

Die Beziehungen zwischen dem Gehalt an C_{org} bzw. N_{min} und der N-Bilanz illustrieren die Abbildungen 6 und 7. Danach ist die Erhaltung eines standorttypischen

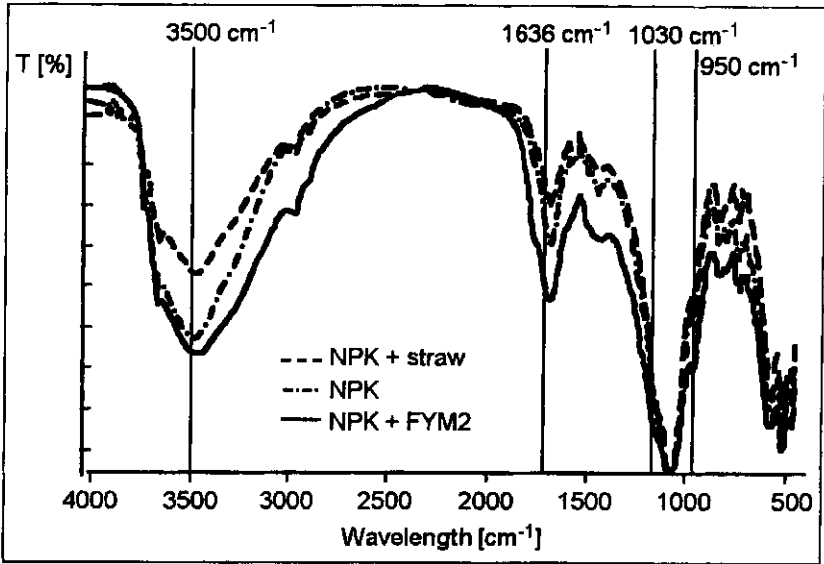


Abb. 5 FT-IR Spektren der organischen Bodensubstanz (rel.) in Abhängigkeit vom Düngungs niveau: NPK+Stm 2, NPK, NPK+Stroh (Na-Pyrophosphat-Extrakte, Dauerversuch V 140/00, Müncheberg)

Fig. 5 FT-IR spectra of soil organic matter (rel.) in relation to fertilizer treatments: NPK+FYM 2, NPK, NPK+straw (sodium pyrophosphate extracts, Long Term Fertilizer Experiment V 140/00, Müncheberg)

Tabelle 6 Einfluß der organischen und mineralischen Düngung auf die Kationenaustauschfähigkeit (Dauerversuch V 140/00, Müncheberg)

Table 6 Influence of organic manuring and mineral fertilization of the CEC (Long Term Field Experiment V 140/00, Müncheberg)

| | C_{org} [%] | | Austauschkapazität [mval · kg ⁻¹] | |
|-----------|---------------|----------|--|----------|
| | 0-25 | 25-50 cm | 0-25 cm | 25-50 cm |
| gedüngt | 0,47 | 0,26 | 37 | 26 |
| NPK | 0,52 | 0,30 | 37 | 30 |
| NPK+Stm1 | 0,54 | 0,29 | 40 | 31 |
| NPK+Stm2 | 0,57 | 0,31 | 41 | 32 |
| NPK+Stroh | 0,56 | 0,32 | 37 | 29 |

Kohlenstoffgehaltes im Boden auf sandigen Ackerstandorten nur bei N-Bilanzüberschüssen von 30–40 kg·ha⁻¹ möglich (Abb. 6). Dies hat erwartungsgemäß den Anstieg des N_{min}-Gehaltes im Boden zur Folge (Abb. 7). Damit steigt gleichzeitig die Gefahr von N-Verlusten durch NO₃-Austrag bzw. N₂O-Emission.

N₂O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden

Eine große Anzahl natürlicher Faktoren beeinflusst die mikrobiellen Prozesse im Boden, die N₂O produzieren (z. B. Bodentemperatur, Bodenfeuchte, N_{min}, C_{org}, pH, ...). Das agronomische Management beeinflusst vor allem über Fruchtfolge, Düngung und Bodenbearbeitung diese natürlichen Abläufe. Die anthropogene N₂O-

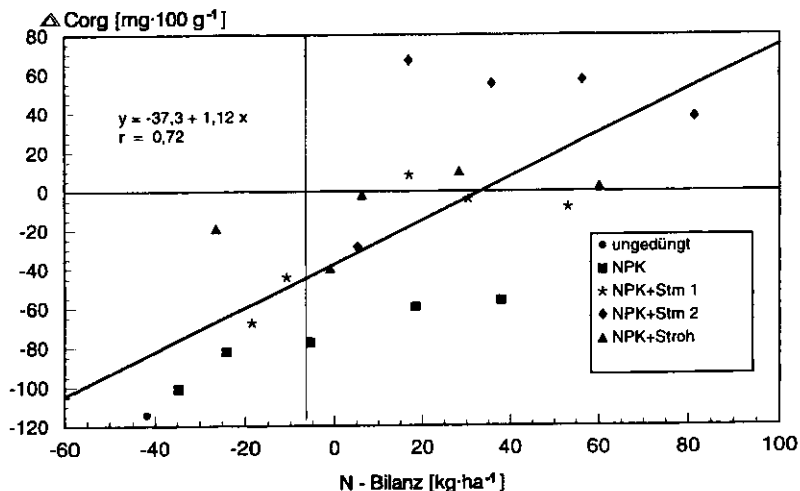


Abb. 6 Veränderungen der organischen Bodensubstanz (ΔC_{org}) als Funktion der N-Bilanz (Nährstoffsteigerungsversuch, Müncheberg Profiltiefe 0 – 25 cm)

Fig 6 Changes in soil organic matter (ΔC_{org} , final value: initial value) as a function of N balance (Long Term Fertilizer Experiment, Müncheberg, soil depth 0 – 25 cm)

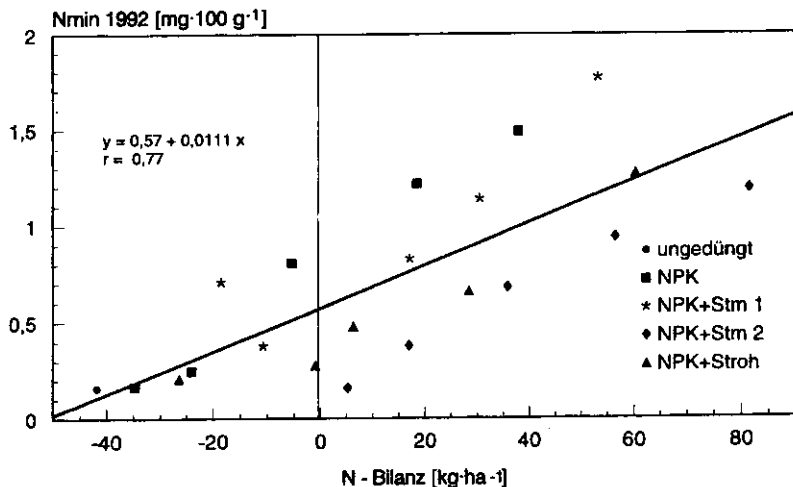


Abb. 7 N_{min} -Konzentration im Oberboden als Funktion der N-Bilanz im Nährstoffsteigerungsversuch Müncheberg, 1992

Fig. 7 N_{min} concentration in soil as a function of N balance (Long Term Fertilizer Experiment, Müncheberg, 1992)

Emission ist in Landnutzungssystemen mit hohem N-Input am größten. Die bisher geschätzten N_2O -Emissionen variieren sehr stark (vgl. z.B. Thornton und Valente, 1996), deshalb beschränkt man sich bei der Berechnung des emittierten N_2O in der Regel auf Emissionsfaktoren, die sich auf Art und Menge des aufgewendeten Stickstoff-Düngers beziehen.

Erste Messungen der N_2O -Emission auf ausgewählten Parzellen des Müncheberger Dauerversuches geben die typischen Emissionsraten unter Getreide wieder (Abb. 8). Auf Grund der hohen N_2 -Fixierung durch Leguminosen ist bei anschließender Mineralisierung der mikrobiellen Biomasse mit höheren N-Verlusten durch N_2O -Emission zu rechnen. Die Beträge für Erbsen liegen auf sandigen Ackerstandorten etwa doppelt so hoch wie bei Getreide.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die langfristigen Beobachtungs- und Meßreihen des Müncheberger Dauerversuches sind zur Quantifizierung von Langzeiteffekten hinsichtlich Energieeinsatz und CO_2 -Freisetzung, C-Speicherung im Boden, Bilanzierung der N-Düngung und N_2O -Emission geeignet. Die Ergebnisse sind wesentliche Bausteine für ressourcenschonende Landnutzungssysteme.

- Durch optimierten Einsatz von Treib- und Schmierstoffen, mineralischen und organischen Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln kann die Emission klimawirksamer Spurengase gemindert werden.
- Systemimmanent für umweltgerechte, nachhaltige Wirtschaftsweisen sind nur die Maßnahmen, die die organische Bodensubstanz und somit das Senkenpotential des Bodens für CO_2 erhalten.
- Molekulargewicht und Funktionalität der organischen Bodensubstanz werden durch das Management beeinflusst.

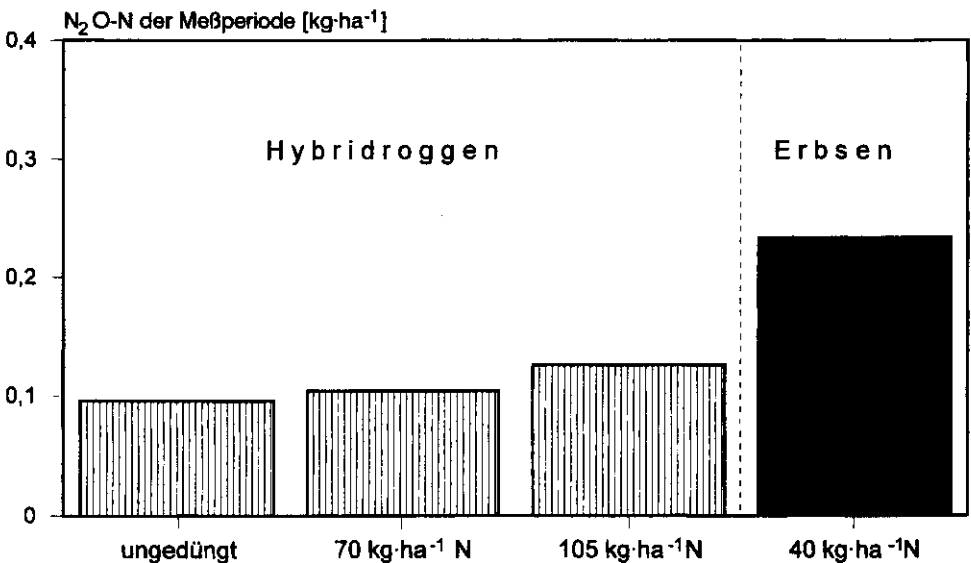


Abb. 8 Saisonale N_2O -Abgaberrate auf dem Standort Müncheberg in Hybridroggen und Erbsenbeständen (Meßperiode 1996: Wochen 19–24)

Fig. 8 Seasonal N_2O emissions from long-term different fertilized arable soil (Müncheberg, field experiments with winter rye and peas, weeks 19–24 in 1996)

- C_{org} - und N_{min} -Gehalte des Bodens sind Funktionen der N-Bilanz. Als Konsequenz hoher N-Überschüsse ist mit steigenden Konzentrationen von $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NH}_4\text{-N}$ im Boden zu rechnen.
- Die Höhe des NO_3 -Gehaltes im Boden beeinflusst im Zusammenspiel mit Bodenwassergehalt, Temperaturverläufen, Wurzel- und Bestandsentwicklung sowie mikrobieller Aktivität entscheidend die N_2O -Abgaberraten in die Atmosphäre bzw. Nitratausträge ins Grundwasser.
- Erfolgreiche N_2O -Vermeidungsstrategien können durch Managementmaßnahmen erreicht werden, die ein optimales Pflanzenwachstum gewährleisten und N-Verluste aus dem System Boden-Pflanze verhindern.

Literatur

- Capriel, P., Härter, P., Stephenson, D.: Influence of management on organic matter of a mineral soil. *Soil Science* 135, S. 122–128 (1992)
- Dämmgen, U. und Rogasik, J.: Einfluß der Land- und Forstbewirtschaftung auf Luft und Klima. In: Linckh, G.; Sprich, H.; Flaig, H.; Mohr, H. (Hrsg.) Nachhaltige Land- und Forstwirtschaft. *Expertisen. Akademie für Technikfolgeabschätzungen* Stuttgart, Springer-Verlag, 850 S. (1996)
- Dixon, R.K.; Turner, D.P.: The Global Carbon Cycle and Climate Change: Responses and Feedbacks from Below-ground Systems. *Environmental Pollution* 73, S. 245–262 (1991)
- Ellerbrock, R.; Höhn, A. and Rogasik, J.: Functional analyses of soil organic matter composition with respect to soil management. Im Druck (1997)
- Körshens, M.: Simulationsmodelle für den Umsatz und die Reproduktion der organischen Substanz im Boden. Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Hamburg, Berlin: Parey, Bd. 4. *Humushaushalt. Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft*; N. F., 206, S. 140–154 (1993)
- Kuikman, P.J.; Gorissen, A.: Carbon fluxes and organic matter transformation in plant-soil-systems. In: van den Geijn, S.C.; Goudriaan, J.; Berendse, F. (Hrsg.): Climate change; crops and terrestrial ecosystems. *Agrobiological Themes* 9. Wageningen: DLO Centre for Agrobiological Research (CABO-DLO) S. 97–107 (1993)
- Rogasik, J.; Dämmgen, U.; Lüttich, M. und Obenauf, S.: Wirkungen physikalischer und chemischer Klimaparameter auf Bodeneigenschaften und Bodenprozesse. In: Brunnert, H., Dämmgen, U. (Hrsg.): Klimaveränderung und Landbewirtschaftung Teil II. *Landbauforschung Völknerode, Sonderheft* 148, S. 107–139 (1994)
- Rogasik, J.; Dämmgen, U. und Lüttich, M.: Ökosystemare Betrachtungen zum Einfluß klimatischer Faktoren und veränderter Intensität der Landnutzung auf Quellen- und Senkeneigenschaften von Böden für klimarelevante Spurengase. *Ökologische Hefte der Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät der HU Berlin*, 3, S. 37–58 (1995)
- Rogasik, J.; Obenauf, S.; Lüttich, M.; Scholz-Seidel, C.: Sink and source properties of soils and plants for greenhouse gas emissions influenced by soil and crop management. Abstracts of the International Conference on Sustainable Crop Production in Fragile Environments, CCS Haryana Agricultural University, Hisar, India, Nov. 25–28, S. 116 (1996)
- Rogasik, J.; Obenauf, S.; Lüttich, M.; Scholz-Seidel, C.; Ellerbrock, R.: Agriculture and the greenhouse effect – influences of soil and crop management on sinks and sources for CO_2 . International Conference on Sustainable Agriculture for Food, Energy and Industry. Books of Abstracts, Braunschweig, S. 300 (1997)
- Smukalski, M.; Kundler, P.; Rogasik, J.: Der Müncheberger Nährstoffsteigerungsversuch. Dauerfeldversuche der DDR, Berlin, S. 251–259 (1990)
- Smukalski, M.; Rogasik, J.: Nährstoffbilanzen und Entwicklung der Bodenfruchtbarkeit bei extensivem bis intensivem Wirtschafts- und Mineraleidüngereinsatz. Maercker-Symposium zum 90jährigen Bestehen des Statischen Düngungsversuchs Bad Lauchstädt: "Dauerfeldversuche und Nährstoffdynamik", 9. – 12.6. 1992 in Bad Lauchstädt, S. 36–41
- Smukalski, M.; Rogasik, J.; Obenauf, S.: Nährstoffumsatz und Nährstoffbilanzen bei ackerbaulicher Nutzung pleistozäner Sandböden in Abhängigkeit von Nährstoffzufuhr und Fruchtfolge – Ergebnisse aus Müncheberger Dauerfeldversuchen. *Landbauforschung Völknerode* 43 (4), S. 211–223 (1993)

- Thornton, F. C., Valente R. J.: Soil emissions of nitric oxide and nitrous oxide from no-till corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **60**, S. 1127–1133 (1996)
- Van Breemen, N.; Feijtel, T.C.J.: Soil processes and properties involved in the production of greenhouse gase, with special relevance to soil taxonomic systems. In: Bouwman, A.F. (Hrsg.): *Soils and the greenhouse effect. Proceedings of the International Conference Soils and the Greenhouse Effect.* Wageningen, S. 195–223 (1990)