

Bachelorarbeit

Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften

Fachgebiet Agrarwirtschaft

Einfluss verschiedener Stickstoff-Düngungs- strategien auf Ertrag, Stickstoffbilanz und N₂O-Emission von Winterweizen

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science

vorgelegt von: Isabell Kleinhardt

urn:nbn:de:gbv:519-thesis 2013-0252-5

Erstprüfer: Prof. Dr. B. Seggwiß

Zweitprüfer: Dr. G. Verch

Hochschule Neubrandenburg, Kreckow, den 14.01.2013

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to study the varying effects of differentiated mineral nitrogen fertilization strategies on yields, nitrogen balances and emissions of the climate relevant nitrous oxide (N_2O) in a field site in North-East Germany. Therefore, a three years long experience on a winter wheat field at the Agricultural Experiment Station in Dedelow was carried out. A comparison between the effects of mineral fertilization strategies with urea (HS), calcium ammonium nitrate (KAS) and a stabilized nitrogen fertilizer (Alzon, combination of urea and y mixture of dicyandiamide and 1H-1,2,4 triazole) was made. The yields of the parcels were then calculated according to appropriate harvesting technologies. The N balances for all variants in the last three years were established taking into account the Nmin content, the N-Inputs and N-Removals. No considerable differences in the yields of the differentiated fertilization strategies could be observed. In N-Uptake and thus in the N-Efficiency, the KAS Variant has proved to be the fertilization strategy with the best N-utilization when compared to the urea and Alzon variant. The Alzon had had no influence on the N-uptake. A better N-efficiency could not be ascertained in this experience.

The amount of trace gas was determined with the closed chamber method. Short time N_2O emissions of various levels were detected after the application of the various N-fertilizers. The emissions of the interpolated nitrous oxide were calculated on the basis of the measured flow rates. They merely illustrate the tendencies within a year as measures were taken every 14 days. The highest emissions were observed by the HS- and the control variant. The N_2O flow rates turned out to be inconsiderable by the Alzon variant. It emitted circa 50% less than the HS-variant. However the DCD fertilization strategy proved to be the only variant that showed a slight increasing N_2O emission of about 5/g/ha/d at the turn of the year.

In the course of these three years and compared to the results given by further publications, the probed field site showed little annual N_2O emissions (0,03 -3,5kg N/ha/a) in the cumulative N_2O fluxes.

Kurzfassung

Die Bachelorarbeit verfolgte das Ziel, die unterschiedlichen Einflüsse verschiedener mineralischer Stickstoff-Düngungsstrategien auf den Ertrag, die N-Bilanz und die Emission des klimarelevanten Lachgases (N_2O) auf einem Ackerstandort Norddeutschlands zu prüfen. Dazu diente ein 3-jähriger Feldversuch in der Versuchsstation Dedelow von Winterweizen. Es wurde die Wirkung der mineralischen Düngungsstrategien Harnstoff (HS), Kalkammonsalpeter (KAS) und ein stabilisierter Stickstoffdünger (Alzon) (Kombination aus Harnstoff und dem Gemisch Dicyandiamid und 1H-1,2,4-Triazol) verglichen. Die Erfassung der Erträge der einzelnen Versuchspartellen erfolgte mit der entsprechenden Erntetechnik. Die N-Bilanz für alle Varianten der drei Jahre ist unter Berücksichtigung des N_{min} -Gehaltes, der N-Zufuhr und N-Abfuhr erstellt worden. Es traten keine erheblichen Unterschiede in den Erträgen der verschiedenen N-Düngungsstrategien auf. Im N-Entzug und damit in der N-Effizienz ist die KAS-Variante, die Düngungsstrategie mit der höchsten N-Ausnutzung im Vergleich zur Harnstoff- und Alzon-Variante. Das eingesetzte Alzon hatte keinen Einfluss auf den N-Entzug und eine bessere N-Effizienz konnte in diesem Versuch ebenfalls nicht festgestellt werden.

Die N_2O -Emission wurde mit der „closed chamber“ Methode ermittelt. Nach der Applikation der verschiedenen N-Dünger ließen sich nur kurzzeitig N_2O -Emissionen in unterschiedlicher Höhe feststellen. Die interpolierten Lachgasemissionen wurden auf der Grundlage der tatsächlich gemessenen Flussraten errechnet. Sie stellen lediglich Tendenzen innerhalb eines Jahres dar, aufgrund des 14-tägigen Abstands zwischen den Messungen. Die höchsten Emissionspeaks wurden bei der HS-Variante und bei der Kontrollvariante beobachtet. Am geringsten fielen die N_2O -Flüsse bei der Alzon-Variante aus. Sie emittierte etwa 50% weniger als die HS-Variante. Die Strategie mit DCD zeigte jedoch als einzige Variante leicht erhöhte N_2O -Emissionen von ungefähr 5g/ha/d zur Jahreswende.

Insgesamt zeigte der untersuchte Standort über die drei Versuchsjahre in den kumulierten Lachgasflüssen, im Vergleich mit anderen Publikationen, geringe jährliche N_2O -Emissionen. Während im Jahr 2010 und 2011 extrem geringe Emissionsraten ($< 1\text{kg } N_2O/\text{ha/a}$) und keine Unterschiede zu verzeichnen waren, lagen die Werte im Jahr 2012 für die Variante ohne N-Düngung und für HS bei 3kg, für Alzon und KAS um 1,5kg, wobei sich Alzon signifikant von der Kontrolle und von HS unterschied.

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	II
Kurzfassung.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis und Formelsammlung.....	VIII
Formelsammlung.....	IX
Danksagung.....	X
1 Einleitung.....	1
2 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	3
3 Kenntnisstand.....	5
3.1 Ertragswirkung verschiedener N-Dünger.....	5
3.2 Einflussgrößen der Lachgasemission.....	8
4 Material und Methoden.....	11
4.1 Untersuchungsgebiet.....	11
4.2 Versuchsaufbau.....	12
4.2.1 Versuchsanordnung.....	12
4.2.2 Düngung.....	14
4.3 Haubenmessverfahren für Lachgas.....	15
4.3.1 Material.....	15
4.3.2 Durchführung der N ₂ O-Messung.....	17
4.4 Datenaufbereitung und Statistik.....	18
4.4.1 Berechnung und Auswertung der Düngungsversuche.....	18
4.4.2 Berechnung der N ₂ O-Flussrate.....	20
4.4.3 lineare Interpolation zur Berechnung der kumulativen Emissionen	21
5 Ergebnisse.....	22
5.1 Klimadaten.....	22
5.2 Ertrag und N-Bilanz.....	23
5.2.1 Wirkung der N-Düngerstrategien auf Ertrag.....	23
5.2.2 N-Entzug verschiedener N-Düngungsstrategien.....	25
5.2.3 Nmin-Gehalte des Versuchszeitraums.....	28
5.3 Lachgasemission.....	30
5.3.1 Tägliche N ₂ O-N-Flüsse.....	30
5.3.2 Kumulierte N ₂ O-Emissionsrate.....	32

5.4 N-Bilanz des Versuchszeitraums.....	33
6 Diskussion.....	34
6.1 Einfluss der N-Strategien auf Ertrag und N-Bilanz.....	34
6.2 Einfluss der Stickstoffdüngerform auf die Lachgasfreisetzung.....	39
7 Schlussfolgerungen.....	43
8 Literaturverzeichnis.....	45
9 Erklärung.....	50
10 Anhang.....	51
10.1 Vollständige Aufschlüsselung der N-Bilanz für alle drei Jahre.....	51
10.2 Auswertung von Ertrag und N-Entzug der langjährigen Versuchsreihe.....	54
10.3 Auswertung von Ertrag und N-Entzug des dreijährigen Versuchs.....	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Forschungsstation Dedelow (www.google-maps.de 2012).....	11
Abbildung 2: Lageplan des Parzellenversuches 2010.....	13
Abbildung 3: Lageplan des Parzellenversuches 2011.....	13
Abbildung 4: Eine Parzelle mit drei Rahmen ohne Hauben.....	16
Abbildung 5: Eine Haube mit vier Gasflaschen auf einem Rahmen während einer Messung.....	16
Abbildung 6: Messung mit einer Verlängerung.....	17
Abbildung 7: Die jährlichen Kornerträge der vier Varianten von '03 - '12 (n=36). a und b stellen die signifikanten Unterschiede der unterschiedlichen Varianten dar (GD 5%).....	24
Abbildung 8: Die Kornerträge der vier Varianten von '03 – '12 zusammengefasst (n=36) ...	25
Abbildung 9: N-Entzug der Düngungsstrategien der Jahre '10 - '12 (n= 16). a, b und c stellen die signifikanten Unterschiede der unterschiedlichen Varianten dar (GD 5%).....	25
Abbildung 10: Der jährliche Korn-N-Entzug der vier Varianten von '03 - '12 (n=36). a, b , c und d stellen die signifikanten Unterschiede der unterschiedlichen Varianten dar (GD 5%).....	26
Abbildung 11: Der Korn-N-Entzug der vier Varianten von '03 - '12 zusammengefasst (n=36).....	27
Abbildung 12: Nmin-Gehalte von März 2010 bis März 2012.....	29
Abbildung 13: tägliche N ₂ O-N-Flüsse der vier Varianten des Messzeitraumes von '10 – '12.....	31
Abbildung 14: Kumulierte N ₂ O-N-Flüsse des Messzeitraums von '10 – '12.....	32
Abbildung 15: N-Salden am Ende der jeweiligen Versuchsjahre.....	33
Abbildung 16: Niederschlag und Lufttemperatur in Dedelow von '10-'12 und dem Mittel der Jahre '81-'10 (Wetterstation Dedelow).....	35
Abbildung 17: tägliche N ₂ O-N-Flüsse des Versuchsjahres 11/12.....	41
Abbildung 18: tägliche N ₂ O-N-Flüsse der Kontrollvariante des Versuchsjahres 2012.....	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich von N-Formen und Düngungshäufigkeit (Anzahl N-Gaben, nach KÜBLER 1994, verändert).....	7
Tabelle 2: Übersicht über die Düngungsstrategien mit Düngemengen und -termine der einzelnen Varianten (VB: Vegetationsbeginn, EC: Entwicklungsstadium).....	15
Tabelle 3: Niederschlagsmenge und Temperatur in Dedelow (Wetterstation Dedelow).....	23
Tabelle 4: Kornertrag der vier Varianten von '10 -'12 (n=16). a, b und c stellen die signifikanten Unterschiede der unterschiedlichen Varianten dar.....	23
Tabelle 5: N-Effizienz der drei Düngungsstrategien der drei Versuchsjahre (in %).....	27
Tabelle 6: N-Effizienz der drei Düngungsstrategien der Jahre '03 – '12.....	28
Tabelle 7: Vollständige Auflistung der N-Bilanz von 2010.....	51
Tabelle 8: Vollständige Auflistung der N-Bilanz von 2011.....	52
Tabelle 9: Vollständige Auflistung der N-Bilanz von 2012.....	53
Tabelle 10: N-Salden der Jahre 2010 - 2012 und vom langjährigen Mittel '03-'12.....	53

Abkürzungsverzeichnis und Formelsammlung

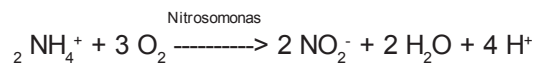
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
DBG	Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft
DCD	Dicyandiamid
DMPP	3,4-Dimethylpyrazolphosphat
ECD	<i>electron capture detector</i> (Elektroneneinfangdetektor)
EC	Entwicklungsstadium
FAO	<i>Food and Agriculture Organisation of the United Nations</i> (Organisation der UNO für Ernährung und Landwirtschaft)
FID	<i>flame ionisation detector</i> (Flammenionisationsdetektor)
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (Treibhauspotenzial)
HS	Harnstoff
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Weltklimarat)
KAS	Kalkammonsalpeter
l'S	lehmiger Sand
s'L	sandiger Lehm
n	Stichprobenzahl
ND	Niederschlagsmenge
NH	Nitrifikationshemmer
N	Stickstoff
NH ₃	Ammoniak
NH ₄	Ammonium
Nmin	mineralisierter Bodenstickstoff
NO	Stickstoffmonoxid
N ₂ O	Distickstoffoxid bzw. Lachgas
NO ₃	Nitrat
NO _x	Stickstoffoxide
ppb	parts per billion (=10 ⁻⁹)
ppm	parts per million (=10 ⁻⁶)
PVC	Polyvinylchlorid
TM	Trockenmasse
VB	Vegetationsbeginn

Formelsammlung

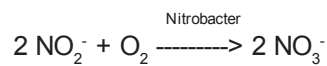
- Harnstoffumwandlung durch Hydrolyse



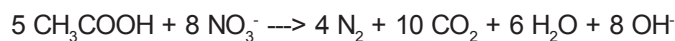
- Umwandlung von Ammonium zu Nitrat



- Umwandlung von Nitrit zu Nitrat



- Umwandlung von Nitrat zu molekularem Stickstoff



- Berechnung des N-Entzuges

$$\text{N-Entzug} = (\text{Proteingehalt}/6,25) \times \text{Ertrag}$$

- Berechnung der Dünger-N-Effizienz in %

$$\text{scheinbare Dünger-N-Effizienz (\%)} = \frac{(\text{N-Entzug}_{\text{gedüngt}} - \text{N-Entzug}_{\text{ungedüngt}}) \times 100}{\text{N-Düngermenge}}$$

- Berechnung der N-Bilanz in kg N/ha

$$\text{N}_{\text{min}} + \text{N-Zufuhr} - \text{N-Abfuhr} = \text{N-Saldo}$$

- Berechnung der Flussrate

$$r \text{ N}_2\text{O} = \frac{M P V d c f_1 f_2 f_3}{R T A t \text{ ppm bzw. ppb}}$$

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Personen bedanken, ohne deren Unterstützung das Gelingen dieser Bachelorarbeit nicht möglich gewesen wäre.

Herr Prof. Dr. B. Seggewiß und Herr Dr. G. Verch, dass sie mir das erstellen dieser Bachelorarbeit im Fachgebiet Pflanzenernährung der Agrarwirtschaft ermöglichten.

Dr. G. Verch danke ich nochmal für die aufmerksame und umfassende Betreuung.

Dem Institut für Landschaftsbiogeochemie und in dem Zuge besonders Dr. Ulrike Hagemann, Dipl. Madlen Pohl und Nicole Jurisch des Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF e.V.) für die Unterstützung bei der Datenaufbereitung der gemessenen Lachgasemissionen.

Volker Michel und Dr. Andrea Zenk der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Ertragsdaten.

Besonderer Dank gilt Daniel Göring, der mich bis zum Abschluss meines Studiums in jeder Hinsicht unterstützte.

Des Weiteren danke ich meinen Eltern, Verwandten und Freunden für die stets aufmunternden Worte und für das Verständnis, dass ich ihnen in den letzten Monaten nicht immer die volle Aufmerksamkeit schenken konnte.

1 Einleitung

Stickstoff (N) gehört zu den Hauptnährstoffen der Pflanzen und ist neben C, O und H, der viertwichtigste Nährstoff für die Biomasseproduktion und somit wichtig für den Ertrag (LARCHER 1994). Weil das N im Boden selbst nur gering vorkommt (in Mineralböden 0,02 – 0,4% N, SCHILLING 2000), aber in großen Mengen als Nitrat-Ion und Ammonium-Ion für die Versorgung der Pflanzen aus dem Boden aufgenommen wird, gehört es zu den Kernnährstoffen. Eine Erhöhung des N-Vorrats im Boden kann durch den Abbau von organischer Substanz, stickstoffassimilierenden Bakterien und durch mineralische Düngung erreicht werden. Die Düngung von mineralischem Stickstoff hat die größte Bedeutung für die optimale Versorgung der Kulturpflanzen (LUBS et al. 1965). Bei N-Mangel und auch bei N-Überschuss kann es zu einer Beeinträchtigung der Pflanzen und deren Wachstum kommen, daher sollte die Düngung immer an die Bedürfnisse der Pflanzen angepasst sein.

Die meisten Pflanzen können sowohl Nitrat (NO_3) als auch Ammonium (NH_4) aufnehmen. Die Aufnahme hängt sehr von den vorliegenden Parametern ab, wie dem pH-Wert, Witterung, Temperatur, Bodengefüge und den Lichtverhältnissen. Ein niedriger pH-Wert zum Beispiel beeinträchtigt die NH_4 -Aufnahme weniger als die NO_3 -Aufnahme. Die Stickstoffaufnahme wird besonders durch Staunässe bzw. schlecht durchlüftete Böden und bei kalten Temperaturen stark herabgesetzt und kann zu N-Mangel führen. Die Auswahl der N-Dünger und der damit verbundenen Düngungsstrategien sollten nach den Kriterien Nährstoffform, Wirkungsgeschwindigkeit, Nebenwirkungen sowie nach arbeitswirtschaftlichen und ökonomischen Gründen getroffen werden.

Zu berücksichtigen sind dabei die mit der Düngung verbundenen N-Verluste. N-Verbindungen können durch bestimmte Ab- und Umbauprozesse zum einen als Nitrat verlagert und ausgewaschen werden und zum anderen als Ammoniak (NH_3), elementarer Stickstoff (N_2) oder Stickoxide (N_2O , NO_2 , NO) gasförmig aus dem Boden entweichen. Diese biologischen Vorgänge sind zum einen für die Effizienz der Dünger und Düngungsstrategien relevant, andererseits aber auch sehr entscheidend bei Umweltfragen. Je nach Boden- und Witterungsbedingungen können diese N-Verluste unterschiedlich stark auftreten. Distickstoffoxid bzw. Lachgas (N_2O) wird hauptsächlich durch die Denitrifikation von Bakterien unter sauerstoffarmen Bedingungen gebildet und gehört zu den klimarelevanten Spurengasen (STURM et al. 1994). N_2O -Verluste treten aber nicht nur bei der Denitrifikation sondern auch bei einer unvollständig ablaufenden Nitrifikation und anderen Nitratreduktionen

auf. Neben Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Methan (CH₄) wird auch dem Lachgas eine Beteiligung an dem Treibhauseffekt und dem Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre zugesprochen (SCHUBERT 2006).

2008 betrug die N₂O-Emission in Deutschland 132.000 t N₂O (= 40.92 Mio. t CO₂ aq. berechnet mit dem GWP-Faktor 310). Die Landwirtschaft hat einen Anteil von ca. 70% an der deutschen N₂O-Gesamtemission. 124 t N₂O kommen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen (LF), das sind 4% der gesamten deutschen Treibhausgasemissionen. Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen bilden mit 94,5% den größten Anteil der Emissionen aus der Landwirtschaft (HAENEL et al. 2010). In Deutschland liegen gemessene N₂O-Emissionen auf LF zwischen < 0,5 und ca. 17kg N₂O/ha/a (JUNGKUNST et al. 2006). Mithilfe langjähriger Messungen der N₂O-Freisetzungsraten könnte man den tatsächlichen Anteil an N₂O-Emissionen von LF und demzufolge die Beständigkeit der einzelnen Düngerformen wie auch das Minderungspotenzial von Nitrifikationsinhibitoren ermitteln. Durch die Aufstellung einer N-Bilanz, in der Parameter wie die N₂O-Freisetzungsrate, der Ertrag (Entzug), die eingesetzte Düngermenge sowie die N_{min}-Gehalte im Boden mit einfließen, kann man Rückschlüsse auf die N-Effizienz der eingesetzten Stickstoffdünger und demzufolge auch auf die N-Stabilität der Dünger ziehen. Insbesondere auf sandigen Standorten, da dort noch ein erhöhter Forschungsbedarf besteht.

Der 3-jährige Feldversuch wurde im Weizen durchgeführt, da es sich bei Weizen (*Triticum aestivum*) neben Reis und Mais um das wichtigste Getreide der Welt handelt. Im Jahr 2010 wurden weltweit ca. 651 Millionen Tonnen von einer Fläche von etwa 217 Millionen ha geerntet (FAO 2012). Global werden 60% des Stickstoffdüngers auf Getreideflächen verwendet (IFA 2002) und es wird auf ihnen 20% des reaktiven Stickstoffs produziert (DOBERMANN 2005).

Mitteleuropa liegt bereits im weltweiten Vergleich in der N₂O-Freisetzung aus Mineraldünger (10%) unter dem Anteil der N₂O-Entstehung anderer Teile der Welt. Grund dafür ist, dass die Landwirtschaft in Mitteleuropa eine höhere N-Ausnutzung von mineralischem Dünger aufweist (STURM et al. 1994). Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit sollen Anreiz geben, das gewonnene Wissen und die praktische Anwendung erfolgreich umzusetzen aber auch weiter in andere Gebiete der Welt zu transportieren, um eine verlustärmere und effizientere Nutzung von N-Dünger zu fördern und dadurch unseren Lebensraum zu schützen. Die Bachelorarbeit soll neue ökologische und ökonomische Ansätze für die Landwirtschaft und den Klima- und Naturschutz hervorbringen.

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Unter dem Einfluss bestimmter Witterungs- und Bodenbedingungen können verschiedene Umbauprozesse an N-Düngern stattfinden und dadurch zu unterschiedlich hohen N-Verlusten führen. Dies ist unter anderem auch von der Düngungsstrategie abhängig. Das heißt wann, wie viel und in welcher Form wird der N-Dünger ausgebracht um einen möglichst hohen Ertrag zu erreichen ohne entsprechende N-Verluste hervorzurufen. Mithilfe einer vergleichenden Analyse sollen die Erträge, die N-Bilanzen und die N_2O -Emissionen aus einem 3-jährigen Düngeversuch auf Flächen mit Winterweizen unter den Standortbedingungen der Uckermark (Brandenburg im Norden Deutschlands) festgestellt werden. Bei diesem Düngeversuch wurde in 3 Varianten der Einsatz von Harnstoff (HS), Alzon (mit einem Nitrifikationshemmer) und Kalkammonsalpeter (KAS) einer Kontrollvariante gegenübergestellt. Dadurch soll die N-Effizienz der Dünger und der dazugehörigen unterschiedlichen Strategien sowie deren N-Verluste in Form von N_2O -Emission untersucht werden. Um aussagekräftige Werte der N_2O -Verluste zu erhalten, werden Messungen der Lachgasfreisetzung infolge der Ausbringung von N-Dünger durchgeführt, wodurch man vor allem das Emissionsreduktionspotenzial von Nitrifikationsinhibitoren im Vergleich zu herkömmlichen N-Düngern analysieren und vergleichen kann, um anhand dessen Rückschlüsse auf die Beständigkeit und Stabilität der unterschiedlichen Dünger ziehen zu können.

Ziele der Untersuchungen dieser Bachelorarbeit sind:

- Die Erfassung und Analyse der Erträge der unterschiedlichen Düngungsvarianten des Düngeversuches von 2010 bis 2012 sowie zusätzlich von einer vergleichbaren langjährigen Versuchsreihe von 2003 bis 2012.
- Die Erstellung und der Vergleich von N-Bilanzen aller 4 Düngungsvarianten von 2010 bis 2012.
- Die Erfassung und Analyse der möglichen Konzentrationen der N_2O -Emissionen der Düngungsstrategien gemessen über das Haubenmessverfahren (closed chamber method) von 2010 bis 2012 in Abhängigkeit der Entwicklungsstadien der Pflanze und von den Düngungsterminen.

Mithilfe der gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Bachelorarbeit sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Ist durch den Einsatz von Nitrifikationshemmern eine höhere N-Ausnutzung und somit eine höhere N-Effizienz des Düngers im Vergleich zum herkömmlichen Düngereinsatz möglich?
- Unterscheiden sich die Dünger und Düngungsstrategien in ihren N_2O -Emissionen?
- Kann der Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren zu einer Reduktion der Lachgasemissionen führen?

3 Kenntnisstand

3.1 Ertragswirkung verschiedener N-Dünger

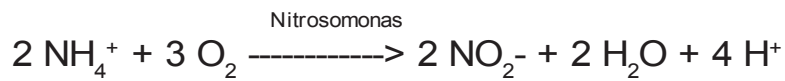
Allgemein können mineralische Stickstoffdünger anhand ihrer unterschiedlichen Zusammensetzung nach Ammoniumdünger, Nitratdünger, Ammoniumnitratdünger und Amiddünger eingeteilt werden. Amiddünger sind eine besondere Form der Ammoniumdünger. Sie haben den Stickstoff in Amidform (NH_2) gebunden. Diese Form kann nicht direkt von der Pflanze aufgenommen werden, sondern muss erst im Boden in Ammonium oder Nitrat umgewandelt werden. Die Umsetzung ist temperaturabhängig und verläuft entsprechend verzögert ab (einige Tage). Harnstoff (HS), der neben Kalkstickstoff zu den Amiddüngern zählt, löst sich unter feuchten Bodenbedingungen zwar schnell auf, der Stickstoff kann aber erst nach einer zweimaligen Umsetzung von der Wurzel aufgenommen werden. Mithilfe von Bodenbakterien und dem Enzym Urease, wird der Harnstoff durch eine hydrolytische Spaltung über Ammoniumcarbamat zu Ammoniumcarbonat umgewandelt und bewirkt zum einen dadurch eine relativ langsame bzw. nachhaltige N-Wirkung (SCHUBERT 2006, OEHMICHEN 1983). Zum anderen ist HS langsam wirksam, da das Ammonium (NH_4) eine geringere Löslichkeit im Bodenwasser und/oder eine starke Fixierung an Tonminerale aufweist.

Formel: Harnstoffumwandlung durch Hydrolyse

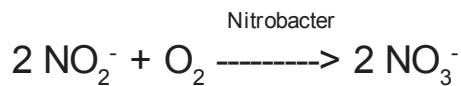


In belüfteten Böden wird das Ammoniumcarbonat durch Nitrosomonas und Nitrobacter (Nitrit- und Nitratbakterien) über Nitrit in Nitrat umgewandelt (Nitrifikation) und ist dadurch sehr gut von der Pflanzenwurzel aufnehmbar. Während der Nitrifikation kann auch durch eine Nebenreaktion N_2O gebildet werden. Der Anteil, der durch das freiwerdende Ammonium zu Nitrat umgewandelt wird, ist letztlich aber nur sehr gering (STURM et al. 1994), da der Vorgang von den Witterungsbedingungen und von der Aktivität der Bodenlebewesen abhängt.

Formel: von Ammonium zu Nitrit



Formel: von Nitrit zu Nitrat



Harnstoff enthält 46% N und keine weiteren Bestandteile wie Kalk. Durch seinen hohen N-Gehalt sollte HS nur in geringen Aufwandmengen ausgebracht werden, da bereits durch Überlappung während der Düngung eine Überdüngungsgefahr besteht. Wird der Harnstoff zu kalten Temperaturen ausgebracht und anschließend nicht eingearbeitet, können die Pflanzen unter anderem den Stickstoff nur zum Teil und verzögert aufnehmen und andererseits können innerhalb einer Woche ca. 25% gasförmige N-Verluste (NH_3 , N_2O , N_2) auftreten (OEHMICHEN 1983). HS verursacht nur eine temporäre pH-Veränderung. Anfangs, nach dem das entstandene NH_3 mit dem Bodenwasser NH_4OH oder NH_4^- und OH^- -Ionen gebildet hat, steigt der pH-Wert stark an, fällt dann aber nach der Nitrifikation von NH_4 zu HNO_3 wieder ab.

ALZON 46, ist ein stabilisierter Stickstoffdünger aus granuliertem Harnstoff 46 mit Nitrifikationshemmstoff (NH), der zu einer verzögerten Freisetzung (*slow release nitrogen source*) des enthaltenen Stickstoffs führt (SKW Piesteritz 2012). ALZON enthält Dicyanamidhaltiges (DCD) Ammonsulfat mit 22% N, davon sind 2% Dicyanamid-N (SCHUBERT 2006). Mithilfe des NH wird die Nitrifikation um mehrere Wochen (ca. 8 Wochen) verhindert bzw. verlangsamt (OEHMICHEN 1983), das heißt die für die Umsetzung verantwortlichen Nitrosomonas werden durch DCD in ihrer Aktivität gebremst, wodurch die Nitrifikation des enthaltenen Ammoniumstickstoffs zu Nitratstickstoff verlangsamt wird. Nitrobacter werden durch DCD nicht beeinflusst. Mit DCD ist eine gleichmäßige N-Anlieferung zur Pflanze möglich und die N-Verluste werden verringert. Bei ALZON ist daher, im Gegensatz zu normalen Harnstoff, eine Zusammenlegung der ersten zwei Teilgaben mit einer gleichbleibenden Aufwandmenge zu Getreide möglich (OEHMICHEN 1983).

Kalkammonsalpeter (KAS) beinhaltet 26% N und besteht aus 74% Ammoniumnitrat (NH_4NO_3) und 26% Kalziumkarbonat (CaCO_4). Ammonium und Nitrat sind jeweils zu 50% im Ammoniumnitrat enthalten. Dieser Dünger besitzt dadurch den Vorteil, die Vor- und Nachteile der Einzelformen ausgleichen zu können. Durch das enthaltene Nitrat hat der N-Dünger eine schnelle und durch das Ammonium eine langsame Wirkung auf die Pflanzen. Die

Jugendentwicklung und auch spätere Entwicklungsstadien werden sofort aber auch nachhaltig gefördert, so das man KAS in mehreren Teilgaben auf den Bestand ausbringen kann (OEHMICHEN 1983). Aufgrund der Mischung mit dem Kalkzusatz, hat der Dünger eine physiologisch neutrale Wirkung, da die Säurewirkung des N-Anteils aufgehoben wird (SCHUBERT 2006).

*Tabelle 1: Vergleich von N-Formen und Düngungshäufigkeit
(Anzahl N-Gaben, nach KÜBLER 1994, verändert)*

Variante	Erträge (dt/ha)
1. KAS 3-4 Teilgaben	92,4
2. Alzon 2 Teilgaben	92,8
3. HS 3 Teilgaben	91,8
4. 1/3 KAS Startgabe + 2/3 HS in 2-3 Teilgaben	92,2
5. HS flüssig	92,8
6. Alzon reduziert (20kg) 2 Teilgaben	91,6

Wie in Tabelle 1 dargestellt, zeigen ältere Versuche von KÜBLER (1994) entsprechend keine großen Ertragsunterschiede zwischen der Düngung mit KAS, HS und Alzon, unabhängig von der Düngungsstrategie. Die Ertragswirkung ist letztlich stark von Bodenparametern beeinflusst. Auf schweren Böden mit Staunässe und Schäden in der Bodenstruktur hat HS eine geringere N-Wirkung und eine verringerte Ertragsleistung als die Düngung mit KAS (KÜBLER 1994). Auf leichteren Standorten ist es eher der entgegengesetzte Fall. Auf mittleren Böden sind HS und KAS in ihrem Ertragsniveau annähernd gleich zu bewerten (OEHMICHEN 1983).

Nicht zu verachten ist der Nmin-Gehalt im Boden und dessen Wirkung. Nmin ist der mineralische Bodenstickstoff (NO_3^- -N + NH_4^+ -N). Der Gehalt von Nmin zum Vegetationsbeginn hängt von mehreren Einflussparametern ab. Zum einen von dem N-Rest der Vorfrucht, von der Mineralisation im Herbst und gegebenenfalls von der organischen Düngung, andererseits auch von den N-Verlusten über die Wintermonate durch Auswaschung sowie von der N-Anreicherung durch Mineralisation im Frühjahr (BENKER 2012). Dieser Nmin-Wert muss mit in die Ermittlung des N-Düngebedarfs einfließen (mithilfe der Nmin-Methode erfasst), um eine gute Versorgung des Bestandes zu gewährleisten und um keine Überdüngung zu riskieren. Eine Überdüngung ist nicht nur aus ökonomischer (Düngerkosten) sondern auch aus ökologischer Sicht (Umweltbelastung) zu beachten.

3.2 Einflussgrößen der Lachgasemission

Lachgas entsteht bei der Umwandlung von Nitrat zu elementarem Stickstoff. Diesen Vorgang nennt man Denitrifikation, wodurch der umgesetzte Stickstoff dann in die Atmosphäre entweicht. Eine Vielzahl an Bodenbakterien (z.B. Pseudomonas, Rhizobium, Bacillus u. a.) können unter Sauerstoffabschluss den Sauerstoff aus dem Nitrat nutzen. Das heißt anstelle von O_2 nehmen sie NO_3 , NO_2 , NO oder N_2O um dem Sauerstoffmangel entgegenzuwirken (SCHUBERT 2006). Dieser Prozess ist nicht nur von den Bakterien sondern auch von den Bodenbedingungen abhängig, wodurch es zu teilweise unvollständigen Abbauvorgängen des NO_3 kommt. Dann entstehen neben N_2 auch variierende Mengen von Stickoxiden (N_2O , NO und NO_2). Die Mengen variieren stark, je nach dem welche Boden- und Witterungsbedingungen vorliegen. Bei diesem Abbauprozess spricht man von einer dissimilatorischen Nitratreduktion. Im Gegensatz dazu spricht man bei dem Umbauprozess zu Ammonium von der assimilatorischen Nitratreduktion (SCHUBERT 2006). Zu beachten ist, dass neben der Denitrifikation auch im Zuge der Nitrifikation und anderen N-Umsetzungsprozessen, wie der Nitratammonifikation Lachgas entstehen kann.

Faktoren, die die Aktivität der Denitrifikanten fördern, sind O_2 -Mangel, die Verfügbarkeit organischen Kohlenstoffs und ein schwach saurer bis neutraler pH-Wert des Bodens. Nach BENCKISER und SYRING (1992) kann man die Faktoren auf die Denitrifikation folgendermaßen festlegen:

- Essentielle Faktoren: C-Gehalt im Boden, Nitratverfügbarkeit und Denitrifikations-Aktivität
- Regulierende Faktoren: O_2 -Partialdruck im Boden, Nitrifikations-Aktivität, Bodentemperatur, pH-Wert u. a.
- Die Gasdiffusion beeinflussende Faktoren: Bodenstruktur, Luftporen-Volumen, Wassergehalt des Bodens u. a..

Bei einem hohen Kohlenstoffgehalt kommt es zu einer erhöhten Denitrifikation. Dabei spielen vor allem leicht lösliche Kohlenhydrate eine wesentliche Rolle. Bei einer kombinierten Düngung von mineralischem und organischem Dünger, tritt eine fünfmal höhere denitrifizierende Umsetzung auf. Besonders Essig-, Propion-, Buttersäure, Glukose, Saccharose und Cellulose werden von den Bakterien bevorzugt. Sie benötigen sie zur Aufrechterhaltung ihres Stoffwechsels und für ihre Atmung nehmen sie den O_2 vom NO_3 .

Wird 1g N reduziert werden 1,07g C oxidiert (STURM et al. 1994).

Formel: von Nitrat zu molekularem Stickstoff



Bei der Nitratverfügbarkeit ist das Verhältnis von löslichen C und NO_3 entscheidend. Dabei unterscheiden sich mineralische von organischen N-Formen. Unmittelbar nach der Düngung mit KAS steigt die Denitrifikation an und sinkt wieder langsam in den nachfolgenden Wochen ab. Nach der Ausbringung von Gülle hingegen ist kaum ein Anstieg der Denitrifikation zu erkennen (OTTOW et al. 1990). Die Denitrifikation auf Brachen ist höher als auf bewachsenen Flächen, aufgrund des hohen Nitratangebots, da es zu keiner Nährstoffaufnahme kommt (STURM et al. 1994). Deshalb ist es ratsam, die Düngermenge an das Potenzial der Nährstoffaufnahme und an das Wachstum der Pflanzen anzupassen bzw. einen Nitrifikationshemmer einzusetzen.

Die Denitrifikations-Aktivität ist erheblich vom Standort beeinflusst. Die Hauptdenitrifikation läuft in der obersten Bodenschicht (Krume) ab. Die Aktivität nimmt in der weiteren Bodentiefe (60-90cm) immer weiter ab. Aber auch in der ungesättigten Bodenzone und sogar im Grundwasser ist die Denitrifikation noch nachweisbar (ISERMANN 1977). Untersuchungen zeigen, dass alle 10cm Bodenschicht, vom Oberboden bis zum Grundwasserspiegel Denitrifikationsraten von unter 0,9kg/ha/a auf Ackerböden zu ermitteln sind. Zu 40% waren bei einer Parabraunerde der Unterboden, Dränzonen und Kapillarräume an der Nitrifikation beteiligt. In trockenen Jahren liegt die Denitrifikationsrate unter Ackerland bei Parabraunerde bei 26,1 und bei Braunerde bei 26,4kg/ha/a. In nassen Jahren ist die Rate höher (LEHN-REISER et al. 1990).

Bei einer Bodentemperatur von 5°C sind die Bodenorganismen aktiv und die Denitrifikation beginnt. Steigt die Temperatur auf 10°C an, verdoppelt sich die Denitrifikations-Aktivität. In unseren Breitengraden spricht man bei 10° bis 15°C vom Optimum der Umsetzung, da der Wassergehalt der Böden bei höheren Temperaturen abnimmt und dadurch die Denitrifikations-Aktivität verlangsamt wird (STURM et al. 1994).

Bei einem hohen O_2 -Angebot in einem gut durchlüfteten Boden mit einem hohen Porenvolumen, geringer Wassersättigung und einem mittelkörnigem Aggregatzustand kommt es eher weniger zur Denitrifikation. Aber auch dort sind O_2 -freie Zonen vorhanden, in denen NO_3 -Reduktionen statt finden. Im Gegensatz dazu steigen die Raten der Denitrifikation in

stark verdichteten, nassen und verkrusteten Äckern sehr schnell an (OTTOW und BENCKISER 1994). Nach HAUNZ et al. (1992) entstehen im Herbst Denitrifikationsverluste von 34kg N /ha auf vorwiegend verdichteten Böden. Eine einheitliche Faustzahl ist jedoch nicht möglich, da die Verluste aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren zu stark schwanken.

Mit einem Anteil von 8-10% an der Gesamtdenitrifikation, kann N_2O -N freigesetzt werden (OTTOW et al. 1990, SCHUBERT 2006). Nach WINTZER et al. (1993) liegt die N_2O -Freisetzungsrate bei einem NO_3 -Dünger zw. 0,001 - 0,018%, bei NH_4NO_3 -Düngern zw. 0,4 – 0,7%, NH_4 -Düngern zw. 0,06 – 2,5% und bei organischem Dünger bei 0,8 – 2,05% des gedüngten Stickstoffs und ist dadurch relativ gering. Dennoch sollten N_2O -Verluste gering gehalten werden, denn der Anteil der Mineraldünger an den gesamten N_2O -Emissionen beträgt weltweit nach Schätzungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 13% (QUADE 1993). Betrachtet man nur Mitteleuropa ist die N-Ausnutzung auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen höher als in anderen Ländern der Welt. Die N_2O -Emission liegt dementsprechend in Mitteleuropa mit 10% etwas niedriger.

4 Material und Methoden

4.1 Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen wurden auf den Versuchsfeldern der Forschungsstation Dedelow durchgeführt. Die Forschungsstation Dedelow gehört zum Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e. V. Müncheberg (ZALF). Die Station befindet sich in der Nähe von Prenzlau im Landkreis Uckermark in Brandenburg (53°22 'Nord, 13°48 'Ost), ungefähr 100 km nördlich von Berlin. Das Untersuchungsgebiet liegt in der nordostdeutschen Tiefebene, ca. 60 m über dem Meeresspiegel.



Abbildung 1: Forschungsstation Dedelow (www.google-maps.de 2012)

Die Station bewirtschaftet ungefähr 50ha Versuchsfläche mit lehmigen Böden und Bodenpunkten von 40 bis 60 (ZALF 2012). In dieser Region ist der Boden durch kalkhaltige Ablagerungen und glaziale Sedimente geprägt. Auf den Versuchsflächen befindet sich nach der Klassifikation der World Reference Base (WRB) der Bodentyp Haplic Luvisol bzw. nach der deutschen Klassifikation eine Parabraunerde (DBG 1998, VERCH et al. 2009). Die Bodenkörnung besteht aus 60% Sand, 30% Schluff und 10% Ton und wird als ein lehmiger Sand (l'S) bis sandiger Lehm (s'L) deklariert. Der durchschnittliche pH-Wert der Flächen liegt bei 6,8 und der organische Kohlenstoffgehalt beträgt 0,8% (VERCH et al. 2009).

Die Region ist von einem kontinentalbeeinflussten östlichen Klima geprägt. Nach BAYERL (2006) liegt die Uckermark in der Zone des Mecklenburgisch-Brandenburgischen Übergangsklimas. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 8,4°C und die Jahresniederschlagsmenge liegt etwa bei 500mm/m² (ZALF 2012).

4.2 Versuchsaufbau

4.2.1 Versuchsanordnung

Für den Düngungsversuch wurden drei verschiedene Düngungsvarianten (N2-N4) und eine Kontrollvariante (N1) in jeweils fünf Parzellen angelegt. Im ersten Jahr wurde am 30.09.2009 die Weizensorte Profilus gedreht, im zweiten Versuchsjahr wurde die Weizensorte Chevalier am 22.09.2010 und im dritten Jahr am 15.09.2011 ausgesät. Die Parzellengröße von 1,5 x 6 m war groß genug um sie mit einer entsprechenden Technik zu bearbeiten. Vier Parzellen pro Variante dienten allein nur zur Entnahme von Boden- sowie Pflanzenproben und zur Ertragsbestimmung. Der Standort der Versuchsanlage wurde in allen drei Versuchsjahren gewechselt. 2010 wurde der Versuchsaufbau der Parzellen für die Ernte so gestaltet, dass die Parzellen ein Lateinisches Quadrat ergaben (Abbildung 2). Der Versuchsaufbau 2012 war am Anfang gleichzusetzen mit dem Aufbau von 2010. Es konnten jedoch von den 20 angelegten Versuchspartellen nach starken Auswinterungsschäden des Weizens nur noch vier Parzellen allein für die Gasmessung genutzt werden. Um den Ertrag zu ermitteln wurde der Weizen innerhalb der Messrahmen abgeerntet und entsprechend hochgerechnet. Die Ertragsbestimmung (dt/ha) für das Jahr 2010 und 2011 erfolgte über die Beerntung der Parzellen mit dem Parzellenmähdrescher der Firma Hege mit integrierter Wiegeeinrichtung.

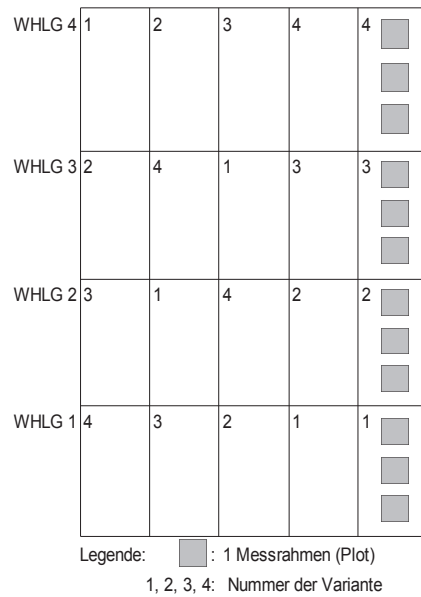


Abbildung 2: Lageplan des Parzellenversuches 2010

Der Versuchsaufbau von 2011 ist in Abbildung 3 dargestellt. In diesem Jahr wurde der Versuch nicht in Form eines Lateinischen Quadrates aufgebaut, hatte aber die identische Anzahl an Parzellen sowie 4 Wiederholungen pro Variante. Die Parzellen für die Gasmessungen wurden wieder getrennt von den Parzellen gehalten, die zur Probeentnahme wie auch zur Ertragsmessung dienen.

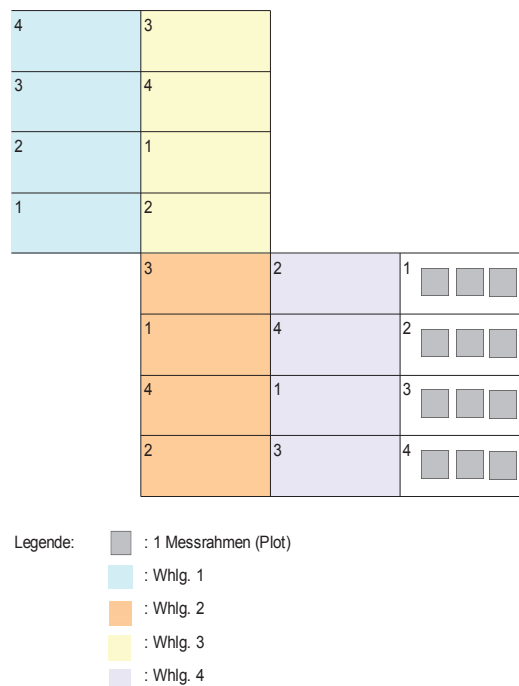


Abbildung 3: Lageplan des Parzellenversuches 2011

Die Bodenproben zur Nmin-Bestimmung bzw. zur Erfassung der NO₃-N- und NH₄-N-Gehalte in 0-30cm wurden zu jeder regulären Lachgasmessung durchgeführt, und zwar direkt vor der Düngung und zur letzten Ereignis-bezogenen Messung nach der Düngung. Die Probenahme und Untersuchung der Nmin-Proben erfolgte nach einheitlichen methodischen Grundsätzen (Nmin-Methode). Die Probenahme erfolgte mithilfe eines Bohrstocks aus der Tiefe 0-30cm. Es wurden immer vier Proben pro Parzelle zu eine Probe vermischt. Nach der Entnahme wurde die Mischprobe kühl transportiert und ggf. gelagert. Für die Bestimmung des Nmin-Gehaltes wurde eine Extraktion mit einer 0,025mg CaCl₂-Lösung durchgeführt. Anschließend folgte eine Dampfdestillation und eine Titration mit Schwefelsäure. Anhand des Säureverbrauchs während der Titration wurden die NO₃-N- und NH₄-N-Gehalte berechnet. Zur Berechnung der Trockenmasse (TM) wurden die Proben 6 Stunden im Trockenschrank bei 105°C getrocknet. Die Gehalte des mineralischen Bodenstickstoffs werden in [mg/100g TM] angegeben. Die Nmin-Gehalte der drei Versuchsjahre sind im Ergebnisteil aufgeführt. Nach dem Winter und während des vegetativen Wachstums wurde eine visuelle Beurteilung der Bestandsentwicklung durchgeführt sowie die Erfassung und Bonitur von Krankheiten, Schädlingen und Lager. Die Bestandsführung auf der Versuchsfläche wird generell nach der guten fachlichen Praxis durchgeführt. Die Parzellen wurden langjährig gepflügt und die Fruchtfolge war zu jedem Versuchsjahr identisch (Wintergerste, Winterraps und zum eigentlichen Versuchsjahr Winterweizen).

4.2.2 Düngung

Die Variante N1 ist eine ungedüngte Kontrollvariante (Kontrolle), die Variante N2 wurde mit PIAGRAN 46, ein granulierter Harnstoff (HS) mit 46% N Gesamtstickstoff als Carbamidstickstoff gedüngt. Die Variante N3 wurde mit ALZON 46, einem stabilisierten Stickstoffdünger aus granuliertem Harnstoff 46 mit Nitrifikationshemmstoff (Alzon) gedüngt. Er besteht aus 46% N Gesamtstickstoff als Carbamidstickstoff und einem Gemisch aus Dicyandiamid und 1H-1,2,4-Triazol (DCD). Die Variante N4 wurde mit granuliertem Kalkammonsalpeter (KAS), mit 27% Gesamtstickstoff mit 13,5% Nitrat-N und 13,5% Ammonium-N gedüngt. Die unterschiedlichen Düngungsstrategien sind in der Tabelle 2 dargestellt. Die gesamte Düngermenge betrug bei allen drei Strategien in allen drei Jahren 190kg N/ha, dies entspricht der guten fachlichen Praxis.

Tabelle 2: Übersicht über die Düngungsstrategien mit Düngemengen und -termine der einzelnen Varianten (VB: Vegetationsbeginn, EC: Entwicklungsstadium)

Variante	Dünger	N-Aufwandmenge (kg N/ha)			
		1. Düngungs-termin VB	2. Düngungs-termin EC 32	3. Düngungs-termin EC 37	4. Düngungs-termin EC 49/51
N1	Kontrolle	0	0	0	0
N2	HS	60	70	0	60
N3	Alzon	100	0	90	0
N4	KAS	60	70	0	60

Die Düngungstermine des Versuchs wurden anhand des Entwicklungsstadiums der Pflanze festgelegt. Zur HS-Variante N2 wurde der Dünger in drei Teilgaben, zum Vegetationsbeginn sowie zum Beginn des Schossens (EC 32) und zum Ährenschieben (EC 49/51) ausgebracht. In der KAS-Variante N4 waren die Düngungstermine und auch die N-Menge identisch mit der N2-Variante. Bei der Alzon-Variante N3 wurden im Gegensatz dazu nur zwei Teilgaben gedüngt, wie in Tabelle 2 dargestellt. Durch den in N3 eingesetzten Nitrifikationshemmer, ist bei Alzon eine Zusammenlegung der 1. und 2. Teilgabe zu einer Düngergabe mit einer insgesamt annähernd gleichen Düngermenge zum Vegetationsbeginn möglich. Die zweite und gleichzeitig letzte Düngergabe folgte zum Ende des Schossens (EC 37).

4.3 Haubenmessverfahren für Lachgas

4.3.1 Material

Auf je einer Parzelle pro Variante wurden über die gesamte Versuchsdauer drei Messrahmen (Plots) mit 0,75 x 0,75m, auf denen jeweils eine Haube zur Messung aufgesetzt wurde, installiert. Die drei Messplots waren mit 50cm Abstand parallel zueinander angeordnet.

Die Messhauben bestehen aus 3mm dickem, lichtundurchlässigem PVC-Material (Polyvinylchlorid). Um mögliche Wärmeabsorptionsprozesse zu reduzieren, die evtl. die Messergebnisse verfälschen könnten, sind die Hauben von Außen wie von Innen weiß und vollständig lichtundurchlässig. PVC eignet sich hervorragend als Material für diese Messmethode, da es wasserundurchlässig und träge (chemisch inert) ist und so keine Reaktionen mit den zu messenden Spurengasen eingeht. Die Hauben haben eine Grundfläche von 0,5625m² und ein Gesamtvolumen von 296l. Die Rahmen werden nach der Aussaat 5-10cm tief in den Boden gesetzt, um einen luftdichten Übergang zwischen Boden

und Messrahmen zu schaffen. Die obere Kante der Rahmen befindet sich unmittelbar über der Bodenoberfläche.



Abbildung 4: Eine Parzelle mit drei Rahmen ohne Hauben.

Auf diese Kante wird die Haube gestellt. An der unteren Haubenkante ist eine Gummidichtung angebracht. Dieses Gummimaterial ist witterungsbeständig und elastisch, so dass der Übergang zwischen Haube und Rahmen luftdicht abgeschlossen wird und keine Gase während der Messungen in die Atmosphäre entweichen können. Oben auf den Hauben befinden sich vier Anschlüsse für Flaschen, mit denen je eine Gasprobe aus den Hauben entnommen wird. Es sind vier evakuierte Gasfläschchen mit je einem Drehventil.

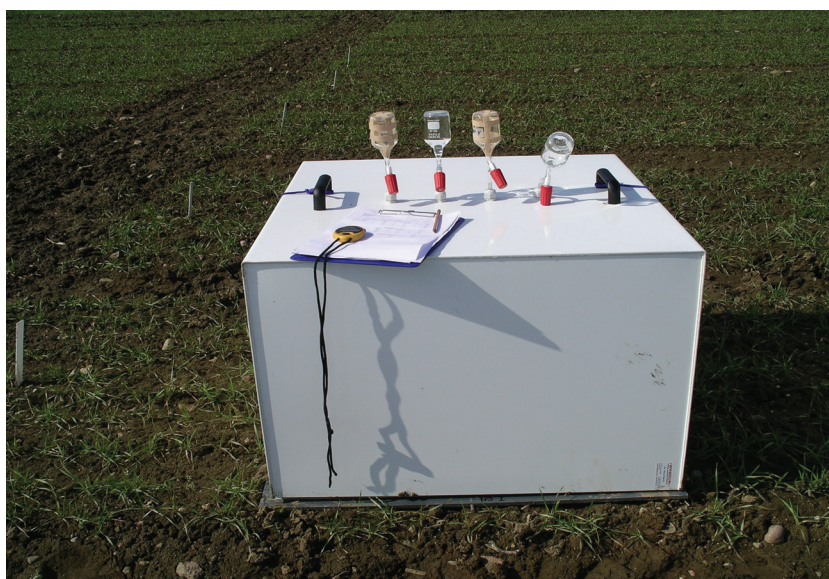


Abbildung 5: Eine Haube mit vier Gasflaschen auf einem Rahmen während einer Messung.

4.3.2 Durchführung der N₂O-Messung

Die Lachgasemissionen wurden alle drei Jahre ausschließlich im Winterweizen gemessen. Die Gasmessungen und die Messungen der Boden- und Lufttemperatur (Lufttemperatur in 2m Höhe, Bodentemperatur in 2, 5 und 10cm Tiefe) wurden manuell durchgeführt. Für die Lachgasmessung wurden die Hauben auf die bereits installierten Rahmen gesetzt. Zu diesem Zeitpunkt sind alle vier Flaschen auf der Haube verschlossen. Zur Probenahme wurde im 20-Minuten-Takt je eine Flasche an der Haube kurz geöffnet und wieder verschlossen. Die vier Flaschen enthalten die Änderung der Luftzusammensetzung (Konzentration der Spurengase) innerhalb einer Stunde. Ist die Höhe des Bestandes höher als die der Haube, werden Verlängerungen eingesetzt, damit die Pflanzen während der Messung nicht beeinflusst wird.

Die erste Lachgasmessung wurde vor der ersten Düngung am 22.03.2010 durchgeführt. Danach wurde etwa alle 14 Tage die N₂O-Emission ermittelt. Zu den Düngungsereignissen wurde jeweils einmal vorher und 4-5 Tage (täglich) hinterher die N₂O-Emission gemessen. Die ereignisbezogenen Messungen wurden durchgeführt, da direkt nach den Düngergaben erhöhte Flüsse zu erwarten waren (HOFFMANN et al. 2001). Die letzte Messung fand am 20.07.2012 kurz vor der Ernte statt.

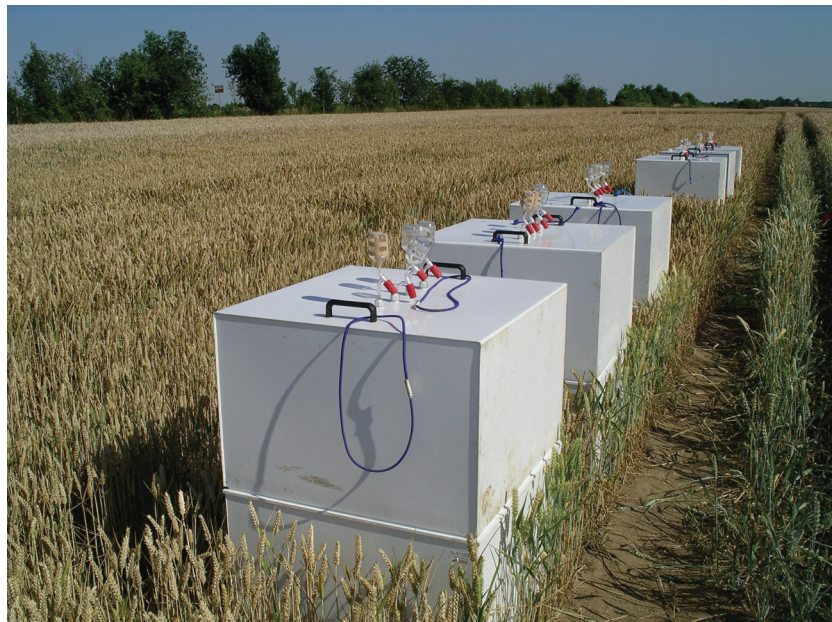


Abbildung 6: Messung mit einer Verlängerung

Anschließend wurden die Proben mit dem Gaschromatographen (GC) im Labor des Instituts Landschaftsbiogeochemie in Müncheberg ausgewertet. Der Gaschromatograph (Typ: Shimadzu GC-14B) bestimmt die Konzentrationen von N₂O und zusätzlich die enthaltene CO₂-Konzentration und CH₄-Konzentration. Mithilfe einer Säule (mit Porapak Q gefüllt) wurden die Spurengase voneinander getrennt. Stickstoff fungierte als Trägergas und mittels zweier Detektoren (FID: flame ionisation detector und ECD: electron capture detector) wurden die Konzentrationen ermittelt. Die N₂O- wie auch die CO₂-Konzentrationen wurden durch den ECD bestimmt. Eine Messreihe setzt sich aus 20 zu analysierenden Proben zusammen. Vor und nach jeder Messreihe wurde eine Eichung mit drei Standardgasen (Gase mit bekannter Konzentration) unternommen, um mögliche Druck- und Temperaturveränderungen im Labor zu berücksichtigen. Durch Integration der Signalflächen mithilfe der Eichung wurde die korrekte Spurengaskonzentration der Proben ermittelt. Mit den Standardgasen wurden ebenfalls die Detektoren geprüft und es wurden Driftfaktoren ermittelt, die in die Flussratenberechnung zur Driftkorrektur mit einfließen.

4.4 Datenaufbereitung und Statistik

4.4.1 Berechnung und Auswertung der Düngungsversuche

Zur Auswertung der Versuchsjahre wurde eine Zweischrittanalyse durchgeführt, da die Versuchsanlagen der drei Jahre verschieden waren. Der erste Schritt beinhaltet die Auswertung jedes Einzelversuches und der zweite Schritt die zusammenfassende Auswertung über die Jahre. Dr. Andrea Zenk von der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, Sachgebiet Sortenwesen und Biostatistik nahm die einfaktorielle Versuchsauswertung (EVA) nach dem neuen Standard M-V II/2011 vor. Zusätzlich wurden Erträge eines weiteren vergleichbaren Düngerversuchs von 2003 bis 2012 ausgewertet und für den statistischen Vergleich genutzt. Die Auswertung der langjährigen Versuchsreihe erfolgte in der Einschrittanalyse, also Einzelversuchs- und Serienversuchsauswertung in einem Zuge mit gepooltem Fehler über alle Jahre. Daher sind alle Grenzdifferenzen (GD) der Einzeljahre identisch. Im Ergebnisteil sind die Mittelwerte der Erträge der Varianten über die drei Jahre und die Signifikanz der einzelnen Düngungsstrategien zueinander dargestellt. Die ausführliche Auswertung der Versuche ist als Anhang angefügt (Kapitel 10.2 und 10.3).

Der N-Entzug errechnet sich aus dem Trockenmasseertrag und der Nährstoffkonzentration. Der N-Entzug wird gebildet um zu quantifizieren, wie viel N insgesamt von der Pflanze oberirdisch aufgenommen wurde. Die Ernterückstände, Stroh und Wurzeln verbleiben auf den Flächen und gehen wieder in den Nährstoffkreislauf über. Der N-Entzug durch das geerntete Korn errechnet sich aus dem Produkt aus Ertrag und der N-Konzentration (=Proteinkonzentration/6,25) im Korn. Die Bestimmung der Kornproteinkonzentration erfolgte mittels NIRS (Nah-Infrarot-Reflektions-Spektroskopie). Die Auswertung der ermittelten Daten des N-Entzuges erfolgte nach dem gleichen Verfahren wie die Auswertung der Erträge an der Forschungsanstalt M-V.

Formel: Berechnung des N-Entzuges

$$\text{N-Entzug} = (\text{Proteingehalt} / 6,25) \times \text{Ertrag}$$

Um die N-Ausnutzung der unterschiedlichen Dünger zu ermitteln, also der N-Anteil, der von der Pflanze tatsächlich aufgenommen wird, wurde eine einfache Differenzmethode angewendet. Dazu wird von dem N-Entzug der gedüngten Variante der N-Entzug der ungedüngten Variante (Kontrolle) subtrahiert. Die Dünger-N-Effizienz der unterschiedlichen Düngungsstrategien wurde mit folgender Formel berechnet:

Formel: Berechnung der Dünger-N-Effizienz in %

$$\text{scheinbare Dünger-N-Effizienz} = \frac{(\text{N-Entzug}_{\text{gedüngt}} - \text{N-Entzug}_{\text{ungedüngt}}) \times 100}{\text{N-Düngermenge}}$$

Für die Erstellung einer N-Bilanz wurde der N_{min}-Gehalt des Bodens, die N-Zufuhr (Düngermenge) und die N-Abfuhr (N-Entzug) hinzugezogen, um den N-Saldo der einzelnen Flächen und deren Düngungsvarianten zu ermitteln. Der N-Saldo des langjährigen Mittels der verschiedenen Düngungsstrategien der Jahre 2003 - 2012 ist im Ergebnisteil aufgeführt. Eine N-Bilanz für den dreijährigen Versuch wurde, aufgrund der Auswinterungsschäden im Winter 2012 und den daraus resultierenden Folgen, nicht ermittelt.

Formel: Berechnung der N-Bilanz in kg N/ha

$$\text{N}_{\text{min}} + \text{N-Zufuhr} - \text{N-Abfuhr} = \text{N-Saldo}$$

4.4.2 Berechnung der N₂O-Flussrate

Mithilfe des flux Pakets, dass in der frei verfügbaren Programmiersprache R abgefasst ist (JURASINKI et al. 2012), wurde die Gasflussrate für jede der drei Hauben pro Variante auf Basis der Konzentrationsgradienten (GC-Analyse) berechnet. Die Formel der Flussratenberechnung basiert auf der allgemeinen Gasgleichung.

Formel: Berechnung der Flussrate

$$r_{\text{N}_2\text{O}} = \frac{M P V dc f_1 f_2 f_3}{R T A t \text{ ppb}}$$

$r_{\text{N}_2\text{O}}$: Flussrate [$\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$]

M : molare Masse der Gasmoleküle [g mol^{-1}]

P : Normaldruck der Luft (101300 Pa)

V : Volumen der Haube (m^3)

dc : Konzentrationsgradient des Gases [ppm]

f_1 - f_3 : Umrechnungsfaktoren (von Molekül auf Elementwert, von Grundfläche A auf 1 m^2 , von Akkumulationszeit t auf 1h)

R : allgemeine Gaskonstante ($8,3143 \text{ m}^3 \text{ Pa K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)

T : Temperatur zum Messzeitpunkt [K], Lufttemperatur außerhalb der Messhaube

A : Grundfläche der Gasmesshaube [m^2]

t : Akkumulationszeit [h]

ppm/ppb : Dimension der Spurengaskonzentration

Mit der am GC zusätzlich bestimmten CO₂-Konzentration und der anschließenden R-Berechnung konnten Fehlerquellen gefiltert bzw. korrigiert werden (Bsp. wenn die zeitlich begründete Abfolge der Fläschchen vertauscht wurde), da die CO₂-Konzentration innerhalb der Haube aufgrund der Ökosystematmung (von Mikroorganismen und Pflanzen) während der Messzeit eigentlich linear ansteigen sollte. Aus den einzeln ermittelten Flussraten pro Haube wurde anschließend, aus den Mittelwerten der drei Hauben, die Flussrate (zusätzlich Standardabweichung) für eine Parzelle (= Düngevariante) mit R berechnet.

4.4.3 lineare Interpolation zur Berechnung der kumulativen Emissionen

Mithilfe der errechneten Mittelwerte der gemessenen Flussraten wurde die gesamte Emission für den Messzeitraum von nicht ganz 3 Jahren berechnet. Die Messungen erfolgten zum ersten mal vor der ersten Düngung am 22.03.2010 und endete zum Betrachtungszeitraum am 20.07.2012 vor der Ernte (Messungen werden bis Ende 2012 fortgeführt, diese fließen jedoch in die Betrachtung dieser Arbeit nicht mit ein). Um letztendlich die drei Versuchsjahre miteinander vergleichen zu können, wurden die unvollständigen Versuchsjahre 1 und 3 anteilmäßig hochgerechnet:

Jahr 1: Aussaat 30.09.2009 bis 1 Tag vor Aussaat 21.09.2010

(vom 30.09.2009 bis 21.03.2010 hochgerechnet)

Jahr 2: Aussaat 22.09.2010 bis 1 Tag vor Aussaat 14.09.2011

(ist 1 vollständiges Vegetations- bzw. Versuchsjahr)

Jahr 3: Aussaat 15.09.2011 bis zur Ernte 20.09.2012

(vom 21.07.2012 bis 20.09.2012 hochgerechnet)

Da nicht für jeden Tag Messdaten zur Verfügung standen, wurde für diese Tage die Flussrate der tatsächlichen Messtage linear interpoliert. Als Ergebnis der Interpolation erhält man Flussraten [g N₂O-N/ha/d] für jeden einzelnen Tag der drei Versuchsjahre. Um die Versuchsjahre besser vergleichen zu können, wurden die fehlenden Tage vom 30.09.2009 bis 21.03.2010 und vom 21.07.2012 bis zum 20.09.2012 mit den interpolierten Flussraten vom 30.09.2010 bis 21.03.2011 und vom 21.07.2011 bis 20.09.2011 ergänzt. Daraufhin folgte die Aufaddierung der täglichen Flussraten zu einer kumulierten N₂O-Jahresemission [kg N₂O-N/ha/a], entsprechend der totalen Lachgasemission des Untersuchungszeitraumes.

5 Ergebnisse

5.1 Klimadaten

In der Tabelle 3 sind die monatlichen Niederschlagsmengen und die Lufttemperatur der drei Versuchsjahre und des langjährigen Mittels von 1981 – 2010 dargestellt. Die Summe der durchschnittlichen Niederschlagsmenge von 1981 bis 2010 betrug 496mm. Die Niederschlagsmenge von 2010 und 2011 lag in der Summe mit über 600mm um 100mm höher als das langjährige Mittel. In diesen zwei Jahren waren es überdurchschnittlich hohe Niederschlagsmengen in den dafür untypischen Monaten Mai, Juli und August. In 2012 zeichnet sich wieder eine überdurchschnittlich hohe Niederschlagsmenge ab, da auch in diesem Jahr allein im Juli 169mm Regen gefallen ist. In der Hauptmesszeit von März bis Juli ist die Niederschlagsmenge von 2010 geringfügig niedriger als die langjährigen Mittel dieser Monate von 1981 bis 2010. Im Jahr 2011 hingegen wurde der Durchschnittsniederschlag von März bis Juli mit fast 150 mm überschritten. Grund dafür war die hohe Niederschlagsmenge von 214mm im Monat Juli. 2012 gab es in den Monaten März bis Mai im Vergleich zu den vorherigen Jahren relativ wenig Niederschlag.

Die Lufttemperaturen zeigen insgesamt in allen drei Jahren im Vergleich zum langjährigen Mittel keine großen Schwankungen. Vereinzelt schwanken die Monate des Hauptmesszeitraumes um 1 bis 3°C, aber das Mittel der Monate der Hauptmesszeit aller drei Jahre sowie das langjährige Mittel liegt bei 11 bis 12°C. Auffällig ist, dass im Monat Februar die Lufttemperatur der Versuchsjahre 3°C niedriger sind als im langjährigen Mittel. Damit liegen alle drei Jahre unter 0°C, was für stärkere Frostperioden spricht.

Tabelle 3: Niederschlagsmenge und Temperatur in Dedelow (Wetterstation Dedelow).

	Niederschlag				Temperatur			
	81-10	2010	2011	2012	85-10	2010	2011	2012
Januar	32	12	14	48	-0,6	-6,3	0,2	1
Februar	23	15	23	18	0,6	-1,8	-1,3	-2,7
März	34	40	21	10	3,3	3,5	3,3	5,4
April	29	17	23	39	7,9	7,5	10,9	7,5
Mai	53	89	70	15	12,6	9,7	13,2	12,8
Juni	65	24	64	39	15,4	15	16,3	14,6
Juli	59	48	214	169	17,9	20,3	16,3	16,4
August	53	174	66	62	17,5	17,4	16,9	15,8
September	48	54	56		13,2	12,4	14,2	
Oktober	32	15	24		8,8	7,1	9,2	
November	36	82	2		4,1	3,9	3,1	
Dezember	32	33	59		0,8	-5,6	3,6	
	Summe				Mittelwert			
	496	603	636	400	8,46	6,93	8,83	8,85
	März - Juli				März - Juli			
	240	218	392	272	11,42	11,2	12	11,34

5.2 Ertrag und N-Bilanz

5.2.1 Wirkung der N-Düngerstrategien auf Ertrag

Die folgende Tabelle 4 zeigt die Erträge der vier Varianten der Jahre 2010, 2011 und 2012. Die Erträge für die Jahre 2010 und 2011 wurden aus den Mittelwerten von vier Parzellen pro Variante ermittelt und für das Jahr 2012 aus den Mittelwerten des Kornertrages innerhalb der drei Rahmen der Parzelle für die Gasmessung jeder Variante. Im Jahr 2011 wies die KAS-Variante signifikante Mehrerträge gegenüber der Alzon-Variante aus. Weiterhin waren alle gedüngten Varianten signifikant von der Kontrolle verschieden, die Erträge der gedüngten Varianten wiesen jedoch keine einheitliche Tendenz auf, bzw. waren nicht signifikant verschieden.

Tabelle 4: Kornertrag der vier Varianten von '10 -'12 (n=16). a, b und c stellen die signifikanten Unterschiede der unterschiedlichen Varianten dar.

	2010	2011	2012
Kontrolle	55 a	69 a	43 a
HS	91 b	101 bc	83 b
Alzon	94 b	98 b	81 b
KAS	95 b	104 c	80 b

Für einen besseren Vergleich der einzelnen Düngungsstrategien wurde zusätzlich von einer vergleichbaren langjährigen Versuchsreihe von 2003 bis 2012 die Erträge ermittelt (2005 nicht berücksichtigt) und gegenüber gestellt. Das folgende Diagramm (Abbildung 7) zeigt, dass es kaum signifikante Unterschiede zwischen den drei Düngungsstrategien gibt. Von neun Jahren lag die KAS-Variante in fünf Jahren in ihrem Ertrag höher als die Alzon-Variante und 2009 war der Mehrertrag der KAS-Variante und auch der HS-Variante gegenüber Alzon signifikant. Nur in den Jahren 2004 und 2007 lag die Alzon-Variante in ihren Erträgen etwas höher als die der KAS-Variante. Im Jahr 2007 fällt auf, dass die Kontrolle 1,5dt/ha mehr Ertrag erzielte als die HS-Variante und auch nur geringfügig weniger erreichte als die KAS-Variante (+/-0,3dt/ha) und die Alzon-Variante (+/-3,5dt/ha). Im Mittel der Jahre sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den gedüngten Varianten jedoch zur Kontrolle ersichtlich. Auffällig ist im Mittel das hohe Niveau der Kontrollvariante. Generell ist festzustellen, dass die Erträge von Jahr zu Jahr sehr stark schwanken.

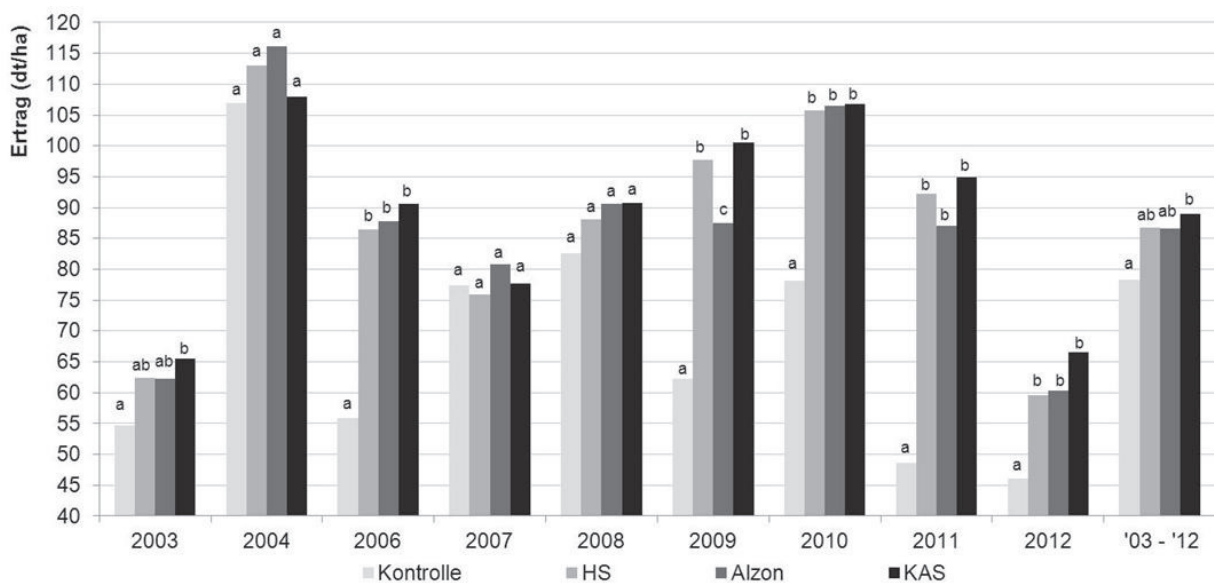


Abbildung 7: Die jährlichen Kornerträge der vier Varianten von '03 - '12 (n=36). a und b stellen die signifikanten Unterschiede der unterschiedlichen Varianten dar (GD 5%).

Die Abbildung 8 fasst die Erträge der Jahre von 2003 bis 2012 der vier Varianten zusammen. Sie zeigt sehr geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Düngungsstrategien. Die Erträge liegen über den mehrjährigen Versuchszeitraum zwischen 75 und 100dt/ha. Alle vier Varianten zeigen deutliche Ausreißer ins Maximum wie auch ins Minimum. Bei Alzon fällt die Abweichung im Vergleich mit den anderen beiden Düngungsstrategien stärker aus. Die Variante mit KAS zeigt jedoch geringere Ausschläge der Max.- und Min.-Erträge.

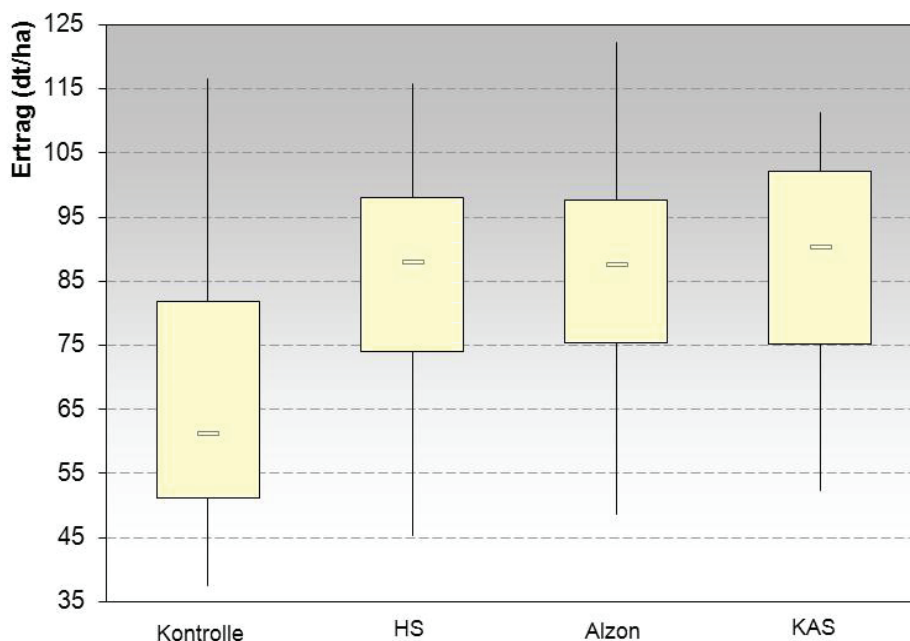


Abbildung 8: Die Kornträge der vier Varianten von '03 – '12 zusammengefasst (n=36).

5.2.2 N-Entzug verschiedener N-Düngungsstrategien

In der Abbildung 9 ist der N-Entzug der vier Düngungsstrategien von 2010 bis 2012 dargestellt. In allen drei Jahren sind signifikante Unterschiede zwischen der Kontrolle und den Düngungsvarianten vorhanden. Im Jahr 2011 tritt eine Signifikanz des N-Entzuges zwischen Alzon und KAS auf, die bereits zuvor auch im Ertrag festzustellen waren.

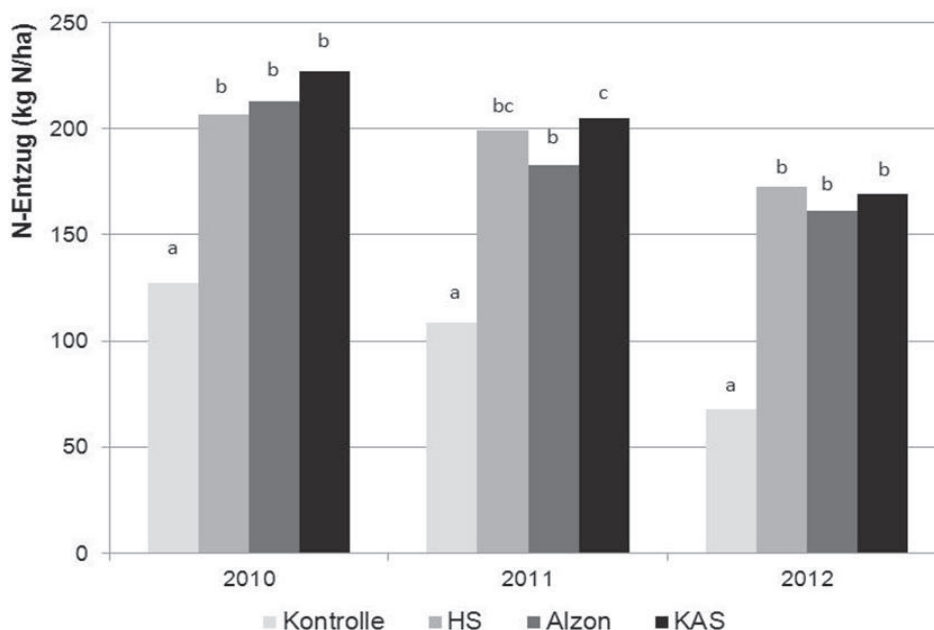


Abbildung 9: N-Entzug der Düngungsstrategien der Jahre '10 - '12 (n= 16). a, b und c stellen die signifikanten Unterschiede der unterschiedlichen Varianten dar (GD 5%).

Die Abbildung 10 gibt Auskunft über die Höhe des N-Entzugs des Korns der einzelnen Düngungsstrategien in der langjährigen Versuchsreihe. Signifikante Unterschiede wurden in allen Jahren mit Ausnahme des Jahres 2007 ermittelt. In acht von neun Versuchsjahren wies die KAS-Variante die höchsten N-Entzüge auf. Davon waren fünf Jahre signifikant verschieden von der HS/Alzon-Variante. Besonders bemerkenswert ist, dass auch im Mittel von '03-'12 die KAS-Düngung signifikant höhere Entzüge bewirkt als die HS/Alzon-Düngung. Zwischen den Varianten mit HS und Alzon sind nur 2009 signifikante Unterschiede im N-Entzug festzustellen. Im Jahr 2010 wird ein N-Entzug von über 220kg N/ha von allen drei Düngungsstrategien erreicht.

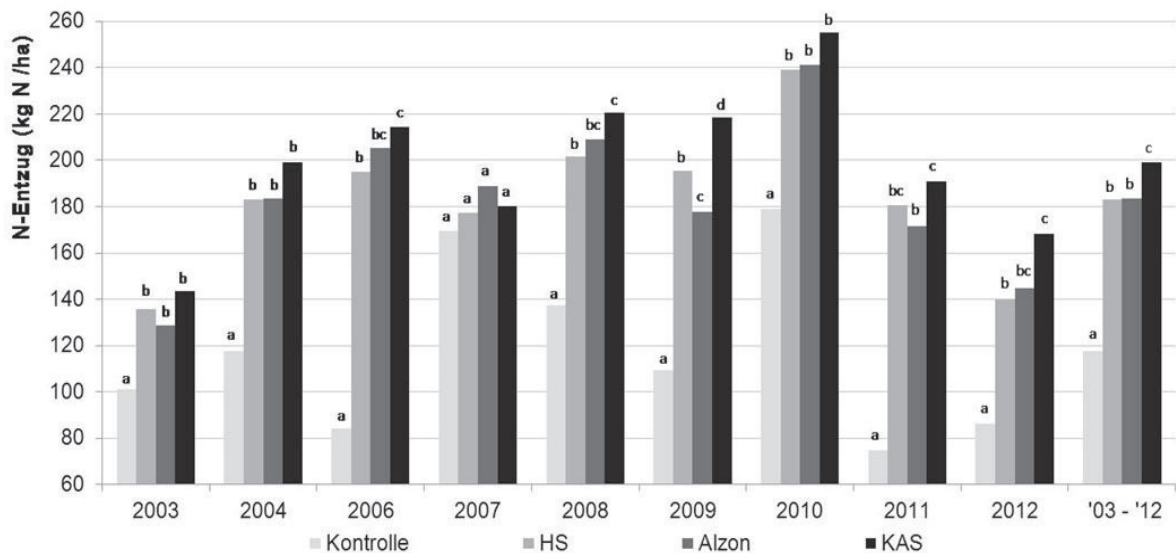


Abbildung 10: Der jährliche Korn-N-Entzug der vier Varianten von '03 - '12 (n=36). a, b, c und d stellen die signifikanten Unterschiede der unterschiedlichen Varianten dar (GD 5%).

In der Abbildung 11 sind die N-Entzüge des Korns der vier Varianten von den Jahren 2003 bis 2012 zusammengefasst. Auch hier ist zu bemerken, wie bereits in Abbildung 10 zu erkennen war, dass die KAS-Strategie den höchsten N-Entzug aufweist und somit die höchste N-Ausnutzung. Die HS- und Alzon-Varianten unterscheiden sich nur gering im N-Entzug. Die Kontrollvariante fällt im Vergleich zu den gedüngten Varianten sehr ab.

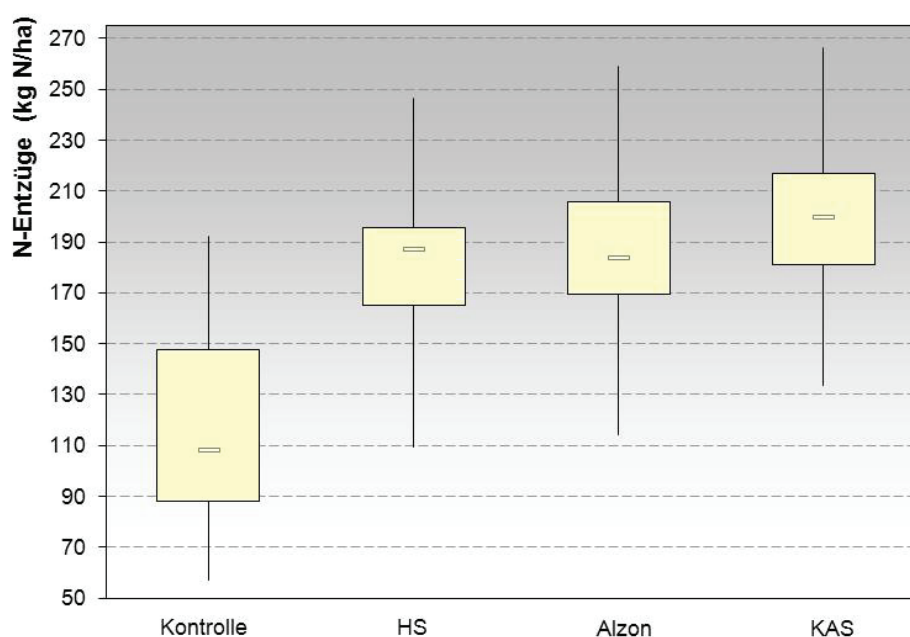


Abbildung 11: Der Korn-N-Entzug der vier Varianten von '03 - '12 zusammengefasst (n=36).

Die N-Effizienz der unterschiedlichen Dünger schwankt innerhalb der drei Jahre, wie in der Tabelle 5 dargestellt. In allen drei Jahren lag die KAS-Variante höher als die Alzon-Variante. Nur im Jahr 2010 hat Alzon eine höhere N-Effizienz als HS. In den weiteren zwei Jahren ist es jedoch genau anders herum, denn mit 6-9% Unterschied, zeigt HS dort eine bessere N-Effizienz als Alzon. 2012 liegen die HS-Variante und die KAS-Variante in ihrer N-Effizienz ungefähr gleich.

Tabelle 5: N-Effizienz der drei Düngungsstrategien der drei Versuchsjahre (in %).

	2010	2011	2012
HS	42	48	55
Alzon	45	39	49
KAS	53	51	53

Die Tabelle 6 zeigt die N-Effizienz der vergleichbaren langjährigen Versuchsreihe. Es ist festzustellen, dass mit Ausnahme des Jahres 2007 immer die KAS-Variante die höchste N-Effizienz aufweist. Bei 2/3 der ermittelten Fälle, ist die N-Effizienz bei der Alzon-Variante höher als die der HS-Variante. Die HS- sowie die Alzon-Variante liegen meist deutlich unter der N-Effizienz der KAS-Variante. 2006 und 2008 lagen 10% Unterschied zwischen HS und KAS, 2012 sogar 15% und im Jahr 2009 lagen zwischen der KAS- und der Alzon-Variante 21% Unterschied.

Tabelle 6: N-Effizienz der drei Düngungsstrategien der Jahre '03 – '12.

	2003	2004	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
HS	18	34	58	4	34	45	32	56	28
Alzon	14	35	64	10	38	36	33	51	31
KAS	22	43	69	6	44	57	40	61	43

5.2.3 Nmin-Gehalte des Versuchszeitraums

Eine in der Praxis übliche N-Bilanz enthält mehrere Parameter. Den Nmin-Gehalt im Boden zu Vegetationsbeginn, die Zufuhr von mineralischem/organischem Dünger sowie Erntereste und die Abfuhr des Ernteguts. Als besonderer Aspekt ist in dieser Arbeit die Lachgasemission mit in die N-Bilanz in kg N/ha eingeflossen. Die Nmin-Gehalte vor der ersten Düngung des jeweiligen Vegetationsjahres wurden den Nmin-Untersuchungen entnommen.

Die folgende Grafik zeigt die Ergebnisse der Nmin-Untersuchungen im Boden in einer Tiefe von 0-30cm über den gesamten Messzeitraum von März 2010 bis März 2012. Der Startwert mit einem Nmin-Gehalt von 38kg/ha ist der offiziell ermittelte Nmin-Gehalt der Untersuchungsflächen der LMS (LMS 2010) und kann als Anfangswert in der Höhe auch für die genutzten Versuchsflächen in die Betrachtung mit einfließen.

In der Abbildung 12 ist zu erkennen, dass nach der zweiten Düngung mit HS und KAS der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalt auf über 50kg/ha ansteigt. Dies geschieht jedoch auch in der Alzon-Variante, die keine Düngung erhielt. Die höchsten Peaks bei den Nmin-Gehalten über den gesamten Messzeitraum sind vor allem bei der KAS-Variante festzustellen. Im Vergleich zu den vorherigen Messungen steigt ab Ende Mai der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anteil im Boden und der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Anteil nimmt ab. Nach der Düngung am 9.06.2010 steigt der Nmin-Gehalt der KAS-Varianten bis auf über 130kg/ha mit einem Verhältnis von NO_3 zu NH_4 von ca. 50:50. Im Gegensatz dazu lag am 10.05.2010 der Nmin-Gehalt der KAS-Variante bei 110kg/ha $\text{NO}_3\text{-N}$. Im März 2011 wurden im Gegensatz zum März 2010 höhere $\text{NH}_4\text{-N}$ -Mengen erfasst und nur geringere $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte. Ab Ende Juni, Anfang Juli ist eine Gleichmäßigkeit in der Höhe der Nmin-Gehalte der unterschiedlichen Düngungsstrategien der einzelnen Messungen zu erkennen. Auch zwischen der Kontrollvariante und den Düngungsversuchen sind keine großen Gehaltsunterschiede festzustellen.

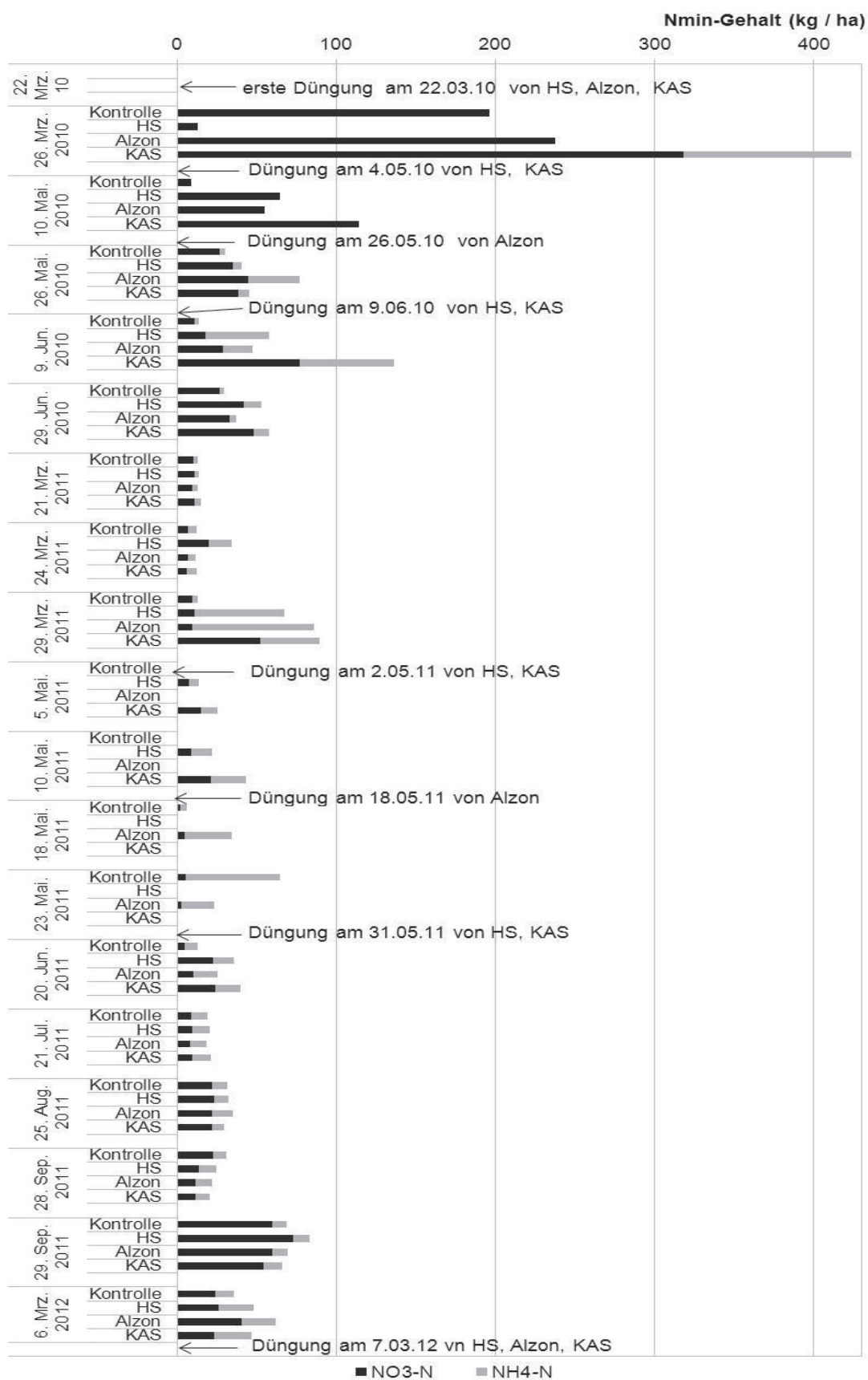


Abbildung 12: Nmin-Gehalte von März 2010 bis März 2012.

5.3 Lachgasemission

5.3.1 Tägliche N₂O-N-Flüsse

Abbildung 13 stellt die täglichen N₂O-N-Flüsse vom 22.03.2010 bis zum 20.07.2012 der vier Varianten dar. Die Lachgasemissionen haben in allen vier Varianten einen annähernd gleichen Verlauf. Festzustellen ist, dass es 2010 und 2011 im Gegensatz zu 2012, zu relativ geringen Lachgasemissionen kam bzw. keine N₂O-N-Flüsse zu erfassen waren. Die höchsten Flussraten wurden im Frühjahr 2012 in allen vier Varianten gemessen. Bei der Kontrollvariante entgasten Anfang März ca. 50 g/ha/d, die Alzon-Variante liegt bei 30g/ha/d und die KAS-Variante etwas über 40g/ha/d. Bei der HS-Variante wurden die höchsten täglichen N₂O-N-Flüsse gemessen. Sie erreichten nach der ersten Düngung eine Flussrate in Höhe von über 80g/ha/d. Ein weiterer Peak ist in den Varianten zu unterschiedlichen Zeitpunkten festzustellen. Dieser zweite Peak erreicht Anfang Juni bei der Alzon-Variante 20g/ha/d, Anfang Juli bei der HS-Variante sowie bei der Kontrollvariante ungefähr die Hälfte des ersten Peaks der täglichen N₂O-N-Flüsse. Bei der KAS-Variante zeichnet sich ein Anstieg Ende Juli 2012 ab. Zur Höhe dieses Peaks liegen jedoch keine exakt gemessenen Werte vor.

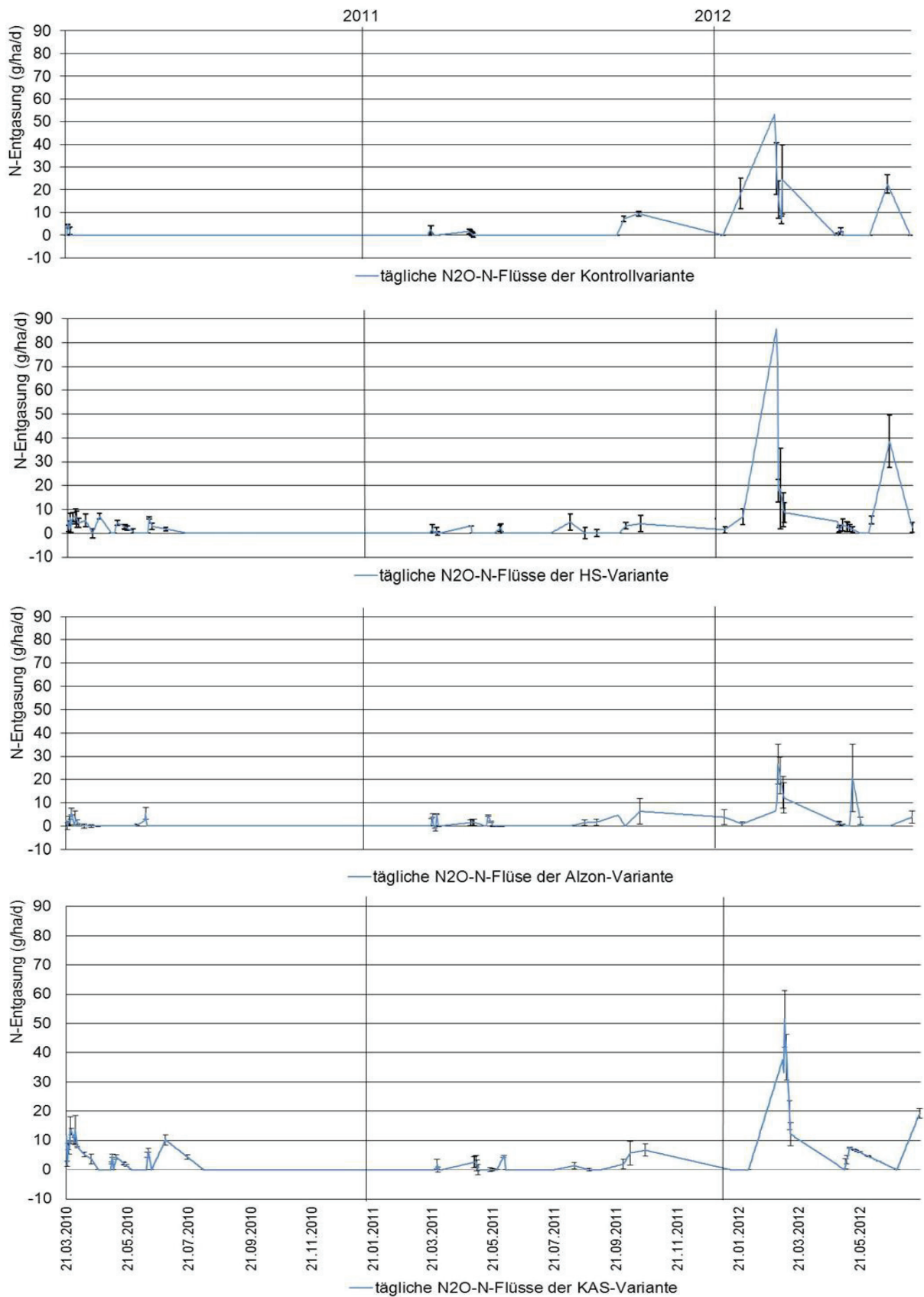


Abbildung 13: tägliche N_2O -N-Flüsse der vier Varianten des Messzeitraumes von '10 – '12.

5.3.2 Kumulierte N₂O-Emissionsrate

In der Abbildung 14 sind die aufsummierten Emissionsraten der vier Varianten für alle drei Versuchsjahre dargestellt. Wie schon in Abbildung 14 festzustellen war, sind vor allem im Jahr 2012 die Lachgasemissionsraten höher als die der vorherigen Jahre 2010 und 2011. Innerhalb des Jahres 2012 ist bei HS und der Kontrolle der Stickstoff mit über 3kg/ha in Form von N₂O-N in die Atmosphäre entgast und somit verloren gegangen. Bei Alzon lag der N-Verlust bei der Hälfte mit ca. 1,5kg/ha N₂O-N. In den Jahren mit geringer Lachgasemission ist die Alzon-Variante 2011, die mit den höchsten N-Verlusten und 2010 die KAS-Variante. Die verschiedenen Varianten liegen alle mit ihren N₂O-N-Verlusten in den ersten zwei Jahren unter 1kg N/ha/a.

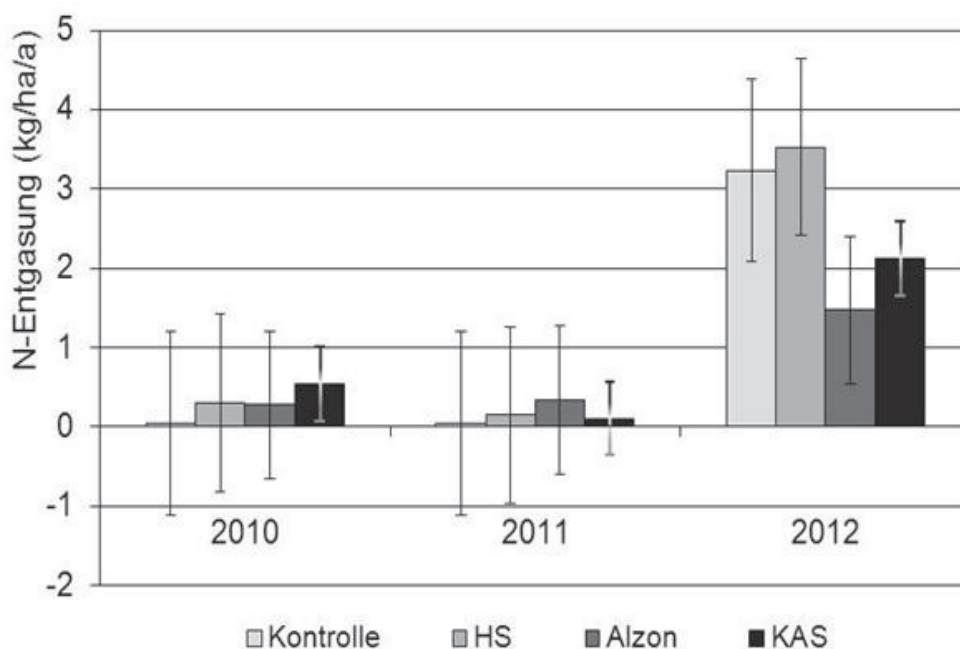


Abbildung 14: Kumulierte N₂O-N-Flüsse des Messzeitraums von '10 – '12.

5.4 N-Bilanz des Versuchszeitraums

Die folgende Abbildung 15 stellt die einzelnen N-Schluss-Salden der verschiedenen Düngungsstrategien der langjährigen Versuchsreihe dar. Für die Erstellung der N-Bilanz wurden die Erträge der langjährigen Versuchsreihe genutzt, da Auswinterungsschäden im 3-jährigen Versuch 2012, die N-Bilanz verzerren würden. Als zusätzliche N-Abfuhr wurden pauschal 3kg N/ha als N₂O-N-Verluste für alle Varianten der drei Jahre in der N-Bilanz abgezogen. Für den Nmin-Gehalt wurde der Durchschnitt des jeweiligen Jahres genutzt. In den Jahren 2010 und 2011 lagen die N-Mengen, die nach der Ernte im Boden verblieben, bei ungefähr 50kg N/ha und damit auf der Höhe des Nmin-Grenzwertes, der im Herbst nicht überschritten werden sollte. 2012 stieg der Nmin-Gehalt auf über 120kg/ha und überschreitet damit das Doppelte des N-Grenzwertes. (Aufgrund der deutlich hohen N-Gehalte, die erfasst wurden, kann evtl. von einem systematischen Messfehler ausgegangen werden.) Da die N-Zufuhr bei der Kontrollvariante sehr gering ausfällt, liegt der N-Saldo in jedem Jahr im negativen Bereich. Eine ausführliche Aufschlüsselung der N-Bilanz ist als Anhang angefügt (Kapitel 10.1 Tabelle 7 - 10).

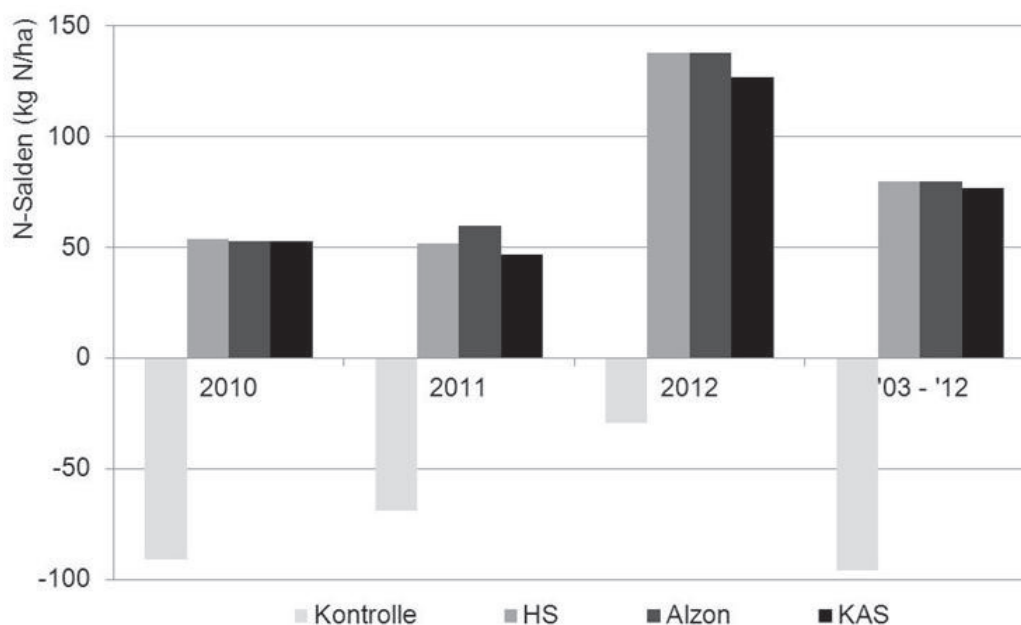


Abbildung 15: N-Salden am Ende der jeweiligen Versuchsjahre.

6 Diskussion

6.1 Einfluss der N-Strategien auf Ertrag und N-Bilanz

Betrachtet man die Erträge der einzelnen Düngungsstrategien (Kapitel 5; Tabelle 4, Abbildung 7 und 8) sind keine großen Differenzen zu erkennen. Bei dem 3-jährigen Versuch wie auch beim mehrjährigen Versuch erzielte die KAS-Variante, mit nur geringem Abstand zu den Harnstoffvarianten, die meisten Mehrerträge. Zwischen der Alzon-Variante und der HS-Variante sind im Ertrag keine gravierenden Unterschiede zu erkennen. Auch das langjährige Mittel zeigt die gleichen Ergebnisse. KNITTEL et al. (2008) konnte bei seinem langjährigen Versuch von 1999 - 2003 bei einer stabilisierten Düngung (DMPP) zwar eine Ertragssteigerung von 0,3t/ha im Vergleich zu einer Ammonium-Nitrat-Düngung ermitteln, die Ertragssteigerung um 0,3t/ha ist jedoch nicht signifikant höher zu den Düngungsstrategien ohne Stabilisator. Der Proteingehalt und somit der N-Entzug und das TKM blieben in dem Versuch unverändert. BRENNER (1991) sowie ZERULLA und KNITTEL (1991) konnten Mehrerträge durch ammoniumstabilisierte Dünger vor allem feststellen, umso höher die Niederschläge in den 6 – 8 Wochen nach der Düngerapplikation waren und eine entsprechende Nitratverlagerung auslösten. ZERULLA (1989) beobachtete des weiteren Mehrerträge bei der Düngung mit DCD auf leichteren Standorten mit niedrigen Ackerzahlen (20-30). MUNZERT (1983) und SCHEFFER et al. (1983) beschreiben zusätzlich, dass auf schweren Böden unter trockenen Bedingungen nur geringe Ertragsunterschiede festzustellen sind. Der Einsatz von Düngern mit Nitrifikationshemmern ist somit auf leichteren Standorten mit viel Niederschlag bzw. bei stärkerem Wasseraufkommen zu empfehlen. Es muss aber ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass Ammoniumdünger mit Nitrifikationshemmern nicht ohne weiteres vergleichbar sind. Die Versuchsflächen in Dedelow hingegen haben Bodenpunkte zwischen 40 und 60 (mittlere Böden) und haben, mit durchschnittlich 500mm, nur eine relativ geringe Niederschlagsmenge.

Im N-Entzug zeigen sich in den Ergebnissen der zwei Versuchsreihen ähnliche Tendenzen. In dem drei- wie auch in dem mehrjährigen Versuch sticht die KAS-Variante hervor. In den neun Jahren liegt KAS acht mal höher im N-Entzug als die Harnstoffvarianten. Grund dafür könnte die Spätgabe von KAS zu EC 49/51 mit 60kg N/ha gewesen sein, die bei Alzon bereits im EC 37 gegeben wurde. Der Harnstoff wurde auch, genau wie KAS, als Spätgabe verabreicht, allerdings kann die Ausnutzung des Stickstoffs bei Harnstoff durch Trockenheit

beeinflusst sein. Die Umbauprozesse des Harnstoffs zu pflanzenverfügbaren N werden eingeschränkt und die gewünschte Erhöhung des Proteingehaltes durch eine späte Qualitätsgabe wird nicht erreicht. Dadurch das KAS im Gegensatz zu HS und Alzon schnell verfügbaren N enthält, zeichnen sich dort höhere N-Entzüge ab. MOTT (1973) stellte, im Vergleich zur KAS-Düngung, bei HS nur eine 85%ige N-Ausnutzung fest. SCHULTZ (1987) hingegen beschränkte die niedrige N-Ausnutzung von HS nur auf die Zeiträume von Trockenperioden. TIMMERMANN u. SÖCHTIG (1983) und auch MUNZERT (1987) konnten in zahlreichen Untersuchungen bei stabilisierten Düngern eine höhere N-Ausnutzung beobachten als bei herkömmlichen Düngern.

In der folgenden Abbildung 16 ist zu erkennen, dass in den Frühjahrsmonaten im langjährigen Mittel sowie in den Jahren 2010, 2011 und 2012 zu den Düngergaben (Ausnahme Mai 2010) wenig Niederschlag (ND) gefallen ist und sich vor allem 2012 eine stärkere Frühjahrstrockenheit abzeichnet. Es fielen im März 2012 10 mm ND, ca. 15mm weniger als im langjährigen Mittel. Im Juni 2010 und 2012 zur Spätgabe fiel nur die Hälfte an Regen, der ND-Menge, die seit 1981 bis 2010 im Durchschnitt gefallen ist. Zu dieser Frühjahrstrockenheit sind zusätzlich höhere Temperaturen festzustellen, die höher lagen als das langjährige Mittel.

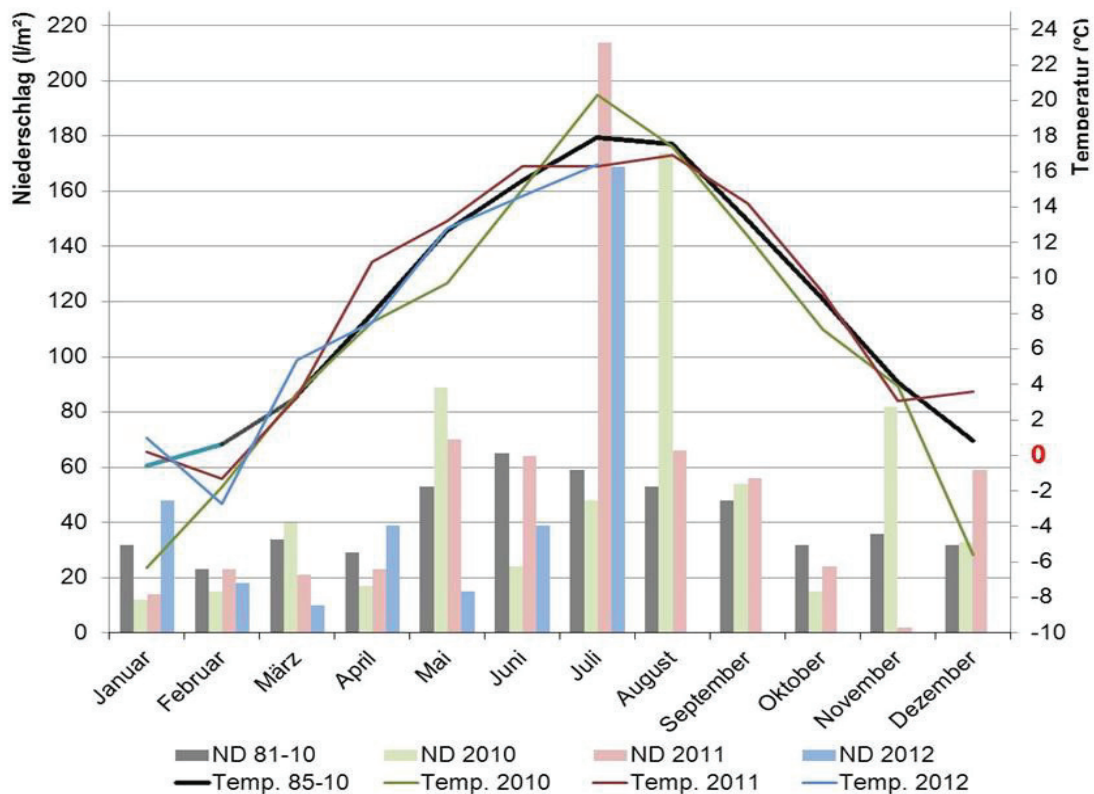


Abbildung 16: Niederschlag und Lufttemperatur in Dedelow von '10-'12 und dem Mittel der Jahre '81-'10 (Wetterstation Dedelow).

So können die gering differenzierten Ertragsunterschiede sowie Unterschiede im N-Entzug letztendlich auf Witterungsbedingungen zurückzuführen sein. Für eine optimale Nährstoffausnutzung ist eine ausreichende Wasserversorgung der Pflanze wichtig. Zu dem ist eine hohe N-Ausnutzung nur dann gewährleistet, wenn alle pflanzenbaulichen Maßnahmen optimal durchgeführt werden (z.B. Pflanzenschutz, Lager-Vermeidung, Bodenbearbeitung). Besonders bei Witterungsextremen (Trockenphasen) ist so eine ausreichende Stickstoffaufnahme, bzw. Verwertung zu gewährleisten. KNITTEL et al. (1987) stellte in Versuchen an zwei unterschiedlichen Standorten fest, dass die Temperatur erheblichen Einfluss auf die Wirkung von Harnstoff ausübt, wie auch die Bodenart und der pH-Wert. Auf einem Löß-Standort mit niedrigen Temperaturen ($<5^{\circ}\text{C}$) und einem pH-Wert von 7,8 erzielte die KAS-Düngung höhere Erträge, aber auf Sand mit einem pH-Wert von 6,8 und höheren Temperaturen ($5-7^{\circ}\text{C}$) war die HS-Variante in dem Versuch ertragreicher. SCHULTZ (1986) und auch RODGERS et al. (1986) kamen zu dem Schluss, dass Harnstoff unter guten Boden- und Witterungsbedingungen (Temperatur, pH-Wert, ND, Bodenart) an die Erträge von KAS heranreicht. ZERLULLA und HÜTHER (1992) konnten auf ihren drei Versuchsstandorten zwischen HS und KAS keine Ertragsunterschiede beobachten. Nach BAUMGÄRTEL (2010) wurden in der Vergangenheit reichlich Untersuchungen zur Wirksamkeit verschiedener Stickstoffdüngerformen durchgeführt, mit dem einheitlichen Ergebnis, dass die weitverbreiteten Stickstoffdünger HS und KAS bei guter fachlicher Praxis in Ackerkulturen in ihren Erträgen und ihren N-Entzügen weitestgehend gleich einzuschätzen sind.

In Düngungsversuchen der Landwirtschaftskammer Niedersachsen wurde versucht, durch den Einsatz von stabilisierten Düngern bzw. angepassten Düngungsstrategie (CULTAN-Verfahren), auf die Vorsommertrockenheit gezielter zu reagieren. Zu Vegetationsbeginn wurde der Pflanze angemessen viel Stickstoff angeboten und bei der Schlussdüngung je nach Standort und Witterung entsprechend verhaltener gedüngt. Dadurch sollte die Effizienz der Stickstoffdünger verbessert werden. Im Kapitel 5 Tabelle 5 und 6 ist die N-Effizienz der einzelnen Düngungsstrategien der Versuchsjahre von 2010 – 2012 sowie von 2003 - 2012 dargestellt. Festzustellen ist, dass die KAS-Variante durchschnittlich die höchste N-Effizienz gegenüber der HS- und Alzon-Variante aufweist. Die Alzon-Variante mit dem stabilisierten N-Dünger zeigt, entgegen den Erwartungen dieser Arbeit keine höhere N-Effizienz, nicht einmal gegenüber der HS-Variante. Dieses Ergebnis widerspricht auch dem Ziel einer angepassten Düngungsstrategie des Düngungsversuchs der Landwirtschaftskammer Niedersachsen (BAUMGÄRTEL 2010).

Dass die aufgeschlüsselte N-Effizienz der einzelnen Dünger allgemein so gering ausfällt, wie in der Tabelle 6 dargestellt, kann auf die Versuchsbedingungen zurückgeführt werden. Im Verhältnis zu den gedüngten Varianten hat die Kontrolle in einigen Jahren hohe Erträge und N-Entzüge erzielt, was evtl. auf die Parzellengröße (9m²), auf eine ideale Witterung, auf eine positive Wirkung der unbestellten Parzellenränder oder auf den jährlichen Wechsel der Versuchsanlage zurückzuführen ist. Die Dünger-N-Effizienz wird, wie im Kapitel 4.4.1 beschrieben, durch die Ertragsrelationen der ungedüngten Variante zu der gedüngten Variante ermittelt. Ist dabei die ungedüngte Variante in ihrer N-Ausnutzung zu der gedüngten Variante entsprechend hoch, fällt die N-Effizienz der Düngungsvarianten nur gering aus. Um eine praxistaugliche N-Effizienz zu ermitteln sollte die Parzellengröße entsprechend vergrößert werden, so erhält man eine größere Druschfläche, die weniger Einflussfaktoren am Rand ausgesetzt und mit den realen Werten der Praxis besser vergleichbar ist. Des Weiteren gibt es verschiedene Ansätze zur Bewertung der N-Effizienz, die möglicherweise zu anderen Aussagen führen würden. Es sollte individuell abgewogen werden, welche Bewertung sich am geeignetsten zeigt, um aussagekräftige Rückschlüsse ziehen zu können.

Die Abbildung 13 im Kapitel 5.1.3 zeigt die N-Salden von 2010 bis 2012 und das langjährige Mittel. Durch die Bilanzierung der Stickstoff-Zu- und Abfuhr liegen die Ergebnisse der Düngungsstrategien im positiven Saldo und die der Kontrolle im negativen Saldo. Der ermittelte Überhang der drei Düngungsstrategien ist nicht gleichzusetzen mit einer überhöhten Düngung. In den Jahren 2010 und 2011 ist der Stickstoffüberhang in einer Höhe von ca. 50kg N/ha so, dass von einer „Bedarfsgerechten Düngung“ gesprochen werden kann. In der Düngeverordnung (BUNDESMINISTERIUM 2006) ist nachzulesen, wenn die Ergebnisse der Nährstoffvergleiche für N im Mittel der letzten drei Jahre unter 60kg N/ha betragen, ist zu vermuten, dass die Stickstoffdüngung bedarfsgerecht erfolgte. Im Jahr 2012 hingegen lag der N-Saldo über 100kg N/ha. Dies ist jedoch darauf zurückzuführen, dass in jedem Versuchsjahr die gleiche Düngermenge von 190kg N/ha für alle Düngungsstrategien ausgebracht wurde und so keine angepasste Düngung vorlag. In Brandenburg betrug 2010 der N-Saldo auf landwirtschaftlich genutzten Flächen im Durchschnitt 32kg N/ha. Das sind 6 kg N weniger im Vergleich zum Mittel der Jahre 1997 bis 2011. 2011 lag der N-Saldo jedoch wieder mit 36kg N/ha etwas höher als das Vorjahr (HEIDECHE 2011). Das langjährige Mittel von 38kg N/ha/a liegt damit unter der zugelassenen Höhe von 50kg N/ha und spricht allgemein für eine gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft. Für eine vollständige N-Bilanz sollte jedoch, neben den Einträgen und Austrägen, zusätzlich auch der tatsächliche Umfang der N-Mineralisierung und Immobilisierung im Boden berücksichtigt werden.

Für eine effiziente N-Düngung ist eine sachgerechte Ermittlung des N-Düngebedarfs ausschlaggebend. Er sollte an die Standorteigenschaften, die Fruchtfolge und an die Düngerform angepasst sein. Eine gute Ausnutzung des gedüngten Stickstoffs ist zusätzlich nur dann möglich, wenn alle pflanzenbaulichen Maßnahmen (Pflanzenschutz, Bodenbearbeitung) optimal durchgeführt werden. Für die Dosierung der N-Düngermenge ist die Messung des N_{min}-Gehaltes im durchwurzelbaren Boden ausschlaggebend. Zieht man den ermittelten N_{min}-Gehalt vom Sollwert (basiert auf Ergebnisse zahlreicher Feldversuche) ab, erhält man die notwendige Höhe einer effizienten Stickstoffdüngung. Doch letztendlich ist nicht nur die Effizienz der Stickstoffdüngung zu berücksichtigen, da eine gezielte Düngung auch sehr komplexe Einflüsse auf ökonomische wie auch ökologische Aspekte beinhaltet. Die N-Düngung sollte so ausfallen, dass N-Verluste vermieden, aber die Qualität der Ernteprodukte optimal gefördert werden. Die Salden der Kontrollvariante zeigen, wie sich eine zu geringe bzw. keine Düngung auf den Ertrag und den N-Entzug auswirkt. Für möglichst gute Erntequalitäten, sollten auch keine Defizite in der N-Düngung vorliegen. Um repräsentative Aussagen über die N-Effizienz machen zu können, sollte bei weiteren Versuchen darüber nachgedacht werden, keine pauschale Düngermenge zu verwenden, sondern diese den Standort- und Witterungsbedingungen anzupassen.

Durch eine Kontrolle der Bestände im zeitigen Frühjahr, sollte die Dichte (Pflanzenanzahl) und der Zustand (Krankheitsbefall) des Bestandes erfasst werden und anhand der geschätzten Ertragserwartungen wird die bedarfsgerechte Düngermenge für die erste Düngung festgelegt. Flächen mit einer hohen Pflanzendichte und einem kräftigen Bestand benötigt zum Vegetationsbeginn eine geringere Stickstoffgabe als geschwächte Bestände. Allgemein üblich sind 3. Teilgaben mit einer Startgabe von 50-70kg N/ha. Bei schwachen Beständen (+20kg N/ha) bzw. bei üppigen Beständen (-20kg N/ha) wird die erste Stickstoffgabe entsprechend angepasst, ohne dass sich die Gesamt-N-Menge dadurch verändert (BENKER 2012). Bei schwachen Beständen ist aber auch von einer Alzon-Düngung abzugehen, da die Pflanzen sofort schnell-verfügbares NO₃ benötigen. Eine KAS-Düngung ist in diesem Fall demzufolge günstiger als HS und Alzon. Auch unter trockenen Bedingungen ist die Düngung mit KAS vorteilhafter als HS, da HS nur mithilfe von Wasser (Hydrolyse) zu pflanzenverfügbaren Stickstoff umgebaut wird. Um der Trockenphase im April/Mai entgegenzuwirken, sollte frühzeitig zu Vegetationsbeginn (März), wenn die Regenwahrscheinlichkeit noch höher ist, Alzon mit einer angemessenen Düngermenge in den Bestand gebracht werden. Alzon kann bei rechtzeitiger Applikation in der Trockenphase die Versorgung der Pflanze eher aufrechterhalten, als eine weitere Düngung mit KAS oder

HS. Der Bestand sollte immer unter Beobachtung stehen und anhand einer Ertragsschätzung vor jeder weiteren Düngung sollte die Düngermenge an den Bedarf angepasst werden. In der Düngeplanung sind immer wirtschaftliche Aspekte wie auch Umweltaspekte abzuwägen. Zusätzlich wurden gasförmige N_2O -N-Verluste mit in die N-Bilanz einbezogen. Anhand der erhaltenen Ergebnisse der Lachgasmessungen, wurde in der N-Bilanz für alle Varianten als weitere N-Abfuhr 3kg N/ha/a veranschlagt. Die 3kg N/ha/a gingen aus den kumulierten N_2O -N-Flüssen der drei Jahre hervor (Kapitel 5, Abbildung 15). Die häufigsten täglichen N_2O -N-Flüsse liegen jedoch weit unter 10g N/ha/d, wie in Kapitel 5 Abbildung 14 dargestellt, und erreichen in der Jahressumme nur 2012 etwas mehr als 3kg N/ha/a. Mit der N-Bilanz ist festzustellen, dass gasförmige N_2O -Verluste in der ermittelten Höhe für die Ertragsunterschiede keine Ursache darstellen. Es sind keine Auswirkungen festzustellen, da die entgasten N-Mengen zu marginal sind, um Einfluss auf den Ertrag und den N-Entzug zu nehmen. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass andere gasförmige N-Verluste wie NH_3 und N_2 für die Bilanz durchaus von Bedeutung sein können und aufgrund dessen auch bestimmt werden sollten, um eine korrekte Einschätzung vornehmen zu können.

6.2 Einfluss der Stickstoffdüngerform auf die Lachgasfreisetzung

In der Abbildung 12, Kapitel 5.2.1 sind die täglichen N_2O -N-Flüsse der drei Jahre 2010, 2011 und 2012 dargestellt. Zu erkennen sind geringe N_2O -N-Emissionen in den ersten zwei Jahren. Die höchsten Peaks 2010 wurden bei der KAS-Variante im Düngungszeitraum ermittelt. In der Kontrollvariante lassen sich minimale Flüsse Anfang März nachweisen, danach fallen die täglichen N_2O -N-Flüsse auf Null zurück. 2011 hingegen wurden bei der Kontrollvariante die höchsten Peaks in den N_2O -N-Flüssen gemessen. Anfang Oktober gingen 9g N/ha durch N_2O -N-Emission verloren. Bei allen gedüngten Varianten hingegen fielen die Flüsse etwas geringer aus. Es gibt Untersuchungen in denen festgestellt wurde, dass 50% der jährlichen N_2O -Emissionen während des Winters (Oktober bis Februar) ablaufen (KAISER et al. 1998). Die Autoren begründen es zum einen damit, dass N_2O entgast, wenn der Boden gefriert und das in tiefen Bodenschichten enthaltene N_2O entweicht sowie zum anderen durch mikrobielle N_2O -Produktion am Tage, wenn der Boden auftaut und Nachts wieder gefriert. In einer Untersuchung von WAGNER-RIDDLE et al. (2007) wurden ebenfalls erhöhte Emissionen von November bis April, mit einer Differenz von 30 – 90% zu den Emissionen von Mai bis Oktober, ermittelt, von denen der größte Teil N_2O -Flüsse waren

als der Boden auftaute. Sie untersuchte von 2000 bis 2005 zwei unterschiedliche Bewirtschaftungsverfahren (konventionell und Direktsaat) für die Fruchtfolge Mais, Sojabohne und Winterweizen. Die höchsten N₂O-Emissionen erfasste sie dabei im Winter in den konventionell bewirtschafteten Kulturen (Winterweizen 1,3 - 2,9kg N/ha, gefolgt von Mais 0,9 - 1,2kg N/ha und Sojabohne 0,4 - 1,1kg N/ha). Bei allen Varianten ist ein geringer N₂O-N-Fluss zur Jahreswende 11/12 festzustellen. Bei anderen Untersuchungen zeigte sich, dass Flächen mit gedüngtem Hemmstoff auch im Winter geringere Emissionen aufweisen als Flächen ohne Nitrifikationshemmer (RUSER et al. 2001). Die erhöhten Flüsse könnten durch höhere Tagestemperaturen im Dezember bzw. Januar auftreten, wenn der Boden taut. Im Dezember 2011/Januar 2012 lag die Tagestemperatur bei durchschnittlich 3°C. Die erhöhten Flüsse im März 2012 sind evtl. auf extreme Fröste im Februar zurückzuführen (durchschnittliche Lufttemperatur 02/12 lag bei -2,7°C). Enthalten die Ernterückstände höhere N-Gehalte oder liegt noch unverbrauchter N-Dünger im Boden, trägt dies während des Winters zum einen zu den N_{min}-Gehalte bei, bringt aber gleichzeitig die Gefahr erhöhter N₂O-Emissionen außerhalb der Vegetationsperiode mit sich (RUSER et al. 2001, KAISER et al. 1998). In Untersuchungen wurde darauf hingewiesen, dass Ernterückstände potentiell wichtige N₂O-N-Quellen im Boden sind, die man jedoch nur schlecht erfassen kann. Es wurde herausgefunden, dass das C/N-Verhältnis des Ernterückstandes zu 22-34% und der N_{min}-Gehalt zu 18-74% für die Schwankungen der N₂O-Emissionen verantwortlich ist (VELTHOF et al. 2002).

2012 ist von den drei Versuchsjahren das interessanteste Jahr. Wie in der Abbildung 17 zu erkennen, gehen in dem Jahr die täglichen N₂O-N-Flüsse bei der HS-Variante leicht hoch auf etwas mehr als 80g/ha/d. Damit zeigt die HS-Variante die höchsten täglichen Flüsse in der Zeit nach den Düngungen, wogegen im Jahresvergleich der kumulierten Flüsse keine der drei Düngungsvarianten besonders hervorsticht (Abbildung 14, Kapitel 5.2.2). Nach CLAYTON et al. (1997) sind keine unterschiedlichen N₂O-Emissionen bei der Düngung verschiedener Düngerformen festzustellen.

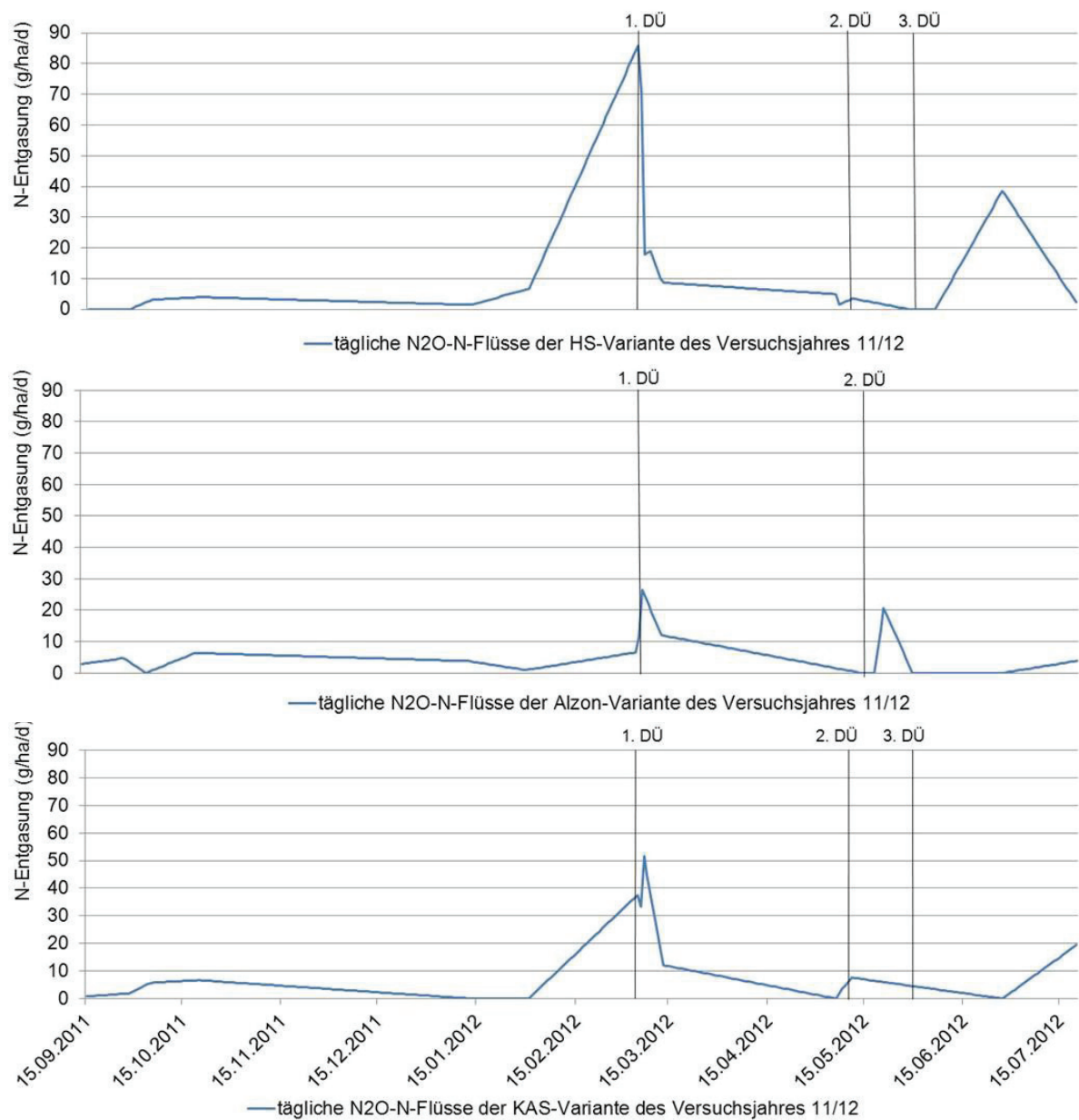


Abbildung 17: tägliche N₂O-N-Flüsse des Versuchsjahres 11/12.

Bei einer weiteren Untersuchung wurden 1000 Datensätze analysiert, mit dem Ergebnis, dass keine prägnanten Zusammenhänge zwischen der Düngerform und der N₂O-Emission festgestellt werden konnten (STEHFEST und BOUWMAN 2006). Die höchsten täglichen Emissionen der Alzon-Variante fallen um 50% geringer aus als entsprechende Emissionen der HS-Variante, abgesehen von Zeiträumen in denen allgemein die Emissionen sehr niedrig waren. Dies ist hauptsächlich auf den geringen Anteil an NO₃-N im Dünger und der verringerten Anzahl an Düngergaben zurückzuführen. Auch in Untersuchungen von LINZMEIER et al. (2001) wurde die N₂O-Emission, um 20% durch den Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren reduziert.

In der Abbildung 18 sind bei der Kontrollvariante relativ hohe N_2O -Emissionen im Vergleich zu den gedüngten Varianten festzustellen. Da der höchste Peak zum Vegetationsbeginn und so gleichzeitig zum Beginn der mikrobiellen Umsetzung vorliegt, könnten hier die N_{min} -Gehalte und die Ernterückstände im Boden eine größere Rolle spielen. Nach LINZMEIER et al. (2001) kann der Anteil des Bodenstickstoffs an der N_2O -Gesamtemission 60-90% betragen und im Verhältnis dazu nur 10-40% des Düngestickstoffs entgasen als N_2O . Dass sagt aber auch, bei einer Düngermenge von 190kg N/ha, würde dann der gedüngte Stickstoff in einer Größenordnung von 19 – 76kg N/ha als Lachgas an die Atmosphäre verloren gehen.

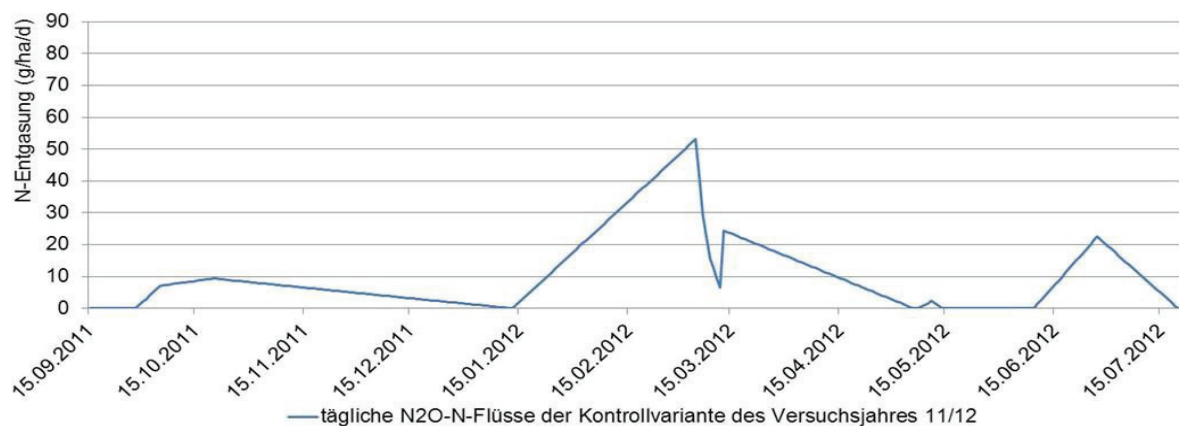


Abbildung 18: tägliche N_2O -N-Flüsse der Kontrollvariante des Versuchsjahres 2012.

Über den gesamten Messzeitraum sind letztlich keine überhöhten Lachgasemissionen erkennbar. In der Zeit der Vegetation und gleichzeitig zur Zeit der Düngerapplikation wird das meiste Lachgas emittiert. Mit einem durchschnittlichen Niederschlag von weniger als 600mm und weniger als 100 Tage Frost, steht die Uckermark bzw. Dedelow für eine Region mit generell geringer Lachgasemission. Dies bestätigen weitere Untersuchungen.

JUNGKUNST et al. (2006) erfasste die jährlichen Emissionsraten von 27 Standorten, die im Bereich von 0,04 bis 17,1kg N_2O -N/ha lagen. Und auch Ergebnisse von LEIDEL (2000) sowie HELLEBRAND et al. (2003), deren Standorte ebenfalls im Nordosten von Deutschland liegen, erhielten geringe Lachgasflüsse zwischen 1,1 und 2,1kg N_2O -N/ha. Hinzu kommt der mangelnde Niederschlag in den Vorsommermonaten der drei Jahre, wodurch zusätzlich eher niedrige Lachgasemissionen zu erwarten waren. Dass das Jahr 2012 leicht erhöhte Lachgasemissionen aufweist, kann man letztendlich nur auf die Standortbedingungen zurückführen, da sich die Versuchsfelder und demzufolge die Standorte der Parzellen der einzelnen Jahre unterscheiden.

7 Schlussfolgerungen

Ziel dieser Arbeit war es den Einfluss verschiedener Stickstoff-Düngungsstrategien auf den Ertrag, die Stickstoffbilanz und die N_2O -Emissionen von Winterweizen zu quantifizieren. Dieses Ziel wurde erreicht, wie die Ergebnisse in Kapitel 5 zeigen. Beim Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Stickstoff-Düngungsstrategien zeigte sich, dass zum einen keine signifikanten Unterschiede in der Ertragswirkung der einzelnen Düngungsstrategien bestehen. Zum anderen konnte keine erhöhte N-Ausnutzung und somit auch keine bessere N-Effizienz durch den Einsatz von Alzon gegenüber dem herkömmlichen Düngereinsatz festgestellt werden. Die beste N-Effizienz zeigte die KAS-Düngungsstrategie, in Abhängigkeit von den in Dedelow vorherrschenden Boden- und Witterungsbedingungen der drei Versuchsjahre.

Analysiert man die Ergebnisse der N_2O -Emission der unterschiedlichen Düngungsstrategien, stellt man fest, dass keine prägnanten Zusammenhänge zwischen den Düngerformen und der N_2O -Emission vorliegen. Durch den Vergleich der gewonnenen Ergebnisse der jährlichen N_2O -Flüsse mit anderen Versuchsergebnissen zeigt sich, dass an dem Standort Dedelow, aufgrund der vorliegenden Bedingungen, insgesamt nur geringe N_2O -Emissionen zu erwarten sind. Mit dem Einsatz von Alzon konnte eine Reduzierung der täglichen N_2O -Flüsse von 50% im Vergleich zur HS-Düngung beobachtet werden. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass unabhängig von der Düngungsstrategie der Düngebedarf an die Ertragserwartungen angepasst werden sollte, da Düngerreste und mineralischer Bodenstickstoff einen nicht zu vernachlässigen Anteil an den jährlichen N_2O -Emissionen ausmachen.

Es gibt zahlreiche Untersuchungen hinsichtlich hilfreicher Maßnahmen zur Minderung der N_2O -Freisetzung. Die aussichtsreichste Maßnahme ist der Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren bei mineralischen N-Düngern, da das Minderungspotenzial bei ungefähr 40% liegt und die hemmende Wirkung auch ein halbes Jahr nach der Ausbringung noch nachzuweisen ist (RUSER 2010).

Durch die Reduzierung der Aufwandmengen der N-Dünger ist nach Untersuchungen von PFAB et al. (2010) eine N_2O -Minderung von 20% möglich, die höchstwahrscheinlich die Obergrenze der möglichen N_2O -Reduzierung mithilfe einer reduzierten Düngermenge darstellt. Diese Maßnahme ist jedoch nicht pauschal in jedem Betrieb anzuwenden, sondern sollte immer in Verbindung mit dem an der Kultur orientierten Nmin-Sollwertsystem erfolgen.

Durch die Erhöhung der N-Effizienz, aufgrund einer bedarfsgerechten N-Düngung, werden positive N-Salden vermieden und Gehalte an mineralischem N im Boden sowie N₂O-Emissionen verringert (GUTSER et al. 2000, KAISER und RUSER 2000).

Eine weitere Reduktion der N₂O-Freisetzung ist evtl. durch den Einsatz von Precision Farming möglich. Nach einem Versuch von SEHY et al. (2003) konnte auf Niedrigertragsstandorten eine Minderung der N₂O-Emission um 10% festgestellt werden. Auf Hohertragsstandorten konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen Precision Farming und konventioneller Düngung ermittelt werden.

Mit einer Depotdüngung (Band- oder Punktapplikation) konnte keine Minderung der N₂O-Freisetzung erreicht werden. In Untersuchungen von DRURY et al. (2006) und ENGEL et al. (2010) fand man heraus, dass sich die Emissionen bei einer Depotdüngung aufgrund der Nitrifikationshemmer in der hohen Ammoniumkonzentration letztlich nur zeitlich verschiebt. Es wurde keine Emissionsminderung, dagegen jedoch sogar höhere Emissionen als auf breit-flächig gedüngten Versuchsflächen gemessen. Ureasehemmstoffe sind derzeit zusätzlich in der Diskussion. Die Datengrundlage ist aber im Moment noch zu gering um abgesicherte Aussagen machen zu können.

Das von Thünen-Institut berichtete in seinem nationalen Emissionsbericht für den Zeitraum von 1990 bis 2008 über einen Rückgang der Lachgasemission durch Ausbringung von Mineraldünger in Brandenburg von 2,2 auf 1,7Gg/a N₂O und in Deutschland von 42,5 auf 35,5Gg/a N₂O (vTI 2010). Diese Ergebnisse entstammen jedoch keinen realen Messungen, sondern werden mit einem Stufe-1-Verfahren nach IPCC (1996) berechnet. Dazu wird ein Standardwert (Emissionsfaktor) mit der entsprechenden Aktivität (Tierzahl, Anbaufläche, Düngermenge) multipliziert. Für diese Berechnungen wird derzeit jedoch nur die N-Düngermenge angepasst. Um wirklich Realwerte zu erhalten, sollte in der Gleichung nach der Art des Bodens, Klimafaktoren, Nutzung der Flächen und die N-Düngerform differenziert werden (AUGUSTIN 2010), wie sich anhand der bereits zahlreichen Untersuchungen herausstellt.

8 Literaturverzeichnis

- Augustin, J. (2010): Anteil der N₂O-Emissionen an den Dünger-N-Verlusten. Symposium. Klimagasbilanz im Winterrapsanbau
- Baumgärtel, G. (2010): Effizienz der mineralischen Stickstoffdüngung. KTBL-Schrift 483:26-30
- Bayerl, G. (2006): Geschichte der Landnutzung in der Region Barnim-Uckermark. Materialnummer 12. Materialien der interdisziplinären Arbeitsgruppe zukunftsorientierte Nutzung ländlicher Räume. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
- Benckiser, G., Syring, K.M. (1992): Denitrifikation in Agrarstandorten – Bedeutung, Quantifizierung und Modellierung. Journal of BioEngineering Vol.8 No.3:46-52
- Benker, M. (2012): Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz. Ausgabe 2012. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen
- Bundesministerium der Justiz (2006): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV). in Zusammenarbeit mit der juris GmbH. www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/d_v/gesamt.pdf (Zugriff 11.09.2012)
- Brenner, K. (1991): Stabilisierte Stickstoffdünger – ein Beitrag zur Vermeidung des Nitratproblems. Tagungsband 15./16. Oktober 1991. Aus: Sturm, H., Buchner, A., Zerulla, W. (1994): Gezielter düngen. integriert, wirtschaftlich, umweltgerecht. 3. Auflage. DLG-Verlags-GmbH Frankfurt am Main
- Clayton, H., McTaggart, I.P., Parker, J., Swan, L., Smith, K.A. (1997): Nitrous oxide emissions from fertilised grassland: A 2-year study of the effects of N fertiliser from an environmental conditions. Journal of Biology and Fertility of Soils 25: 252-260
- Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft (1998): Systematik der Böden und der bodenbildenden Substrate Deutschlands. Mitteilungen DBG 86: 1-180
- Dobermann, A. (2005): Nitrogen Use Efficiency – State of the Art. IFA International Workshop on Enhanced – Efficiency Fertilizers Frankfurt. <http://www.fertilizer.org/ifa/HomePage/LIBRARY/Publication-database.html/Nitrogen-Use-Efficiency-State-of-the-Art.html> (Zugriff 31.07.2012)
- Drury, C.F., Reynolds, W.D., Tan, C.S., Welacky, T.W., Calder, W., McLaughlin N.B. (2006): Emissions of nitrous oxide and carbon dioxide: influence of tillage and nitrogen placement depth. Journal of Soil Science Society of America 70: 570-581

- Engel, R., Liang, D.L., Wallander, R., Bembek, A. (2010): Influence of urea fertilizer placement on nitrous oxide production from a silt loam soil. *Journal of Environmental Quality* 39: 115-125
- Food and Agriculture Organisation of the united nations (2012): <http://faostat.fao.org/> (Zugriff 03.08.2012)
- Gutser, R., Linzmeier, W., Kilian, A. (2000): N₂O-Emission aus landwirtschaftlich genutzten Flächen in Abhängigkeit der N-Düngung und des N-Potentials der Böden. *VDLUFA-Schriftenreihe* 55:190-199
- Haunz, F.X., Maidl, F.X., Fischbeck, G. (1992): Effect of soil compaction on the dynamics of soil and fertilizer nitrogen under winter wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* Vol.155 No.2:129-134
- Heidecke, D., Zimmer, J. (2011): Umsetzung der Düngerverordnung – Nährstoffvergleich für das Land Brandenburg. *Jahresbericht Landwirtschaft und Gartenbau 2011*: 51-52: http://elf.brandenburg.de/sixcms/media.php/4055/LELF%20Jahresbericht%202011_web.pdf (Zugriff 21.09.2012)
- Hellebrand, H.J., Kern, J., Scholz, V. (2003): Long-term studies on greenhouse gas fluxes during the cultivation of energy crops on sandy soils. *Journal of Atmospheric Environment* 37: 1635-1644
- Hoffmann, CH., Anger, M., Kühbauch, W. (2001): N₂O-Freisetzung auf gemähten Dauergrünland in Abhängigkeit von Standort und N-Düngung. *Journal of Agronomy and Crop Science* 187:153-159
- International Fertilizer Industry Association (2002): *Fertilizer use by crop*. 5. Edition. IFA Rom
- Isermann, K. (1977): *Recent Developments in Fertilizer Technology on Nitrogen*, Federal Republic of Germany. Paper 15. Landwirtschaftliche Versuchsstation Limburgerhof
- Jungkunst, H.F., Freibauer, A., Neufeldt, H., Bareth, G. (2006): Nitrous oxide emission from agricultural land use in Germany – a synthesis of available annual field data. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169: 341-351
- Jurasinski, G., Koebsch, F., Hagemann, U. (2012): Flux rate calculation from dynamic closed chamber measurements. R package version 0.2-1. <http://cran.r-project.org/web/packages/flux/index.html>
- Kaiser, E.A., Kohrs, K., Kucke, M., Schnug, E. Heinemeyer, O., Munch, J.C. (1998): Nitrous oxide release from arable soil: Importance of N-fertilization, crops and temporal variation. *Journal of Soil Biology and Biochemistry* Vol.30 No.12:1553-1563
- Kaiser, E.A., Ruser, R. (2000): Nitrous oxide emissions from arable soils in Germany – An evaluation of six long-term field experiments. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163: 249-260

- Knittel, H., Zerulla, W. (1987): Einfluss der N-Düngung auf Ertragsentwicklung landwirtschaftlicher Kulturen und Veränderung des mineralischen N-Gehaltes im Boden bei achtjährigen Dauerversuchen. *Journal of Agronomy and Crop Science* Vol. 159 No.4:251-259
- Knittel, H., Oppitz, K., Lex, M., Mannheims, T., Pasda, G. (2008): Düngestrategien beim Einsatz von stabilisierten Stickstoffdüngern zu Winterweizen. 2. Auswirkungen auf Ertragskomponenten und Qualität. *Pflanzenbauwissenschaften*. Vol.12 No.1:1-7
- Kübler, E. (1994): Weizenanbau. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co. Hohenheim
- Larcher, W. (1994): Ökophysiologie der Pflanzen. 5. Auflage. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co. Hohenheim
- Lehn-Reiser, M., Ottow, J.C.G., Benckiser, G. (1990): Microbial nitrate decomposition in unsaturated area of various soils in an agricultural used drinking watershed, 102. VDLUFA-Kongreß Berlin
- Leidel, S. (2000): N-Salden und Emissionen der klimarelevanten Spurengase Lachgas und Methan unter den Standortbedingungen Nordostdeutschlands als Indikatoren der umweltgerechten Landbewirtschaftung. Dissertation. Universität Rostock
- Linzmeier, W., Gutser, R., Schmidhalter, U. (2001): Nitrous oxide emission from soil and from a nitrogen-15-labelled fertilizer with the new nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP). *Journal of Biology and Fertility of Soils* Vol.34 No.2:103-108
- LMS (2010): Fachinformation_DüV1001. www.lms.beratung.de (Zugriff 14.08.2012)
- Lubs, E. (1965): Grundlagen der Bodenkunde und Düngerlehre für Gärtner. 3. Auflage. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin
- Mott, N. (1973): Schwäbischer Bauer Nr. 15. Aus: Sturm, H., Buchner, A., Zerulla, W. (1994): Gezielter düngen. integriert, wirtschaftlich, umweltgerecht. 3. Auflage. DLG-Verlags-GmbH Frankfurt am Main
- Munzert, M. (1983): VDLUFA-Schriftenreihe 11:231-238
- Munzert, M. (1987): Bessere Stickstoffverwertung mit DCD-haltigen Mineraldüngern. *Der Kartoffelbau* 38:56-58
- Oehmichen, J. (1983): Pflanzenproduktion. 1. Band. Verlag Paul Parey Berlin und Hamburg
- Ottow, J.C.G., Benckiser, G., Kapp, M., Schwarz, G. (1990): Denitrifikation – Die unbekannteste Größe. *DLG-Mitteilungen* 105
- Ottow, J.C.G., Benckiser, G. (1994): Effect of ecological conditions on total Denitrification and N₂O-release from soils. *Nova Acta Leopoldina* 288:251-262

- Pfab, H., Palmer, I., Buegger, F., Fiedler, S., Müller, T., Ruser, R. (2010): N₂O fluxes from a Haplic Luvisol under intensive production of lettuce and cauliflower as affected by different N fertilization strategies. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* DOI:10.1002/jpln.201000123
- Quade, J. (1993): *Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau*. Hydro Agri Dülmen GmbH. 12. Auflage. Landwirtschafts-Verlag Münster
- Rodgers, G.A., Penny, A., Hewitt, M.V. (1986): A comparison of the effects of prilled urea, used alone or with a nitrifikation or urease inhibitor, with those of 'Nitro-Chalk'. *Journal of Agricultural Science* Vol.106 No.3:515-526
- Ruser, R., Flessa, H., Schilling, R., Beese, F. u. Munch, J.C. (2001): Effects of crop-specific field management and N fertilization on N₂O emissions from a fine-loamy soil. *Journal of Nutrient Cycling in Agroecosystems* 59:177-191
- Ruser, R. (2010): Möglichkeiten zur Minderung der Lachgasfreisetzung aus landwirtschaftlich genutzten Böden bei mineralischer Stickstoffdüngung. *KTBL-Schrift* 483:109-120
- Scheller, B., Kuntze, H. u. Bartels, R. (1983): *VDLUFA-Schriftenreihe* 11:87-96
- Schilling, G. (2000): *Pflanzenernährung und Düngung*. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co. Hohenheim
- Schubert, S. (2006): *Pflanzenernährung. Grundlagen Bachelor*. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co. Hohenheim
- Schultz, H. (1986): *top Agrar*. Heft 12:58-59. Aus: Sturm, H., Buchner, A., Zerulla, W. (1994): *Gezielter düngen. integriert, wirtschaftlich, umweltgerecht*. 3. Auflage. DLG-Verlags-GmbH Frankfurt am Main
- Schultz, H. (1987): *top Agrar*. Heft 2:78-79. Aus: Sturm, H., Buchner, A., Zerulla, W. (1994): *Gezielter düngen. integriert, wirtschaftlich, umweltgerecht*. 3. Auflage. DLG-Verlags-GmbH Frankfurt am Main
- Sehy, U., Ruser, R., Munch, J.C. (2003): Nitrous oxide fluxes from maize fields: relationship to yield, site-specific fertilization, and soil conditions. *Journal of Agriculture, Ecosystems and Environment* 99:97-111
- Stehfest, E., Bouwman, A. (2006): N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Journal of Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74:207-228
- Sturm, H., Buchner, A., Zerulla, W. (1994): *Gezielter düngen. integriert, wirtschaftlich, umweltgerecht*. 3. Auflage. DLG-Verlags-GmbH Frankfurt am Main
- Timmermann, F., Söchtig, H. (1983): *VDLUFA-Schriftenreihe* 11:258-270

- Velthof, G.L., Kuikman, P.J., Oenema, O. (2002): Nitrous oxide emission from soils amended with crop residues. *Journal of Nutrient Cycling in Agroecosystems* Vol.62 No.3:249-261
- Verch, G., Kächele, H., Höltl, K. et al. (2009): Comparing the profitability of tillage methods in Northeast Germany – A field trial from 2002 to 2005. *Soil and Tillage Research* 104:16-21
- VTI (2010): Emissions from German Agriculture – National Emission Inventory Report (NIR) 2010 for 2008 – Methods and data. Bundesforschungsinstitut für ländliche Räume. *Journal of the Johann Heinrich von Thünen-Institut Landbauforschung vTI Agriculture and Forestry Research. Special Issue* 334
- Wagner-Riddle, C. et al. (2007): Intensive measurement of nitrous oxide emissions from a corn-soybean-wheat rotation under two contrasting management systems over 5 years. *Journal of Global Change Biology* Vol.13 No.8:1722-1736
- Wintzer, D. u. Autorenkollektiv (1993): Technikfolgeabschätzung zum Thema Nachwachsende Rohstoffe. Schriftenreihe des BMLF, Reihe A. Angewandte Wissenschaft. Landwirtschafts-Verlag Münster
- ZALF (2012): Standortbedingungen Dedelow.
<http://www.zalf.de/de/forschung/services/fos/bereiche/Seiten/dedelow.aspx>
(Zugriff 03.08.2012)
- Zerulla, W., Knittel, H. (1991): Yield and quality of root crops after application of dicyandiamide-containing fertilizers. 1. Influence on potatoes. *Agribiological Research* 44(4): 278-281. 2. Influence on sugarbeet. *Agribiological Research* 44(4): 282-288
- Zerulla, W. (1989): VDLUFA-Schriftenreihe 30. Kongreßband: 651-656
- Zerulla, W., Hüther, O. (1992): Ertragswirksamkeit organischer Düngung im Vergleich zur Mineraldüngung, Interner Bericht Nr. 3459, Landwirtschaftliche Versuchsstation Limburgerhof. Aus: Sturm, H., Buchner, A., Zerulla, W. (1994): Gezielter düngen. integriert, wirtschaftlich, umweltgerecht. 3. Auflage. DLG-Verlags-GmbH Frankfurt am Main

9 Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit selbstständig von mir verfasst wurde und keine anderen als die gekennzeichneten Quellen verwendet wurden.

Die Arbeit wurde an keiner anderen Stelle als Prüfungsleistung vorgelegt.

Kreckow, den 14.01.2013

10 Anhang

10.1 Vollständige Aufschlüsselung der N-Bilanz für alle drei Jahre

Tabelle 7: Vollständige Auflistung der N-Bilanz von 2010

2010	Kontrolle	Harnstoff	Alzon	KAS
Ertrag	55,6 dt/ha	91,2 dt / ha	94,2 dt / ha	95,1 dt / ha
N _{min}	+ 38 kg N/ha	+ 38 kg N/ha	+ 38 kg N/ha	+ 38 kg N/ha
Zufuhr	keine Düngung	413 kg Harnstoff /ha mit 190 kg N /ha 1. Gabe: 60 kg N/ha 2. Gabe: 70 kg N/ha 3. Gabe: 60 kg N/ha	413 kg Alzon /ha mit 190 kg N /ha 1. Gabe: 100 kg N/ha 2. Gabe: 90 kg N/ha	704 kg KAS /ha mit 190 kg N /ha 1. Gabe: 60 kg N/ha 2. Gabe: 70 kg N/ha 3. Gabe: 60 kg N/ha
	WW-Stroh 0,5 kg N/dt FM 27,8 kg N/ha	WW-Stroh 0,5 kg N/dt FM 45,6 kg N /ha	WW-Stroh 0,5 kg N/dt FM 47,1 kg N /ha	WW-Stroh 0,5 kg N/dt FM 47,6 kg N /ha
Abfuhr	Korn (14% RP) 2,11 kg N/dt FM 117,3 kg N/ha	Korn (14% RP) 2,11 kg N/dt FM 192,0 kg N/ha	Korn (14% RP) 2,11 kg N/dt FM 198,8 kg N/ha	Korn (14% RP) 2,11 kg N/dt FM 200,7 kg N/ha
	N ₂ O-N-Entgasung 0,05 kg N/ha	N ₂ O-N-Entgasung 0,30 kg N/ha	N ₂ O-N-Entgasung 0,27 kg N/ha	N ₂ O-N-Entgasung 0,54 kg N/ha
Bilanz	+ 38 Nmin + 0 kg N /ha + 27,8 kg N/ha - 117,3 kg N /ha - 0,05 kg N/ha	+ 38 Nmin + 190 kg N /ha + 45,6 kg N/ha - 192,0 kg N /ha - 0,3 kg N/ha	+ 38 Nmin + 190 kg N /ha + 47,1 kg N/ha - 198,8 kg N /ha - 0,27 kg N /ha	+ 38 Nmin + 190 kg N /ha + 47,6 kg N/ha - 200,7 kg N /ha - 0,54 kg N /ha
Saldo 2010	= - 51,55 kg N /ha	= 81,3 kg N /ha	= 76,03 kg N /ha	= 74,36 kg N /ha

Tabelle 8: Vollständige Auflistung der N-Bilanz von 2011

2011	Kontrolle	Harnstoff	Alzon	KAS
Ertrag	69,9 dt/ha	101,8 dt / ha	98,5 dt / ha	104,0 dt / ha
N _{min}	+ 12,8	+ 13,9	+ 12	+ 15
Zufuhr	keine Düngung	413 kg Harnstoff /ha mit 190 kg N /ha 1. Gabe: 60 kg N/ha 2. Gabe: 70 kg N/ha 3. Gabe: 60 kg N/ha	413 kg Alzon /ha mit 190 kg N /ha 1. Gabe: 100 kg N/ha 2. Gabe: 90 kg N/ha	704 kg KAS /ha mit 190 kg N /ha 1. Gabe: 60 kg N/ha 2. Gabe: 70 kg N/ha 3. Gabe: 60 kg N/ha
	WW-Stroh 0,5 kg N/dt FM 34,95 kg N/ha	WW-Stroh 0,5 kg N/dt FM 50,9 kg N /ha	WW-Stroh 0,5 kg N/dt FM 49,25 kg N /ha	WW-Stroh 0,5 kg N/dt FM 52 kg N /ha
Abfuhr	Korn (14% RP) 2,11 kg N/dt FM 147,49 kg N/ha	Korn (14% RP) 2,11 kg N/dt FM 214,80 kg N/ha	Korn (14% RP) 2,11 kg N/dt FM 207,8 kg N/ha	Korn (14% RP) 2,11 kg N/dt FM 219,44 kg N/ha
	N ₂ O-N-Entgasung 0,04kg N/ha	N ₂ O-N-Entgasung 0,15 kg N/ha	N ₂ O-N-Entgasung 0,34 kg N/ha	N ₂ O-N-Entgasung 0,10 kg N/ha
Bilanz	+ 12,8 Nmin + 0 kg N /ha + 34,95 kg N/ha - 147,49 kg N /ha - 0,04 kg N/ha	+ 13,9 Nmin + 190 kg N /ha + 50,9 kg N/ha - 214,8 kg N /ha - 0,15 kg N/ha	+ 12 Nmin + 190 kg N /ha + 49,25 kg N/ha - 207,8 kg N /ha - 0,34 kg N /ha	+ 15 Nmin + 190 kg N /ha + 52 kg N/ha - 219,44 kg N /ha - 0,1 kg N /ha
Saldo 2011	= - 99,78 kg N /ha	= 39,85 kg N /ha	= 43,11 kg N /ha	= 37,46 kg N /ha

Tabelle 9: Vollständige Auflistung der N-Bilanz von 2012

2012	Kontrolle	Harnstoff	Alzon	KAS
Ertrag	43,83 dt/ha	83,6 dt / ha	81,23 dt / ha	80,23 dt / ha
N _{min}	+ 35,9 kg N/ha	+ 48 kg N/ha	+ 61,7 kg N/ha	+ 46,6 kg N/ha
Zufuhr	keine Düngung	413 kg Harnstoff /ha mit 190 kg N /ha 1. Gabe: 60 kg N/ha 2. Gabe: 70 kg N/ha 3. Gabe: 60 kg N/ha	413 kg Alzon /ha mit 190 kg N /ha 1. Gabe: 100 kg N/ha 2. Gabe: 90 kg N/ha	704 kg KAS /ha mit 190 kg N /ha 1. Gabe: 60 kg N/ha 2. Gabe: 70 kg N/ha 3. Gabe: 60 kg N/ha
	WW-Stroh 0,5 kg N/dt FM 21,92 kg N/ha	WW-Stroh 0,5 kg N/dt FM 41,8 kg N /ha	WW-Stroh 0,5 kg N/dt FM 40,62 kg N /ha	WW-Stroh 0,5 kg N/dt FM 40,12 kg N /ha
Abfuhr	Korn (14% RP) 2,11 kg N/dt FM 92,48 kg N/ha	Korn (14% RP) 2,11 kg N/dt FM 176,4 kg N/ha	Korn (14% RP) 2,11 kg N/dt FM 171,4 kg N/ha	Korn (14% RP) 2,11 kg N/dt FM 169,29 kg N/ha
	N2O-N-Entgasung 3,24 kg N/ha	N2O-N-Entgasung 3,53 kg N/ha	N2O-N-Entgasung 1,47 kg N/ha	N2O-N-Entgasung 2,12 kg N/ha
Bilanz	+ 35,9 Nmin + 0 kg N /ha + 21,92 kg N/ha - 92,48 kg N /ha - 3,24 kg N/ha	+ 48 Nmin + 190 kg N /ha + 41,8 kg N/ha - 176,4 kg N /ha - 3,53 kg N/ha	+ 61,7 Nmin + 190 kg N /ha + 40,62 kg N/ha - 171,4 kg N /ha - 1,47 kg N /ha	+ 46,6 Nmin + 190 kg N /ha + 40,12 kg N/ha - 169,29 kg N /ha - 2,12 kg N /ha
Saldo 2012	= - 37,9 kg N /ha	= 99,87 kg N /ha	= 119,45 kg N /ha	= 105,31 kg N /ha

Tabelle 10: N-Salden der Jahre 2010 - 2012 und vom langjährigen Mittel '03-'12

Saldo	Kontrolle	HS	Alzon	KAS
2010	-91	54	53	53
2011	-69	52	60	47
2012	-29	138	138	127
Mittel '03 - '12	-96	80	80	77

10.2 Auswertung von Ertrag und N-Entzug der langjährigen Versuchsreihe

```
Proc mixed data=e.Versuch1;
class Jahr Var WDH;
model e = Var Jahr Var*Jahr ;
random WDH*Jahr;
lsmeans Var*Jahr Var / alpha=0.05 pdiff cl;
run;
```

Ertrag

Class Level Information

Class	Levels	Values
Jahr	9	2003 2004 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012
Var	4	1 2 3 4
WDH	4	1 2 3 4

Number of Observations

Number of Observations Read	144
Number of Observations Used	144
Number of Observations Not Used	0

Covariance Parameter Estimates

Cov Parm	Estimate
Jahr*WDH	8.1272
Residual	32.9814

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
Var	3	81	104.20	<.0001
Jahr	8	27	67.81	<.0001
Jahr*Var	24	81	7.75	<.0001

Least Squares Means

Effect	Jahr	Var	Standard Estimate	Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
Jahr*Var	2003	1	54.6600	3.2058	81	17.05	<.0001	0.05	48.2815	61.0385
Jahr*Var	2003	2	62.3925	3.2058	81	19.46	<.0001	0.05	56.0140	68.7710
Jahr*Var	2003	3	62.2450	3.2058	81	19.42	<.0001	0.05	55.8665	68.6235
Jahr*Var	2003	4	65.5600	3.2058	81	20.45	<.0001	0.05	59.1815	71.9385
Jahr*Var	2004	1	106.88	3.2058	81	33.34	<.0001	0.05	100.50	113.26
Jahr*Var	2004	2	112.98	3.2058	81	35.24	<.0001	0.05	106.60	119.35
Jahr*Var	2004	3	116.09	3.2058	81	36.21	<.0001	0.05	109.71	122.47
Jahr*Var	2004	4	107.94	3.2058	81	33.67	<.0001	0.05	101.57	114.32
Jahr*Var	2006	1	55.9250	3.2058	81	17.44	<.0001	0.05	49.5465	62.3035
Jahr*Var	2006	2	86.5000	3.2058	81	26.98	<.0001	0.05	80.1215	92.8785
Effect	Jahr	Var	Standard Estimate	Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
Jahr*Var	2006	3	87.8500	3.2058	81	27.40	<.0001	0.05	81.4715	94.2285
Jahr*Var	2006	4	90.6000	3.2058	81	28.26	<.0001	0.05	84.2215	96.9785
Jahr*Var	2007	1	77.3750	3.2058	81	24.14	<.0001	0.05	70.9965	83.7535
Jahr*Var	2007	2	75.8500	3.2058	81	23.66	<.0001	0.05	69.4715	82.2285
Jahr*Var	2007	3	80.8750	3.2058	81	25.23	<.0001	0.05	74.4965	87.2535
Jahr*Var	2007	4	77.7000	3.2058	81	24.24	<.0001	0.05	71.3215	84.0785
Jahr*Var	2008	1	82.5750	3.2058	81	25.76	<.0001	0.05	76.1965	88.9535
Jahr*Var	2008	2	88.0500	3.2058	81	27.47	<.0001	0.05	81.6715	94.4285
Jahr*Var	2008	3	90.6750	3.2058	81	28.28	<.0001	0.05	84.2965	97.0535
Jahr*Var	2008	4	90.7000	3.2058	81	28.29	<.0001	0.05	84.3215	97.0785
Jahr*Var	2009	1	62.2345	3.2058	81	19.41	<.0001	0.05	55.8559	68.6130
Jahr*Var	2009	2	97.7529	3.2058	81	30.49	<.0001	0.05	91.3744	104.13
Jahr*Var	2009	3	87.4975	3.2058	81	27.29	<.0001	0.05	81.1190	93.8761
Jahr*Var	2009	4	100.49	3.2058	81	31.35	<.0001	0.05	94.1126	106.87
Jahr*Var	2010	1	78.1696	3.2058	81	24.38	<.0001	0.05	71.7911	84.5481
Jahr*Var	2010	2	105.74	3.2058	81	32.99	<.0001	0.05	99.3663	112.12
Jahr*Var	2010	3	106.51	3.2058	81	33.22	<.0001	0.05	100.13	112.89
Jahr*Var	2010	4	106.85	3.2058	81	33.33	<.0001	0.05	100.47	113.22
Jahr*Var	2011	1	48.5787	3.2058	81	15.15	<.0001	0.05	42.2001	54.9572
Jahr*Var	2011	2	92.2543	3.2058	81	28.78	<.0001	0.05	85.8758	98.6329
Jahr*Var	2011	3	87.0118	3.2058	81	27.14	<.0001	0.05	80.6333	93.3904
Jahr*Var	2011	4	94.8614	3.2058	81	29.59	<.0001	0.05	88.4829	101.24
Jahr*Var	2012	1	46.0250	3.2058	81	14.36	<.0001	0.05	39.6465	52.4035
Jahr*Var	2012	2	59.5250	3.2058	81	18.57	<.0001	0.05	53.1465	65.9035
Jahr*Var	2012	3	60.3250	3.2058	81	18.82	<.0001	0.05	53.9465	66.7035
Jahr*Var	2012	4	66.6000	3.2058	81	20.77	<.0001	0.05	60.2215	72.9785
Var		1	68.0470	1.0686	81	63.68	<.0001	0.05	65.9208	70.1732
Var		2	86.7827	1.0686	81	81.21	<.0001	0.05	84.6566	88.9089
Var		3	86.5639	1.0686	81	81.01	<.0001	0.05	84.4377	88.6901
Var		4	89.0337	1.0686	81	83.32	<.0001	0.05	86.9075	91.1599

„fffffffffffffffffffff...fffff...fffff...fffff...fffff...fffff...fffff...fffff...
 ffffff...fffff...fffff†
 , 2003 ,2004 ,2006 ,2007 ,2008 ,2009 ,2010 ,2011 ,2012 , MW ,

‡fffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff
 f‰
 ,1 , 54.7,106.9, 55.9, 77.4, 82.6, 62.2, 78.2, 48.6, 46.0, 68.0,

‡fffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff
 f‰
 ,2 , 62.4,113.0, 86.5, 75.9, 88.1, 97.8,105.7, 92.3, 59.5, 86.8,

‡fffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff
 f‰
 ,3 , 62.2,116.1, 87.9, 80.9, 90.7, 87.5,106.5, 87.0, 60.3, 86.6,

‡fffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff
 f‰
 ,4 , 65.6,107.9, 90.6, 77.7, 90.7,100.5,106.8, 94.9, 66.6, 89.0,

‡fffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff
 f‰
 ,GD (5%) , 8.1, 8.1, 8.1, 8.1, 8.1, 8.1, 8.1, 8.1, 8.1, 2.7,

Šfffffffffffffffffffff<fffff<fffff<fffff<fffff<fffff<fffff<fffff<fffff<fffff<fffff<fffff<fffff<fffff<fffff<fffff
 ffCE

mittlere GD der Mittelwertsvergleiche Variante

N	Mean	Std Dev	Minimum	Maximum
6	2.6932899	0	2.6932899	2.6932899

mittlere GD der Mittelwertsvergleiche 'Variante*Jahr'

N	Mean	Std Dev	Minimum	Maximum
630	8.9399759	0.2635620	8.0798696	9.0206109

N-Entzug

Class Level Information

Class	Levels	Values
Jahr	9	2003 2004 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012
Var	4	1 2 3 4
WDH	4	1 2 3 4

Number of Observations

Number of Observations Read	144
Number of Observations Used	144
Number of Observations Not Used	0

Covariance Parameter Estimates

Cov Parm	Estimate
Jahr*WDH	33.4062
Residual	118.78

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
Var	3	81	396.23	<.0001
Jahr	8	27	58.26	<.0001
Jahr*Var	24	81	10.46	<.0001

Least Squares Means

Effect	Jahr	Var	Standard Estimate	Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
Jahr*Var	2003	1	100.91	6.1682	81	16.36	<.0001	0.05	88.6358	113.18
Jahr*Var	2003	2	135.77	6.1682	81	22.01	<.0001	0.05	123.49	148.04
Jahr*Var	2003	3	128.87	6.1682	81	20.89	<.0001	0.05	116.60	141.14
Jahr*Var	2003	4	143.71	6.1682	81	23.30	<.0001	0.05	131.43	155.98
Jahr*Var	2004	1	117.72	6.1682	81	19.08	<.0001	0.05	105.44	129.99
Jahr*Var	2004	2	183.05	6.1682	81	29.68	<.0001	0.05	170.78	195.32
Jahr*Var	2004	3	183.40	6.1682	81	29.73	<.0001	0.05	171.12	195.67

Jahr*Var	2004	4	199.01	6.1682	81	32.26	<.0001	0.05	186.73	211.28
Jahr*Var	2006	1	84.1112	6.1682	81	13.64	<.0001	0.05	71.8383	96.3841
Jahr*Var	2006	2	195.14	6.1682	81	31.64	<.0001	0.05	182.87	207.42
Jahr*Var	2006	3	205.22	6.1682	81	33.27	<.0001	0.05	192.94	217.49
Jahr*Var	2006	4	214.54	6.1682	81	34.78	<.0001	0.05	202.27	226.81
Jahr*Var	2007	1	169.61	6.1682	81	27.50	<.0001	0.05	157.33	181.88
Jahr*Var	2007	2	177.19	6.1682	81	28.73	<.0001	0.05	164.91	189.46
Jahr*Var	2007	3	188.92	6.1682	81	30.63	<.0001	0.05	176.65	201.20

Effect	Jahr	Var	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
Jahr*Var	2007	4	180.26	6.1682	81	29.22	<.0001	0.05	167.99	192.54
Jahr*Var	2008	1	137.40	6.1682	81	22.28	<.0001	0.05	125.13	149.68
Jahr*Var	2008	2	201.46	6.1682	81	32.66	<.0001	0.05	189.19	213.73
Jahr*Var	2008	3	208.92	6.1682	81	33.87	<.0001	0.05	196.64	221.19
Jahr*Var	2008	4	220.58	6.1682	81	35.76	<.0001	0.05	208.31	232.86
Jahr*Var	2009	1	109.53	6.1682	81	17.76	<.0001	0.05	97.2598	121.81
Jahr*Var	2009	2	195.51	6.1682	81	31.70	<.0001	0.05	183.23	207.78
Jahr*Var	2009	3	177.80	6.1682	81	28.82	<.0001	0.05	165.52	190.07
Jahr*Var	2009	4	218.67	6.1682	81	35.45	<.0001	0.05	206.40	230.94
Jahr*Var	2010	1	178.98	6.1682	81	29.02	<.0001	0.05	166.70	191.25
Jahr*Var	2010	2	239.24	6.1682	81	38.79	<.0001	0.05	226.96	251.51
Jahr*Var	2010	3	240.96	6.1682	81	39.07	<.0001	0.05	228.69	253.24
Jahr*Var	2010	4	255.23	6.1682	81	41.38	<.0001	0.05	242.96	267.51
Jahr*Var	2011	1	74.7076	6.1682	81	12.11	<.0001	0.05	62.4347	86.9804
Jahr*Var	2011	2	180.40	6.1682	81	29.25	<.0001	0.05	168.13	192.67
Jahr*Var	2011	3	171.58	6.1682	81	27.82	<.0001	0.05	159.30	183.85
Jahr*Var	2011	4	190.82	6.1682	81	30.94	<.0001	0.05	178.55	203.09
Jahr*Var	2012	1	86.4860	6.1682	81	14.02	<.0001	0.05	74.2131	98.7589
Jahr*Var	2012	2	139.69	6.1682	81	22.65	<.0001	0.05	127.42	151.97
Jahr*Var	2012	3	144.91	6.1682	81	23.49	<.0001	0.05	132.64	157.19
Jahr*Var	2012	4	168.23	6.1682	81	27.27	<.0001	0.05	155.96	180.50
Var		1	117.72	2.0561	81	57.25	<.0001	0.05	113.63	121.81
Var		2	183.05	2.0561	81	89.03	<.0001	0.05	178.96	187.14
Var		3	183.40	2.0561	81	89.20	<.0001	0.05	179.31	187.49
Var		4	199.01	2.0561	81	96.79	<.0001	0.05	194.91	203.10

„ffffffffffffffffffff...fffff...fffff...fffff...fffff...fffff...fffff...fffff...
 ffffff...fffff...fffff†
 , 2003,2004,2006,2007,2008,2009,2010,2011,2012, MW ,

‡ffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff
 f‰
 ,1 ,100.9,117.7, 84.1,169.6,137.4,109.5,179.0, 74.7, 86.5,117.7,

‡ffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff^fffff
 f‰
 ,2 ,135.8,183.0,195.1,177.2,201.5,195.5,239.2,180.4,139.7,183.1,

10.3 Auswertung von Ertrag und N-Entzug des dreijährigen Versuchs

```
Proc mixed data=e.Versuch2 sigiter;
class Jahr F1;
model e= F1 Jahr ;
parms (1) / eqcons=1 noiter;
weight w; repeated ;
lsmeans F1 / alpha=0.05 pdiff cl;
run;
```

Ertrag

Class	Levels	Values
Jahr	3	2010 2011 2012
F1	4	1 2 3 4

Number of Observations

Number of Observations Read	12
Number of Observations Used	12

Covariance Parameter Estimates

Cov Parm	Estimate
----------	----------

Residual	1.0000
----------	--------

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
F1	3	6	158.23	<.0001
Jahr	2	6	87.82	<.0001

Least Squares Means

Effect	F1	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
F1	1	58.1018	1.4643	6	39.68	<.0001	0.05	54.5188	61.6848
F1	2	92.1028	1.4643	6	62.90	<.0001	0.05	88.5197	95.6858
F1	3	89.6263	1.4643	6	61.21	<.0001	0.05	86.0433	93.2093
F1	4	93.2507	1.4643	6	63.68	<.0001	0.05	89.6677	96.8338

GD (5%) 4.6346
 „ffffffffffffffffffff...fffff...fffff...fffff...fffff†
 , 2010, 2011, 2012, MW ,
 ‡ffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff%
 ,1 , 55.6, 69.9, 43.8, 58.1,
 ‡ffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff%
 ,2 , 91.2, 101.8, 83.6, 92.1,
 ‡ffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff%
 ,3 , 94.2, 98.5, 81.2, 89.6,
 ‡ffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff%
 ,4 , 95.1, 104.0, 80.2, 93.3,
 ‡ffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff%
 ,GD (5%) , 13.1, 5.0, 9.7, 4.6,
 \$ffffffffffffffffffff<fffff<fffff<fffff<fffffœ

N-Entzug

Class	Levels	Values
Jahr	3	2010 2011 2012
F1	4	1 2 3 4

Number of Observations

Number of Observations Read	12
Number of Observations Used	12
Number of Observations Not Used	0

Covariance Parameter Estimates

Cov Parm	Estimate
Residual	1.0000

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
F1	3	6	136.34	<.0001
Jahr	2	6	31.50	0.0007

Least Squares Means

Effect	F1	Standard		DF	t Value	Pr > t	Alpha	Lower	Upper
		Estimate	Error						
F1	1	102.81	4.1142	6	24.99	<.0001	0.05	92.7406	112.87
F1	2	194.41	4.1142	6	47.25	<.0001	0.05	184.34	204.48
F1	3	182.39	4.1142	6	44.33	<.0001	0.05	172.33	192.46
F1	4	200.68	4.1142	6	48.78	<.0001	0.05	190.61	210.75
GD (5%)		13.4789							

```

„ffffffffffffffffffff...fffff...fffff...fffff...fffff†
,
,2010 ,2011 ,2012 , MW ,
‡ffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff%oo
,1
,127.4,108.7, 67.9,102.8,
‡ffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff%oo
,2
,206.4,199.5,172.5,194.4,
‡ffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff%oo
,3
,213.1,182.8,161.3,182.4,
‡ffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff%oo
,4
,227.2,205.2,169.0,200.7,
‡ffffffffffffffffffff^fffff^fffff^fffff^fffff%oo
,GD (5%)
, 30.4, 14.9, 30.8, 13.5,
Šffffffffffffffffffff<fffff<fffff<fffff<fffffœ
    
```