

POTENZIALE DES ÖKOLANDBAUS IN ZEITEN DES KLIMAWANDELS

GERINGERE LACHGAS-EMISSIONEN VOR ALLEM AUF BIODYNAMISCHEN ACKERBÖDEN



AUTOREN: EVA-MARIA L. MINARSCH¹ (FOTO),
ANDREAS GATTINGER¹, COLIN SKINNER², PAUL MÄDER²

¹ Professur für Ökologischen Landbau mit dem Schwerpunkt nachhaltige Bodennutzung, Justus-Liebig-Universität Gießen, Karl-Glöckner-Str. 21 C, D-35394 Gießen

² Departement für Bodenwissenschaften, Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), Ackerstrasse, CH-5070 Frick
Kontakt: eva-maria.minarsch@agrar.uni-giessen.de



Geringste Lachgas-Emissionen im BIODYN-System

Kann ökologischer Landbau die Emission von Treibhausgasen reduzieren und damit einen Beitrag zum Klimaschutz leisten? Dieser Frage ist ein Team vom Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL) in der Schweiz unter der Leitung des Gießener Agrarwissenschaftlers Andreas Gattinger nachgegangen. In ihrer Studie, erschienen im Wissenschaftsjournal „Scientific Reports“ vom Februar 2019, berichten die Forscher von geringeren Lachgas-Emissionen ökologisch bewirtschafteter Ackerböden (Skinner et al., 2019).

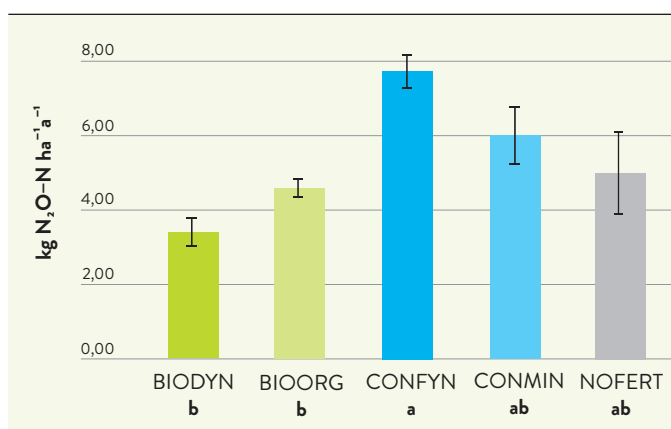
Lachgas-Emissionen in der Landwirtschaft

Lachgas (N_2O) ist neben Methan (CH_4) das weltweit wichtigste Treibhausgas (THG) aus der Landwirtschaft und wird primär in Böden auf der Grundlage mikrobiologischer Prozesse gebildet. Letztere sind entscheidend für die Nährstoffverfügbarkeit im Boden und damit für ein gesundes Pflanzenwachstum. Vereinfacht beschrieben, wird im Boden über den Nitrifikationsprozess der in organischen Verbindungen gebundene Stickstoff (N) als pflanzenverfügbares Nitrat (NO_3^-) herausgelöst. Dieses ist stark reaktiv, kann also, statt aufgenommen zu werden durch anaerobe Denitrifikation als Gas (NO , N_2O und N_2) entweichen (Firestone und Davidson, 1989). Menschliche Eingriffe in Ökosysteme sind die

Hauptursache für N_2O -Emissionen. In der Landwirtschaft ist der Einsatz stickstoffhaltiger Düngemittel mineralischen und organischen Ursprungs auf Böden der stärkste Treiber für N_2O -Emissionen (Umweltbundesamt, 2019).

Es konnte gezeigt werden, dass eine Reduktion der Applikationsmenge zu niedrigeren N_2O -Emissionen führt (Bouwman et al., 2002) und eine Intensivierung positiv mit einer nicht linearen Zunahme der N_2O -Emissionen korreliert (Shcherbak et al., 2014). Die Intensität der N_2O -Emissionen wird stark beeinflusst von Umweltfaktoren (u. a. Bodenart, -Struktur, pH-Wert, Witterung und damit Feuchtigkeit, Sauerstoff- und Nitratverfügbarkeit), Managementfaktoren (Düngemittel, -niveau, -zeitraum und Bodenbearbeitung) und schlussendlich der angebauten Kultur (Snyder et al., 2009) die mit ihrem spezifischen Nährstoffbedürfnis in Konkurrenz zur Bodenfauna steht (van Groenigen et al., 2010; Shcherbak et al., 2014). Das Reduzieren der zugeführten Stickstoffmenge hat die größte Hebelwirkung, um bodenbürtige N_2O -Emissionen zu reduzieren. >>>

ABB 1: BEWIRTSCHAFTUNG ENTSCHEIDET KLIMARELEVANZ



Lachgas-Emission verschiedener Bewirtschaftungssysteme im Jahresmittel (1. Jahr); verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede

LACHGAS (N_2O)

hat ein Treibhaus-Erwärmungs-Potenzial (engl. global warming potential, GWP), das rund 300-Mal (Methan 24-Mal) stärker wirkt als CO_2 . Die Umrechnung in CO_2 -Äquivalente erlaubt die summarische Betrachtung der mittleren Erwärmungswirkung des Gases über einen bestimmten Zeitraum (meist 100 Jahre). In der Stratosphäre (15–50 km Höhe) ist Lachgas nicht mehr stabil, sondern wird reaktiv und setzt ozonabbauende Prozesse in Gang.

TAB 1: N₂O-EMISSIONEN UNTERSCHIEDLICHER ANBAUSYSTEME

Anbausystem	Kleegras 24.8.2012–7.5.2013 256 Tage, Mittelwert		Silomais 7.5.–24.9.2013 140 Tage, Mittelwert		Grünbrache 24.9.2013 – 18.3.2014 175 Tage, Mittelwert		Jahresmittel 18.3.2013–18.3.2014 Mittelwert	
BIODYN	0,30	bc	2,07	b	1,15	bc	3,38	b
BIOORG	0,40	b	3,55	ab	0,89	bc	4,66	b
CONFYM	0,49	a	4,75	a	2,81	a	7,68	a
CONMIN	0,26	c	4,22	a	1,59	ab	5,91	ab
NOFERT	- *		4,17	a	0,73	c	5,03	ab
Vergleich	p-Wert		p-Wert		p-Wert		p-Wert	
bio. vs. kon.	0,333		0,008		<0,0001		<0,0001	

Mittelwerte und Signifikanz der Unterschiede der aufsummierten flächenbezogenen N₂O-Emissionen (kg N₂O-N pro Hektar) der Kleegras-Silomais-Grünbrache Kulturfolge sowie der Jahresmittelwert für die verschiedenen Anbausysteme. Die Buchstaben kennzeichnen den paarweisen Mittelwertvergleich (Post-hoc Tukey Test): unterschiedliche Buchstaben bedeuten signifikante Unterschiede (p<0,05). Die paarweise Mittelwertvergleiche (Post-hoc t-Test) der

zusammengefassten biologisch- (BIODYN+BIOORG) und konventionellen (CONFYM+CONMIN) Anbausysteme zeigen signifikante Unterschiede bei einem p-Wert kleiner 0,05.

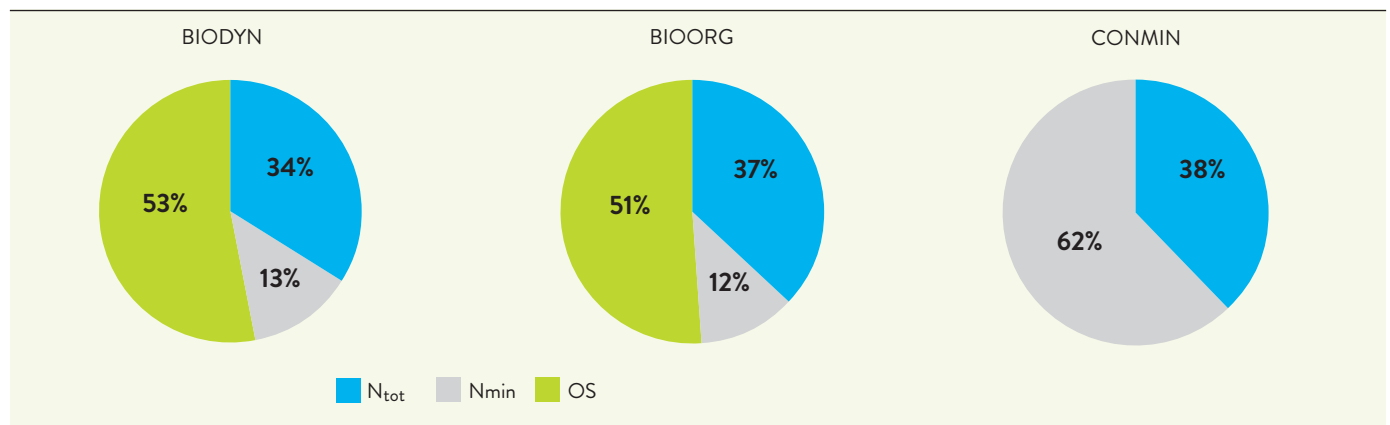
* Die Messungen von NOFERT starteten am 14. März 2013 und wurden von der statistischen Analyse ausgeschlossen. Quelle: Verändert nach Skinner et al. (2019).

Hervorgehoben wird die Notwendigkeit der Stickstoffminderung unter anderem in einer jüngst im Fachjournal Nature Climate Change veröffentlichten Studie. Das internationale Forscherteam geht davon aus, dass die globalen N₂O-Emissionen seit 2009 deutlich stärker angestiegen sind als bislang mit dem IPCC-Emissionsfaktor von 1% (De Klein et al., 2006) berechnet wurde (Thompson et al., 2019). Der Emissionsfaktor, der im Rahmen der nationalen THG Inventare zur Berechnung bodenbürtiger N₂O-Emissionen der Landwirtschaft anhand des Stickstoffeintrags verwendet wird, sollte laut Thompson et al. (2019) global bei 2,3% liegen und je nach Region und Stickstoffeintragsmenge entsprechend angepasst werden.

Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft

Die THG-Emissionen der deutschen Landwirtschaft beliefen sich 2017 auf 66,3 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente und entsprachen damit 7,3 % der deutschen Gesamtemissionen. Mit rund 40,2 % bildeten landwirtschaftliche Böden die wichtigste THG-Quelle, dicht gefolgt von CH₄-Emissionen aus der Tierhaltung (Umweltbundesamt 2019). Im Hinblick auf den deutschen Klimaschutzplan, der eine Minderung der landwirtschaftlichen THG-Emissionen um 8–13 % bis 2030 vorsieht, ist es von großem Interesse, emissionsmindernde Kulturmaßnahmen zu identifizieren und zu fördern, um Anbausysteme klimafreundlicher zu gestalten (BMU 2016).

ABB 2: HERKUNFT DES STICKSTOFFS IN DEN VERSCHIEDENEN ANBAUSYSTEMEN



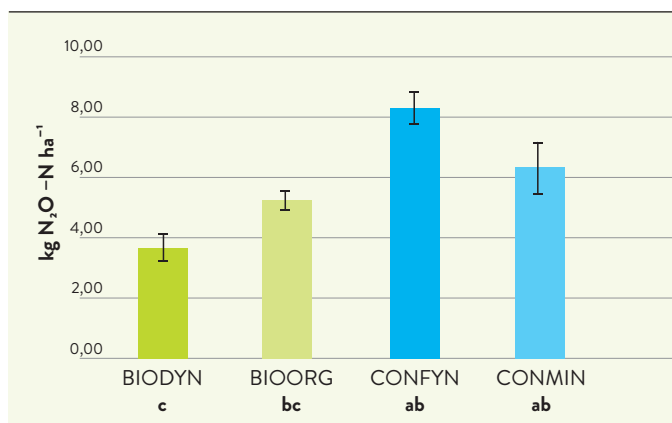
Effektive Stickstoffquellen der Anbausysteme relativ zu CONFYM in %. OS = organische Substanz.

Wissenschaftliche Grundlage der Studie

Skinner und Kollegen hatten bereits 2014 mittels umfassender Literaturrecherche den globalen Datensatz an vergleichenden Feldmessungen ökologischer und konventioneller Anbausysteme zu bodenbürtigen THG-Emissionen (N_2O und CH_4) zusammengetragen. Ziel der statistischen Analyse war, erstmalig den Unterschied der Anbausysteme anhand von Messwerten zu quantifizieren. Basierend auf zwölf Studien (70 Vergleichspaare, Ackerland und Wiese umfassend) mit einem Messzeitraum von mindestens einem Jahr hatte die Metaanalyse ergeben, dass ökologisch bewirtschaftete Flächen signifikant niedrigere N_2O -Emissionen und höhere CH_4 -Aufnahmen pro Hektar (flächenbezogen) aufweisen als konventionell bewirtschaftete. Ertragsbezogen wurden jedoch leicht höhere N_2O -Emissionen pro ökologisch erzeugter Ertrags-einheit ermittelt. Dies ist mit dem in den Daten um 20 % geringeren Flächenertrag unter ökologischer Bewirtschaftung zu erklären. Ein um lediglich 9 % höherer Öko-Ertrag, hätte diese Differenz bereits ausgeglichen.

Die Metaanalyse von Skinner et al. (2014) stützt sich auf Studien, die Anbausysteme nach durchschnittlich neun Jahren Laufzeit untersucht haben. Umstellungen von Anbausystemen gehen mit erheblichen Änderungen, die massiven Störungen des „Acker-Ökosystems“ entsprechen, einher und können mehrere Jahrzehnte zur Einstellung eines neuen Gleichgewichts benötigen. Van Kessel et al. (2013) stellten beispielsweise fest, dass klimaschonende Auswirkungen auf N_2O -Emissionen durch Umstellung auf reduzierte Pflugverfahren (no-till, reduced till) erst nach über zehn Jahren Laufzeit sichtbar werden, siehe auch Krauss et al. (2017). Um Umstellungseffekte auszuschließen, sind daher Feldmessungen auf Standorten nahe dem Equilibrium und während mindestens einer gesamten Fruchtfolge notwendig.

ABB 3: **BIODYNAMISCH MIT VORTEIL**



Flächenbezogene Lachgas-Emissionen ($\text{N}_2\text{O-N}$ je Hektar) über die gesamte Fruchtfolge von 571 Tagen (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede).

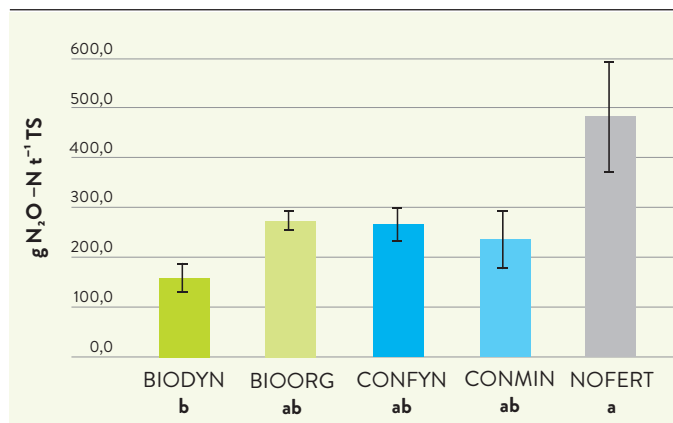


Forscher Colin Skinner bei der Probenahme im Versuchsfeld

Der DOK Langzeit-Feldversuch

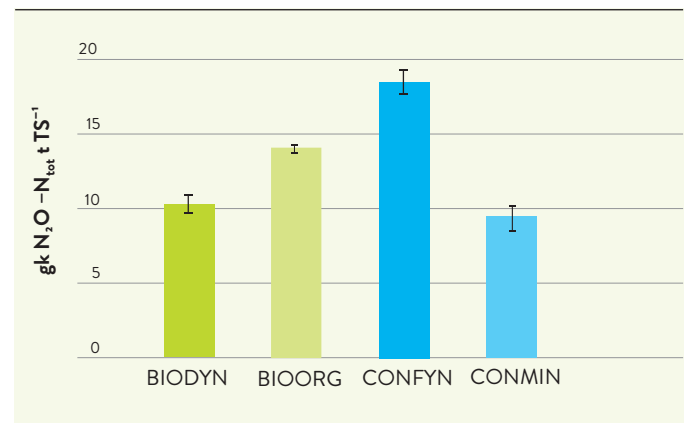
Die aktuelle Studie zur Untersuchung der bodenbürtigen Treibhausgase wurde im 1978 gestarteten DOK-Langzeitversuch ($47^{\circ}30' \text{N}$; $7^{\circ}32' \text{E}$; 306 m ü NN) in Therwil, Schweiz auf einem Haplic Luvisol (15 % Sand, 70 % Schluff und 15 % Lehm) auf tiefem Löss durchgeführt (Abb. 1). Hierbei handelt es sich um einen der bedeutendsten Langzeit-Feldversuche zum Vergleich ökologischer und konventioneller Anbausysteme (Mäder et al., 2002). Die siebenjährige Fruchtfolge wie auch die Intensität der Düngung mit 1,4 GVE (Großvieheinheit) unterscheidet sich nicht zwischen den Anbausystemen. Nach 34 Jahren Laufzeit des DOK Versuchs wurden im Rahmen der aktuellen Studie in der Kulturfolge Klee-gras-Mais-Grünbrache die Treibhausgase N_2O und CH_4 in fünf Anbausystemen bestimmt. Diese umfassten das biologisch-dynamische (BIODYN), biologisch-organische (BIOORG) sowie zwei konventionelle Bewirtschaftungssysteme, einmal mit Mineraldünger allein (CONMIN) und in Kombination mit Hofdünger (CONFYN). Zusätzlich wurde eine ungedüngte Kontrolle (NOFERT) untersucht. Aufgrund der langen Laufzeit des DOK Versuches entwickelten die Böden systemspezifische Merkmalsausprägungen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die THG-Gasfluss-Daten systemspezifische physikalische, chemische und biologische Bodeneigenschaften reflektieren.

Die Untersuchungsperiode dauerte 571 Tage und erfolgte im Zeitraum von August 2012 bis März 2014. Die THG-Beprobungen wurden wöchentlich mit der Methode der geschlossenen Hauben (Hutchinson und Mosier, 1981) durchgeführt (Abb. 2). Die Proben wurden mittels Gaschromatographie analysiert (Krauss et al., 2017; Hüppi et al., 2018) und darauf basierend die Gasflüsse berechnet. Begleitend wurden Bodenproben gezogen, um die Feuchte und den Stickstoffgehalt zu ermitteln sowie Boden- und Lufttemperatur zu Beginn und Ende der Probennahme zu messen. >>>

ABB 4: N₂O-EMISSIONEN UNTER SILOMAIS

Ertragsbezogene Lachgas-Emissionen (N₂O-N je t Trockensubstanz) von Silomais

ABB 5: STICKSTOFFEFFIZIENZ DER SYSTEME



Stickstoffeffizienz der Silomaiskultur im Verhältnis von Gesamtstickstoff (kg N_{tot}) zu Trockensubstanz (t TS).

Geringere flächenbezogene Emissionen

Es konnte gezeigt werden, dass die flächenbezogen und über alle drei Fruchtfolgen hinweg aufsummierten N₂O-Emissionen der ökologisch bewirtschafteten Anbausysteme (BIODYN und BIOORG) im Mittel rund 40 % niedriger waren als die der konventionellen (CONFYN und CONMIN). Im Jahresmittel ergaben sich insgesamt 2,78 kg weniger N₂O-N Emissionen pro Hektar der ökologisch bewirtschafteten Anbausysteme (Tab. 1). Im Vergleich dazu hatten Skinner et al. (2014) in ihrer Metaanalyse 1,05 kg weniger N₂O-N pro Hektar der ökologischen Anbausysteme ermittelt, was ungefähr einer Reduktion um ein Drittel entspricht. Das ist ein Indiz für die Richtigkeit der Annahme der Autoren, dass in biologischen Anbausystemen die N₂O-Emissionen im Laufe der Jahrzehnte abnehmen. Korrelationsanalysen deuten darauf hin, dass die über alle Anbausysteme (NOFERT ausgeschlossen) hinweg aufsummierten N₂O-Emissionen während der Silomaiskultur signifikant mit dem Eintrag von Stickstoff, insbesondere mineralischem N, und dem pH-Wert zusammenhängen.

Die aufsummierten CH₄-Emissionen schwankten zwischen -0,49 (CONMIN) und +3,29 kg CH₄-C pro Hektar (CONFYN). Ein signifikanter Anbausystemeffekt mit den höchsten Werten für CONFYN, jedoch kein Unterschied zwischen organischen und konventionellen Systemen wurde festgestellt. Folglich zeigte sich, anders als aufgrund der Metaanalyse von Skinner et al. (2014) erwartet, neben den ökologischen Anbausystemen auch CONMIN als CH₄-Senke.

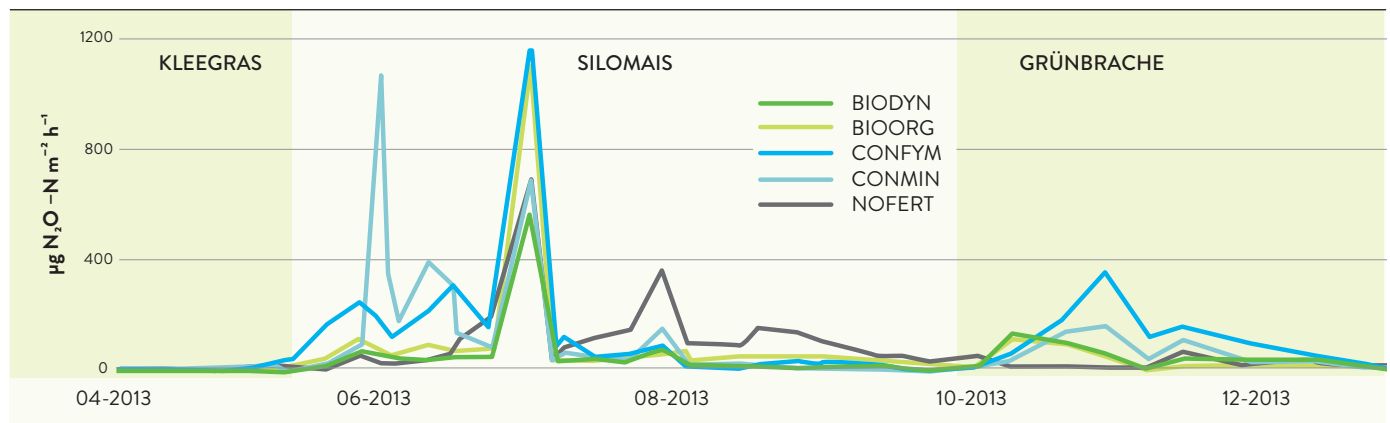
Hohe N₂O-Emissionen in der Mulldüngung

In allen fünf Anbausystemen wurden die geringsten flächenbezogenen N₂O-Emissionen während der Klee grasphase und die höchsten während der Wachstumsphase des Silomais gemessen (Abb. 3). Der Klee grasumbruch vor der Maisaussaat zeigte erwartungsgemäß erhebliche N₂O-Emissionen. Damit in Zusammenhang stehen auch die unerwartet hohen N₂O-Emissionen für das ungedüngte Anbausystem (NOFERT), die im Schnitt nur unwesentlich geringer als die der beiden konventionellen Varianten waren (Tab. 1). Es wird davon ausgegangen, dass im Boden des NOFERT-Systems u.a. ein Mangel der Makronährstoffe Phosphor und Kalium vorliegt und folglich Pflanzenwachstum und Stickstoffaufnahme trotz der Stickstoffverfügbarkeit durch die Klee graseinarbeitung limitiert sind. Außerdem scheinen die niedrigen pH-Werte unter NOFERT den letzten Schritt der Denitrifikation und damit die Umwandlung von N₂O zu N₂ zu hemmen (Krause et al., 2017). Die Mulldüngung ist somit keine Option zur Minderung von THG-Emissionen.

Kein Unterschied bei ertragsbezogenen N₂O-Emissionen

Obleich mit einer Öko-Ertragslücke von 27 % witterungsbedingt ein außerordentlicher Unterschied im Maisertrag erzielt wurde, so zeigten doch die ertragsbezogenen N₂O-Emissionen der aktuellen Studie keinen Unterschied zwischen den ökologischen und konventionellen Anbausystemen auf. Die geringsten ertragsbezogenen N₂O-Emissionen wurden im BIODYN- (154,8 g N₂O-N/t Trockensubstanz) und die höchsten im NOFERT-System (478,8 g N₂O-N/t Trockensubstanz) analysiert. Diese Erkenntnisse stehen im Gegensatz zu den Ergebnissen der Metaanalyse von Skinner et al. (2014) und weisen nach, dass biologische Anbausysteme nicht immer mit erhöhten ertragsbezogenen N₂O-Emissionen einhergehen.

ABB 6: LACHGAS-EMISSION IN DER VEGETATIONSPERIODE VON SILOMAIS



Moderate Ausschläge bei Biodynamisch (dunkelgrün): Zeitliche Dynamik des Gasflusses von N_2O-N im Rahmen der Klee-gras-Mais-Grünbrache Kulturfolge in den fünf Anbausystemen. Ausschnitt aus der Gesamtmessung. (Quelle: Verändert nach Skinner et al 2019.)

Geringste N_2O -Emissionen im BIODYN System

Bemerkenswert sind außerdem die durchwegs niedrigen N_2O -Emissionen des biologisch-dynamischen Anbausystems (BIODYN). Im Vergleich zu BIOORG wurden signifikant geringere flächen- und tendenziell auch ertragsbezogene N_2O -Emissionen verzeichnet. Der Hauptunterschied der beiden biologischen Anbausysteme liegt in der Applikationsform des Hofdüngers, Mistkompost im BIODYN- und Rottemist im BIOORG-System.

Skinner und Kollegen gehen davon aus, dass die langjährige Kompostanwendung, die sich positiv auf Bodenstruktur und Bodenleben, sowie im Gegensatz zu Rotte- und Stapelmist auch auf den pH-Wert auswirkt, ursächlich ist. So bestehen zum organischen Bodenkohlenstoffgehalt und der mikrobiellen Biomasse, die beide im BIODYN-System erhöht vorliegen, negative Korrelationen zu N_2O -Emissionen. Ein möglicher Einfluss der im BIODYN-System eingesetzten Präparate auf die N_2O -Emissionen konnte aufgrund des experimentellen Designs in diesem Systemvergleich nicht untersucht werden.

Schlussfolgerung

Die Potenziale des Ökolandbaus in Zeiten des Klimawandels sind:

- geringere bodenbürtige N_2O -Emissionen;
- erhöhte CH_4 -Aufnahme;
- erhöhter Boden pH-Wert, organischer Bodenkohlenstoff und mikrobielle Biomasse.

Von zentraler Bedeutung sind hierfür u.a. die nachhaltige Bodennutzung, die gezielte Bewirtschaftung mit Wirtschaftsdünger und die vielfältige Fruchtfolge.

Die Leistungen des Ökolandbaus für Umwelt und Gesellschaft sind durchaus weitreichender als hier dargestellt und lassen sich im Thünen Report 65, der auf einer umfassenden Literaturrecherche basiert, nachlesen (Sanders und Heß, 2019). •

Literatur: • BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2016) Klimaschutzplan 2050: Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, 92 p. • Bouwman AF, Boumans LJM, Batjes NH (2002) Emissions of N_2O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4), 1058. • De Klein C et al. (2006) in IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (eds.), Vol. 4, IGES, Japan. • Firestone MK, Davidson EA (1989) Microbiological basis of NO and N_2O production and consumption in soil, in: "Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere" Andreae MO and Schimel DS (eds.), Wiley, Chichester, p. 7–21. • Hüppi R, Felber R, Krauss M, Six J, Leifeld J, Fuß R (2018) Restricting the nonlinearity parameter in soil greenhouse gas flux calculation for more reliable flux estimates. *PLoS ONE* 13(7):e0200876. • Hutchinson GL, Mosier AR (1981) Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. *Soil Science Society of America Journal*, 45, 311–6. • Krause H-M, Thonar C, Eschenbach W, Well R, Mäder P, Behrens S, Kappler A, Gättinger A (2017) Long term farming systems affect soils potential for N_2O production and reduction processes under denitrifying conditions. *Soil Biology and Biochemistry* 114, 31–41. • Krauss M, Ruser R, Müller T, Hansen S, Mäder P, Gättinger A (2017) Impact of reduced tillage on greenhouse gas emissions and soil carbon stocks in an organic grass-clover ley-winter wheat cropping sequence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 239, 324–333. • Mäder P, Fliessbach A, Dubois D, Gunst L, Fried P, Niggli U (2002) Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* 296, 1694–1697. • Sanders J, Hess J (2019) Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und

Gesellschaft. Johann Heinrich von Thünen-Institut: Braunschweig, Germany • Shcherbak I, Millar N, Robertson GP (2014) Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N_2O) emissions to fertilizer nitrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (25), 9199–9204 • Skinner C, Gättinger A, Krauss M, Krause H-M, Mayer J, van der Heijden M, Mäder P (2019) The impact of long-term organic farming on soil-derived greenhouse gas emissions. *Scientific Reports* 9, 1702 • Skinner C, Gättinger A, Müller A, Mäder P, Fliessbach A, Stolze M, Ruser R, Niggli U (2014) Greenhouse gas fluxes from agricultural soils under organic and non-organic management – a global metaanalysis. *Science of the Total Environment* 468–469, 553–563. • Snyder CS, Bruulsema TW, Jensen TL, Fixen PE (2009) Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 133, 247–266 • Thompson RL, Lassaletta L, Patra PK, Wilson C, Wells KC, Gressent A, Koffi EN, Chipperfield MP, Winiwarter W, Davidson EA, Tian H, Canadell JG (2019) Acceleration of global N_2O emissions seen from two decades of atmospheric inversion. *Nature Climate Change* 1–6. • Umweltbundesamt (2019) Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990–2017, 947 p. UNFCCC-Submission • Van Groenigen JW, Velthof GL, Oenema O, Van Groenigen KJ, Van Kessel C (2010) Towards an agronomic assessment of N_2O emissions: A case study for arable crops. *European Journal of Soil Science*, 61(6), 903–913. • Van Kessel C, Venterea R, Six J, Adviento-Borbe MA, Linquist B, Van Groenigen KJ (2013) Climate, duration, and N placement determine N_2O emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis. *Global Change Biology* 19, 33–44.