

Bodenfruchtbarkeit und biologische Vielfalt im ökologischen Landbau*

Paul Mäder, Andreas Fließbach, David Dubois, Lucie Gunst, Padruot Fried und Urs Niggli

Um die Effektivität landwirtschaftlicher Anbausysteme zu beurteilen, bedarf es eines Verständnisses der Agrarökosysteme. Eine 21-jährige Studie ergab 20 Prozent geringere Erträge bei ökologischen Anbausystemen gegenüber konventionellen, obgleich der Einsatz von Düngemitteln und Energie um 34 bis 53 Prozent und der von Pestiziden um 97 Prozent geringer war. Wahrscheinlich führen die erhöhte Bodenfruchtbarkeit und die größere biologische Vielfalt in den ökologischen Versuchspartellen dazu, dass diese Systeme weniger auf Zufuhr von außen angewiesen sind.

Die Intensivlandwirtschaft hat zwar zu hohen Erträgen geführt, aber auch zu gravierenden Umweltproblemen (Pimentel et al., 1995). Eine nachhaltige Landwirtschaft wird im Idealfall gute Erträge erbringen mit minimalen Auswirkungen auf ökologische Faktoren wie die Bodenfruchtbarkeit (Tilman, 1999; Pimentel et al., 1997). Ein fruchtbarer Boden liefert die notwendigen Nährstoffe für das Pflanzenwachstum, ist Lebensraum für eine aktive und vielfältige Lebensgemeinschaft, weist eine standorttypische Struktur auf und ermöglicht einen ungestörten Abbau organischer Reststoffe.

Ökologische Anbausysteme sind eine Alternative zur konventionellen Landwirtschaft. In einigen europäischen Ländern werden bis zu 8 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche nach der Verordnung der Europäischen Union (EEC) Nr. 2092/91 bewirtschaftet (www.organic.aber.ac.uk/stats.shtml). Aber wie nachhaltig ist diese Produktionsweise wirklich? Die begrenzte Anzahl von Langzeitstudien zeigt einige Vorteile für die Umwelt (Drinkwater et al., 1998; Reganold et al.,

2001). Hier stellen wir Ergebnisse des 21-jährigen Systemvergleichsversuches „DOK“ (bio-dynamisch, bio-organisch, konventionell) vor, welcher auf einer Klee-gras-Fruchtfolge basiert.

Der Feldversuch wurde 1978 auf einem Lössboden in Therwil (Schweiz) angelegt (Mäder, et al., 2000; zusätzliche Online-Informationen auf Englisch**). Zwei ökologische Anbausysteme (bio-dynamisch, BIODYN; bio-organisch: BIOORG) und zwei konventionelle Systeme (Düngung mit Hofdünger und Mineraldünger (KONHFD) bzw. Düngung ausschließlich mit Mineraldünger (KONMIN) werden in einem randomisierten Feldexperiment simuliert. Beide konventionellen Anbausysteme wurden 1985 auf integrierte Produktion umgestellt. Fruchtfolge, Sorten und Bodenbearbeitung sind in allen Systemen gleich.

Ökoanbau effizient

Der Nährstoffeinsatz (N, P, K) war in den ökologischen Anbausystemen 34 bis 51 Prozent geringer als in den konventio-

nellen, während der durchschnittliche Pflanzenertrag über einen Zeitraum von 21 Jahren nur um 20 Prozent darunter lag (Abb. 1, Tab. 1). Das weist auf eine effiziente Produktion hin. In den ökologischen Anbausystemen war der Energieaufwand zur Erzeugung einer Ertragseinheit um 20 bis 56 Prozent und je Flächeneinheit um 36 bis 53 Prozent geringer.

Die Kartoffelerträge der ökologischen Systeme erreichten 58 bis 66 Prozent der konventionellen (Abb. 1), hauptsächlich wegen Engpässen in der Kaliversorgung und wegen des Befalls mit *Phytophthora infestans*. Die Winterweizenerträge erreichten bei ökologischem Anbau in der dritten Fruchtfolgeperiode im Mittel 4,1 Tonnen pro Hektar. Dies entspricht 90 Prozent des Kornertrags der konventionellen Systeme, welcher vergleichbar hoch war wie auf den konventionellen Betrieben in der Region (Simon, pers. Mittlg.). Die Ertragsunterschiede bei Klee-gras waren gering.

Die Getreideerträge im ökologischen Landbau liegen in Europa durchschnittlich bei 60 to 70 Prozent der konventionellen Erträge, während die Klee-graserträge 70

* Nachdruck mit Erlaubnis: Mäder, P. et al. (2002): Soil Fertility and Biodiversity in Organic Farming. Science 296: 1694-1697 – Copyright 2002, AAAS
Der folgende Text ist keine offizielle Übersetzung durch die SCIENCE Redaktion und SCIENCE übernimmt auch keine Verantwortung für dessen Richtigkeit. Im Zweifelsfall beziehen Sie sich bitte auf die offizielle in SCIENCE erschienene englische Fassung.

** Internet www.sciencemag.org/cgi/content/full/296/5573/1694/DC1 und www.fibl.ch/buehne/forschung/bodenoekologie/dok/Literatur.html#science

bis 100 Prozent erreichen. Das Einkommen ökologischer Landwirtschaftsbetriebe in Europa ist ähnlich wie das vergleichbarer konventioneller Betriebe (Offerman/Nieberg, 2000). Durch angepasste Pflanzenzüchtung ließen sich die Erträge im ökologischen Landbau wahrscheinlich noch verbessern. Die Produktqualität unterschied sich zwischen den Anbausystemen kaum (Alföldi et al.).

Höhere biologische Aktivität

Die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit ist sehr wichtig für eine nachhaltige Landnut-

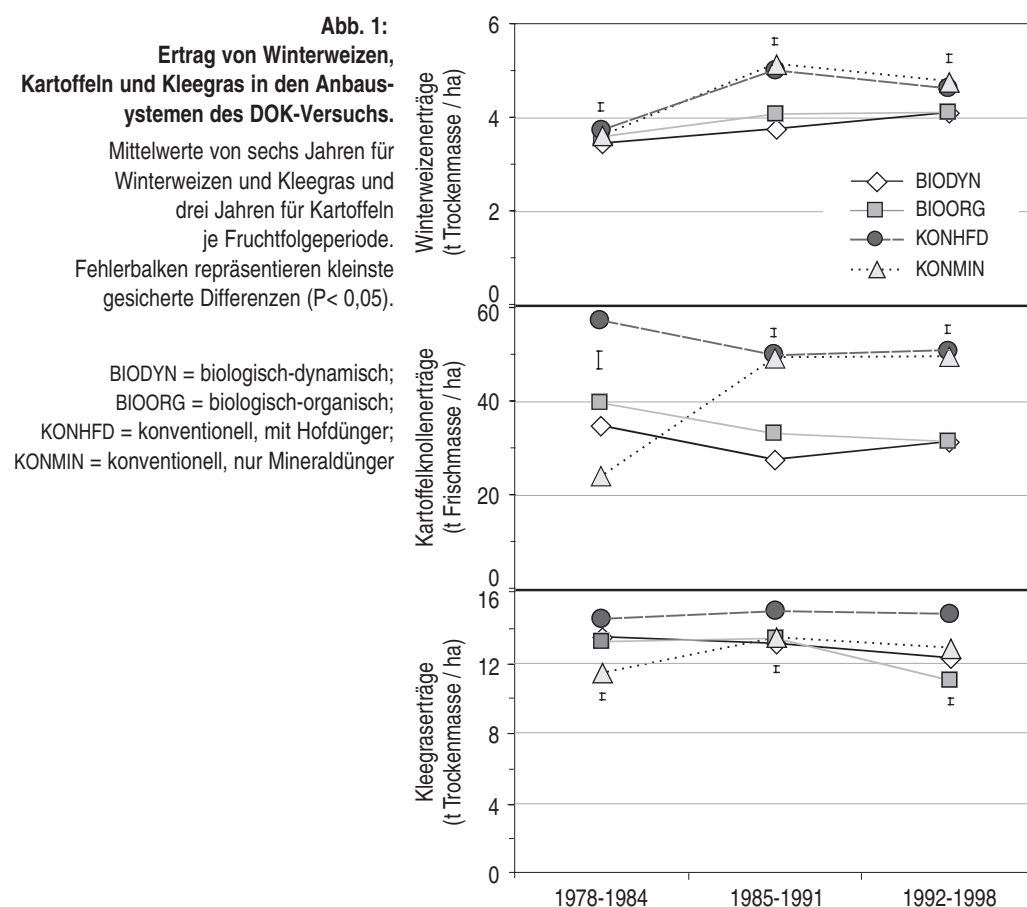
zung. In unseren Versuchspartellen zeigen die ökologisch bewirtschafteten Böden eine höhere biologische Aktivität als konventionelle. Demgegenüber wiesen chemische und physikalische Bodenparameter geringere Differenzen auf (Abb. 2).

Die Aggregatstabilität, gemessen mit der Perkulationsmethode (Siegrist et al., 1998) und der Nasssiebmethode (Schinner et al., 1993) war in den ökologisch bewirtschafteten Böden um 10 bis 60 Prozent gegenüber den konventionellen erhöht (Abb. 2A). Diese Unterschiede spiegeln die Situation wider, wie sie auch im Feld beobachtet werden kann (Abb. 3), wo ökologi-

sche Böden eine größere Stabilität aufwiesen. Wir errechneten eine positive Korrelation zwischen Aggregatstabilität und mikrobieller Biomasse ($r=0,68, P<0,05$) sowie zwischen Aggregatstabilität und Regenwurmbiomasse ($r=0,45, P<0,05$).

In den ökologischen Systemen waren der pH-Wert des Bodens etwas höher und die löslichen Anteile von Phosphor und Kalium geringer als in den konventionellen, während die von Calcium und Magnesium erhöht waren (Abb. 2B). Der Phosphortransfer zwischen Bodenmatrix und Bodenlösung war im BIODYN System am intensivsten (Oberson et al., 1993).

Mikroorganismen regeln die vielfältigen Nährstoffumsetzungsprozesse im Boden. Die mikrobielle Biomasse stieg in der Reihenfolge KONMIN < KONHFD < BIOORG < BIODYN an (Abb. 2C). In den Böden der ökologischen Systeme waren die Aktivitäten der Dehydrogenase, der Protease und der Phosphatase höher als in den konventionellen, was eine insgesamt höhere Mikrobentätigkeit und ein größeres Abbaupotenzial für Proteine und organische Phosphorverbindungen anzeigt (Schinner et al., 1993). Der Phosphorumsatz durch die mikrobielle Biomasse war in den ökologisch bewirtschafteten Böden schneller, und in der mikrobiellen Biomasse war mehr Phosphor gespeichert (Oberson et al., 1996; Oehl et al., 2001). Offensichtlich liegen in den ökologischen Systemen die Nährstoffe weniger in gelöster Form vor, und wahr-



Tab. 1: Zufuhr von Nährstoffen, Pestiziden und fossiler Energie in den Anbausystemen des DOK-Versuchs:

Die angegebene Nährstoffzufuhr ist das Mittel von 1978 bis 1998 für BIODYN, BIOORG und KONHFD und von 1985 bis 1998 für KONMIN. Der lösliche Stickstoff ist die Summe von $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$. Für den Zeitraum von 1985 bis 1991 wurde die Zufuhr des Pestizid-Wirkstoffs berechnet, außerdem die Energie für die Produktion von Maschinen, Infrastruktur, Mineraldüngern und Pestiziden sowie der Energiegehalt von den Treibstoffen.

Anbausystem	Gesamt-Stickstoff (kg N ha ⁻¹ Jahr ⁻¹)	Löslicher Stickstoff (kg N ha ⁻¹ Jahr ⁻¹)	Phosphor (kg P ha ⁻¹ Jahr ⁻¹)	Kalium (kg K ha ⁻¹ Jahr ⁻¹)	Pestizide (kg Aktivsubstanz ha ⁻¹ Jahr ⁻¹)	Energie (GJ ha ⁻¹ Jahr ⁻¹)
BIODYN	99	34	24	158	0	12,8
BIOORG	93	31	28	131	0,21	13,3
KONHFD	149	96	43	268	6	20,9
KONMIN *	125	125	42	253	6	24,1

* Das Verfahren KONMIN wurde in der ersten Fruchtfolgeperiode als Vergleichsverfahren mit konventionellem Pflanzenschutz aber ohne Düngung geführt.

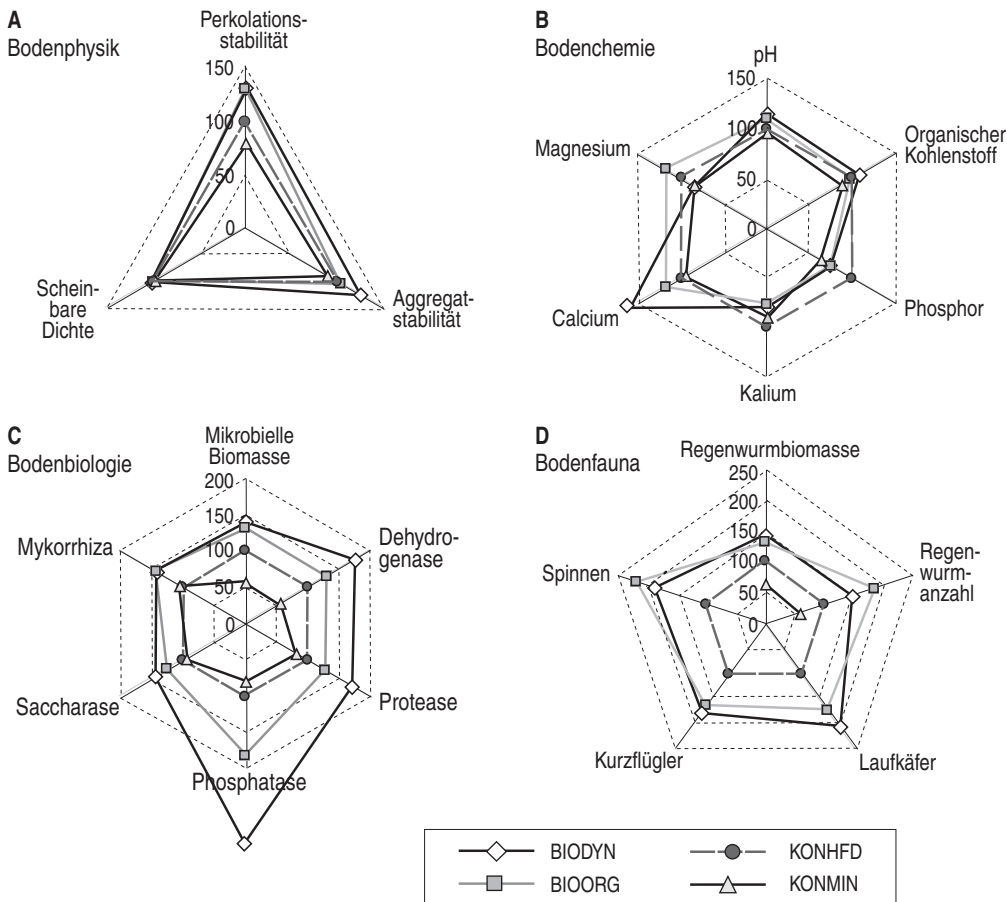


Abb. 2: Physikalische, chemische und biologische Bodeneigenschaften der DOK-Anbausysteme.

Die Analysen wurden im Pflughorizont durchgeführt (0-20 cm) mit Ausnahme der Bodenfauna. Die Resultate sind in vier Polarkoordinaten-Grafiken relativ zum konventionellen System KONHFD dargestellt (= 100%). Absolute Werte für 100%:

- (A) Perkolationsstabilität: 43,3 ml min⁻¹; Aggregatstabilität: 55 % stabile Aggregate > 250 µm; scheinbare Dichte: 1,23 g cm⁻³
- (B) pH (H₂O): 6,0; Organischer Kohlenstoff: 15,8 g C_{org} kg⁻¹; Phosphor: 21,4 mg P kg⁻¹; Kalium: 97,5 mg K kg⁻¹; Calcium: 1,7 g Ca kg⁻¹; Magnesium: 125 mg Mg kg⁻¹
- (C) Mikrobielle Biomasse: 285 mg C_{mic} kg⁻¹; Dehydrogenase-Aktivität: 133 mg TPF kg⁻¹ h⁻¹; Protease-Aktivität: 238 mg Tyrosin kg⁻¹ h⁻¹; Alkalische Phosphatase-Aktivität: 33 mg Phenol kg⁻¹ h⁻¹; Saccharase-Aktivität: 526 mg reduzierter Zucker kg⁻¹ h⁻¹; Mykorrhiza: 13,4 % Wurzellänge mit Mykorrhiza kolonisiert
- (D) Regenwurmbiomasse: 183 g m⁻²; Regenwurmanzahl: 247 Individuen m⁻²; Laufkäfer: 55 Individuen; Kurzflügler: 23 Individuen; Spinnen: 33 Individuen. Die Arthropoden wurden im KONMIN System wegen des Feldversuchsdesigns nicht untersucht.

Signifikante Effekte wurden für alle Parameter gefunden mit Ausnahme der scheinbaren Dichte, C_{org} und Kalium (Varianzanalyse, P < 0,05).

scheinlich tragen mikrobielle Umsetzungsprozesse verstärkt zur Phosphorennahrung der Pflanze bei.

Mykorrhizen als Mitglieder der Lebensgemeinschaft im Boden verbessern die Nährstoffaufnahme der Pflanze und tragen zur Bodenaggregatbildung bei (Smith/Read, 1997). Die Gesamtlänge an kolonisierten Wurzeln war in den ökologischen Systemen 40 Prozent höher als in den konventionellen (Mäder et al., 2000) (Abb. 2C).

Die Biomasse und Anzahl der Regenwürmer waren in den ökologischen Parzellen um den Faktor 1,3 bis 3,2 höher als in den konventionellen (Pfiffner/ Mäder, 1997) (Abb. 2D).

Wir untersuchten auch die teils räuberisch und vorwiegend oberirdisch lebenden Arthropoden, weil sie wichtige Nützlinge sind und als empfindliche Indikatoren für die Bodenfruchtbarkeit gelten. Die mittlere Aktivitätsdichte von Laufkäfern, Kurzflüglern und Spinnen war in den ökologisch bewirtschafteten Parzellen

fast doppelt so hoch wie in den konventionellen (Pfiffner/Niggli, 1996) (Abb. 2D).

Gesunde Ökosysteme zeichnen sich durch eine hohe Artenvielfalt aus. Der DOK-Versuch zeigt, dass ökologischer Landbau die Entwicklung einer relativ artenreichen Ackerbegleitflora erlaubt. Wir fanden neun bis 11 Beikraut-Arten in ökologisch bewirtschafteten Parzellen und nur eine Art in konventionellen. Zwischen 28 und 34 Laufkäferarten lebten im BIODYN-System, 26 bis 29 Arten im BIOORG-System und 22 bis 26 Arten im KONHFD-System (Pfiffner/Niggli, 1996). Einige gefährdete Arten kamen nur in den beiden ökologischen Systemen vor. Neben dem Angebot und der Vielfalt an Beikräutern haben der Einsatz von Pestiziden und die Bestandesdichte der Kulturen Einfluss auf Vielfalt und Häufigkeit der Arthropoden.

Effizientere Ressourcennutzung

Ein bemerkenswertes Resultat (Abb. 4) war die signifikante Zunahme der mikrobiellen Vielfalt (BIOLOG Inc., CA) in der Reihenfolge KONMIN, KONHFD < BIOORG < BIODYN, wobei diese Zunahme mit einer Abnahme des metabolischen Quotienten ein-



Fotos: T. Alföldi, FiBL

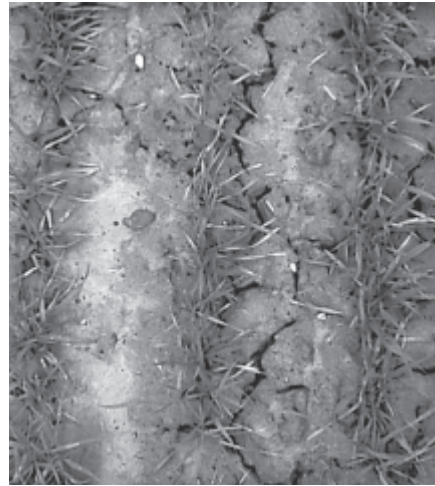


Abb. 3: Bodenoberfläche von bio-dynamischen (links) und konventionellen (rechts) Winterweizenparzellen. Regenwurmlosungen und Beikraut-Keimpflanzen sind in der bio-dynamischen Parzelle häufiger. Disaggregation von Bodenpartikeln in den konventionellen Parzellen führte zu einer glatteren Bodenoberfläche. Der Abstand der Weizenreihen beträgt 0,167 m.

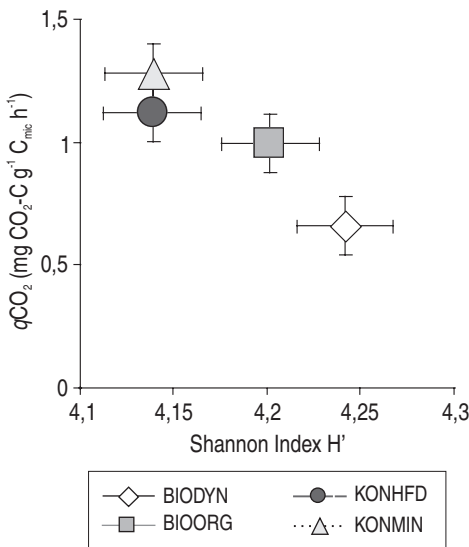


Abb. 4: Mikrobielle funktionelle Diversität der Bodenmikroorganismen (Shannon Index H') und metabolischer Quotient (qCO_2 = Bodenatmung / mikrobielle Biomasse) korrelieren negativ.

Eine höhere Diversität in den ökologisch bewirtschafteten Parzellen hängt mit einem kleineren qCO_2 zusammen, was auf eine bessere Energienutzungseffizienz der vielfältigeren Mikroorganismengemeinschaft hinweist. Der Shannon Index ist signifikant verschieden zwischen den beiden konventionellen Systemen (KONHFD, KONMIN) und dem BIODYN System, der qCO_2 zwischen KONMIN und BIODYN ($P < 0,05$).

herging (qCO_2) (Fließbach/Mäder, 1997). Nach der Theorie von Odum über die Entwicklung von Ökosystemen nimmt im Verlauf ihrer Sukzession das Verhältnis von Gesamt-Atmung zu Gesamt-Biomasse ab (Odum, 1969). Dieser Quotient wurde auf Bodenorganismen übertragen (Insam/Haselwandter, 1989), wobei die Bodenatmung zur Hauptsache von den Bodenmikroorganismen herrührt. Der kleinere qCO_2 in den ökologischen Systemen, speziell im BIODYN-System zeigt, dass diese Mikroorganismengemeinschaften fähig sind, organische Substanz im Boden vermehrt für ihr Wachstum zu nutzen und weniger Energie für den Erhaltungsbedarf benötigen.

Unter kontrollierten Bedingungen baute die vielfältigere Mikroorganismenge-

meinschaft des BIODYN-Bodens ¹⁴C-markiertes Pflanzenmaterial besser ab als die des konventionellen Bodens (Fließbach et al. 2000). Im Freilandversuch wurde die leichte Fraktion aus partikulärer organischer Substanz, die aus unzeretztem Pflanzenmaterial besteht, in den ökologischen Systemen vollständiger abgebaut (Fließbach/Mäder, 2000). Folglich bauen die vielfältigeren Mikroorganismengemeinschaften in den ökologisch bewirtschafteten Böden den Kohlenstoff aus organischen Reststoffen mit einem geringeren Energieaufwand in Biomasse ein und bilden dadurch mehr mikrobielle Biomasse. Entsprechendes ist über die funktionelle Rolle von vielfältigen Pflanzengesellschaften für die Nitratverwertung berichtet worden (Tilman et al., 1996) sowie über

die Bedeutung einer Vielfalt an Mykorrhizen für die Phosphataufnahme und Ertragsbildung der Pflanzen (van der Heijden et al., 1998). Die übereinstimmenden Ergebnisse dieser beiden Studien und unserer eigenen unterstützen die Hypothese, dass im System Boden-Pflanze eine vielfältigere Lebensgemeinschaft effizienter in der Ressourcennutzung ist. Die Verbesserung der biologischen Aktivität und Vielfalt im und auf dem Boden in den Anfangsstadien der Nahrungskette, die sich im DOK-Versuch zeigt, steuert wahrscheinlich auch einen positiven Beitrag für höher stehende Glieder der Nahrungskette bei, wie zum Beispiel für Vögel und andere größere Tiere.

Die ökologischen Anbausysteme weisen eine effiziente Nutzung der Ressourcen und eine erhöhte pflanzliche und tierische Vielfalt auf – Merkmale, die typisch sind für reife Ökosysteme. Im DOK-Versuch zeigt sich eine signifikante Korrelation ($r = 0,52$, $P < 0,05$) zwischen der oberirdischen Systemeffizienz (Energieeinheit pro Ertragseinheit) und der unterirdischen (CO_2 -Bildung pro Einheit mikrobielle Biomasse im Boden). Wir schließen daraus, dass organisch gedüngte Anbausysteme mit Klee gras in der Fruchtfolge, welche Hofdünger vom eigenen Betrieb verwenden, eine realistische Alternative zur konventionellen Landwirtschaft sind. □

Dr. Paul Mäder^{*)}, Dr. Andreas Fließbach, Dr. Urs Niggli, Forschungsinstitut für biologischen Landbau, Ackerstrasse, CH-5070 Frick, Schweiz sowie
Dr. David Dubois, Lucie Gunst, Dr. Padruot Fried, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landwirtschaft, Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zürich, Schweiz

^{*)} Korrespondenzadresse:
E-Mail paul.maeder@fibl.ch

Literatur:

Alföldi et al., unveröffentlicht
Drinkwater, L. E., P. Waggoner & M. Sarrantonio, 1998: Nature 396, 262
Fließbach, A. & P. Mäder, 1997: In: Microbial Communities – Functional versus Structural Approaches. Insam, H., A. Rangger (Eds.) (Springer, Berlin), 109
Fließbach, A., P. Mäder & U. Niggli, 2000: Soil Biol. Biochem. 32, 1131
Fließbach, A. & P. Mäder, 2000: Soil Biol. Biochem. 32, 757

- Insam, H. & K. Haselwandter, 1989: *Oecologia* 79, 174-178
- Mäder, P., S. Edenhofer, T. Boller, A. Wiemken & U. Niggli, 2000: *Biol. Fertil. Soils* 31, 150
- Oberson, A., J.-C. Fardeau, J.-M. Besson & H. Sticher, 1993: *Biol. Fertil. Soils* 16, 111
- Oberson, A., J.-M. Besson, N. Maire & H. Sticher, 1996: *Biol. Fertil. Soils* 21, 138
- Odum, E. P., 1969: *Science* 164, 262-270
- Oehl, F., A. Oberson, M. Probst, A. Fließbach, H. R. Roth & E. Frossard, 2001: *Biol. Fert. Soils* 34, 31
- Offermann, F. & H. Nieberg, 2000: *Economic Performance of Organic Farms in Europe*. (University of Hohenheim, Hago Druck & Medien, Karlsbad-Ittersbach, Germany), vol. 5.
- Pfiffner, L. & U. Niggli, 1996: *Biol. Agric. Hortic.* 12, 353
- Pfiffner, L. & P. Mäder, 1997: *Biol. Agric. Hortic.* 15, 3
- Pimentel, D. et al.: 1995: *Science* 267, 1117
- Pimentel, D. et al., 1997: *Bioscience* 47, 747
- Reganold, J. P., J. D. Glover, P. K. Andrews & H. R. Hinman, 2002: *Nature* 410, 926
- Schinner, F., R. Öhlinger, E. Kandeler & R. Margesin, 1993: *Bodenbiologische Arbeitsmethoden* (Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2. Aufl.)
- Siegrist, S., D. Schaub, L. Pfiffner & P. Mäder, 1998: *Agric. Ecosys. Environ.* 69, 253
- Simon, P., Landwirtschaftliches Zentrum Ebenrain, CH-4450 Sissach/BL, persönl. Mitteilung
- Smith, S. E. & D. J. Read, *Mycorrhizal Symbiosis* 1997: (Academic Press, London, ed. 2.)
- Tilman, D., D. Wedin & J. Knops, 1996: *Nature* 379, 718
- Tilman, D., 1999: *Proc. Nat. Acad. Sci., USA* 96, 5995
- van der Heijden, M. G. A. et al., 1998: *Nature* 396, 69

Wir danken allen Beteiligten am DOK-Versuch, insbesondere W. Stauffer und R. Frei und den Landwirten. Ebenso danken wir T. Boller und A. Wiemken und zwei unbekanntem Sachverständigen für ihre hilfreichen Kommentare. Diese Arbeit wurde durch das Schweizerische Bundesamt für Landwirtschaft und den Schweizerischen Nationalfonds unterstützt.

Diese Übersetzung ist
H. Vogtmann und
J.-M. Besson
gewidmet, die den
DOK-Versuch geplant haben.