



Executive Stakeholder Summary

Projektnummer	406840_173569
Projekttitel	Lachgas- und Methan-Emissionen von aus landwirtschaftlichen Böden in der Schweiz
Projektleiter	Andreas Gattinger, Justus-Liebig-Universität Giessen und Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL
Weitere Projektverantwortliche	Daniel Bretscher, Agroscope Andreas Schellenberger, Bundesamt für Umwelt BAFU

Frick, 28.2.2018

Hintergrund

Seit der industriellen Revolution ist die Konzentration der Treibhausgase (THG) in der Atmosphäre kontinuierlich angestiegen. Von 1850 bis 2017 nahm die atmosphärische Konzentration der wichtigsten Treibhausgase Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) um 45, 155 und 22 Prozent zu. Der jährliche Anstieg der CO₂-, CH₄- und N₂O-Konzentrationen betrug 2016 3.3 ppm, 9 ppb und 0.8 ppb. Das Treibhausgaspotenzial der Spurengase N₂O und CH₄ ist 298-fach beziehungsweise 25-fach höher als jenes von CO₂. Böden stellen in der Landwirtschaft neben der Tierhaltung und der Lagerung und Behandlung von Hofdünger gegenwärtig eine der grössten Quellen für Treibhausgase dar. Die Ursache liegt vor allem bei N₂O-Emissionen aus dem Boden, die weltweit rund die Hälfte der anthropogenen N₂O-Emissionen ausmachen. Bei guter Durchlüftung wirken Böden als leichte CH₄-Senke. Über die An- und Abreicherung von organischem Kohlenstoff agieren landwirtschaftliche Böden auch als CO₂-Senken oder -Quellen. Die Fähigkeit eines Bodens Kohlenstoff langfristig in der organischen Bodensubstanz (OBS) zu speichern, hängt dabei von den standörtlichen Bedingungen und den dominierenden Bodenprozessen ab. Verschiedene Bewirtschaftungsweisen im Ackerbau wirken sich stark auf die Kohlenstoffbilanz des Bodens aus. Die stärksten Effekte auf den Bodenkohlenstoff sind jedoch bei Landnutzungsänderungen zu erwarten, beispielsweise bei der Umwandlung von Grasland in Ackerland. Aktivitäten wie die französische «4 per 1000» zeigen, dass die Kohlenstoffdynamik von landwirtschaftlichen Böden und ihre Bedeutung für das globale Klima zunehmend auch ausserhalb der Wissenschaft Beachtung finden. Obwohl der Einfluss einzelner Bodenparameter auf die THG- und insbesondere die N₂O-Emissionen in vielen Studien erforscht wurde, existieren Wissenslücken hinsichtlich der Wirkungen komplexer Bewirtschaftungsstrategien im Feld. Auch für CH₄-Emissionen ist der Einfluss verschiedener landwirtschaftlicher Praktiken bisher nicht systematisch quantifiziert.

Ziel

In den letzten Jahren wurde mehrere Feldstudien zu N₂O- und CH₄-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden in der Schweiz und im benachbarten Ausland durchgeführt. Um die skizzierten Wissenslücken zu schliessen, zielte das Projekt darauf ab, die Ergebnisse der Feldstudien auf Basis einer Literaturrecherche systematisch zusammenzufassen und mit Bezug auf Schweizer Verhältnisse quantitativ auszuwerten. Die treibenden Faktoren für N₂O-Emissionen nach verschiedenen Landnutzungsformen (Ackerland und Grasland) und Bodentypen (organische und mineralische Böden) sollen dabei gestaffelt aufgezeigt werden. Als Zielparameter definiert wurden die N₂O-Emissionen und die Emissionsfaktoren, die angeben, welcher prozentuale Anteil des Stickstoffeintrags als N₂O emittiert wurde. Zudem sollten Empfehlungen erarbeitet werden, wie sich N₂O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden reduzieren lassen, und diese in die thematische Synthese TS2 «Boden und Umwelt» des NFP 68 integriert werden.

Resultate

Um robuste Aussagen hinsichtlich THG-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden zu erfassen, berücksichtigte die systematische Literaturrecherche nur Studien, in denen N₂O- und/oder CH₄-Emissionen in Feldversuchen gemessen und in «peer-review» Zeitschriften publiziert wurden. Um die Anzahl der aussagekräftigen Studien zu erhöhen, wurden nicht nur Messungen

in der Schweiz zugelassen, sondern auch Messungen aus pedoklimatisch ähnlichen Regionen wie Süddeutschland, Österreich und Ostfrankreich. Die Messdauer der 30 identifizierten Studien schwankte zwischen 2 und 18 Monaten. Emissionsmessungen einer Vegetationsperiode lassen sich in der Regel jedoch nicht auf das Gesamtjahr extrapolieren. Da die Messperiode meist bewusst in Zeiträume hoher N₂O-Emissionen gelegt werden, würden die errechneten Jahresemissionen überschätzt. Je nach Intensität der Frost-Tau-Zyklen können die Winteremissionen zudem bis zu 50 Prozent der Gesamtemissionen ausmachen. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten können, wurden für die Metaanalyse daher nur Studien berücksichtigt, denen Jahresdaten für N₂O- und CH₄-Emissionen entnommen werden konnten. Aufgrund dieses Kriteriums mussten 10 Studien ausgeschlossen werden. Übrig blieben 20 valide Studien mit 89 Jahresmessungen für N₂O. Die meisten davon stammten von mineralischen Acker- und Graslandböden (66 bzw. 10 valide Jahresdaten). N₂O-Jahresdaten von organischen Böden stammen von 6 Acker- und 12 Graslandstandorten.

Für die CH₄-Emissionen konnten nur 5 Studien mit Jahresdaten identifiziert werden, weshalb von einer statistischen Analyse abgesehen wurde. Das gesetzte Ziel, wichtige Einflussgrößen für CH₄ Emissionen quantitativ zu erfassen, konnte daher nicht weiterverfolgt werden. Die Quellen und Senken von CO₂ und CH₄ werden an dieser Stelle nicht weiter untersucht.

Die Berechnung der Mittelwerte der N₂O-Jahresemissionen in organischen und mineralischen Acker- und Graslandböden zeigt die grosse Variabilität der N₂O-Emissionen auf. Auf mineralischen Ackerböden wurden im Durchschnitt 3,88 kg N₂O-N ha⁻¹ Jahr⁻¹ emittiert (Tabelle 1). Mit 3,15 kg N₂O-N ha⁻¹ Jahr⁻¹ lag die Standardabweichung allerdings in derselben Größenordnung. In dieser Nutzungskategorie wurden insgesamt 66 Jahresmessungen durchgeführt. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die hohe Standardabweichung nicht ausschliesslich auf eine geringe Messanzahl zurückgeführt werden kann. Sowohl die verschiedenen Standorte als auch Temperatur- und Niederschlagsschwankungen zwischen den einzelnen Jahren sind Ursachen der hohen Standardabweichung bei den N₂O-Emissionen. Die Resultate der Varianzanalyse weisen signifikant höhere N₂O-Emissionen aus Ackerstandorten auf organischen Böden (14,92 ± 20,93 kg N₂O-N ha⁻¹ Jahr⁻¹) als auf mineralischen Böden (3,88 ± 3,15 kg N₂O-N ha⁻¹ Jahr⁻¹). Die starke Standortabhängigkeit verdeutlicht: Die Klimawirkung entwässerter organischer Ackerböden ist aufgrund der hohen Kohlenstoff- und Stickstoffmineralisierung überdurchschnittlich hoch.

Die Standardabweichung der N₂O-Emissionen auf Graslandböden war sowohl auf mineralischen als auch auf organischen Standorten überdurchschnittlich hoch (Tabelle 1). Im Gegensatz zu Ackerstandorten konnten bei Grasland keine signifikant höheren N₂O-Emissionen aus organischen Böden festgestellt werden. Neben der geringen Anzahl an Messreihen können die fehlenden Unterschiede durch das generell niedrigere Stickstoffdüngungsniveau auf Graslandstandorten erklärt werden. Auf mineralischen Böden beeinflusste die unterschiedliche Landnutzung die N₂O-Jahresemissionen nicht signifikant.

Entsprechend der absoluten N₂O-Jahresemissionen sind die berechneten N₂O-Emissionsfaktoren für Acker- und Graslandnutzung auf mineralischen Böden signifikant niedriger als auf organischen Böden. Die N₂O-Emissionsfaktoren mineralischer Böden waren mit 2,06 ± 2,66 % für Ackerböden und 1,45 ± 1,07 % für Graslandböden vergleichbar mit dem Emissionsfaktor, den das Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC angibt.

Tabelle 1: Durchschnittliche N₂O-Jahresemissionen (\pm Standardabweichung) und N₂O-Emissionsfaktoren aus organischen und mineralischen Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung. Nutzungskategorien, die nicht durch denselben Buchstaben gekennzeichnet sind, unterscheiden sich signifikant mit $p < 0,05$. Je kleiner «n» desto weniger belastbar sind die Ergebnisse.

Boden Nutzung	Mineralisch				Organisch							
	Acker		Grasland		Acker		Grasland					
		n		n		n		n				
N ₂ O (kg -N ha ⁻¹ Jahr ⁻¹)	3,88	$\pm 3,15$	66	4,40	$\pm 7,95$	10	14,92	$\pm 20,93$	6	3,51	$\pm 5,22$	12
ANOVA Post-Hoc Tukey	b			b			a			b		
N ₂ O-Emissionsfaktor (%)	2,06	$\pm 2,66$	54	1,45	$\pm 1,07$	8	4,37	$\pm 3,00$	5	6,51	$\pm 9,37$	9
ANOVA Post-Hoc Tukey	b			b			ab			a		

Um die treibenden Faktoren der N₂O-Jahresemissionen zu identifizieren, wurde der Einfluss der einzelnen Bodenparameter mit Hilfe einer Korrelationsanalyse ermittelt. Die Ergebnisse zeigen für mineralische Ackerböden einen signifikanten Zusammenhang zwischen N₂O-Jahresemissionen und der ausgebrachten Düngemenge sowie dem Boden-pH (Tabelle 2). Dies bestätigt den engen Zusammenhang zwischen Stickstoffverfügbarkeit und N₂O-Emissionen und verdeutlicht die Bedeutung einer angepassten Düngung. Die Tatsache dass der Boden-pH auf regionaler Ebene über mehrere Jahre hinweg signifikant mit den N₂O-Emissionen korreliert, verdeutlicht die Klimarelevanz eines stabilen Boden-pH. Im NFP 68-Projekt LACHGAS konnte gezeigt werden, dass eine bewirtschaftungsinduzierte Versauerung des Bodens zu einer Disfunktionalität der biologischen N₂O-Reduktion führen kann. Aus Klimaschutzüberlegungen ist daher möglichst zu vermeiden, dass der Boden-pH unterhalb von 6 sinkt. Andere Korrelationen von N₂O-Emissionen mit den begleitenden Bodenparametern waren auf mineralischen Ackerböden allerdings nicht signifikant. Somit lassen sich keine weiteren fundierten Schlüsse ziehen. Der Grund dafür ist vor allem in der geringen Anzahl Messungen zu suchen. Beispielsweise wurde nicht in allen Studien mit N₂O-Jahresmessungen auf mineralischen Graslandböden der OBS-Gehalt bestimmt. Die Anzahl der validen Datenpunkte für die Korrelationsanalyse ist damit beschränkt. Trotz der geringen Anzahl an Messpunkten konnte für mineralische Graslandböden und die Nutzung von organischen Böden eine signifikante Korrelation der OBS-Gehalte mit den N₂O-Emissionen beobachtet werden (Tabelle 2).

Tabelle 2: Pearson Korrelationskoeffizienten (r), Signifikanzniveau (p-Wert) und Anzahl (n) der Messpunkte von N₂O-Jahresemissionen (in kg N₂O-N ha⁻¹ Jahr⁻¹) mit den jeweiligen begleitenden Bodenparametern in mineralischen und organischen Böden unter verschiedener landwirtschaftlicher Nutzung. Je kleiner das «n» desto weniger belastbar sind die Ergebnisse. Ab einem p-Wert von kleiner als 0,05 wird das Ergebnis als statistisch signifikant angesehen.

Boden Nutzung	Mineralisch						Organisch					
	Acker			Grasland			Acker			Grasland		
	r	p-Wert	n	r	p-Wert	n	r	p-Wert	n	r	p-Wert	n
Tongehalt	0,18	0,152	63	-		2	-			-		
Lagerungsdichte	0,13	0,302	59	0,45	0,369	6	0,66	0,146	6	0.63	0.026	12
SOC	0,07	0,564	66	0,83	0,018	7	0,85	0,029	6	0.66	0.019	12
Boden-pH	0,33	0,007	66	0,46	0,178	10	0,89	0,016	6	0.91	<0.001	12
N-Düngung	0,50	<0,001	63	0,21	0,556	10	0,35	0,488	6	0,42	0,164	12

Bedeutung für die Forschung

Die statistische Analyse des vorliegenden Datensatz zu N₂O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden weist eine Reihe von Limitierungen auf, die in die Interpretation der Ergebnisse einbezogen werden müssen. Obwohl in den letzten Jahren in verschiedenen Feldversuchen Studien zu THG-Emissionen durchgeführt wurden, war die Anzahl an vergleichbaren Messwerten im untersuchten geografischen Raum zu gering, um klare Aussagen über die treibenden Faktoren treffen zu können. Der Umstand, dass N₂O-Messkampagnen mit unterschiedlicher Messdauer nicht systematisch miteinander verglichen werden können, reduzierte die Anzahl der auswertbaren Studien um fast die Hälfte.

Um künftige Messkampagnen von THG-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen vergleichbarer zu gestalten, ergeben sich aus diesem Projekt eine Reihe an Empfehlungen, die als Mindestkriterienkatalog dienen können:

- Es sollte darauf geachtet werden, dass sich die Messperiode über mindestens ein gesamtes Kalenderjahr erstreckt, also mehr als eine Vegetationsperiode abbildet und alle Jahreszeiten abdeckt. Entsprechend sollten die Ergebnisse in der Einheit N₂O-N ha⁻¹ Jahr⁻¹ dargestellt werden. Um N₂O-Emissionen realistisch abschätzen zu können, sollte dabei besonders nach Bewirtschaftungsmassnahmen wie Düngung und Bodenbearbeitung auf eine höhere Messfrequenz mit mehr als einer Probenahme pro Woche geachtet werden.
- Begleitende Quantifizierungen von relevanten Bodenparametern wie Textur, Lagerungsdichte, Boden-pH, Gehalt an organischem Bodenkohlenstoff und gegebenenfalls die N-Düngung sollten fester Bestandteil von THG-Messkampagnen sein.
- Auch sollten klimatische Einflussfaktoren wie Temperatur und Niederschlag und die damit zusammenhängenden bodenphysikalischen Grössen wie Wassergehalt, Wassersättigung und Bodentemperatur erhoben werden. Dies würde helfen, Messkampagnen unterschiedlicher Jahre besser vergleichen und den Einfluss von Niederschlagsereignissen und Temperaturschwankungen auf bewirtschaftungsbedingte N₂O-Emissionen systematisch erfassen und bewerten zu können.
- In Düngeexperimenten sollte eine Null-Düngungsvariante berücksichtigt werden, damit das Niveau und der Jahresverlauf der Hintergrundemissionen solide quantifiziert werden kann. Ohne Quantifizierung der Hintergrundemissionen ist die Berechnung eines aussagekräftigen und vergleichbaren Emissionsfaktors in der Regel kaum möglich.

Der vorliegende Datensatz ist aufgrund seiner geringen Anzahl an vergleichbaren Studien und unter Anbetracht der komplexen Natur der N₂O-Emissionen nur bedingt geeignet, belastbare Aussagen über Strategien zur Minderung von N₂O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden treffen zu können.

Bedeutung für die Praxis

Die Resultate dieses Projekts sind eher für die wissenschaftliche Gemeinschaft als für die landwirtschaftliche Praxis bedeutsam. Doch hat auch diese Studie einen Zusammenhang zwischen N-Düngung und N₂O-Emissionen festgestellt. Welche praktischen, landwirtschaftlichen Massnahmen zur Minderung der N₂O-Emissionen ergriffen werden können, werden im Folgenden erläutert.

Empfehlungen

Als Treiber für N₂O-Emissionen aus mineralischen Ackerböden identifizierte diese Studie die N-Düngung und den Boden-pH. In organischen Böden und mineralischen Graslandböden war der OBS-Gehalt ein wichtiger Treiber der N₂O-Emissionen. Unter Ackernutzung sind die N₂O-Emissionen signifikant höher als in mineralischen Böden. Allerdings konnte der Einfluss einzelner Bewirtschaftungsverfahren wie pfluglos oder die Verwendung von Nitrifikationsinhibitoren oder Pflanzenkohle aufgrund der geringen Anzahl an vergleichbaren Studien nicht quantitativ ausgewertet werden.

Um N₂O-Emissionen aus mineralischen Ackerflächen zu verringern, empfiehlt sich nach dem aktuellen Stand des Wissens ein Bündel von Massnahmen. Dazu zählt vor allem eine zeitlich und räumlich optimierte N-Düngung, die sich am spezifischen N-Bedarf der Kultur und den Standortbedingungen orientiert und temporäre N-Überschüsse im Boden vermeidet. Voraussetzung hierfür wäre ein regelmässiges Monitoring der N-Gehalte in mineralischen Ackerböden, gegebenenfalls auch von Hofdüngern für eine fundierte Quantifizierung der einzelnen Düngegaben. Da das unterschiedliche C- und N-Mineralisierungspotenzial einen grossen Einfluss auf die Stickstoffverfügbarkeit und somit auf die N₂O-Emissionen hat, sollten zudem Unterschiede im Bodentyp wie zwischen Mineralböden und organischen Böden berücksichtigt werden. Mittels einer regelmässigen Erfassung der räumlichen Heterogenität der N-Gehalte mit Werkzeugen des Präzisionslandbaus könnte die teilflächenspezifische Düngung weiter optimiert werden. Zusätzlich zur bedarfsgerechten Düngung sollte das Ausbringen von Dünger zu Zeiten von erhöhtem Emissionsrisiko – geringe N-Aufnahmekapazität der Kultur, wassergesättigte Böden – vermieden werden. Zudem sollte die Funktion des Bodens, N₂O abzubauen (biologische N₂O-Reduktion) erhalten werden. Dazu sollte der Boden-pH über dem kritischen Wert von 6 stabilisiert und eine bewirtschaftungsinduzierte Versauerung vermieden werden. Auf Ackerflächen lässt sich dies durch Kalkung oder regelmässiges Ausbringen von Kompost erreichen. Für den Einsatz von Pflanzenkohle und Nitrifikationsinhibitoren sind verstärkte Forschungsanstrengungen nötig, mit dem Ziel, deren Anwendung unter Schweizer Bedingungen abschliessend beurteilen und entsprechende Empfehlungen formulieren zu können.