

5.4 Messung und Modellierung von Treibhausgasflüssen auf Versuchsflächen

Johann Peter, Harald Schmid, Rolf Schilling, Jean Charles Munch,
Claus Florian Stange, Kurt-Jürgen Hülsbergen

Zusammenfassung

N₂O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden unterliegen einer hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität. Bisher gibt es noch keine ausreichenden Untersuchungen zur N₂O-Freisetzung in Abhängigkeit von der Fruchtfolge, Düngung, Bodenbearbeitung sowie den Standortfaktoren.

In Feldexperimenten wurden N₂O und CH₄-Flüsse im Fruchtfolgeglied Klee gras – Winterweizen bei unterschiedlicher N-Düngung mit einem automatischen Messsystem mit hoher Frequenz (mehrere Messungen innerhalb von 24 Stunden pro Messpunkt) gemessen. Die Messergebnisse werden mit Ergebnissen der Bodenprozessmodellierung (Modell DNDC) sowie der Abschätzung kumulativer N₂O-Emissionen mit Hilfe von Emissionsfaktoren verglichen.

Unter den Versuchsbedingungen wurden beim Anbau von Winterweizen höhere N₂O-Emissionen als beim Anbau von Klee gras gemessen. Düngung mit Biogasgülle erhöhte die N₂O-Emissionen beträchtlich. Die Modellierung mit DNDC zeigt übereinstimmend mit den Messungen, dass Düngergaben erhebliche N₂O-Emissionen hervorrufen können. DNDC wies stärkere N₂O-Peaks mit kürzeren Emissionsphasen aus und führte kumulativ zu geringen THG-Emissionen als die Messungen. Beim Klee grasanbau ohne N-Düngung hat DNDC unter den Versuchsbedingungen generell sehr geringe N₂O-Emissionen berechnet. Die N₂O-Emissionsereignisse in wachsenden, schnittgenutzten Klee grasbeständen konnten mit dem Modell nicht richtig nachvollzogen werden. Bei der Bewertung der Wirkung einzelner Fruchtarten (z.B. Klee gras) müssen nicht nur die gesamte Vegetationsperiode, sondern auch die Nachwirkung auf Folgefrüchte analysiert werden.

Schlüsselwörter: Treibhausgase, N₂O-Emissionen, Modellierung, Klee gras, Biogasgülle

Abstract

The emissions of N₂O from managed soils are liable to a high spatial and temporal variety. Up to now, there are no sufficient investigations on the N₂O-emissions according to crop rotation, fertilization, tillage and the influence of the site. The N₂O- and CH₄-emissions of clover grass and winter wheat under the conditions of different N-fertilization have been examined in field trials. An automatic high-frequency measuring system (several measurements per plot in 24 hours) was used. The results of the measurements are compared with the results of the model DNDC and the estimation of cumulative N₂O-emissions using emission factors.

Under the test conditions we detected higher N₂O-emissions in winter wheat than in clover grass. Fertilization with digestates from biogas led to higher emissions. The modeling with DNDC showed in compliance with the measurements that fertilization can raise the N₂O-emissions. DNDC calculated higher N₂O-peaks in less time and computed less cumulated emissions than we detected with the

measurements. It also calculated very low emissions in the cultivation of clover grass without fertilization. The model was not able to simulate the emission events under growing clover grass correctly. When evaluating the effect of single crops (e.g. clover grass) not only the whole growing season but also the consequences of former crops have to be taken into account, too.

Keywords: greenhouse gas emissions, N₂O-emissions, modeling, clover grass, digestate

5.4.1 Einleitung und Problemstellung

Weltweit verursacht die Landwirtschaft 10 bis 12 % der anthropogenen Treibhausgas- (THG)-Emissionen bzw. 58 % der N₂O- und 47 % der CH₄-Emissionen (Burney et al., 2010). Durch die pflanzliche Produktion entstehen neben den CO₂-Emissionen durch den Einsatz fossiler Energie (Küstermann et al., 2008) vor allem auch Treibhausgase im Boden. Aufgrund der räumlichen und zeitlichen Variabilität der THG-Flüsse, vor allem der N₂O-Flüsse, ist es schwierig, Aussagen zu bewirtschaftungsbedingten Emissionen zu treffen. Bislang gibt es noch keine ausreichenden Untersuchungen zur N₂O-Freisetzung in Abhängigkeit von der Fruchtfolge, Düngung, Bodenbearbeitung sowie den Standortfaktoren. Allgemein wird von geringen N₂O-Emissionen im ökologischen Pflanzenbau ausgegangen, da die N-Zufuhr um ca. 50 % niedriger liegt als in konventionellen Anbausystemen. Zu Lachgasfreisetzungen kann es aber auch kommen, wenn Klee gras gemulcht wurde (Heuwinkel et al., 2005) oder bei hohen Boden-N-Vorräten.

Im Rahmen des Projekts „Pilotbetriebe“ werden THG-Flüsse in Feldexperimenten untersucht. Ziel ist es, den Einfluss von Standortfaktoren und Anbaumaßnahmen auf die Emissionen zu analysieren und Bodenprozessmodelle zu validieren. Schwerpunkte der Arbeit sind Analysen des Fruchtfolgeglieds Klee gras – Winterweizen sowie der Wirkung organischer Düngung. Vorgestellt werden Ergebnisse zeitlich hoch auflösender Messungen der THG-Flüsse in diesen Anbausystemen. Zum Vergleich werden Ergebnisse der Anwendung des Denitrification Decomposition (DNDC) Modells (Li et al., 2006) dargestellt. Der Vergleich von Mess- und Modellwerten soll zeigen, inwieweit dieses Modell das standortspezifische N₂O-Verlustpotenzial (vgl. Flessa et al., 2002a; Heuwinkel et al., 2005) sowie die Einflüsse der Fruchtfolge, Düngung und Bodenbearbeitung auf die N₂O-Flüsse beschreiben kann. Eine zentrale Frage für das Gesamtprojekt „Pilotbetriebe“ ist hierbei, ob sich das Modell DNDC prinzipiell eignet, unter den gegebenen Standortbedingungen die kumulativen N₂O-Emissionen hinreichend genau zu berechnen, um es in den Pilotbetrieben zur Modellierung der THG-Flüsse einzusetzen.

5.4.2 Material und Methoden

In der Versuchsstation Viehhausen der TU München werden in einem Dauerfeldversuch Wirkungen von Energiepflanzenfruchtfolgen sowie von Biogasgülle auf Böden, Pflanzen und Umwelt unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus analysiert (Versuchsbeschreibung: Reents et al., 2011).

Der Standort befindet sich im Tertiärhügelland, ca. 30 km nordöstlich von München (480 m N.N., \bar{x} 797 mm Niederschlag, \bar{x} 7,5°C Jahrestemperatur). Bei den untersuchten Böden handelt es sich um Braunerden bis Parabraunerden, sL-L, Ackerzahl \bar{x} 55.

In ausgewählten Versuchsvarianten werden täglich mehrmals N_2O -, CO_2 - und CH_4 -Flüsse mit einem automatischen Messsystem (Beschreibung des Messprinzips in Flessa et al., 2002a) mit hoher Frequenz (mehrere Messungen innerhalb von 24 Stunden pro Messpunkt) in drei Wiederholungen gemessen. Die einzelnen Messungen werden als Tagesmittelwerte zusammengefasst. Es werden sowohl schnittgenutztes Klee gras als auch verschiedene Weizenanbausysteme (Düngung mit Biogasgülle und ohne Düngung) in der Fruchtfolge Klee gras – Winterweizen – Grünroggen/Silomais – Triticale untersucht. Exemplarisch werden Ergebnisse eines Messzeitraums in der Vegetationsperiode 2009/2010 dargestellt. Die N_2O - und CH_4 -Emissionen werden für den Messzeitraum vom 1.5. bis 31.8.2009 und 1.9.2009 bis 30.4.2010 kumulativ berechnet und die Gesamtemissionen in CO_2 -Äquivalenten (CO_2_{eq}) nach IPCC (Forster et al., 2006) bestimmt. Versuchsbedingte Unterbrechungen der Messungen (durch Bodenbearbeitung und Erntemaßnahmen) werden durch Mittelwerte des jeweiligen Monats ergänzt.

Für den Vergleich zwischen den Messergebnissen und den Modellierungen wird das Modell Denitrification Decomposition (DNDC) verwendet. Dieses Modell basiert auf einen prozessorientierten, biochemischen Ansatz und wurde entwickelt, um N_2O - und N_2 -Flüsse durch Denitrifikation vorherzusagen (Li et al., 1992). Es wurde stetig weiterentwickelt, z.B. um neben den N-Flüssen auch C-Flüsse zu erfassen (Li et al., 1994a). Schwerpunktmäßig werden mit DNDC Prozesse wie Mineralisation, Nitrifikation, Denitrifikation und Methanoxidation beschrieben, die an der Spurengasproduktion beteiligt sind (Szyska, 2009). DNDC wurde in zahlreichen Studien umfangreich getestet (vgl. Li et al., 1994b; Li, 2000; Zhang et al., 2002; Li et al., 2006). Das Modell eignet sich zur Berechnung der NO -, N_2 -, CO_2 -, CH_4 -, NH_3 -Emissionen sowie der NO_3 -Austräge (z.B. Li et al., 2006). Über Eingangsparameter in den Bereichen Temperatur, Niederschlag, Bodenart, Vegetation und Management kann das Modell individuell an einen Standort angepasst werden (Li et al., 2006). Als Mindesteingabe müssen die tägliche Durchschnittstemperatur und die täglichen Niederschlagsmengen vorliegen sowie die Bodenart charakterisiert werden. Angaben zum Anbausystem werden über die Fruchtfolge, die Düngung und die Bodenbearbeitung abgefragt. Es wurde jeweils eine ganze Fruchtfolge modelliert, um etwaige Jahreseffekte, die bei einjähriger Simulation entstehen können, möglichst auszuschließen.

5.4.3 Ergebnisse

5.4.3.1 Ergebnisse der Messung von THG-Flüssen

Generell ist eine hohe zeitliche Variation der Messwerte festzustellen. Nach Einzelereignissen (Niederschlag, Düngung, Bodenbearbeitung) können ausgeprägte N_2O -Peaks auftreten. Unter den Bedingungen des Jahres 2009 wurden beim Anbau von Winterweizen höhere N_2O -Emissionen als beim Anbau von Klee gras (Schnittnutzung der Biomasse) gemessen. Düngergaben mit Biogasgülle (11.5.2009 und 13.8.2009) erhöhen die N_2O -Emissionen beträchtlich und fortwährend (Abbildung 5.4-1).

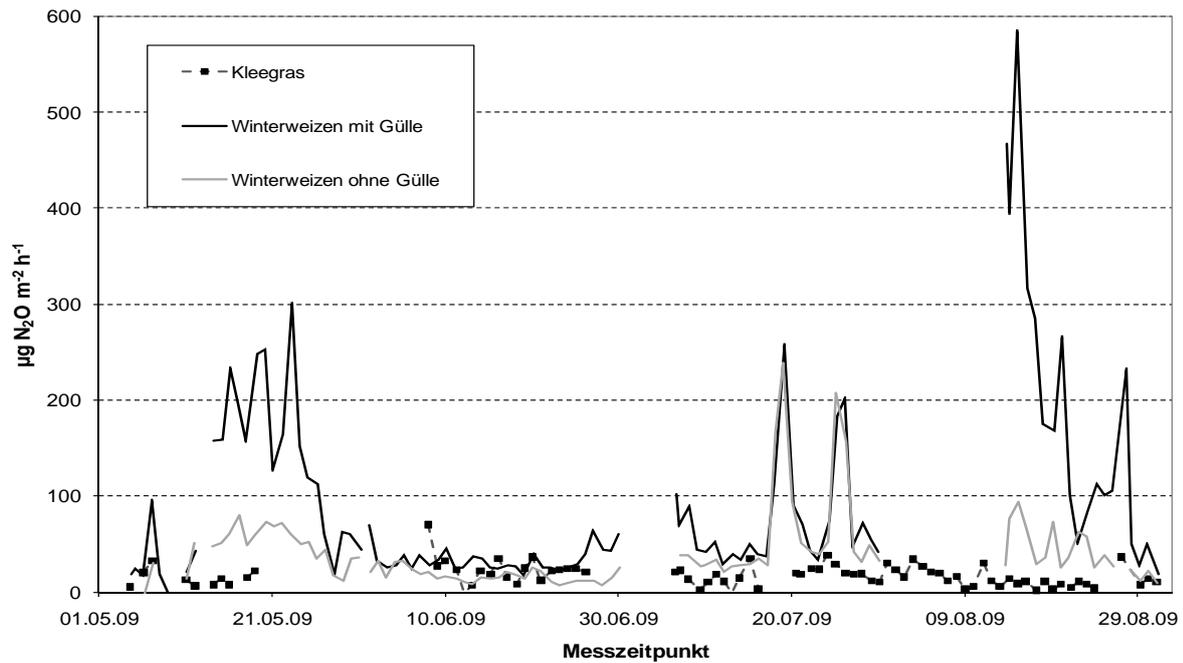


Abbildung 5.4-1: N₂O-Emissionen beim Anbau von Winterweizen und Kleegras vom 1.5.2009 bis 29.8.2009, Messungen im Energiepflanzen-Fruchtfolgeversuch Viehhausen (Peter et al., 2011), Biogasgülledüngung: 11.5.2009 und 13.8.2009, 35 und 100 kg N ha⁻¹.

Nach dem Kleegrasumbruch wurden im Versuch hohe N₂O-Emissionen im Winterhalbjahr gemessen, während bei intakten, wachsenden, schnittgenutzten Kleegrasbeständen geringe Emissionen festgestellt wurden (Beispiel in Abbildung 5.4-2). Die Messergebnisse belegen, dass auch im Winter beachtliche N₂O-Flüsse stattfinden, so dass dieser Zeitraum bei kumulativen Bewertungen mit einbezogen werden muss.

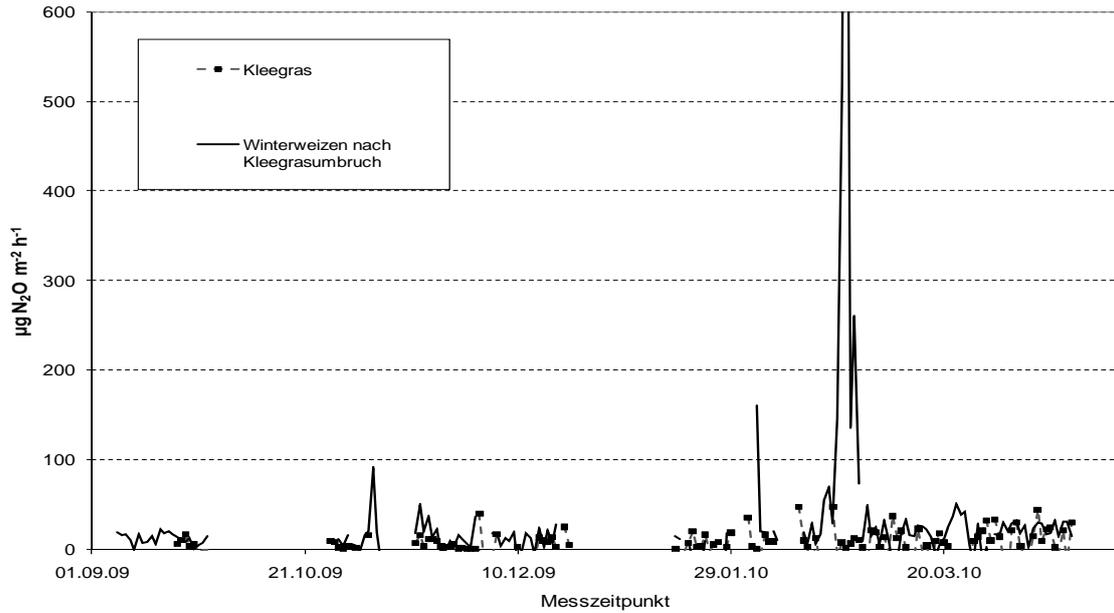


Abbildung 5.4-2: N₂O-Emissionen beim Anbau von Winterweizen und Kleegras vom 1.9.2009 bis 30.4.2010, Messungen im Energiepflanzen-Fruchtfolgeversuch Viehhausen, Kleegrasumbruch und Weizenaussaat: 27.10.2009.

Der Verlauf der CH₄-Flüsse im Zeitraum 1.5.2009 bis 31.8.2009 (Abbildung 5.4-3) und im Zeitraum 1.9.2009 bis 30.4.2010 (Abbildung 5.4-4) zeigen, dass die ackerbaulich genutzten Böden überwiegend Senken und keine Quellen für CH₄ sind.

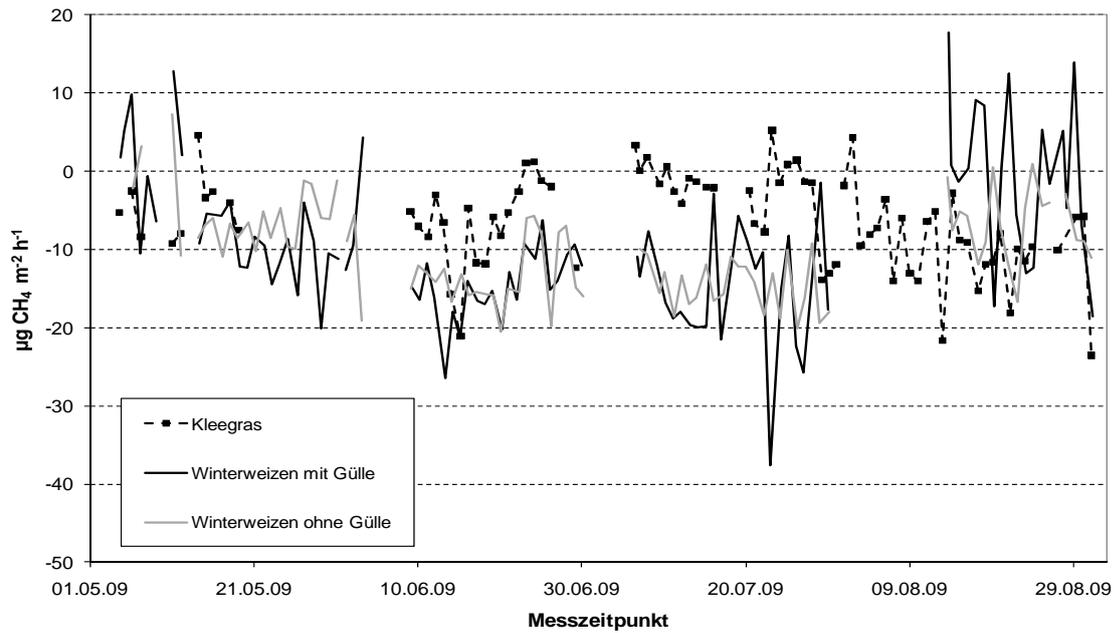


Abbildung 5.4-3: CH₄-Flüsse beim Anbau Winterweizen und Kleegras vom 1.5.2009 bis 29.8.2009, Messungen im Energiepflanzen-Fruchtfolgeversuch Viehhausen (Peter et al., 2011).

Der stärkste Abbau von CH₄ erfolgte im Zeitraum 1.5.2009 bis 31.8.2010 in den Varianten mit Winterweizenanbau. Im Zeitraum 1.9.2009 bis 30.4.2010 wurde ein stärkerer Abbau von CH₄ in der Variante Kleegras gemessen; ein großer Unterschied wurde allerdings nicht festgestellt.

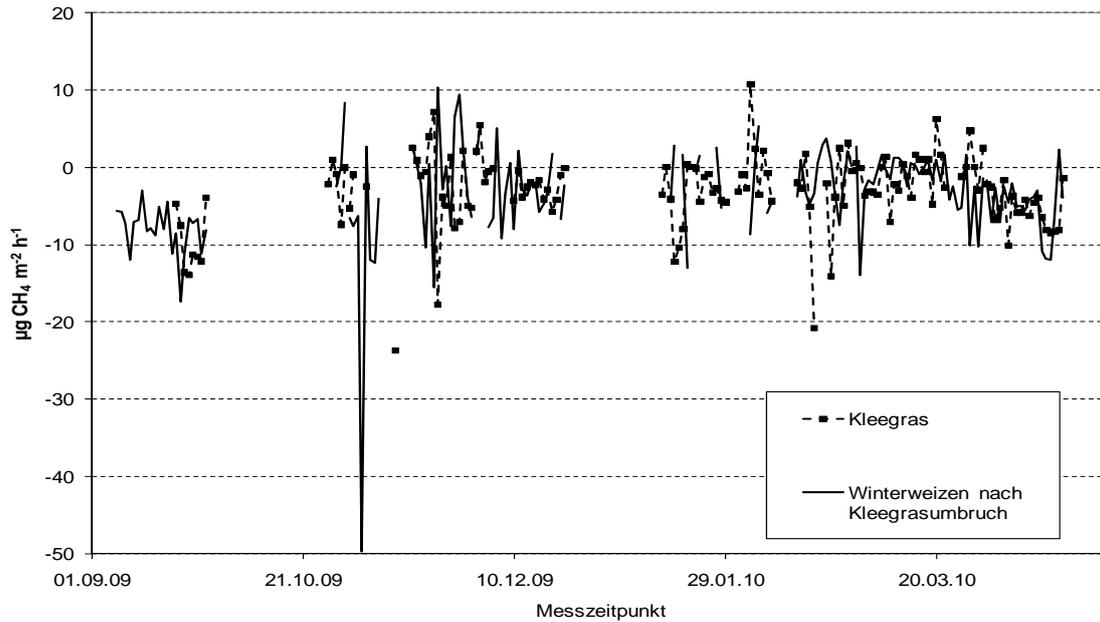


Abbildung 5.4-4: CH₄-Flüsse beim Anbau von Winterweizen und Klee gras vom 1.9.2009 bis 30.4.2010, Messungen im Energiepflanzen-Fruchtfolgeversuch Viehhausen.

Die kumulativen N₂O-, CH₄- und CO₂ eq -Emissionen zeigen, dass die Winterweizenanbausysteme während der Messperiode 1.5. bis 31.8.2009 eine deutlich höhere THG-Emissionen aufweisen als der schnittgenutzte Klee grasbestand (Tabelle 5.4-1). Dabei ist zu beachten, dass während dieses Messzeitraums das Klee gras nicht umgebrochen wurde.

Tabelle 5.4-1: Kumulative N₂O-, CH₄- und CO₂ eq -Emissionen im Zeitraum 1.5. bis 31.8.2009, Energiepflanzen-Fruchtfolgeversuch Viehhausen (Peter et al., 2011)

Treibhausgasfluss	Klee gras	Winterweizen, ohne Düngung	Winterweizen, mit Biogasgülle
N ₂ O (g ha ⁻¹)	504	1191	3040
CH ₄ (g ha ⁻¹)	-175	-287	-259
CO ₂ eq (kg ha ⁻¹)	146	348	899

Im Winterhalbjahr 2009/10 traten die in Tabelle 5.4-2 dargestellten kumulativen Emissionen auf. Der Klee grasumbruch mit anschließendem Winterweizenanbau führte zu höheren Emissionen als ein intakter Klee grasbestand.

Tabelle 5.4-2: Kumulative N₂O-, CH₄- und CO₂ eq -Emissionen im Zeitraum 1.9. bis 30.4.2010, Energiepflanzen-Fruchtfolgeversuch Viehhausen

Treibhausgasfluss	Kleegras	Winterweizen, nach Kleegrasumbruch
N ₂ O (g ha ⁻¹)	320	1516
CH ₄ (g ha ⁻¹)	-211	-170
CO ₂ eq (kg ha ⁻¹)	90	448

5.4.3.2 Ergebnisse der DNDC-Modellierung von THG-Flüssen im Vergleich zu Messwerten

Die Modellierung mit DNDC zeigt übereinstimmend mit den Messungen, dass Düngergaben (hier Biogäsgülle am 11.5.2009 und 13.8.2009) erhebliche N₂O-Emissionen hervorrufen können (Abbildung 5.4-5). Im Untersuchungszeitraum wies DNDC stärkere N₂O-Peaks mit kürzeren Emissionsphasen aus als die Messungen. Die modellierten N₂O-Emissionen fallen nach Emissionsereignissen sehr schnell unter die gemessenen Emissionen und beschreiben somit nur zum Teil das Emissionsgeschehen richtig. Die DNDC-Modellierung konnte nicht alle N₂O-Flüsse/Peaks vollständig abbilden und führte kumulativ zu geringen THG-Emissionen als die Messungen (Tabelle 5.4-3).

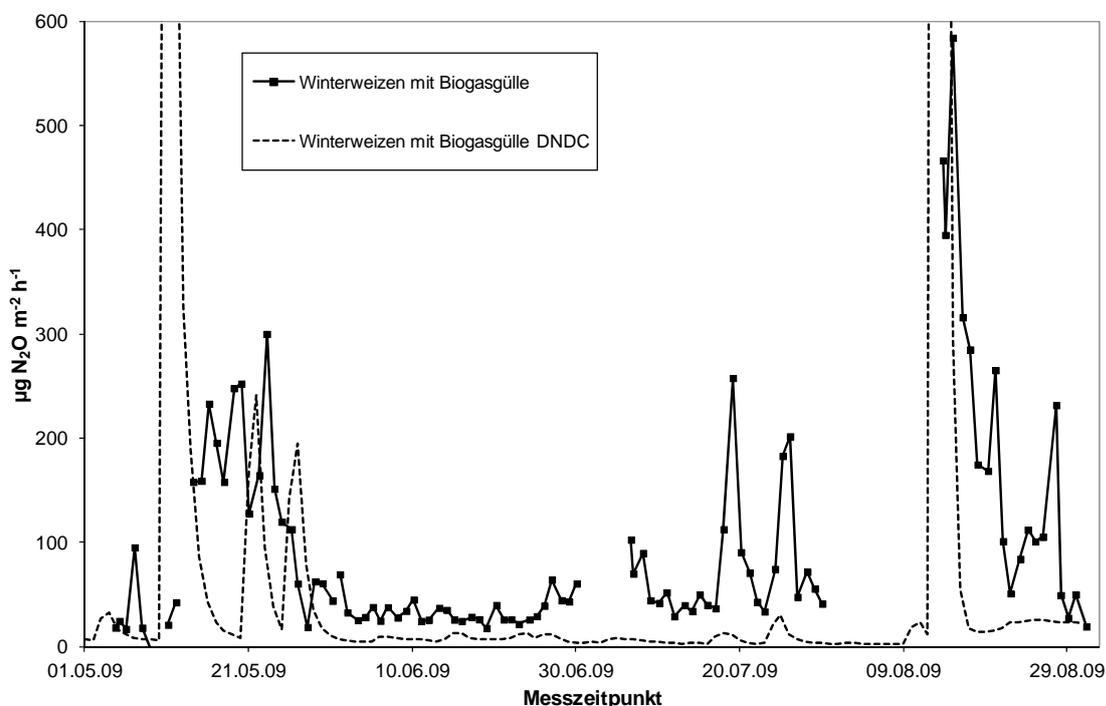


Abbildung 5.4-5: N₂O-Emissionen beim Anbau von Winterweizen vom 1.5.2009 bis 29.8.2009, Messungen und Modellierung mit DNDC im Energiepflanzen-Fruchtfolgeversuch Viehhausen, Biogäsgüldüngung: 11.5.2009 und 13.8.2009, 35 und 100 kg N ha⁻¹.

Beim Kleegrasanbau ohne N-Düngung hat DNDC unter den Versuchsbedingungen generell sehr geringe N_2O -Emissionen ausgewiesen (Beispiel in Abbildung 5.4-6). Die N_2O -Emissionsereignisse in wachsenden, schnittgenutzten Kleegrasbeständen konnten mit dem Modell nicht richtig nachvollzogen werden. Offenbar war das Modell DNDC in der hier verwendeten Version und Parametrisierung nicht in der Lage, den N-Eintrag der Leguminosen in den Boden während ihres Wachstums durch Wurzelexudate und absterbende Feinwurzeln hinreichend genau abzubilden und damit die sich aus der Umsetzung der stickstoffreichen Leguminosenbiomasse bzw. der N-Mineralisierung aus dem Boden-N-Pool ergebenden N-Flüsse zu beschreiben.

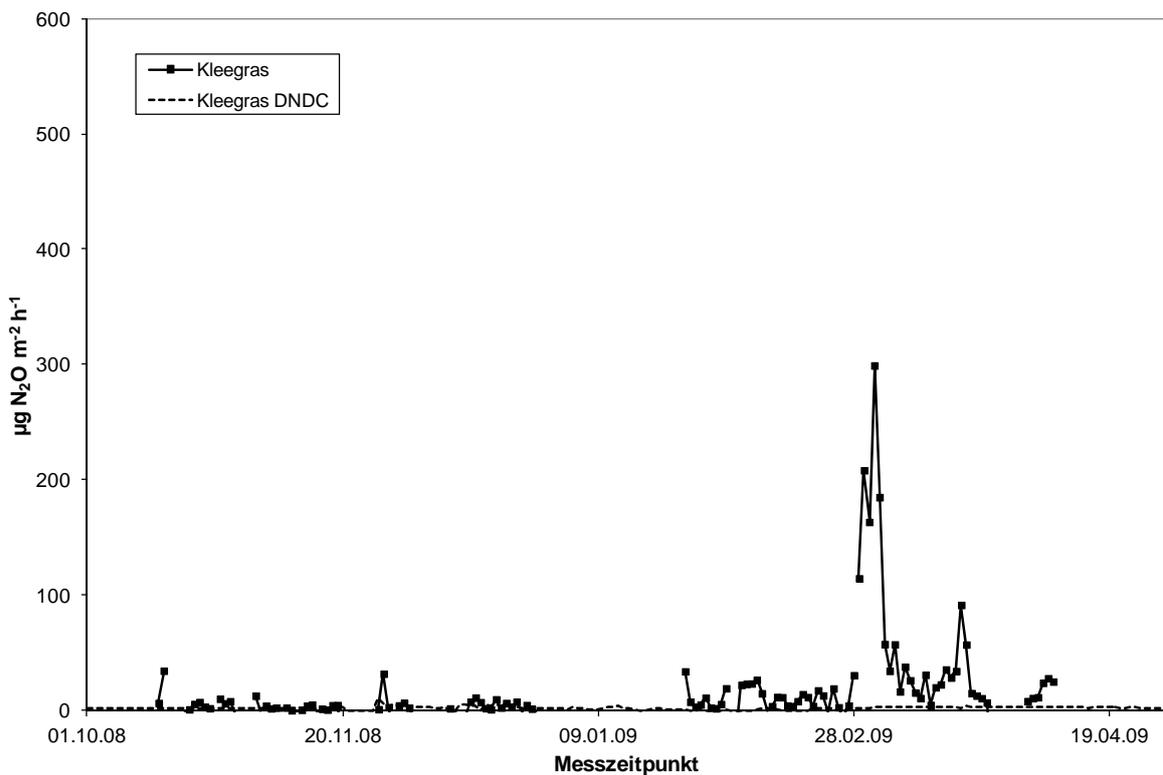


Abbildung 5.4-6: N_2O -Emissionen beim Anbau von Kleegras vom 1.10.2008 bis 19.4.2009, Messungen im und Modellierung mit DNDC im Energiepflanzen-Fruchtfolgeversuch Viehhausen.

Wie die Gegenüberstellung der gemessenen und mit DNDC modellierten Daten in Tabelle 5.4-3 zeigt, stimmen die Summen der N_2O -Emissionen in einigen Varianten und Versuchsabschnitten gut überein (z.B. Zeitraum 1.5.2009 bis 31.8.2009, Fruchtart Winterweizen mit Biogasgülle). Bei den ungedüngten Varianten kommt es hingegen zu einer deutlichen Diskrepanz zwischen Mess- und Modellwerte.

Tabelle 5.4-3: Vergleich der kumulierten N₂O-Messwerte und der N₂O-Modellwerte (g ha⁻¹)

Variante	Klee gras		Winterweizen nach Klee gras umbruch	
	ohne Biogasgülle	mit Biogasgülle	ohne Biogasgülle	mit Biogasgülle
1.10.2008 – 30.4.2008				
Gemessen	580		3380	3380
Modelliert mit DNDC	97		64	1340
1.5.2009 – 31.8.2009				
Gemessen	504	504	1191	3040
Modelliert mit DNDC	74	387	28	2732
1.9.2009 – 30.4.2010				
Gemessen	320		1516	1516
Modelliert mit DNDC	12		7	734
1.5.2010 – 30.6.2010				
Gemessen	795	795	1712	940
Modelliert mit DNDC	16	459	7	1143

In Tabelle 5.4-4 werden die gemessenen und modellierten N₂O-Emissionen mit berechneten Werten nach IPCC (1997) und Flessa et al. (2002b) verglichen. IPCC verwenden eine vereinfachte Formel, bei der 1,25% des aufgewendeten Stickstoffes, bestehend aus organischer und mineralischer Düngung, N₂-Fixierung durch Leguminosen, N-Deposition und Ernterückstände, in Form von N₂O-N ausgasen. Bei Untersuchungen an einem vergleichbaren Standort in Bayern wurden höhere N₂O-Emissionen gemessen (Flessa et al., 2002b) und ein höherer standortspezifischer Emissionsfaktor von 2,5 % abgeleitet.

Es zeigt sich, dass keiner der Emissionsfaktoren die gemessenen Werte widerspiegeln kann (Tabelle 5.4-4). Im Klee gras überschätzen sowohl IPCC als auch Flessa die N₂O Emissionen, im Winterweizen werden diese zum Teil unterschätzt. Eine mögliche Fehlerquelle liegt vermutlich am Bezugszeitraum der Modellierungen. Da im ökologischen Landbau ein Großteil der N-Zufuhr durch N₂-Fixierung der in der Fruchtfolge vorhandenen Leguminosen erfolgt, und davon anderen Kulturen profitieren (hier z.B. der Winterweizen nach Klee gras), ist es notwendig die Modellierungen auf eine Fruchtfolge auszuweiten.

Tabelle 5.4-4: Vergleich der kumulierten N₂O-Messwerte und der N₂O-Modellwerte mit berechneten Werte nach IPCC (1997) und mit einem standortspezifischem Emissionsfaktor nach Flessa et al. (2002b) (g ha⁻¹)

Variante	Kleegras		Winterweizen nach Kleegrasumbruch	
	ohne Biogasgülle	mit Biogasgülle	ohne Biogasgülle	mit Biogasgülle
1.10.2008 – 30.8.2009				
Gemessen	1084	1084	4571	6420
Modelliert mit DNDC	171	287	92	4072
Berechnet nach IPCC	2213	2213	295	979
Berechnet nach Flessa	4427	4427	589	1959
1.9.2009 – 30.6.2010				
Gemessen	1115	1115	3228	2456
Modelliert mit DNDC	28	471	14	1877
Berechnet nach IPCC	2229	2229	279	1592
Berechnet nach Flessa	4459	4459	557	3185

5.4.4 Diskussion

In unseren Untersuchungen wurden N₂O-Flüsse beim Kleegrasanbau analysiert, weil Kleegras für die Stickstoffversorgung im ökologischen Landbau von großer Bedeutung ist. In vielen ökologischen Marktfruchtssystemen stellt die N₂-Fixierleistung von Kleegras die wichtigste Stickstoffquelle dar. Nach Kleegrasumbruch, aber auch bei der Kleegrasnutzung (vor allem in Mulchsystemen) können beachtliche N-Mineralisationsschübe und N₂O-Verluste auftreten. In mehrjährigen Untersuchungen in Feldexperimenten der Versuchsstation Viehhausen zeigte sich, dass das Kleegrasmanagement (Umbruchtermin, Nutzung der Biomasse als Mulch oder Schnitt) die N₂O-Verluste ebenso wie die Jahreswitterung beeinflusst (Heuwinkel et al., 2005). Es traten kumulative N₂O-Emissionen in Höhe von 3,4 bis 8,5 kg N₂O-N ha⁻¹ a⁻¹ (\bar{x} 7,9 kg N₂O-N ha⁻¹ a⁻¹ bei Mulchnutzung, \bar{x} 5,0 kg N₂O-N ha⁻¹ a⁻¹ bei Schnittnutzung) auf (Heuwinkel et al., 2006).

Die zeitliche Dynamik der N₂O-Flüsse (Abbildung 5.4-1 und Abbildung 5.4-2) belegt, dass zur hinreichend genauen Erfassung der N₂O-Emissionen eine ausreichend hohe Messfrequenz (mehrmals täglich) erforderlich ist. Bei nur wöchentlichen Messungen besteht die Gefahr, dass die ausgeprägten N₂O-Peaks nicht erfasst und die N₂O-Verluste unterschätzt werden. Die von uns in wachsenden schnittgenutzten Kleegrasbeständen gemessenen N₂O-Emissionen lagen deutlich niedriger, allerdings traten bei nachfolgendem Winterweizen bereits im Winter nach dem Kleegrasumbruch erhebliche Emissionen auf. Bei der Bewertung der Wirkung einzelner Fruchtarten (z.B. Kleegras) müssen demnach nicht nur die gesamte Vegetationsperiode, sondern auch die Nachwirkung auf Folgefrüchte analysiert werden. Dies macht sehr lange Messzeiträume und kontinuierliche Messungen, auch im Winterhalbjahr, erforderlich (vgl. Abbildung 5.4-2 und Abbildung 5.4-6).

Die Boden- und Klimabedingungen im Tertiärhügelland (hohe Niederschläge, zur Verdichtung neigende Böden) führen zu einem hohen standortspezifischen N₂O-Verlustpotenzial (vgl. Flessa et al., 2002a). Mit dem Emissionsfaktor nach IPCC (1997) wurden die N₂O-Emissionen deutlich unterschätzt. Als

nachteilig erweist sich, dass weder Standortparameter noch Managementfaktoren (z.B. Art und Intensität der Bodenbearbeitung) in die Berechnungen eingehen.

Bei der Modellierung mit DNDC stellte sich heraus, dass das Modell nur bedingt geeignet ist, die N_2O -Flüsse an diesem Versuchsstandort unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus abzubilden. Bei konventioneller Bewirtschaftung oder Bewirtschaftung bei dem Stickstoff als Dünger (z.B. Biogasgülle) zugeführt wird, erzeugt DNDC mit den Messungen vergleichbare Werte. Werden Flächen nicht gedüngt und nur indirekt über die Pflanzenbestände (im Versuch Winterweizen und Klee gras) nur von der N-Versorgung durch die Fixierleistung der Leguminosen und die Boden-N-Nachlieferung durch Mineralisationsprozesse versorgt, zeigt DNDC zu geringe N_2O -Emissionen.

Das Modell berechnet zwar die Fixierleistung der Leguminosen (berechnet wurden $260 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), allerdings wird dies erst bei Umbruch dem Boden zugeführt und steht dann der Boden-N-Nachlieferung durch Mineralisationsprozesse zur Verfügung. Eine schon während des Wachstums der Leguminosen vorhandene N-Versorgung des Bodens (z.B. durch Wurzelexudate und absterbende Feinwurzeln) durch Klee gras wird von DNDC offenbar deutlich unterschätzt, so dass die N_2O -Flüsse für diesen Versuchsstandort nicht richtig abgebildet werden konnten.

Aus den Ergebnissen der Messungen, Modellierungen und Emissionsberechnungen ist zu schlussfolgern, dass die komplexen N_2O -Emissionsprozesse in Leguminosen basierten ökologischen Anbausystemen noch nicht genau abgebildet werden können. Das Modell DNDC ist für Anwendungen in den ökologischen Pilotbetrieben noch nicht geeignet, weil die bisher Wirkung von Klee gras nicht richtig erfasst wird. Mit den Emissionsfaktoren nach IPCC werden die N_2O -Emissionen unterschätzt und wesentliche Einflussgrößen (Fruchtfolge, Bodenbearbeitung) bleiben unberücksichtigt. Die beste Übereinstimmung mit den kumulierten N_2O -Messwerten wurde bei Berechnungen mit standortspezifischen Emissionsfaktoren erzielt. Dieser Ansatz setzt jedoch umfangreiche Messungen am Standort oder zumindest in der Region voraus. Soweit entsprechende regionsbezogene Emissionsfaktoren verfügbar sind, sollten sie in den Referenzbetrieben zur Abschätzung der N_2O -Emissionen verwendet werden.

5.4.5 Literatur

Burney JA, Davis SJ, Lobell DB (2010) Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. *PNAS* 107:12052-12057

Flessa H, Ruser R, Schilling R, Löffel N, Munch JC, Kaiser EA, Beese F (2002a) N₂O and CH₄ fluxes in potato fields: automated measurement, management effects and temporal variation. *Geoderma* 105:307-325

Flessa H, Ruser R, Dörsch P, Kamp T, Jimenez MA, Munch JC, Beese F (2002b) Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, N₂O) from farming systems in southern Germany. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 91:175-189

Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, Berntsen T, Betts R, Fahey DW, Haywood J, Lean J, Lowe DC, Myhre G, Nganga J, Prinn R, Raga G, Schulz M, Van Dorland R (2007) Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Heuwinkel H, Gutser R, Schmidhalter U (2005) Auswirkung einer Mulch- statt Schnittnutzung von Klee gras auf die N-Flüsse einer Fruchtfolge. *Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft* 6:71-79

IPCC (1997) Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC/OECD/IEA, IPCC, Geneva, Switzerland

Küstermann B, Kainz M, Hülsbergen K-J (2008) Modeling carbon cycles and estimation of greenhouse gas emissions from organic and conventional farming systems. *Renewable Agriculture and Food Systems* 23:38-52

Li C (2000) Modeling trace gas emissions from agriculture ecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58:259-276

Li C, Farahbakhshazad N, Jaynes DB, Dinnes DL, Sales W, McLaughlin D (2006) Modeling nitrate leaching with a biogeochemical model modified based on observations in a row-crop field in Iowa. *Ecological Modeling* 196:116-130

Li C, Folking S, Folking TA (1992) A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research* 97:9759-9776

Li C, Folking S, Harris RC (1994a) Modeling carbon geochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochemical Cycles* 8:238-254

Li C, Folking S, Harris RC, Terry RE (1994b) Modeling nitrous oxide emissions from agriculture: A Florida case study. *Chemosphere* 28:1401-1415

Peter J, Schmid, H. Schilling, R. Munch, JC, Hülsbergen K-J (2011) Treibhausgasflüsse beim Anbau von Winterweizen und Klee gras. In: [Hrsg.]: Leithold G, Becker K, Brock C, Fischinger S, Spiegel

A-K, Spory K, Wilbois K-P, Williges U: Beiträge zur 11. Wissenschaftstagung im Ökologischen Landbau, 147-150

Reents HJ, Kimmelmann S, Kainz M, Hülsbergen K-J (2011) Biogas-Fruchtfolgeversuch Viehhausen - Versuchsanlage und Ertragseffekte auf Winterweizen. In: [Hrsg.]: Leithold G, Becker K, Brock C, Fischinger S, Spiegel A-K, Spory K, Wilbois K-P, Williges U: Beiträge zur 11. Wissenschaftstagung im Ökologischen Landbau, 76-77

Szyska BM (2009) Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse des prozessorientierten Modells DNDC zur Schätzung klimarelevanter Treibhausgasemissionen aus der Pflanzenproduktion. Promotionsschrift Justus-Liebig-Universität Gießen

Zhang Y, Li C, Zhou X, Moore B (2002) A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture. *Ecological Modeling* 151, 1:75-108