

Ökologischer Landbau – Beitrag zum Klimaschutz

Technische Universität München,
Lehrstuhl für Ökologischen Landbau

Kurt-Jürgen Hülsbergen & Björn Küstermann

Zusammenfassung

Mit der Veröffentlichung des IPCC-Berichtes zur Klimaveränderung der Erde im Februar 2007 erreichten die Diskussionen auch die breite Öffentlichkeit. In allen gesellschaftlichen Bereichen, auch in der Landwirtschaft, muss nach Wegen zum Klimaschutz gesucht werden.

Im Beitrag wird das Model REPRO vorgestellt. Es verbindet die Analyse von C-, N- und Energieflüssen im System Boden-Pflanze-Tier-Umwelt, um die klimarelevanten CO₂-, CH₄- und N₂O-Quellen bzw. -Senken bestimmen zu können. Zur Ermittlung des Treibhauspotenzials werden die C-Speicherung der Böden, CO₂-Emissionen durch den Einsatz fossiler Energie, CH₄-Emissionen der Tierhaltung und die N₂O-Emissionen der Böden berechnet.

Das Modell wird erstmals im ökologischen (öko) und integrierten (int) Betriebssystem des Versuchsgutes Scheyern in Süddeutschland sowie in 28 kommerziellen Betrieben (18 öko, 10 int) mit vergleichbaren Boden-Klimaregionen angewendet.

Der organische Betrieb ist vielseitig strukturiert, mit einer auf Leguminosen basierten Fruchtfolge. Durch seine Tierhaltung (1,4 GV ha⁻¹) ist der Betrieb stofflich als kreislauforientiert, energetisch als Low-Input System (Energie-Input 4,5 GJ ha⁻¹ a⁻¹) einzustufen. Der integrierte Betrieb ist ein einfach strukturiertes Marktfruchtsystem. Der Betrieb ist stofflich als Mineral N basiert (N Input 145 kg ha⁻¹ a⁻¹) und Durchfluss orientiert, energetisch als High-Input System (Energie-Input 14,0 GJ ha⁻¹ a⁻¹) einzuordnen. Den größten Einfluss auf das Treibhauspotenzial haben die C-Speicherung im Boden und die N₂O-Emissionen. In Scheyern kommt es zur C-Speicherung bei organischer Bewirtschaftung (+0,20 t ha⁻¹ a⁻¹) und zum Humusabbau bei integrierter Bewirtschaftung (-0,25 t ha⁻¹ a⁻¹). Vergleicht man die ökologischen und integrierten Betriebe, wurden aufgrund geringerer N- und Energieinputs für die organischen Betriebe deutlich geringere N₂O- und CO₂-Emissionen berechnet. In der Summe liegt das flächenbezogene Treibhauspotenzial der integrierten Betriebe (2618 kg CO₂ eq ha⁻¹ a⁻¹) fast um den Faktor 3 über dem der organischen Betriebe (918 kg CO₂ eq ha⁻¹ a⁻¹); produktbezogen sind die Unterschiede geringer.

Die Untersuchungen lassen Schlussfolgerungen zur Betriebsoptimierung und Minderung des Treibhauspotenzials zu. Nach unseren Ergebnissen besitzt der Ökolandbau ein hohes Potenzial zur C-Speicherung im Boden und zur Minderung der Emission von Treibhausgasen.

Summary

With publication of the IPCC assessment report of climate change in February 2007, the discussion about climate change reached new public interest. In all social areas, also in agriculture, we need mitigation strategies to reduce greenhouse gas emissions.

In this article we describe the model software REPRO. It couples the balancing of C, N and energy fluxes in the system soil-plant-animal-environment with the target to estimate the climate relevant CO₂, CH₄ and N₂O sources and sinks. For the determination of the net global warming potential (GWP), calculations of the C sequestration in the soil, CO₂ emissions from the use of fossil energy, CH₄ emissions from livestock keeping and N₂O emissions from the soil have been made.

The model has been applied in the organic (org) and integrated (int) experimental farm Scheyern in Southern Germany and also in 28 commercial farms (18 org, 10 con) with comparable soil and climate conditions in the surroundings of Scheyern.

The organic farm is multi structured and has a legume-based crop rotation. Due to the livestock keeping (1.4 LSU ha⁻¹) the farm is oriented on closed mass cycles. From the energetic point of view it represents a low-input system (energy input 4.5 GJ ha⁻¹ a⁻¹). The integrated farm is a simple structured cash crop system, based on mineral N (N input 145 kg ha⁻¹ a⁻¹) on transition which corresponds to a high energy input of 14.0 GJ ha⁻¹ a⁻¹. The strongest influence on the GWP is exerted by C sequestration and N₂O emissions. In Scheyern, C sequestration sets in under organic management (+0.20 t ha⁻¹ a⁻¹), while humus depletion has been recorded in the conventional system (-0.25 t ha⁻¹ a⁻¹).

Comparing the conventional and organic farming systems due to lower N and energy inputs, clearly lower N₂O and CO₂ emissions were obtained for the organic farms. Summing up the area-related GWP of the integrated farms (2618 kg CO₂ eq ha⁻¹ a⁻¹), it turns out to be nearly three times higher than that of the organic farms (918 kg CO₂ eq ha⁻¹ a⁻¹); the product-related GWPs deviate less. The analyses allow to draw conclusions for management optimization and GWP mitigation. Our findings underline that organic farming possesses a high potential of C sequestration and for the reduction of greenhouse gas emissions.

Einleitung

Anfang Februar 2007 legte das IPCC, das UN-Expertengremium für Klimaänderungen, seinen neuesten Bericht vor. Demnach ist seit Mitte des 19. Jahrhunderts die Erdoberfläche um fast 1 Grad Celsius wärmer geworden, vorwiegend infolge menschlicher Aktivitäten. Klimasimulationen zeigen, dass sich die globale Mitteltemperatur bis Ende des 21. Jahrhunderts um weitere 1,0 bis 6,3 °C erhöhen wird, wenn die Emissionen von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen unvermindert ansteigen. Die Intensität der Niederschläge und die damit verbundene Hochwassergefahr werden zunehmen, ebenso die Dauer von Trockenperioden, d. h. die Witterungsextreme vergrößern sich. Infolge der thermischen Ausdehnung der Ozeane und der Schmelze von grönländischem Eis steigt der Meeresspiegel bis Ende des Jahrhunderts um bis zu 58 cm. Die Daten und Modellrechnungen sind so alarmierend, dass Presse und Fernsehen ausgiebig über den IPCC-Report berichteten. Das Thema Klimaschutz hat die öffentliche Diskussion erreicht und wird wohl das Umweltthema der Zukunft sein.

In allen gesellschaftlichen Bereichen, auch in der Landwirtschaft, muss nach Wegen zum Klimaschutz gesucht werden. Die Diskussion wird auch vor dem ökologischen Landbau nicht Halt machen. Kann der ökologische Landbau einen wirksamen Beitrag zum Klimaschutz leisten? Wie hoch sind die Emissionen von Treibhausgasen im ökologischen Landbau im Vergleich zu anderen Landnutzungsformen? Welche Minderungspotenziale gibt es und wie können diese effizient genutzt werden?

Zur Einführung in die Problematik wird eine Übersicht zum globalen Kohlenstoffkreislauf, zu Emissionen klimarelevanter Gase und, daraus abgeleitet, zu möglichen Strategien der Emissionsminderung im ökologischen Landbau gegeben. Von dieser globalen Betrachtung wird zum ökologischen Landbau in einer konkreten Region – dem Tertiärhügelland Bayerns – übergeleitet. Mit einem neuen Modell wird auf der Grundlage betrieblicher Kohlenstoffkreisläufe das Treibhauspotenzial ökologischer und integrierter Betriebssysteme berechnet.

Klimawandel und Landwirtschaft

Der CO₂-Gehalt der Atmosphäre nahm seit 1750 um 35 % von 280 ppm auf 379 ppm im Jahr 2005 zu (IPCC 2007). Im globalen C-Kreislauf sind u. a. folgende C-Pools miteinander verbunden – die Atmosphäre (760 Gt C), die Vegetation (500 Gt C), der Boden (2000 Gt C) und die Ozeane (39.000 Gt C). Durch Photosynthese werden jedes Jahr etwa 60 Gt C in der pflanzlichen Biomasse gebunden. Ein Teil dieser Biomasse gelangt in die Böden und trägt zur C-Speicherung im Humus bei. Etwa 60 Gt C werden jährlich durch Bodenmikroorganismen wieder veratmet und an die Atmosphäre abgegeben. Damit wäre der Kreislauf geschlossen. Durch menschliche Einflüsse wird der globale C-Kreislauf verändert. Allein durch die Nutzung fossiler Energieträger werden 6,3 Gt C a⁻¹ als CO₂ emittiert, infolge von Landnutzungsänderungen (z. B. Rodung tropischer Wälder) 1,7 Gt C a⁻¹. Ungefähr die Hälfte dieser CO₂-Emissionen wird in Ozeanen und in terrestrischen Senken (z. B. Wälder) gebunden. Der gemessene Anstieg des CO₂-Gehalts der Atmosphäre von 1,5 ppm pro Jahr entspricht einer C-Menge von 3,2 Gt a⁻¹.

Eine einfache Kalkulation kann diese Werte in Beziehung zu möglichen Minderungsstrategien setzen (Schimel et al. 2001): Die Emission von 6,3 Gt C a⁻¹ entspricht bei einer Weltbevölkerung von 6 Milliarden Menschen einer mittleren Emissionsrate von 1 t C pro Kopf und Jahr. Um einen Ausgleich mit der derzeitigen Rückbindung in Ozeanen und Biosphäre zu erreichen, müsste die Emissionsrate auf 500 kg C pro Kopf und Jahr reduziert werden. Derzeit

sind die Emissionsraten in den USA 10mal, in Europa 4mal höher. Erwartet wird bis 2050 kein Rückgang der CO₂-Emissionen, sondern – je nach Szenario – ein deutlicher Anstieg auf mind. 11 Gt C a⁻¹ (Newton et al. 2007).

Theoretisch sind drei Wege zur Minderung des CO₂-Anstiegs möglich (Janzen 2004):

- a) die Reduzierung des Einsatzes fossiler Energie,
- b) der Ersatz fossiler Energie durch Bioenergieträger,
- c) die C-Bindung in Vegetation und Böden (C-Sequestrierung).

Die Strategien berühren allesamt den ökologischen Landbau.

- a) In der Landwirtschaft müssen – wie in jedem Wirtschaftsbereich – Möglichkeiten zur Energieeinsparung genutzt werden. Ein wichtiges Bewertungskriterium landwirtschaftlicher Systeme ist daher der Einsatz fossiler Energie je Flächen- bzw. je Produkteinheit. Wie hoch sind der Energieeinsatz und die Energieeffizienz im ökologischen Landbau?
- b) Bioenergieträger können fossile Energieträger substituieren. Welche Möglichkeiten und Grenzen der Erzeugung und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe bestehen im ökologischen Landbau? Sind energieautarke ökologische Betriebe möglich? Welche Systeme (Biogaswirtschaft, Mischfruchtbau, ...) passen in den ökologischen Landbau?
- c) Die C-Speicherung im Humus landwirtschaftlich genutzter Böden ist eine Option zur Minderung des CO₂-Anstiegs, die weltweit diskutiert wird. Humus besteht zu etwa 58 % aus Kohlenstoff, der aus der Atmosphäre stammt. Wenn der Humusgehalt von Böden durch geeignete Maßnahmen (Fruchtfolge, Düngung, Bodenbearbeitung) erhöht wird, kommt es zur C-Akkumulation. Welches Potenzial hat der ökologische Landbau zur C-Speicherung? Bestehen systembedingte Unterschiede zum integrierten Landbau?

Neben CO₂ sind Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) als Treibhausgase bedeutsam, deren Konzentration seit 1750 um 148 % bzw. 18 % zunahm (IPCC 2007). In eine Emissionsinventur landwirtschaftlicher Betriebe müssen CH₄ und N₂O aufgrund der hohen spezifischen Treibhauspotenziale einbezogen werden, auch wenn die emittierten Mengen zumeist deutlich geringer sind als die CO₂-Emissionen.

Material und Methoden

In mehreren Forschungsprojekten wurden in den vergangenen Jahren ökologische und integrierte Landwirtschaftsbetriebe Bayerns bezüglich ihrer Stoffkreisläufe und Umweltwirkungen untersucht. Ein Schwerpunkt der Analysen lag auf der Berechnung von Treibhausgas-Emissionen, um das Treibhauspotenzial unterschiedlicher Betriebssysteme einschätzen zu können. Zur Berechnung der CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen ist es notwendig, die auf Betriebsebene relevanten Stickstoff-, Kohlenstoff- und Energieflüsse zu analysieren. Hierzu wurde das Betriebsmodell REPRO (Hülsbergen 2003) verwendet. Mit REPRO können betriebliche Stoffkreisläufe und Energieflüsse in Abhängigkeit von Standort- und Bewirtschaftungsbedingungen berechnet werden. Als Einflussfaktoren werden die Betriebsstrukturen (Tierbesatz, Fruchtfolge), die Bewirtschaftungsintensität (Stoff- und Energieinputs) sowie die Verfahren (z. B. Bodenbearbeitung) berücksichtigt.

Während zur Analyse von Stickstoff- und Energieflüssen auf Betriebsebene ausgereifte Modelle existieren, gibt es kaum Ansätze zur Analyse der Kohlenstoffflüsse im System Boden – Pflanze – Tier – Umwelt. Das von uns entwickelte Modell ist auf die Darstellung dieser

betrieblichen C-Kreisläufe ausgerichtet. Zur Quantifizierung der C-Stoffströme (Beispiele in Abb. 1 und 2) kommen u. a. folgende Methoden zur Anwendung:

- Die C-Speicherung im Humus wird mit Humusbilanzen ermittelt. Hierbei wird der Einfluss der Fruchtarten (abhängig von Standort und Ertrag) und der organischen Dünger (abhängig von Menge und Qualität) auf den Humusgehalt des Bodens bilanziert. Die Parameter wurden in Dauerversuchen mit unterschiedlichen Fruchtfolge- und Düngungssystemen aus der Entwicklung der C-Vorräte abgeleitet. Sie berücksichtigen indirekt Wurzelmasse, Rhizodeposition der Fruchtart und Intensität der Bodenbearbeitung.
- Die C-Assimilation und der C-Input durch Pflanzen. Die C-Netto-Assimilation der Pflanzen wird aus der gebildeten Biomasse und den C-Gehalten der Biomasse abgeleitet. Der Ernteertrag der Hauptprodukte geht als Messwert ein. Die C-Inputs zum Boden werden fruchtarten-, ertrags- und standortabhängig unter Berücksichtigung von Nebenprodukten, Ernterückständen (Stoppeln), Wurzeln und Rhizodepositionen (Exsudate und während der Vegetationsperiode umgesetzte Wurzeln) berechnet.
- CO₂-Emissionen durch den Einsatz fossiler Energie. Die CO₂- und Energiebilanz sind miteinander gekoppelt; berücksichtigt werden der direkte (z. B. Kraftstoff) und indirekte (z. B. Dünge- und Pflanzenschutzmittel, Investitionsgüter) Einsatz fossiler Energie und die damit verbundenen CO₂-Emissionen (Hülsbergen et al. 2001).
- CH₄-Emissionen. Die stoffwechselbedingten Methanemissionen der Tierhaltung werden tierarten-, leistungs- und fütterungsabhängig berechnet. Ausgehend von der Futter-Bruttoenergie wird die Methanausscheidung anhand von Konversionsfaktoren geschätzt. Zur Quantifizierung der Methanverluste bei der Lagerung organischer Dünger wird in Abhängigkeit vom Exkrementanfall (Menge, Inhaltsstoffe, Abbaubarkeit) das Methanbildungspotenzial berechnet und die gebildete Methanmenge in Abhängigkeit vom Lagerungssystem kalkuliert (IPCC 1997).

Die für eine Emissionsinventur relevanten N-Flüsse werden wie folgt ermittelt:

- N₂O-Emissionen. Die Berechnung der N₂O-Emissionen erfolgt unter Verwendung des IPCC-Ansatzes (IPCC 1997). Stark vereinfachend wird unterstellt, dass 1,25 % des den Böden durch organische und mineralische Düngung, N₂-Fixierung und N-Deposition zugeführten Stickstoffs als N₂O-N emittiert werden. Die von den gasförmigen NH₃-Verlusten sowie den N-Auswaschungsverlusten ausgehenden N₂O-Emissionen werden über Emissionsfaktoren quantifiziert.
- N₂-Fixierung. Die Berechnung der symbiotischen N₂-Fixierung von Leguminosen erfolgt in der Annahme, dass die Fixierleistung mit wachsendem Ertrag steigt. Für jede Leguminosenart wird ein spezifischer Ndfa-Wert (Ndfa = Nitrogen derived from the atmosphere) angenommen, der je nach Bedingungen, u. a. dem Gehalt an pflanzenaufnehmbarem Stickstoff im Boden, modifiziert wird (z. B. Klee gras im ökologischen Anbau: Ndfa = 0,90, Klee gras im integrierten Anbau: Ndfa = 0,80). Die in Wurzeln, Ernterückständen und Rhizodeposition enthaltenen N-Mengen werden über fruchtartenspezifische Parameter geschätzt. Beim Gemengeanbau geht der Leguminosenanteil (Masse %) als Mess- oder Schätzwert in die Berechnung ein.

Die CO₂-, CH₄- und N₂O-Emissionen werden unter Nutzung der spezifischen Treibhauspotenziale, die den relativen Beitrag eines Gases zum Treibhauseffekt charakterisieren, in CO₂-Äquivalente umgerechnet [CO₂ eq]. Abhängig von der Absorption der infraroten Strahlung und der Verweildauer in der Atmosphäre beträgt das Treibhauspotenzial

von Methan 23, das von Lachgas 296, bezogen auf die Wirksamkeit von CO₂ (= 1) (IPCC 2001).

Untersuchungsstandort und Untersuchungsbetriebe

Das Modell kommt (1) in dem 40 km nördlich von München gelegenen Versuchsbetrieb Scheyern sowie (2) in 28 Praxisbetrieben der gleichen Boden-Klima-Region zum Einsatz.

(1) Der Versuchsbetrieb Scheyern wurde im Jahr 1992 in zwei eigenständige Betriebe geteilt. Ein Betrieb (31 ha Ackerland, 25 ha Grünland) wird ökologisch, ein Betrieb (30 ha Ackerland) integriert bewirtschaftet. Der Versuchsbetrieb liegt 445 - 498 m über NN in einer Hügellandschaft. Die Böden sind teilweise von Löß bedeckt. Der Jahresniederschlag beträgt 833 mm, die Jahresdurchschnittstemperatur 7,4°C. Die Flächen des ökologischen Betriebes weisen stärkere Hangneigungen und ein geringeres Ertragspotenzial (im Mittel 48 Bodenpunkte) als die Flächen des integrierten Betriebes (im Mittel 52 Bodenpunkte) auf.

Im ökologischen Betrieb werden Mutterkühe (1,4 GV ha⁻¹) gehalten. Die Fruchtfolge war:

1. Klee gras, 2. Kartoffeln + Untersaat-Senf, 3. Winterweizen, 4. Sonnenblumen + Untersaat-Klee gras, 5. Klee gras, 6. Winterweizen, 7. Winterroggen + Untersaat-Klee gras.

Der integrierte Betrieb ist auf Marktfruchtbau spezialisiert. Die Fruchtfolge war:

1. Kartoffeln + Zwischenfrucht-Senf, 2. Winterweizen, 3. Mais + Zwischenfrucht-Senf, 4. Winterweizen. Die Bodenbearbeitung ist den Anbausystemen angepasst. In der siebenfeldrigen ökologischen Fruchtfolge werden dreimal ein Pflug und zweimal ein Grubber eingesetzt; in der integrierten Fruchtfolge wird auf den Einsatz des Pfluges verzichtet.

Auf den Betriebsflächen wird seit mehr als 15 Jahren ein intensives Messprogramm durchgeführt. Seit Untersuchungsbeginn werden alle Arbeitsgänge in einer Ackerschlagkartei dokumentiert. Somit existiert ein umfangreicher Datenpool, der zur Modell-Validierung genutzt werden kann. Als Untersuchungszeitraum wurden die Jahre 1999 bis 2002 gewählt.

(2) Die 28 Praxisbetriebe liegen im Umkreis von Scheyern (max. Entfernung 60 km). Von den untersuchten Betrieben werden 18 ökologisch (öko) und 10 integriert (int) bewirtschaftet. Die Böden sind denen in Scheyern ähnlich, weisen aber mit durchschnittlich 58 (40 bis 74) Bodenpunkten (öko) bzw. 61 (45 bis 77) Bodenpunkten (int) im Mittel eine etwas höhere Ertragsfähigkeit auf. Der Tierbesatz beträgt 0,5 (0,0 bis 1,4) GV ha⁻¹ (öko) bzw. 0,8 (0,0 bis 2,2) GV ha⁻¹ (int). Die Fruchtfolgen variieren stark. Der Getreideanteil beträgt 60 (35 bis 80) % der AF (öko), bzw. 70 (50 bis 80) % der AF (int), der Leguminosenanteil 25 (15 bis 45) % der AF (öko) bzw. 5 (0 bis 20) % der AF (int), der Hackfruchtanteil 3 (0 bis 25) % der AF (öko) bzw. 15 (0 bis 50) % der AF (int).

Ergebnisse und Diskussion

Betriebliche C-Kreisläufe am Beispiel von Scheyern

Zusammenhänge zwischen Bewirtschaftung, C-Kreisläufen und Emissionspotenzialen werden beispielhaft am Versuchsbetrieb Scheyern dargestellt. Strukturbedingt sind die Stoffkreisläufe beider Betriebssysteme grundlegend verschieden. Das ökologische System ist kreislauforientiert (Abb. 1). Damit kommt Scheyern (öko) einem grundlegenden Prinzip des ökologischen Landbaus, dem des weitgehend geschlossenen Stoffkreislaufs in einem vielseitig strukturierten Betriebssystem, nahe. Lediglich der relativ hohe Futterzukauf und die damit verbundenen C- und N-Importe verstärken die betrieblichen Stoffkreisläufe in nennenswertem Umfang und schränken die Nährstoffautarkie ein.

Der integrierte Betrieb Scheyern ist ein sehr einfach strukturiertes Marktfruchtssystem mit einer Fruchtfolge geringer Diversität. Der Betrieb ist stofflich als Mineral-N basiert und durchflussorientiert (Abb. 2), energetisch als High-Input-System einzustufen.

Die C-Assimilationsleistung des ökologischen Betriebes beträgt fast 70 % der Leistung des integrierten Betriebes. Der C-Input durch Ernte- und Wurzelrückstände (EWR) des ökologischen Systems ist 80 % höher als der des integrierten (infolge hoher EWR-Mengen des Kleegrases). Andererseits werden den Böden des integrierten Betriebes sehr hohe C-Mengen als Stroh und Grünmasse zugeführt, so dass der Gesamt-C-Input zum Boden mit $4253 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ den des ökologischen Betriebes ($3497 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) übertrifft.

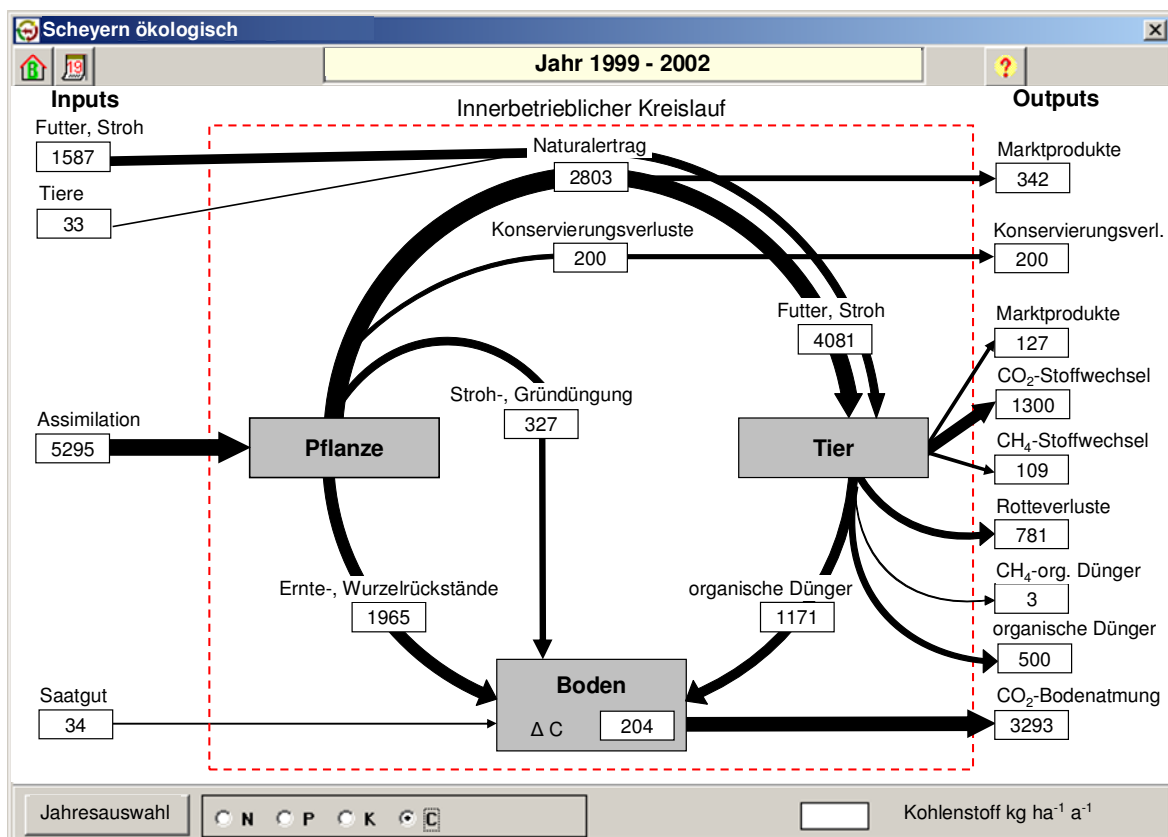


Abb. 1: Kohlenstoffkreislauf im Versuchsbetrieb Scheyern, ökologisch (1999-2002) Bildschirm-Anzeige REPRO, nach Küstermann et al. (2007)

Die Anbausysteme in Scheyern haben unterschiedliche Wirkung auf die Humus-Vorräte. Auf die LF bezogen wurde eine mittlere C-Speicherung von $0,20 \text{ t ha}^{-1}$ (öko) bzw. $-0,25 \text{ t ha}^{-1}$ (int) berechnet (Abb. 1, 2). Die chemisch-analytische Bestimmung der C-Vorräte (Rühling et al. 2005) zeigt nach 10jähriger differenzierter Flächennutzung (1991 bis 2001) einen Anstieg um $0,18 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (öko; $n = 106$) bzw. eine Abnahme um $0,12 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (int; $n = 116$).

Oftmals hat die Qualität (Stoffgruppenzusammensetzung, Zersetzungsgrad) der organischen Primärschubstanz größeren Einfluss auf die C-Speicherung der Böden als die zugeführte C-Menge. In Scheyern steigen die C-Mengen bei ökologischer und sinken bei integrierter Bewirtschaftung, obwohl die integrierte Fruchtfolge ein Mulchsaat-System ist und höhere C-Inputs erhält. Nach der Humusbilanz sind für die C-Speicherung die Qualität der organischen Dünger (Stallung vs. Stroh) sowie der Leguminosenanteil der Fruchtfolge ausschlaggebend. Für Klee gras wird eine C-Speicherung von $0,93 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ausgewiesen, für Mais ($-0,72 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) und Kartoffeln ($-0,93 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$; int) werden negative Effekte auf die C-Vorräte berechnet. Zur C-Speicherung mehrjähriger Leguminosen liegen in der Literatur zahlreiche Ergebnisse vor, die die hier mitgeteilten Werte stützen. So betrug die C-Speicherung von Luzerne in Feldexperimenten $0,5$ bis $> 1,0 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Su 2006, Robertson et al. 2000, Meyer-Aurich 2006, Hülsbergen 2003).

Die Berechnung der Treibhauspotenziale erfolgt unter Berücksichtigung der C-Speicherung. Zu beachten ist, dass die durch Bewirtschaftungsumstellungen initiierte C-An- und Abreicherung zeitlich begrenzt ist, und ΔC mit der Annäherung an neue Fließgleichgewichte letztlich auf 0 sinkt (Johnson et al. 1995). Die CO_2 -Bodenatmung (Abb. 1, 2) von $3293 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (öko) u. $4501 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (int) ergibt sich rechnerisch ($= \Sigma \text{ C-Input} - \Delta C$).

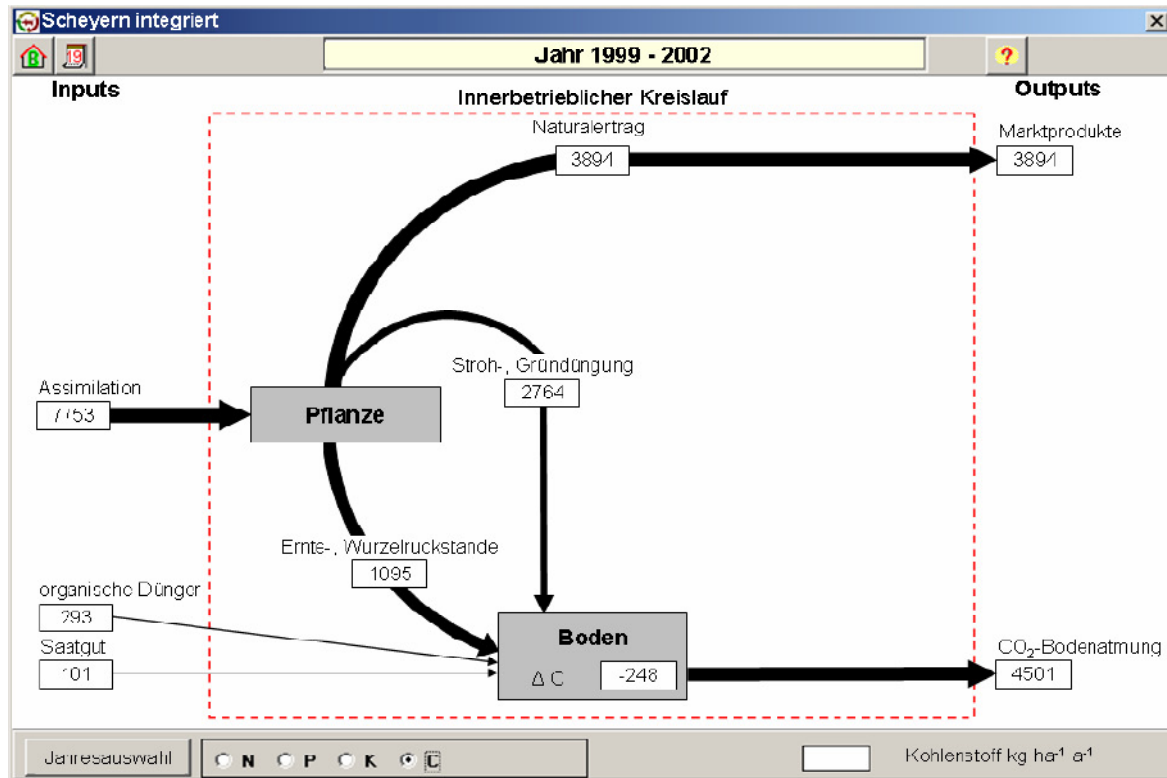


Abb. 2: Kohlenstoffkreislauf im Versuchsbetrieb Scheyern, integriert (1999-2002). Bildschirm-Anzeige REPRO, nach Küstermann et al. (2007)

Aufgrund der differenzierten Ertragsleistungen, vor allem aber aufgrund der unterschiedlichen Ertragsverwendung, gibt es substantielle Differenzen im C-Output. In den pflanzlichen Marktprodukten sind $342 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (öko) bzw. $3894 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (int) gebunden; die C-Menge in tierischen Produkten beträgt $127 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (öko). Im tierhaltenden ökologischen Betrieb treten C-Verlustprozesse auf, die im Marktfruchtbetrieb fehlen, z. B. stoffwechselbedingte CH_4 -Emissionen ($109 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) und CO_2 -Emissionen der Tiere ($1300 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) sowie die Verluste bei der Lagerung der Wirtschaftsdünger (Abb. 1).

Ergebnisse der Untersuchung von 28 Praxisbetrieben

Die Anwendung des Modells in 28 Betrieben in Süddeutschland zeigt, dass gravierende Unterschiede zwischen ökologischen und integrierten Betrieben bezüglich der Struktur, der Stoff- und Energieinputs, der Erträge, der C-Speicherung und der Treibhauspotenziale bestehen (Tab. 1, Abb. 3). Um die Vergleichbarkeit der Betriebe zu gewährleisten wird ausschließlich der Pflanzenbau analysiert (Tab. 1, Abb. 3).

Tab. 1: Kennzahlen zum Stoff- und Energiehaushalt, zur C-Sequestrierung und zu Treibhausgasemissionen im Pflanzenbau der Untersuchungsbetriebe; nach Küstermann et al. (2007)

Parameter	ME	Ökologische Betriebe (n = 18)		Integrierte Betriebe (n = 10)	
		Scheyern	Mittel (Min – Max)	Scheyern	Mittel (Min – Max)
Energie-Input	GJ ha^{-1}	5,9	5,4 (4,1 – 7,8)	14,0	11,9 (9,5 – 15,0)
N-Input	kg N ha^{-1}	185	149 (108 – 227)	275	240 (193 – 304)
TM-Ertrag	t ha^{-1}	6,5	3,6 (2,0 – 7,7)	14,5	7,5 (4,5 – 9,0)
Output/Input-Verhältnis		18,0	12,4 (6,0 – 19,3)	11,1	11,9 (6,1 – 16,2)
Treibhauspotenzial					
CO_2 -Emission (Energie-Input)	$\text{kg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$	504	451 (320 – 750)	1220	1018 (819 – 1215)
C-Speicherung im Humus*	$\text{kg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$	-1350	-402 (-1830 – 489)	910	202 (-659 – 638)
N_2O -Emissionen	$\text{kg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$	1227	869 (631 – 1322)	1317	1398 (1123 – 1771)
Treibhauspotenzial	$\text{kg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$	323	918 (106 – 1875)	3697	2618 (1878 – 3112)
Treibhauspotenzial	$\text{kg CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$	50	274 (23 – 431)	255	370 (271 – 388)

* Positive Werte bedeuten einen Humusabbau und die Abgabe von im Boden gebundenem C an die Atmosphäre, negative Werte einen Humusaufbau und die Rückbindung von C aus der Atmosphäre in den Boden.

Der mittlere Energieinput der ökologischen Betriebe beträgt $5,4 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Tab. 1) und ist auf dem Niveau des ökologischen Betriebes in Scheyern. Bedingt durch Unterschiede in Anbaustruktur und Management liegen einige Betriebe aber auch um bis zu 50 % über diesem Wert. Der Einsatz mineralischer Dünger und chemischer Pflanzenschutzmittel führt bei den integrierten Betrieben zu deutlich höheren Energieinputs ($11,9 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Bei einem weiten

Schwankungsbereich ($9,5 - 15,0 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) überschreitet nur ein Betrieb die Anbauintensität des integrierten Betriebes in Scheyern ($14,0 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$).

Die TM-Erträge der ökologischen Betriebe weisen mit $2,0$ bis $7,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ eine größere Schwankungsbreite als die der integrierten Betriebe ($4,5$ bis $9,0 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) auf. Die ökologischen Betriebe mit den höchsten Erträgen erreichen das Ertragsmittel der integrierten Betriebe. Die TM-Erträge sind nicht nur vom Anbausystem (öko vs. int), sondern auch von der Nutzung der gebildeten Biomasse abhängig. Hohe TM-Erträge werden bei hohem Harvest-Index (z. B. durch Nutzung der Nebenernteprodukte und Zwischenfrüchte) erreicht. Die Energieeffizienz, ausgedrückt als Output/Input-Verhältnis, ist in ökologischen und integrierten Betrieben etwa auf gleichem Niveau.

Die Spanne der berechneten C-Speicherung [$\text{CO}_2 \text{ eq}$] ist bei den ökologischen Betrieben und den integrierten Betrieben sehr groß. Im Mittel erreichen die ökologischen Betriebe eine C-Akkumulation ($+ 110 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1} =$ Reduktion des Treibhauspotenzials um $402 \text{ kg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), während die integrierten Betriebe C abreichern ($-55 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1} =$ Erhöhung des Treibhauspotenzials um $202 \text{ kg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Die unterschiedliche Entwicklung der C-Vorräte ist durch Unterschiede in den Fruchtfolgen (hohe Leguminosenanteile (öko) vs. hohe Hackfrucht- und Getreideanteile (int)) sowie in Menge und Qualität der den Böden zugeführten organischen Substanzen bedingt.

Aufgrund geringerer N- und Energieinputs wurden für die ökologischen Betriebe deutlich geringere N_2O - und CO_2 -Emissionen als für die integrierten Betriebe berechnet. Im Mittel emittieren die integrierten Betriebe $2618 \text{ kg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Unter Berücksichtigung der Boden-C-Vorratsänderung liegt dies fast um den Faktor 3 über der berechneten Emission der ökologischen Betriebe ($918 \text{ kg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Produktbezogen [je t TM] sind die Unterschiede aufgrund der deutlich geringeren Erträge der ökologischen Betriebe geringer ($274 \text{ kg CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$ (öko) vs. $370 \text{ kg CO}_2 \text{ eq t}^{-1}$ (int)).

Mit dem Mineral N und Energieinput steigen die flächenbezogenen N_2O - und CO_2 -Emissionen; daher besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Energieinput und Treibhauspotenzial (Abb. 3). Bei der Berechnung der Treibhauspotenziale werden die C-Speicherung, die symbiotische N_2 -Fixierung und der Energieinput durch den Einsatz von Maschinen und Kraftstoffen berücksichtigt; dies erklärt die enorme Variabilität der CO_2 -Emissionen der ökologischen und integrierten Betriebe (Abb. 3). Überprägt wird der Zusammenhang von Energieinput und Treibhauspotenzial durch die aus dem Humusaufbau bzw. -abbau abgeleiteten CO_2 -Äquivalente. Würde beispielsweise ΔC für den Versuchsbetrieb Scheyern unberücksichtigt bleiben, so stiege das Treibhauspotenzial der ökologischen Fruchtfolge deutlich an, das Treibhauspotenzial der integrierten Fruchtfolge würde sich vermindern (Abb. 3).

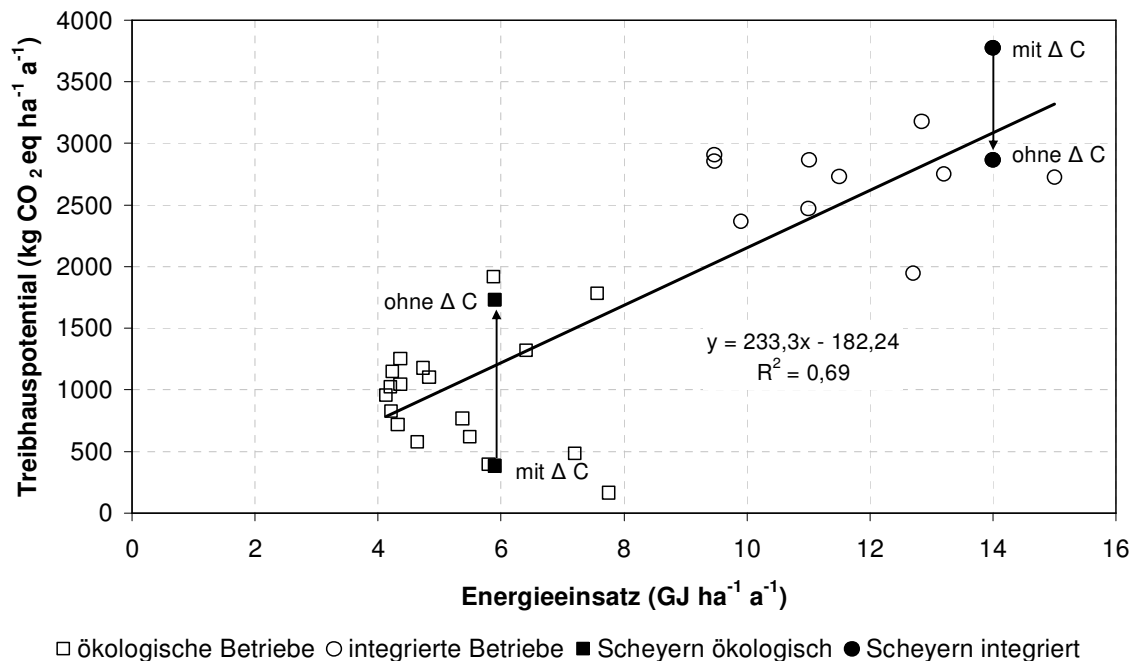


Abb. 3: Beziehung zwischen Energieinput und Treibhauspotenzial im Pflanzenbau, n = 30, nach Küstermann et al. (2007)

Auch andere Autoren, z. B. Haas et al. (1995), Flessa et al. (2002), Petersen et al. (2006), fanden geringere flächenbezogene Treibhausgas-Emissionen ökologischer Betriebe gegenüber integrierten Vergleichsbetrieben.

Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen lassen Schlussfolgerungen zur Betriebsoptimierung und Minderung der Treibhausgas-Emissionen zu. Nach unseren Ergebnissen besteht im ökologischen Landbau ein Potenzial zur C-Speicherung in Böden, vor allem durch den Anbau mehrjähriger Leguminosen und den Einsatz hochwertiger organischer Dünger. Im integrierten Anbau sind Leguminosen und Stalldung fast bedeutungslos; die Humusbilanzen weisen auf die Abnahme der C-Vorräte hin. Einzelbetrieblich kann die Situation jedoch je nach Fruchtfolge und Verfahrensgestaltung gänzlich anders sein, so dass letztlich betriebsbezogene Empfehlungen und Optimierungsstrategien notwendig sind.

Der landwirtschaftliche Betrieb steht bei unseren Untersuchungen im Fokus, weil auf dieser Ebene Managemententscheidungen getroffen werden, die umwelt- und klimarelevant sind. Zur Emissionsminderung müssen die Problembereiche betriebsbezogen identifiziert und darauf abgestimmte Maßnahmen und Strategien abgeleitet werden. Für die Akzeptanz durch die Landwirte ist es wichtig abzuschätzen, welche ökonomischen und ökologischen Konsequenzen deren Realisierung hätte. Mit dem Modell REPRO verfolgen wir daher das Ziel der Gesamtbewertung von Betrieben nach multiplen Kriterien. Neben der in dieser Arbeit beschriebenen Bilanzierung der C-, N- und Energieflüsse sind weitere Module, z. B. Bodenschadverdichtung, Erosion und Biodiversität in der Entwicklung. In Kooperation mit wissenschaftlichen Einrichtungen und Praxispartnern wird das Modell derzeit in 90 Landwirtschaftsbetrieben der Bundesrepublik Deutschland getestet, um es künftig nicht nur in der Wissenschaft, sondern auch im Betriebsmanagement einsetzen zu können.

Literaturverzeichnis

- Flessa, H., Ruser, R., Dörsch, P., Kamp, T., Jimenez, M.A., Munch, J.C., Beese, F. (2002): Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, N₂O) from two farming systems in southern Germany. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 91:175-189.
- Haas, G., Geier, U., Schulz, D.G., Köpke, U. (1995): Vergleich konventioneller und organischer Landbau - Teil I: Klimarelevante Kohlendioxid-Emission durch den Verbrauch fossiler Energie. *Ber. Landw.* 73: 401–415.
- Hülsbergen, K.-J. (2003): Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Shaker Verlag Aachen.
- Hülsbergen, K.-J., Feil, B., Biermann, S., Rathke, G.-W., Kalk, W.-D., Diepenbrock, W. (2001): A method of energy balancing in crop production and its application in a long-term fertilizer trial. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 86: 303–321.
- IPCC (1997): Revised (1996): IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual, Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris.
- IPCC (2001): *Climate Change: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, UK.
- IPCC (2007): *Climate Change (2007): The physical science basis*. IPCC Secretariat, Geneva, CH.
- Janzen, H.H. (2004): Carbon cycling in earth systems - a soil science perspective. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104: 399–417.
- Johnson, M.G., Levine, E. R., Kern, J. S. (1995): Soil organic matter: Distribution, genesis, and management to reduce greenhouse gas emissions. *Water, Air and Soil Pollution* 82: 593-615.
- Küstermann, B., Kainz, M., Hülsbergen, K.-J. (2007): Modelling Carbon Cycles and Estimation of the Global Warming Potential of Organic and Conventional Farming Systems. *Renewable Agriculture and Food Systems*. Submitted.
- Meyer-Aurich, A., Weersink, A., Janovicek, K., Deen, B. (2006): Cost efficient rotation and tillage options to sequester carbon and mitigate GHG emissions from agriculture in Eastern Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 117: 119-127.
- Newton, P.C.D., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus, P.A. (2007): *Agroecosystems in a changing climate*. Advances in agroecology. Taylor & Francis.
- Petersen, S.O., Regina, K., Pöllinger, A., Rigler, E., Valli, L., Yamulki, S., Esala, M., Fabbri, C., Syväsalo, E., Vinther, F.P. (2006): Nitrous oxide emissions from organic and conventional crop rotations in five European countries. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112: 200–206.
- Robertson, G. P., Paul, E. A., Harwood, R. R. (2000): Greenhouse Gases in Intensive Agriculture: Contributions of Individual Gases to the Radiative Forcing of the Atmosphere. *Science* 289: 1922-1925.
- Rühling, I., Ruser, R., Kölbl, A., Priesack, E., Gutser, R. (2005): Kohlenstoff und Stickstoff in Agrarökosystemen. In: Osinski, E., Meyer-Aurich, A., Huber, B. Rühling, I., Gerl, G. & Schröder, P. [Eds.]: *Landwirtschaft und Umwelt – ein Spannungsfeld*. oekom Verlag München, S. 99-154.

Schimel, D.S. et al. (2001) : Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature* 414, 169-172.

Su, Y. Z. (2006): Soil carbon and nitrogen sequestration following the conversion of cropland to alfalfa forage land in northwest China. *Soil & Tillage Research* 92: 181-189.