



SCIENTIFIC PANEL

ON RESPONSIBLE PLANT NUTRITION

TREIBHAUSGASEMISSIONEN DURCH VERANTWORTLICHE PFLANZENERNÄHRUNG MINIMIEREN

Issue Brief 07, Dezember 2024

KERNPUNKTE

Die Bereitstellung von Nährstoffen für das Pflanzenwachstum in Form von anorganischen oder organischen Düngemitteln führt zu Treibhausgas (THG)-Emissionen aus den Prozessen ihrer Herstellung und Transport zum landwirtschaftlichen Betrieb sowie aus dem Boden nach der Ausbringung. Es bestehen viele Möglichkeiten zur Emissionsreduzierung entlang der gesamten Düngemittelversorgungskette. Die Herausforderung besteht darin, Emissionen in großem Maßstab zu reduzieren und dabei gleichzeitig die Nahrungsmittelproduktion und das Einkommen der Landwirte zu sichern. Die Reduzierung der THG-Emissionen aus dem Boden in Form von Lachgas (Distickstoffoxid, N_2O) und die Verbesserung der Stickstoffnutzungseffizienz (NUE) von Düngemitteln sind dabei von besonderer Bedeutung.

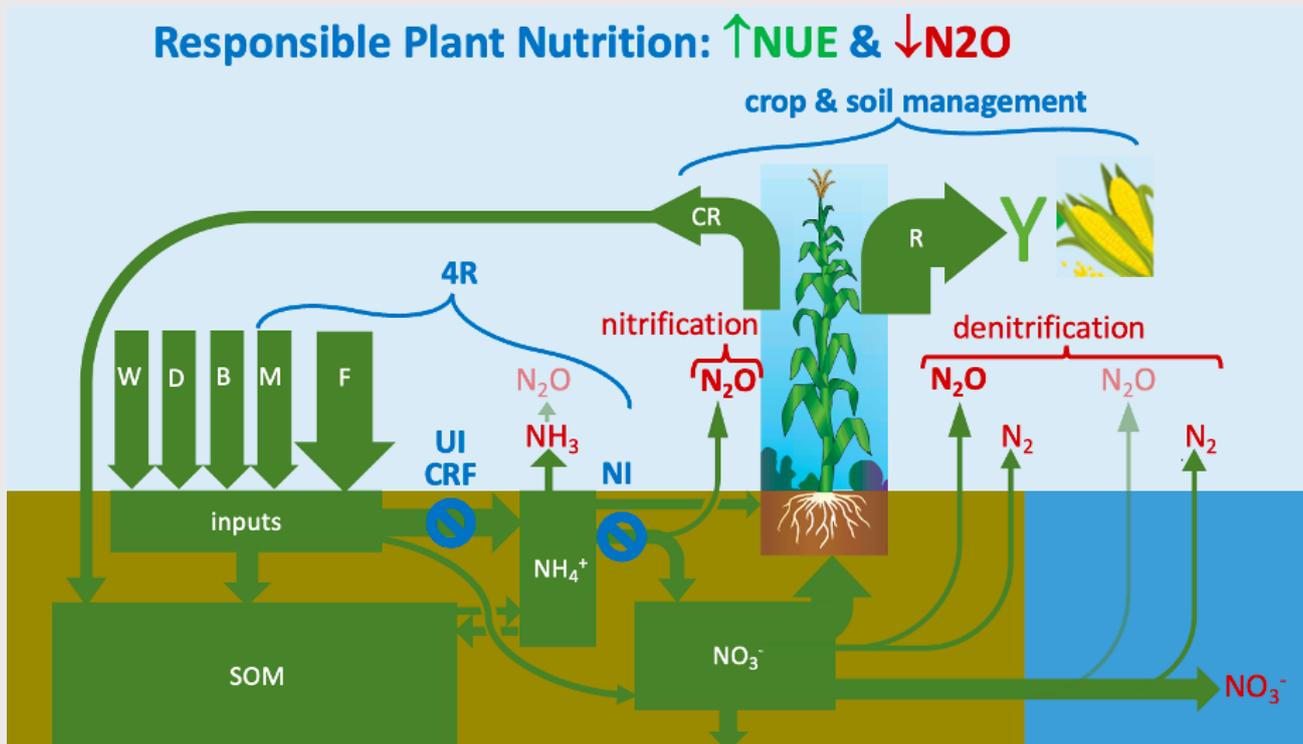


Abbildung 1. Quellen von N_2O -Emissionen aus Stickstoff (N)-Einträgen in landwirtschaftliche Böden. Die Emissionen steigen bei der Ausbringung von Düngemitteln (F) oder Wirtschaftsdünger (M). Direkte Emissionen entstehen, wenn Ammonium (NH_4^+) nitrifiziert und Nitrat (NO_3^-) denitrifiziert werden. Indirekte Emissionen entstehen durch Verluste ins Abwasser und durch Ammoniak (NH_3)-Verluste in die Luft. Zusätzliche Einträge umfassen die biologische Stickstofffixierung (B), atmosphärische Deposition (D) und Bewässerungswasser (W). Die Rückführung von Ernterückständen (CR) trägt ebenfalls N zu den Bodenpools hinzu, aus denen N_2O emittiert wird. Die Optimierung der N-Nutzungseffizienz (NUE) – durch möglichst genaue Anpassung der Einträge an die Ernteabfuhr (R) – wird durch Management der Einträge (4R), Kulturen und Böden zur Optimierung der Erträge (Y) erreicht. Verbesserungen der NUE reduzieren die Düngemittlemissionen pro Einheit erzeugtes Produkt. Nitrifikationshemmer (NI), Dünger mit kontrollierter Freisetzung (CRF) und Ureasehemmer (UI) sind effektive 4R-Praktiken, die die N_2O -Emissionen pro eingesetzte N-Einheit verringern.

N_2O -Emissionen aus dem Boden sind hochgradig variabel und werden durch Boden- und Klimafaktoren sowie deren Wechselwirkungen mit Landwirtschaftspraktiken bestimmt. Trotz dieser Variabilität können eine Reihe von Maßnahmen im Rahmen der verantwortungsvollen Pflanzenernährung Emissionen reduzieren. Diese Maßnahmen umfassen sowohl 4R-Nährstoffmanagementpraktiken als auch Pflanzen- und Bodenbewirtschaftungspraktiken, die die Ernteerträge und die Stickstoffaufnahme der Pflanzen verbessern. Die Düngemittel und Inhibitoren, welche die Stickstoffumwandlung im Boden hemmen können N_2O -Emissionen vom Feld direkt reduzieren, während alle 4R-Komponenten (Düngerart, Rate, Zeit und Platzierung) zusammen mit der Pflanzen- und Bodenbewirtschaftung die NUE verbessern können, mit Auswirkungen auf alle Emissionen der gesamten Düngemittelversorgungskette. Diese Lösungen haben das Potenzial, einen großen Teil der jährlichen THG-Emissionen aus der Düngemittelnutzung in den nächsten Jahrzehnten zu mindern, insbesondere wenn sie kombiniert angewendet werden.

Wir schlagen Maßnahmen vor, die am besten geeigneten Mechanismen in den Zielregionen zu priorisieren, um kurzfristigen Erfolg und gleichzeitig langfristige Fortschritte zu ermöglichen. Soziale und wirtschaftliche Einschränkungen, die die Fähigkeit der Landwirte zur Übernahme emissionsmindernder Praktiken beeinflussen, müssen angegangen werden, um eine breitere Wirkung zu erzielen. Neue Emissionserfassungsmethoden und marktgetriebene Kreditsysteme müssen entwickelt werden, um Lösungen zu unterstützen, die die THG-Emissionen aus der Düngemittelnutzung nachweislich reduzieren.

WAS SIND DIE PROBLEME?

In allen Bereichen menschlicher Aktivität sind dringende Maßnahmen erforderlich, um THG-Emissionen zu reduzieren und die Auswirkungen des Klimawandels zu minimieren, einschließlich des Agrar- und Ernährungssektors (1). Im Jahr 2021 betrug die Emissionen des gesamten Agrar- und Ernährungssektors etwa 16 Milliarden Tonnen Kohlendioxid-Äquivalent (Gt CO₂e) oder etwa 30 % der gesamten anthropogenen Emissionen (53 Gt CO₂e) (2). Die Agrar- und Ernährungsemissionen waren in Asien (6,8 Gt CO₂e) und Amerika (4,3 Gt CO₂e) am höchsten, was die große Bevölkerungszahl und geografische Ausdehnung dieser Regionen widerspiegelt. Landwirtschaftliche Betriebsabläufe zur Erzeugung von Nahrungsmitteln und anderen Produkten (d.h. ab Hof) trugen 48 % aller Emissionen des Agrar- und Ernährungssystems bei, während Prozesse vor (z.B. Düngemittelproduktion) und nach der Produktion (z.B. Lebensmittelverpackung) etwa 33 % und Landnutzungsänderungen 19 % ausmachen (Abb. 2). Aufgrund gesteigerter landwirtschaftlicher Produktivität und Effizienz sind die Pro-Kopf-THG-Emissionen für die Nahrungsmittelproduktion im Laufe der Zeit tatsächlich gesunken. 1990 beliefen sich die nahrungsmittelbezogenen Emissionen pro Person auf 3,0 t CO₂e/Jahr. Diese Zahl sank bis 2015 auf 2,4 t CO₂e/Jahr (3) und betrug 2021 etwa 2 t CO₂e/Jahr pro Kopf (2).

Der Agrar- und Ernährungssektor spielt eine wichtige Rolle um globale Emissionsreduktionsziele (4) zu erreichen und muss dabei gleichzeitig die Ernährungssicherheit und Bodengesundheit gewährleisten, die Biodiversität erhalten, Umweltauswirkungen reduzieren und das Einkommen der Landwirte verbessern. Die Steigerung der Ernteerträge und der Nährstoffnutzungseffizienz auf den bestehenden landwirtschaftlichen Flächen durch verantwortungsvolle Pflanzenernährung wird für die Erreichung dieser Ziele von entscheidender Bedeutung sein (5). Die Bereitstellung von Nährstoffen in Form von mineralischen Düngemitteln zur Unterstützung des Pflanzenwachstums führt zu THG-Emissionen aufgrund der Gewinnung, Produktion und Verarbeitung. Emissionen entstehen auch durch Transport und Nutzung auf Betriebsebene, d.h. durch den Einsatz von Maschinen und aus Böden; letztere verursacht durch die Ausbringung von N-Düngemitteln (6).

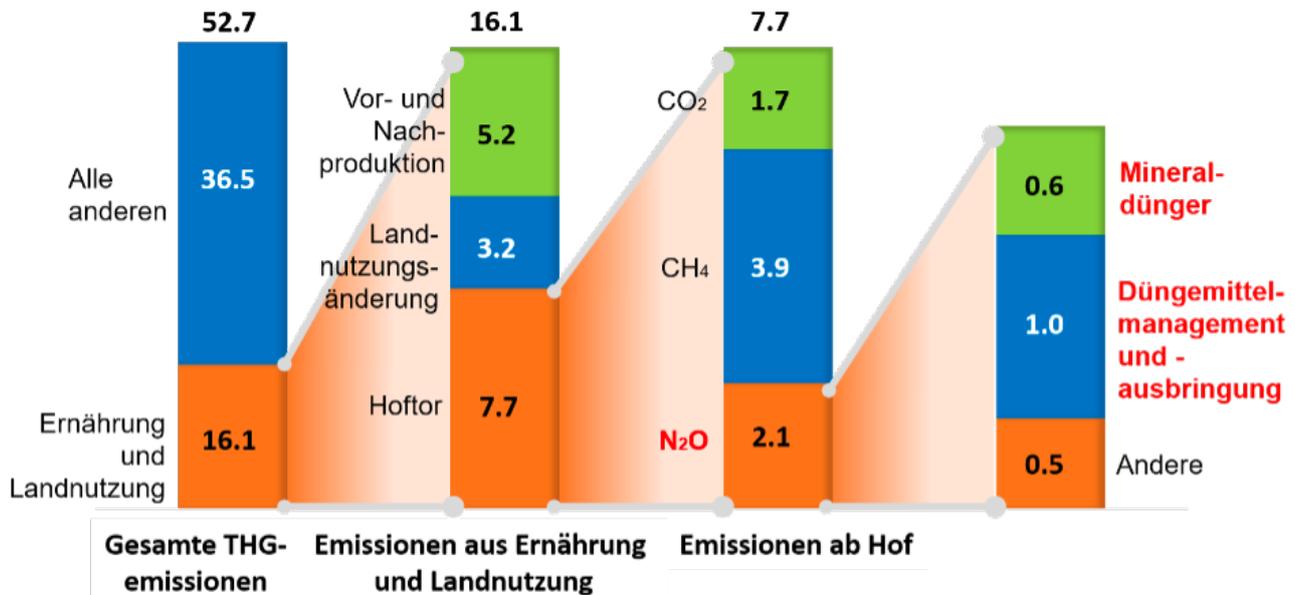


Abbildung 2. Jährliche Treibhausgas (THG)-Emissionen (Gt CO₂e) des Agrar- und Ernährungssektors nach Treibhausgasen und primären Quellen. Die gezeigten Werte sind Durchschnittswerte von 2017-2021. Die Werte am oberen Rand jedes Balkens sind die Summe der jeweils dargestellten Komponenten. Die äußerste rechte Spalte schlüsselt die N₂O-Emissionen ab Hof auf. THG-Emissionen im Zusammenhang mit der Produktion und dem Transport von Düngemitteln (nicht dargestellt) belaufen sich auf ~0,5 der 5,2 Gt CO₂e, die für Vor- & Nachproduktion angegeben sind. Quelle: FAOSTAT Emissionsgesamtwerte, <https://www.fao.org/faostat/en/#data/GT>

Stickstoff ist der essentielle Pflanzennährstoff mit den größten THG-Auswirkungen. Tabelle 1 fasst globale THG-Emissionen zusammen, die mit der Produktion und Nutzung von N-Düngemitteln im Jahr 2018 verbunden waren, adaptiert aus einer Studie, die mehrere Informationsquellen berücksichtigte, einschließlich des Weltklimarats (IPCC) und der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation (FAO) (7). Erstens wird geschätzt, dass der energieintensive Prozess der synthetischen N-Produktion für 0,44 Gt oder 440 Mt CO₂e/Jahr verantwortlich ist. Zweitens erhöht der N-Düngereintrag in den Boden die mikrobielle Produktion des starken Treibhausgases Distickstoffoxid (N₂O), bezeichnet als direkte N₂O-Emissionen; N-Verluste in Form von Ammoniakverflüchtigung und Nitratwaschung führen zusätzlich zu N₂O-Emissionen außerhalb des Standorts, bezeichnet als indirekte N₂O-Emissionen (Abb. 1). Somit trugen die direkten und indirekten Feldemissionen von N₂O 0,6 Gt CO₂e der 52,7 Gt CO₂e globalen Emissionen bei (Abb. 2) oder 0,66 Gt CO₂e, wenn die CO₂-Freisetzung aus Harnstoff einbezogen wird (Tabelle 1). In der Summe trug die synthetische N-Düngemittel-Lieferkette mit Produktion, Transport und Feldemissionen 1,13 Gt CO₂e oder 2,1 % aller globalen THG-Emissionen bei (Tabelle 1). China, Indien, USA und EU28 waren für 62 % der gesamten Düngemittel-N-Emissionen verantwortlich. Es sollte jedoch beachtet werden, dass diese Schätzungen eine durchschnittliche Abweichungen von etwa ±15 % aufweisen, hauptsächlich aufgrund der Unsicherheiten bei den direkten und indirekten N₂O-Feldemissionen (±42 bzw. ±24 %) (7).

1. CO₂e – CO₂ equivalent as measure to account for the different global warming potential of CO₂, N₂O, and CH₄
 2. Commonly included in Scope 1 and 2 emissions for the fertilizer industry
 3. Commonly included in Scope 3 emissions for the fertilizer industry

Tabelle 1. Geschätzte globale Treibhausgasemissionen aus der Produktion und Nutzung anorganischer N-Düngemittel in der Landwirtschaft im Jahr 2018 (7). Die Summe der indirekten und direkten N₂O-Emissionen beträgt 662 Mt CO₂e (=0,662 Gt CO₂e), während die Werte in Abb. 2 aufgrund der unterschiedlichen Zeiträume 0,6 Gt CO₂e zeigen.

TREIBHAUSGASEMISSIONS-KOMPONENTEN DER DÜNGEMITTEL-LIEFERKETTE	Mt* CO ₂ e	ANTEIL (%)
Synthetische N-Produktion	439	38.8
Transport	30	2.7
Direkte Feldemissionen (N ₂ O, CO ₂)	466**	41.2
Indirekte N ₂ O Emissionen	196***	17.3
GESAMTEMISSIONEN	1131	100

* Millionen Tonnen (1 Mt = 0.001 Gt)

** 380 Mt CO₂e als direkte Boden-N₂O-Emissionen plus 86 Mt CO₂e als CO₂, das aus Harnstoffdünger freigesetzt wird

***66 Mt CO₂e als indirekte N₂O-Emissionen aus Ammoniakverflüchtigung und -ablagerung und 130 Mt CO₂e als indirekte N₂O-Emissionen aus Nitratauswaschung

N₂O-Emissionen aus der Wirtschaftsdünger- und der Anwendung anderer organischer Düngemittel fügen jährlich weitere 1,0 Gt CO₂e hinzu (Abb. 2). Zusammengenommen liegen die direkten und indirekten N₂O-Emissionen im Zusammenhang mit der Verwendung von mineralischem N und organischen Düngemitteln in der Größenordnung von etwa 2,13 Gt CO₂e jährlich oder ungefähr 4 % der weltweiten Gesamtemissionen, was ein erhebliches Minderungspotenzial bietet (Abb. 2). Die Produktion und Verwendung anderer mineralischer Düngemittel wie Phosphor (P) oder Kalium (K) verursacht zusätzliche THG-Emissionen, die hier nicht berücksichtigt sind. Diese wurden jedoch im Vergleich zu N-bezogenen Emissionen als sehr gering eingeschätzt (z.B. 0,04 Gt CO₂e für China im Jahr 2020 (8)).

Während die Verwendung von N-Düngemitteln zur THG-Produktion beiträgt, kann die effiziente Nutzung von Pflanzennährstoffen in der Landwirtschaft auch eine wichtige Rolle bei der Minderung von THG-Emissionen spielen. Dies kann passieren indem: 1) die Intensivierung der Pflanzenproduktion auf bestehenden Flächen ermöglicht wird, wodurch Entwaldung und Landrodung vermieden werden, die die Hauptursachen für CO₂-Emissionen aus dem Boden sind (siehe Landnutzungsänderung in Abb. 2); 2) das Wachstum von Biokraftstoffpflanzen als erneuerbare Energiequellen unterstützt wird; und 3) das Wachstum und die Entfernung von atmosphärischem CO₂ durch Pflanzen unterstützt werden, die zum Aufbau von organischer Bodensubstanz führen können (9). Die Möglichkeiten zur Minderung der THG-Produktion im Agrar- und Ernährungssystem umfassen die nachhaltige Steigerung der Ernteerträge, verstärktes Nährstoffrecycling und die Erhöhung der N-Nutzungseffizienz (NUE) auf bestehenden Flächen, zusätzlich zu anderen Maßnahmen wie der Priorisierung der Pflanzenproduktion für den menschlichen Konsum, Änderung der Ernährungsgewohnheiten, Reduzierung von Lebensmittelabfällen und Dekarbonisierung von Lieferketten (10, 11). Besonders wichtig ist, dass die Erhöhung der NUE und die Minimierung direkter und indirekter N₂O-Emissionen die relevantesten Möglichkeiten zur Emissionsreduzierung im Zusammenhang mit Düngemitteln darstellen (6).

Die zentrale Frage ist, wie man den Bedarf an N-Düngemitteln zur Unterstützung der Nahrungsmittelproduktion mit dem Ziel zur Reduzierung der Klimaauswirkungen der N-Düngemittelnutzung in Einklang bringen kann, insbesondere durch die Reduzierung direkter und indirekter N₂O-Emissionen. In diesem Brief konzentrieren wir uns auf die spezifische Rolle der verantwortungsvollen Pflanzenernährung um THG-Emissionen zu minimieren. Wir stellen Praktiken und Technologien dar, die THG-Emissionen im Zusammenhang mit der N-Düngemittelnutzung mindern. Gleichzeitig identifizieren wir Herausforderungen bei der Umsetzung von Lösungen und der Quantifizierung von Emissionsreduktionen. Abschließend schlagen wir vor, wie verschiedene Interessengruppen zur Bewältigung dieser Herausforderungen beitragen können.

WAS GESCHIEHT?

GLOBALE TRENDS DER STICKSTOFFDÜNGER

Der allgemeine globale Trend aus den 1960er bis 1990er Jahren war ein Anstieg des N-Düngereinsatzes und der Pflanzenproduktion (N-Ertrag), begleitet von einem steigenden N-Überschuss und einem Rückgang oder einer Stagnation der Stickstoffnutzungseffizienz (NUE) im Ackerland (12). In den letzten Jahrzehnten stiegen die globale Pflanzenproduktion und der N-Eintrag (einschließlich Dünger, Wirtschaftsdünger, biologische N-Fixierung, Saatgut und atmosphärische Deposition) weiter an. Gleichzeitig stieg die globale NUE auf etwa 55% im Jahr 2021 an (Abb. 3). Der jährliche N-Überschuss blieb mit etwa 80 Millionen Tonnen N relativ konstant, wobei es große regionale Unterschiede gibt (3, 12). In diesem Zeitraum stiegen die N₂O-Emissionen ab Hoftor bis 2021 auf 2,1 Gt CO₂e (Abb. 3), hauptsächlich im Zusammenhang mit mineralischer und organischer Düngung (Abb. 2). Die zentrale Herausforderung besteht darin, diese Trends in Richtung einer deutlicheren Reduzierung des N-Überschusses und der N₂O-Emissionen zu verschieben – bei gleichzeitiger Steigerung der Produktivität und NUE. Der in Abb. 3 erkennbare Rückgang des Verhältnisses von N₂O-Emission zu N-Eintrag ergibt sich aus einer Zunahme des Anteils der biologischen Fixierung am Gesamt-N-Eintrag, begleitet von einem Rückgang des Wirtschaftsdüngeranteils.

EIGENSCHAFTEN VON DISTICKSTOFFOXID EMISSIONEN

Distickstoffoxidemissionen aus Böden entstehen hauptsächlich durch mikrobielle Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse. Diese werden durch zahlreiche Umweltbedingungen und spezifische abiotische Prozesse reguliert (13). Zum Beispiel führt nach N-Düngung und starken Niederschlägen ein Überschuss an anorganischem N und/oder Feuchtigkeit im Boden zu erhöhten N₂O-Emissionen. Die Bedingungen, die N₂O-produzierende mikrobielle Prozesse im Boden antreiben, sind räumlich und zeitlich hochgradig variabel, was zu Emissionen führt, die als 'Hot Spots' und 'Hot Moments' charakterisiert werden. Dabei stammt ein großer Prozentsatz der Emissionen aus kurzen, unvorhersehbaren Ereignissen oder aus kleinen Bereichen eines Feldes (14). Das Ausmaß dieser Emissionereignisse wird durch Boden- und Klimafaktoren sowie deren Wechselwirkungen mit Boden- und Pflanzenbewirtschaftungspraktiken beeinflusst. Die Emissionseigenschaften von Boden-N₂O stellen eine Herausforderung für die Messung sowie die Identifizierung und Umsetzung von Minderungsmaßnahmen dar, die allgemein als boden-, pflanzen- und klimaspezifisch angesehen werden.

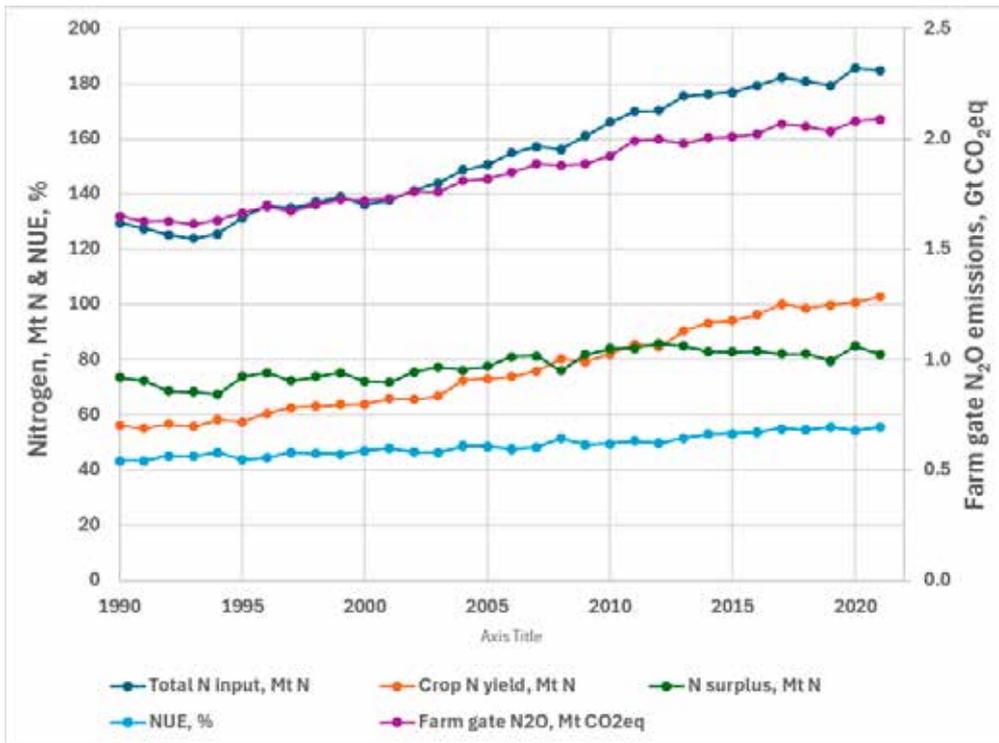


Abbildung 3. Veränderungen des globalen Stickstoff (N)-Inputs im Ackerland, N-Ertrags der Pflanzen, N-Überschusses, der Stickstoffnutzungseffizienz (NUE) und der Distickstoffoxid (N₂O)-Emissionen ab Hof von 1990 bis 2021. Quelle: und FAOSTAT Emissionsgesamtwerte.

MAßNAHMEN ZUR REDUZIERUNG VON N₂O-EMISSIONEN

Eine Reihe von Maßnahmen können N₂O-Emissionen aus dem Boden reduzieren, einschließlich der Verwendung neuartiger Düngemittelprodukte und verbesserter agronomischer Maßnahmen (Abb. 1) (15). Diese Maßnahmen in Kombination mit Bodenkohlenstoffgewinnen durch verbesserte Produktivität mit ausgewogenen Pflanzenernährungspraktiken versprechen die THG-Emissionen aus der Landwirtschaft zu reduzieren (16). Allerdings müssen Kompromisse berücksichtigt werden, da die Erhöhung des organischen Kohlenstoffs im Boden und damit der Bodenfruchtbarkeit N₂O-Emissionen erhöhen kann, was möglicherweise die Klimaschutzvorteile der erhöhten Kohlenstoffbindung ausgleicht (17). Stickstoffdüngergaben müssen entsprechend angepasst werden. Die Reduzierung von N₂O-Emissionen ist ein dauerhafter Vorteil im Gegensatz zu Bodenkohlenstoffgewinnen, die durch nachfolgende landwirtschaftliche Praktiken wie verstärkte Bodenbearbeitung rückgängig gemacht werden können.

Wirksame Maßnahmen um N₂O-Emissionen aus dem Boden zu reduzieren, werden im Rahmen des 4R-Nährstoffmanagements erfasst. Dieses konzentriert sich auf die 4 «richtigen» Aspekte (Quelle, Rate, Zeit und Platzierung) der Nährstoffanwendungen. Das neue Paradigma für verantwortungsvolle Pflanzenernährung hat den Umfang der relevanten Praktiken erweitert und zu den 4R-Prinzipien die Berücksichtigung klimafreundlicher Düngemittel hinzugefügt, d.h. die Verwendung von Düngemittelquellen mit reduziertem CO₂-Fußabdruck, welches die Emissionen aus Herstellung und Anwendung einschließt (18). Obwohl sich Anwender des 4R-Rahmens oft auf die Verwendung von Mineraldüngern konzentrieren, ist dessen Integration mit organischer Düngerverwaltung äußerst wichtig. Zum Beispiel vermeidet das Recycling organischer N-Quellen THG-Emissionen, die mit der Produktion von N-Dünger verbunden sind, während die Anpassung der N-Dünger Menge unter Berücksichtigung des durch organische Quellen gelieferten N zur Reduzierung der N₂O-Emissionen aus dem Boden beiträgt. Die hier diskutierten 4R-Praktiken müssen in einem breiteren Kontext des N-Managements betrachtet werden, einschließlich organischer Quellen. Eine Zusammenfassung der Reduzierungen der N₂O-Emissionen aus dem Boden und der Änderungen der Ernteerträge für verschiedene 4R- und Pflanzenbewirtschaftungspraktiken ist in Tabelle 2 dargestellt.

Aufgrund der hohen Variabilität der N₂O-Emissionen werden «zusammenfassende Effekte» von Praktiken typischerweise aus Metaanalysen abgeleitet, die auf mehrjährige Forschungsergebnisse aus einem breiten Spektrum von Bedingungen angewendet werden.

STICKSTOFFDÜNGER MIT VERBESSERTER EFFIZIENZ

Die meisten Meta-Analysen bestätigen einen starken Effekt von 'Düngemitteln mit verbesserter Effizienz' (EEFs, einschließlich Nitrifikationshemmer, Ureasehemmer und/oder Dünger mit kontrollierter Freisetzung) auf N₂O-Emissionen (Tabelle 2). Konsistente Emissionsreduzierungen werden bei diesen EEFs beobachtet (36 % über 608 peer-reviewte Studien weltweit (19)). Allerdings zeigen einzelne Meta-Analysen eine Bandbreite von Werten für die verschiedenen EEF-Typen, wobei die höchsten Reduzierungen generell bei der Verwendung von Nitrifikationshemmern beobachtet wurden (Tabelle 2). Bei Gemüsekulturen reduzierten Dünger mit kontrollierter Freisetzung die N₂O-Emissionen im Durchschnitt um 24 %, während Nitrifikationshemmer diese um 40 % reduzierten, wobei beide Technologien die Erträge um etwa 8 % steigerten (20).

Düngemittelquellen können N₂O-Emissionen auf verschiedene Weise beeinflussen. Zum Beispiel wurden in Regionen wie Irland, die milde, feuchte Klimabedingungen und Böden mit hohem organischen Anteil aufweisen, signifikante Reduzierungen der N₂O-Emissionen durch den Wechsel von nitratbasierten Düngemitteln zu Harnstoff mit zugesetzten Urease- oder Nitrifikationshemmern erreicht (21). Andererseits wurden in einem Feldversuch mit tropfbewässerten Kulturen in Spanien niedrigere Emissionen bei Calciumnitrat im Vergleich zu Harnstoff gemessen (22).

Zusammenfassend lässt sich sagen: (i) Reduzierungen der N₂O-Emissionen durch EEFs sind im Allgemeinen größer als ihre positiven Auswirkungen auf Ernteertrag oder NUE (23); (ii) Nitrifikationshemmer sind am effektivsten bei der Reduzierung von N₂O-Emissionen, können aber auch Ammoniakverflüchtigungsverluste erhöhen; und (iii) in vielen Situationen wird die Kombination von Urease- und Nitrifikationshemmern empfohlen um Schadstoffverlagerungen zu vermeiden. Zum Beispiel können im Fall der alleinigen Verwendung eines Ureasehemmers die direkten N₂O-Emissionen zunehmen, auch wenn die indirekten N₂O-Emissionen reduziert wurden (24, 25). Zusätzlich zu den Auswirkungen auf THG-Emissionen reduzieren EEFs im Allgemeinen auch die Nitrat auswaschungsverluste aus dem Boden um etwa 20-40 % (26). Diese Verringerung des N-Verlusts bietet zusätzliche ökologische und wirtschaftliche Vorteile durch reduzierte indirekte N₂O-Emissionen, reduzierte Grundwasserbelastung und reduzierte Düngemittelkosten.

Tabelle 2. Relative Änderungen (%) der N₂O- und NH₃-Emissionen und des Ernteertrags durch 4R- und Pflanzenbewirtschaftungspraktiken. Quellen: Meta-Analysen, die die globale Literatur zusammenfassen.

PRAXIS	N ₂ O EMISSION %	NH ₃ EMISSION %	ERNTE-ERTRAG %	N* (FÜR N ₂ O)	QUELLE
Fruchtfolge	-4		-2	1	(19)
Zwischenfruchtanbau	-5		+12	3	(19)
Düngermenge	-9	-31	-4	7	(19)
Düngungszeitpunkt	0	-32	+4	3	(19)
Düngerplatzierung	-15	-43	-5	1	(19)
Düngerplatzierung:					
Nitrifikationshemmer	-50	+20	+2	422	(27)
Urease- + Nitrifikationshemmer	-30	-38	+3	118	(27)
Ureasehemmer	-10	-50	+6	116	(27)
Dünger mit kontrollierter Freisetzung	-19 to -33	-65	-3	276	(28-30)
Mais EEF**	-25		+4	429	(30-31)
Weizen EEF**	-29		+5	279	(30-31)
Reis EEF**	-25		+8	312	(30-31)

* n steht für die Anzahl der Metaanalysen für Quelle (19) und die Anzahl der Standortjahre für die übrigen

**EEF: Düngemittel mit verbesserter Effizienz, die Nitrifikations-/Ureasehemmer und Langzeitdünger enthalten

DÜNGUNGSZEITPUNKT UND -PLATZIERUNG

Die Auswirkungen des Zeitpunkts und der Platzierung von N-Düngern sind in der Regel kleiner und weniger konstant als die von EEF (Tabelle 2). Young et al. (19) berichteten in einer Synthese von 113 Meta-Analysen, dass die optimale Düngerplatzierung die direkten N₂O-Emissionen um 15 % und die NH₃-Emissionen um 43 % reduziert (was die indirekten N₂O-Emissionen verringern würde) und den Ertrag um 5 % steigert. Der optimale Zeitpunkt hatte keinen signifikanten Einfluss auf die direkten N₂O-Emissionen, während er im Durchschnitt die NH₃-Emissionen um 32 % reduzierte (Tabelle 2).

BIOLOGISCHE NITRIFIKATIONSHEMMER

Während sich die in Tabelle 2 zusammengefassten Studien nur auf hergestellte Hemmstoffe beziehen, die anorganischen Düngemitteln zugesetzt werden, besteht auch die Möglichkeit, die biologische Nitrifikation durch von Pflanzen ausgeschiedene Verbindungen zu modifizieren, die die Nitrifikation und N₂O-Emission unterdrücken können. Eine aktuelle Literaturlauswertung ergab, dass «Primärmetabolite wie Zucker, Aminosäuren und organische Säuren die N₂O-Emissionen im Boden durchschnittlich um 79 % stimulierten, während Sekundärmetabolite wie Phenole, Terpenoide und Flavonoide, die häufig sowohl als biologische Nitrifikationshemmer (BNIs) als auch als biologische Denitrifikationshemmer (BDIs) charakterisiert werden, die N₂O-Emissionen im Boden durchschnittlich um 41 % reduzierten.» (32). Die biologische Nitrifikationshemmung erklärt zum Beispiel die niedrigen N₂O-Emissionsraten bei Brachiaria, einer Grasart, die in Brasilien häufig als Weide- und Deckfrucht verwendet wird. Es könnte möglich sein, BNI-Eigenschaften in ertragreichen Getreidesorten durch Pflanzenzüchtung zu verstärken (33, 34). Allerdings sind die Durchführbarkeit und Wirksamkeit von BNI im Vergleich zu synthetischen Nitrifikationshemmern noch nicht vollständig erforscht.

STICKSTOFFMENGE

Die aufgebrauchte N-Düngermenge wurde weithin in der THG-Bilanzierung zur Schätzung der N₂O-Emissionen verwendet. Der IPCC legte einen durchschnittlichen düngerbedingten direkten Emissionsfaktor (EF) von 1 % (Unsicherheitsbereich: 0,1-1,8 %) für globale Schätzungen fest; das heißt,

für jede aufgebrauchte Menge von 100 kg N wird 1 kg N₂O-N direkt aus Böden emittiert (35). Der IPCC bietet einige weitere Differenzierungen, z.B. einen EF von 1,6 % für Dünger in 'feuchten' Klimazonen oder einen EF von nur 0,3 % in dauerhaft gefluteten Reisfeldern. Obwohl sich der IPCC-Wert als robust für N₂O-Emissionsschätzungen in Regionen erwiesen hat, die keine lokal abgeleiteten EFs haben, hat die Forschung gezeigt, dass EFs stark variieren können und in vielen Fällen auch deutlich niedriger als 1 % sind.

In Australien lag zum Beispiel der durchschnittliche EF von mineralischem N-Dünger bei 0,7 %, mit einer Spanne von 0,17-1,77 % über Regionen und Anbausysteme hinweg (36). In Deutschland reichten die EFs auf Bezirksebene von 0,38 % bis 0,92 %, mit einem nationalen Durchschnitt von 0,62 % (37). In einer globalen räumlichen Analyse lagen die durchschnittlichen geschätzten EFs bei 1,02 % für Mais, 0,58 % für Weizen und 0,52 % für Reis, variierten aber stark, einschließlich Hotspots mit höheren Werten (38). Ähnlich erstellten Wang et al. (39) globale EF-Karten mit einem Durchschnitt von 0,88 % für Mais und 0,65 % für Weizen. Yao et al. (31) ermittelten durchschnittliche globale EFs von 0,69 % für Mais, 0,60 % für Weizen und 0,36 % für Reis.

Andererseits umfasst das globale Agrar- und Ernährungssystem auch Produktionssysteme, in denen die N-Ausbringungsmengen, N₂O-Emissionen und EFs besonders hoch sind. Zum Beispiel machen Teeplantagen zwar nur 0,3 % der gesamten Ackerfläche aus, sie sollen jedoch für 1,5-12,7 % der gesamten direkten N₂O-Emissionen aus Ackerland verantwortlich sein, mit durchschnittlichen Verlusten von 17 kg N/ha in Form von N₂O-Emissionen und einem globalen mittleren EF von 2,3 % (40). Diese hohen EFs werden durch N-Ausbringungsmengen verursacht, die den N-Bedarf der Teepflanzen bei weitem übersteigen und zu einem exponentiellen Anstieg der N₂O-Emissionen aus dem Boden bei Mengen über 250 kg N/ha/Jahr führen. Solche globalen Hotspots müssen mit besonderer Dringlichkeit angegangen werden.

Shcherbak et al. (41) untersuchten 233 Studien mit mindestens drei N-Stufen. N₂O-Emissionen reagierten nicht-linear auf die N-Rate, was zeigt, dass die Reduzierung von N-Überschüssen über den Pflanzenbedarf hinaus am effektivsten zur Emissionsminderung beiträgt. Die Grundsätze

der Pflanzenernährung legen nahe, dass bei der optimalen N-Rate für eine Kultur in einer spezifischen Umgebung die NUE hoch, der N-Überschuss gering und die N-Verluste sowie N₂O-Emissionen wahrscheinlich niedriger sind als bei Raten über dem Optimum. Dieses Prinzip wurde zum Beispiel im N-Bilanzmodell des Environmental Defence Funds umgesetzt (42, 43). Die wichtigste Schlussfolgerung ist, dass Regionen, in denen N über die optimalen Düngermengen hinaus ausgebracht wird, das größte N₂O-Minderungspotenzial durch Mengenreduzierung aufweisen.

MAßNAHMEN ZUR STEIGERUNG DER ERTRÄGE UND DER STICKSTOFFNUTZUNGSEFFIZIENZ

In Regionen mit geringem N-Einsatz oder Nährstoffmangel gibt es wenig Potenzial zur Minderung der aktuellen N₂O-Emissionen. Allerdings ist es notwendig die Erträge auf bestehenden Ackerflächen zu steigern, um die Ernährungssicherheit zu verbessern und CO₂-Emissionen durch Entwaldung und Landrodung zu vermeiden. Diese Regionen liegen besonders häufig in Afrika südlich der Sahara. Viele dieser Regionen weisen degradierte Böden auf, die sowohl mineralische Dünger als auch organische Einträge benötigen, zusammen mit fundierten agronomischen Praktiken, hochwertigem Saatgut, Bodenverbesserungsmitteln und anderen Maßnahmen, wie sie die Prinzipien des Integrierten Bodenfruchtbarkeitsmanagements (ISFM) vorschreiben (44). Es gibt auch Möglichkeiten, Kohlenstoff in diesen Böden zu speichern (45, 46). Allerdings muss auch dieser Kohlenstoff zunächst durch erhöhte Ernteerträge produziert werden.

Die Bewertung der gesamten Nettoauswirkungen auf THG-Emissionen, Landnutzungsänderungen und Bodenkohlenstoffspeicherung, die sich

aus der breiten Palette standortspezifischer ISFM-Praktiken ergeben, liegt außerhalb des Rahmens dieser Arbeit. Dennoch hängen die gleichzeitigen Verbesserungen bei Erträgen und Stickstoffnutzungseffizienz in Nordamerika oder anderen Regionen zu einem großen Teil von massiven Investitionen in die genetische Verbesserung von Kulturpflanzen sowie in Boden-, Pflanzen- und Nährstoffmanagement ab (47, 48). Ähnliche Investitionen werden wahrscheinlich für andere Teile der Welt erforderlich sein, wo die Ernteerträge weit unter dem Potenzial liegen, insbesondere in Afrika südlich der Sahara (49).

ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde gezeigt, dass eine breite Palette agronomischer Praktiken und 4R-N-Management-Lösungen die NUE erhöhen und/oder N₂O-Emissionen über Regionen und Kulturen hinweg direkt reduzieren können. Diese effektiven Maßnahmen haben das Potenzial, einen großen Teil der jährlichen THG-Emissionen von 0,66 Gt CO₂e aus der Düngermittelnutzung innerhalb der nächsten Jahrzehnte zu minimieren, insbesondere wenn sie kombiniert angewendet werden (6, 39). Diese Maßnahmen würden einen wichtigen Beitrag zur Erreichung von Netto-Null-Emissionen bis 2050 leisten, indem sie die globalen Emissionen des Agrar- und Ernährungssystems (16 Gt CO₂e) reduzieren (4). Aufgrund ihrer großen Fläche und ihres Anteils am globalen N-Düngerverbrauch spielen Getreideproduktionssysteme eine besonders wichtige Rolle um THG-Minderungsmaßnahmen umzusetzen. Die Frage ist, wie diese Maßnahmen großflächig umgesetzt werden können.

WAS KANN GETAN WERDEN?

EMPFOHLENE UMSETZUNGSMASSNAHMEN

Zunächst müssen die vielversprechendsten Praktiken identifiziert werden um N₂O-Emissionen zu reduzieren und die Reduktionsziele zu erreichen. Allerdings hängt letztendlich deren Umsetzung von der Akzeptanz, dem Vertrauen und den Maßnahmen der Landwirte ab. Je nach Region sind «Win-win»-Praktiken möglicherweise bereits auf dem Weg zur Einführung, oder es besteht Potenzial für die Übernahme durch geeignete Wissens- und Technologietransferprogramme. Für andere THG-Reduktionspraktiken und -technologien könnten Anreize für Landwirte reduzierte Inputkosten, verbesserte Produktivität, subventionierte EEF-Produkte, Zahlungen und nachhaltigkeitsbezogene Finanzierung umfassen. Verbesserte agronomische Praktiken, die die Pflanzenproduktivität mit der minimal erforderlichen N-Düngermenge steigern, können Landwirte motivieren, indem sie ihnen helfen, Inputkosten zu senken und gleichzeitig das Einkommen zu erhöhen.

Wir gruppieren die potenziellen Lösungen in drei Handlungsziele, die in Tabelle 4 dargestellt sind. Regionen, in denen übermäßige N-Raten zu erheblichen N-Überschüssen führen, sollten sich zunächst auf Ziel-1-Maßnahmen konzentrieren. Beispiele hierfür sind viele Teile Chinas und Indiens, aber auch einige Gebiete in Europa und Nordamerika mit hoher Anbau- und Viehbesatzintensität (50). In Regionen mit erheblichem N-Überschuss wäre die erste Priorität die Anwendung des Prinzips der richtigen Menge, was eine Win-win-Situation darstellt, da THG-Emissionen reduziert und gleichzeitig Gewinne gesteigert würden. Die erreichbaren Reduktionen könnten signifikant sein. Allerdings ist es wichtig, dass ein nicht-lineares EF-Modell verwendet wird, um die Abnahme der N₂O-Emissionen durch Reduktionen des N-Überschusses zu erfassen, da das lineare EF-Modell die potenziellen Emissionsreduktionen unterschätzen würde (41).

Tabelle 4. Überblick über umfassende Maßnahmen zur Reduzierung von N₂O-Emissionen und deren potenzielle Vorteile.

HANDLUNGSZIEL	PRAKTIKEN	VORTEILE
1. Übermäßigen Stickstoffüberschuss reduzieren	Richtige Menge, erreicht durch verbesserte Vorhersage des N-Bedarfs der Pflanzen und verbessertes Gülle-Management sowie agronomische Bewirtschaftung zur Verbesserung von Ertrag und N-Aufnahme	Direkte und indirekte N ₂ O-Emissionen werden reduziert; Ertrag bleibt unverändert; NUE und Gewinne steigen
2. Ammoniakverluste reduzieren	Richtiger Zeitpunkt, richtige Platzierung und Einsatz von Ureasehemmstoffen oder Dünger mit kontrollierter Freisetzung (Richtige Quelle) mit Mengenanpassungen	Indirekte N ₂ O-Emissionen werden reduziert; Ertrag und NUE steigen; Gewinne steigen potenziell bei Mengenanpassung
3. Direkte N ₂ O-Verluste reduzieren	Einsatz von Nitrifikationshemmstoffen und Düngern mit kontrollierter Freisetzung (Richtige Quelle) abhängig von der richtigen Menge, Zeit und Platzierung	THG-Emissionen werden reduziert; Ertrag und NUE bleiben unverändert oder steigen leicht

In Regionen, in denen die N-Düngermengen bereits nahe dem Optimum liegen (Richtige Menge), sollte der Schwerpunkt auf der Reduzierung von N-Verlusten in Form von Ammoniak durch besseres Timing, Platzierung und den Einsatz von Ureasehemmstoffen oder Düngemitteln mit kontrollierter Freisetzung liegen (Ziel 2; Tabelle 4). Ammoniakemissionen können einen erheblichen Anteil des als Harnstoff ausgebrachten Dünger-N ausmachen. Die Reduzierung der

Emissionen würde indirekte N_2O -Emissionen verringern und zu deutlich höheren Erträgen, NUE und Gewinnen führen. Allerdings muss darauf geachtet werden, die N-Rate entsprechend der Ammoniakreduzierung anzupassen; andernfalls können direkte N_2O -Emissionen aufgrund erhöhter N-Retention im Boden zunehmen.

Das dritte Ziel würde für Situationen gelten, in denen Erträge und Stickstoffnutzungseffizienz bereits nahe dem Optimum liegen. Die Maßnahmen würden sich auf die direkte Reduzierung von N_2O -Emissionen durch Praktiken wie den Einsatz von Düngemitteln mit kontrollierter Freisetzung, Nitrifikationshemmstoffen oder Kombinationen aus Nitrifikations- und Ureasehemmstoffen konzentrieren. Da N_2O -Emissionen im Vergleich zum N-Düngereinsatz gering sind, führen Nitrifikationshemmstoffe möglicherweise nicht zu wesentlichen Ertragssteigerungen und erhöhen eventuell nicht die Gewinne (Tabelle 2). Aus diesem Grund sind häufig Unterstützungsmechanismen erforderlich, um Anreize für Ziel-3-Maßnahmen zu schaffen. Alle drei Zielmaßnahmen könnten auch die Nitratauswaschung reduzieren und haben damit zusätzliche Umweltvorteile. Es ist wahrscheinlich, dass der N-Verlust in Form von molekularem Stickstoff (N_2) durch Denitrifikation ebenfalls durch Ziel-3-Maßnahmen gemindert würde, was wirtschaftliche Vorteile bringt. Aber dafür gibt es aufgrund der Schwierigkeit, N_2 -Gasemissionen zu messen, wenig Belege.

Eine Kombination von 4R-Praktiken ist wahrscheinlich erforderlich, um die größten THG-Reduktionen zu erreichen. Die vorgeschlagenen Maßnahmenkategorien in Tabelle 4 sind kumulativ zu verstehen. Zum Beispiel könnte es auch in Gebieten, die unter die Ziele 2 und 3 fallen, wo die Mengen nicht übermäßig und nahe am Optimum liegen, aufgrund der Unsicherheit bei der Vorhersage des N-Bedarfs der Pflanzen noch Möglichkeiten zur Anpassung der N-Düngermengen geben. In diesen Fällen neigen Landwirte möglicherweise dazu, etwas mehr N-Dünger als zum Erreichen des wirtschaftlichen Optimums erforderlich zu verwenden, und es können zusätzliche Anreize im Zusammenhang mit Risikomanagement erforderlich sein.

POLITISCHE MAßNAHMEN ZUR FÖRDERUNG DER UMSETZUNG

Die in Tabelle 4 aufgeführten Maßnahmen sind potenzielle Mittel zur Verbesserung der NUE und zur Reduzierung von THG-Emissionen sowie anderen Formen der N-Verschmutzung bei gleichzeitiger Gewährleistung der Ernährungssicherheit. Daher sollte die Umleitung der öffentlichen Politik und Subventionen hin zu ihrer breiten Einführung zu sorgfältig gestalteten Vorschriften oder Anreizen führen, die kosteneffektiv sind, Brennpunkte gezielt angehen und die Kompromisse zwischen Ertrag, Gewinn und Umweltauswirkungen berücksichtigen (51).

Verbesserungsziele für die Stickstoffnutzungseffizienz können eine zentrale Rolle bei der Erreichung des richtigen Gleichgewichts zwischen den verschiedenen Zielen spielen. In China zum Beispiel führten strengere Umweltschutzrichtlinien und verbessertes N-Management zu einer landesweiten Reduzierung des N-Düngereinsatzes pro Fläche, erhöhter NUE und verlangsamtem Wachstum der N_2O -Emissionen aus Ackerland nach 2003 (52, 53).

Insgesamt bleiben jedoch Belege für erfolgreiche Politikmaßnahmen, die Anreize für NUE-Steigerungen, Reduzierungen der N-Verschmutzung und N_2O Emissionen bei gleichzeitiger Unterstützung der Nahrungsmittelproduktion schaffen, recht spärlich (54). Die Integration der N_2O -Minderung in die Klimapolitik hat lange Zeit zu wenig Aufmerksamkeit erhalten (55). Es sollte auch beachtet werden, dass weitere Reduzierungen des N-Verlusts langfristig tiefgreifende Änderungen im Ernährungssystem erfordern, insbesondere Veränderungen der Ernährungsgewohnheiten in Regionen mit hoher Ernährungssicherheit (56).

Anreize zur Einführung von N_2O -Emissionsreduktionsmaßnahmen können auch von Kohlenstoffmärkten kommen, die Landwirte für die Umsetzung emissionsmindernder Praktiken finanziell belohnen würden. Kohlenstoffgutschriften können in diesem Fall mit allen in Tabelle 4 aufgeführten Maßnahmen verbunden sein, d.h. Reduzierung der Ausbringungsmenge anorganischer und organischer Düngemittel, Steigerung der NUE und/oder direkte Reduzierung von N_2O -Emissionen durch Hemmstoffe oder Dünger mit kontrollierter Freisetzung.

Evidenzbasierte Methoden (Standards) müssen für solche Zwecke noch etabliert werden, einschließlich Überwachung und Verifizierung. Es gibt auch ein wachsendes Interesse an der Bewältigung von Scope-3-THG-Emissionen durch Unternehmen, die Dienstleistungen erbringen oder Produkte aus dem Agrarsektor beziehen. Scope-3-Emissionen «sind das Ergebnis von Aktivitäten aus Vermögenswerten, die nicht im Besitz oder unter der Kontrolle der berichtenden Organisation stehen, die die Organisation aber indirekt in ihrer Wertschöpfungskette beeinflusst» (57). Betriebliche Emissionen wie N_2O -Emissionen aus dem Boden sind bedeutende Scope-3-Emissionen für Unternehmen, die N-Dünger verkaufen oder für Unternehmen, die landwirtschaftliche Produkte für ihre Lieferkette einkaufen. Zum Beispiel ist eine kürzlich geschlossene Partnerschaft zwischen Nutrien Ag Solutions und Maple Leaf Foods für die Einführung von 4R Stewardship durch Landwirte in den kanadischen Prärien eine Wertschöpfungskettenintervention, die Scope-3-Emissionen beider Unternehmen adressiert. Sie zielt darauf ab, Lebensmittelprodukte mit geringerer Kohlenstoffintensität durch den Anbau von Kulturen (z.B. Raps, Gerste, Weizen, Erbsen) mit optimiertem N-Düngermanagement zu produzieren (58).

Nachhaltigkeitsfinanzierung kann ebenfalls Anreize für emissionsarme Praktiken schaffen. Regierungen können zum Beispiel einen Teil ihrer finanziellen Unterstützung auf Landwirte umlenken, die NUE-steigernde und emissionsmindernde Praktiken einführen. In anderen Fällen können Banken verbesserte Finanzierungsbedingungen, wie niedrigere Zinssätze, anbieten, wenn sich die Umwelleistung der Betriebe verbessert. Solche Politik- und Marktmechanismen können die notwendigen Anreize bieten, um insbesondere Emissionsreduktionspraktiken vom Typ Ziel 3 (Tabelle 4) anzugehen, die der Öffentlichkeit mehr nutzen als dem Landwirt.

METRIKEN ZUR FORTSCHRITTSKONTROLLE

Unabhängig vom verwendeten Anreizmechanismus werden Metriken benötigt, um die Fortschritte der Reduktions- oder Effizienzziele zu überwachen. Nachhaltigkeitsmetriken sind wesentliche Elemente zur Verfolgung der Auswirkungen eines verbesserten N-Düngermanagements und zur Bestimmung der Bemühungen von Landwirten, Unternehmen oder Regierungen bei der Reduzierung ihrer CO_2 -Bilanz und der Erreichung von Emissionsreduktionszielen. Die Verfügbarkeit von Metriken begrenzt auch, welche Praktiken für Anreize in Frage kommen. Bestehende THG-Methoden basieren hauptsächlich auf IPCC-Richtlinien, die nur die N-Rate berücksichtigen, aber nicht andere 4R-Praktiken wie Platzierung oder Verwendung von Hemmstoffen. Daher konzentrieren sich Kohlenstoffreduktionsprotokolle oft auf die Reduzierung der N-Rate anstatt auf die Erhöhung der NUE, was auch zu unerwünschten Ertragsverlusten führen kann.

Eine Ausnahme ist das in Alberta, Kanada, implementierte Nitrous Oxide Emission Reduction Protocol (NERP), das 4R-Praktiken über die N-Rate hinaus einbezog (59). Der Ansatz wurde von mehreren Lieferketteninitiativen übernommen. Diese zielen darauf ab, THG-Emissionen von Organisationen entlang

der landwirtschaftlichen Wertschöpfungskette zu quantifizieren und zu überwachen. Es bestehen jedoch noch mehrere Lücken, einschließlich der Bewertung regionalspezifischer Managementpraktiken, der Beurteilung der 4Rs als Maßnahmenpakete statt als Einzelmaßnahmen, der Bewertung von variablen Ausbringungsraten und Düngertechnologien sowie der Quantifizierung der Auswirkungen von einzelner vs. dualer Verwendung von Urease- und Nitrifikationshemmstoffen. Darüber hinaus sind die Wechselwirkungen mit anderen Erhaltungspraktiken wie der Diversifizierung von Fruchtfolgen oder Zwischenfrüchten noch nicht berücksichtigt.

Darüber hinaus könnte ein pragmatischer Ansatz darin bestehen, N_2O -Emissionen als Funktion der partiellen N-Bilanz der Kulturpflanzen zu schätzen. Wie mehrere Studien nahelegen, würde dies die Differenz zwischen N-Einträgen (Dünger, Gülle, andere Quellen) und dem durch die Ernte entnommenen N umfassen (15, 43, 60, 61). Es wurde festgestellt, dass N_2O -Emissionen ebenso gut oder besser mit der N-Bilanz korrelieren als mit der ausgebrachten N-Menge (15). Generalisierte Beziehungen wurden für verschiedene Kulturen in Nordamerika (43) und weltweit (15) entwickelt. Diese zeigen, dass in Getreideanbausystemen die N_2O -Emissionen wahrscheinlich höher sind sobald der N-Überschuss etwa 50 kg N/ha übersteigt. Die Überschussreduzierung als Emissionsindikator ist in der Landwirtschaft durch Betriebsmanagementsoftware relativ einfach anzuwenden. Ebenso würden die gesammelten Informationen die Überwachung von NUE und N-Überschuss als allgemein wichtige Indikatoren für die agronomische und ökologische Betriebsleistung ermöglichen, einschließlich Orientierung für zu erreichende Ziele (62). Eine Fokussierung auf den Überschuss erfasst jedoch nicht alle möglichen Emissionsreduktionen im Zusammenhang mit Düngemitteln, insbesondere solche, die als kurzlebige Breiten oder Hotspots auftreten. Außerdem werden die unabhängigen Auswirkungen von Hemmstoffen und Produkten mit kontrollierter Freisetzung auf direkte und indirekte N_2O -Emissionen, wie oben erwähnt, vernachlässigt.

Ein letzter Ansatz betrifft die Art und Weise, wie Emissionen (und deren Reduktionen) ausgedrückt werden. Einige Metriken drücken Emissionen typischerweise pro Flächeneinheit aus (kg N_2O -N pro ha), als THG-Intensität (pro Einheit der Pflanzenproduktion, z.B. N_2O -N pro kg Getreide) oder pro Einheit des bereitgestellten N-Inputs (d.h. als Emissionsfaktor, kg N_2O -N pro kg N appliziert). Wahrscheinlich sind alle drei Metriken je nach Ziel der Emissionsreduktion nützlich. THG-Intensität und Emissionsfaktoren sind effizienzbasierende Metriken, die Output oder Input berücksichtigen, während eine flächenbasierte Metrik den erhaltenen Input oder den von der Fläche gelieferten Output nicht berücksichtigt. Für absolute Emissionsreduktionen sind flächenbasierte Emissionen die relevanteste Metrik. In Carbon-Credit-Systemen für Lebensmittellieferketten können Unternehmen, die ihren CO_2 -Fußabdruck reduzieren möchten, jedoch pro-Lebensmitteleinheit-Messungen (intensitätsbasiert) bevorzugen. Emissionen pro Produkteinheit sind auch für den internationalen Handel wichtig und eignen sich besser für die Anwendung von CO_2 -Grenzausgleichsmaßnahmen.

Fortschritte im Wissen über N_2O -Emissionen und Praktiken zu deren Reduzierung zeigen, dass eine Minderung nach den Prinzipien der verantwortungsvollen Pflanzenernährung möglich und durchführbar ist. Um die Umsetzung auf Betriebsebene voranzutreiben, müssen Anreizmechanismen Motivationen und Hindernisse für die Übernahme erkennen und Maßnahmen priorisieren. Um dies zu verwirklichen, sind Verpflichtungen und abgestimmte Maßnahmen vieler Interessengruppen erforderlich.

WER MUSS WAS TUN?

Regierungen:

- Maßnahmen einführen die die Übernahme von Praktiken und Technologien mit nachgewiesener Wirkung auf die Steigerung der N-Nutzungseffizienz und die Reduzierung von THG-Emissionen, insbesondere N_2O , wie Nitrifikations- und Ureasehemmer sowie N-Dünger mit kontrollierter Freisetzung, fördern und belohnen.
- Zusammenarbeit mit der Industrie bei Programmen zur Umsetzung vor Ort und bei Emissionsberichterstattungsvorschriften, die mit marktbasierenden Ansätzen vereinbar sind.
- Verbesserung der Methoden und Sicherstellung, dass Reduktionsmaßnahmen in nationalen THG-Inventarberichten erfasst werden.

Industrie:

- Umsetzung gezielter Scope-3-Emissionsreduktionsprogramme; Anreize und Unterstützung für die Dokumentation von Emissionsreduktionen.
- Einführung von Standards zur Reduzierung von N_2O -Emissionen und Beteiligung an freiwilligen Kohlenstoffmarktprogrammen.
- Unterstützung und Schulung akkreditierter Pflanzenberater zur Förderung der Umsetzung, Überwachung, Berichterstattung und Überprüfung emissionsmindernder Praktiken.
- Förderung von Innovationen sowie Bereitstellung von Ressourcen zur Entwicklung neuer Technologien für THG-Minderung, einschließlich intelligenter Dünger mit kontrollierter Freisetzung und Echtzeit-Präzisionstechnologien für N-Management.
- Regionale Unterstützung der öffentlichen Forschung zu wichtigen Themen im Zusammenhang mit den 4Rs.

Kohlenstoffmarkt-Teilnehmer und Investoren:

- Entwicklung und Verfeinerung evidenzbasierter, transparenter Standards für die Beanspruchung von Kohlenstoffgutschriften durch die Einführung N_2O -emissionsmindernder Praktiken.
- Schaffung und Umsetzung freiwilliger Kohlenstoffmarktprogramme, die Landwirte finanziell begünstigen und die breitere Übernahme von Praktiken und Technologien zur Reduzierung von N_2O -Emissionen fördern.

LANDWIRTE UND ANDERE PRAKTIKER:

- Optimierung des Nährstoffmanagements mit verfügbaren 4R-Praktiken basierend auf Pflanzenbedarf und Bodenfruchtbarkeitsbedingungen unter Verwendung geeigneter Entscheidungshilfen.
- Bewertung von Praktiken auf Betriebsebene; Führen von Aufzeichnungen und Bereitstellung von Daten über betriebliche Aktivitäten, die in Protokollen und Nachhaltigkeitskennzahlen verwendet werden können; Bereitstellung technischer Unterstützung (Peer-to-Peer).

Wissenschaftler:

- Entwicklung und Bewertung neuartiger Praktiken zur Steigerung des NUEs und Reduzierung von N_2O -Emissionen.
- Entwicklung und Verbesserung von Datenbanken, Emissionsfaktoren, Methoden und Modellen zur Verwendung in Emissionsreduktionsprotokollen und -standards.
- Bewertung von Kosten/Nutzen von Praktiken und Zusammenarbeit mit Landwirten zur Identifizierung von Praktiken, die auf Betriebsebene am durchführbarsten und praktikabelsten sind.

WIE SIEHT ERFOLG AUS?

Wenn die in Tabelle 4 beschriebenen Maßnahmen ausreichend umgesetzt werden, könnten in den kommenden Jahrzehnten folgende Ergebnisse erzielt werden::

1. Etwa 70 % der mit der Düngung verbundenen THG-Emissionen sind bis 2050 gemindert. Der Großteil davon muss in Regionen erreicht werden, die den größten Teil des derzeitigen N-Düngereinsatzes ausmachen: insbesondere Asien, Nordamerika und Europa.
2. Die IPCC-Methodik für THG-Emissionsinventare schätzt N_2O -Emissionen basierend auf der N-Bilanz anstatt auf N-Raten und erkennt dabei an, dass N-Ratenerhöhungen in Regionen mit niedrigem N-Einsatz die Emissionen weniger steigern als in Regionen mit hohen N-Einsatzraten.
3. Die breite Einführung von Praktiken zur Reduzierung von N_2O -Emissionen unterstützt auch weitere Steigerungen der Ernteerträge und der Stickstoffnutzungseffizienz und reduziert andere Verluste von reaktivem N in die Umwelt, wodurch sie zu den globalen Ambitionen beiträgt, N-Abfälle zu halbieren, die Wasserqualität zu verbessern und die Biodiversität zu schützen.
4. Robuste Methoden und Standards sind weithin eingeführt, um N_2O -Emissionen in der Landwirtschaft zu erfassen und Kohlenstoffkredit-Programme zu unterstützen, die N_2O -reduzierende Technologien und Praktiken finanziell fördern. Landwirte profitieren von neuen Zahlungssystemen und können die Kosten für die Einführung neuer Technologien und Praktiken ausgleichen. Die Etablierung schafft Anreize für die Industrie und Innovatoren, in die Entwicklung besserer Technologien und Lösungen zu investieren.
5. Die Beteiligung von Landwirten an Programmen der Agrar- und Lebensmittelindustrie zur Reduzierung des THG-Fußabdrucks von Lebensmitteln hat zu mehr Vertrauen und Transparenz geführt, einschließlich der Bereitschaft, Daten über Nährstoffmanagementpraktiken für Zwecke der Überwachung, Bewertung und Berichterstattung von Nachhaltigkeitsergebnissen zu teilen. Digitale Technologien werden für diese Zwecke zunehmend eingesetzt, einschließlich künstlicher Intelligenz.
6. Zusammen mit der dekarbonisierten Düngemittelproduktion sind neue Produkt- und Lebensmittelkennzeichnungen entstanden, die ihre gesamten CO_2 -Fußabdrücke einschließlich des mit Düngemitteln verbundenen Anteils ausweisen.
7. Forscher und Start-ups haben neuartige Düngemittel mit minimalen THG-Emissionen und länger anhaltenden Wirkungsweisen für spezifische Bedingungen entwickelt.

LITERATURVERZEICHNIS

- H. Tian *et al.*, A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*. **586**, 248–256 (2020), doi:10.1038/s41586-020-2780-0.
- FAO, *Agrifood systems and land-related emissions. Global, regional and country trends, 2001–2021. FAOSTAT Analytical Briefs Series No. 73* (2023) (available at <https://doi.org/10.4060/cc8543en>).
- M. Crippa *et al.*, Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*. **2**, 198–209 (2021), doi:10.1038/s43016-021-00225-9.
- C. Costa *et al.*, Roadmap for achieving net-zero emissions in global food systems by 2050. *Sci Rep*. **12**, 15064 (2022), doi:10.1038/s41598-022-18601-1.
- A. Dobermann *et al.*, Responsible plant nutrition: A new paradigm to support food system transformation. *Global Food Security*. **33**, 100636 (2022), doi:10.1016/j.gfs.2022.100636.
- IFA & Systemiq, *Reducing emissions from fertilizer use* (International Fertilizer Association and SystemIQ, Paris, France, 2022).
- S. Menegat, A. Ledo, R. Tirado, Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilisers in agriculture. *Sci Rep*. **12**, 14490 (2022), doi:10.1038/s41598-022-18773-w.
- H. Gong *et al.*, Synergies in sustainable phosphorus use and greenhouse gas emissions mitigation in China: Perspectives from the entire supply chain from fertilizer production to agricultural use. *Science of the Total Environment*. **838**, 155997 (2022), doi:10.1016/j.scitotenv.2022.155997.
- J. W. van Groenigen *et al.*, Sequestering soil organic carbon: a nitrogen dilemma. *Environmental Sci. & Technol*. **51**, 4738–4739 (2017), doi:10.1021/acs.est.7b01427.
- J. D. Gil *et al.*, Reconciling global sustainability targets and local action for food production and climate change mitigation. *Global environmental change : human and policy dimensions*. **59**, 101983 (2019), doi:10.1016/j.gloenvcha.2019.101983.
- A. Muscat *et al.*, Principles, drivers and opportunities of a circular bioeconomy. *Nature Food*. **2**, 561–566 (2021), doi:10.1038/s43016-021-00340-7.
- X. Zhang *et al.*, Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*. **528**, 51–59 (2015), doi:10.1038/nature15743.
- K. Butterbach-Bahl *et al.*, Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Trans. Royal Society of London. Series B, Biological sciences*. **368**, 20130122 (2013), doi:10.1098/rstb.2013.0122.
- C. Wagner-Riddle *et al.*, Mitigation of nitrous oxide emissions in the context of nitrogen loss reduction from agroecosystems: managing hot spots and hot moments. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. **47**, 46–53 (2020), doi:10.1016/j.cosust.2020.08.002.
- T. M. Maaz *et al.*, Meta-analysis of yield and nitrous oxide outcomes for nitrogen management in agriculture. *Global Change Biol*. **27**, 2343–2360 (2021), doi:10.1111/gcb.15588.
- N. C. Lawrence, C. G. Tenesaca, A. VanLoocke, S. J. Hall, Nitrous oxide emissions from agricultural soils challenge climate sustainability in the US Corn Belt. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A*. **118** (2021), doi:10.1073/pnas.2112108118.
- B. Guenet *et al.*, Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? *Global Change Biol*. **27**, 237–256 (2021), doi:10.1111/gcb.15342.
- Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, *Furthering 4R nutrient stewardship. Issue Brief 03* (SPRPN, Paris, France, 2022). (available at <https://sprpn.org/issue-brief/furthering-4r-nutrient-stewardship/>).
- M. D. Young, G. H. Ros, W. de Vries, Impacts of agronomic measures on crop, soil, and environmental indicators: A review and synthesis of meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. **319**, 107551 (2021), doi:10.1016/j.agee.2021.107551.
- Z. Pan *et al.*, Global impact of enhanced-efficiency fertilizers on vegetable productivity and reactive nitrogen losses. *Science of the Total Environment*. **926**, 172016 (2024), doi:10.1016/j.scitotenv.2024.172016.
- M. A. Harty *et al.*, Reducing nitrous oxide emissions by changing N fertiliser use from calcium ammonium nitrate (CAN) to urea based formulations. *Science of the Total Environment*. **563–564**, 576–586 (2016), doi:10.1016/j.scitotenv.2016.04.120.
- D. Abalos *et al.*, Management of irrigation frequency and nitrogen fertilization to mitigate GHG and NO emissions from drip-fertigated crops. *Science of the Total Environ*. **490**, 880–888 (2014), doi:10.1016/j.scitotenv.2014.05.065.
- D. Abalos *et al.*, Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. **189**, 136–144 (2014), doi:10.1016/j.agee.2014.03.036.
- C. F. Drury *et al.*, Combining urease and nitrification inhibitors with incorporation reduces ammonia and nitrous oxide emissions and increases corn yields. *J. Environ. Qual*. **46**, 939–949 (2017), doi:10.2134/jeq2017.03.0106.
- A. L. Woodley *et al.*, Ammonia volatilization, nitrous oxide emissions, and corn yields as influenced by nitrogen placement and enhanced efficiency fertilizers. *Soil Sci. Soc. Am. J*. **84**, 1327–1341 (2020), doi:10.1002/saj2.20079.
- FFAR, *The Global Fertilizer Challenge: Future The Global Fertilizer Challenge: directions for efficient fertilizer research* (2023) (available at <https://foundationfar.org/wp-content/uploads/2023/08/EFC-White-Paper-1.pdf>).
- M. Chen *et al.*, Evidence map of the benefits of enhanced-efficiency fertilisers for the environment, nutrient use efficiency, soil fertility, and crop production. *Environ. Res. Lett*. **18**, 43005 (2023), doi:10.1088/1748-9326/acb833.
- R. Thapa *et al.*, Effect of enhanced efficiency fertilizers on nitrous oxide emissions and crop yields: a meta-analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J*. **80**, 1121–1134 (2016), doi:10.2136/sssaj2016.06.0179.
- B. Pan *et al.*, Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. *Agriculture*,

- Ecosystems & Environment*. **232**, 283–289 (2016), doi:10.1016/j.agee.2016.08.019.
30. D. Grados *et al.*, Synthesizing the evidence of nitrous oxide mitigation practices in agroecosystems. *Environ. Res. Lett.* **17**, 114024 (2022), doi:10.1088/1748-9326/ac9b50.
31. Z. Yao *et al.*, A global meta-analysis of yield-scaled N₂O emissions and its mitigation efforts for maize, wheat, and rice. *Global Change Biol.* **30**, e17177 (2024), doi:10.1111/gcb.17177.
32. Y. Lu *et al.*, Biological mitigation of soil nitrous oxide emissions by plant metabolites. *Global Change Biol.* **30**, e17333 (2024), doi:10.1111/gcb.17333.
33. G. V. Subbarao, T. D. Searchinger, A «more ammonium solution» to mitigate nitrogen pollution and boost crop yields. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **118**, e2107576118 (2021), doi:10.1073/pnas.2107576118.
34. G. V. Subbarao *et al.*, Enlisting wild grass genes to combat nitrification in wheat farming: A nature-based solution. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **118**, e2106595118 (2021), doi:10.1073/pnas.2106595118.
35. IPCC, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2019) (available at <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>).
36. P. Grace *et al.*, Revised emission factors for estimating direct nitrous oxide emissions from nitrogen inputs in Australia's agricultural production systems: a meta-analysis. *Soil Res.* **62** (2024), doi:10.1071/SR23070.
37. G. P. Mathivanan *et al.*, New N₂O emission factors for crop residues and fertiliser inputs to agricultural soils in Germany. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. **322**, 107640 (2021), doi:10.1016/j.agee.2021.107640.
38. X. Cui *et al.*, Global mapping of crop-specific emission factors highlights hotspots of nitrous oxide mitigation. *Nat. Food*. **2**, 886–893 (2021), doi:10.1038/s43016-021-00384-9.
39. C. Wang *et al.*, Reducing soil nitrogen losses from fertilizer use in global maize and wheat production. *Nat. Geosci.*, 1–8 (2024), doi:10.1038/s41561-024-01542-x.
40. Y. Wang *et al.*, Tea-planted soils as global hotspots for N₂O emissions from croplands. *Environ. Res. Lett.* **15**, 104018 (2020), doi:10.1088/1748-9326/aba5b2.
41. I. Shcherbak, N. Millar, G. P. Robertson, Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N₂O) emissions to fertilizer nitrogen. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **111**, 9199–9204 (2014), doi:10.1073/pnas.1322434111.
42. EDF, *How to use EDF's nitrogen balance model to make nitrous oxide and nitrate reduction claims* (2022) (available at <https://www.edf.org/ecosystems/making-invisible-loss-nitrogen-visible-farm-and-future>).
43. A. J. Eagle *et al.*, Quantifying on-farm nitrous oxide emission reductions in food supply chains. *Earth's Future*. **8** (2020), doi:10.1029/2020EF001504.
44. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, *Fertilizer and soil health for enhanced productivity and sustainability in sub-Saharan Africa. Issue Brief 06* (SPRPN, Paris, France, 2024). (available at <https://sprpn.org/issue-brief/fertilizer-and-soil-health-for-enhanced-productivity-and-sustainability-in-sub-saharan-africa/>).
45. M. Lessmann *et al.*, Global variation in soil carbon sequestration potential through improved cropland management. *Global Change Biol.* **28**, 1162–1177 (2022), doi:10.1111/gcb.15954.
46. R. Lal, Carbon farming by recarbonization of agroecosystems. *Pedosphere*. **33**, 676–679 (2023), doi:10.1016/j.pedsph.2023.07.024.
47. T. Fischer *et al.*, Sixty years of irrigated wheat yield increase in the Yaqui Valley of Mexico: Past drivers, prospects and sustainability. *Field Crops Res.* **283**, 108528 (2022), doi:10.1016/j.fcr.2022.108528.
48. S. M. Mueller, C. D. Messina, T. J. Vyn, Simultaneous gains in grain yield and nitrogen efficiency over 70 years of maize genetic improvement. *Sci. Rep.* **9**, 9095 (2019), doi:10.1038/s41598-019-45485-5.
49. B. Vanlauwe *et al.*, *Fertilizer and soil health in Africa: The role of fertilizer in building soil health to sustain farming and address climate change* (2023) (available at <https://ifdc.org/resources/fertilizer-and-soil-health-in-africa-the-role-of-fertilizer-in-building-soil-health-to-sustain-farming-and-address-climate-change/>).
50. L. F. Schulte-Uebbing *et al.*, From planetary to regional boundaries for agricultural nitrogen pollution. *Nature*. **610**, 507–512 (2022), doi:10.1038/s41586-022-05158-2.
51. G. Mandrini *et al.*, Exploring trade-offs between profit, yield, and the environmental footprint of potential nitrogen fertilizer regulations in the US Midwest. *Front. Plant Sci.* **13**, 852116 (2022), doi:10.3389/fpls.2022.852116.
52. Xuejun LIU *et al.*, A new approach to holistic nitrogen management in China. *Front. Agr. Sci. Eng.* **0**, 0 (2022), doi:10.15302/J-FASE-2022453.
53. Z. Shang *et al.*, Weakened growth of cropland-N₂O emissions in China associated with nationwide policy interventions. *Global Change Biol.* **25**, 3706–3719 (2019), doi:10.1111/gcb.14741.
54. D. R. Kanter *et al.*, Gaps and opportunities in nitrogen pollution policies around the world. *Nat. Sustain.* **3**, 956–963 (2020), doi:10.1038/s41893-020-0577-7.
55. D. R. Kanter, S. M. Ogle, W. Winiwarter, Building on Paris: integrating nitrous oxide mitigation into future climate policy. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. **47**, 7–12 (2020), doi:10.1016/j.cosust.2020.04.005.
56. A. Leip *et al.*, Halving nitrogen waste in the European Union food systems requires both dietary shifts and farm level actions. *Global Food Security*. **35**, 100648 (2022), doi:10.1016/j.gfs.2022.100648.
57. USEPA, *Scope 3 inventory guidance* (2024) (available at <https://www.epa.gov/climateleadership/scope-3-inventory-guidance>).

58. SustainCert, *Nutrien/Maple Leaf Foods- Reduced N₂O emissions from 4R Nitrogen Management* (2024) (available at <https://platform.sustain-cert.com/public/vivid-registry/interventions/vc/details/23/documents>).
59. Government of Alberta, *Quantification protocol for agricultural nitrous oxide emission reductions. Version 2.1* (2023) (available at <https://open.alberta.ca/publications/9781460125502>).
60. Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, *Defining nutrient use efficiency in responsible plant nutrition. Issue Brief 04* (SPRPN, Paris, France, 2023). (available at <https://sprpn.org/issue-brief/defining-nutrient-use-efficiency-in-responsible-plant-nutrition/>)
61. E. L. McLellan *et al.*, The nitrogen balancing act: tracking the environmental performance of food production. *BioScience*. **68**, 194–203 (2018), doi:10.1093/biosci/bix164.
62. EU Nitrogen Expert Panel, *Nitrogen Use Efficiency (NUE). Guidance document for assessing NUE at farm level* (Wageningen University, Alterra, Wageningen, NL, 2016). (available at <https://www.eunep.com/wp-content/uploads/2023/12/NUE-Guidance-Document.pdf>).

AUTOREN, ZITATION UND KONTAKT

Autoren: Mitglieder des Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition (Leadautoren unterstrichen).
Patrick H Brown (University of California-Davis, USA), Tom Bruulsema (Plant Nutrition Canada), Achim Dobermann (International Fertilizer Association, France), Mariangela Hungria (Embrapa, Brazil), Jian Feng Ma (Okayama University, Japan), Michael McLaughlin (University of Adelaide, Australia), Bernard Vanlauwe (International Institute of Tropical Agriculture, Kenya), Marta Vasconcelos (Universidade Católica Portuguesa, Portugal), Claudia Wagner-Riddle (University of Guelph, Canada), Fangjie Zhao (Nanjing Agricultural University, China),

Zitation: Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition. 2024. *Mitigating greenhouse gas emissions through responsible plant nutrition. Issue Brief 07.* Verfügbar unter <https://sprpn.org>

Weitere Informationen: Scientific Panel on Responsible Plant Nutrition, info@sprpn.org