



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
GÖTTINGEN

Emissionsminderung (NH₃ und N₂O) durch Unterfußinjektion von Wirtschaftsdüngern



Ein Projekt der Georg-August-Universität Göttingen,
Department für Nutzwissenschaften,
Abteilung Verfahrenstechnik in der Veredelungswirtschaft

Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück

Aktenzeichen: 30741

Endbericht

Berichtszeitraum: 01.04.2013 – 31.03.2015
Projektbeginn: 01.04.2013, Laufzeit: 24 Monate

Berichtersteller: Msc. agr. Maximilian Severin
(Unterstützt durch: Prof. Dr. Herman Van den Weghe)

gefördert durch



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Göttingen, im März 2015

Zusammenfassung

Im Projekt „Emissionsminderung (NH₃ und N₂O) durch Unterfußinjektion von Wirtschaftsdüngern“ (AZ 30741) wurde untersucht, wie durch die Anwendung einer innovativen Applikationstechnik die Nährstoffnutzungseffizienz im Maisanbau gesteigert und die Emissionen an Ammoniak und Distickstoffoxid minimiert werden können. Eine hohe Nährstoffeffizienz verbunden mit einem bedarfsorientierten Nährstoffinput stellt aus Sicht der Pflanzenernährung, des Umweltschutzes verbunden mit gesetzlichen Auflagen und aus betriebswirtschaftlicher Sicht eine wichtige Grundlage für eine nachhaltige Landwirtschaft dar.

In diesem Zusammenhang ist die Studie folgenden Zielen nachgegangen:

- Welchen Einfluss haben der Boden und der Standort auf die Freisetzung von NH₃- und N₂O-Emissionen bei der Gülle und Gärrestapplikation?
- Mit welcher Applikationstechnik können die in Gülle und Gärrest enthaltenen Pflanzennährstoffe verlustarm, bezüglich NH₃- und N₂O-Emissionen ausgebracht werden?
- In wie weit kann ein Nitrifikationshemmer zusätzlich zur Applikationstechnik die Nährstoffeffizienz steigern?

Im Laborversuch wurde die Injektion (in 15 und 20 cm Tiefe) von Gülle und Gärrest (150 kg N ha⁻¹) im Vergleich zur Schleppschlauchausbringung mit sofortiger Einarbeitung auf unterschiedlichen Böden untersucht. Die Injektion von Gülle und Gärrest in größere Tiefen hat auf einem Moorboden zu signifikant erhöhten N₂O-Emissionen geführt. Auf einem lehmigen Sand sind derartige Unterschiede nur in geringem Maße zu erkennen. Der Einsatz des Nitrifikationshemmers DMPP hat im Feldversuch zu reduzierten N₂O-Emissionen geführt.

Zur möglichen Steigerung der Nährstoffausnutzungseffizienz wurde im Feldversuch mit Mais ein Premaister (Unterfußinjektor, Firma Kotte Landtechnik) so modifiziert, dass in zwei Reihen übereinander (10 und 20 cm) Gülle ausgebracht wurde, um auf die Nährstoffbedürfnisse von Mais in mehreren Wachstumsphasen einzugehen. Zwischen den unterschiedlichen Varianten im Feldversuch [Schleppschlauch mit sofortiger Einarbeitung (Gülle und Gärrest), Injektion 15 cm (Gülle und Gärrest), Injektion 10 und 20 cm (Gülle), Injektion 15 cm mit DMPP (Gülle) und Kontrolle ohne

Düngung und Bodenbearbeitung] konnten hinsichtlich der N_2O Freisetzung keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Allerdings ergeben sich für die Variante mit dem modifizierten Premaister tendenziell die höchsten N_2O -Emissionen, da in zwei Tiefen Nährstoffe abgelegt werden und sich „anoxic hot spots“ bilden, die die Nitrifikation und Denitrifikation fördern (Flessa und Beese 2000). Die Variante mit dem Einsatz von DMPP reduziert die N_2O -Emissionen gegenüber allen anderen Varianten mit Ausnahme der ungedüngten und unbearbeiteten Kontrolle. Die NH_3 -Messungen zeigen, dass bei sofortiger Einarbeitung oder Injektion keine messbaren NH_3 -Emissionen freigesetzt werden.

Die Ammoniumgehalte im Boden waren im Feldversuch nach Versuchsende in den Varianten mit DMPP Zusatz am höchsten. Somit konnte der Nitrifikationshemmer die Umwandlung von Ammonium zu Nitrat verlangsamen und gleichzeitig die Freisetzung von N_2O -Emissionen reduzieren. Bezüglich der Erträge und Erntequalitäten konnten keine Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden. Aus ökonomischer Sichtweise konnte herausgearbeitet werden, dass die Injektion von Gülle und Gärrest preiswerter ist als die Schleppschlauchapplikation mit sofortiger Einarbeitung.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es mit mehreren Ansätzen möglich ist, die Nährstoffeffizienz durch veränderte Applikationstechnik und Nitrifikationshemmer zu steigern. Die Untersuchungen zeigen auch deutlich, dass eine reduzierte Nährstoffgabe auf hoch mit Nährstoffen versorgten Standorten keinen nennenswerten Einfluss auf die Ertragsbildung hat. In weiteren Feld- und Gefäßversuchen müssten die hier erzielten Ergebnisse auf die Allgemeingültigkeit für andere Randbedingungen (Bodentypen, Nährstoffversorgungsstufen, etc.) untersucht werden.

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	30741	Referat	34	Fördersumme	269.648,00€
Antragstitel		Emissionsminderung (NH₃ und N₂O) durch Unterfußinjektion von Wirtschaftsdüngern			
Stichworte					
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
36	01.04.2013				
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger		Georg-August-Universität Göttingen Department für Nutztierwissenschaften Abteilung Verfahrenstechnik in der Veredelungswirtschaft Herr Prof. Dr. Herman Van den Weghe Universitätsstraße 7 49377 Vechta		Tel 04441/15435 Fax 04441/15448	
				Projektleitung Prof. Dr. Herman Van den Weghe	
				Bearbeiter Dr. Felix Garlipp	
Kooperationspartner		Kotte Landtechnik GmbH und Co. KG Herr Dr. Stefan Kotte Malgartner Straße 10 - 12 49597 Rieste			

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Das Gesamtziel des zur Förderung vorgeschlagenen Projektes ist die signifikante Reduktion von klima- und umweltrelevanten Emissionen (N₂O und NH₃) bei der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern zu Mais durch ein neuentwickeltes System der Unterfußinjektion. Dazu werden Emissionsmessungen auf zwei Ackerstandorten (Lehmboden [AZ 50], Sandboden [AZ 20]) mit zwei unterschiedlichen Wirtschaftsdüngern (Mastschweinegülle, Gärrest) bei Ausbringung mit dem neuentwickelten Unterfußinjektor durchgeführt. Als Referenzsystem dient die Ausbringung mit dem in der Praxis eingeführten Schleppschlauchverfahren. Begleitend zu den Feldversuchen werden Gefäßversuche unter standardisierten und kontrollierten Umweltbedingungen vorgenommen. Bodenkundliche und pflanzenbauliche Untersuchungen werden parallel zu den Messungen der gasförmigen Emissionen angelegt. Ziel ist es hier, die Einflüsse des Bodens auf die Emissionen und die Erträge und Qualitäten des angebauten Maises und die vielfältigen Wechselwirkungen zu ermitteln. Dies ist zu einer umfassenden Beurteilung von Gülleausbringungssystemen und für die Abbildung der Nährstoffströme unerlässlich. Systematisch sollen sowohl die ökologischen als auch ökonomischen Aspekte der innovativen Technik erarbeitet und geprüft werden. Durch die Untersuchungen soll zudem der Stand der Technik hinsichtlich der Gülleapplikation optimiert werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Prozessgrundlagen werden an der Abteilung für Verfahrenstechnik in der Veredelungswirtschaft (Standort Vechta) erarbeitet. In Technikumsversuchen, die der Durchführung der Feldversuche vorgeschaltet werden, ist es das Ziel, unter standardisierten und kontrollierten Umweltbedingungen die optimale Injektionstiefe für die Gülle bzw. den Gärrest zu bestimmen. Dafür werden 84 Mikrokosmen ($d = 30$ cm; Länge = 50 cm) gebaut. Auf diese Mikrokosmen werden Stahlhülsen aufgesetzt und anschließend eine ungestörte Bodenprobe gewonnen. Nach einer Inkubationszeit von 14 Tagen werden die gefüllten Mikrokosmen unter Variation von „Ausbringungsverfahren“ (Premaister Injektion, Schleppschlauch, Kontrolle) „Injektionstiefe“ (15 cm; 20 cm), „Boden“ (Lehm; Sand; anmooriger Lehm) und „Substrat“ (Gülle; Gärrest) hinsichtlich der freigesetzten Emissionen NH_3 und N_2O untersucht ($n = 4$; Messzeitraum 14 Tage für einen Boden). Die Probengewinnung erfolgt in einem Durchflusssystem.

Der sich anschließende Feldversuch sieht folgende Versuchsparameter vor:

- Schleppschlauchausbringung (Kotte Landtechnik) mit Gülle bzw. Gärrest auf Parzelle I bzw. III mit Eingrubbern innerhalb von 4 Stunden und direkter Einsaat
- Gleiche Gülle bzw. gleicher Gärrest (identische Technik) auf Parzelle II bzw. IV mit dem PreMaister (12 m = 16 Reihen) zum gleichen Zeitpunkt mit direkter Einsaat (30 m^3/ha)
- Direkt nach dem Maislegen erfolgt der Aufbau der Messtechnik. Dafür werden auf jeder Parzelle drei Messkammern (3 Wiederholungen) errichtet (12 Kammern = 0,5 x 0,5 x 0,3 cm). Eine Messkammer überdeckt zwei Reihen des PreMaisters bzw. 0.25 m^2 des Bodens.
- Aufgrund der Tatsache, dass eine Verdichtung Milieuveränderungen im Boden bewirkt, was eine Veränderung der Emissionsgenerierung nach sich ziehen könnte, wird dieser Effekt mit erfasst. Dazu werden jeweils zwei Messkammern auf der mit dem PreMaister bearbeiteten Parzellen II und IV (orange dargestellt) über einer verdichteten Reihe installiert (4 Messkammern 75x1.50x0.5 m).
- Um mögliche Verschiebungen im Boden zu verhindern, wird unter jede Kammer ein Rahmen (Tiefe 10 cm) eingeschlagen, welcher bündig mit dem Bodenhorizont abschließt. Auf den Rahmen wird die Messkammer gelegt (Gummidichtung). Zum Luftabschluss werden beide Elemente mit Schnellverschlüssen verbunden.
- Auf dem Versuchsstandort werden kontinuierlich Bodentemperatur und Bodenwassergehalt gemessen
- Die Temperaturen unter den Messhauben werden kontinuierlich gemessen
- Jede Kammer ist mit einem Anschluss für die Gasmesstechnik, sowie mit jeweils 2 Sensoren zur Bestimmung der Bodentemperaturen und -feuchten ausgestattet, um deren Einfluss auf die Ammoniak- und Lachgasemissionen beurteilen zu können.
- Für die Gasmessungen werden die Kammern in 4 Perioden (07:00-08:00 Uhr, 12:00-13:00 Uhr, 17:00-18:00 Uhr, 22:00-23:00 Uhr) pro Tag für jeweils zwei Stunden mit dem Bodenanker verbunden (closed chamber).
- Innerhalb der einen Stunde werden 4 Gasproben aus jeder Kammer gewonnen (0, 20, 40, 60 min nach Haubenschluss). Das Aufkonzentrieren der Gase in einer geschlossenen Kammer wird in der Literatur vor allem für Lachgasmessungen empfohlen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	III
1. Einleitung	1
1.1 Hintergründe und Ziele des Projektes	1
1.2 Projektbeteiligte.....	2
1.3 Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)	3
2. Maßnahmen und Arbeitsschritte	6
2.1 Arbeitspaket AP1 – Projektkoordination.....	6
2.2 Arbeitspaket AP2 – Grundlagen zur Entstehung von Emissionen (NH ₃ ; N ₂ O) bei der Unterfußinjektion in Technikumsversuchen	9
2.3 Arbeitspaket AP3 und AP5 – Entstehung von Emissionen (NH ₃ ; N ₂ O) bei der Unterfußinjektion und Einfluss der Applikationstechnik auf Ertrag und Erntequalität im Feldversuch	28
2.4 Arbeitspaket AP4 - Datenaufbereitung aus Technikums- und Feldversuch.....	42
2.5 Arbeitspaket AP6 und AP7 - Entstehung von Emissionen (NH ₃ ; N ₂ O) bei der Unterfußinjektion und Einfluss der Applikationstechnik auf Ertrag und Erntequalität im Feldversuch	42
2.6 Arbeitspaket AP8 - Verfahrensbewertung	42
3. Diskussion	43
3.1 Versuchsergebnisse Laborversuch.....	43
3.2 Versuchsergebnisse Feldversuch	44
3.3 Evaluierung methodischer Versuchsansätze	47
3.4 Praxisnaher Ansatz zur ökonomischen Bewertung der Verfahren	49
3.5 Verfahrensbewertung.....	55
4. Öffentlichkeitsarbeit.....	59
5. Fazit Projektverlauf	60
6. Literatur	60
7. Anhang/Anlagen	66
7.1 Kooperationsvertrag TI-AK Projektbeschreibung für Projekt unter Beteiligung Thünen-Institut für AgrarklimaschutzTI	66
7.2 Bilder von der Versuchsdurchführung	82

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Standorte in Rieste, Luftbild, 1 = Plaggic Anthrosol, 2 = Gleysol, 3 = Histosol.....	10
Abbildung 2: Standorte in Rieste, Bodenkarte, 1 = Plaggic Anthrosol, 2 = Gleysol, 3 = Histosol.....	11
Abbildung 3: Probenahme von Bodensäulen im Stahlzylinder mit einem Radlader	12
Abbildung 4: Bodensäule im Mikrokosmengerüst in der Klimakammer	12
Abbildung 5: Stempelsystem zur Bearbeitung von Bodensäulen	14
Abbildung 6: Mikrokosmengerüst	14
Abbildung 7: Injektionsfurche in der Bodensäule	16
Abbildung 8: Mikrokosmenanlage mit Bodensäulen, Großansicht.....	17
Abbildung 9: Glasvials für N ₂ O, CH ₄ und CO ₂ sowie ein großes Vial als Säurefalle für NH ₃	17
Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der N ₂ O-Flüsse bei einer unbehandelten Kontrolle (control), der Injektion (I15 und I20) und bei der Schleppschlauchausbringung (TH+I 5 cm) von Gülle (PS) und Gärrest (PSD) auf drei Standorten (Gleysol, Plaggic Anthrosol und Histosol)	19
Abbildung 11: Mittelwerte der täglichen N ₂ O-Emissionen (Mittelwert und Standardabweichung) bei einer unbehandelten Kontrolle (control), der Injektion (I15 und I20) und bei der Schleppschlauchausbringung (TH+I 5 cm) von Gülle (PS) und Gärrest (PSD) auf drei Standorten (Gleysol, Plaggic Anthrosol und Histosol) über einen Zeitraum von 37 Tagen.....	20
Abbildung 12: Zeitlicher Verlauf der CH ₄ -Flüsse bei einer unbehandelten Kontrolle (control), der Injektion (I15 und I20) und bei der Schleppschlauchausbringung (TH+I 5 cm) von Gülle (PS) und Gärrest (PSD) auf drei Standorten (Gleysol, Plaggic Anthrosol und Histosol).....	21
Abbildung 13: Mittelwerte der täglichen CH ₄ -Emissionen (Mittelwert und Standardabweichung) bei einer unbehandelten Kontrolle (control), der Injektion (I15 und I20) und bei der Schleppschlauchausbringung (TH+I 5 cm) von Gülle (PS) und Gärrest (PSD) auf drei Standorten (Gleysol, Plaggic Anthrosol und Histosol) über einen Zeitraum von 37 Tagen.....	22
Abbildung 14: Zeitlicher Verlauf der CO ₂ -Flüsse bei einer unbehandelten Kontrolle (control), der Injektion (I15 und I20) und bei der Schleppschlauchausbringung (TH+I 5 cm) von Gülle (PS) und Gärrest (PSD) auf drei Standorten (Gleysol, Plaggic Anthrosol und Histosol)	23
Abbildung 15: Mittelwerte der täglichen CO ₂ -Emissionen (Mittelwert und Standardabweichung) bei einer unbehandelten Kontrolle (control), der Injektion (I15 und I20) und bei der Schleppschlauchausbringung (TH+I 5 cm) von Gülle (PS) und Gärrest (PSD) auf drei Standorten (Gleysol, Plaggic Anthrosol und Histosol) über einen Zeitraum von 37 Tagen.....	24

Abbildung 16: Der modifizierte „Kotte Premaister“ legt in zwei Tiefen (10 und 20 cm) übereinander zwei Güllebänder ab und soll somit die Nährstoffversorgung der Maispflanze in zwei Wachstumsphasen sicherstellen.....	30
Abbildung 17: Die Ablage der Gülle erfolgt in zwei Tiefen (10 und 20 cm) übereinander .	31
Abbildung 18: Die mit dem Schleppschlauch ausgebrachten Substrate wurden sofort nach der Ausbringung eingearbeitet.....	32
Abbildung 19: Dräger Tube Methode modifiziert für Maisreihenversuche	33
Abbildung 20: Die N ₂ O-Probenahme erfolgt mit der Closed Chamber Methode	34
Abbildung 21: N ₂ O-Freisetzung im Zeitverlauf von der Substratausbringung bis zu Tag 68 nach Versuchsanlage.....	36
Abbildung 22: CO ₂ -Emissionen über den Zeitraum von 68 Tagen auf dem Standort Rieste.....	37
Abbildung 23: CH ₄ -Emissionen über einen Zeitraum von 68 Tagen auf dem Standort Rieste.....	37
Abbildung 24: Niederschlag im Tagesdurchschnitt (mm) am Standort Rieste	38
Abbildung 25: Temperatur im Tagesdurchschnitt (°C) am Standort Rieste.....	38
Abbildung 26: Maiserträge Frischmasse und Trockenmasse aller Varianten im Überblick	39
Abbildung 27: Netto-Energie-Laktation (NEL) Gehalte der unterschiedlichen Varianten im Überblick	40
Abbildung 28: Rohfasergehalte der unterschiedlichen Varianten im Überblick.....	40
Abbildung 29: Stärkegehalte der unterschiedlichen Varianten im Überblick	41
Abbildung 30: Rohproteingehalte der unterschiedlichen Varianten im Überblick	41
Abbildung 31: N _{min} -Gehalte aller Versuchsvarianten direkt nach der Ernte.....	42
Abbildung 32: Gesamt Stickstoffdepositionen in Niedersachsen (Bultjes et al. 2011)	55
Abbildung 33: Stickstoffeinträge pro ha/Jahr in Niedersachsen (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klima 2013).....	56
Abbildung 34: Design der Feldversuche für einen Boden.....	75
Abbildung 35: Probenahme von Bodensäulen mit einem Stechzylinder	82
Abbildung 36: Unbearbeitete Bodensäulen direkt nach der Probenahme	83
Abbildung 37: Bodensäule Gülle, die in die Bodenfurche gespritzt wurde.....	83
Abbildung 38: Mikrokosmenanlage mit Bodensäulen, Detailansicht.....	84
Abbildung 39: Mikrokosmenanlage mit Bodensäulen.....	85
Abbildung 40: Ventile zum Einstellen der Gasflüsse	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ursprünglicher Finanzierungsplan der Georg-August-Universität Göttingen	4
Tabelle 2: Ursprünglicher Finanzierungsplan der Firma Kotte Landtechnik	5
Tabelle 3: Standortbeschreibung, C- und N-Gehalte, Nitrat- und Ammoniumgehalte, Bodendichte und Bodenwassergehalt von drei untersuchten Böden	13
Tabelle 4: Übersicht über die verwendeten Wirtschaftsdünger	16
Tabelle 5: C- und N-Gehalte sowie C/N-Verhältnisse des Standorts Gleysol mit injiziertem und mit Schleppschlauch ausgebrachter und eingearbeitetem Wirtschaftsdünger im Vergleich zu einer unbearbeiteten Variante (I15 = Injektion 15 cm, I20 = Injektion 20 cm, TH+I 5 cm = Schleppschlauch)	25
Tabelle 6: C- und N-Gehalte sowie C/N-Verhältnisse des Standorts Histosol mit injiziertem und mit Schleppschlauch ausgebrachter und eingearbeitetem Wirtschaftsdünger im Vergleich zu einer unbearbeiteten Variante (I15 = Injektion 15 cm, I20 = Injektion 20 cm, TH+I 5 cm = Schleppschlauch)	25
Tabelle 7: C- und N-Gehalte sowie C/N-Verhältnisse des Standorts Plaggic Anthrosol mit injiziertem und mit Schleppschlauch ausgebrachter und eingearbeitetem Wirtschaftsdünger im Vergleich zu einer unbearbeiteten Variante (I15 = Injektion 15 cm, I20 = Injektion 20 cm, TH+I 5 cm = Schleppschlauch).....	26
Tabelle 8: N _{min} -Gehalte (0-30 cm) Plaggic Anthrosol mit Gülle und Gärrest Injektion 15 und 20 cm, Schleppschlauchausbringung mit Einarbeitung, sowie einer unbehandelten Variante vor und nach Düngerapplikation (I15 = Injektion 15 cm, I20 = Injektion 20 cm, TH+I 5 cm = Schleppschlauch)	27
Tabelle 9: N _{min} -Gehalte (0-30 cm) Gleysol mit Gülle und Gärrest Injektion 15 und 20 cm, Schleppschlauchausbringung mit Einarbeitung, sowie einer unbehandelten Variante vor und nach Düngerapplikation (I15 = Injektion 15 cm, I20 = Injektion 20 cm, TH+I 5 cm = Schleppschlauch)	27
Tabelle 10: N _{min} -Gehalte (0-30 cm) Histosol mit Gülle und Gärrest Injektion 15 und 20 cm, Schleppschlauchausbringung mit Einarbeitung, sowie einer unbehandelten Variante vor und nach Düngerapplikation (I15 = Injektion 15 cm, I20 = Injektion 20 cm, TH+I 5 cm = Schleppschlauch)	28
Tabelle 11: Versuchsvarianten im Überblick.....	29
Tabelle 12: Zeitpunkte der N ₂ O-Probenahme.....	35
Tabelle 13: Verfahrenskosten Schleppschlauch und Injektion (Kosten nach Janssen 2014).....	51
Tabelle 14: Monetäre Bedeutung von NH ₃ -Verlusten verschiedener Gülleapplikationsverfahren	51
Tabelle 15: Vorzüglichkeit der Injektion gegenüber dem Schleppschlauch mit sofortiger Einarbeitung	52
Tabelle 16: Vergleich der Verfahrenskosten für die Düngemittelausbringung	

zwischen der mineralischen und der organischen Düngung.....	53
Tabelle 17: Ausgebrachte Nährstoffmenge kg/ha] bei der Ausbringung von 1 und 30 m ³ Mastschweine Gülle	53
Tabelle 18: Berechnung der mineralischen Düngung bezogen auf 30 m ³ /ha Nährstoffe aus der Gülleausbringung	54
Tabelle 19: Probenumfang.....	79

1. Einleitung

Im Folgenden werden die Hintergründe und Ziele des Projekts, die Projektbeteiligten, sowie die Förderung durch die DBU im Einzelnen dargestellt.

1.1 Hintergründe und Ziele des Projektes

Durch landwirtschaftliche Produktion bedingte gasförmige Emissionen sind nicht vollständig zu vermeiden und insbesondere bodenbürtige Emissionen sind in Abhängigkeit von den herrschenden Umweltbedingungen in ihrer Höhe sehr variabel. Nahezu 50 % aller Ammoniakemissionen (NH_3) aus der Landwirtschaft entstehen bei bzw. nach der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern (NIR 2010 und UBA 2011). Gleichzeitig bietet dieser Faktor in Hinblick auf eine mögliche Ammoniakreduktion als auch auf eine nachhaltige und kurzfristige Umsetzbarkeit das größte Minderungspotential.

In Bezug auf die Ressourcenschonung (Energie und Rohstoffe) ist eine mögliche Substitution von Mineraldüngern durch Wirtschaftsdünger insbesondere im Maisanbau anzustreben. Neben Ammoniak (NH_3) trägt insbesondere Lachgas (N_2O) erheblich zum Klimawandel bei. N_2O zählt zu den wichtigsten Bilanzgrößen von Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft (Thorman 2011). Eine hohe Verfügbarkeit von organischem Kohlenstoff und mineralischem Stickstoff, in Verbindung mit einem gesteigerten mikrobiellen O_2 -Verbrauch, begünstigt die N_2O -Bildung (Ruser 2008). Insbesondere sind Maßnahmen zur Steigerung der N-Effizienz und zur Reduktion von N-Überschüssen auf betrieblicher Ebene von Bedeutung. Die wichtigsten Ansatzpunkte zur Reduktion von stickstoffhaltigen Emissionen in der landwirtschaftlichen Tierhaltung sind die Reduktion der Ausbringungsverluste des Wirtschaftsdüngers und die Optimierung des Wirtschaftsdüngermanagements. Durch die Ausbringung mit Schleppschläuchen können die NH_3 -Emissionen um 30 % bei Schweinegülle auf unbewachsenen Böden (auf bewachsenem Acker = 50 % Schweinegülle) gegenüber Prallverteilern (noch gängiges Verfahren) reduziert werden (Döhler und Horlacher 2010). Auch für N_2O gibt es Hinweise, dass die Ausbringungstechniken einen großen Einfluss auf die Höhe der entstehenden Emission haben (Flessa et al. 2012). Eine signifikant höhere Emissionsminderung gegenüber dem Schleppschlauchverfahren kann

durch die Injektion von Wirtschaftsdüngern direkt in den Boden (Unterfuß) erwartet werden.

Dementsprechend ist es das Ziel des geförderten Projektes, eine signifikante Reduktion von klima- und umweltrelevanten Emissionen (N_2O ; NH_3) bei der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern in Maiskulturen durch ein neuentwickeltes System der Unterfußinjektion zu untersuchen. Dazu werden, nach entsprechenden Technikums- und Laborversuchen unter standardisierten und kontrollierten Umweltbedingungen, Emissionsmessungen auf einem Ackerstandort (Sandboden in Nordwestdeutschland) mit zwei unterschiedlichen Wirtschaftsdüngern (Mastschweinegülle, Gärrest) bei Ausbringung mit einem neuentwickelten Unterfußinjektor durchgeführt. Als Referenzsystem dient die Ausbringung mit dem in der Praxis üblichen Schleppschlauchverfahren. Bodenkundliche und pflanzenbauliche Untersuchungen werden parallel zu den Messungen der gasförmigen Emissionen durchgeführt.

Zusammengefasst betrachtet, ist es das Hauptziel dieser Studie, ein nachhaltiges, emissionsminderndes und ressourcenschonendes Verfahren der Wirtschaftsdüngerbringung für die Praxis zu erarbeiten, um die Umwelt in Bezug auf klima- und umweltrelevante Emissionen (N_2O ; NH_3) zu entlasten.

1.2 Projektbeteiligte

Die **Projektleitung** dieses Projektes trägt Prof. Dr. Herman Van den Weghe, Leiter der **Abteilung Verfahrenstechnik in der Veredlungswirtschaft, Department für Nutzwissenschaften Georg-August-Universität Göttingen**. Mit dem aktiven Ausscheiden aus dem Dienst zum 30.09.2014 ist Prof. Dr. Van den Weghe weiterhin für die wissenschaftliche Betreuung des Projektes verantwortlich. Die organisatorische Projektleitung obliegt ab dem 01.10.2014 bis zum Projektende Prof. Dr. Hessel. Die Projektkoordination wird von Herrn Dr. F. Garlipp aus der oben genannten Abteilung bis zum 30.09.2014 durchgeführt. Die wissenschaftliche Durchführung des Projektes wird von Herrn Msc. agr. M. Severin gewährleistet.

Die **Firma Kotte Landtechnik** (Kotte Landtechnik, Malgarterstraße 36, 49597 Rieste) ist Projektpartner der Georg-August-Universität Göttingen in dem Projekt „Emissionsminderung (NH₃ und N₂O) durch Unterfußinjektion von Wirtschaftsdüngern“ und wird in diesem Projekt durch die DBU finanziell gefördert. Die Firma Kotte Landtechnik ist in Deutschland Marktführer beim Bau von Technik zur Ausbringung von flüssigen Wirtschaftsdüngern und ist in einer Region mit hoch verdichteter Nutztierhaltung innerhalb Europas angesiedelt. In Zusammenarbeit mit der Firma Kotte Landtechnik sind in den Feldversuchen (ab März 2014) die Injektionstechnik gegenüber der praxisüblichen Schleppschlauchausbringung in verschiedenen Varianten untersucht worden. Im Anschluss an die Untersuchungen sollen Ausbringungsgeräte durch den Erkenntnisgewinn modifiziert und im Hinblick auf die Freisetzung von NH₃ und N₂O effizienter gestaltet werden.

Das **Thünen Institut in Braunschweig, Fachgebiet Agrarklimaschutz (TI-AK)**, vertreten durch Prof. Dr. H. Flessa, konnte im laufenden Projekt als Kooperationspartner gewonnen werden. Mit diesem Kooperationspartner wurde es möglich, die geplanten Laborversuche um verschiedene Fragestellungen zu erweitern. Für die sich anschließenden Feldversuche hat das TI-AK Messhauben für die N₂O Beprobung und wissenschaftliches Knowhow bereitgestellt. Die Analytik der Gasproben wurde im TI-AK durchgeführt.

Die **Hochschule Osnabrück, Fakultät für Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur** vertreten durch Prof. Dr. D. Trautz und Prof. Dr. H.-W. Olf arbeitet in einem ähnlichen durch die DBU geförderten Projekt. Hierdurch ergaben sich nach Absprache durch die DBU gemeinsame Schnittstellen hinsichtlich der Feldversuche im Jahr 2014.

1.3 Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Die Förderung durch die DBU beläuft sich in diesem Projekt auf insgesamt 269.648.00 € (Georg-August-Universität Göttingen und Firma Kotte). Im Einzelnen sieht die Förderung wie folgt aus:

Tabelle 1: Ursprünglicher Finanzierungsplan der Georg-August-Universität Göttingen

Kosten	Kostenposition	Betrag [€]
Personalkosten	ein/-e wissenschaftliche/-r Mitarbeiter/in für 36 Monate (13 TV-L/0,5)	87.700,00
	Studentische Hilfskraft (40 h/Monat) für 30 Monate (14,89€/h)	17.868,00
	Gesamt Personal	105.568,00
Sachkosten	VA-Stahl für 18 Messkammern (Bodenanker)	7.200,00
	Kunststoffabdeckung für 18 Messkammern	7.200,00
	isolierte Leitungen, Heizdraht, PTFE-Schlauch Anschlüsse für Gasleitungen	16.200,00
	Kalibrierung der Gasmessgeräte	10.000,00
	Prüfgas Ammoniak/ Lachgas (GC-Messungen)	2.000,00
	Pacht für Versuchsflächen	2.000,00
	Boden und Gülle für Technikumsversuche	2.500,00
	Laborkosten (GC-Analysen)	5.200,00
	Temperatur- und Feuchtesensoren	3.000,00
	Gesamt Sachkosten	55.300,00
Vergabe von Aufträgen an Dritte	Vergabe der Gülleanalysen an die LUFA Nord West	2.000,00
	Vergabe der pflanzenbaulichen Analysen an die Abteilung Graslandwissenschaften der Universität Göttingen	
	N-, P-, K-, pH-Analysen (92 Proben)	1.500,00
	NIRS (92 Proben)	3.000,00
	N _{min} -Analysen 0-90 (552 Proben)	2.500,00
	N _{min} -Analysen 0-30 (496 Proben)	2.500,00
	Vergabe der Beerntung der Parzellen an die Landwirtschaftskammer	2.000,00
Gesamt Vergabe	13.500,00	
Reisekosten	Tagungen	1.500,00
	Fahrten zu Versuchsflächen	3.500,00
	Fahrten für Materialbeschaffung (Gülle, Boden etc.)	1.000,00
	Gesamt Reisekosten	6.000,00
Gesamtkosten Abteilung Verfahrenstechnik 180.368,00 €		

Tabelle 2: Ursprünglicher Finanzierungsplan der Firma Kotte Landtechnik

Kosten	Kostenposition	Betrag [€]
Personal-Einzelkosten	Techniker für Umbauten und Neukonstruktionen für 3 Monate (Brutto-Arbeitsentgelt 3250 €/Monat)	9.750,00
	Projektkoordinator für Planung und Entwicklung für 3 Monate (Brutto-Arbeitsentgelt 3850 €/Monat)	11.550,00
	Gesamt Personal-Einzelkosten	21.300,00
Gemeinkosten	Gemeinkosten 120% auf Summe der Personal-Einzelkosten von 21.300 €	25.560,00
Sach-Einzelkosten	Materialaufwand für Schare mit Erdstrom-Trenner <ul style="list-style-type: none"> • Stiele • Doppelherzschar • Scheiben 	1.600,00
	Materialaufwand für spezifische Gänsefuss-Schare <ul style="list-style-type: none"> • VA-Stahl • Scheiben 	800,00
	Materialaufwand für spezifische Drainagekegel	1.200,00
	Materialaufwand für verschiedene Hohlscheiben-Typen	8.000,00
	Materialaufwand für verschiedene Leitblechvarianten	4.000,00
	Materialaufwand für verschiedene Andruckrollen-Typen	8.000,00
	Materialaufwand für Schweißungen	400,00
	Materialaufwand für Verteiler <ul style="list-style-type: none"> • Lochverteiler 8-Loch D=50 • 6" Keilflanschschieber (mit Schmiernippel) • Handhebel für 6" Schieber • Drehgelenk 6" (4-Kant) • O-Ring für Schieber 6" 	1.190,00
	Injektor-Rahmen mit Anbauteilen	14.880,00
	Kosten Einsatz Schlepper (Testfahrten)	530,00
	Hydraulikzylinder (2)	440,00
	Schläuche <ul style="list-style-type: none"> • Spiralschlauch 6" (L=300cm) • Schlauchschelle • V-Teil 6" • Elastikschlauch Ø 50 mm (grün) • Schellen Spannweite 59-63 	200,00
	Fahrten zu Versuchsfeldern	840,00
	Fahrten Informationsaustausch Rieste - Vechta	340,00
	Gesamt Sach-Einzelkosten	42.420,00
Gesamt	89.280,00	

Gesamtkosten Kotte Landtechnik GmbH & Co. KG
89.280,00 €

Beantragte Förderung bei Kostenanalyse auf Kostenbasis in Höhe von 50%
44.640,00 €

2. Maßnahmen und Arbeitsschritte

2.1 Arbeitspaket AP1 – Projektkoordination

Bezüglich der in AP1 beschriebenen Projektkoordination wurden im Zeitraum vom 01.04.2013 bis 31.03.2015 fünf Projekttreffen durchgeführt.

Herr Maximilian Severin war als Doktorand in diesem Projekt zur Durchführung der in AP2 beschriebenen Projektziele vom 01.04.2013 bis 17.10.2013 am Thünen Institut Braunschweig, Institut für Agrarklimaschutz tätig. Die Durchführung dieser Versuche wurde im Vorfeld zwischen beiden Instituten abgestimmt und koordiniert.

Das **1. Projekttreffen** fand am 16.09.2013 am Thünen Institut Braunschweig zwischen den Projektbeteiligten der Georg-August-Universität Göttingen (Prof. Dr. Herman Van den Weghe, Dr. Felix Garlipp, Maximilian Severin) und dem Institut für Agrarklimaschutz des TI (Prof. Dr. Heinz Flessa, Dr. Reinhard Well, Dr. Roland Fuß) statt. Ziel war es, erste Ergebnisse aus AP 2 darzustellen und zu diskutieren. Herr Dr. Holger Wurl als Vertreter der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) war ebenfalls anwesend. Des Weiteren fand bei diesem Treffen die Planung und Koordination des in 2014 geplanten Feldversuchs statt.

Das **2. Projekttreffen** fand an der Hochschule Osnabrück am 10.12.2013 statt. Beteiligte waren:

Herr Dr. Well	Thünen Institut, Braunschweig
Herr Prof. Dr. Olf	Hochschule Osnabrück
Herr Prof. Dr. Trautz	Hochschule Osnabrück
Herr Pralle	Hochschule Osnabrück
Herr Federolf	Hochschule Osnabrück
Herr Westerschulte	Hochschule Osnabrück
Herr Prof. Dr. Dittert	Universität Göttingen
Herr Prof. Dr. Van den Weghe	Universität Göttingen, Außenstelle Vechta
Herr Dr. Garlipp	Universität Göttingen, Außenstelle Vechta
Herr Severin	Universität Göttingen, Außenstelle Vechta
Frau Gerdes	Universität Göttingen, Außenstelle Vechta

Im ersten Teil stellten beide Arbeitsgruppen die bisherigen Ergebnisse des DBU-Projekts vor. Im zweiten Teil wurde die Durchführung der Feldversuche in Bezug auf das Anlegen der Parzellen sowie der vorgesehenen Emissions- und Ertragsmessungen für das Jahr 2014 besprochen. Des Weiteren wurden weitere mögliche gemeinsame Arbeitsschritte in Bezug auf N_{\min} Bodenbeprobungen diskutiert.

Das **3. und 4. Projekttreffen** fand zwischen beiden Projektpartnern (Georg-August-Universität Göttingen und Fa. Kotte Landtechnik GmbH) am 16.12.2013 und am 13.01.2014 in Rieste statt. Hierbei wurden dezidiert der Feldversuch sowie die damit verbundene Aufgabenverteilung für das Jahr 2014 geplant.

Zwischenzeitlich hat sich ergeben, dass die Außenstelle der Georg-August-Universität Göttingen im Herbst 2014 weitestgehend nach Göttingen verlagert wird. Dadurch ergeben sich Veränderungen im geplanten Projektablauf. Die für das Jahr 2015 geplanten Feldversuche können auf Grund fehlender Ressourcen am Standort Vechta (Personal, Messtechnik, Fahrzeuge, etc.) nicht wie geplant durchgeführt werden. Eine Weiterführung des Projektes, insbesondere der Feldversuche im Jahr 2015 gestaltet sich auf Grund der großen Entfernung zwischen Göttingen und Vechta als sehr schwierig. Herr Prof. Dr. Van den Weghe scheidet zum 30.09.2014 aus dem aktiven Dienst aus und kann nur noch die wissenschaftliche Betreuung aber nicht mehr die Durchführung des Projektes übernehmen. Auch die Weiterführung des Projekts kann nach dem 30.09.2014 nicht durch Frau Gerdes sichergestellt werden, da diese im März 2014 aus dem Dienst ausgeschieden ist.

Am 20.03.2014 fand bei der DBU in Osnabrück das **5. Projekttreffen** statt, um die veränderte Projektsituation zu besprechen.

An diesem Gespräch waren beteiligt:

Herr Dr. Wurl	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Her Dr. Kotte	Kotte Landtechnik
Herr Prof. Dr. Dittert	Universität Göttingen
Herr Prof. Dr. Van den Weghe	Universität Göttingen, Außenstelle Vechta
Herr Dr. Garlipp	Universität Göttingen, Außenstelle Vechta
Herr Severin	Universität Göttingen, Außenstelle Vechta

Bei diesem Gespräch wurde beschlossen, dass das Projekt auf Grund der veränderten Situation auf eine Laufzeit von insgesamt 2 Jahren verkürzt und zum 31.03.2015 beendet werden soll. Dadurch fallen die Feldversuche im Jahr 2015 aus der Planung. Die für 2014 geplanten Versuche werden auf Grund unsicherer Ressourcen auf einen Standort begrenzt, dort aber sehr ausführlich durchgeführt. Auf Grund der zu diesem Zeitpunkt unklaren Nachfolge von Herrn Prof. Dr. Van den Weghe wurde beschlossen, dass Herr Prof Dittert das Projekt in dieser eingeschränkten Form bis zum Ende betreuen soll. Im September 2014 wurde seitens der Georg-August-Universität Göttingen allerdings beschlossen, dass Prof. Dr. Hessel die Abteilung Verfahrenstechnik in der Veredelungswirtschaft von Herrn Prof. Dr. Van den Weghe übergangsweise vertreten soll. Aus diesem Grund und aus Gründen einer vereinfachten Abwicklung wurde seitens des Dekanats der Fakultät für Agrarwissenschaften beschlossen, das Projekt nicht an die Abteilung von Herrn Prof. Dr. Dittert zu verlagern sondern in der Abteilung Verfahrenstechnik in der Veredelungswirtschaft am Standort Göttingen zu belassen.

Um dem in AP1 beschriebenen Controlling des Projektes gerecht zu werden, stehen alle Projektbeteiligten in ständigem Kontakt zur Übermittlung von Teilergebnissen sowie zur Koordination der Berichterstattung.

AP1 konnte mit der Projektbeendigung erfolgreich abgeschlossen werden.

2.2 Arbeitspaket AP2 – Grundlagen zur Entstehung von Emissionen (NH₃; N₂O) bei der Unterfußinjektion in Technikumsversuchen

Im vorliegenden Projektzeitraum (01.04.2013 – 31.03.2015) wurde die Bearbeitung des Arbeitspakets 2 „Prozessgrundlagen – Gefäßversuche zur Bestimmung der Implikationstiefe“ (AP2) vollständig in erweiterter Form durchgeführt. Von der ursprünglich in der Vorhabensbeschreibung beschriebenen Versuchsdurchführung wurde abgewichen, weil sich eine statistische korrekte Auswertung nicht zu 100 % gewährleisten ließe und der Arbeitsaufwand mit den verfügbaren Mitteln nicht realisierbar war.

In Kooperation mit dem TI-AK wurden die geplanten Versuche in abgewandelter Form als Mikrokosmenversuch in Braunschweig in einer Klimakammer durchgeführt. **Im Folgenden sind die einzelnen Fragestellungen dieses Versuches aufgeführt:**

- Kann die Injektion im Vergleich zur Schleppschlauchausbringung Emissionen (NH₃, N₂O, CH₄ und CO₂) signifikant reduzieren?
- Zeigt die Injektion von Gülle und Gärrest in zwei Tiefen (15 und 20 cm) signifikant unterschiedliche Emissionsfreisetzungen (NH₃, N₂O, CH₄ und CO₂)?
- Unterscheiden sich Wirtschaftsdünger (Gülle und Gärrest) bei gleicher Ausbringungstechnik in ihrer Emissionsfreisetzung (NH₃, N₂O, CH₄ und CO₂)?
- Wie unterscheiden sich unterschiedliche Böden in ihrer Emissionsfreisetzung nach Injektion von Wirtschaftsdüngern (NH₃, N₂O, CH₄ und CO₂)?

Zur Repräsentation einer intensiven Veredelungsregion (Nordwestdeutschland) wurden im April 2013, vor der Wirtschaftsdüngerbringung auf drei unterschiedlichen Standorten im Raum Rieste bei Osnabrück Stechzylinderproben (40 cm lang und 14,4 cm Innendurchmesser) entnommen (Abb. 1 bis 4, sowie Tabelle 3).

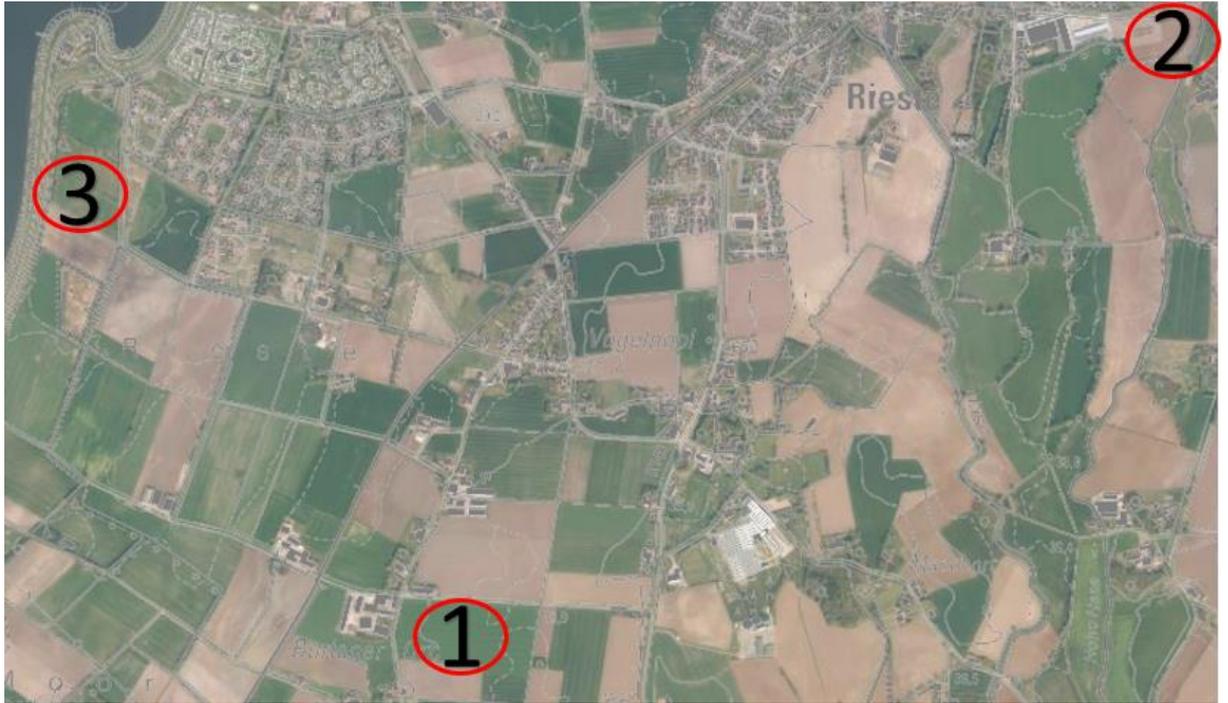
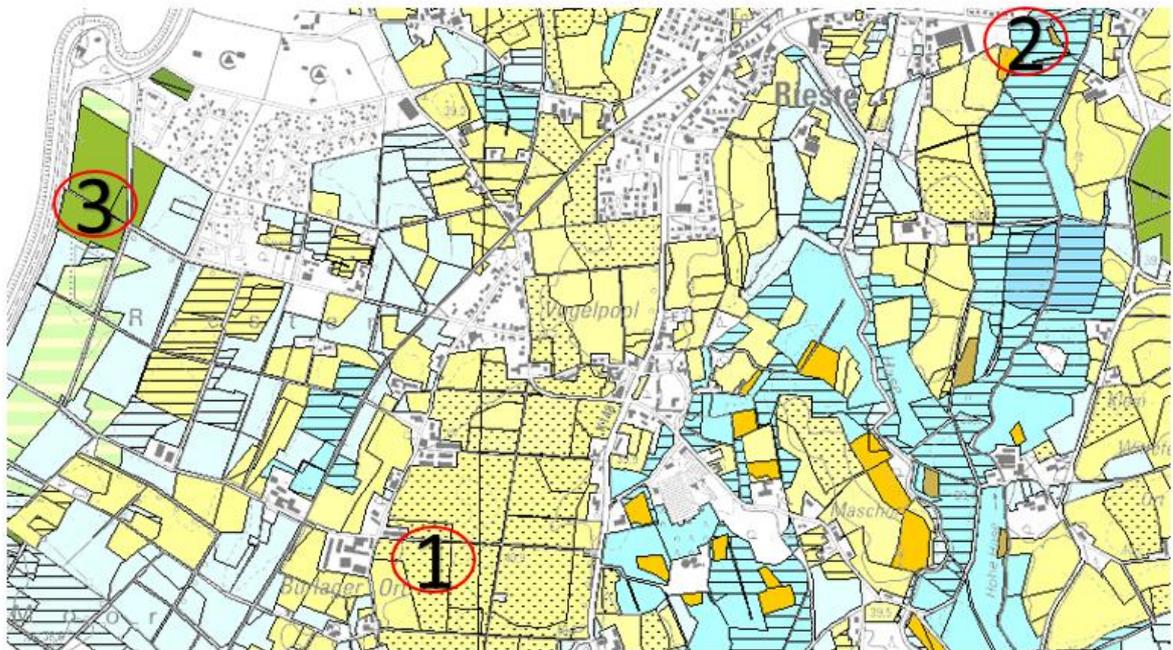


Abbildung 1: Standorte in Rieste, Luftbild, 1 = Plaggic Anthrosol, 2 = Gleysol, 3 = Histosol



Moore (Mo)	Eiszeitliche Ablagerungen(D)	Böden unter Grünland
Niedermoor, gute Zustandsstufe	Sand (S)	Sand (S)
Niedermoor oder Hochmoor, mittlere Zustandsstufe	anlehmgiger Sand (Sl)	lehmiger Sand (IS)
Hochmoor, schlechte Zustandsstufe	lehmiger Sand (IS)	sandiger Lehm (sL)
Sandlössse und Lössse (Lo)	stark lehmiger Sand (SL)	Lehm (L)
	sandiger Lehm (sL)	Ton (T)
	Lehm (L)	
lehmiger Sand (IS)	schwerer Lehm (LT)	
stark lehmiger Sand (SL)	Ton (T)	
sandiger Lehm (sL)		

Abbildung 2: Standorte in Rieste, Bodenkarte, 1 = Plaggic Anthrosol, 2 = Gleysol, 3 = Histosol



Abbildung 3: Probenahme von Bodensäulen im Stahlzylinder mit einem Radlader



Abbildung 4: Bodensäule im Mikrokosmengerüst in der Klimakammer

Tabelle 3: Standortbeschreibung, C- und N-Gehalte, Nitrat- und Ammoniumgehalte, Bodendichte und Bodenwassergehalt von drei untersuchten Böden

	Bodentyp		
	Gleysol	Plaggic Anthrosol	Histosol
Sand [% TM]	73,40	83,30	83,30
Lehm [% TM]	13,00	8,30	8,90
Ton [% TM]	13,60	6,00	4,90
C _{org} [%]	1,70	2,40	12,14
N _{total} [%]	0,20	0,20	0,853
C/N	8,50	12,00	14,23
NO ₃ -N [mg/100g]	5,95	5,00	4,35
NH ₄ -N [mg/100g]	0,18	0,43	2,60
pH	5,06	5,84	4,25
Bodendichte g/cm ³	1,28	1,27	0,74
H ₂ O vol. [%]	28,11	21,82	49,23
WFPS (Probenahme)	55,70	42,15	67,32

Die Probenahme erfolgte mit Plexiglasrohren, die in einem Stahlzylinder mit einem Radlader in den Boden eingebracht und wieder entnommen wurden. Hierdurch konnten ungestörte Bodenproben gewonnen werden. Die entnommenen Stechzylinderproben wurden zur Versuchsdurchführung ins TI-AK überführt. Mit einem Stempelsystem (siehe Abb. 5 und weitere Abbildungen im Anhang) wurde der Bodenkern in den Plexiglasrohren bei jeder Bodensäule 10 cm nach unten herausgedrückt. Dann wurden die untersten 10 cm Unterboden abgeschnitten und verworfen.



Abbildung 5: Stempelsystem zur Bearbeitung von Bodensäulen

Im Anschluss hieran wurden jeweils 28 Bodensäulen je Standort in ein Mikrokosmengerüst (Abb. 6) eingebaut und über 14 Tage bei 12 °C in die Klimakammer gestellt.



Abbildung 6: Mikrokosmengerüst

In dieser Zeit wurden die Bodensäulen in den ersten 2 Tagen von unten mit 100 ml CaCl_2 Lösung (0,001 mol) aufgesättigt. Mit der CaCl_2 Lösung können die Eigenschaften von Regenwasser nachgeahmt werden. Nach 2 Tagen wurde an

jede Bodensäule ein Unterdruck von 100 hPa (100 cm Wassersäule) angelegt. Durch eine poröse Platte konnte überschüssiges Wasser abgesaugt werden, die Bodensäulen wurden auf Feldkapazität eingestellt. Danach wurden die Bodensäulen inkubiert und konnten sich an die Temperatur in der Mikrokosmenanlage anpassen. Zur gleichmäßigen Luftversorgung wurden die Bodensäulen nach dem Einstellen der Feldkapazität an die Gasversorgung der Mikrokosmenanlage angeschlossen und konnten somit belüftet werden (Erhalt von Mikroorganismen und Schutz vor Schimmel). Es wurde ein kontinuierlicher Gasfluss von 20 ml/min je Säule eingestellt. Danach wurden jeweils 28 Säulen einer Bodenart aus der Mikrokosmenanlage geholt und geöffnet. Der Bodenkern wurde nun je nach späterem Applikationsverfahren von unten nach oben über den Säulenrand gedrückt und abgeschnitten:

- Schleppschlauch: 5 cm herausdrücken und abschneiden (TH+I 5 cm)
- Injektion 15 cm: 15 cm herausdrücken und abschneiden (I15)
- Injektion 20 cm: 20 cm herausdrücken und abschneiden (I20)

Eine ungedüngte und unbearbeitete Kontrolle (control) wurde im Vergleich hierzu angelegt.

Die Injektionstiefe wurde auf 15 und 20 cm festgelegt. Von jeder Variante wurden vier Wiederholungen durchgeführt. Zusätzlich wurden eine Kontrolle (keine Bearbeitung und keine Düngung) sowie vier leere Säulen zur Ermittlung der Hintergrundemissionen in jedem Versuch mit in die Mikrokosmenanlage gestellt.

Bei den Varianten Injektion - 15 und 20 cm - wurde in die Mitte der Bodensäulenoberfläche mit einem Furchenstecher eine Furche gestochen (Abb. 7). Die Furche hat ein Volumen von 63 cm³. Die Berührungsfläche zwischen später injiziertem Substrat und Furchenoberfläche entspricht ungefähr der einer Premaisterfurche (Unterfußinjektor, Kotte Landtechnik) im Praxisbetrieb. Die Einhaltung dieses Parameters ist entscheidend für die N₂O Bildung.



Abbildung 7: Injektionsfurche in der Bodensäule

Der entnommene Boden wurde auf 5 mm gesiebt. Danach wurden jeweils 50 ml Schweinegülle und Gärrest aus Schweinegülle (Tab. 4) mit einer Spritze in die Furche gespritzt.

Tabelle 4: Übersicht über die verwendeten Wirtschaftsdünger

	Düngerart	
	Gärrest aus Mastschweinegülle	Mastschweinegülle
Trockenmasse [%]	6,11	8,85
N _{total} [%]	0,51	0,50
NH ₄ -N [%]	0,25	0,21
pH	7,50	7,20

Bei der Schleppschlauchvariante wurde der abgenommene und gesiebte Oberboden direkt mit dem Substrat vermengt, durchmischt und wieder in die Bodensäulen zurückgegeben. Bei den Injektionsvarianten wurde nach der „Injektion“ des Substrats der vorher entnommene und gesiebte Boden wieder in die Bodensäulen zurückgegeben. Damit die Rückverdichtung des Premaister Praxisgerätes nachempfunden werden kann, wurde ein Stempel mit 600 g Fallgewicht gebaut. Dieser wurde nach Abschluss der Injektion einmalig aus 20 cm

Höhe auf jede Bodensäule fallen gelassen. Abschließend wurden die Bodensäulen verschlossen und in die Mikrokosmenanlage zurückgestellt (Abb. 8 und 9).



Abbildung 8: Mikrokosmenanlage mit Bodensäulen, Großansicht



Abbildung 9: Glasvials für N_2O , CH_4 und CO_2 sowie ein großes Vial als Säurefalle für NH_3

Die Gasprobenahme erfolgte über einen Zeitraum von 37 Tagen. Die Probenahme von N₂O, CH₄ und CO₂ erfolgte täglich mittels Glasvials, die an die Mikrokosmen angeschlossen wurden. Die Probenahme (N₂O, CH₄ und CO₂) erfolgt im Durchflusssystem. In den ersten 10 Tagen erfolgte mittels Säurefalle die Messung von NH₃. Hierzu wurde die Luft aus dem Mikrokosmos durch eine Schwefelsäurefalle (70 ml; 0,01 mol) geleitet. In den ersten 48 h erfolgte die Messung von NH₃ im Vier-Stunden-Takt. Danach wurde die Messung einmal täglich durchgeführt. Die Analytik der NH₃-Proben wurde photometrisch mit einem Segmented Flow Analysis System (SFAS) (SKALAR, Breda NL) und im Vergleich hierzu mit einer NH₃-Elektrode (Orion star A214, thermo science fisher, Waltham USA) gemessen.

Mit einem Gaschromatographen (Shimadzu GC2014) umgebaut nach *Lofffield* (1997) wurden N₂O-, CH₄- und CO₂-Konzentrationen gemessen. Zur parallelen Messung von N₂O, CH₄ und CO₂ besitzt das System einen Elektroneneinfangdetektor (ECD) und einen Flammenionisationsdetektor (FID). Die Arbeitstemperatur beträgt 70 °C. N₂O-Konzentrationen über 2000 ppm wurden mit einem Agilent 7890A GC mit PAL-Headspace Autosampler mit einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor, Elektroneneinfangdetektor und Helium Ionisations Detektor (HID) gemessen.

Die N_{min}-Analytik wurde nach *VDLUFA* (2002) durchgeführt. Bodenkohlenstoff und -stickstoff wurden mit einem C/N-Analyser untersucht. Der Gesamtstickstoff wurde nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse) bestimmt (*VDLUFA* 2012a). Die Bestimmung des organischen Kohlenstoffs wurde durch Verbrennung und Gasanalyse durchgeführt (*VDLUFA* 2012b)

Ergebnisse Mikrokosmenversuch

Die Ergebnisse aus den durchgeführten Versuchen werden im Folgenden dargestellt. Die NH₃-Emission konnten mittels der angebrachten Säurefalle nicht erfasst werden. Aus diesem Grund gibt es keine Ergebnisse zu diesem Versuchsteil. In der Diskussion soll auf die Problematik der NH₃-Messung näher eingegangen werden.

Bei der Ergebnisdarstellung werden zuerst die zeitlichen Verläufe der Emissionen (N_2O , CH_4 und CO_2) und anschließend die aufsummierten Gasflüsse, sowie die Ergebnisse der Bodenuntersuchung dargestellt.

Distickstoffmonoxidemissionen

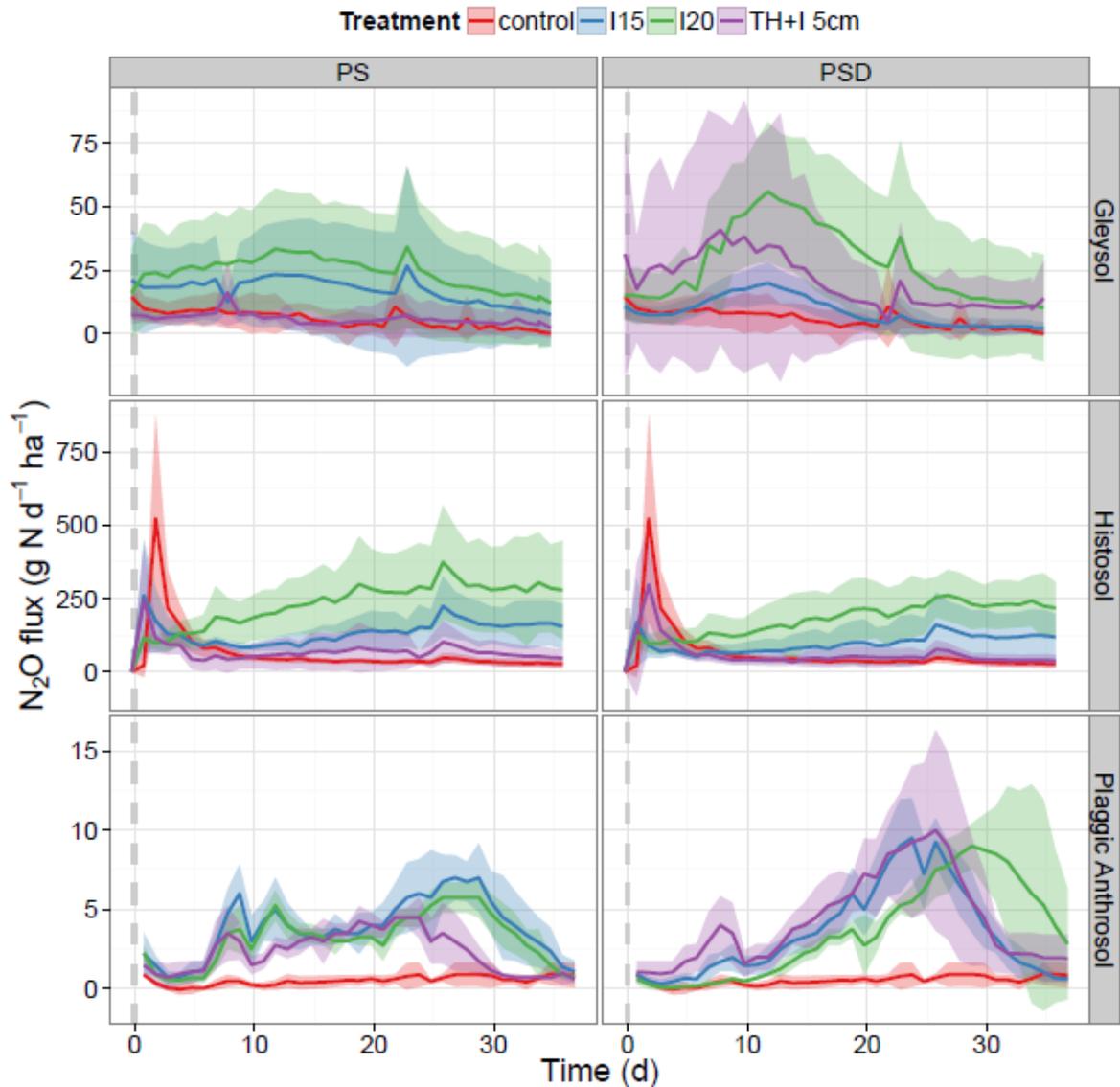


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der N_2O -Flüsse bei einer unbehandelten Kontrolle (control), der Injektion (I15 und I20) und bei der Schleppschauchausbringung (TH+I 5 cm) von Gülle (PS) und Gärrest (PSD) auf drei Standorten (Gleysol, Plaggic Anthrosol und Histosol)

Nach der Wirtschaftsdüngerapplikation sind die N_2O -Emissionen der bearbeiteten Varianten im Vergleich zur unbearbeiteten und ungedüngten Variante angestiegen. 15 bis 25 Tage nach Düngerapplikation ist der Peak der N_2O -Emissionen bei allen Varianten erreicht. Die mit Gärrest behandelten Varianten setzen tendenziell, aber nicht signifikant mehr N_2O frei als die mit Gülle gedüngten Varianten. Die Varianten

mit injizierten Wirtschaftsdüngern zeigen tendenziell aber nicht signifikant höhere N₂O-Emissionen. Zwischen unterschiedlichen Ausbringungstechniken gibt es keinen signifikanten Unterschied (Abb. 10).

Zur besseren Vergleichbarkeit der N₂O-Emissionen wurde die gemessene N₂O-Konzentration an Hand der Molekülmassen in die N₂O-Freisetzung in Gramm pro Hektar umgerechnet. Im Folgenden wurde dies auch bei CH₄ und CO₂ gemacht. Beim Plaggic Anthrosol zeigt 29 Tage nach Düngerapplikation die Variante mit der Injektion von Gülle (PS) in 15 cm Tiefe die höchsten N₂O-Emissionen. Bei der Gärrestapplikation (PSD) zeigt die Schleppschlauchvariante (TH+I 5 cm) nach 27 Tagen die höchsten N₂O Emissionen. Beim Gleysol zeigt die Injektion von Gülle in 20 cm Tiefe nach 23 Tagen die höchsten N₂O-Emissionen. Die Gärrestausringung zeigt bei diesem Boden die höchsten N₂O-Freisetzung nach 12 Tagen bei der Injektion in 20 cm Tiefe. Bei dem Histosol zeigt die unbehandelte Variante einen Tag nach Versuchsstart die höchsten N₂O-Emissionen. Bei der Gülleausbringung setzt die Injektion in 20 cm Tiefe die höchsten Emissionen frei. Bei der Gärrestausringung zeigt die Schleppschlauchvariante die höchsten Emissionen.

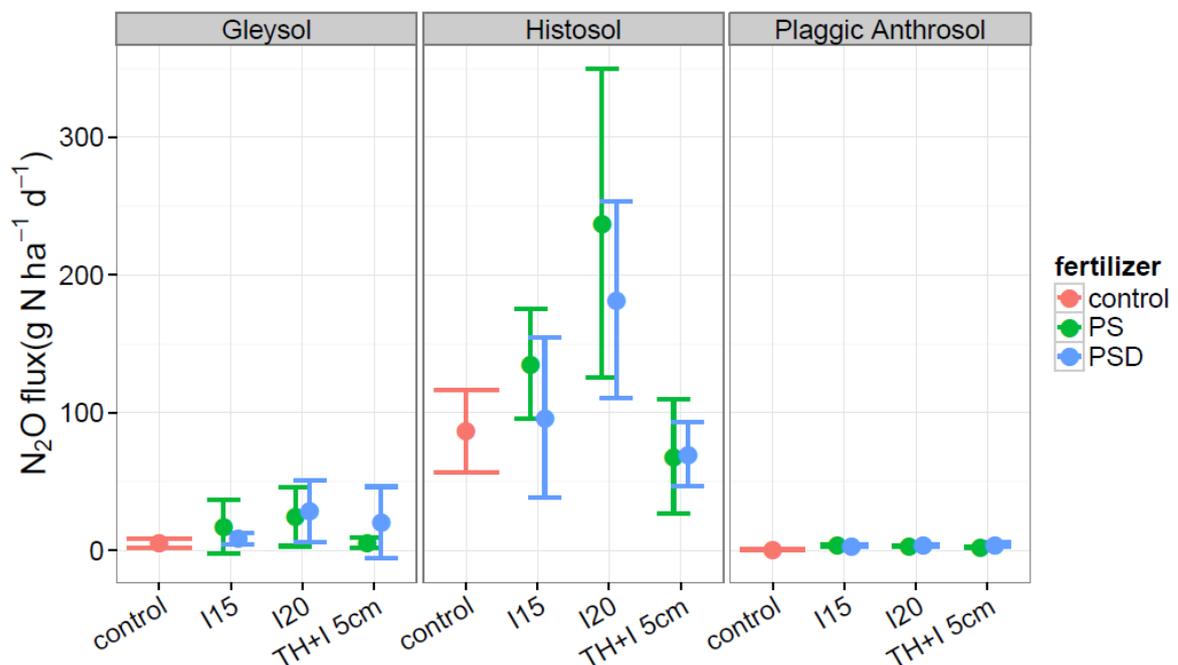


Abbildung 11: Mittelwerte der täglichen N₂O-Emissionen (Mittelwert und Standardabweichung) bei einer unbehandelten Kontrolle (control), der Injektion (I15 und I20) und bei der Schleppschlauchausbringung (TH+I 5 cm) von Gülle (PS) und Gärrest (PSD) auf drei Standorten (Gleysol, Plaggic Anthrosol und Histosol) über einen Zeitraum von 37 Tagen

Über einen Zeitraum von 37 Tagen nach Düngerapplikation wurden die täglichen Mittelwerte der N₂O-Emissionen bezogen auf alle Varianten eines Standorts berechnet. Tendenziell aber nicht signifikant zeigen die injizierten Dünger höhere N₂O-Emissionen, als die mit dem Schleppschlauch ausgebrachten Dünger (Abb. 11).

Methanemissionen

Die CH₄-Emissionen sind in den ersten 48 h nach Düngerapplikation deutlich über das Ausgangsniveau vor der Bearbeitung angestiegen. Die Peaks der freigesetzten CH₄-Emissionen liegen bei allen Böden zwischen 0 und 90 g C d⁻¹ ha⁻¹ (Abb. 12). Bei der Kumulation der Flüsse ist zu erkennen, dass es zwischen den unterschiedlichen Applikationstechniken keine signifikanten Unterschiede gibt. Der Histosol setzt CH₄ frei und der Gleysol und der Plaggic Anthrosol nehmen geringfügig CH₄ auf (Abb.13).

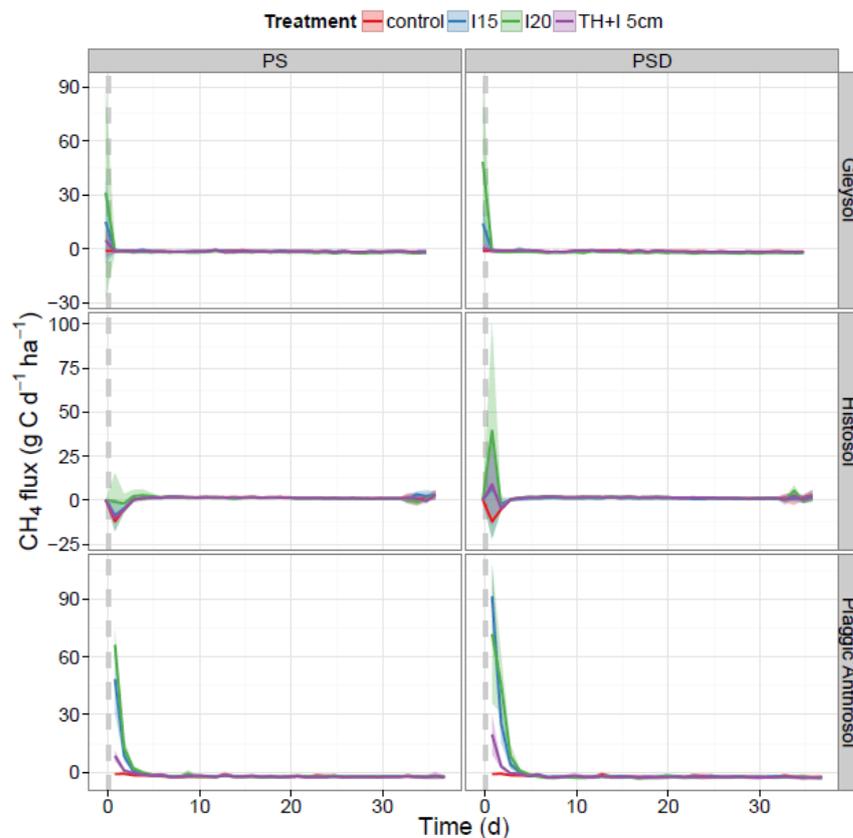


Abbildung 12: Zeitlicher Verlauf der CH₄-Flüsse bei einer unbehandelten Kontrolle (control), der Injektion (I15 und I20) und bei der Schleppschlauchausbringung (TH+I 5 cm) von Gülle (PS) und Gärrest (PSD) auf drei Standorten (Gleysol, Plaggic Anthrosol und Histosol)

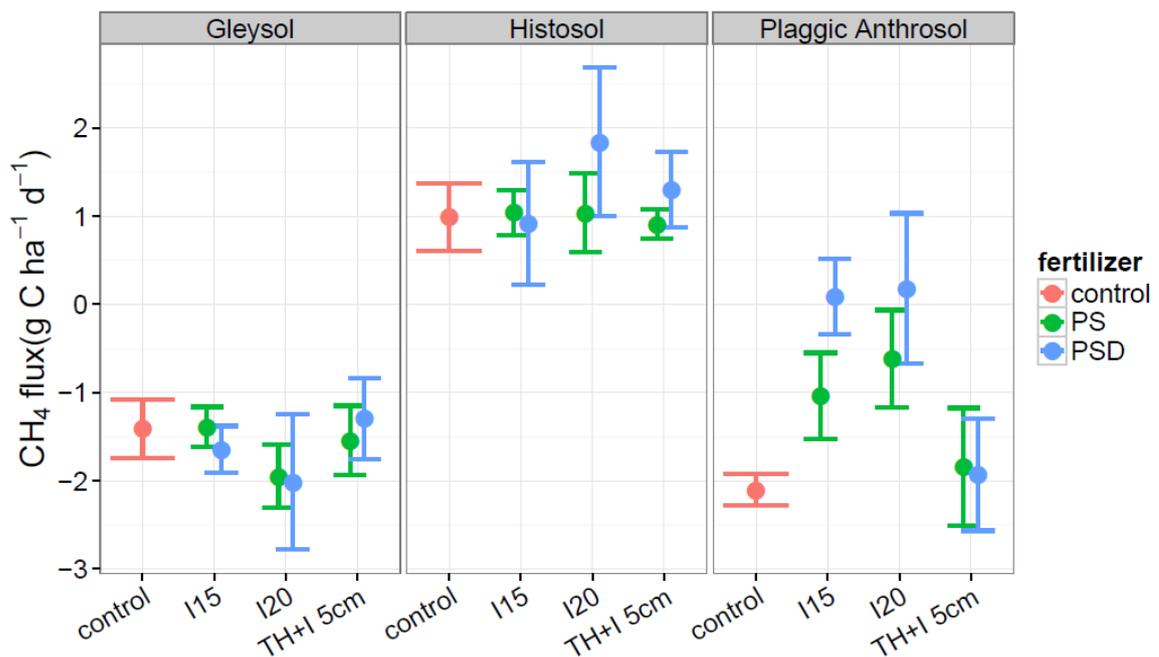


Abbildung 13: Mittelwerte der täglichen CH₄-Emissionen (Mittelwert und Standardabweichung) bei einer unbehandelten Kontrolle (control), der Injektion (I15 und I20) und bei der Schleppschauchausbringung (TH+I 5 cm) von Gülle (PS) und Gärrest (PSD) auf drei Standorten (Gleysol, Plaggic Anthrosol und Histosol) über einen Zeitraum von 37 Tagen

Kohlenstoffdioxidemissionen

24 – 48 h nach der Wirtschaftsdüngerapplikation konnten die höchsten CO₂-Freisetzungen gemessen werden. Nach dem Erreichen eines CO₂-Peaks geht die CO₂-Freisetzung zurück, auf einen Level vor Düngerapplikation. In den bearbeiteten Varianten sind die CO₂-Emissionen tendenziell aber nicht signifikant höher als bei der Kontrolle.

Die Gärrestapplikation mit dem Schleppschlauch zeigt beim Plaggic Anthrosol wenige Stunden nach Düngerapplikation die höchsten CO₂-Freisetzungen (53 g C d⁻¹ ha⁻¹). Auch beim Gleysol sind die CO₂-Emissionen wenige Stunden nach Gärrestapplikation mit dem Schleppschlauch am höchsten (55 g C d⁻¹ ha⁻¹). Die Gülle Injektion in 15 cm Tiefe zeigt beim Histosol einen Tag nach dem Düngeereignis die höchsten CO₂-Emissionen (54 g C d⁻¹ ha⁻¹) (Abb. 14). Die kumulierten CO₂-Emissionen zeigen über den Versuchszeitraum von 37 Tagen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsvarianten. Tendenzuell sind die CO₂-Emissionen die vom Gleysol und Histosol freigesetzt werden am größten (Abb. 15).

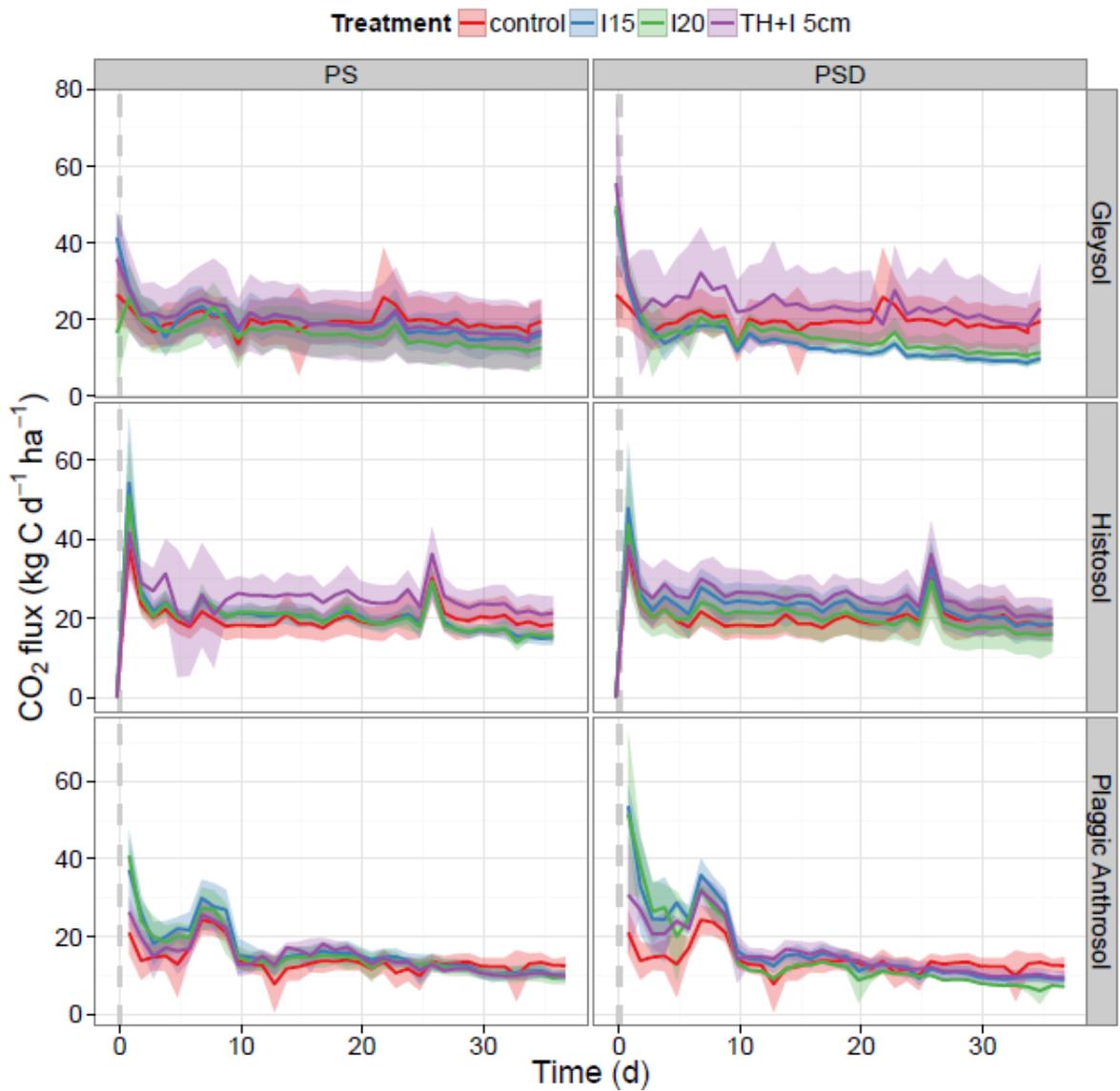


Abbildung 14: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Flüsse bei einer unbehandelten Kontrolle (control), der Injektion (I15 und I20) und bei der Schleppschauchausbringung (TH+I 5 cm) von Gülle (PS) und Gärrest (PSD) auf drei Standorten (Gleysol, Plaggic Anthrosol und Histosol)

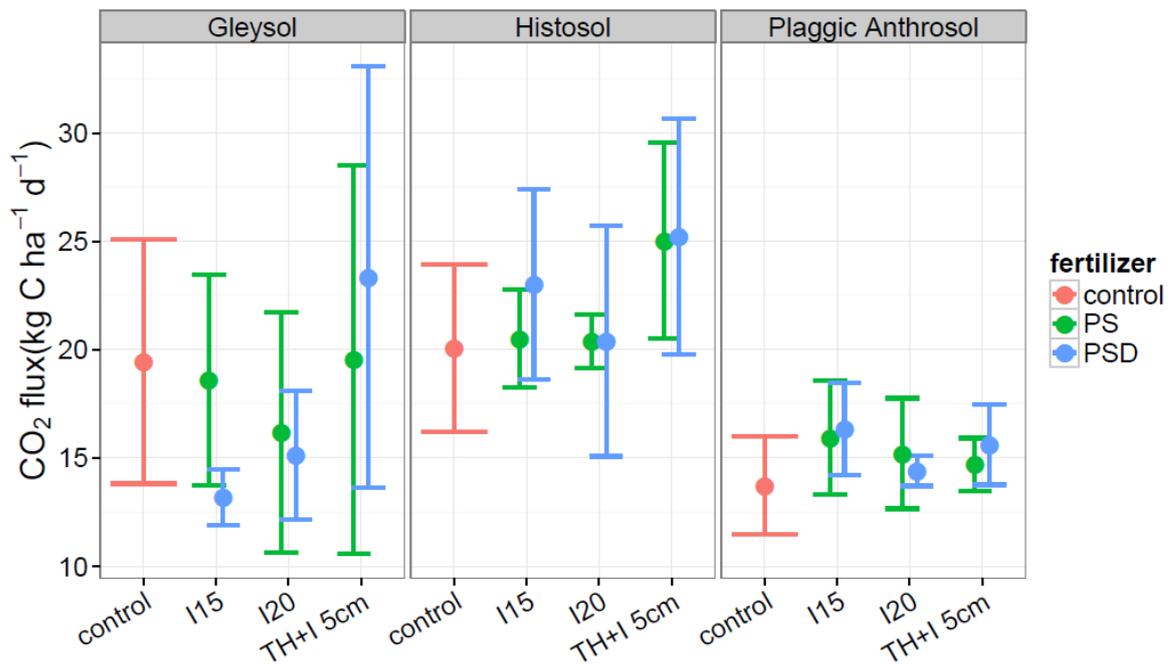


Abbildung 15: Mittelwerte der täglichen CO₂-Emissionen (Mittelwert und Standardabweichung) bei einer unbehandelten Kontrolle (control), der Injektion (I15 und I20) und bei der Schleppschauchausbringung (TH+I 5 cm) von Gülle (PS) und Gärrest (PSD) auf drei Standorten (Gleysol, Plaggic Anthrosol und Histosol) über einen Zeitraum von 37 Tagen

Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte der untersuchten Böden

Die drei untersuchten Böden zeigen je nach Herkunft unterschiedliche Bodenkohlenstoffgehalte. Die höchsten Kohlenstoffgehalte zeigt der Histosol (15,66 – 17,50 %). Der Gleysol zeigt die niedrigsten Kohlenstoffgehalte (1,71 – 1,84 %). Die unterschiedlichen Bearbeitungsvarianten zeigen keinen signifikanten Unterschied untereinander und keinen signifikanten Unterschied zur Kontrolle. Auch die beiden genutzten Substrate (Gülle und Gärrest) zeigen keinen signifikanten Unterschied in ihrer Wirkung auf die Bodenkohlenstoffgehalte.

Die höchsten N-Gehalte im Boden zeigt der Histosol (1,05 – 1,18 %). Gleysol und Plaggic Anthrosol zeigen die geringsten N-Gehalte (0,09 – 0,24 %). Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen der unbehandelten Variante, der Injektion und der Schleppschauchausbringung von Gülle und Gärrest (Tab. 5 bis 7).

Tabelle 5: C- und N-Gehalte sowie C/N-Verhältnisse des Standorts Gleysol mit injiziertem und mit Schleppschlauch ausgebrachter und eingearbeitetem Wirtschaftsdünger im Vergleich zu einer unbearbeiteten Variante (I15 = Injektion 15 cm, I20 = Injektion 20 cm, TH+I 5 cm = Schleppschlauch)

		Gleysol					
Behandlung	Düngerart	C [%]		N [%]		C/N	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Kontrolle		1,82	0,09	0,17	0,01	10,55	0,09
I15	MS-Gülle*	1,86	0,13	0,18	0,01	10,33	0,22
I20	MS-Gülle*	1,81	0,09	0,17	0,01	10,66	0,40
TH+I 5 cm	MS-Gülle*	1,83	0,16	0,17	0,01	10,59	0,41
I15	Gärrest	1,84	0,07	0,18	0,01	10,31	0,24
I20	Gärrest	1,71	0,24	0,17	0,02	10,20	0,32
TH+I 5 cm	Gärrest	1,83	0,13	0,18	0,01	10,43	0,25

*MS-Gülle=Mastschweinegülle

Tabelle 6: C- und N-Gehalte sowie C/N-Verhältnisse des Standorts Histosol mit injiziertem und mit Schleppschlauch ausgebrachter und eingearbeitetem Wirtschaftsdünger im Vergleich zu einer unbearbeiteten Variante (I15 = Injektion 15 cm, I20 = Injektion 20 cm, TH+I 5 cm = Schleppschlauch)

		Histosol					
Behandlung	Düngerart	C [%]		N [%]		C/N	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Kontrolle		15,66	2,09	1,05	0,01	14,96	0,12
I15	MS-Gülle*	16,88	1,44	1,14	0,10	14,84	0,12
I20	MS-Gülle*	17,00	1,52	1,14	0,10	14,89	0,15
TH+I 5 cm	MS-Gülle*	15,98	2,72	1,08	0,19	14,85	0,10
I15	Gärrest	17,50	1,08	1,18	0,08	14,89	0,05
I20	Gärrest	16,72	2,57	1,12	0,17	14,97	0,07
TH+I 5 cm	Gärrest	16,76	1,65	1,13	0,11	14,84	0,11

*MS-Gülle=Mastschweinegülle

Tabelle 7: C- und N-Gehalte sowie C/N-Verhältnisse des Standorts Plaggic Anthrosol mit injiziertem und mit Schleppschlauch ausgebrachter und eingearbeitetem Wirtschaftsdünger im Vergleich zu einer unbearbeiteten Variante (I15 = Injektion 15 cm, I20 = Injektion 20 cm, TH+I 5 cm = Schleppschlauch)

Plaggic Anthrosol							
Behandlung	Düngerart	C [%]		N [%]		C/N	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
Kontrolle		2,63	0,04	0,19	0,00	13,81	0,30
I15	MS-Gülle*	2,66	0,05	0,20	0,00	13,61	0,14
I20	MS-Gülle*	2,62	0,01	0,19	0,00	13,88	0,12
TH+I 5 cm	MS-Gülle*	2,63	0,05	0,19	0,01	13,72	0,21
I15	Gärrest	2,66	0,03	0,19	0,00	13,97	0,11
I20	Gärrest	2,68	0,05	0,19	0,00	13,82	0,09
TH+I 5 cm	Gärrest	2,60	0,05	0,19	0,01	13,87	0,32

*MS-Gülle=Mastschweinegülle

N_{min}-Gehalte in den Böden

Im Vergleich aller untersuchten Varianten vor und nach der Wirtschaftsdüngerausbringung zeigt sich eine Abnahme der NH₄-Gehalte. Im gleichen Zeitraum steigen die NO₃-Gehalte an. Der Histosol zeigt tendenziell höhere NH₄⁺- und NO₃⁻-Gehalte als der Gleysol und der Plaggic Anthrosol. Innerhalb jedes einzelnen Bodens gibt es keinen signifikanten Variantenunterschied. Vor und nach der Bodenbearbeitung und Wirtschaftsdüngerausbringung kann kein signifikanter Unterschied der NH₄-Gehalte über alle Böden festgestellt werden. Tendenzuell zeigen mit Gärrest behandelte Varianten höhere N_{min}-Gesamtgehalte, allerdings gibt es auch hier keinen signifikanten Variantenunterschied. Tendenzuell zeigt die Schleppschlauchvariante die geringsten NO₃⁻-Gehalte (Tab. 8 bis 10).

Tabelle 8: N_{\min} -Gehalte (0-30 cm) Plaggic Anthrosol mit Gülle und Gärrest Injektion 15 und 20 cm, Schleppschlauchausbringung mit Einarbeitung, sowie einer unbehandelten Variante vor und nach Düngerapplikation (I15 = Injektion 15 cm, I20 = Injektion 20 cm, TH+I 5 cm = Schleppschlauch)

Plaggic Anthrosol					
		NH_4^+		NO_3^-	
Behandlung	Düngerart	Mean	Tukey $\alpha < 0,05$	Mean	Tukey $\alpha < 0,05$
Vor Düngung		0,43	a	5	b
Kontrolle		0,29	a	25,19	cdef
I15	MS-Gülle*	0,50	a	88,91	cde
I20	MS-Gülle*	0,71	a	67,54	cde
TH+I 5 cm	MS-Gülle*	0,31	a	80,94	cd
I15	Gärrest	0,46	a	101,36	de
I20	Gärrest	0,41	a	93,71	ce
TH+I 5 cm	Gärrest	0,34	a	73,54	cd

*MS-Gülle=Mastschweinegülle

Tabelle 9: N_{\min} -Gehalte (0-30 cm) Gleysol mit Gülle und Gärrest Injektion 15 und 20 cm, Schleppschlauchausbringung mit Einarbeitung, sowie einer unbehandelten Variante vor und nach Düngerapplikation (I15 = Injektion 15 cm, I20 = Injektion 20 cm, TH+I 5 cm = Schleppschlauch)

Gleysol					
		NH_4		NO_3	
Behandlung	Düngerart	Mean	Tukey $\alpha < 0,05$	Mean	Tukey $\alpha < 0,05$
Vor Düngung		0,18	a	5,95	b
Kontrolle		0,13	a	20,88	ac
I15	MS-Gülle*	0,21	a	87,26	ac
I20	MS-Gülle*	0,16	a	88,39	ac
TH+I 5 cm	MS-Gülle*	0,18	a	70,30	a
I15	Gärrest	0,23	a	102,21	a
I20	Gärrest	0,25	a	93,92	a
TH+I 5 cm	Gärrest	0,23	a	79,60	ac

*MS-Gülle=Mastschweinegülle

Tabelle 10: N_{min}-Gehalte (0-30 cm) Histosol mit Gülle und Gärrest Injektion 15 und 20 cm, Schleppschlauchausbringung mit Einarbeitung, sowie einer unbehandelten Variante vor und nach Düngerapplikation (I15 = Injektion 15 cm, I20 = Injektion 20 cm, TH+I 5 cm = Schleppschlauch)

		Histosol			
		NH ₄		NO ₃	
Behandlung	Düngerart	Mean	Tukey α < 0,05	Mean	Tukey α < 0,05
Vor Düngung		2,60	a	4,35	b
Kontrolle		1,82	a	26,50	c
I15	MS-Gülle*	7,70	a	102,73	a
I20	MS-Gülle*	2,67	a	79,61	e
TH+I	MS-Gülle*	11,12	a	80,67	e
I15	Gärrest	4,77	a	121,16	ad
I20	Gärrest	5,73	a	155,58	ad
TH+I	Gärrest	5,02	a	100,43	ad

*MS-Gülle=Mastschweinegülle

2.3 Arbeitspaket AP3 und AP5 – Entstehung von Emissionen (NH₃; N₂O) bei der Unterfußinjektion und Einfluss der Applikationstechnik auf Ertrag und Erntequalität im Feldversuch

Zusätzlich zu dem durchgeführten Mikrokosmenversuch, der in einer Veröffentlichung ausführlich beschrieben wird (siehe Kapitel 4 „Öffentlichkeitsarbeit“), wurde auf dem in dem Mikrokosmenversuch genutzten Plaggic Anthrosol (lehmgiger Sand) ein Feldversuch durchgeführt. Ziel des Feldversuches war es zum einen herauszufinden, wie sich eine Injektion in 15 cm Tiefe gegenüber einer Schleppschlauchausbringung von Gülle und Gärrest auf die Emissionsfreisetzung (NH₃, N₂O, CO₂ und CH₄), Erträge und Erntequalität von Mais auswirkt. Zum anderen wurde ein Unterfußinjektor (Premaister – Kotte Landtechnik, Malgartnerstraße 36, 49597 Rieste) so modifiziert, dass eine Gülleausbringung parallel in zwei Arbeitstiefen (10 und 20 cm) möglich ist. Es wurde untersucht, ob eine Gülle Injektion parallel in zwei Tiefen (10 und 20 cm) gegenüber einer Injektion in 15 cm Einflüsse auf die Emissionsfreisetzung hat und ob sich Auswirkungen auf die Erträge ergeben. Durch die Anlage von zwei übereinander liegenden Depots wird sich erhofft besser auf das Pflanzenwachstum und den Nährstoffbedarf im Wachstumsverlauf einzugehen und auch in späteren Entwicklungsphasen der Maispflanze wurzelnah Nährstoffe anzubieten. Des Weiteren wurde der Einfluss des Nitrifikationshemmers 3,4-Dimethyl-Pyrazol-Phosphate (DMPP) (EuroChem Agro, Reichskanzler-Müller-Straße 23, 68165 Mannheim) auf die

Emissionsfreisetzung und die mineralischen Bodenstickstoffmengen (N_{\min}) untersucht. Durch den Wirkstoff DMPP soll die Nitrifikation verlangsamt, die N_2O Freisetzung und die Stickstoff Auswaschung reduziert werden. Bei der Versuchsanlage wurde bewusst auf die zusätzliche Gabe von mineralischen Düngemitteln verzichtet. Die Pflanzenernährung mit Stickstoff und Phosphor sollte komplett aus dem Bodenvorrat sowie aus Gülle und Gärrest sichergestellt werden. Hierbei sollte beachtet werden, dass dies nur auf gut mit Nährstoffen versorgten Standorten möglich ist. Die Unterfußdüngung in der hier dargestellten Form kann nur im Maisanbau durchgeführt werden.

Material und Methoden

In Kooperation mit der Firma Kotte Landtechnik wurde unter praxisüblichen Bedingungen ein Feldversuch mit Mais im niedersächsischen Rieste ($52,48^\circ$; $7,98^\circ$) angelegt. Der Standort, ein lehmiger Sand [N_{\min} 18 kg ha⁻¹, N_{total} 0,14 %, organische Substanz 3,7 %, C/N 15, pH 4,9, 12 mg P^{100 mg Boden} (P-CAL), 16 mg K^{100 mg Boden} (K-CAL)] repräsentiert einen hoch mit Nährstoffen versorgten Ackerstandort in Nordwestdeutschland.

Es wurden in jeder Variante mit Ausnahme der Kontrolle 30 m³ Gülle (3,3 % TS, 4,5 % N_{total} , 2,8 % NH_4-N) oder Gärrest (7,5 % TS, 4,4 % N_{total} , 1,6 % NH_4-N) ausgebracht. Die Parzellengröße betrug 30 x 3 m (3 m Arbeitsbreite).

Insgesamt wurden sieben Versuchsvarianten angelegt (Tab. 11).

Tabelle 11: Versuchsvarianten im Überblick

Bezeichnung	Abkürzung
Injektion 15 cm Gärrest	I15-GA
Injektion 15 cm Gülle	I15-GU
Injektion 15 cm Gülle DMPP	I15-GU DMPP
Injektion 10 + 20 cm, 2 Bänder übereinander	I15+20
Kontrolle ohne Düngung	Kontrolle
Schleppschlauch + Einarbeitung Gärrest	S+E GA
Schleppschlauch + Einarbeitung Gülle	S+E GU

Bei den Varianten Injektion 15 cm wurde Gülle bzw. Gärrest mit einem Unterfußinjektor (Premaister, Kotte Landtechnik) in 15 cm Tiefe in den Boden

injiziert. In einer weiteren Variante wurde Gülle vor der Injektion mit 6 l Entec flüssig (Wirkstoff DMPP) vermischt und in 15 cm Tiefe mit dem Premaister injiziert. Bei der Variante „**Injektion 10 + 20 cm**“ wurde ein „Kotte Premaister“ so modifiziert, das zeitgleich zwei Güllebänder übereinander in 10 und 20 cm abgelegt werden konnten (Abb. 16 und 17).

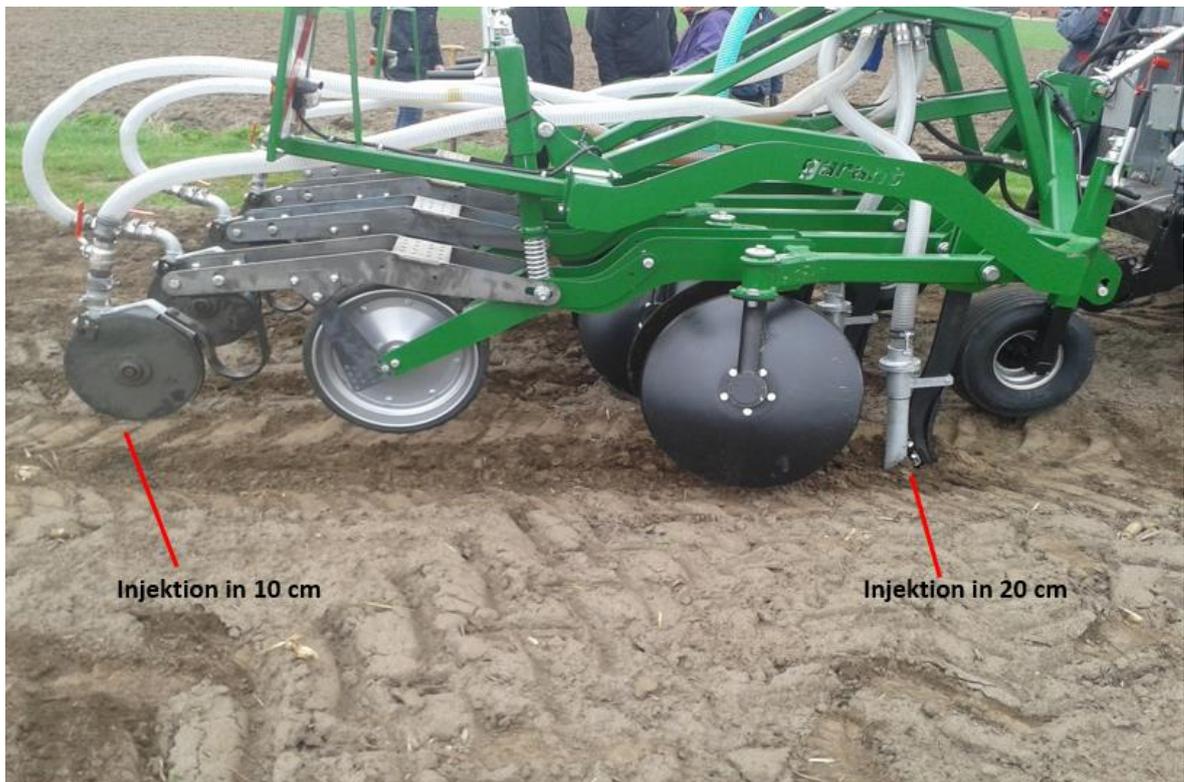


Abbildung 16: Der modifizierte „Kotte Premaister“ legt in zwei Tiefen (10 und 20 cm) übereinander zwei Güllebänder ab und soll somit die Nährstoffversorgung der Maispflanze in zwei Wachstumsphasen sicherstellen

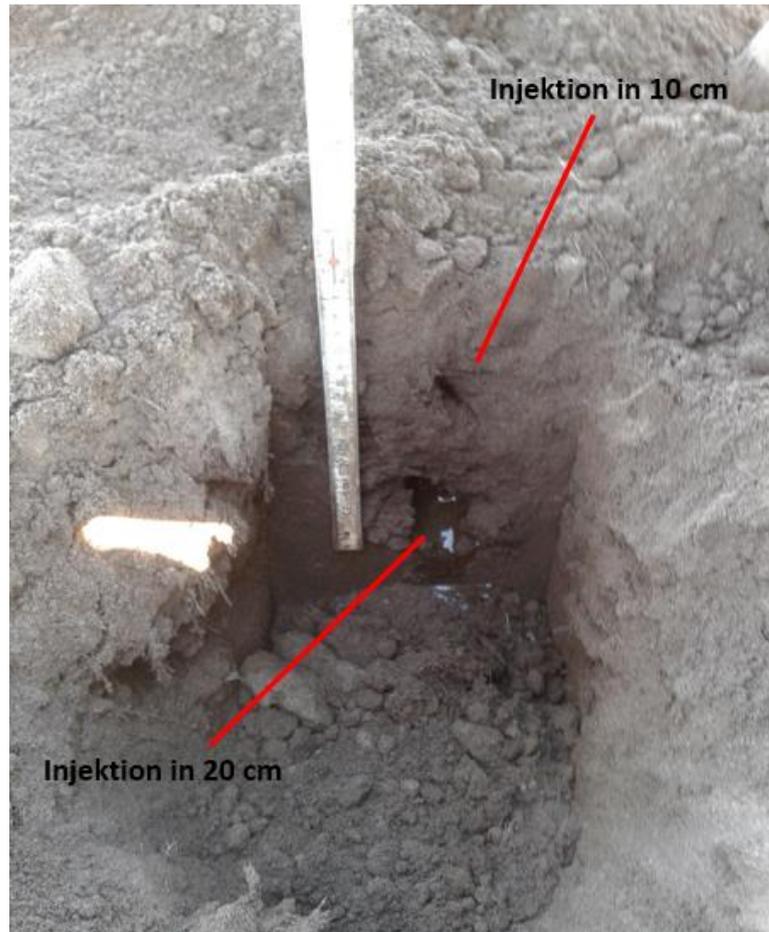


Abbildung 17: Die Ablage der Gülle erfolgt in zwei Tiefen (10 und 20 cm) übereinander

Bei den Varianten Schleppschlauch + Einarbeitung wurde Gülle bzw. Gärrest mit dem Schleppschlauch ausgebracht. Die Einarbeitung erfolgte sofort nach der Ausbringung mit einem Grubber (Abb. 18). Bei der Kontrollvariante wurden keine Düngung und keine Bodenbearbeitung vorgenommen. Von jeder Variante wurden vier Wiederholungen angelegt. Nach guter fachlicher Praxis ist eine Einarbeitung innerhalb von 4 Stunden nach der Wirtschaftsdüngerausbringung vorgeschrieben, eine Kontrolle ist allerdings nicht möglich. Zum direkten Vergleich von Injektion und Schleppschlauch wurde die Einarbeitung sofort nach der Wirtschaftsdüngerausbringung durchgeführt.

Bei der Injektion erfolgt im Unterschied zum Schleppschlauch nur eine Bodenstörung direkt um den Injektionsbereich herum, die Nährstoffgabe erfolgt konzentriert in einen kleinen Bereich.



Abbildung 18: Die mit dem Schleppschauch ausgebrachten Substrate wurden sofort nach der Ausbringung eingearbeitet

Die Gülleausbringung wurde am 16.04.2014 durchgeführt, 7 Tage später erfolgte die Maisaussaat (Sorte Aventura).

Die NH_3 -Messung erfolgte nach der Dräger Tube Methode angelehnt an *Pacholski* (2003). Mit einem Dräger X-Act 5000 (Drägerwerk, Lübeck, Deutschland) wurden mit Dräger Röhrrchen die NH_3 -Emissionen über 75 cm Abstand (Reihenweite) auf 4 Messpunkten vollautomatisch erfasst (Abb. 19). Dabei wurde die Messapparatur so platziert, dass repräsentativ die NH_3 -Emissionen über eine Maissaatreihe erfasst werden konnten. Es wurden für die Beprobung Dräger Röhrrchen im Messbereich von 0,35 – 3,0, 2,0 – 30 und 5,0 – 100 ppm NH_3 eingesetzt.

In den ersten 4 Stunden nach der Substratapplikation wurde in einstündigen Intervallen, im Zeitraum 4 – 24 Stunden nach Ausbringung in 4 stündigen Intervallen gemessen. Danach wurde die Beprobungszeit bis 36 Stunden nach der Applikation auf 6 stündige Intervalle ausgedehnt.

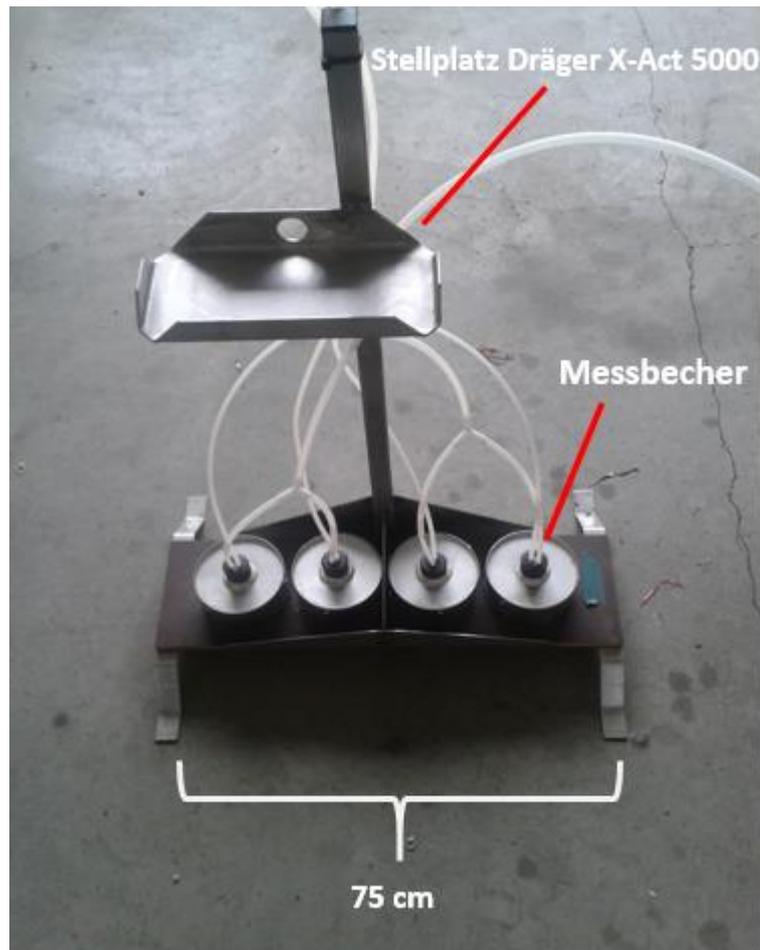


Abbildung 19: Dräger Tube Methode modifiziert für Maisreihenversuche

Die N_2O -Probenahme erfolgt mit Hauben, die für die Probenahme auf einen Rahmen gesetzt werden (Closed Chamber Methode) (Leick 2003 und Smith et al. 1995) (Abb. 20). Über einen definierten Zeitraum (0, 20, 40 und 60 min nach Haubenschluss) werden Gasproben aus der Haube gesammelt und später im Labor mit einem Gaschromatographen (GC 2014, Shimadzu, Duisburg, Deutschland) auf ihren N_2O -Gehalt untersucht. Weitere Informationen zur Probenanalytik sind der Veröffentlichung „Greenhouse gas emissions of organic fertilizers: Soil, slurry and application effects“ zu den Laborversuchen zu entnehmen (siehe Kapitel 4 Öffentlichkeitsarbeit).



Abbildung 20: Die N₂O-Probenahme erfolgt mit der Closed Chamber Methode

Die Probenahme erfolgte über einen Zeitraum von 68 Tagen, wobei in den ersten 14 Tagen täglich beprobt wurde. Danach wurden die Probenahmen in länger werdenden Intervallen durchgeführt (Tab. 12). Die Probenahmen erfolgten immer zur selben täglichen Uhrzeit.

Tabelle 12: Zeitpunkte der N₂O-Probenahme

Nr.	Datum
1	17.04.2014
2	18.04.2014
3	19.04.2014
4	20.04.2014
5	21.04.2014
6	22.04.2014
7	23.04.2014
8	24.04.2014
9	25.04.2014
10	26.04.2014
11	27.04.2014
12	28.04.2014
13	29.04.2014
14	30.04.2014
15	05.05.2014
16	08.05.2014
17	13.05.2014
18	15.05.2014
19	20.05.2014
20	22.05.2014
21	27.05.2014
22	03.06.2014
23	11.06.2014
24	17.06.2014
25	25.06.2014

Die NH₃-Messung zeigt, dass bei sofortiger Einarbeitung oder Injektion keine messbaren NH₃-Emissionen freigesetzt werden. Durch die Injektion werden die NH₃-Emissionen nahezu vollständig reduziert. Bei den Schleppschlauchvarianten bindet sich das freigesetzte Ammoniak aus dem Substrat bei der Durchmischung mit dem Boden, so dass auch hier keine NH₃-Konzentrationen über denen der Hintergrundkonzentrationen festgestellt werden können. Die gemessenen N₂O-Emissionen zeigen drei Peaks (Tag 10 – 20; Tag 25 – 35 und Tag 45 – 60), wobei zwischen den Versuchsvarianten keine signifikanten Unterschiede in der Höhe der N₂O-Emissionen festgestellt werden können. Die mit DMPP versetzte Gülle setzt tendenziell die geringsten N₂O-Emissionen und die Injektion mit zwei übereinander liegenden Güllebändern die höchsten N₂O-Emissionen frei (Abb. 21).

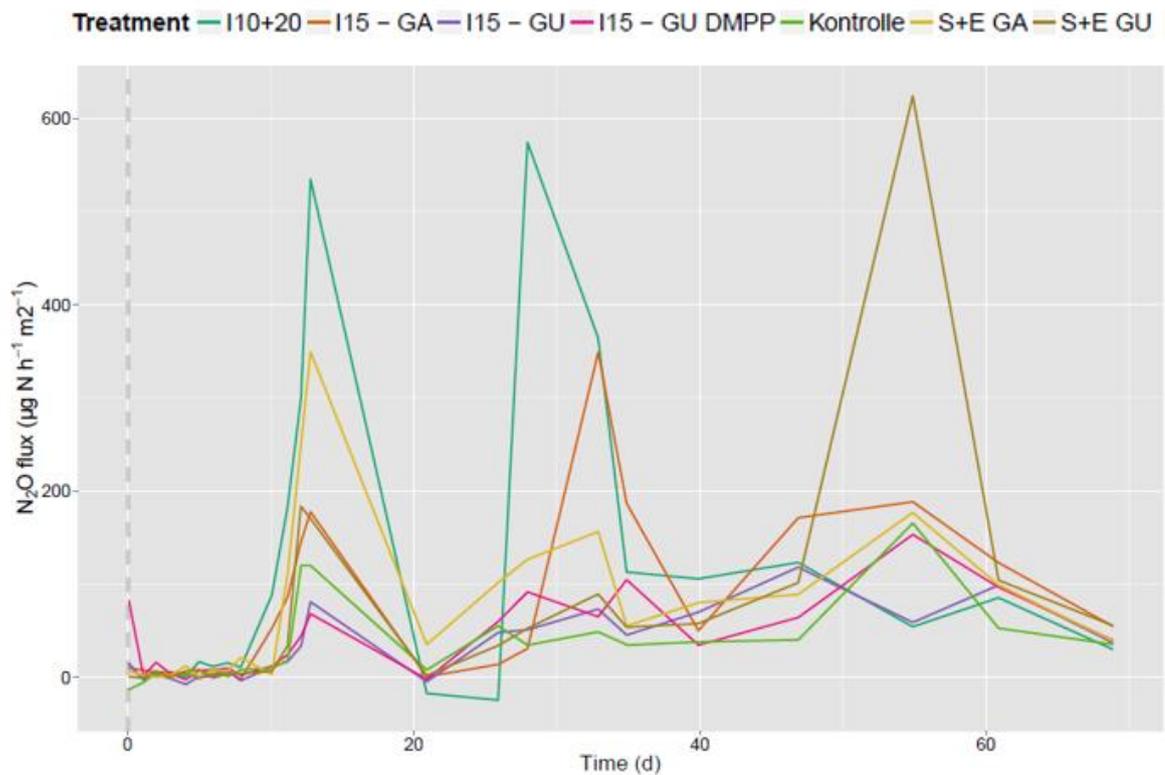


Abbildung 21: N₂O-Freisetzung im Zeitverlauf von der Substratausbringung bis zu Tag 68 nach Versuchsanlage

Die CO₂-Emissionen zeigen direkt nach der Substratausbringung einen Peak, fallen zwischenzeitlich wieder ab und steigen dann vom 10. – 68. Tag nach Versuchsstart kontinuierlich an (Abb. 22).

Der CH₄-Fluss zeigt einen Peak direkt nach der Gülle und Gärrest Applikation, was auf die Freisetzung von im Substrat enthaltenen CH₄ zurückzuführen ist. Danach fallen die CH₄-Flüsse ab und der Boden wird ein CH₄-Sink (Abb. 23).

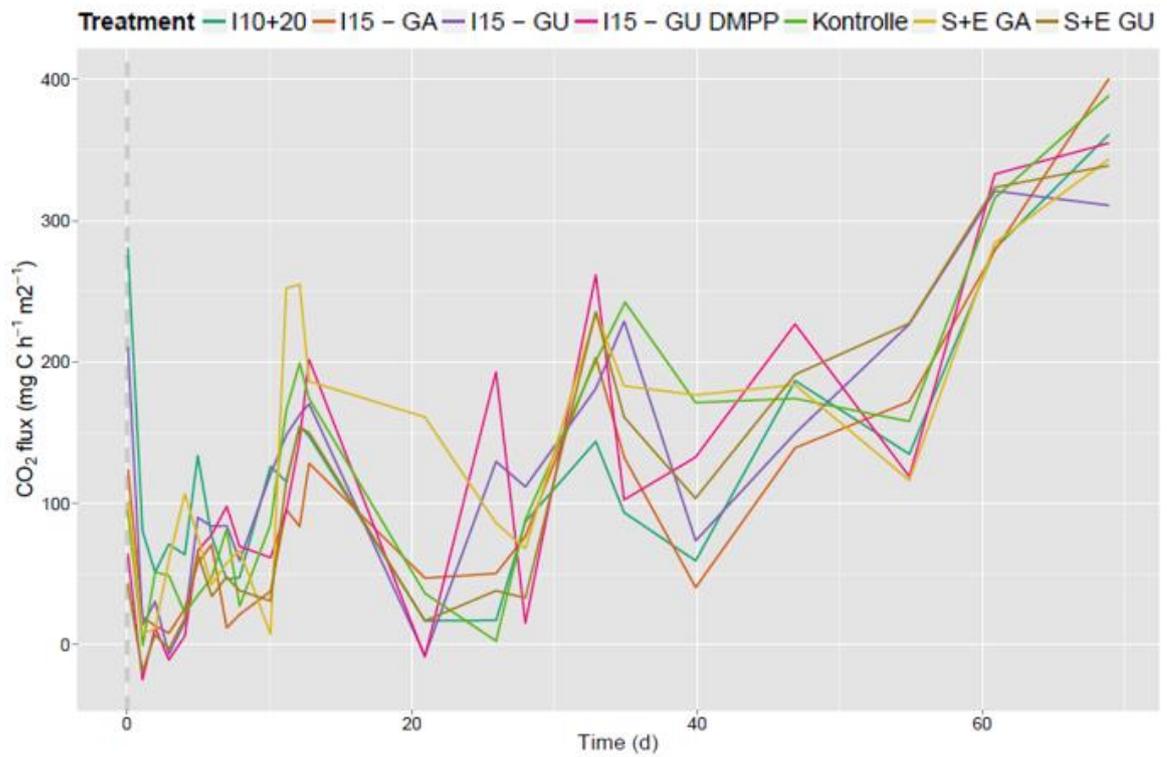


Abbildung 22: CO₂-Emissionen über den Zeitraum von 68 Tagen auf dem Standort Rieste

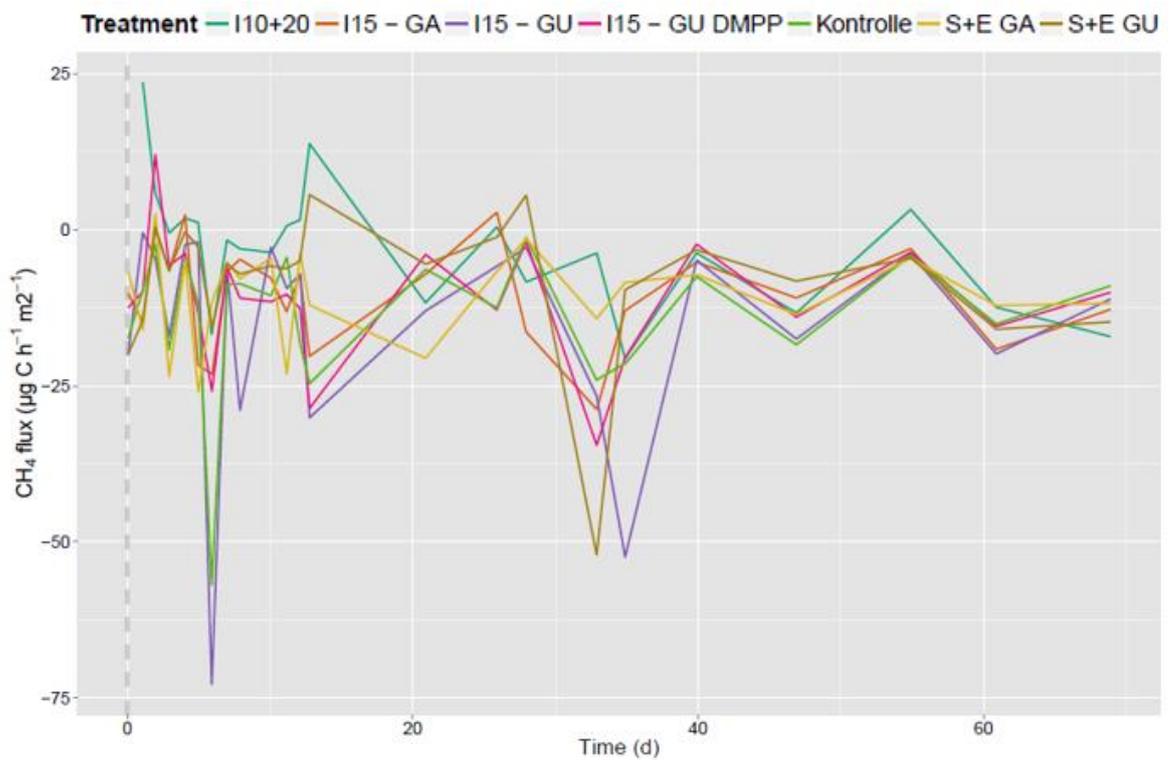


Abbildung 23: CH₄-Emissionen über einen Zeitraum von 68 Tagen auf dem Standort Rieste

Der Witterungsverlauf zeigt während des gesamten Versuches zwei stärkere Niederschlagsereignisse mit einem Niederschlag über 20 mm/d (Abb. 24). Die durchschnittliche Tagestemperatur ist während des Versuchsverlaufs kontinuierlich angestiegen (Abb. 25).

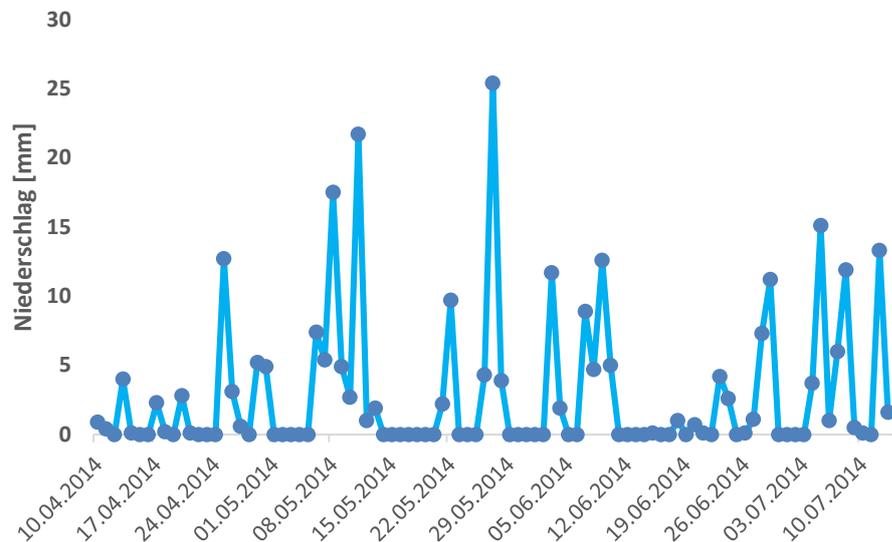


Abbildung 24: Niederschlag im Tagesdurchschnitt (mm) am Standort Rieste



Abbildung 25: Temperatur im Tagesdurchschnitt (°C) am Standort Rieste

Mit steigender Lufttemperatur nehmen die CO₂-Emissionen zu. Nitrifikation und Denitrifikation reagieren auf Niederschlagsereignisse. Nach erhöhten Niederschlägen (> 20 mm/d) kommt es zeitversetzt zu einem Anstieg der N₂O-Emissionen.

Die Frischmasse Erträge aller Versuchsvarianten liegt zwischen 537 und 620 dt ha⁻¹, die Trockenmasseerträge zwischen 197 und 225 dt ha⁻¹. Die unterschiedlichen Substratapplikationstechniken zeigen keine signifikanten Einflüsse auf die Erträge (Abb. 26). Die ungedüngte Kontrolle zeigt geringere Erträge, liegt aber dennoch auf einem Ertragsniveau, das sich nicht von den anderen Varianten unterscheidet.

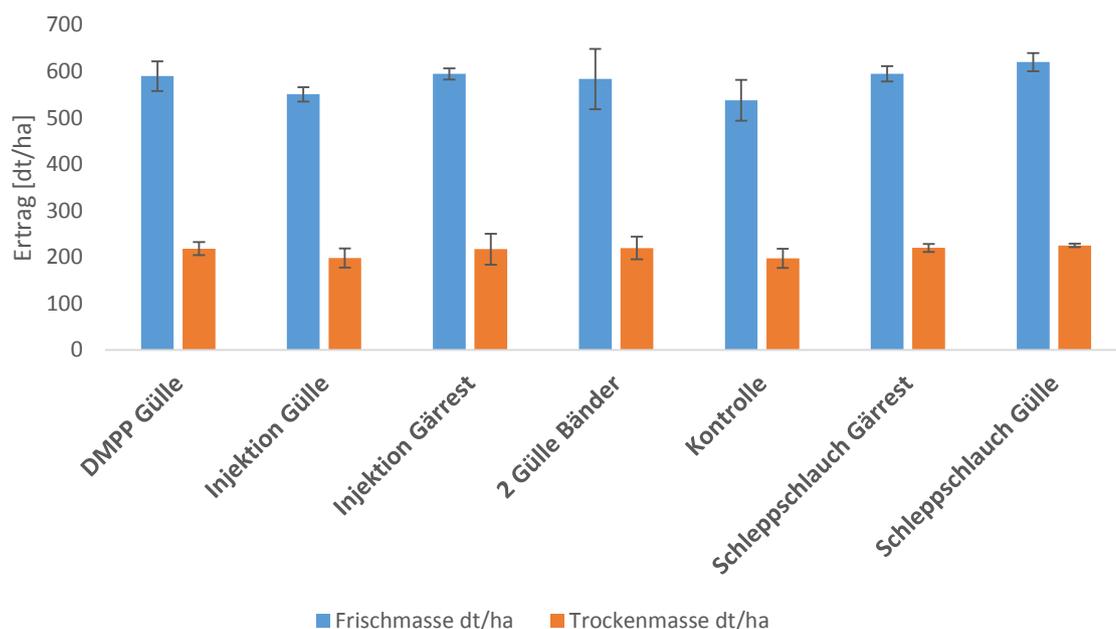


Abbildung 26: Maiserträge Frischmasse und Trockenmasse aller Varianten im Überblick

Die Erntequalität in diesem Feldversuch wird nicht von den unterschiedlichen Substratapplikationstechniken beeinflusst (Abb. 27). Neben der Netto-Energie-Laktation (NEL) wurden weitere Qualitätsparameter (Rohfaser, Stärke und Rohprotein) untersucht, bei denen sich auch keine signifikanten Variantenunterschiede ergeben (Abb. 28 – 30).

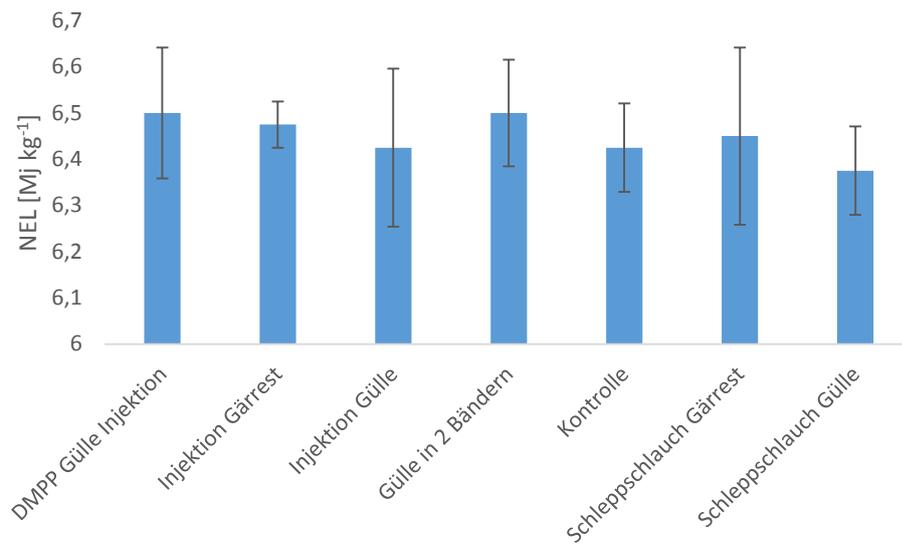


Abbildung 27: Netto-Energie-Laktation (NEL) Gehalte der unterschiedlichen Varianten im Überblick

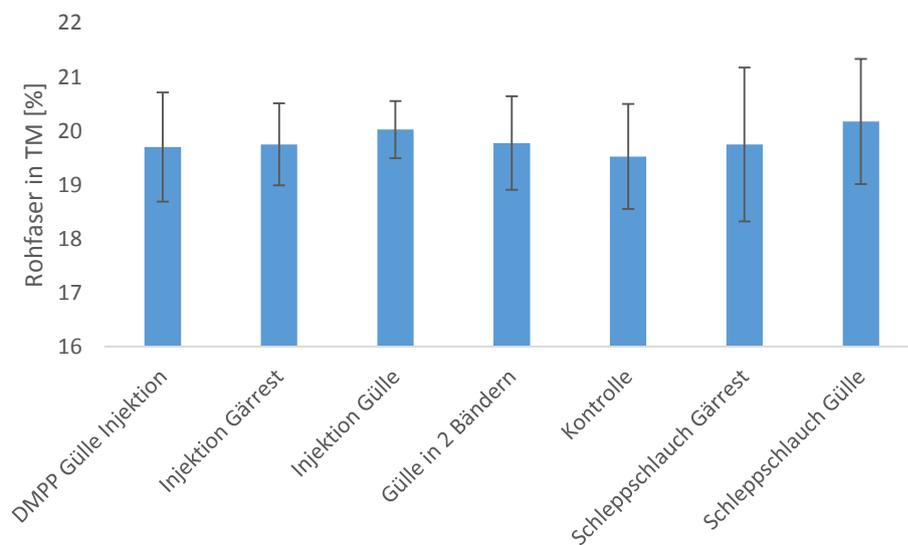


Abbildung 28: Rohfasergehalte der unterschiedlichen Varianten im Überblick

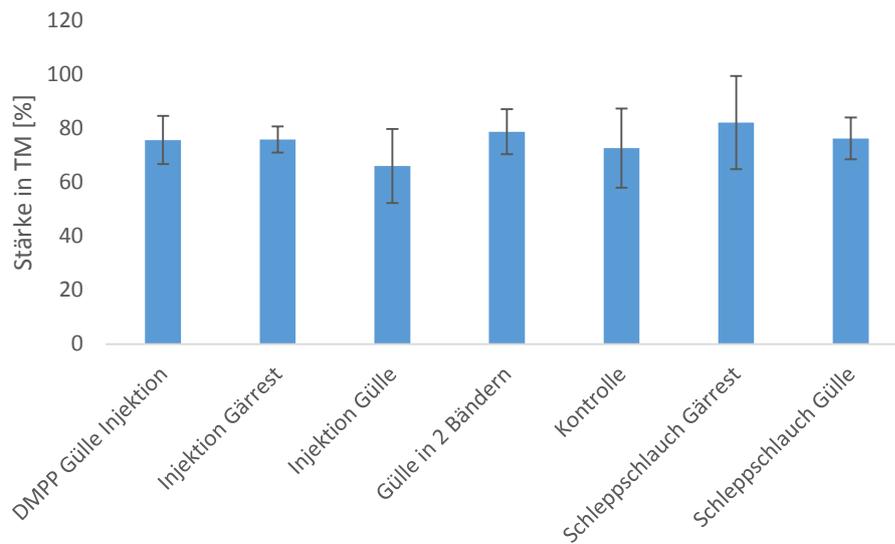


Abbildung 29: Stärkegehalte der unterschiedlichen Varianten im Überblick

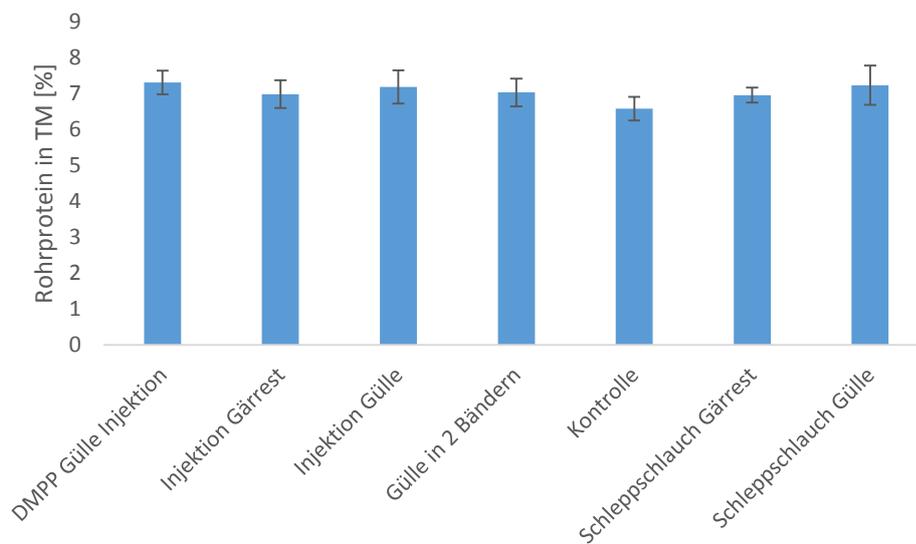


Abbildung 30: Rohrproteingehalte der unterschiedlichen Varianten im Überblick

Direkt nach der Ernte wurde der Standort auf seine N_{\min} -Gehalte (0 – 30 cm) untersucht. In der Tendenz zeigt die Variante mit Zusatz von DMPP die höchsten N_{\min} -Gehalte nach der Ernte und die Schleppschauch Variante mit Gülle die geringsten (Abbildung 31).

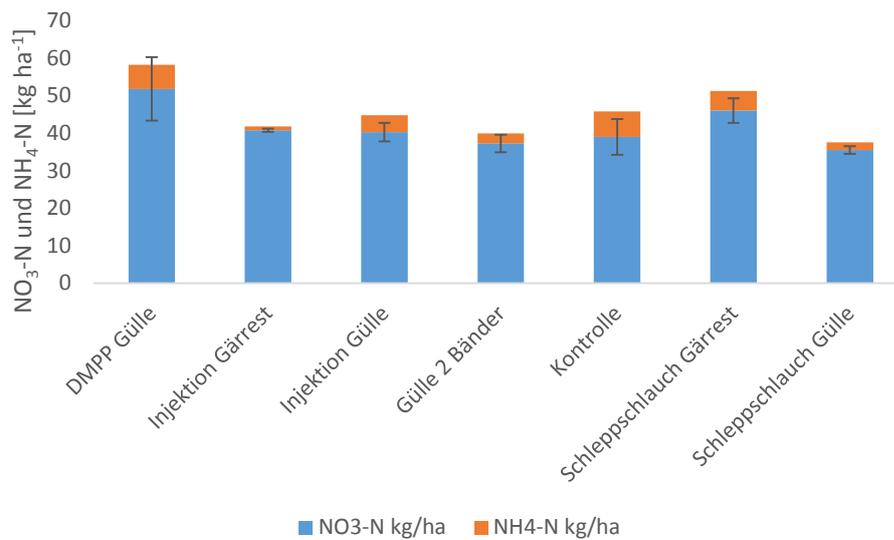


Abbildung 31: N_{min}-Gehalte aller Versuchsvarianten direkt nach der Ernte

Zwischen den Varianten sind wegen der hohen N-Nachlieferung keine signifikanten Unterschiede des N_{min}-Gehalts festzustellen.

2.4 Arbeitspaket AP4 - Datenaufbereitung aus Technikums- und Feldversuch

Die aufbereiteten Daten aus den Labor- und Feldversuchen können direkt unter den Punkten Arbeitspaket AP2 und Arbeitspaket AP3 eingesehen werden. Die Ergebnisse aus den Versuchen werden später in Kapitel 3 dieses Berichtes diskutiert.

2.5 Arbeitspaket AP6 und AP7 - Entstehung von Emissionen (NH₃; N₂O) bei der Unterfußinjektion und Einfluss der Applikationstechnik auf Ertrag und Erntequalität im Feldversuch

Die Arbeitspakete AP6 und AP7 (Feldversuch und Auswertung der Ergebnisse 2015) wurden nicht durchgeführt, weil das gesamte Forschungsvorhaben auf zwei Jahre - im ersten Jahr Laborversuch und im zweiten Jahr Feldversuch – verkürzt wurde. Dennoch ergeben sich aus den Arbeitspaketen AP3 und AP5 (Feldversuch und Auswertung der Ergebnisse 2014) Aussagen für die Emissionsfreisetzung bei der Unterfußinjektion von Wirtschaftsdüngern im Feld.

2.6 Arbeitspaket AP8 - Verfahrensbewertung

Die Verfahrensbewertung wird im Kapitel 3 dieses Berichtes dargestellt.

3. Diskussion

3.1 Versuchsergebnisse Laborversuch

N₂O-Emissionen

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die größten Unterschiede bei den N₂O-Emissionen nach der Wirtschaftsdüngerausbringung zwischen den drei untersuchten Böden vorliegen. Die Unterschiede zwischen unterschiedlichen Ausbringungstechniken sind hingegen eher zu vernachlässigen. Die erzielten Ergebnisse stehen im Einklang mit *Clemens et al. (1997)* sowie *Thomsen et al. (2010)*, die in ihren Untersuchungen auch keine signifikanten Unterschiede zwischen unterschiedlichen Applikationstechniken feststellen konnten.

Unterschiede in den N₂O-Freisetzungsvorgängen verschiedener Böden können u.a. durch unterschiedliche C-Gehalte der Standorte erklärt werden. Ein enges C/N-Verhältnis fördert die N₂O-Freisetzung (Velthof et al. 1992, Velthof et al. 2003 und Clemens et al. 1997).

Mkhabela et al. (2009) konnten zeigen, dass der Standort in den meisten Untersuchungen einen größeren Einfluss auf die N₂O-Freisetzung hat, als die Applikationstechnik.

Im Gegensatz hierzu konnten *Flessa und Beese (2000)* und *Fanguero et al. (2010)* aufzeigen, dass es einen Zusammenhang zwischen Injektionstiefe und N₂O-Freisetzung gibt. *Thomsen et al. (2010)* konnten in einem zweijährigen Feldversuch im ersten Versuchsjahr Unterschiede zwischen Wirtschaftsdüngerinjektion und Schleppschlauchausbringung feststellen. Im zweiten Versuchsjahr auf demselben Versuchsstandort wurden diese Unterschiede nicht festgestellt. Das zeigt, dass der Faktor Standort den größten möglichen Effekt auf die Emissionsfreisetzung hat.

Hierbei ist allenfalls darauf zu verweisen, dass es sich in der von uns durchgeführten Studie um einen reinen Laborversuch handelt, dessen Ergebnisse nur mit Einschränkungen auf Praxisversuche übertragbar sind. Beispielsweise spielen standortbedingte klimatische Einflüsse im Freiland eine viel größere Rolle als in einem Laborversuch.

Methan- und Kohlenstoffdioxidemissionen

Die hohen CH₄-Freisetzungen in der ersten Phase nach Versuchsstart können durch das Düngersubstrat und dessen C_{org}-Anteil erklärt werden (Chadwick und Pain 1997). Die erhöhten CO₂-Emissionen in den ersten 24 – 48 Stunden nach Versuchsbeginn sind unter Umständen durch die Bodenstörung durch Bodenbearbeitung zu erklären (Bertora et al. 2008).

Kohlenstoff und Stickstoffgehalt im Boden

Die Untersuchung der C- und N-Gehalte aller Varianten nach Versuchsende zeigt keinen Unterschied zwischen einzelnen Bearbeitungsvarianten. Nur zwischen den drei untersuchten Böden können Unterschiede festgestellt werden. Das zeigt, dass auch hier nur die verschiedenen Ausgangsböden aber nicht die Bearbeitung und Düngungstechnik in dem durchgeführten Versuch für Boden C- und N-Gehalt verantwortlich sind.

N_{min}-Gehalte im Boden

Die N_{min}-Gehalte der drei Standorte unterscheiden sich auf Grund unterschiedlicher Standorthistorien und Bodenzusammensetzungen. Die N_{min}-Gehalte im Boden zeigen zwischen einzelnen Behandlungen keine signifikanten Unterschiede.

3.2 Versuchsergebnisse Feldversuch

Der hiesige Feldversuch im Jahr 2014 zeigt, dass es zwischen den Applikationstechniken bezüglich der N₂O-Freisetzung keine signifikanten Unterschiede gibt. Durch die in Reihen konzentrierte Ablage von Gülle und Gärrest bei der Injektion entstehen so genannte „hot spots“ die zu einer erhöhten Nitrifikation und Denitrifikation führen (Flessa und Beese 2000). Bei der Injektion in zwei Etagen übereinander werden zwei „hot spots“ gebildet, die gegenüber allen anderen Versuchsvarianten tendenziell zu erhöhten N₂O-Emissionen führen. Die auftretenden N₂O-Peaks sind nach Niederschlägen besonders erhöht, weil sich die

Bedingungen für die Nitrifikation und Denitrifikation verbessern. Des Weiteren begünstigen im Feldversuch auch die steigenden Lufttemperaturen mit fortschreitender Versuchsdauer (ab Tag 30 nach Versuchsbeginn) die N₂O-Freisetzung (Davidson 1992 und Goodroad und Keeney 1984). Neben der Applikationstechnik hat der Boden (Feldkapazität, C-Gehalt, N-Gehalt etc.) einen Einfluss auf die N₂O-Freisetzung. Bei dem ausgewählten Standort handelt es sich um einen lehmigen Sand (83 % Sand, 8 % Schluff, 6 % Ton) der auf Grund seiner geringen potentiellen Feldkapazität nur ein geringes N₂O Freisetzungspotential aufweist (Velthof et al. 2003, Flessa 2010 und De Klein et al. 2003). Dazu kommen auch die geringen Niederschläge im Frühjahr und Frühsommer des Jahres 2014, die eine N₂O-Bildung nicht gefördert haben. Der Nitrifikationshemmer DMPP zeigt bezüglich der N₂O-Emissionen im Feldversuch nur eine geringe Wirkung, weil die freigesetzten Emissionen ohne DMPP sehr gering sind und damit ein Minderungspotential sehr begrenzt ist (Küstermann et al. 2013; Freney 1997 und Menendez et al. 2012).

Die **Injektion von Gülle in zwei Etagen** übereinander erhöht tendenziell N₂O-Emissionen und führt auf dem untersuchten Standort nicht zu einer verbesserten Pflanzenentwicklung oder zu Ertragssteigerungen. Zur Prüfung der Nährstoffeffizienz sollten Versuche mit einer Injektion in zwei Etagen übereinander auf einem nährstoffarmen Standort wiederholt werden.

Die Entstehung von CO₂- und CH₄-Emissionen sind abhängig von der Applikation (Schleppschlauch + Einarbeitung und Injektion) (Chatskikh und Olesen 2007) und vom Substrat (Gülle und Gärrest) (Chadwick und Pain 1997). Die Applikation fördert durch die Bodendurchlüftung die CO₂-Freisetzung. Das Substrat setzt in den ersten Stunden nach der Ausbringung CH₄ frei. Die zwischenzeitlichen Peaks sind auf Witterungseinflüsse (Lufttemperatur und Niederschlag) zurückzuführen. Nach Niederschlagsereignissen ist der Boden eine Methansenke, es kommt im Boden zu einem Porenschluss und Methan kann nicht aus dem Boden diffundieren

Der Methanfluss in den Boden ist von biotischen und abiotischen Faktoren abhängig. Die Diffusion von Methan in den Boden wird durch physikalische Prozesse gesteuert. Durch methanotrophe Bakterien, die Methan aus der Atmosphäre aufnehmen, gelangt Methan durch Diffusion in den Boden. Nach Niederschlägen ist die CH₄-Aufnahme in den Boden auf Grund der reduzierten

Diffusion begrenzt. Mit zunehmender Trockenheit nimmt die CH₄-Aufnahme des Bodens bis zu einem Maximum zu. Die CH₄-Aufnahme des Bodens durch methanotrophe Bakterien nimmt mit steigender Trockenheit ab, so dass die CH₄-Aufnahme bei Trockenstress abnimmt (Mosier et al. 1997 und Kolb 2011).

Die Untersuchungen von *Clemens et al.* (1997), *Thomsen et al.* (2010) und *Mkhabela et al.* (2009) zeigen, dass der Unterschied der Emissionsfreisetzung zwischen unterschiedlichen Applikationstechniken sehr gering ist und der Zusatz von Nitrifikationshemmern zum Wirtschaftsdünger und Standorteinflüsse einen deutlich größeren Einfluss auf die Freisetzung von N₂O-Emissionen haben als die Applikationstechnik.

Die Erträge (Frischmasse 537 - 620 dt ha⁻¹) im Feldversuch liegen auf Grund der sehr guten Witterungsbedingungen über den Durchschnittserträgen der letzten Jahre (Silomais Frischmasse: 474 dt ha⁻¹, Durchschnitt 2011 – 2013 in Niedersachsen) (Maiskomitee 2014). Die unterschiedlichen Applikationstechniken zeigen hier keinen Einfluss auf die Erträge, auch weil der ausgewählte Boden hoch mit Nährstoffen, insbesondere Phosphat, Kalium und Magnesium (Gehaltsklasse D) versorgt ist. Eine langfristige organische Düngung des Standorts sorgt für eine kontinuierliche Stickstoffnachlieferung. Bei den untersuchten Qualitätsparametern sind auf Grund der optimalen Nährstoffversorgung keine Unterschiede zu erkennen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass auf gut bis sehr gut mit Nährstoffen versorgten Standorten auf Grund hoher N-Nachlieferung die N-Düngung reduziert werden kann, ohne dass größere Ertragseinbußen entstehen.

Bei der Betrachtung der N_{min}-Gehalte kann herausgestellt werden, dass es keinen Einfluss der Applikationstechnik - Injektion tief, flach, in zwei Etagen und Schleppschlauch mit sofortiger Einarbeitung - auf den N_{min}-Gehalt gibt. Bei den Varianten mit Zusatz des Nitrifikationshemmers DMPP können höhere Ammoniumgehalte am gesamten N_{min}-Gehalt festgestellt werden. Damit kann auch hier die Wirkung des Nitrifikationshemmers DMPP auf den N_{min}-Gehalt einwandfrei nachgewiesen werden. Bei höheren Rest N_{min}-Gehalten, die durch den Einsatz von Nitrifikationshemmern im Boden sind, besteht das Risiko erhöhter Nitrat auswaschungen über den Winter. Deshalb sollten unbedingt Zwischenfrüchte angebaut werden, damit der Stickstoffüberschuss aus dem Herbst effizient genutzt

werden kann. Durch erhöhte Stickstoffgehalte im Boden, die über den Winter nicht genutzt werden, bestehen auch Risiken erhöhter N_2O -Emissionen. Besonders in der Veredelungsregion Nordwestdeutschland können Nitrifikationshemmer auf Grund von Stickstoffüberschüssen und ohnehin schon erhöhten Stickstoffgehalten im Boden zu negativen Effekten führen.

Eine Einarbeitung oder die direkte Injektion von Wirtschaftsdüngern sollte auf jeden Fall durchgeführt werden, wenn die Standortbedingungen dies zulassen. Die Injektion von flüssigen organischen Wirtschaftsdüngern hat das Ziel, NH_3 -Verluste bei der Ausbringung zu reduzieren, die im Dünger enthaltenen Nährstoffe besser zu verteilen und näher an die Pflanzenwurzel zu platzieren. Mit Gülle und Gärrest als Unterfußdünger lassen sich Mineraldünger einsparen. Somit kann die betriebliche N- und P-Bilanz entlastet und die Nährstoffeffizienz gesteigert werden. Damit trägt das Verfahren zum Boden-, Klima-, und Wasserschutz bei (Anonym 2008 und Laurenz 2012).

3.3 Evaluierung methodischer Versuchsansätze

Zusätzlich zu der Messung von N_2O -, CO_2 - und CH_4 -Emissionen wurde in allen Untersuchungen versucht die NH_3 -Emissionen nach der Applikation von Gülle und Gärrest mit unterschiedlichen Applikationstechniken zu messen.

In einem ersten Schritt wurden zur Beprobung von NH_3 -Emissionen im Laborversuch Absorptionsfallen ($0,01 \text{ mol H}_2\text{SO}_4$) eingesetzt und ein Luftdurchfluss von 20 ml/min in der Mikrokosmenanlage eingestellt. Der Durchfluss von 20 ml/min wurde auf Grund der N_2O -, CO_2 - und NH_4 -Probenahme ausgewählt, die gegenüber höheren Luftdurchflüssen sehr empfindlich reagieren kann (Flessa und Beese 2000). Die NH_3 - bzw. NH_4 -Analytik wurde mit einem Segmented Flow Analysis System (SFAS) (SKALAR, Breda NL) und parallel dazu mit einer NH_3 -Elektrode (Orion star A214, thermo science fisher, Waltham USA) durchgeführt, so dass systematische Fehler ausgeschlossen werden konnten. In dieser Versuchsanordnung konnten bei den gedüngten Varianten gegenüber der ungedüngten Kontrolle keine erhöhten NH_3 Emissionen festgestellt werden. Mögliche Fehlerursachen – NH_4 -Absorption in den luftführenden Leitungen und im Mikrokosmos – wurden überprüft, konnten aber als Fehlerquelle ausgeschlossen werden. Eine NH_3 -Aufstauung kann vernachlässigt werden, da zu keinem späteren Zeitpunkt sprunghaft ansteigende NH_3 Emissionen festgestellt werden konnten.

Nach *Kissel et al.* (1977) muss für eine ungestörte NH_3 Beprobung die im Headspace der Mikrokosmen befindliche Luft 15-mal pro Minute ausgetauscht werden. In den vorliegenden Untersuchungen wurden diese sehr hohen Luftdurchsätze auf Grund der parallel statt findenden N_2O -, CO_2 - und CH_4 -Probenahme nicht gewährleistet. Dies ist eine Ursache für die fehlerhafte Beprobung.

Des Weiteren ist davon auszugehen, dass NH_3 -Verluste bei der Gülle und Gärrestausrückführung nach Einarbeitung oder Injektion sehr gering sind. Es kann angenommen werden, dass hierdurch keine Variantenunterschiede sichtbar werden und sich die Varianten in der Ausprägung der freigesetzten NH_3 -Emissionen nicht signifikant unterscheiden. Dies konnte hier auch von den im Feldversuch erzielten Ergebnissen bestätigt werden, die mit einer anderen Untersuchungsmethode gewonnen wurden.

Im Nachgang an die Mikrokosmenversuche wurde Gülle in einem Mikrokosmos oberflächlich ausgebracht und eingearbeitet, in einer zweiten Variante wurde die oberflächlich applizierte Gülle nicht eingearbeitet. Die NH_3 -Emissionsmessung erfolgte in diesem Fall photoakustisch mit einem online Messsystem von California Analytical Instruments Inc. (INNOVA 1312, Kalifornien, Vereinigte Staaten von Amerika). Bei diesem System werden 5 l Luft innerhalb von 1,5 min angesaugt und analysiert. In diesem Fall konnten NH_3 -Konzentrationen von 52 $\text{mg}/\text{m}^3/\text{min}$ (Applikation mit sofortiger Einarbeitung) bis 107 $\text{mg}/\text{m}^3/\text{min}$ (oberflächliche Applikation ohne Einarbeitung) gemessen werden. Das zeigt, dass bei wesentlich höheren Durchflüssen NH_3 -Messungen zu Ergebnissen führen und Variantenunterschiede sichtbar sind.

Eine Messung mit dem photoakustischen System wäre auf Grund der sehr hohen Anzahl an Versuchsgliedern im Mikrokosmenversuch nicht umsetzbar gewesen. Die mit der Absorptionsfalle erzielten Ergebnisse (NH_3 -Messung) aus dem Mikrokosmenversuch sind nicht für weitere Berechnungen nutzbar. In den beiden durchgeführten Laborversuchen konnte festgestellt werden, dass die Messung von NH_3 -Emissionen mit Absorptionsfallen im Mikrokosmenversuch auf Grund der äußeren Umstände - geringe Luftaustauschrate und sehr geringe Beprobungsfläche - nur schwierig möglich ist.

Für die Emissionsmessung im Mikrokosmenversuch sollte die Beprobung von N₂O-, CO₂- und CH₄- von der NH₃-Beprobung getrennt werden. Die Einstellung von angepassten Luftaustauschraten für N₂O, CO₂ und NH₃ wäre dann möglich. NH₃- und N₂O-, CO₂- und CH₄-Messungen könnten nacheinander mit unterschiedlichen Durchflussgeschwindigkeiten durchgeführt werden. Eine Alternative wäre der Einsatz der oben genannten photoakustischen Messtechnik in Folgeversuchen. Die Erfassung der NH₃-Emissionen im Feldversuch erfolgte mit der Drägertube-Methode (Pacholski 2003). Die im Feldversuch durchgeführte Messmethodik zur Erfassung von NH₃-Emissionen wurde in Vorversuchen überprüft, bei der oberflächlichen Substratausbringung wurden NH₃-Emissionen erfasst. Bei einer Substratinjektion wurden mit dieser Methode keine NH₃-Emissionen gemessen. Im anschließend durchgeführten Feldversuch wurden keine erhöhten NH₃-Emissionen der gedüngten gegenüber der ungedüngten Variante festgestellt. Durch die Injektion und die sofortige Einarbeitung nach Applikation wurde kein Ammoniak freigesetzt, weil NH₃ in Form von Ammonium an Bodenpartikel gebunden und somit nicht gasförmig freigesetzt wurde.

3.4 Praxisnaher Ansatz zur ökonomischen Bewertung der Verfahren

In dieser Arbeit wurde zum ersten Mal der Effekt von zwei Ausbringungstiefen von Wirtschaftsdüngern hinsichtlich der Emissionsfreisetzung und Stickstoffgehalte im Boden in mehreren Labor- und einem Feldversuch untersucht. Die Substratinjektion in 15 bzw. 20 cm Tiefe zeigt keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Emissionsfreisetzung, mit Ausnahme des Anmoorbodens. Werden diese Ergebnisse auf die Praxis bezogen sollte aus ökonomischen Gesichtspunkten eine Injektion mit möglichst flacher Tiefe durchgeführt werden, um den Kraftstoffverbrauch und die Bodenverdichtung gering zu halten. Allerdings sollte auch beachtet werden, dass eine Ablage unter 12 cm (ab Bodenoberkante) nicht sinnvoll erscheint, weil der Maiskeimling durch die zu flache Ablage Salzschäden erleiden kann (Laurenz 2012).

Nach *Uppenkamp* (2007) kann mit einem Kraftstoffverbrauch von 0,5 – 1,5 l/ha pro cm Bodentiefe ausgegangen werden. Somit könnten bei einer Verringerung der Injektionstiefe von 20 auf 12 cm zwischen 4 und 12 l/ha Kraftstoff (5,2 – 15,6 €, Stand Juli 2014) eingespart werden. Mit einer tiefen Injektion kommt es zu erhöhten

Verdichtungen, die neben einem hohen Zugkraftbedarf gegen Injektionstiefen > 15 cm sprechen.

Für die Applikation von Wirtschaftsdüngern ist bei der Übertragung der Ergebnisse aus den eigenen Studien auf die praktische Landwirtschaft ein Kosten-Nutzen Vergleich angebracht. Zum einen muss die Injektion im Vergleich zu anderen Applikationstechniken betrachtet werden. Zum anderen stellt sich bei einem solch innovativen Verfahren die Frage, in wie weit die Nährstoffeffizienz - mineralische Düngemittel einsparen, durch Wirtschaftsdünger ersetzen und gasförmige Stickstoffverluste reduzieren – gesteigert werden kann.

Zur Veranschaulichung monetärer Vorteile einzelner Applikationsverfahren wurde unter den Annahmen einer Gülleausbringungsmenge von 30 m³/ha und einer Hof-Feld Entfernung < 2 km die Vorzüglichkeit der Schleppschlauchausbringung mit sofortiger Einarbeitung sowie der Injektion von Wirtschaftsdüngern im Maisanbau berechnet (Tab. 13). Die Substratinjektion in zwei Etagen übereinander wurde auf Grund fehlender langfristiger Erfahrungsgrößen nicht mit in diese Berechnung einbezogen. Bei beiden Varianten wird von einem durchschnittlichen Schlepper (176 kW) ausgegangen. Es wird ein Güllefass mit 24 – 30 m³ Fassungsvermögen mit einem Schleppschlauch mit 24 m Arbeitsbreite eingesetzt. Die Einarbeitung erfolgt beim Schleppschlauch innerhalb von 4 Stunden nach der Ausbringung mit einem Grubber (6 m Arbeitsbreite). Bei dem Injektor wird von einem Güllefass (30 m³) mit angebautem Unterfußinjektor (6 m Arbeitsbreite und 12 cm Injektionstiefe) ausgegangen. Es wird bei beiden Verfahren Mastschweinegülle (Mastschweinegülle 3 %TS, 4,2 kg/m³ Gesamt N, 3,3 kg/m³ NH₄-N, 1,7 kg/m³ P₂O₅, 3 kg/m³ K₂O, 0,7 kg/m³ MgO) ausgebracht. Da nur die Ausbringungsverluste verglichen werden sollen, wurde auf die Umrechnung der Düngewirkung in Mineraldüngeräquivalente verzichtet. Die Berechnungen beinhalten die Arbeitserledigungskosten (Gehälter, fixe und variable Maschinenkosten), sowie die Mehrwertsteuer.

Tabelle 13: Verfahrenskosten Schleppschauch und Injektion (Kosten nach Janssen 2014)

Kostenverursacher	Schleppschauchausbringung	Injektion (12 cm)
Arbeitserledigungskosten	61,60 €	51,00 €
Grubber	20,00 €	-
Injektor	-	20,00 €
MwSt. [19 %]	15,49 €	9,69 €
Gesamtpreis [ha]	97,09 €	80,69 €

Nach *KTBL* (2005) kann für die Injektion mit Arbeitserledigungskosten von 101,22 €/ha und bei der Schleppschauchapplikation mit anschließender Einarbeitung mit Kosten von 94,79 €/ha gerechnet werden. Hierbei wird von einem 20 ha Schlag ausgegangen. Die Kosten für das Schleppschauchverfahren von *KTBL* (2005) und *Janssen* (2014) sind vergleichbar. Die Kosten von *Janssen* (2014) für die Applikation mit einem Unterfußgerät sind niedriger als die vom *KTBL* (2005) berechneten Kosten, weil sich gegenüber *KTBL* (2005) technische Weiterentwicklungen der Geräte ergeben haben und die fixen Kosten günstiger geworden sind. Bei den variablen Kosten muss mit einbezogen werden, dass enormer Druck für Lohnunternehmer herrscht Leistungen Dienstleistungen günstig anzubieten, so dass die von *Janssen* (2014) gelieferten Kosten günstiger sind als die vom *KTBL* (2005).

Bei der Applikation von Wirtschaftsdüngern müssen neben den Verfahrenskosten auch noch Nährstoffverluste durch NH₃-Ausgasung und ökologische Folgekosten hinzuberechnet werden, die sich aus jedem der betrachteten Verfahren ergeben (Tab. 14). Allerdings sind die ökologischen Folgekosten nur schwierig monetär zu beziffern. Für die Kalkulation wird unterstellt, dass 100 kg NH₄-N ausgebracht werden.

Tabelle 14: Monetäre Bedeutung von NH₃-Verlusten verschiedener Gülleapplikationsverfahren

Applikationstechnik	NH₃-Verluste	KAS N [€/kg]	Verlust [€]
Schleppschauch mit Einarbeitung	17%	1,10 €	18,70 €
Injektion	2%	1,10 €	2,20 €

Es wurden typische gasförmige NH₃-Verluste für einzelne Verfahren angenommen, die dann in ihren Düngerwert umgerechnet wurden (Misselbrook et al. 2002). Des Weiteren muss hinzugezogen werden, dass die Phosphatverfügbarkeit bei der Ausbringung mit dem Schleppschlauch im ersten Jahr nach der Applikation um 50 % schlechter ist als die bei der Injektion. Langfristig ist die Phosphatverfügbarkeit beider Verfahren gleich einzustufen. Dadurch ergeben sich für das Verfahren Schleppschlauch besonders auf phosphatarmen Standorten Abzüge für die Phosphateffizienz. Diese errechnen sich aus dem P-Gehalt der Gülle (1,7 kg/m³) multipliziert mit einer 50 %igen Wirksamkeit und dem aktuellen Marktpreis (Bröker 2011).

Aufgrund geringerer Stickstoffverluste und Vorteilen bei der Phosphatverfügbarkeit hat die Injektion die höchste Vorzüglichkeit (Tab. 15). Das Verfahren Schleppschlauch mit Einarbeitung weist gegenüber der Injektion höhere Verfahrenskosten, durch die Einarbeitung auf. Stickstoffverluste und eine nicht vollständig anrechenbare Phosphatdüngung führen zu weiteren Abschlägen. Auf gut mit Phosphat versorgten Standorten werden Abzüge für eine schlechte P-Verfügbarkeit nach Düngung mit dem Schleppschlauch nicht berücksichtigt.

Tabelle 15: Vorzüglichkeit der Injektion gegenüber dem Schleppschlauch mit sofortiger Einarbeitung

Kostenverursacher	Schleppschlauch mit Einarbeitung	Injektion
Verfahrenskosten	97,09 €	80,69 €
Verluste Stickstoff	18,70 €	2,20 €
Abzüge Phosphat	25,50 €	-
Gesamtkosten	141,29 €	82,89 €

In einem weiteren Verfahrensschritt sollen die Kosten (Verfahrenskosten und Düngemittelkosten) der organischen mit der mineralischen Düngung verglichen werden. Zur Vergleichbarkeit beider Verfahren wird von einer beispielhaften Ausbringung von 30 m³ Gülle ausgegangen. Die Zusammensetzung ist gleich, wie bei der zuvor beschriebenen Gülle. Der Nährstoffgehalt in 30 m³ Gülle wird als Berechnungsgrundlage für die Düngemenge mit mineralischen Düngemitteln genutzt. Bei der Mastschweinegülle wird von einem Mineraldüngeräquivalent von 85 % (79 % im Düngjahr und 6 % im Folgejahr) ausgegangen (LAURENZ 2009). Die im Vergleich zum mineralischen Dünger fehlenden 15 % werden der Wertigkeit der

Gülle abgezogen. Die Rahmenbedingungen sind gleich der vorherigen Rechnung. Die Ausbringung des mineralischen Düngers wird von einem Anhängeschleuderstreuer mit 4,0 m³ Fassungsvermögen und 24 m Arbeitsbreite vorgenommen. Die Ausbringungskosten beziehen sich auf 1280 kg Düngemittel pro Hektar. Die Düngung bezieht sich dabei auf Standorte, die in der Veredelungsregion Nordwestdeutschland liegen und durch hohe Versorgungsstufen des Bodens mit Nährstoffen nicht auf eine jährliche Aufdüngung mit mineralischen Düngemitteln angewiesen sind. Somit kann ein direkter Vergleich zwischen mineralischer und organischer Düngung ohne mineralische Aufdüngung gewährleistet werden. Die schlechtere Phosphatverfügbarkeit wurde auf Grund einer guten Bodenversorgung nicht berücksichtigt. Bei dem Vergleich der reinen Verfahrenskosten zwischen der Ausbringung von organischen und mineralischen Düngemitteln kann gezeigt werden, dass die Ausbringungskosten für mineralische Dünger deutlich geringer sind als die von organischen Düngemitteln (Tab 16).

Tabelle 16: Vergleich der Verfahrenskosten für die Düngemittelausbringung zwischen der mineralischen und der organischen Düngung

Kostenverursacher	organische Düngemittel*		mineralische Düngemittel**
	Schleppschlauch mit Einarbeitung	Injektion	Schleuderstreuer
Verfahrenskosten	97,09 €	80,69 €	14,34 €
Verluste Stickstoff	18,70 €	2,20 €	-
Gesamtkosten (inkl. MwSt.)	115,79 €	82,89 €	14,34 €

*Berechnungen nach Janssen (2014)

**Datengrundlage KTBL (2005)

Bei der Ausbringung von 30 m³ werden die in Tabelle 17 dargestellten Nährstoffe ausgebracht.

Tabelle 17: Ausgebrachte Nährstoffmenge kg/ha] bei der Ausbringung von 1 und 30 m³ Mastschweine Gülle

Gülmeng [m ³ /ha]	Gesamt N [kg/ha]	NH ₄ -N [kg/ha]	P ₂ O ₅ [kg/ha]	K ₂ O [kg/ha]	MgO [kg/ha]
1	2,38	1,09	1,97	5,24	0,75
30	71,4	32,64	59,16	157,08	22,44

Der Wert von 30 m³ Gülle entspricht 303,02 €/ha (Tab. 18). Hierbei wurde unterstellt, dass nur 85 % des Stickstoffs anrechenbar ist.

Tabelle 18: Berechnung der mineralischen Düngung bezogen auf 30 m³/ha Nährstoffe aus der Gülleausbringung

Düngemittel	Düngerpreis [€/t]	Düngung [kg/ha]	Kosten [€/ha]
Harnstoff (46 % N)*	355,00 €	131,94	46,84
TSP (45 % P ₂ O ₅)	410,00 €	131,46	53,89
Korn Kali (30 % K ₂ O und 10 % MgO)	415,00 €	523,6	217,29
MgO		52,36	
Gesamtpreis			318,02
Wert Gülle*			303,02

*Kalkulation Stickstoffdüngung auf Basis einer Mineraldüngeräquivalenten von 85 % bei Gülle

** Gesamtpreis abzüglich Kosten MgO, die mineralisch mit Korn Kali ausgebracht werden, aber nicht in Gülle enthalten sind

Der reine Nährstoffwert von Gülle deckt sich aber nicht mit dem Marktpreis von Gülle. In intensiven Viehhaltungsregionen ist der Wert deutlich geringer. In einigen Regionen in denen Nährstoffüberschüsse nicht der guten fachlichen Praxis entsprechen und nicht mit der Nährstoffbilanz vereinbar sind muss Gülle in Regionen mit einer ausgeglichenen Nährstoffbilanz exportiert werden. Es müssen bis zu 10 €/m³ gezahlt werden, damit die Gülle verbracht wird (Kühn 2006). Die Applikation von organischen Düngemitteln ist zwar deutlich teurer als die von mineralischen Düngern, wenn allerdings mit Exportkosten gerechnet werden muss, ist die Nutzung von Wirtschaftsdüngern in jedem Fall günstiger als die Nutzung von mineralischen Düngemitteln. Unter der Annahme, das 30 m³ Gülle exportiert werden müssen, fallen Kosten in Höhe von 300 € an. Bei der Ausbringung auf eigenen Flächen liegen die Kosten (inkl. Nährstoffverluste) je nach Applikationsverfahren zwischen 82,89 und 115,79 €/ha. Bei der Düngung mit mineralischen Düngemitteln würden hingegen bei einer Nährstoffmenge, die der von 30 m³ Gülle entsprechen, Kosten von 332,36 €/ha anfallen. Diese Rechnung geht aber nur auf, wenn ein Nährstoffexport eingespart werden kann. Wenn die Gülle (spezifisches Gewicht 900 kg/m³) zu Kosten von 9,90 €/m³ für 100 km (Kowalewski 2014) exportiert werden muss, lohnt sich dies bei dem Verfahren Injektion für eine Strecke von bis zu 75 km. Darüber hinaus übersteigen die Transportkosten den Wert der Gülle und der Applikationskosten im Vergleich zur mineralischen Düngung. Bei derselben Berechnung mit Nutzung der Schleppschlauchausbringung inklusive Nährstoffverlusten ist ein Transport nur über eine Strecke von ca. 65 km rentabel.

Wenn die Exportkosten für Wirtschaftsdünger dem Betriebszweig Tierproduktion zugerechnet werden muss anders kalkuliert werden.

Die ökonomische Verfahrensbewertung zeigt einen ersten praxisnahen Ansatz zur Verfahrensbewertung und muss zur Anwendung auf die Praxis an die jeweilige Betriebsstruktur und die dazugehörigen Betriebszweige angepasst werden.

3.5 Verfahrensbewertung

In Nordwestdeutschland insbesondere in der Veredelungsregion Weser-Ems liegt der Nährstoffanfall mit 192 kg N/ha und 103 kg P₂O₅/ha deutlich über durchschnittlichen Nährstoffanfällen für Niedersachsen (119 kg N ha⁻¹ und 60 kg P₂O₅ ha⁻¹) (Jansen-Minßen 2014). Aufgrund der intensiven Tierhaltung in dieser Region sind gegenüber dem Bundesdurchschnitt deutlich erhöhte NH₃-Depositionen festzustellen (Abb. 32). Dementsprechend liegen auch die Stickstoffsalden in den entsprechenden Regionen bezogen auf eine Flächeneinheit über dem Bundesdurchschnitt (Abb. 33).

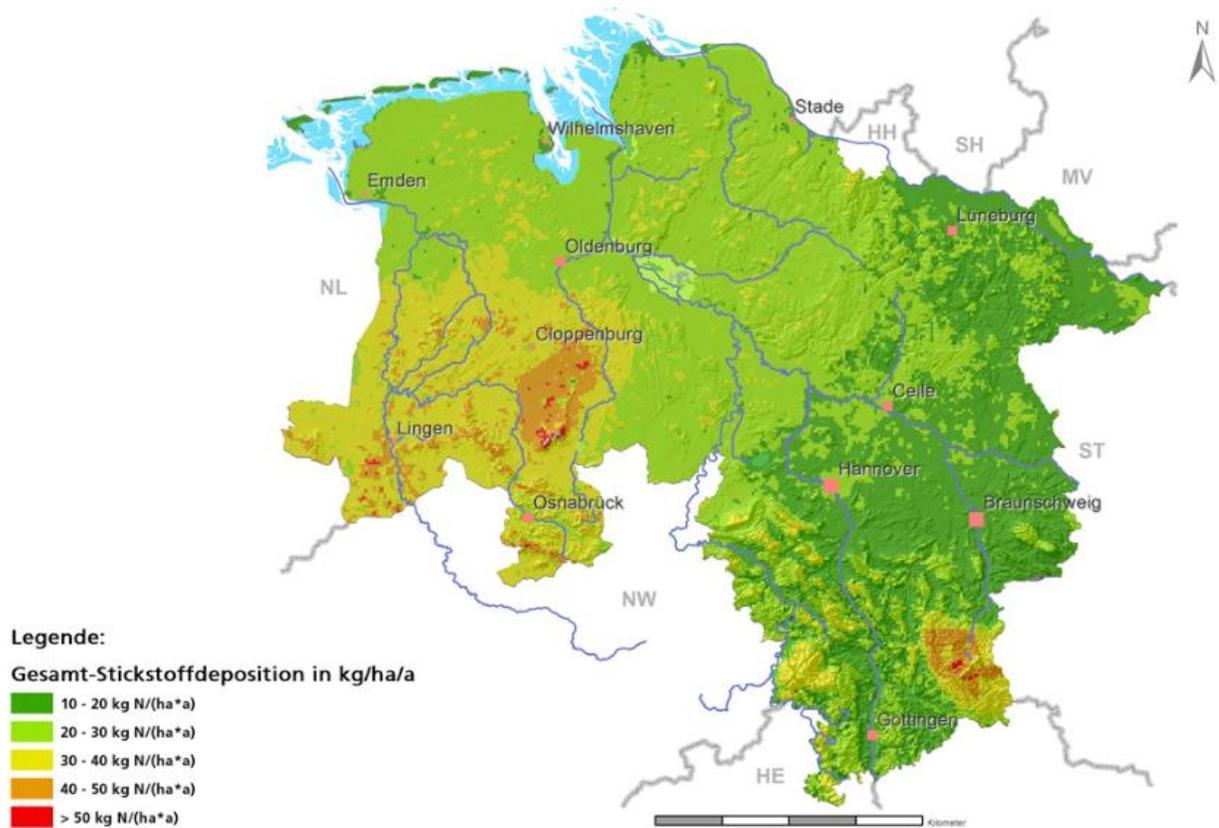


Abbildung 32: Gesamt Stickstoffdepositionen in Niedersachsen (Bultjes et al. 2011)

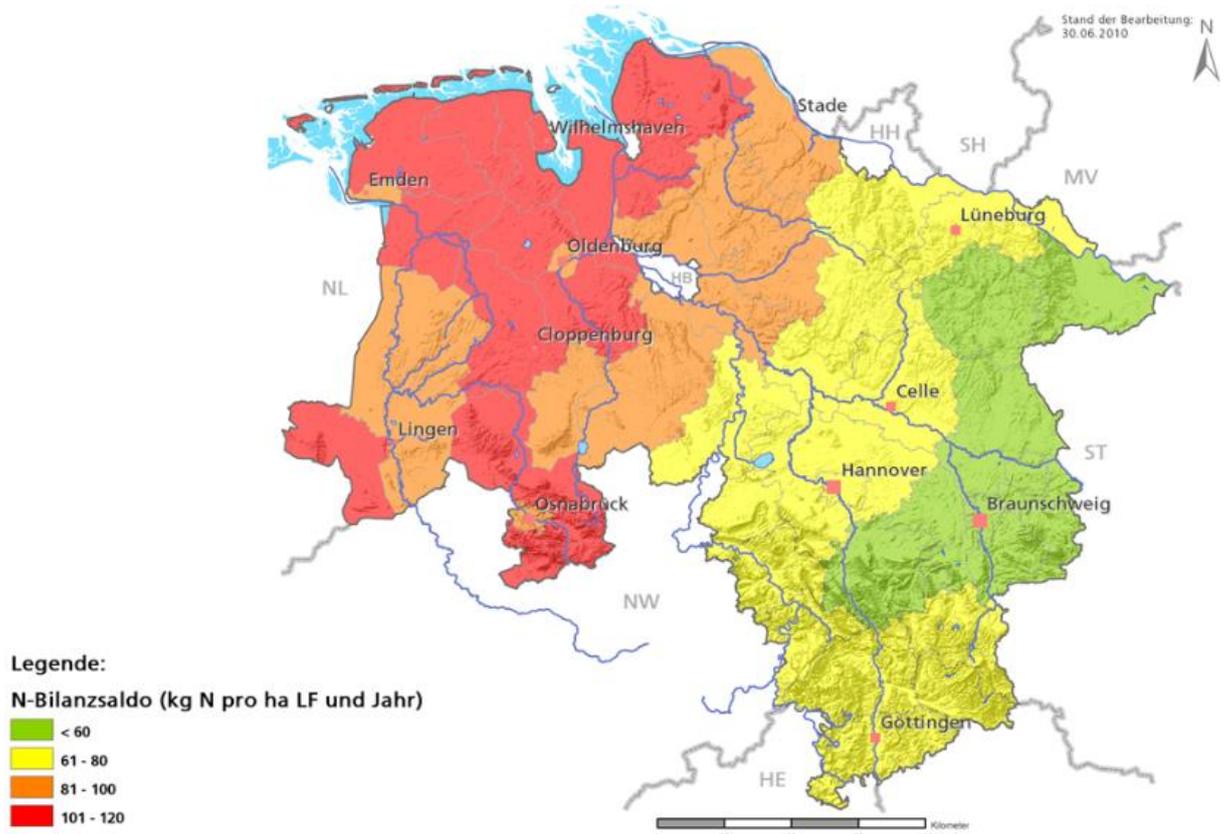


Abbildung 33: Stickstoffeinträge pro ha/Jahr in Niedersachsen (Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klima 2013)

Emissionsmindernde Maßnahmen und Maßnahmen zur Steigerung der Nährstoffeffizienz sind besonders für die Region Nordwestdeutschland von großer Bedeutung.

Die Injektion von flüssigen organischen Wirtschaftsdüngern hat das Ziel, NH_3 -Verluste bei der Ausbringung zu reduzieren, die im Dünger enthaltenen Nährstoffe besser zu verteilen und näher an die Pflanzenwurzel zu platzieren. Mit Gülle und Gärrest als Unterfußdünger lassen sich Mineraldünger einsparen und die betriebliche N- und P-Bilanz kann deutlich entlastet werden. Damit trägt das Verfahren zum Boden-, Klima-, und Wasserschutz bei.

In diesem Projekt wurden zwei wesentliche Strategien betrachtet, vorhandene organische Düngemittel effizienter auszubringen und zu stabilisieren, damit ihre Effizienz gesteigert werden kann. Techniken zur Senkung von NH_3 -Emissionen (Injektion) tragen nicht wesentlich zur Erhöhung von N_2O -Emissionen bei. Die Höhe der N_2O -Emissionen ist abhängig von den Bodeneigenschaften (Corg, Nmin und $\text{H}_2\text{O grav.}$) und wie in vorherigen Studien (Morken und Sakshaug 1998, Haenel et al. 2010, Grant et al. 2006 und De Klein et al. 2003) gezeigt von der Höhe der

Düngegabe und der Witterung. In dem durchgeführten Feldversuch wird der Witterungseinfluss deutlich, der dazu führt, dass Variantenunterschiede bezüglich Emissionen und Ertragsunterschieden ausgeglichen werden. Auf Standorten, die aufgrund ihrer Eigenschaften nicht oder nur minimal zur Erhöhung von N_2O -Emissionen beitragen kann die Injektionstechnik bedenkenlos eingesetzt werden.

Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist die deutliche Geruchsreduktion bei der Ausbringung. Das hat deutliche Auswirkungen auf die Akzeptanz der Landwirtschaft, besonders in Gebieten mit hohem Tourismusanteil (Anonym 2008 und Laurenz 2012).

Die Wirtschaftsdüngerinjektion reduziert Ammoniakemissionen und führt dabei nicht zu erhöhten N_2O -Verlusten. Durch den Einsatz eines Nitrifikationshemmstoffes können zusätzlich NO_3 -Verluste reduziert werden. Diese beiden Maßnahmen (Injektion und Nitrifikationshemmer) dürfen nicht dazu missbraucht werden von der nachhaltigen Düngung abzuweichen und mehr Stickstoff als nötig auszubringen. Die Wirkung des Nitrifikationshemmers DMPP ist nicht primär von der Applikationstechnik des Wirtschaftsdüngers abhängig. Durch erhöhte N_{min} -Gehalte im Boden ist der Anbau von Zwischenfrüchten nach der Anwendung von Nitrifikationshemmern zu empfehlen.

Da es zwischen den Applikationstechniken nur minimale, meist nicht signifikante Unterschiede bezüglich deren Einfluss auf die Höhe der freigesetzten N_2O -Emissionen gibt, kann die effiziente Injektionstechnik zur Minimierung von NH_3 -Verlusten empfohlen werden.

Die durchgeführten Berechnungen zur Vorzüglichkeit einzelner Verfahren (Kapitel 3.4) konnten zeigen, dass die Injektion auf Grundlage von Praxisdaten günstiger ist, als die Nutzung der Schleppschlauchausbringung mit anschließender Einarbeitung. Dabei bleibt zu berücksichtigen, dass ein Vergleich zwischen mineralischer und organischer Düngung nur auf gut mit Nährstoffen versorgten Standorten möglich ist. Hinzu kommen bei der Schleppschlauchapplikation Stickstoffverluste die auf das Gesamtverfahren angerechnet werden müssen.

Für die ökologischen Gesamtfolgen kann festgehalten werden, dass mit den genannten Möglichkeiten ein Beitrag zur Reduzierung des Nitratgehalts im Grundwasser und Verringerung von stickstoffhaltigen Emissionen geleistet werden

kann. Grundsätzlich gilt aber dennoch besonders in Nährstoffüberschuss Regionen die Stickstoffdüngung langfristig zu reduzieren, damit die Düngeeffizienz gesteigert und die ökologischen Kosten der Stickstoffdüngung gesenkt werden können. Nitratverlagerung und gasförmige Stickstoffverluste sind aus ökologischen Gesichtspunkten kritisch zu betrachten und auf ein Minimum zu reduzieren.

Die gültige Düngeverordnung (Anonym 2012) sieht eine maximale Stickstoffgabe aus Wirtschaftsdüngern von 170 kg N/ha im Betriebsdurchschnitt vor. Hierbei können aber extreme Schwankungen bezüglich der Stickstoffeffizienz (NH_3 , N_2O und NO_3) auftreten. Es empfiehlt sich daher die Höchstmengenregelung schlagspezifisch vorzunehmen, damit Stickstoffverlusten besser entgegengewirkt werden kann. Darüber hinaus empfiehlt es sich Vorgaben zur Verminderung von NO_x - und N_2O -Emissionen zu machen. Die vorgesehene Einarbeitungsfrist von 4 Stunden nach der Wirtschaftsdüngerbringung kann nicht kontrolliert werden und ist daher bis jetzt nur eine scheinbare Option der Politik NH_3 -Emissionen effizient zu reduzieren. Die Umsetzung der Vorgaben ist derzeit schwierig, da es nur wenig Sanktionsmöglichkeiten und zu wenig Kontrollen gibt.

Bei den erzielten Ergebnissen muss deutlich darauf hingewiesen werden, dass diese nur für den Maisanbau gelten und nicht ohne weiteres auf andere Reihenkulturen übertragbar sind. Zur besseren Beurteilung des Verfahrens Gülleunterfußdüngung untersucht der Kooperationspartner, die Hochschule Osnabrück die Stickstoffverlagerungen im Boden nach der Ausbringung im Vergleich zu anderen Applikationsverfahren. Des Weiteren wird in den Versuchen der Hochschule Osnabrück verstärkt auf die Wirkung von Nitrifikationshemmstoffen sowie die Phosphateffizienz der Gülleunterfußdüngung eingegangen.

Auf Basis der Ergebnisse der durchgeführten Versuche sollten zukünftig auch Untersuchungen auf nährstoffarmen Standorten durchgeführt werden, damit Verfahrensunterschiede bezüglich der Nährstoffeffizienz unterschiedlicher Applikationsverfahren noch besser herausgearbeitet werden können und die Substitution von Mineraldünger durch organische Düngemittel umfassend eingeschätzt werden kann.

4. Öffentlichkeitsarbeit

Folgende Veröffentlichungen haben sich im Rahmen des Projektes ergeben:

Wissenschaftliche Veröffentlichungen (peer reviewed) eingereicht:

SEVERIN, M., R. FUß, R. WELL, F. GARLIPP, H. VAN DEN WEGHE: Greenhouse gas emissions of organic fertilizers: Soil, slurry and application effects, in International Journal of Agricultural and Biological Engineering

Wissenschaftliche Veröffentlichungen:

SEVERIN, M., F. GARLIPP, H. VAN DEN WEGHE, R. FUß UND S. GLODNIOK: Unterfußinjektion von Wirtschaftsdüngern im Maisanbau – Stickstoffverluste im Griff haben?, Landwirtschaft ohne Pflug – LOP, Das Fachmagazin für den professionellen Pflanzenbau, Ausgabe Februar 2015

Tagungsbeiträge mit Veröffentlichung:

SEVERIN, M., R. FUß, R. WELL, F. GARLIPP, H. VAN DEN WEGHE (2014): Treibhausgasemissionen bei der organischen Düngung: Einfluss von Boden, Düngemittel und Applikationstechnik, in Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. vom 16. - 18. September 2014, Band 26, S. 64 - 65 ISSN 0934-5116 (Vortrag)

Vorträge ohne Veröffentlichung

SEVERIN, M. (2013): Emissionsminderung (NH₃ und N₂O) durch Unterfußdüngung von Wirtschaftsdüngern, „12. NH₃-Workshop“ beim staatlichen Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, 06.11.2013

Bachelorarbeiten im Projekt

MEYER ZUR MÜDEHORST, J. (2013): Wirkung von Nitrifikationshemmern bei der Gülle- und Gärrestdüngung im Hinblick auf Ertragswirkungen im Maisanbau und Stickstoffverluste in der Landwirtschaft, Universität Göttingen

Neben den bereits erschienenen und eingereichten Veröffentlichungen werden die Projektergebnisse in der Dissertation von Herrn Msc. Agr. Maximilian Severin

erscheinen. Zu den Feldversuchen ist eine zusätzliche Veröffentlichung in einer wissenschaftlichen Zeitschrift geplant.

5. Fazit Projektverlauf

AP2 und AP4 konnten im ersten Versuchsjahr ohne größere Probleme erfolgreich abgeschlossen werden. Im zweiten Versuchsjahr (AP3, AP4 und AP5) wurde zur Überprüfung der Ergebnisse aus dem Laborversuch ein Feldversuch am Standort Rieste angelegt. Auf Grund veränderter Gegebenheiten hinsichtlich der Außenstelle Vechta wurden die Versuchsdurchführungen auf einen Standort begrenzt und die Projektlaufzeit von 36 auf 24 Monate verkürzt. Trotz der verkürzten Laufzeit konnten sowohl im Technikums- als auch im Feldversuch wertvolle Ergebnisse hinsichtlich der Emissionsfreisetzung bei der Unterfußdüngung von Wirtschaftsdüngern gewonnen werden.

Durch die Kooperationen mit dem TI Braunschweig und der HS Osnabrück) konnten zahlreiche Synergieeffekte zwischen den einzelnen Arbeitsgruppen genutzt werden.

6. Literatur

Anonym (2012): Düngeverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 36 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist

Anonym (2008): Emissionsmindernde Gülleausbringung IBK Positionspapier Antrag an die Regierungen, <http://www.bodenseekonferenz.org/bausteine.net/file/showfile.aspx?downaid=9056&guid=b3d46c1f-816a-41fb-b9ae-d624553cd9b9&fd=0>, abgerufen am 07.08.2014

Bertora, C., Alluvione, F., Zavattaro, L., van Groenigen, J. W., Velthof, G., & Grignani, C. (2008): Pig slurry treatment modifies slurry composition, N₂O, and CO₂ emissions after soil incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(8): 1999-2006

Broeker, M. (2011): Gülleinjektion spart teuren Dünger, *top agrar* 3/2011

- Builtjes; P. E. Hendriks, M. Koenen, M. Schaap, S. Banzhaf, A. Kerschbaumer, T. Gauger, H.-D. Nagel, T. Scheuschner und A. Schlutow (2011): Erfassung, Prognose und Bewertung von Stoffeinträgen und ihren Wirkungen in Deutschland, UBA Texte 39/2011
- Chadwick DR. and Pain BF. (1997): Methane fluxes following slurry applications to grassland soils: Laboratory experiments. *Agriculture Ecosystems and Environment* 63(1):51-60
- Chatskikh, D., und Olesen, J. E. (2007): Soil tillage enhanced CO₂ and N₂O emissions from loamy sand soil under spring barley. *Soil and tillage Research*, 97(1):5-18
- Clemens, J.; Vandre, R.; Kaupenjohann, M. and Goldbach, H. (1997): Ammonia and nitrous oxide emissions after landspreading of slurry as influenced by application technique and dry matter-reduction. II. Short term nitrous oxide emissions. *Journal of Plantnutrition and soil science* 160(4):491-496
- Davidson, E.A. (1992): Sources of nitric oxide and nitrous oxide following wetting of dry soil, in *Soil Science Society of America Journal* 56(1):95-102
- De Klein, C. A. M., L. Barton, R. R. Sherlock, Z. Li and R. P. Littlejohn (2003): Estimating a nitrous oxide emission factor for animal urine from some New Zealand pastoral soils, *Soil Research*, 41(3):381-399
- Döhler H. und Horlacher D. (2010): Ammoniakemissionen organischer Düngemittel. In: *Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden*, KTBL-Schrift 483, S. 51-71, Darmstadt
- Fangueiro, D., Chadwick, D., Dixon, L., Grilo, J., Walter, N. and Bol, R. (2010): Short term N₂O, CH₄ and CO₂ production from soil sampled at different depths and amended with a fine sized slurry fraction. *Chemosphere*. 81(1):100-108
- Flessa, H., Müller, D., Plassmann, K., Osterburg, B., Techen, AK., Nitsch, H., Nieberg, H., Sanders, J., Meyer zu Hartlage, O., Beckmann, E. und Anspach V. (2012): Studie zur Vorbereitung einer effizienten und gut abgestimmten Klimaschutzpolitik für den Agrarsektor, *Landbauforschung – vTI agriculture and forestry research*, Sonderheft 361, Braunschweig
- Flessa, H. (2010): Lachgasemissionen landwirtschaftlich genutzter Böden - Stand des Wissens, *Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden*. KTBL-Schrift 483 S. 103-108

- Flessa, H. and Beese, F. (2000): Laboratory Estimates of Trace Gas Emissions following Surface Application and injection of Cattle Slurry. *Journal of Environmental Quality*. 29(1):262-268
- Freney JR. (1997): Strategies to reduce gaseous emissions of nitrogen from irrigated agriculture. *Nutrient cycling in agroecosystems* 48(1-2):155-160
- Goodroad, L. L. and Keeney, D. R. (1984): Nitrous oxide production in aerobic soils under varying pH, temperature and water content, *Soil Biology and Biochemistry* Vol 16(1):39-43
- Grant, R. F., Pattey, E., Goddard, T. W., Kryzanowski, L. M., & Puurveen, H. (2006): Modeling the effects of fertilizer application rate on nitrous oxide emissions. *Soil Science Society of America Journal*, 70(1):235-248.
- Haenel, H.D. (2010): Berechnung der Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft – Nationaler Emissionsbericht (NIR) 2010 für 2008, *Landbauforschung – vTI agriculture and forestry research*, Sonderheft 334, Braunschweig
- Janssen, I. (2014): Kosten der Gülleausbringung mit unterschiedlichen Applikationstechniken, Preisangebot Lohnunternehmen Janssen, Rhede/Ems
- Jansen-Minßen, F. (2014): Nährstoffbericht Niedersachsen in Bezug auf Wirtschaftsdünger, Vortrag 11. Pflanzenbautagung der LWK Niedersachsen am 14.02.2014 in Sehnde-Rethmar
- Kissel, D. E., Brewer, H. L. and Arkin G. F: (1977): Design and test of a field sampler for ammonia volatilization. *Soil Science Society of America Journal* 41(6):1133-1138
- Kolb, S. (2011): Warum verschwindet das Treibhausgas Methan im Waldboden? Bedeutung von Bakterien für das Klima, *Spektrum – Universität Bayreuth*, 66 – 69, 1/2011
- Kowalewski, H.H. (2014): Kosten und Nutzen der Nährstoffverbringung, Vortrag 2. Symposium „Nährstoffmanagement und Grundwasserschutz“ 22.05.2015
- Kühn, H. (2006): Abgeben ist günstiger als teuer zupachten, Verwertung von Wirtschaftsdüngern, Nährstoffe zwischen Überschuss und Bedarf, <http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCcQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.naehrstoffboerse.de%2Fdata%2FAbgebenistguenstigeralsteuerzupachten.pdf&ei=LRC8VJTHKIXfPeCygOAC&usg=AFQjCNHMSMISfIjPhbqQN5jv9m4ar3kmNQ>, abgerufen am 17.01.2015

- Küstermann, B., Munch, J. C., & Hülsbergen, K. J. (2013): Effects of soil tillage and fertilization on resource efficiency and greenhouse gas emissions in a long-term field experiment in Southern Germany. *European Journal of Agronomy*, 49:61-73.
- KTBL (2005): *Faustzahlen für die Landwirtschaft*, 13. Auflage, Herausgeber Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. Darmstadt, ISBN: 3-7843-2194-1
- Laurenz, L. (2012): Gülledepot unter Mais im praxistest, top agrar 3/2012
- Laurenz, L. (2009): Wertigkeit von Gülle, Vortrag 02.05.2009 Haus Düsse, <https://www.landwirtschaftskammer.de/duesse/lehrschau/pdf/2009/2009-02-05-guelle-01.pdf>., abgerufen am 17.01.2015
- Leick, B. (2003): Emissionen von Ammoniak (NH₃) und Lachgas (N₂O) von landwirtschaftlich genutzten Böden in Abhängigkeit von produktionstechnischen Maßnahmen, Dissertation Uni Hohenheim
- Lofffield, N.; Flessa, H.; Augustin, J. and Beese, F. (1997): Automated Gas Chromatographic System for rapid analysis of the atmospheric trace gases methane, carbon dioxide, and nitrous oxide. *Journal of Environmental Quality* 26(2):560-564
- Maiskomitee (2014): Flächenerträge von Körnermais und Silomais in Deutschland, <http://www.maiskomitee.de/web/public/Fakten.aspx/Statistik/Deutschland/FI%C3%A4chenetr%C3%A4ge>, abgerufen am November 2014
- Menendez, S., Barrena, I., Setien, I., Gonzalez-Murua, C. and Estavillo, JM. (2012): Efficiency of nitrification inhibitor DMPP to reduce nitrous oxide emissions under different temperature and moisture conditions. *Soil Biology and Biochemistry* 53: 82-89
- Misselbrook, T.H., Smith, K.A., Johnson, R.A. and Pain, B. F. (2002): Slurry application techniques to reduce ammonia emissions: Results of some UK field-scale experiments, *Biosystems engineering*, 81(3):313-321
- Mkhabela, MS.; Gordon, R.; Burton, D.; Smith, E. and Madani, A. (2009): The impact of management practices and meteorological conditions on ammonia and nitrous oxide emissions following application of hog slurry to forage grass in Nova Scotia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 130(1):41-49
- Morcken, J. und S. Sakshaug (1998): Direct Ground Injektion of livestock waste slurry to avoid ammonia emission, *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51(1):59-63

- Mosier, A. R., Delgado, J. A., Cochran, V. L., Valentine, D. W., & Parton, W. J. (1997). Impact of agriculture on soil consumption of atmospheric CH₄ and a comparison of CH₄ and N₂O flux in subarctic, temperate and tropical grasslands. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 49(1-3):71-83
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt und Klima (2013): Quellen und Einträge, Abbildung nach LBEG Kartenerstellung: MU, http://www.google.de/imgres?sa=X&biw=1280&bih=1023&tbm=isch&tbnid=Csb oKzpyGlrBFM%3A&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.umwelt.niedersachsen.de%2Fportal%2Flive.php%3Fnavigation_id%3D26260%26_psmmand%3D10&docid=kyT5ETr7cTQg-M&imgurl=http%3A%2F%2Fwww.umwelt.niedersachsen.de%2Flive%2Finstitutio n%2Fmediadb%2Fmand_1%2Fpsfile%2Fzoombild%2F32%2F4_1_Abb_8_4c 77bada7717a.jpg&w=1000&h=708&ei=MazOUqP1OYzs4wSEnoGABA&zoom= 1&iact=rc&dur=1345&page=1&start=0&ndsp=26&ved=0CGMQrQMwBQ (abgerufen 13.01.2014)
- NIR (National Emission Inventory Report) (2010): Calculations of emission from German agriculture - National Emission Inventory Report (NIR) 2010 for 2008.
- Pacholski, AS. (2003): Calibration of a simple method for determining ammonia volatilisation in the field „Experiments in Henan Province, China, and modeling results“, *Landbauforschung Völkenrode, FAL Agricultural Research, Sonderheft 249, Braunschweig*
- Ruser, R. (2008): Klimawirkung der Düngung: Wie wirken sich N-Düngung und Bewirtschaftung auf N₂O-Emissionen aus Böden aus? In: *BUNDESARBEITSKREIS DÜNGUNG (BAD) (Hrsg.): Klimawandel und Bioenergie– Pflanzenproduktion im Spannungsfeld zwischen politischen Vorgaben und ökonomischen Rahmenbedingungen. BAD, Frankfurt/Main, S. 113-124.*
- Smith, P.E., Clayton, K.A., Mctaggart, I.P., Thomson, P.E., Arah, J.R.M. and Scott, A. (1995): The measurement of nitrous oxide emissions from soil by using chambers, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 351(1696):327-338
- Thomsen, I. K., Pedersen, A. R., Nyord, T., & Petersen, S. O. (2010): Effects of slurry pre-treatment and application technique on short-term N₂O emissions as

determined by a new non-linear approach. *Agriculture, ecosystems and environment*, 136(3):227-237

- Thorman, R.E. (2011): Nitrous oxide emission following the application of livestock manure – an integrated approach. In: *Emissionen der Tierhaltung - Treibhausgase, Umweltbewertung, Stand der Technik*. KTBL-Schrift 491 S. 217 – 228, Darmstadt
- UBA (Umweltbundesamt) (2011): Stickstoff – lebensnotwendiger Nährstoff und gefährlicher Schad-stoff. *Presseinformation Umweltbundesamt Nr. 04/2011*, Dessau-Roßlau
- VDLUFA (2012a): Bestimmung von organischem Kohlenstoff durch Verbrennung und Gasanalyse, Methode A 4.1.3.1, Bd. 1, *Die Untersuchung von Böden*, VDLUFA Verlag, Darmstadt
- VDLUFA (2012b): Bestimmung von Gesamtstickstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse), Methode A 2.2.5, Bd. 1, *Die Untersuchung von Böden*, VDLUFA Verlag, Darmstadt
- Velthof, GL.; Mosquera, J.; Huis in't Veld, EJ. and Hummlink, E. (1992): Effect of manure application technique on nitrous oxide emissions from agricultural soil. [zitiert am 09.10.2013]. Available from: <http://edepot.wur.nl/135685>. *Alterra report* ISSN 1566 – 7197
- Velthof, GL.; Kuikman, PJ. and Oenema, O. (2003): Nitrous oxide emission from animal manures applied to soil under controlled conditions. *Biological and Fertility of Soils* 37(4):221-230

7. Anhang/Anlagen

7.1 Kooperationsvertrag TI-AK Projektbeschreibung für Projekt unter Beteiligung Thünen-Institut für AgrarklimaschutzTI

Projektthema Emissionsminderung (NH₃ und N₂O) durch Unterfußinjektion von Wirtschaftsdüngern

Durch landwirtschaftliche Produktion bedingte Treibhausgasemissionen sind nicht vollständig zu vermeiden und insbesondere bodenbürtige Emissionen sind in Abhängigkeit von den herrschenden Umweltbedingungen in ihrer Höhe sehr variable. Des Weiteren entstehen in der Landwirtschaft höhere Vermeidungskosten pro Tonne CO₂-Äquivalent als zum Beispiel in der Energie- und Gebäudewirtschaft (vTI 2012). Nahezu 50 Prozent aller Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft entstehen bei bzw. nach der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern (NIR 2010; UBA 2011). Gleichzeitig bietet dieser Faktor in Hinblick auf eine mögliche Ammoniakreduktion (NH₃) als auch auf eine nachhaltige und kurzfristige Umsetzbarkeit das größte Minderungspotential. Auch in Bezug auf die Ressourcenschonung (Energie und Rohstoffe) ist eine mögliche Substitution von Mineraldünger durch Wirtschaftsdünger insbesondere im Maisanbau anzustreben. Neben NH₃ geht von N₂O ein erhebliches Umweltgefährdungspotential aus und zählt zu den wichtigsten Bilanzgrößen von Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft (Thorman 2011). Eine hohe Verfügbarkeit von organischem Kohlenstoff und mineralischem Stickstoff, in Verbindung mit einem gesteigerten mikrobiellen O₂-Verbrauch, begünstigt die Lachgasbildung (Ruser 2008). Insbesondere sind Maßnahmen zur Steigerung der N-Produktivität und zur Minderung von N-Überschüssen in Regionen mit intensiver Veredelungswirtschaft von Bedeutung, da diese oft hohe N-Überschüsse aufweisen. Maßnahmen zur Emissionsminderung sind in diesen Regionen besonders notwendig, daraus ergibt sich aber auch ein großes Emissionsminderungspotenzial (vTI 2012). Dementsprechend bestehen derzeit die größten Ansatzpunkte zur Reduktion von

Emissionen in der landwirtschaftlichen Tierhaltung durch Reduktion der Ausbringungsverluste des Wirtschaftsdüngers durch die Optimierung der Ausbringungstechnik. Durch die Ausbringung mit Schleppschläuchen werden laut neusten Studien die NH_3 -Emissionen um 30% bei Schweinegülle und um 10% bei Rindergülle auf unbewachsenen Böden (auf bewachsenem Acker = 50% Schweinegülle und 30% Rindergülle) gegenüber den Prallverteilern (noch gängiges Verfahren) reduziert (Döhler und Horlacher 2010). Auch für Lachgas gibt es Hinweise, dass die Ausbringungstechnik einen großen Einfluss auf die Höhe der entstehenden Emission hat (vTI 2012). Eine signifikant höhere Emissionsminderung gegenüber dem Schleppschlauchverfahren könnte durch die Injektion von Wirtschaftsdünger direkt in den Boden (Unterfuß) erwartet werden.

Dementsprechend ist es das Gesamtziel des zur Förderung vorgeschlagenen Projektes, eine signifikante Reduktion von klima- und umweltrelevanten Emissionen (N_2O ; NH_3) bei der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern zu Mais durch ein neuentwickeltes System der Unterfußinjektion zu untersuchen. Dazu werden, nach entsprechenden Technikums- und Laborversuchen unter standardisierten und kontrollierten Umweltbedingungen (Raumtemperatur, rel. Luftfeuchte, Bodenfeuchte, etc.), Emissionsmessungen auf zwei Ackerstandorten (Lehmboden [AZ 50], Sandboden [AZ 20]) mit zwei unterschiedlichen Wirtschaftsdüngern (Mastschweinegülle, Gärrest) bei Ausbringung mit dem neuentwickelten Unterfußinjektor durchgeführt. Als Referenzsystem dient die Ausbringung mit dem in der Praxis üblichen Schleppschlauchverfahren. Bodenkundliche und pflanzenbauliche Untersuchungen werden parallel zu den Messungen der gasförmigen Emissionen angelegt.

Zusammengefasst betrachtet, ist es das Hauptziel der Studie, ein nachhaltiges, emissionsminderndes und ressourcenschonendes Verfahren der Wirtschaftsdüngerausbringung zu etablieren um die Umwelt in Bezug auf klima- und umweltrelevante Emissionen (N_2O und NH_3) zu entlasten.

Antragssteller

Vorname, Name, akad. Grad	Herman Van den Weghe, Prof. Dr. Ir.
Institution und Fachbereich	Georg-August-Universität Göttingen Fakultät für Agrarwissenschaften Department für Nutztierwissenschaften Abteilung Verfahrenstechnik in der Veredelungswirtschaft
Dienstadresse	Universitätsstr. 7 49377 Vechta
Telefon	+49 (0) 4441/15 - 435/436
Telefax	+49 (0) 4441/15 - 448
E-Mail	hweghe@uni-goettingen.de

Projektbearbeiter

Vorname, Name, akad. Grad	Felix Garlipp, Dr.
Institution und Fachbereich	Georg-August-Universität Göttingen Fakultät für Agrarwissenschaften Department für Nutztierwissenschaften Abteilung Verfahrenstechnik in der Veredelungswirtschaft
Dienstadresse	Universitätsstr. 7 49377 Vechta
Telefon	+49 (0) 4441/15 - 439
E-Mail	fgarlip@gwdg.de

Projektdauer 3 Jahre (Beginn 01.02.2013)

1 Thema und Gesamtziel des Projektes

Das Gesamtziel des zur Förderung vorgeschlagenen Projektes ist die signifikante Reduktion von klima- und umweltrelevanten Emissionen (N₂O und NH₃) bei der

Ausbringung von Wirtschaftsdüngern zu Mais durch ein neuentwickeltes System der Unterfußinjektion. Dazu werden Emissionsmessungen auf zwei Ackerstandorten (Lehmboden [AZ 50], Sandboden [AZ 20]) mit zwei unterschiedlichen Wirtschaftsdüngern (Mastschweinegülle, Gärrest) bei Ausbringung mit dem neuentwickelten Unterfußinjektor durchgeführt. Als Referenzsystem dient die Ausbringung mit dem in der Praxis üblichen Schleppschlauchverfahren. Begleitend zu den Feldversuchen werden Gefäßversuche unter standardisierten und kontrollierten Umweltbedingungen vorgenommen. Bodenkundliche und pflanzenbauliche Untersuchungen werden parallel zu den Messungen der gasförmigen Emissionen angelegt. Ziel ist es hier, die Einflüsse des Bodens auf die Emissionen und die Erträge und Qualitäten des angebauten Maises und die vielfältigen Wechselwirkungen zu ermitteln. Dies ist zu einer umfassenden Beurteilung von Gülleausbringungssystemen und für die Abbildung der Nährstoffströme unerlässlich. Systematisch sollen sowohl die ökologischen als auch ökonomischen Vorteile der innovativen Technik erarbeitet und geprüft werden. Durch die Untersuchungen soll zudem der Stand der Technik hinsichtlich der Gülleapplikation optimiert werden.

2 Stand des Wissens – Umweltentlastung und Innovation

Neben molekularem Stickstoff (N_2) stellen Ammoniak (NH_3) und Lachgas (N_2O) in der Landwirtschaft die wichtigsten gasförmigen Stickstoffverluste dar. Dies bedeutet einerseits einen Stickstoffverlust aus dem landwirtschaftlichen System, verbunden mit wirtschaftlichen Konsequenzen für die Landwirtschaft, andererseits führen diese Verluste aber auch zu einer Belastung der Umwelt (NH_3 , N_2O) und des Klimas (N_2O). Lachgas zählt zu den wichtigsten Bilanzgrößen von Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft. Nahezu 50 Prozent aller Ammoniakemissionen aus der Landwirtschaft entstehen bei bzw. nach der Ausbringung von Wirtschaftsdüngern (NIR 2010; UBA 2011). Gleichzeitig bietet dieser Faktor in Hinblick auf eine NH_3 -Reduktion als auch in Bezug auf eine nachhaltige und kurzfristige Umsetzbarkeit das größte Minderungspotential. Auch in Bezug auf die Ressourcenschonung (Energie und Rohstoffe) ist eine mögliche Substitution von Mineräldünger durch Wirtschaftsdünger insbesondere im Maisanbau anzustreben. Derzeit liegen die Emissionen von N_2O bei 132Gg (=40920 Gg CO_2 - Äquivalente), was 4% der deutschen Gesamtmenge entspricht (Butterbach 2010; Flessa 2010; Haenel et al. 2010; NIR 2010) wobei ca. 60 bis 76 kt/a Lachgas aus Böden generieren (UBA 1993). Emissionsminderungen durch

bauliche Maßnahmen und Umrüstungen in der Nutztierhaltung sind, bedingt durch den hohen Kapitalbedarf bzw. durch die Widersprüche in Verbindung mit der Forderung nach mehr Tiergerechtigkeit und Bewegungsfreiheit für die Tiere kurzfristig und ökonomisch vertretbar kaum umsetzbar.

Dementsprechend bestehen derzeit die größten Ansätze bei *der* landwirtschaftlichen Tierhaltung entstehende Emissionen zu reduzieren“ in der Minderung der Ausbringungsverluste des Wirtschaftsdüngers durch die Optimierung der Ausbringungstechnik. Wesentlicher Ansatzpunkt ist hier, dass Wirtschaftsdünger neben einer organischen, langsam pflanzenverfügbaren, eine mineralische, schnell verfügbare Fraktion enthält. Insbesondere die Ammoniak- und Lachgasfraktionen stellen hier die essentiellen Emissionsquellen dar, wobei primär für die Generierung von Treibhausgasen aus Böden großer Forschungsbedarf besteht (Döhler und Horlacher 2010). Verschiedenste Maßnahmen wurden in der Vergangenheit unternommen, um die Ammoniakverluste bei der Lagerung, Be- und Verarbeitung sowie Ausbringung von tierischen Ausscheidungen wie Gülle zu optimieren. Neben einer organisationstechnischen Minderung (Ausbringungszeitpunkt, Bodenbearbeitung) stehen hier technische Optimierungen zunehmend im Mittelpunkt der Betrachtung. Die Applikationstechnik von Wirtschaftsdüngern stellt momentan die wichtigste Stellgröße dar den Austrag schädlicher Stoffe in die Umwelt zu minimieren. Durch eine effizientere Verwertung von Wirtschaftsdüngern (Gülle, Gärrest) mit Hilfe einer direkten Unterfußinjektion könnten, insbesondere in intensiven Tierhaltungsregionen, mögliche Umweltrisiken vermindert und die Schonung natürlicher Ressourcen gesichert werden. Neben der Emissionsverringerung durch Senkung der Ausbringungsverluste kann dadurch eine höhere Effizienz bei der Nutzung des Wirtschaftsdüngers erreicht werden. Durch gezielte Anwendung und Nutzung innovativer Techniken kann Wirtschaftsdünger im Maisanbau den Mineraldüngereinsatz eventuell vollständig substituieren. Weiterhin wird durch die entstehenden ökonomischen Vorteile eine Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit erreicht. Ziel ist es, durch die in diesem Projekt vorgeschlagene direkte Unterfußinjektion sowohl den Arbeitsschritt der Einarbeitung des Wirtschaftsdüngers als auch die logistische Beschaffung und Ausbringung des Mineraldüngers zu reduzieren bzw. ganz durch Wirtschaftsdünger zu ersetzen. Hiermit würden nachhaltig die Schlagkraft erhöht und die Arbeitsbedingungen verbessert. Auf diesem Weg

verringert das entsprechend optimierte Anbausystem nicht nur die negativen Folgen für die Umwelt durch die Tierhaltung, sondern trägt auch den Zielen einer Stärkung der wirtschaftlichen Innovation Rechnung.

Ein wesentlicher Ansatzpunkt der Emissionsminderung bei der Wirtschaftsdüngerausbringung besteht in der Verringerung der Grenzfläche zwischen Wirtschaftsdünger und Atmosphäre (Chadwick et al. 1999; Mattila 1998; Morken und Sakshaug 1998). Neben den durch die Düngeverordnung weiterhin erlaubten Prallverteilern hat der Schleppschlauchverteiler, insbesondere im überbetrieblichen Einsatz, mittlerweile eine dominante Position eingenommen. Durch die Ausbringung mit Schleppschläuchen werden die NH_3 -Emissionen um 30% bei Schweinegülle und um 10% bei Rindergülle auf unbewachsenen Böden (auf bewachsenem Acker = 50% Schweinegülle und 30% Rindergülle) gegenüber den Prallverteilern reduziert (Döhler und Horlacher 2010).

Ebenfalls wird gegenüber anderen Verfahren eine gleichmäßigere Verteilung mit einem geringen Variationskoeffizienten von nur 5% in der Verteilung erreicht. Applikationstechniken mit denen Wirtschaftsdünger nicht nur bodennah ausgebracht, sondern auch direkt in den Boden eingearbeitet werden, sind dagegen in der Praxis kaum verbreitet. Dabei können bei der Injektion NH_3 -Minderungspotentiale von bis zu 90% erreicht werden (Frick und Menzi 1997). Andererseits treten besonders unter aeroben und semiaeroben Bedingungen Nitrifikations- und nach Bildung oxidierter Stickstoffverbindungen auch Denitrifikationsprozesse auf. Beide Prozesse können zu einer erhöhten Lachgasgenerierung führen. Hierdurch birgt die Milieubedingung des Unterfußinjektors auch potentielle Gefahren für eine zunehmende Lachgasfreisetzung. Einem verbreiteten Einsatz einer verbesserten Applikationstechnik in der Praxis wirken verschiedene Parameter entgegen. So ist ein wesentlicher Faktor, dass bei den höheren Anschaffungskosten für eine verbesserte Technik vielfach nicht die ökonomische Verbesserung der Effizienzsteigerung berücksichtigt wird. Um die intrinsische Motivation der Landwirtschaft nachhaltig steigern zu können, müssen ökologische Ziele und ökonomische Effizienz hier stärker im Einklang gebracht werden. Besonders vor dem Hintergrund der produktionstechnischen Voraussetzungen von intensiven Tierhaltungsregionen – wo zweifelsohne das größte Verbesserungspotential besteht – stellt die Unterfußinjektion hier eine neue Möglichkeit dar, diese Win-win-Situation nachhaltig voran zu treiben.

3 Forschungsdesign zum Erreichen der technischen Arbeitsziele des Projektes

Das Forschungsprojekt soll in mehreren nacheinander geschalteten bzw. parallel ablaufenden Versuchsreihen durchgeführt werden. Technikums- und Laborversuche (Februar 2013 – August 2014) zur Definition bestimmter Analyse- und Versuchsparameter (z.B. Messintervall für Ammoniak- und Lachgasmessungen) sind zur Durchführung der sich anschließenden Feldversuche notwendig. Für die Feldversuche sind 2 Vegetationsperioden (April - Oktober 2014; April - Oktober 2015) vorgesehen, um den Einfluss unterschiedlicher Witterungsbedingungen in beiden Versuchsjahren zu erfassen. Die Technikumsversuche vor Beginn der Feldversuche liefern die Grundlage für diese. Weiterführende parallel verlaufende Technikumsversuche sollen zusätzliche prozessrelevante Ergebnisse für die Durchführung der Feldversuche in der zweiten Vegetationsperiode liefern.

Folgenden Fragen soll hierbei nachgegangen werden:

Laborversuch:

- Hat die ausgebrachte Substratmenge einen größeren Einfluss auf die Emissionsfreisetzung als die Ausbringungstechnik?
- Hat die Ausbringungstiefe einen Einfluss auf die Emissionsfreisetzung?
- Können Nitrifikationshemmer die entstehenden Emissionen zusätzlich zur Ausbringungstechnik noch weiter absenken?
- Wie verlagern sich Nährstoffe bei unterschiedlichen Ausbringungstiefen? (Vereisung der Stechzylinderproben mit flüssigen Stickstoff, danach N_{\min} Untersuchung)

Feldversuch:

- Kann die Unterfußdüngung im Vergleich zur bekannten Schleppschlauchdüngung Emissionen senken?

4 Grundlagen zur Entstehung von Emissionen (NH_3 ; N_2O) bei der Unterfußinjektion in Technikumsversuchen

Die Prozessgrundlagen werden an der Abteilung für Verfahrenstechnik in der Veredelungswirtschaft (Standort Vechta) erarbeitet. In Technikumsversuchen, die der Durchführung der Feldversuche vorgeschaltet werden, ist es das Ziel, unter

standardisierten und kontrollierten Umweltbedingungen die optimale Injektionstiefe für die Gülle bzw. den Gärrest zu bestimmen. Dafür werden 84 Mikrokosmen (d = 15 cm; Länge = 40 cm) gebaut. Auf diese Mikrokosmen werden Stahlhülsen aufgesetzt und anschließend eine ungestörte Bodenprobe gewonnen. Nach einer Inkubationszeit von 14 Tagen werden die gefüllten Mikrokosmen unter Variation von „Ausbringungsverfahren“ (Premaister Injektion, Schleppschlauch, Kontrolle) „Injektionstiefe“ (14 cm; 20 cm), „Boden“ (Lehm; Sand; anmooriger Sand) und „Substrat“ (Gülle; Gärrest) hinsichtlich der freigesetzten Emissionen NH_3 und N_2O untersucht (n = 4; Messzeitraum 14 Tage für einen Boden). Die Probengewinnung erfolgt mit der closed-chamber Methode.

Desweiteren wird mit weiteren 64 Mikrokosmen ein N^{15} -Tracerversuch durchgeführt. Hiermit soll untersucht werden welcher Teil des entstehenden Lachgases aus der Nitrifikation und der Denitrifikation stammt. Hierbei wird der Wassergehalt in zwei Stufen variiert. Bei 32 der 64 Mikrokosmen wird eine Behandlung mit einem Nitrifikationsinhibitor vorgenommen. Ein methodischer Vergleich zwischen künstlichen und natürlichen N^{15} -Tracern wird in diesem Versuch zusätzlich durchgeführt, um eine Standardmethode für Tracerversuche zur Untersuchung von N_2O und N_2 Entstehung zu erarbeiten.

Diesen beiden Versuchen vorgeschaltet wird eine Vorversuchsphase von 14 Tagen eingeplant, um den Umgang mit der Messtechnik zu erlernen und eine geeignete Technik für die Substratausbringung zu erarbeiten.

Der sich anschließende Feldversuch sieht folgende Versuchsparameter vor:

- Schleppschlauchausbringung (Kotte Landtechnik) mit Gülle bzw. Gärrest auf Parzelle I bzw. III mit Eingrubbern innerhalb von 4 Stunden und direkter Einsaat,
- gleiche Gülle bzw. gleicher Gärrest (identische Technik) auf Parzelle II bzw. IV mit dem PreMaister (12 m = 16 Reihen) zum gleichen Zeitpunkt mit direkter Einsaat (30 m^3/ha),
- Direkt nach dem Maislegen erfolgt der Aufbau der Messtechnik. Dafür werden auf jeder Parzelle drei Messkammern (3 Wiederholungen) errichtet (12

Kammern = 0,5 x 0,5 x 0,3 cm). Eine Messkammer überdeckt 0.25 m² des Bodens,

- Aufgrund der Tatsache, dass eine Verdichtung Milieuveränderungen im Boden bewirkt, was eine Veränderung der Emissionsgenerierung nach sich ziehen könnte, wird dieser Effekt mit erfasst. Dazu werden jeweils zwei Messkammern auf der mit dem PreMaister bearbeiteten Parzellen II und IV (orange dargestellt) über einer verdichteten Reihe installiert (4 Messkammern 75x1.50x0.5 m),
- Um mögliche Verschiebungen im Boden zu verhindern, wird unter jede Kammer ein Rahmen (Tiefe 10 cm) eingeschlagen, welcher bündig mit dem Bodenhorizont abschließt. Auf den Rahmen wird die Messkammer gelegt (Gummidichtung). Zum Luftabschluss werden beide Elemente mit Schnellverschlüssen verbunden,
- Auf dem Versuchsstandort werden kontinuierlich Bodentemperatur und Bodenwassergehalt gemessen,
- Die Temperaturen unter den Messhauben werden kontinuierlich gemessen,
- Jede Kammer ist mit einem Anschluss für die Gasmessstechnik, sowie mit jeweils 2 Sensoren zur Bestimmung der Bodentemperaturen und -feuchten ausgestattet, um deren Einfluss auf die Ammoniak- und Lachgasemissionen beurteilen zu können,
- Für die Gasmessungen werden die Kammern in 4 Perioden (07:00-08:00 Uhr, 12:00-13:00 Uhr, 17:00-18:00 Uhr, 22:00-23:00 Uhr) pro Tag für jeweils zwei Stunden mit dem Bodenanker verbunden (closed chamber),
- Innerhalb der einen Stunde werden 4 Gasproben aus jeder Kammer gewonnen (0, 20, 40, 60 min nach Haubenschluss). Das Aufkonzentrieren der Gase in einer geschlossenen Kammer wird in der Literatur vor allem für Lachgasmessungen empfohlen,

- Die Messungen beginnen einen Monat vor der Düngung,
- Die parallel zu den Lachgasmessungen erfolgenden Ammoniakmessungen werden von der Abteilung für Verfahrenstechnik mittels Säurefallen und anschließender Bestimmung mit einer Ammoniumelektrode durchgeführt.

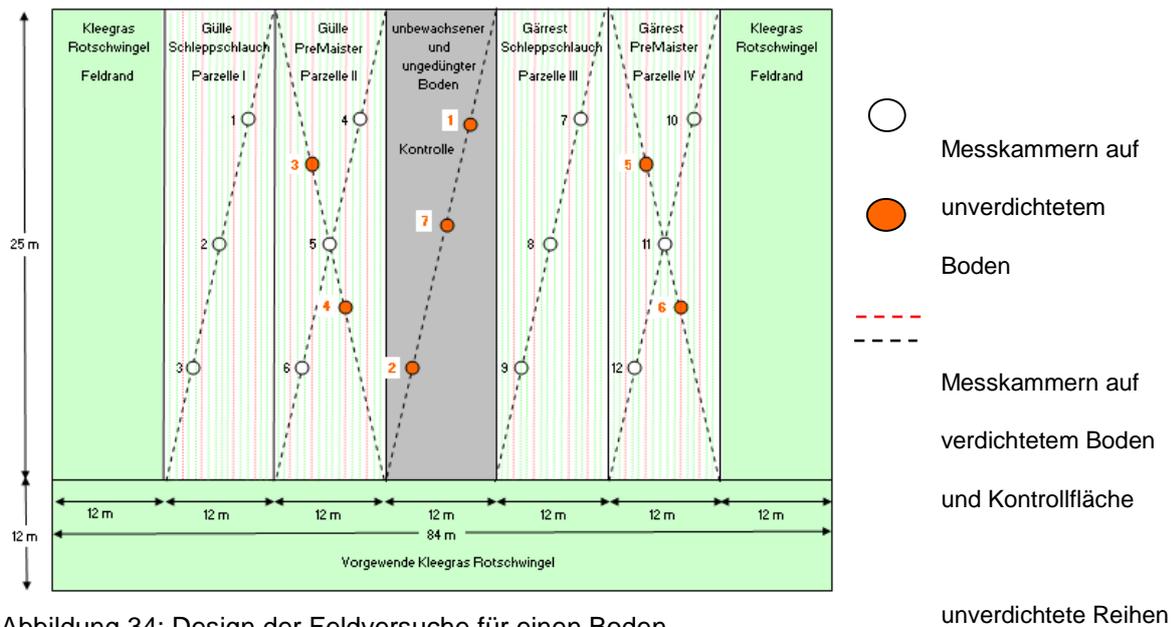


Abbildung 34: Design der Feldversuche für einen Boden

Die Messungen werden über 14 Tage durchgeführt. Über eine Wetterstation werden die Parameter Temperatur, Strahlung, Windgeschwindigkeit, relative Feuchte und Niederschlag online erfasst (14 Tage). Desweiteren werden die Bodentemperatur und die Bodenfeuchte kontinuierlich erfasst. Diese Daten werden für eine statistische Modellierung benötigt. Zusätzlich werden folgende Bodenparameter erfasst: Bodenart und -textur (Sand, Ton, Schluff), Lagerungsdichte und Porosität, Corg, Ngesamt, N_{min} (Ammonium und Nitrat), pH-Wert, Phosphor (CAL- und wasserlöslich), Kalium und Magnesium. Die angestrebte N_{min}-Beprobung wird in verschiedenen Tiefen, zu verschiedenen Zeitpunkten und teilweise sehr fein aufgelöst durchgeführt, so dass die dadurch gewonnenen Daten später für eine Stickstoffbilanzierung genutzt werden können.

Die Ergebnisse aus den Technikumsversuchen und den sich daran anschließenden Feldversuchen stellen die Grundlage für die weiteren Arbeitsabläufe sowie für die

technische Weiterentwicklung der Injektionstechnik dar. Entsprechend wird hier ein Zeitraum von 6 Monaten eingeplant, wo in Kooperation mit der Firma Kotte die Injektionstechnik hinsichtlich Gülleeinbringung (Weiterentwicklung der Schare und der Verdichtung) und Rückverdichtung weiterentwickelt wird.

5 Datenauswertung und Bewertung des Verfahrens

Auf Basis der generierten Ergebnisse werden unterschiedliche Szenarien der praktischen Anwendung entworfen und hinsichtlich der Funktion, Leistung und Umweltwirkung bewertet, dabei ist die Treibhausgasbilanz von besonderer Bedeutung. Der zügige Transfer aufgefundener Lösungen in die Praxis wird durch Erstellung einer Strategie zum weiteren Vorgehen bei der Entwicklung unterstützt.

Arbeitsplan:

	Arbeitspakete	Dauer (Monate)	2013			2014				2015				2016
			II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I
	AP1 Koordination													
1.1	Projektcontrolling	36												
1.2	Berichterstellung	3												
1.3	Strategie für den Ergebnistransfer	3												
	AP2 Prozessgrundlagen													
2.1	Gefäßversuche Bestimmung der Implikationstiefe	9												
	AP3 Emissionsmessungen im Feld													
3.1	Sandboden	3												
3.2	Lehmboden	3												
	AP4 Prozessgrundlagen													
4.1	Datenaufbereitung aus AP2 und AP3	6												
4.2	Technikumsversuche	3												
	AP5 Erntequalität													
5.1	Untersuchungen zur Erntequalität und N_{min}	5												
	AP6 Emissionsmessungen im Feld													
6.1	Sandboden	3												
6.2	Lehmboden	3												
	AP7 Erntequalität													
7.1	Untersuchungen zur Erntequalität und N_{min}	5												
	AP8 Verfahrensbewertung													
8.1	Bewertung des Gesamtverfahrens	6												
8.2	Prognose der Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkung	6												

Projektpartner TI:

Verantwortliche:

Vorname, Name, akad. Grad	Heinz Flessa, Prof. Dr.
Institution und Fachbereich	Thünen Institut Institut für Agrarklimaschutz
Dienstadresse	Bundesallee 50 38116 Braunschweig
Telefon	+495315962601
E-Mail	heinz.flessa@ti.bund.de

Vorname, Name, akad. Grad	Roland Fuß, Dr.
Institution und Fachbereich	Thünen Institut Institut für Agrarklimaschutz
Dienstadresse	Bundesallee 50 38116 Braunschweig
Telefon	+49 531 596 2627
E-Mail	roland.fuss@ti.bund.de

Vorname, Name, akad. Grad	Reinhard Well, PD Dr.
Institution und Fachbereich	Thünen Institut Institut für Agrarklimaschutz
Dienstadresse	Bundesallee 50

38116 Braunschweig

Telefon

+49 531 596 2535

E-Mail

reinhard.well@ti.bund.de

Bei der Kooperation beider Partner soll das TI folgende Aufgaben übernehmen:

- Die von der Abteilung Verfahrenstechnik in der Veredelungswirtschaft genommenen Lachgasproben werden vom TI analysiert (Probenumfang Tab. 1),
- Versuchsergebnisse werden zeitnah vom TI statistisch ausgewertet
- Das TI stellt die Boden- und Oberplatten für die Röhren der Mikrokosmen kostenlos zur Verfügung,
- Die Messung erfolgt in den Messräumen des TI gegen eine wöchentliche Gebühr von 300 € (maximal 10 Wochen),
- Für die Bestimmung von Ammoniakproben wird die aus den Mikrokosmen ausströmende Luft in eine Waschflasche geleitet und mit einer Ammoniumelektrode beprobt. Die für den Versuch benötigte Schwefelsäure und die Messelektrode stellt die Abteilung Verfahrenstechnik. Sämtliche Laborgefäße für den Versuchsaufbau werden vom TI kostenlos gestellt.
- Die Kosten (N¹⁵-Anreicherung, Gasproben, N_{min}-Untersuchung) für den Tracerversuch werden vollständig vom Thünen Institut übernommen

Tabelle 19: Probenumfang

Messzeitpunkt	Bezeichnung	Anzahl Proben	Einzelpreis	Preis Gasflussmessung (4 Wdh.)
01.02.2013 - 15.11.2013	Laborversuch	2800	1,20	3360,00
01.03.2014 - 01.07.2014	Feldversuch I	3584	1,20	4300,80
01.03.2015 - 01.07.2015	Feldversuch II	3584	1,20	4300,80
Gesamtpreis (brutto)				11961,60

Die Proben für den Laborversuch ergeben sich aus 96 Gefäßen (84 Gefäße + 12 Leerrohre) mit einer täglichen Gasflussmessung in 14 Tagen Versuchsdauer. Bei der Versuchsdurchführung in der Gasmessanlage in Braunschweig werden einmal täglich N₂O Messungen vorgenommen, zusätzlich zu den Gefäßen werden täglich 4 Replikate der zugeführten Luft für alle Gefäße gemeinsam beprobt. Durch die Wiederholung des Versuchs mit anderen Parametern verdoppelt sich die Anzahl der Gasproben. Für die Probenahme benötigte Probenahmegefäße und -geräte werden vom TI kostenfrei zur Verfügung gestellt.

Kooperation beider Partner:

Die beiden Projektpartner sollen in folgenden Bereichen kooperieren:

- Beide Projektpartner sind verantwortlich für ein zielführendes Versuchsdesign sowohl im Laborversuch als auch im Feldversuch
- Die Versuchsergebnisse werden von beiden Kooperationspartnern gemeinsam ausgewertet und für spätere Veröffentlichungen aufbereitet. Das TI bringt hier seine Expertise bezüglich Prozessen der N₂O Bildung und -Emissionen, sowie die statistische Auswertung ein.

Weitere Rahmenbedingungen hierzu sind dem Kooperationsvertrag zu entnehmen

Literatur

Butterbach-Bahl K., Kiese R., Haas E. 2010: Prozessorientierte Modellierung von ökosystemaren Stickstoffflüssen und assoziierten Treibhausgasemissionen. In: Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden. KTBL-Schrift 483 S. 151-162.

Chadwick D., Misselbrook T., Pain B. 1999: Potential for reducing gaseous N emissions from high input agriculture. Abstract in: 10th Nitrogen Workshop, August 23-26, 1999, Vol. 2, Theme IV.7, Copenhagen, Denmark.

Döhler H., Horlacher D. 2010: Ammoniakemissionen organischer Düngemittel. In: Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden. KTBL-Schrift 483, S. 51-71.

- Frick R., Menzi H. 1997: Hofdüngeranwendung: Wie Ammoniakverluste vermindern? FAT-Bericht Nr. 496, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon S. 12.
- Haenel H.D., Freibauer A., Rösemann C., Poddey E., Gensior A., Eurich-Menden B., Döhler H. 2010: Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden im Rahmen der deutschen Klimaberichterstattung. In: Emissionen landwirtschaftlich genutzter Böden. KTBL-Schrift 483 S. 11-25.
- Leik 2003: Emission von Ammoniak (NH₃) und Lachgas (N₂O) von landwirtschaftlich genutzten Böden in Abhängigkeit von produktionstechnischen Maßnahmen. Dissertation, Universität Hohenheim.
- Mattila P.K. 1998: Ammonia volatilization from cattle slurry applied to grassland as affected by slurry Behandlung and application technique - first year result. Nutrient Cycling in Agroecosystems 51, 47-50.
- Morcken J. und Sakshaug S. 1998: Direct ground injection of livestock waste slurry to avoid ammonia emission. Nutrient Cycling in Agroecosystems 51, 59-63.
- NIR (National Emission Inventory Report) 2010: Calculations of emission from German agriculture - National Emission Inventory Report (NIR) 20010 for 2008. Haenel, H.D. (Hrsg.), Landbauforschung – vTI agriculture and forestry research, Sonderheft 334, Braunschweig.
- Thorman R.E. 2011: Nitrous oxide emission following the application of livestock manure – an integrated approach. In: Emissionen der Tierhaltung - Treibhausgase, Umweltbewertung, Stand der Technik. KTBL-Schrift 491 S. 217 - 228.
- UBA (Umweltbundesamt) 1993: Berichte des Umweltbundesamtes – Emissionen der Treibhausgase Distickstoffoxid und Methan in Deutschland. Erich Schmidt Verlag, Berlin.

UBA (Umweltbundesamt) 2011: Stickstoff – lebensnotwendiger Nährstoff und gefährlicher Schadstoff. Presseinformation Umweltbundesamt Nr. 04/2011.

vTI (Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig) 2012: Studie zur Vorbereitung einer effizienten und gut abgestimmten Klimaschutzpolitik für den Agrarsektor. Landbauforschung – vTI agriculture und forestry research, Sonderheft 361, Braunschweig.

7.2 Bilder von der Versuchsdurchführung



Abbildung 35: Probenahme von Bodensäulen mit einem Stechzylinder



Abbildung 36: Unbearbeitete Bodensäulen direkt nach der Probenahme

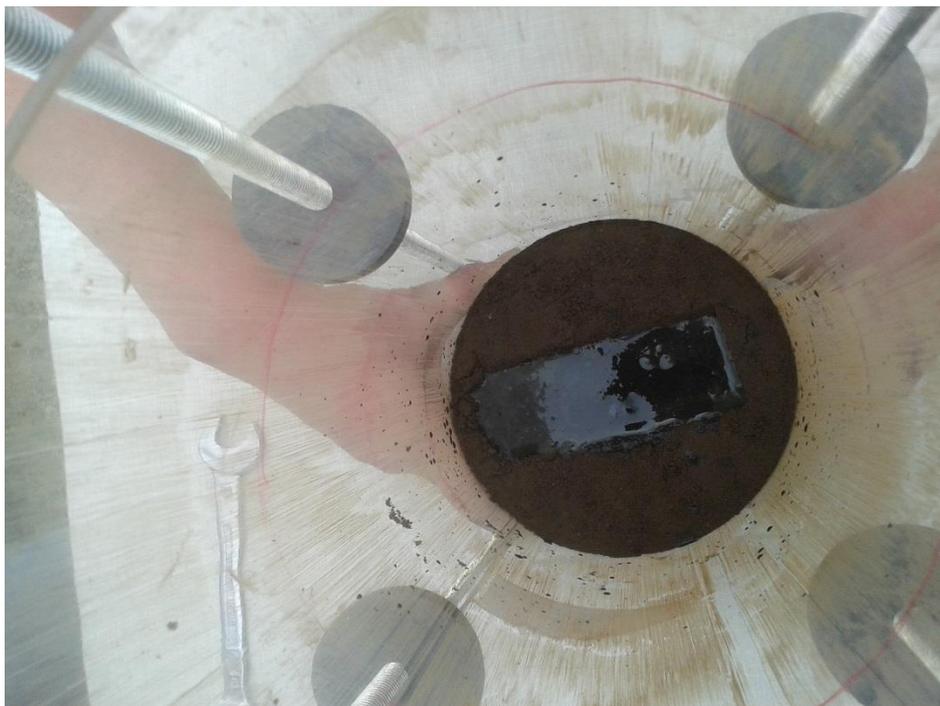


Abbildung 37: Bodensäule Gülle, die in die Bodenfurche gespritzt wurde



Abbildung 38: Mikrokosmenanlage mit Bodensäulen, Detailansicht



Abbildung 39: Mikrokosmenanlage mit Bodensäulen



Abbildung 40: Ventile zum Einstellen der Gasflüsse