

Friedhelm Herbst¹, Oliver Spott², Wolfgang Gans¹

Auswirkungen eines Strohzusatzes zur Gärrestdüngung auf Emissionen klimarelevanter Gase aus dem Boden

Effect of straw addition to fertilization with fermentation residue on emissions of greenhouse gases from soil

384

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Projektes zur Minderung der Freisetzung von klimarelevanten Gasen bei Einsatz von Gärresten wurde u.a. die Wirkung einer zusätzlichen Strohdüngung in Laborversuchen geprüft. Der Strohzusatz erhöhte beachtlich die Kohlendioxidfreisetzung. In den Versuchen, in welchen es zu einer Ammoniakemission kam, wurde diese durch den Strohzusatz gemindert. Die Lachgasemission wurde durch die Strohdüngung sowohl gemindert als auch erhöht. Bei einem Vergleich von Ammonium- und Nitratdüngung lag die Lachgasfreisetzung bei der Ammoniumdüngung höher als bei der Nitratdüngung. Insgesamt hatte der Strohzusatz aber bei beiden N-Formen eine lachgasfördernde Wirkung. Bei der Gärrestdüngung war die Lachgasemission höher als bei einer Ammoniumdüngung, wurde aber bei der Gärrestdüngung durch den Strohzusatz gemindert und bei der Ammoniumdüngung dagegen gesteigert. Der Zusatz von Stroh reduzierte sowohl die Menge an mineralischem Stickstoff im Boden als auch die aus der Düngung stammende Menge an Gesamtstickstoff. Bilanzbetrachtungen deuten darauf hin, dass es bei Strohzusatz auch zu einer erhöhten N₂-Freisetzung gekommen sein kann.

Stichwörter: Gärrestdüngung, Strohdüngung, Stickstoff, klimarelevante Gase, Kohlendioxid, Methan, Lachgas, Ammoniak, Denitrifikation

Abstract

As part of a project to mitigate the release of greenhouse gases due to fermentation residue fertilization the effect of an additional straw application was tested at laboratory scale. It was found that carbon dioxide release was in general markedly increased, while ammonia emission was reduced by straw application. By contrast, nitrous oxide was differently affected by the addition of straw inasmuch as either a reduction or an increase of emission rates was observed. An application of ammonium or nitrate fertilizer revealed an increase of nitrous oxide release in the presence of straw. Concerning ammonium fertilization, however, the release of nitrous oxide was higher compared to that of nitrate fertilization. In addition, the application of straw reduced both the content of mineral nitrogen in the soil as well as the amount of total soil nitrogen. Therefore, the addition of straw might even have resulted in an increased release of dinitrogen.

Key words: Fertilization of fermentation residue, straw application, nitrogen, greenhouse gases, carbon dioxide, methane, nitrous oxide, ammonia, denitrification

Einleitung

Die Strohdüngung ist ein wesentlicher Bestandteil der organischen Düngung, welche insbesondere der Reprä-

Institut

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Professur für Pflanzenernährung¹
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Department Bodenphysik²

Kontaktanschrift

Dr. Friedhelm Herbst, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Professur für Pflanzenernährung, Betty-Heimann-Str. 3, 06120 Halle, E-Mail: Friedhelm.Herbst@landw.uni-halle.de

Zur Veröffentlichung angenommen

15. März 2012

duktion der organischen Bodensubstanz dient. Das Stroh stimuliert darüber hinaus aufgrund seiner leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen das Leben zahlreicher Organismen im Boden. Damit verbunden kommt es nach einer Strohdüngung zu einer Abnahme der Menge an mineralischem Stickstoff im Boden, die bereits vielfach nachgewiesen wurde. Als Erklärung wird hauptsächlich eine mikrobielle Bindung dieses Stickstoffs im Körperprotein von Mikroorganismen angenommen, welche bisher aber wenig analytisch belegt wurde (SCHUSTER und GARZ, 1990; GEISSELER et al., 2010). Andere Ursachen einschließlich erhöhter gasförmiger N-Verluste können dabei nicht ausgeschlossen werden.

Die Freisetzung von klimarelevanten Gasen beim Einsatz der Düngestoffe in der Pflanzenproduktion ist in den letzten Jahren verstärkt ins Blickfeld geraten. Das Augenmerk liegt dabei besonders auf den N-haltigen organischen Düngemitteln wie Gülle und Gärreste. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird nach Mitteln und Methoden gesucht, die zu einer Minderung der Freisetzung der klimarelevanten Gase führen könnten. Hierfür kommt z.B. Stroh in Frage, da es im Gegensatz zu Gülle und Gärrest N-arm ist.

Nachfolgend werden Ergebnisse aus sechs Laborversuchen mit Strohdüngung vorgestellt. Dabei wurde das Stroh nicht als Quelle für die Freisetzung, sondern als ein mögliches Mittel zur Senkung der Emission von klimarelevanten Gasen geprüft. In einem parallel dazu durchgeführten Feldversuch hatte der Strohzusatz zur Gärrestdüngung eine Erhöhung der Freisetzung von Kohlendioxid, Methan und Lachgas zur Folge (HERBST et al., 2010). In kanadischen und chinesischen Untersuchungen kam es in Feldversuchen bei Stroheinsatz sowohl zu einer Erhöhung als auch zu einer Minderung der Lachgasfreisetzung (HAO et al., 2001; MA et al., 2009; MA et al., 2010).

Material und Methoden

Die Untersuchungen erfolgten im Rahmen einer Versuchsserie, in der unterschiedliche Applikationsmethoden und verschiedene Zusatzstoffe zur Gärrestapplikation geprüft wurden. Nachfolgend werden nur die Versuche mit Strohzusatz und die dazu relevanten Prüfvarianten dargestellt. In diesen Versuchen wurde das Stroh stets nur

bei gleichzeitiger Anwendung eines Gärrestes bzw. einer mineralischen N-Form geprüft. Ein alleiniger Zusatz von Stroh zum Boden kam nicht zur Anwendung. Eine ausführliche Beschreibung und Auswertung aller Versuche liegt unter HERBST und GANS (2010) vor.

Die Versuchsansätze (Tab. 1) wiesen jeweils 5 Prüfvarianten mit 3 Wiederholungen auf. In den Ergebnisdarstellungen sind entweder alle 5 Prüfvarianten (z.B. Abb. 5) oder nur 3 für die Strohdüngung relevante Varianten (z.B. Abb. 1) dargestellt. Das verwendete Weizenstroh war auf maximal 1 cm Länge zerkleinert und hatte einen TS-Gehalt von 91,6%, einen N_T-Gehalt von 0,595% in FM sowie einen C_T-Gehalt von 39,6% in FM. Es wurde in einer Aufwandmenge von 4,30 g/Gefäß (äquivalent 50 dt/ha) zusammen mit dem Gärrest in den Boden eingearbeitet.

Die Merkmale der in den einzelnen Versuchen eingesetzten Gärreste und Böden sind in Tab. 2 und 3 enthalten. Die Böden stammen von Standorten, an denen auch Feldversuche zum oben genannten Projekt durchgeführt wurden. Der Boden wurde aus der Ackerkrume entnommen und auf < 10 mm zerkleinert. Der Trockenmassegehalt bei Versuchsansatz entsprach dem Zustand bei der Entnahme im Feld und wurde bewusst in weiten Grenzen geprüft. Neben Gärresten aus Praxisbiogasanlagen wurde



Abb. 1. Laborversuchsanlage mit Schlauchpumpe, Reaktionsgefäßen, Gas-Vials und NH₃-Waschflaschen.

Tab. 1. Durchgeführte Versuche

Versuch	Boden Herkunft	Gärrest Herkunft	Gärsubstrate	Versuchstage
L1	Halle	Altmark	Maissilage	22
L3	Dedelow	Baumersroda	Maissilage	17
L6	Pahren	Pahren	Rindergülle/Maissilage	42
L7	Bad Lauchstädt	Bad Lauchstädt	Rindergülle/Mist/Maissilage	30
L8	Bad Lauchstädt	Prüfung von ¹⁵ NH ₄) ₂ SO ₄ - oder K ¹⁵ NO ₃ -Lösung		31
L9	Halle	Aus ¹⁵ N-markiertem Mais oder (¹⁵ NH ₄) ₂ SO ₄		28

Tab. 2. Gärrestmerkmale

Versuch	Gärssubstrate	Gärrestmenge g/Gefäß	TS %	pH-Wert	% i. FM	
					NH ₄ -N	N _t
L1	Maissilage	43,9	6,0	8,0	0,196	0,461
L3	Maissilage	39,8	9,0	8,0	0,216	0,589
L6	Rindergülle/Maissilage	37,1	5,4	7,7	0,231	0,433
L7	Rindergülle/Mist/Maissilage	28,8	9,1	7,9	0,298	0,604
L8	Prüfung von (¹⁵ NH ₄) ₂ SO ₄ oder K ¹⁵ NO ₃ -Lösung (20 ml/Gefäß)					
L9	¹⁵ N-markierter Mais	62,0	6,6	8,6	0,139	0,408

Tab. 3. Bodenmerkmale

Versuch	Bodenart	Trocken- masse %	pH-Wert	mg/100 TM g		% i. FM	
				NH ₄ -N	NO ₃ -N	N _t	C _t
L1	Lehmiger Sand	90,1	7,1	0,21	4,69	0,108	1,58
L3	Lehmiger Sand	90,3	5,4	0,14	3,11	0,066	0,86
L6	Lehm	98,5	6,3	0,93	5,88	0,258	2,70
L7, L8	Löß-Schwarzerde	83,4	6,6	0,04	0,22	0,147	1,73
L9	Lehmiger Sand	99,7	6,3	0,20	0,20	0,090	1,13

auch ein speziell aus ¹⁵N-markiertem Mais in einem Laborfermenter hergestellter Gärrest (14,5 at%¹⁵N) sowie ¹⁵N-markiertes Ammoniumsulfat (99,0 at%¹⁵N) und ¹⁵N-markiertes Kaliumnitrat (86,8 at%¹⁵N) als Düngestoffe geprüft. Die Aufwandmenge betrug stets äquivalent 100 kg NH₄-N/ha bzw. bei Kaliumnitrat 100 kg NO₃-N/ha.

Als Reaktionsgefäße dienten Saugflaschen mit einer Bodenoberfläche von 86 cm² und einem Volumen von 1120 cm³ (Abb. 1). In die Gefäße wurden 400 g Boden gegeben und die Düngestoffe darin oberflächlich eingearbeitet. Daneben blieb auch eine Variante ungedüngt. Durch die Gefäße wurde mittels einer 16-Kanal-Schlauchpumpe in einem offenen System ein Luftstrom mit einer Flussrate von 5 ml/min geleitet. Dieser Luftstrom wurde anschließend durch Septum-Vials geführt. Die aus den Vials abströmende Luft gelangte in Waschflaschen mit 2%iger Borsäure, um freigesetztes Ammoniak in Form von Ammonium zu binden. Der Austausch der Vials erfolgte am ersten Versuchstag mehrfach, in den folgenden Versuchstagen einmal täglich und gegen Versuchsende im Abstand von mehreren Tagen. Die Messung der Ammoniakfreisetzung geschah täglich und so lange, wie Ammoniak auftrat. Alle Messungen erfolgten bei Raumtemperatur zwischen 18 und 25 °C. Die Versuchsdauer lag zwischen 17 und 42 Tagen. Zum Abschluss der Versuche erfolgte im Boden nach erfolgter Mischung die Messung des pH-Wertes, des mineralischen und teilweise Gesamt-Stickstoffs.

Die Analyse der in den Vials vorliegenden Gase Methan, Lachgas und Kohlendioxid erfolgte mittels Gaschromato-

graphie (GC-14B, Shimadzu, siehe SEGSCHEIDER et al., 1996). Die im Untersuchungszeitraum emittierten Gas-mengen wurden aus den ermittelten Konzentrationen und der die Reaktionsgefäße durchströmenden Luftmenge errechnet. Beim Ammoniak wurden die emittierten N-Mengen direkt durch eine potentiometrische Titration der 2%igen Borsäure mit 0,05 N Schwefelsäure bestimmt. Die Bodenanalysen erfolgten im feuchten Boden bei einer Einwaage von 20 g Boden und Doppelbestimmung. Der pH-Wert im Boden wurde in einer Aufschlammung mit 0,01 M Calciumchlorid-Lösung (50 ml/Probe) potentiometrisch bestimmt. Die Analyse des Gehaltes an mineralischem Stickstoff erfolgte nach Extraktion mit 0,0125 M Calciumchlorid-Lösung (100 ml/Probe) mittels Wasserdampfdestillation. In den Versuchen mit ¹⁵N-Anwendung wurden der Gesamt-N-Gehalt und dessen ¹⁵N-Anteil im getrockneten Boden mittels Elementaranalysator Vario EL gekoppelt mit Stabilisotopenanalysator NOI 7 (Fa. Fischer) bestimmt. Der Verbleib des Dünger-N im Boden wurde unter Berücksichtigung der natürlichen Isotopenhäufigkeit (0,366 at%¹⁵N) und dem ¹⁵N-Markierungsgrad der Düngestoffe ermittelt. In den Abbildungen stellen die Fehlerbalken die Standardabweichung der 3 Wiederholungen dar.

Ergebnisse

Gasemissionen

Der ungedüngte Boden wirkte beim Methan stets als Senke. Beim Einsatz von Gärresten kam es nur unmittel-

bar nach der Applikation zu einer Freisetzung von Methan. Der Zusatz von Stroh hatte auf die CH₄-Freisetzung keinen Einfluss und wird deshalb nicht dargestellt.

Die Freisetzung von CO₂ aus dem Boden wurde sowohl durch den Gärresteinsatz als auch durch den Strohzusatz beachtlich erhöht. Dabei lagen in der Regel die Freisetzungsraten in den ersten Tagen nach der Applikation am höchsten (Abb. 1a). Aus dem ungedüngten Boden erfolgte keine Ammoniakemission. Bei Einsatz eines Gärrestes trat eine solche nur in 3 der 6 Versuchen (L1, L3, L9) auf. In diesen 3 Versuchen wurde die im Untersuchungszeitraum freigesetzte Ammoniakmenge durch den Strohzusatz signifikant reduziert (Abb. 2). Ein typischer Verlauf der Ammoniakfreisetzung ist in Abb. 3 dargestellt.

Im ungedüngten Boden war die Lachgasfreisetzung in allen Versuchen gering. Sie wurde durch die Gärrestdüngung aber deutlich erhöht. Der Einfluss der zusätzlichen Strohzugabe auf die N₂O-Emission war unterschiedlich. In 2 Versuchen zeigte der Strohzusatz keine eindeutige Wirkung (L1, L7), in 2 Versuchen wurde die Lachgasfreisetzung gesenkt (L3, L9) und in 2 Versuchen erhöht (L6, L8). In Abb. 4 ist für alle 3 Fälle die im Unter-

suchungszeitraum freigesetzte Lachgasmenge dargestellt. Besonders deutlich fiel die Erhöhung beim Strohzusatz zu einer mineralischen Ammonium-Düngung aus (Abb. 5 und 6). Die Differenziertheit der Ergebnisse wird vor allem im Versuch L9 deutlich. Die Lachgasfreisetzung lag bei der Gärrestdüngung deutlich höher als bei der Ammoniumdüngung, wurde aber bei der Gärrestdüngung durch den Strohzusatz in der Summe der im Untersuchungszeitraum freigesetzten Menge deutlich gemindert und bei der Ammoniumdüngung dagegen gesteigert.

Umsetzungen im Boden

Die Gärrestzufuhr führte zu Veränderungen des pH-Wertes des Bodens, wobei es sowohl zu einem Anstieg als auch Abfall kam. In allen Versuchen ist aber erkennbar, dass der zusätzliche Stroheinsatz die pH-Veränderungen durch die Gärrest-Applikation ausgeglichen hat (Abb. 7). Bei der Ammoniumdüngung im Versuch L8 war die pH-Absenkung am deutlichsten und wurde durch den Stroheinsatz gemindert (Abb. 8). Bei der Nitratdüngung blieb der pH-Wert unverändert und der Strohzusatz erhöhte ihn.

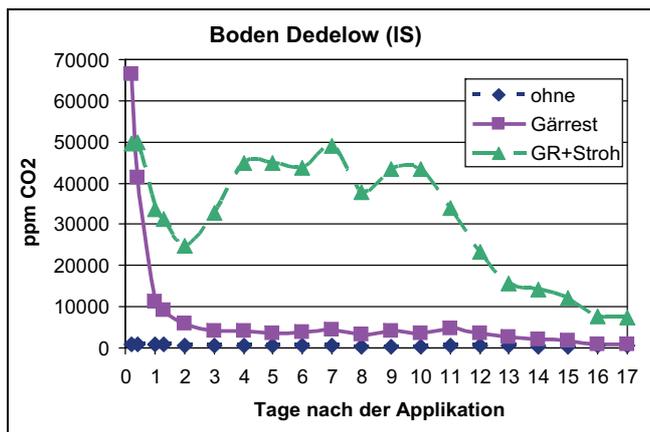


Abb. 1a. Verlauf der CO₂-Konzentration im Versuch L3.

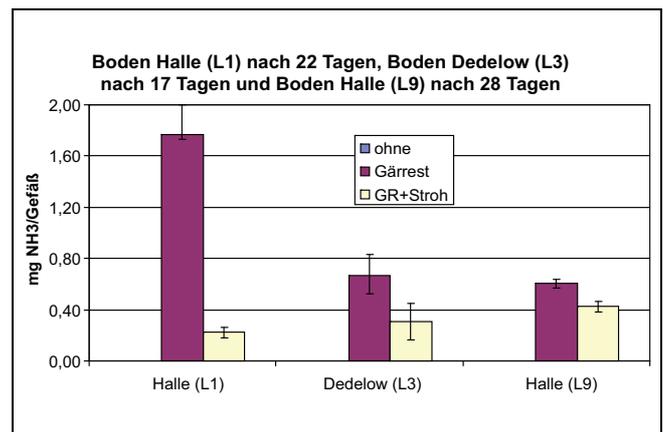


Abb. 2. NH₃-Freisetzung in den Versuchen L1, L3, L9 (ohne Zusatz erfolgte keine NH₃-Freisetzung).

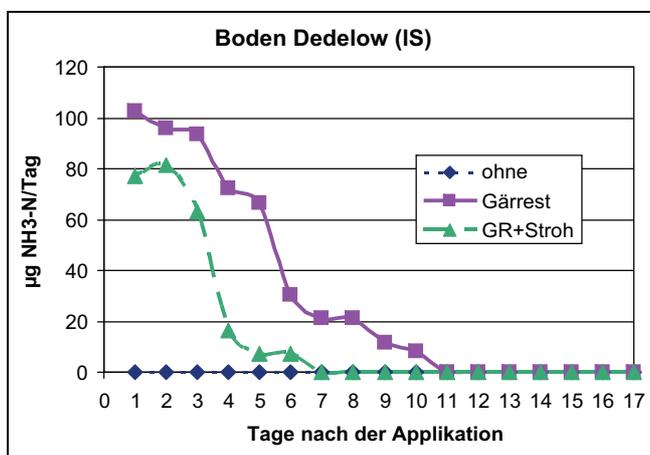


Abb. 3. Verlauf der NH₃-Freisetzung im Versuch L3.

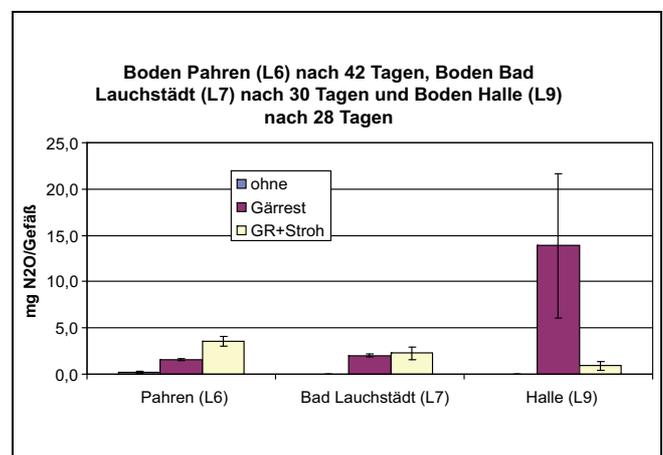


Abb. 4. N₂O-Freisetzung in den Versuchen L6, L7, L9.

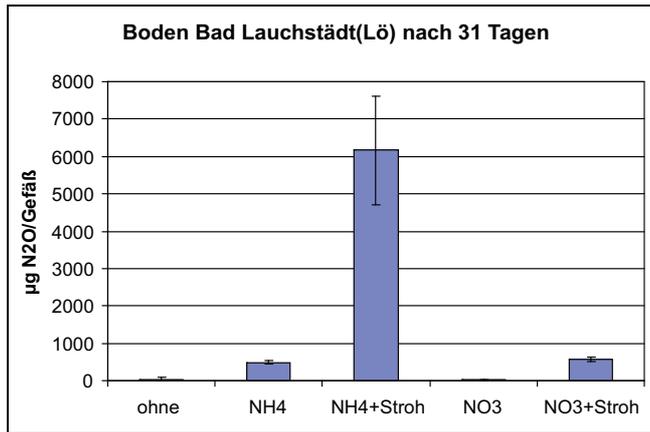


Abb. 5. N₂O-Freisetzung im Versuch L8.

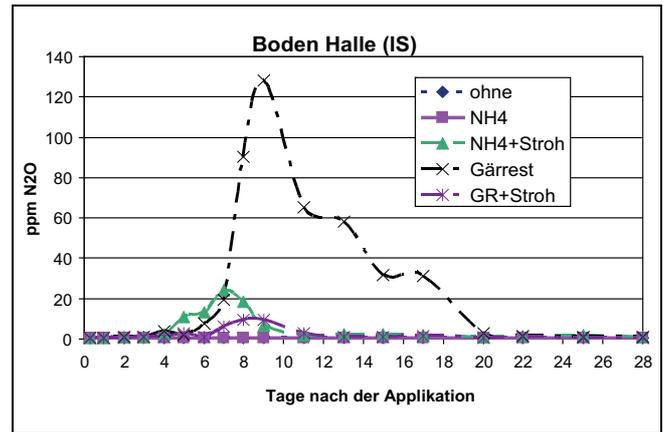


Abb. 6. Verlauf der N₂O-Konzentration im Versuch L9.

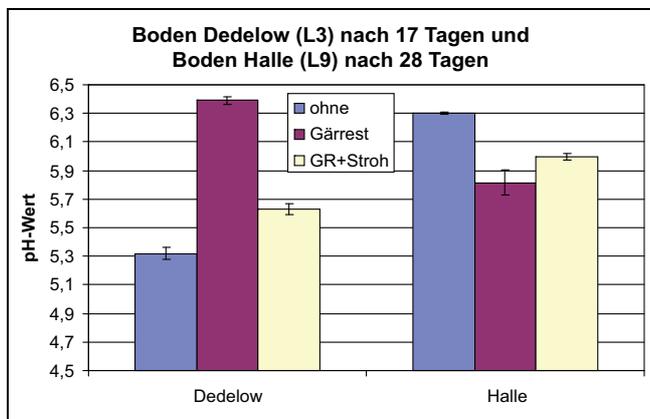


Abb. 7. pH-Wert des Bodens zu Versuchsende in den Versuchen L3 und L9.

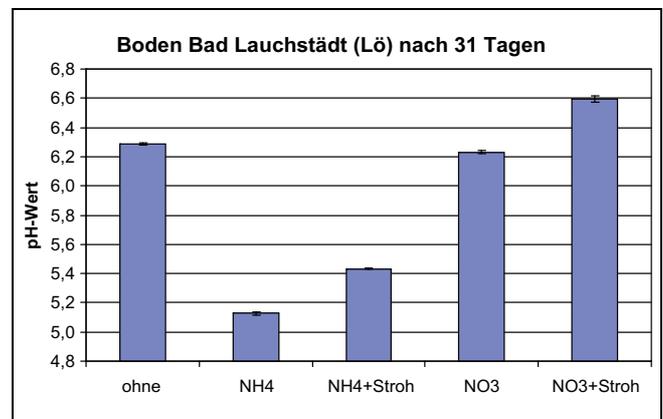


Abb. 8. pH-Wert des Bodens zu Versuchsende im Versuch L8.

Die Zufuhr der N-haltigen Düngestoffe vergrößerte in allen Versuchen die Menge an mineralischem Stickstoff (N_{min}) im Boden. Die zusätzliche Stroheinbringung reduzierte diesen Effekt jedoch in allen Versuchen deutlich (in Abb. 9 für Versuch L3 dargestellt). In den Versuchen mit ¹⁵N-markierten Düngestoffen war bei der zusätzlichen Strohdüngung auch eine Abnahme der wiedergefundenen ¹⁵N-Dünger Menge festzustellen (Abb. 10). Bei Versuchen, in denen bis Versuchsende noch Ammonium-N aus der Gärrestapplikation vorlag, nahm diese Menge bei Strohzusatz noch stärker ab als die Summe aus Ammonium- und Nitrat-N, was auf eine intensivere NH₄⁺-Umsetzung (beispielsweise durch Nitrifikation oder mikrobielle NH₄⁺-Aufnahme) oder NH₄⁺-Fixierung (KOWALENKO, 1981) des mit dem Gärrest zugeführten Ammonium-N bei Strohzusatz hindeutet (Abb. 9).

Bilanzbetrachtung

In den Versuchen mit ¹⁵N-Einsatz (L8, L9) wurde aus der gemessenen Freisetzung von Ammoniak und Lachgas, welche durch Differenzbildung zur ungedüngten Variante ermittelt wurde, und der im Boden wiedergefundenen ¹⁵N-Menge eine Bilanzbetrachtung vorgenommen, die für Versuch L9 in Abb. 11 dargestellt ist. In beiden Ver-

suchen erhöhte sich deutlich das Defizit bei den Varianten mit Strohzusatz gegenüber ohne Strohzusatz.

Diskussion

Gülle und Gärreste werden zur sinnvollen Rückführung der in ihnen enthaltenen Nährstoffe und organischen Substanz folgerichtig in der Pflanzenproduktion eingesetzt. Damit ist aber eine Freisetzung von Kohlendioxid, Lachgas, Methan und Ammoniak verbunden, welche klima- und umweltrelevant sind. Die Freisetzung dieser Gase ist in der Regel die Folge der im Boden ablaufenden Umsetzungsprozesse, die nur bedingt steuerbar sind. So kann und sollte die Ammoniakfreisetzung durch eine sofortige und vollständige Einbringung der Düngestoffe in den Boden ausgeschlossen werden (DÖHLER und HORLACHER, 2010). Die Methanfreisetzung betrifft in der Regel nur den in den Düngestoffen gelösten Anteil. Sie tritt deshalb nur unmittelbar nach der Ausbringung auf und ist im Vergleich zu den anderen Gasen als eher untergeordnet einzustufen (HERBST und GANS, 2010). Die Freisetzung von Kohlendioxid aus den organischen Düngestoffen kann unter praktischen Bedingungen nicht

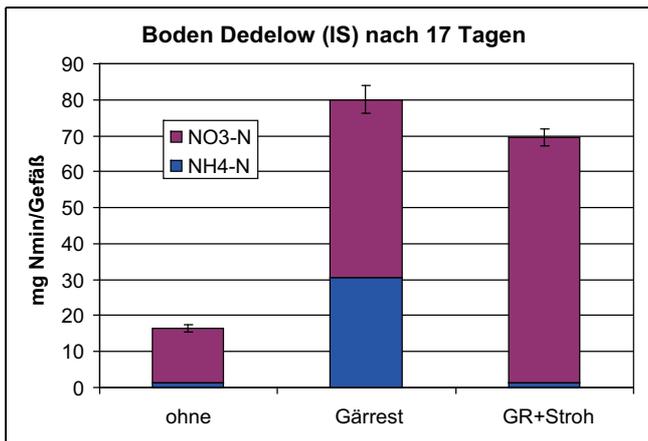


Abb. 9. N_{min} im Boden zu Versuchsende im Versuch L3.

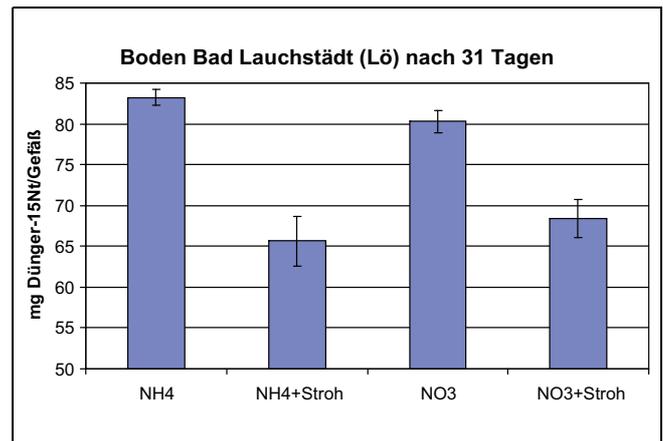


Abb. 10. Dünger-N im Boden zu Versuchsende im Versuch L8.

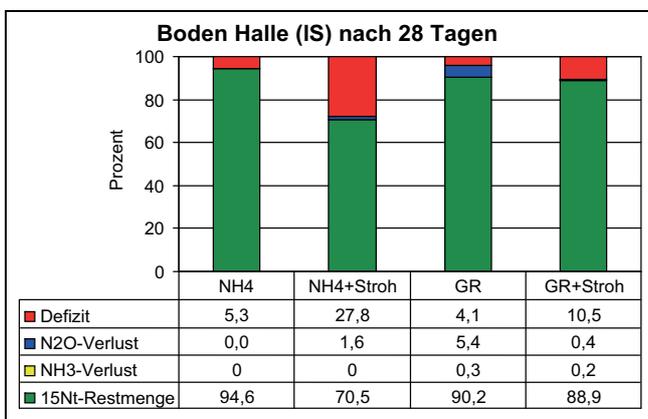


Abb. 11. Bilanzbetrachtung der N-Düngermenge in Versuch L9.

reduziert werden. Die höchste Klimarelevanz besitzt das Lachgas, für welches bereits verschiedene Ansätze zur Minderung der Freisetzung diskutiert werden (RUSER et al., 2006; FLESSA, 2010).

Im Rahmen des eingangs genannten Projektes wurden verschiedene Methoden und Mittel, u.a. auch Stroh, in ihrer Wirkung auf die Gasfreisetzungen geprüft (HERBST und GANS, 2010). Ähnliche Untersuchungen zur Prüfung der Wirkung von Stroh auf die Freisetzung der 4 genannten Gase sind im Zusammenhang mit der Gärrestdüngung nicht bekannt. Dagegen werden schon seit Ende des 19. Jahrhunderts die Wirkungen des Strohes auf das Pflanzenwachstum und Umsetzungen im Boden untersucht und diskutiert. Bereits MAERCKER (1895) hatte auf die wachstums- und ertragshemmende Wirkung des Strohes sowie dessen Wirkung als stickstoffzehrenden Bestandteil des Stallmistes hingewiesen. Die N-Verluste im Boden bei der Strohdüngung diskutierte schon SCHNEIDEWIND (1897) im Zusammenhang mit der Denitrifikation und der mikrobiellen Eiweißbindung. Auf eine denitrifikationssteigernde Wirkung von leicht löslichen organischen Substanzen haben bereits PFEIFFER und LEMMERMANN (1900) aufmerksam gemacht.

Alle erzielten Ergebnisse zu den Umsetzungen im Boden stehen in Übereinstimmung mit den damals schon

bekannteren Erkenntnissen. Das Stroh stellt eine leicht verfügbare Kohlenstoff- und damit auch Energiequelle für die Mikroorganismen dar, wodurch offensichtlich deren Entwicklung direkt gefördert wird. Ausdruck dafür ist die erhöhte CO₂-Freisetzung bei Strohzusatz zum Gärrest, obwohl mit dem Gärrest bereits Kohlenstoff in einem großen Umfang dem Boden zugeführt wurde. Von dieser erhöhten CO₂-Freisetzung profitieren autotrophe Nitrifikanten, d.h., sie können Kohlendioxid assimilieren und benötigen keinen organisch gebundenen Kohlenstoff (SCHILLING, 2000). Die in drei Versuchen festgestellte schnellere Abnahme der NH₄-N Gehalte bei Gärrest- plus Strohzusatz könnte daher die Folge einer verstärkten Nitrifikation durch die verbesserte CO₂-Verfügbarkeit aus der Strohmineralisierung sein.

Die in allen Versuchen im Boden zu Versuchsende nachgewiesene geringere Menge an mineralischem Stickstoff bei Strohzugabe steht offensichtlich in Beziehung zu einem verstärkten Wachstum verschiedener Mikroorganismen. Der Fehlbetrag gegenüber ausschließlicher Gärrestdüngung kann entweder mikrobiell gebunden und/oder zusätzlich gasförmig entbunden worden sein. Aufgrund eines solchen Fehlbetrages an mineralischem Stickstoff im Boden nach Strohzugabe hatten SCHUSTER und GARZ (1990) eine Bestimmung der Biomasse durchgeführt. Dabei wurde zwar bei Strohzusatz eine höhere Bindung an Stickstoff in der Biomasse gefunden, welche aber nur zu einem geringen Teil den Fehlbetrag erklärte. Eine gasförmige Entbindung des Stickstoffs wurde unter jenen Versuchsbedingungen für nicht möglich gehalten. SCHMÄDEKE (1998) ermittelte in ähnlichen Modellversuchen neben dem bilanzierten N-Verlust die N₂O- und N₂-Freisetzung. Die festgestellten gasförmigen N-Verluste waren jedoch nur gering, so dass die mikrobielle N-Festlegung als Hauptursache für den bilanzierten N-Verlust angenommen wurde. KOWALENKO (1981) wies darauf hin, dass die Zugabe von Stroh die abiotische NH₄-Fixierung an Tonmineralen stark erhöht. Die hier bei Strohzugabe z.T. beobachtete beschleunigte Abnahme der NH₄-Menge im Boden (Abb. 9) könnte demnach auch auf eine verstärkte NH₄-Fixierung an Tonmineralen zurückzuführen sein.

In den hier vorgestellten Versuchen wurde die Freisetzung von Ammoniak und Lachgas gemessen und nachgewiesen. Eine Analyse von elementarem Stickstoff erfolgte nicht. Seine Freisetzung kann aber nicht ausgeschlossen werden, da durch die Zugabe der Gärreste bzw. N-Lösungen eine Zunahme der Bodenfeuchte und damit verbunden eine Ausdehnung der anaeroben Bodenbereiche wahrscheinlich ist. Darüber hinaus weisen die ermittelten, erhöhten Defizite des applizierten ^{15}N -Düngerstickstoffs bei Strohzusatz auf einen nicht quantifizierten gasförmigen N-Verlust hin. Ein direkter analytischer Nachweis der N_2 -Freisetzung erscheint deshalb zukünftig dringend erforderlich, um die Bilanzierung zu vervollständigen und die Düngungsstrategien zu präzisieren. Der elementare Stickstoff ist zwar nicht klimarelevant; er stellt aber einen für die Landwirtschaft relevanten N-Verlust dar. Diesen N-Verlust gilt es neben den Verlusten von Ammoniak und Lachgas ebenfalls zu mindern, um den Einsatz der N-Düngemittel prinzipiell effizienter zu machen. Darüber hinaus ermöglicht ein besseres Verständnis des mikrobiellen N_2O -Abbaus im Boden (durch N_2O -Reduktion zu N_2 im Zuge der Denitrifikation) die Entwicklung von neuen Minderungsstrategien der düngerinduzierten N_2O -Freisetzung.

Die Wirkung der Strohzugabe auf die Lachgasfreisetzung fällt wie in den Untersuchungen von HAO et al. (2001), MA et al. (2009) und MA et al. (2010) nicht eindeutig aus. Durch den Strohzusatz zur Gärrestapplikation wurde die Emission von Lachgas sowohl gesenkt als auch erhöht. In den Untersuchungen von HAO et al. (2001) führte die Strohdüngung zusammen mit einer N-Düngung zu einem Anstieg, aber ohne N-Düngung zu einer Minderung der Lachgasfreisetzung. Die Ursachen für die unterschiedliche Wirkung in den dargestellten Ergebnissen konnten noch nicht geklärt werden und sind Gegenstand der weiterführenden Untersuchungen. Dabei werden Boden- und Gärrestmerkmale und insbesondere der Einfluss unterschiedlicher Bodenfeuchten geprüft.

Auf die offenbar besondere Bedeutung von leicht verfügbaren Kohlenstoffverbindungen auf die Lachgasfreisetzung wiesen bereits FLESSA und BEESE (1995) bei Einsatz von Zuckerrübenblatt als C-Quelle hin. Dieser Einfluss wird vor allem auch im Versuch L9 deutlich, bei dem ein Gärrest mit einer Ammoniumlösung verglichen wurde. Die Gärrestdüngung ergab, wie in Untersuchungen von KÖSTER et al. (2009), eine deutlich höhere Lachgasfreisetzung als die Ammoniumdüngung, wofür eine Ursache in der gleichzeitigen Kohlenstoffzufuhr mit dem Gärrest gesehen werden kann. Durch die zusätzliche Stroheinbringung wurde die Lachgasemission bei der Gärrestdüngung vermindert, bei der Ammoniumdüngung dagegen erhöht. Die Erklärung dafür ist noch offen und wird in weiterführenden Untersuchungen gesucht.

Bedeutungsvoll kann für die Zusammenhänge außerdem der Verlauf des pH-Wertes im Boden nach der Applikation sein, worauf auch SCHMÄDEKE (1998) hinweist. Es zeigte sich, dass sich dieser bis zum Versuchsende durch den Gärrest- und Strohzusatz in den einzelnen Versuchen unterschiedlich eingestellt hat. Bei der Bewertung der

Ergebnisse ist neben der unterschiedlichen Versuchsdauer zu beachten, dass der Gärrest und das Stroh beim Versuchsansatz nicht gleichmäßig dem Boden untergemischt, sondern praxisnah eingearbeitet wurde. Zu Versuchsende erfolgte vor der Probenahme eine Mischung des gesamten Bodens pro Gefäß. Aus der Gegenüberstellung der pH-Werte mit Düngestoffen zum ungedüngten Boden kann davon ausgegangen werden, dass in der Umgebung der zugeführten Düngestoffe stärkere Veränderungen vorgelegen haben als mit der Analyse nachgewiesen wurde. Diese tatsächlichen pH-Werte in den mit Düngestoffen angereicherten Bodenaggregaten könnten gegebenenfalls genauere Erklärungen für den Verlauf der Umsetzungen geben. Dieser Aspekt sollte künftig bei der Probenahme und Untersuchung Berücksichtigung finden.

Das Experiment mit dem Einsatz von Ammonium- und Nitrat-Lösungen (L8) belegt eindrucksvoll, dass Lachgas vor allem auch bei der Nitrifikation entstehen kann, wozu bereits von SENBAYRAM et al. (2009) gezielte Untersuchungen vorgenommen wurden. Auch SCHMÄDEKE (1998) stellte nach Ammonium-Zugabe zum Boden eine höhere Lachgasfreisetzung fest als nach Nitrat-Zugabe und kommt zu dem Schluss, dass das gebildete Lachgas zum überwiegenden Teil nitrifikationsbürtig war. Gleiches kann für die dargestellten Ergebnisse angenommen werden. Diese lassen jedoch keine Aussagen über das Verhältnis von nitrifikativen und denitrifikativen Lachgasverlusten zu. Auch ist es nicht möglich, aus der gemessenen Lachgasmenge auf eine vermutete Menge an freigesetztem N_2 zu schließen, da das Verhältnis von N_2O - und N_2 -Freisetzung bei einem analytischen Nachweis in sehr weiten Grenzen schwankt (WALENSIK, 1996; SPOTT et al., 2006; DITTERT und MÜHLING, 2009). Die vorgenommenen Bilanzbetrachtungen sind nur zur qualitativen Einschätzung einer Denitrifikation möglich, nicht aber zur Ermittlung des exakten Denitrifikationsverlustes, was auch SCHMÄDEKE (1998) aus seinen Untersuchungen ableitet.

Die besondere Bedeutung des Ablaufes der Nitrifikation für die Lachgasfreisetzung wird bei der Betrachtung von weiteren im Projekt erzielten Ergebnissen deutlich. Bei Einsatz eines Nitrifikationsinhibitors zum Gärrest kam es in 5 von 8 durchgeführten Versuchen zu einer deutlichen Reduzierung der Lachgasfreisetzung (HERBST und GANS, 2010; HERBST et al., 2010; KRAFT et al., 2011). Dies steht in Übereinstimmung mit der Beobachtung, dass eine Strohdüngung, welche die Nitrifikation möglicherweise beschleunigt (siehe oben), zu einer erhöhten Lachgasfreisetzung führen kann. Die Ergebnisse deuten somit darauf hin, dass der Lachgasproduktion durch die Nitrifikation von durch Düngungsmaßnahmen zugeführten Ammonium-N eine größere Bedeutung zukommt.

Zur Wirkung des Strohzusatzes auf eine mögliche Förderung der Denitrifikation kann davon ausgegangen werden, dass es durch den Abbau des Strohs zu einer O_2 -Zehrung im Boden kommt. Bei limitierter Sauerstoffnachlieferung von der Bodenoberfläche (beispielsweise durch erhöhte Bodenfeuchte) tritt in Teilen des Bodens ein Sauerstoffmangel auf, wodurch Nitrat durch die

Denitrifikanten verstärkt reduziert wird und infolgedessen eine Zunahme der Lachgasproduktion erfolgen kann. Auf Basis der mikrobiellen Reduktion des denitrifikatorisch gebildeten N_2O ist darüber hinaus auch eine Zunahme der Produktion von elementarem Stickstoff (N_2) möglich. FLESSA und BEESE (1995) wiesen diesbezüglich die engen Beziehungen der Lachgasfreisetzung zum wassergesättigten Porenvolumen und den verfügbaren Kohlenstoffquellen nach.

Im Gegensatz zur Lachgasfreisetzung hat der Strohzusatz zur Gärrestdüngung in den vorgestellten Versuchen die Ammoniakfreisetzung eindeutig gemindert. Die Erklärung dafür sollte wiederum in der erhöhten mikrobiellen Aktivität liegen, wodurch der NH_4-N entweder schneller nitrifiziert und/oder stärker mikrobiell gebunden wurde. Dieser positive Aspekt einer Strohdüngung spielt aber für die Praxis kaum noch eine Rolle, da nach der Düngeverordnung ab 2011 eine Einarbeitung von Gülle/Gärrest innerhalb von 4 Stunden nach der Ausbringung erfolgen muss, womit eine Ammoniakemission stark reduziert bzw. ausgeschlossen wird.

Die erzielten Ergebnisse erfordern eine weitere Überprüfung, insbesondere unter Feldbedingungen, und einen analytischen Nachweis der N_2 -Freisetzung. Sollte dabei die aus den durchgeführten Untersuchungen gewonnene Erkenntnis, dass der gemeinsame Einsatz von Gärrest und Stroh zu einer erhöhten Freisetzung von Lachgas und elementarem Stickstoff führen kann, eine Bestätigung erfahren, so ist in weiterführenden Untersuchungen zu prüfen, unter welchen Bedingungen ein gemeinsamer Einsatz nicht erfolgen bzw. wie lange die Ausbringung von N-haltigen Düngemitteln (Gülle/Gärrest) nach einer Strohdüngung verzögert werden sollte.

Die Arbeiten wurden mit Mitteln des BMELV/FNR gefördert (FKZ 22025207).

Literatur

- DITTERT, K., K.H. MÜHLING, 2009: Emission klimarelevanter Spurengase im intensiven Pflanzenbau. CAU Kiel, Agrar- u. Ern.-wiss. Fak. **114**, 87-96.
- DÖHLER, H., D. HORLACHER, 2010: Ammoniakemissionen organischer Düngemittel. KTBL-Schrift **483**, 51-71.
- FLESSA, H., F. BEESE, 1995: Effects of Sugarbeet Residues on Soil Redox Potential and Nitrous Oxide Emission. Soil Sci. Soc. Am. J. **59**, 1044-1051.
- FLESSA, H., 2010: Lachgasemissionen landwirtschaftlich genutzter Böden – Stand des Wissens. KTBL-Schrift **483**, 103-108.
- GEISSELER, D., W.R. HORWARTH, R.G. OERGENSEN, B. LUDWIG, 2010: Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms. Soil Biol. & Biochem. **42**, 2058-2067.
- HERBST, F., J. AUGUSTIN, W. GANS, 2010: Wirkung eines Nitrifikationsinhibitors und einer Strohdüngung auf die Freisetzung klimarelevanter Gase nach Gärrestapplikation. KTBL-Schrift **483**, 359-363.
- HERBST, F., W. GANS, 2010: Minderung der Freisetzung von klimarelevanten Gasen beim Einsatz von Gärrestständen aus nR-Biogasanlagen durch Zusatzstoffe und Applikationsmethoden. Schlussbericht Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22025207.pdf>.
- HAO, X., C. CHANG, J.M. CAREFOOT, H.H. JANZEN, B.H. ELLERT, 2001: Nitrous oxide emissions from an irrigated soil as affected by fertilizer and straw management. Nutr. Cycl. Agroecosyst. **60**, 1-8.
- KOWALENKO, C.G., 1981: Effect of immobilization on nitrogen transformations and transport in a field ^{15}N experiment. Can. J. Soil Sci. **61**, 387-395.
- KÖSTER, J.R., L.M. CARDENAS, R. BOL, K.H. MÜHLING, K. DITTERT, 2009: Einfluss der Düngung mit Biogasresten auf Denitrifikation und Lachgasemission. Jahrestagung Dt. Gesell. Pflanzenernährung, Osnabrück 44.
- KRAFT, J.-U., F. HERBST, W. GANS, 2011: Zur Wirkung des Nitrifikationshemmers PIADIN bei Gülle- und Gärrest-Düngung. Mitteilungen Agrarwissenschaften **18**, 20. Borkheider Seminar zur Ökophysiologie des Wurzelraumes, Hrsg.: W. MERBACH, S. RUPPEL, J. AUGUSTIN, Berlin, Verlag Dr. Köster, 95-104.
- MA, E., G. ZHANG, J. MA, H. XU, Z. CAI, K. YAGI, 2010: Effects of rice straw returning methods on N_2O emission during wheat-growing season. Nutr. Cycl. Agroecosyst. Publ. online 8. May.
- MA, J., E. MA, H. XU, K. YAGI, Z. CAI, 2009: Wheat Straw management affects CH_4 and N_2O emissions from rice field. Soil Biology & Biochemistry **41**, 1022-1028.
- MAERCKER, M., 1895: Jahrbuch der Agrikultur-chemischen Versuchstation der Landwirtschaftskammer der Provinz Sachsen zu Halle a/S.
- PFEIFFER, T., O. LEMMERMANN, 1900: Denitrifikation und Stallmistwirkung. Landw. Versuchsstationen **54**, 386-462.
- RUSER, R., H. FLESSA, R. RUSSOW, G. SCHMIDT, F. BUEGGER, J.C. MUNCH, 2006: Emission of N_2O , N_2 and CO_2 from soil fertilized with nitrate: effect of compaction, soil moisture and rewetting. Soil Biology & Biochemistry **38**, 263-274.
- SCHILLING, G., 2000: Pflanzenernährung und Düngung. Stuttgart, Verlag Eugen Ulmer.
- SCHMÄDEKE, F., 1998: Lachgas- und Methanflüsse eines Gley-Auenbodens unter dem Einfluß einer Rapsfruchtfolge und in Abhängigkeit von der N-Düngung. Diss. Univ. Göttingen.
- SCHNEIDEWIND, W., 1897: Erhaltung des Stickstoffs, sowie die Umsetzung der verschiedenen Stickstoff-Formen im Stalldünger. J. f. Landw. **45**, 173-202.
- SCHUSTER, C., J. GARZ, 1990: CO_2 -Abgabe, Zu- und Abnahme der mikrobiellen Biomasse sowie des N_{an} -Gehaltes im Boden nach Zugabe verschiedener Pflanzenmaterialien – Modelluntersuchungen zum Umsatz von Ernte- und Wurzelrückständen. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd. **34**, 549-557.
- SEGSCHNEIDER, H.J., I. SICH, R. RUSSOW, 1996: Use of specially configured gas chromatography system for the simultaneous determination of methane, nitrous oxide and carbon dioxide in ambient air and soil atmosphere. Proceedings of the International Workshop on Gaseous Emission from Grassland. Okehampton, UK, Institute of Grassland & Environmental Research (IGER), 211-218.
- SENBAYRAM, M., R. CHEN, K.H. MÜHLING, K. DITTERT, 2009: Contribution of nitrification and denitrification to nitrous oxide emissions from soil after application of biogas waste and other fertilizers. Rapid Commun. Mass Spectrom. **23**, 2489-2498.
- SPOTT, O., R. RUSSOW, B. APELT, C.F. STANGE, 2006: A ^{15}N -aided artificial atmosphere gas flow technique for online determination of soil N_2 release using the zeolite Köstrolith SX6®. Rapid Commun. Mass Spectrom. **20**, 3267-3274.
- WALENSIK, G., 1996: Auswirkungen von Bodenverdichtungen durch landwirtschaftliche Nutzung auf die N_2 - und N_2O -Emissionen aus dem Boden. Univ. Hannover, Diss.