

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Pflanzenernährung

Verwertungseffizienz und gasförmige N-Verluste von
3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP)-stabilisiertem Ammoniumdünger

Werner Linzmeier

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. G. Wenzel

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. U. Schmidhalter
2. Univ.-Prof. Dr. J. Schnyder

Die Dissertation wurde am 29.07.2010 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 16.09.2010 angenommen.

Für
Nadine, Julius und Jakob

und
für meine Eltern

Danksagung

„Was lange währt, wir endlich gut!“ Nun ist es vollbracht und die Freude steht über den bedrückenden Phasen der langwierigen Anfertigung dieser Arbeit. Ein herzliches Dankeschön gilt all denen, die zum Gelingen beitrugen.

Besonders möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. U. Schmidhalter für die Möglichkeit zur Promotion danken und vor allem für seine Geduld bis zur Fertigstellung der Arbeit.

An Herrn Prof. Dr. J. Schnyder geht mein Dank für die Übernahme des Koreferats sowie an Herrn Prof. Dr. G. Wenzel für den Prüfungsvorsitz.

Ganz besonders danke ich Herrn Dr. R. Gutser für die Betreuung des Projektes und die Unterstützung mit seinen langjährigen Erfahrungen. Dabei habe ich vor allem seinen Blick für das Wesentliche geschätzt.

Doch bevor die Ergebnisse zu Papier gebracht wurden, waren umfangreiche Feldversuche mit zahllosen Proben und Laboranalysen zu bewältigen. Nur mit Hilfe der fleißigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Dürnast und am Lehrstuhl für Pflanzenernährung war das umfangreiche Programm zu bewältigen. Ohne einzelne hervorzuheben hierfür vielen Dank an alle! Ich denke nur an die nützlichen Ratschläge für eine praktische Versuchsdurchführung und die interessanten Bastelstunden in der Werkstatt. Vor allem die reibungslose und zuverlässige Abwicklung der Laboranalysen am Lehrstuhl hat mir eine große Last von den Schultern genommen.

Der Dank gilt auch der Firma BASF und dem BMBF, die das Forschungsprojekt in Auftrag gegeben haben und in dessen Rahmen eine Promotion möglich wurde.

Ein Dank von ganzem Herzen gilt meiner lieben Frau Nadine, die stets das richtige Maß an Druck und Nachsicht an den Tag gebracht hat und mich dadurch motiviert hat, die Arbeit erfolgreich bis zum Ende zu bringen.

Auszüge und Teilergebnisse dieser Dissertation wurden bereits veröffentlicht:

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). *Biol Fertil Soils*, 34, 103-108.

Linzmeier W., Gutser R., Schmidhalter U. (2001) The new nitrification inhibitor DMPP (ENTEC®) allows increased N-efficiency with simplified fertilizing strategies. 14th Int. Plant Nutrition Colloquium, Hannover. In: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, *Developments in Plant and Soil Sciences*, Vol. 92, 760 – 761.

Linzmeier W., Schmidhalter U., Gutser R. (1999) Wirkung von DMPP auf Nitrifikation und N-Verluste (Nitrat, NH₃, N₂O) von Düngerstickstoff im Vergleich zu DCD. *VDLUFA-Schriftenreihe* 52, Kongressband 1999: 485 - 488.

Gutser R., Linzmeier W., Kilian A. (2001) N₂O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Flächen in Abhängigkeit der N-Düngung und des N-Potentials der Böden. *VDLUFA-Schriftenreihe* 55, Kongressband 2000: 190 – 199.

Wissemeier A.H., Linzmeier W., Gutser R., Weigelt W., Schmidhalter U. (2001) The new nitrification inhibitor DMPP (ENTEC®) – Comparisons with DCD in model studies and field applications. 14th Int. Plant Nutrition Colloquium, Hannover. In: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, *Developments in Plant and Soil Sciences*, Vol. 92, 702 – 703.

1 Einleitung	1
1.1 Mineralische Stickstoffdünger mit Nitrifikationsinhibitoren	2
1.2 Zielsetzung	3
2 Ertrag und Produktqualität von Winterweizen und Silomais in Freilandversuchen mit dem neuen Nitrifikationsinhibitor 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP) in spezifischen Stickstoffdüngungsstrategien.....	5
2.1 Zusammenfassung	5
2.2 Einleitung	6
2.3 Material und Methoden.....	7
2.3.1 Standorte.....	7
2.3.2 Dünger	8
2.3.3 Versuchsaufbau	9
2.3.4 Analysen	11
2.3.5 Bestimmung der Winterweizen-Ertragskomponenten	11
2.3.6 Energieertrag von Silomais	12
2.3.7 Statistische Auswertung	12
2.4 Witterung	13
2.5 Ergebnisse	14
2.5.1 Erträge Winterweizen	14
2.5.1.1 Vergleich der Wirkung von DCD und DMPP	17
2.5.1.2 Einfluss der Witterung	19
2.5.2 Qualität Winterweizen	20
2.5.2.1 Rohprotein.....	20
2.5.2.2 Ertragsaufbau von Winterweizen.....	25
2.5.2.2.1 Bestandesdichte – ährentragende Halme je m ²	25

2.5.2.2.2 Kornzahl pro Ähre.....	26
2.5.2.2.3 Tausendkorngewicht.....	27
2.5.2.3 Korn/Stroh Verhältnis.....	28
2.5.2.4 Siebsortierung.....	29
2.5.3 Energieerträge Silomais	30
2.6 Diskussion	32
3 Effizienz der Stickstoffverwertung von Düngungsstrategien zu Winterweizen in Freilandversuchen mit dem neuen Nitrifikationsinhibitor 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP)	35
3.1 Zusammenfassung.....	35
3.2 Einleitung	36
3.3 Material und Methoden	38
3.3.1 Standorte	38
3.3.2 Dünger.....	39
3.3.3 Versuchsaufbau.....	39
3.3.4 Mikroplots mit ¹⁵ N-Tracer.....	40
3.3.5 Analytik	41
3.3.6 Statistische Auswertung	42
3.4 Witterung.....	43
3.5 Ergebnisse.....	44
3.5.1 Bewertung der Versuchsstandorte.....	44
3.5.2 Bewertung von TM-Ertrag und N-Entzug.....	47
3.5.3 Betrachtung der N-Verwertung des Düngers mittels ¹⁵ N-Tracer.....	49
3.5.3.1 N-Verwertung der gesamten Düngergaben mittels ¹⁵ N-Tracer	50
3.5.3.2 N-Verwertung von Düngerteilgaben mittels ¹⁵ N-Tracer.....	54
3.6 Diskussion	60

4 Lachgasemissionen aus dem Boden und von einem ¹⁵N-	
markierten Stickstoffdünger mit dem neuen Nitrifikationsinhibitor	
3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP).....	65
4.1 Zusammenfassung	65
4.2 Einleitung	65
4.3 Material und Methoden.....	67
4.3.1 Standort und Boden	67
4.3.2 Versuchsaufbau	67
4.3.3 Probenahme.....	68
4.3.4 Analytik.....	68
4.3.5 Statistische Auswertung	69
4.4 Ergebnisse	69
4.4.1 Düngerverteilung und Stickstoffform	69
4.4.2 N ₂ O-Verluste aus dem Boden-N und Dünger-N.....	71
4.4.3 Beitrag des stabilisierten Ammonium	72
4.4.4 Granulate und flüssige Düngung.....	74
4.4.5 Einfluss der Witterung	75
4.4.6 Anorganischer N im Boden	75
4.5 Diskussion.....	77
5 Gesamtdiskussion.....	81
6 Zusammenfassung	85
7 Summary	87
8 Literatur.....	89
9 Anhang.....	97

Abkürzungen und Symbole

ANCA	Automated Nitrogen Carbon Analyser, Automatischer N,C-Analysator
ASS	Ammonsulfatsalpeter
at%	Atom-Prozent
DCD	Dicyandiamid
DMPP	3,4-Dimethylpyrazolphosphat
GD _{5%}	Grenzdifferenz mit 5% Irrtumswahrscheinlichkeit
KAS	Kalkammonsalpeter
L, l	Lehm, lehmig
MS	Massenspektrometer
N	Stickstoff
¹⁵ N	schweres N-Isotop
NH ₄ ⁺	Ammonium
NI	Nitrifikationsinhibitor
N _{min}	mineralischer Stickstoff
NO ₃ ⁻	Nitrat
N ₂ O	Lachgas
N _t	Gesamt-Stickstoff
S, s	Sand, sandig
TKG	Tausendkorngewicht
TM	Trockenmasse
U, u	Schluff, schluffig

Weitere Abkürzungen und Symbole sind im Text erklärt.

1 Einleitung

Mineralische Dünger sind wichtige und sehr wirksame Produktionsmittel in der Pflanzenproduktion, insbesondere im Weizenanbau. Nach einer kontinuierlichen Entwicklung beinhalten moderne N-Düngungssysteme eine möglichst exakte Stickstoffbilanzierung und haben zwei wesentliche Ziele (AMBERGER, 1992):

- a) Minimierung der Stickstoffverluste aller Art und damit möglichst effiziente Nutzung von Boden- und Düngerstickstoff.
- b) Regulation der mineralischen Stickstoffdüngung nach Menge, Form und zeitlicher Verabreichung (splitting), entsprechend dem errechneten Bedarf im Hinblick auf die Ertragserwartung.

In diesen wenigen Sätzen, die nach wie vor gelten, finden sich umfassend alle wesentlichen Anforderungen an die pflanzliche Produktion. Auf die Notwendigkeit einer Verbesserung der N-Effizienz weisen RAUN und JOHNSON (1999) vor allem aus einer globalen Betrachtung hin, in der die NUE (nitrogen use efficiency) für die Getreideproduktion mit lediglich 33% angegeben wird und sehen darin ein enormes Einsparpotenzial. In Deutschland ist in den letzten Jahrzehnten nach BACH und FREDE (1998) die Effizienz des Nährstoffeinsatzes in der Landwirtschaft gestiegen.

In den Böden ist generell eine beachtliche Menge an Stickstoff bevorratet, der größtenteils in organisch gebundener Form vorliegt. Eine Fraktion von 20 - 30% dieses gebundenen N steht mit dem anorganischen N (NH_4^+ und NO_3^-) in einem regen Austausch. Der Transfer von der anorganischen in die organische N-Fraktion und umgekehrt wird über Mikroorganismen bewerkstelligt. Die Überführung von anorganischem N in die organische Fraktion nennt man Immobilisierung, die Freisetzung von organischem N wird als Mineralisierung bezeichnet. Beide Prozesse verlaufen im Boden zu gleicher Zeit (MENGEL, 1991). Der tonmineralogisch fixierte NH_4^+ -N ist für die Pflanzen nur schwer zugänglich (SCHERER und AHRENS, 1996). Die gängigen Untersuchungsmethoden ermöglichen nur bedingt den mineralisierbaren und damit pflanzenverfügbaren N aus dem organischen Pool des Bodens zu bestimmen (APPEL und MENGEL, 1998).

Die Pflanze nimmt den Bedarf an N sowohl in Form von NO_3^- als auch NH_4^+ auf. Über die bevorzugte Form und Auswirkungen auf das Wachstum gibt es diverse

Untersuchungen, die bevorzugt unter kontrollierbaren Bedingungen im Gewächshaus durchgeführt wurden. GOOS et al. (1999) konnten ihre nachgewiesenen Effekte einer kontrollierten NO_3^- - und NH_4^+ -Ernährung vom Gewächshaus nicht in Freilandversuchen bestätigen, da unter den natürlichen Bedingungen weit mehr Einflussfaktoren wirken.

Aus Untersuchungen, die sich mit dem N-Nachlieferungspotential des Bodens und der Grundwasserbelastung durch Nitrat beschäftigen geht hervor, dass es einer mehrjährigen Änderung des N-Einsatzes bedarf, bevor sich nachhaltige Änderungen einstellen bezüglich der Verlustgefährdung durch Auswaschung, gemessen durch N_{min} -Gehalte im Boden (KERSCHBERGER und HESS, 1997). Auch GUTSER (1998) fordert für eine Bewertung von N-Salden für Umweltstandards in der Landwirtschaft eine mehrjährige Betrachtung und Saldierung des Nährstoffflusses, aufgrund von standortabhängigen Gegebenheiten und einer gewissen Trägheit, bevor sich der Boden auf ein Fließgleichgewicht der Nährstoffe einstellt. Unter Berücksichtigung der vielen Faktoren wie Nährstoffbedarf der Pflanze, Nährstoffverfügbarkeit oder dem Nachlieferungspotenzial des Bodens ergeben sich diverse Anforderungen an effiziente Düngungsstrategien mit mineralischen N-Düngern.

1.1 Mineralische Stickstoffdünger mit Nitrifikationsinhibitoren

Mit dem Einsatz von mineralischen Stickstoffdüngern sollten zum einen hohe Erträge und Qualitäten der Ernteprodukte erzielt und zum anderen die Effizienz dieses Produktionsmittels optimiert werden. Ein effizienter Düngemiteleinsatz steht im Weiteren für vereinfachte Düngungssysteme mit reduzierter Anzahl von Teilgaben, in welchen es gilt das Ertrags- und Qualitätsniveau entsprechend den Systemen mit mehreren Teilgaben zu erreichen. Diese vereinfachten Systeme bedingen eine Applikation größerer N-Mengen zu einem Termin, wobei Aspekte der N-Verluste durch Auswaschung Berücksichtigung finden müssen. Eine Durchführung dieser vereinfachten Düngungssysteme mit zugleich geringer Gefahr der Stickstoffauswaschung ermöglichen Ammonium-haltige Dünger mit Nitrifikationsinhibitoren.

Einen Überblick über die Vielfalt, Wirkungsweise und den Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren geben HAUCK (1980), PRASAD und POWER (1995) und TRENKEL (1997). SOMMER und POLETSCHNY (1972) beschreiben die positiven Effekte des Nitrifikationsinhibitors N-Serve zur einmaligen N-Düngung von Winterweizen hinsichtlich des Ertrages. In Deutschland hat seit den 80er Jahren Dicyandiamid (DCD) als Nitrifikationsinhibitor einen festen Platz in der N-Düngung von landwirtschaftlichen Kulturen. Sowohl positive Ertragseffekte u.a. für Winterweizen als auch geringere N-Verluste durch Auswaschung konnten für Düngungssysteme mit stabilisierten N-Düngern gegenüber KAS in Lysimeter- und Feldversuchen ermittelt werden (AMBERGER und GUTSER, 1987). Vor allem die Betrachtung der Langzeitwirkung von stabilisierten N-Düngern verdeutlicht den positiven Effekt hinsichtlich gesicherter Erträge und reduzierter Nitratauswaschung (GUTSER et al., 1988; GUTSER, 1999). BRENNER (1991) bestätigt die Möglichkeit in N-Steigerungsversuchen mit stabilisierten N-Düngern zu Mais und Hackfrüchten 20 - 30% des Stickstoffs einzusparen und gleiche Erträge zu erreichen.

1.2 Zielsetzung

Aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen und Erfahrungen mit dem Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren war das Ziel dieser Arbeit, Düngungssysteme mit und ohne Nitrifikationsinhibitoren, insbesondere des neuen Wirkstoffes DMPP (3,4-Dimethylpyrazolphosphat), gegenüberzustellen und zu bewerten. Die Bewertung sollte ertrags- und qualitätsorientiert auf die Produktivität im Pflanzenbau ausgerichtet sein. Unter den Begriff der Produktivität fallen aber auch die Aspekte der N-Effizienz, weshalb das Düngungsniveau, die N-Verwertung durch die Pflanze, die N-Wiederfindung in der Pflanze und die N-Verluste in der Bewertung berücksichtigt werden sollten. Besonderes Augenmerk gilt den gasförmigen N-Verlusten, die kurzfristig nach Düngungsmaßnahmen in Form von Lachgasemissionen auftreten können. Alle Versuche werden unter dem breiten Spektrum der natürlichen Einflussfaktoren unter Freilandbedingungen durchgeführt. Für spezifische Fragestellungen wurden in ausgewählten Varianten zusätzlich Mikroplots mit ^{15}N -Tracer angelegt.

2 Ertrag und Produktqualität von Winterweizen und Silomais in Freilandversuchen mit dem neuen Nitrifikationsinhibitor 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP) in spezifischen Stickstoffdüngungsstrategien

2.1 Zusammenfassung

Eine optimierte Produktivität im Pflanzenbau mit hohen Ertrags- und Qualitätsparametern bedarf darauf abgestimmter Einsatzstrategien für mineralische Stickstoffdünger. Das Ziel dieser Arbeit besteht in der mehrjährigen Bewertung und Prüfung eines neuen Nitrifikationsinhibitors DMPP in Freilandversuchen auf zwei Standorten sowie der Entwicklung von sachgerechten Einsatzstrategien des mit dem Wirkstoff kombinierten N-Düngers.

Auf beiden Standorten konnten zu Winterweizen mit den stabilisierten Düngern in vereinfachten Düngungsstrategien mit nur einer Teilgabe bzw. zwei Teilgaben - frühjahrsbetonte oder schossbetonte Applikation - jeweils höhere Kornerträge gegenüber dem Vergleichsdünger Kalkammonsalpeter zu drei Teilgaben erzielt werden. Zum einen können durch die stabilisierten Dünger Teilgaben eingespart werden und zum anderen besteht die Möglichkeit, mit gleicher N-Menge höhere Erträge als mit Kalkammonsalpeter zu erzielen. DMPP ist in der Wirkung mit dem derzeit zugelassenen Nitrifikationsinhibitor DCD weitgehend vergleichbar. Die Witterung hat die Pflanzenverfügbarkeit des applizierten Düngers wesentlich beeinflusst und folglich die Erträge von Winterweizen. In den Düngungsstrategien mit Nitrifikationsinhibitor war das zeitliche und mengenmäßige Splitting der Düngung für das Ertragsniveau entscheidend. Für den Qualitätsparameter Rohproteingehalt konnten mit den stabilisierten Düngern nur bedingt befriedigende Ergebnisse erzielt werden. Für ähnlich gute Qualitäten wie mit dem Vergleichsdünger Kalkammonsalpeter waren auf höherem N-Niveau spezifische Teilgaben mit konventionellen N-Düngern erforderlich.

Wesentlich geringer war auf beiden Standorten der Effekt einer N-Düngung zu Silomais zu bewerten, weshalb die stabilisierten N-Dünger keine so deutlichen Ertragsvorteile gegenüber Kalkammonsalpeter erzielten.

2.2 Einleitung

Grundlage für eine optimale Ertragsbildung stellt die Terminierung der Stickstoffdüngergaben dar, im Hinblick auf eine positive Beeinflussung der Phasen der Anlage und Ausbildung der Ertragsorgane (Fischbeck et al., 1990; Fischbeck et al., 1992).

Der Kornertrag im Getreidebau wird maßgeblich durch die Ertragsstrukturkomponenten Bestandesdichte (Zahl ährentragender Halme), Kornzahl je Ähre und Tausendkorngewicht vorgegeben (Oehmichen, 1986). Auf diese Faktoren der Ertragsstruktur muss Einfluss genommen werden, indem Anlagen und Ausbildung gefördert und Reduktionen eingeschränkt werden.

Bezüglich der Ertragskomponenten kann ausgesagt werden, dass das TKG relativ stark genetisch bedingt und direkt nicht wesentlich durch Bewirtschaftungsmaßnahmen beeinflussbar ist. Der Einfluss auf Kornzahl pro Ähre durch pflanzenbauliche Maßnahmen ist relativ hoch. Die Bestandesdichte wird am stärksten durch pflanzenbauliche Maßnahmen beeinflusst. Daraus kann gefolgert werden, dass bei standortgerechter Bestandesdichte um so sicherer hohe Erträge zu erzielen sind, je höher die Kornzahl pro Ähre ist.

Unter diesen Voraussetzungen haben sich zur Stickstoffdüngung von Winterweizen Systeme mit mehreren Teilgaben (splitting) entwickelt, mit dem Ziel hohe Kornerträge mit zugleich hoher Qualität (Rohproteingehalt) zu produzieren. Unter dem Aspekt eines effizienten Düngemitelesinsatzes können vereinfachte Düngungssysteme mit reduzierter Anzahl von Teilgaben zur Anwendung kommen, mit welchen es gilt das Ertrags- und Qualitätsniveau entsprechend den Systemen mit mehreren Teilgaben zu erreichen. Diese vereinfachten Systeme bedingen eine Applikation größerer N-Mengen zu einem Termin und werden durch Ammonium-haltige Dünger mit Nitrifikationsinhibitoren ermöglicht.

In einer Auswertung von 42 Versuchen (1984 - 1991) zu Winterweizen ermittelt KNITTEL (1991) mit stabilisierten N-Düngern durchschnittliche Mehrerträge von 2,1

dt ha⁻¹. SPIELHAUS (1991) verweist bei Winterweizen ebenso auf positive Ertragseffekte durch stabilisierte N-Dünger, aber auch auf geringere Rohproteingehalte im Korn. MOKRY und AMBERGER (1992) zeigen sowohl positive als auch negative Auswirkungen von Düngungssystemen mit stabilisierten N-Düngern auf die ertragsbestimmenden Faktoren und die Qualität von Winterweizen. Generell waren in allen genannten Versuchen standort- und jahresbedingte Unterschiede in der Wirkung der stabilisierten Dünger zu erkennen.

Mit 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP) steht ein neuer Nitrifikationsinhibitor zur Verfügung, der von ZERULLA et al. (2001) als sehr effizient vorgestellt wird. In dieser Arbeit werden in Feldversuchen zu Winterweizen Düngungssysteme mit diesem stabilisierten N-Dünger in reduzierter Anzahl von Teilgaben geprüft, die Kornerträge und Qualität der Ernteprodukte bewertet und mit konventionellen Düngungssystemen mit Kalkammonsalpeter (KAS) in mehreren Teilgaben verglichen. Weiterhin galt eine Versuchsreihe dem Einsatz der stabilisierten Dünger in Silomais mit vornehmlicher N-Aufnahme in der fortgeschrittenen Vegetationsperiode, wobei der Dünger vor der Saat eingearbeitet wurde. Die Bewertungskriterien des Nitrifikationsinhibitors DMPP beziehen sich auf die Effizienz des neuen Wirkstoffes und den Vergleich von stabilisierten und konventionellen Düngungssystemen unter Freilandbedingungen.

2.3 Material und Methoden

2.3.1 Standorte

Die Düngungsversuche wurden auf tiefgründigen Böden mit unterschiedlicher Verlustgefährdung für Nitratstickstoff durchgeführt – ein schluffiger Lehm in 'Dürnast' und ein lehmiger Sand in 'Thonstetten' (Tab. 2.1). Beide Standorte liegen im Raum Freising und sind geologisch dem Tertiärhügelland zuzuordnen (\varnothing 800 mm Jahresniederschlag, \varnothing 7,4 °C Lufttemperatur). Es handelt sich um durchwegs günstige Ackerstandorte, die Auswaschungsgefährdung während der Vegetationszeit ist gering.

Tabelle 2.1: Charakteristik der Versuchsstandorte

	<u>Thonstetten</u>	<u>Dürnast</u>
	lehmgiger Sand	schluffiger Lehm
	Sl	Lu
Ton [%]	10	24
Schluff [%]	26	51
Sand [%]	64	25

2.3.2 Dünger

Die Versuchsdünger lagen in Granulatform vor: Ammonsulfatsalpeter (ASS) als Basis mit entsprechendem Nitrifikationsinhibitor (DCD bzw. DMPP) an das Granulat aufgebracht. Zur Stabilisierung des im ASS dominierenden NH_4^+ -N wurden für DCD die ca. 10-fache Menge an Wirkstoff verwendet als für DMPP. Kalkammonsalpeter (KAS) kam als handelsübliches Produkt zum Einsatz.

Tabelle 2.2: Zusammensetzung der Versuchsdünger

Düngerart	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	DCD-N	Gesamt-N	Wirkstoffmenge bezogen auf Ware
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
ASS/DCD	17,9	7,3	2,0	27,2	3,000**
ASS/DMPP	18,5	7,5	-	26,0	0,305***
KAS *	13,5	13,5	-	27,0	-

* KAS als handelsübliches Produkt

** 2,900 – 3,105

***0,279 – 0,297

Der im KAS im Vergleich zu ASS fehlende Schwefel wurde in der Grunddüngung (Superphosphat, Kalimagnesia, Kieserit) ausgeglichen.

2.3.3 Versuchsaufbau

Düngungsvarianten zu Winterweizen

In den Winterweizenversuchen der Sorte 'Astron' kamen 3 N-Stufen mit 120, 160 und 200 kg N ha⁻¹ zur Prüfung, 1999 zusätzlich 180 kg N ha⁻¹ (Tab. 2.3).

Tab. 2.3: Düngungsvarianten zu Winterweizen

Variante	N-Stufe	N-Verteilung [kg N ha ⁻¹]					
		Veg.-Beginn	BBCH-Code				
			30/31	32	37	49/51	
Kontrolle	0	0					
KAS	11	120	60	20		40	
	12	160	70	40		50	
	13	200	80	40		80	
	16	180	60	60		60	
ASS/ DCD	21	160	160				
	22	160	110		50		
	23	160	70	90			
	24	120	120				
ASS/ DMPP	31	160	160				
	32	160	110		50		
	33	160	70	90			
	34	120	120				
	35	180	100		80		
	36	180	100			80	
	37	180	80		100		
	38-1	160	110			50 ¹⁾	
	38-2	180	120				60 ¹⁾
	38-3	180	100			40 ¹⁾	40 ¹⁾
38-4	180	60 ¹⁾		120			

¹⁾ KAS

Die N-Steigerung mit KAS definiert das Ertragspotential der Versuchsfelder, die Applikation erfolgte praxisüblich mit 3 Teilgaben (Variante 11; 12; 13; 16). Die ASS-Varianten mit DCD und DMPP sind nur in den beiden niederen N-Stufen enthalten: die 160 N-Stufe sieht sowohl eine einmalige Gabe (Variante 21; 31) als auch ein Splitting vor. Die gesplitteten Varianten können frühjahrsbetont, d.h. 110 N zu Vegetationsbeginn und 50 N zu BBCH 32 (Variante 22; 32) oder schossetbetont sein, d.h.

70 N zu Vegetationsbeginn und 90 N zu BBCH 31 (Variante 23; 33). Die niedrigere N-Menge (120 N) der NI-Dünger wird grundsätzlich nur in einer Gabe zu Vegetationsbeginn verabreicht (Variante 24; 34). Zur Verbesserung der Rohproteingehalte kamen 1999 ASS/DMPP-Varianten der 180 N-Stufe (Variante 35; 36; 37) und Kombinationen mit KAS (Variante 38-1; 38-2; 38-3; 38-4) mit in die Prüfung.

Düngungsvarianten zu Silomais

Tabelle 2.4: Düngungsvarianten zu Silomais

Variante	N-Stufe	N-Verteilung [kg N ha ⁻¹]		
		Saat Unterfuß	Saat breit	kniehohen Bestand
Kontrolle:	0	0		
KAS	11	80 ¹⁾		50
	12	120 ²⁾		80
	13	160 ³⁾		100
	14	120 ²⁾		120
	15	120 ²⁾	60	
ASS/ DCD	21	80 ¹⁾		80
	22	120 ²⁾		120
	23	80 ¹⁾	60	20
	24	120 ²⁾	60	60
ASS/ DMPP	31	80 ¹⁾		80
	32	120 ²⁾		120
	33	80 ¹⁾	60	20
	34	120 ²⁾	60	60

¹⁾ 1997 - 100 N

²⁾ 1997 - 140 N

³⁾ 1997 - 180 N

Die KAS-Varianten mit 3 N-Stufen definieren das Silomais-Ertragspotential (Sorte 'Magister') der Standorte (Tab. 2.4). Die KAS-Menge wird entweder in zwei Gaben gesplittet (erste Gabe zur Saat und zweite Gabe in den kniehohen Bestand) oder die gesamte mittlere N-Stufe breitflächig zur Saat (Variante 14) verabreicht. Eine weitere

KAS-Variante (15) sah 60 N als Unterfußdüngung zur Saat vor und 80 bzw. 60 N breitflächig in den kniehohen Bestand. Die NI-Dünger wurden in der niedrigen und mittleren N-Stufe appliziert: die gesamte N-Menge breitflächig zur Saat (Varianten 21; 22; 31; 32) oder 60 N als Unterfußdüngung und die restliche Menge breitflächig zur Saat (Varianten 23; 24; 33; 34) appliziert.

Ab 1998 wurde das N-Niveau um jeweils 20 kg ha^{-1} herabgesetzt. Die Verteilung der N-Gaben war stets ähnlich abgestuft (Tab. 2.4). Alle N-Gaben zur Saat wurden mit einem Striegel eingearbeitet.

2.3.4 Analysen

Die Bestimmung der N-Gehalte der Ernteprodukte Stroh und Korn erfolgte mittels Elementaranalyse (Makro-N, Firma Foss Heraeus). Der Rohproteingehalt errechnet sich aus N-Gehalt $\times 5,7$.

2.3.5 Bestimmung der Winterweizen-Ertragskomponenten

Bestandesdichte

Zur Bestimmung der Bestandesdichte wurden die ährentragenden Halme je m^2 in der Parzelle in vier Wiederholungen gezählt.

Kornzahl je Ähre

Rechnerisch ermittelter Wert aus Tausendkorngewicht, Kornertrag und Anzahl ährentragender Halme je m^2 .

Tausendkorngewicht (TKG)

Gewichts-Bestimmung von 1000 Körnern der Mischprobe aus den Druschparzellen in vier Wiederholungen.

Korn/Stroh - Verhältnis

Relation der Trockenmasseerträge von Korn und Stroh, ermittelt aus Ernteparzellen zu je $0,5 \text{ m}^2$.

Siebsortierung

Prozentualer Gewichtsanteil der Körner, sortiert nach Größe $>2,8 \text{ mm}$.

2.3.6 Energieertrag von Silomais

Die Silomaiserträge werden in Netto-Energie-Laktation (NEL) angegeben. Hier sind sowohl die Trockenmasseerträge von Kolben und Restpflanze berücksichtigt als auch die Kolbenanteile, welche für den Energieertrag von großer Bedeutung sind.

Die Berechnung des Nettoenergiegehaltes erfolgte nach GROSS (1984):

NEL (MJ je kg TS) =

$$(\text{Kolbenanteil [\% d. TS]} * 8,31$$

$$+ \text{Restpflanzenanteil [\% d. TS]} * (5,31 + 0,024 * x - 0,0007 * x^2)) * 100$$

(x = TS-Gehalt im Kolben in %)

2.3.7 Statistische Auswertung

Die varianzanalytische Auswertung der Versuchsergebnisse wurde mit dem Programmpaket „SAS-proc glm“ (SAS Institute Inc., Cary, USA) durchgeführt. Zur Ermittlung der Grenzdifferenz (P < 0,05) fand der Tukey-Test Verwendung.

2.4 Witterung

Die Niederschlagsverteilung sollte für die Düngewirkung zu Winterweizen von großer Bedeutung sein. Vorab sei auf länger anhaltende Trockenperioden im Mai 1997 und 1998 verwiesen (Abb. 2.1). 1999 waren die Niederschläge relativ gleichmäßig über die Vegetationszeit verteilt.

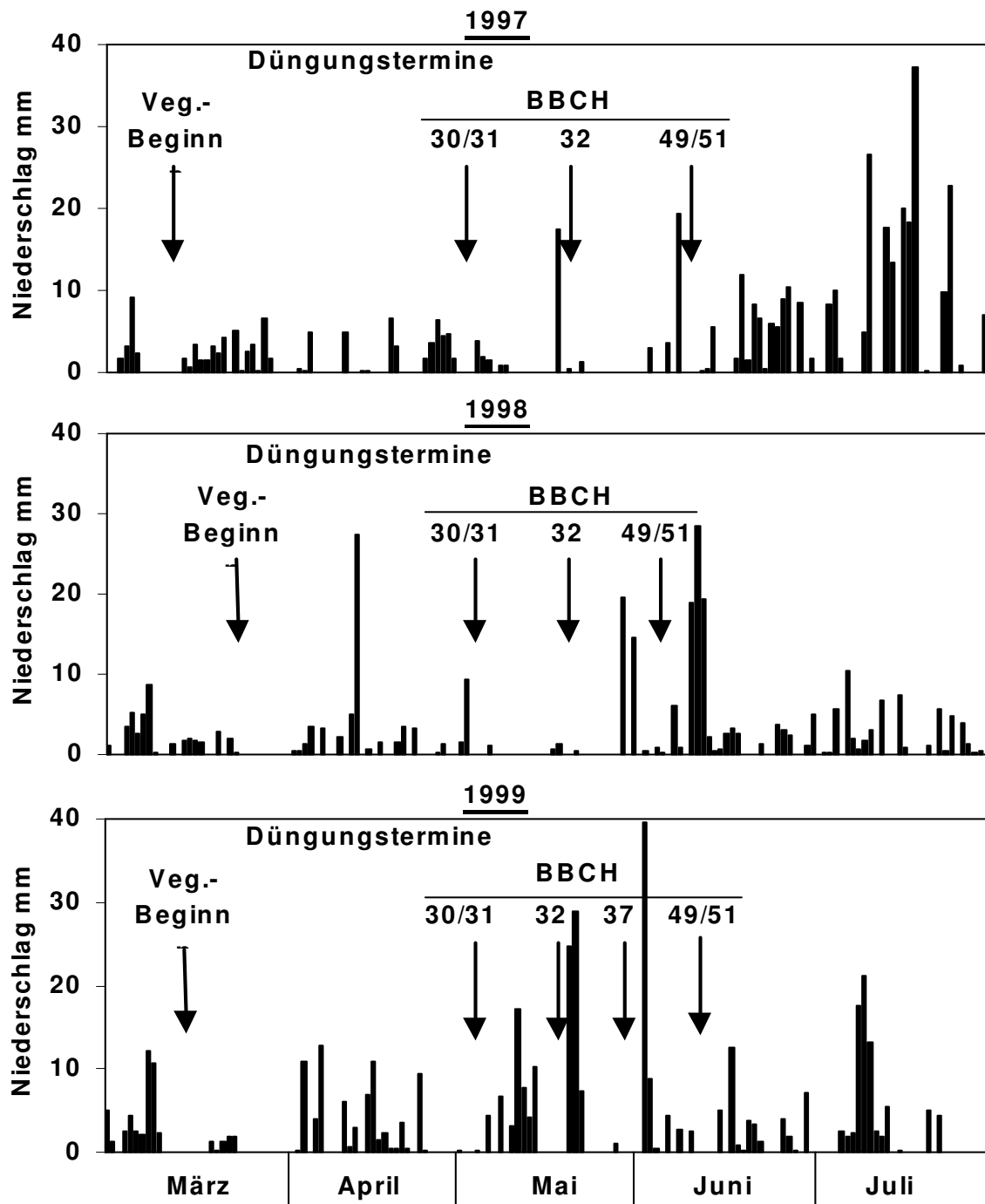


Abbildung 2.1: Regionale Niederschlagsverteilung und Düngungstermine zu Winterweizen

2.5 Ergebnisse

2.5.1 Erträge Winterweizen

Das Ertragspotential der Standorte wurde durch die N-Steigerung der KAS-Varianten ermittelt: Der Standort Dürnast (Lu) zeigte zur N-Steigerung deutliche Ertragseffekte (Abb. 2.2). Auf dem sandigen Boden in Thonstetten (Sl) fiel der Ertragszuwachs geringer aus; insbesondere 1997 konnten nach einer N-Steigerung von 120 auf 200 N lediglich Mehrerträge von 2,7 dt ha⁻¹ erzielt werden (Abb. 2.3). Die ungedüngte Kontrolle in Dürnast lag im Ertragsniveau jahresbedingt um 3,2 bis 16,5 dt ha⁻¹ unter dem in Thonstetten. Der Standort Dürnast spricht demnach stärker auf eine N-Steigerung an als der Standort Thonstetten.

Stabilisierte Dünger wurden in spezifischen Strategien hinsichtlich Düngungstermin und Verteilung angewandt und praxisüblichen Düngerverteilungen mit KAS in drei Teilgaben gegenübergestellt:

Standort Dürnast

In Dürnast konnten vor allem 1998 und 1999 auf der niedrigen N-Stufe (120 N) mit einer einmaligen Gabe ASS/DMPP deutlich höhere Erträge erzielt werden als mit KAS zu drei Teilgaben (Abb. 2.2). Auch auf der mittleren N-Stufe (160 N) erreichte der stabilisierte N-Dünger in einmaliger Gabe insbesondere 1997 und 1998 Vorteile gegenüber dem entsprechenden Vergleichsglied KAS. Ein Splitting des NI-Düngers brachte 1997 und 1999 darüber hinaus eine weitere Ertragsverbesserung, nicht jedoch 1998. In Dürnast lagen die Kornerträge der ASS/DMPP-Varianten (160 N-Stufe) zum Teil über jenen der höchsten KAS-Düngung (200 N).

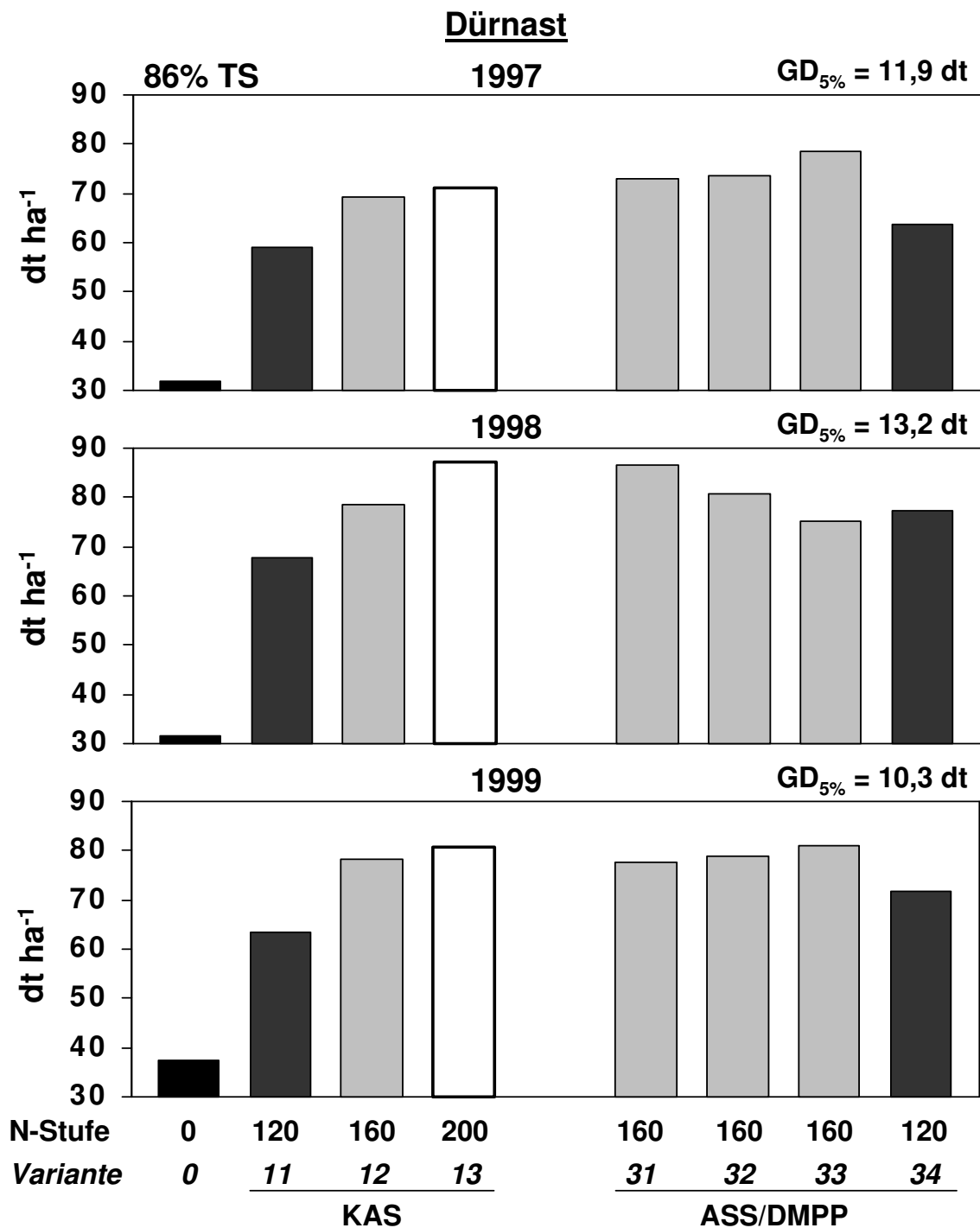


Abbildung 2.2: Kornerträge von Winterweizen in Dürnast (Lu) – Vergleich von KAS und ASS/DMPP

Standort Thonstetten

1998 waren auf dem Standort Thonstetten deutliche Trockenschäden aufgrund fehlender Niederschläge im Mai zu verzeichnen, wodurch die Kornerträge innerhalb der Varianten stark streuten ($GD_{5\%} = 23,2 \text{ dt ha}^{-1}$) und eine KAS-Variante (11) nicht auswertbar war (Abb. 2.3).

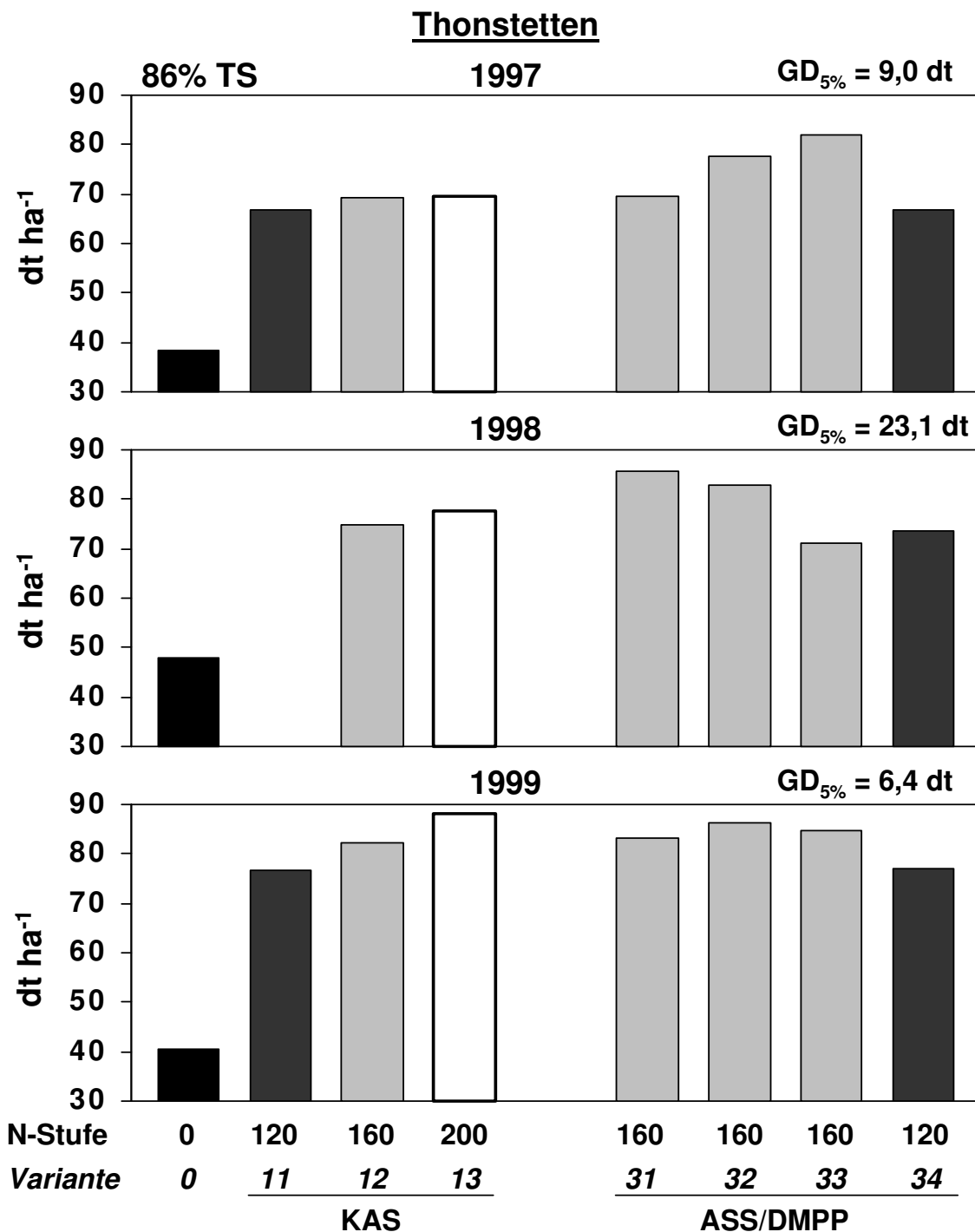


Abbildung 2.3: Kornerträge von Winterweizen in Thonstetten (SI) – Vergleich von KAS und ASS/DMPP

In den Versuchsjahren 1997 und 1999 hob sich auf niedriger N-Stufe (120 N) die KAS-Variante mit drei Teilgaben nicht von ASS/DMPP in einmaliger Applikation zu Vegetationsbeginn ab. Auch auf der mittleren N-Stufe (160 N) lagen die Erträge mit KAS kaum über jenen der einmaligen Gaben des NI-Düngers, mit welchem jedoch 1998 deutliche Mehrerträge erzielt wurden. 1997 zeigten die gesplitteten Varianten des stabilisierten Düngers merklich höhere Erträge gegenüber einer einmaligen Applikation und gegenüber den KAS-Varianten. In den folgenden Versuchsjahren kam dieser Ertragsvorteil der gesplitteten NI-Varianten nicht so deutlich zum Ausdruck. Die hohe KAS-Gabe (200 N) erzielte nur 1999 die höchsten Erträge, in den anderen Jahren war auch in Thonstetten ASS/DMPP mit 160 N dieser überlegen.

Die Ergebnisse beider Standorte belegen, dass mit stabilisierten N-Düngern die Zahl der Teilgaben bzw. das N-Angebot gegenüber konventionellen N-Düngern (z.B. KAS) reduziert werden kann. Somit ergeben sich mit dem Einsatz von ASS/DMPP neben ökonomisch/ökologischen vor allem auch arbeitswirtschaftliche Vorteile.

2.5.1.1 Vergleich der Wirkung von DCD und DMPP

Die positive Wirkung des Nitrifikationsinhibitors DCD ist seit Jahren in zahlreichen Versuchen und in der Praxis bestätigt. Auf beiden Standorten zeigten sich keine grundlegenden Unterschiede zwischen den DCD- und DMPP-Varianten (sowohl einmalige wie gesplittete Applikation) (Abb. 2.4 und 2.5). Gelegentlich waren jahres- und standortspezifische Unterschiede festzustellen. So etwa 1998 vorwiegend in Thonstetten, wobei auf die fehlenden Niederschläge im Mai mit resultierenden Trockenschäden verwiesen werden muss. Trotz erheblich geringerem Wirkstoffaufwand gegenüber DCD sind demnach mit DMPP gleichwertig positive Ertragseffekte zu erzielen.

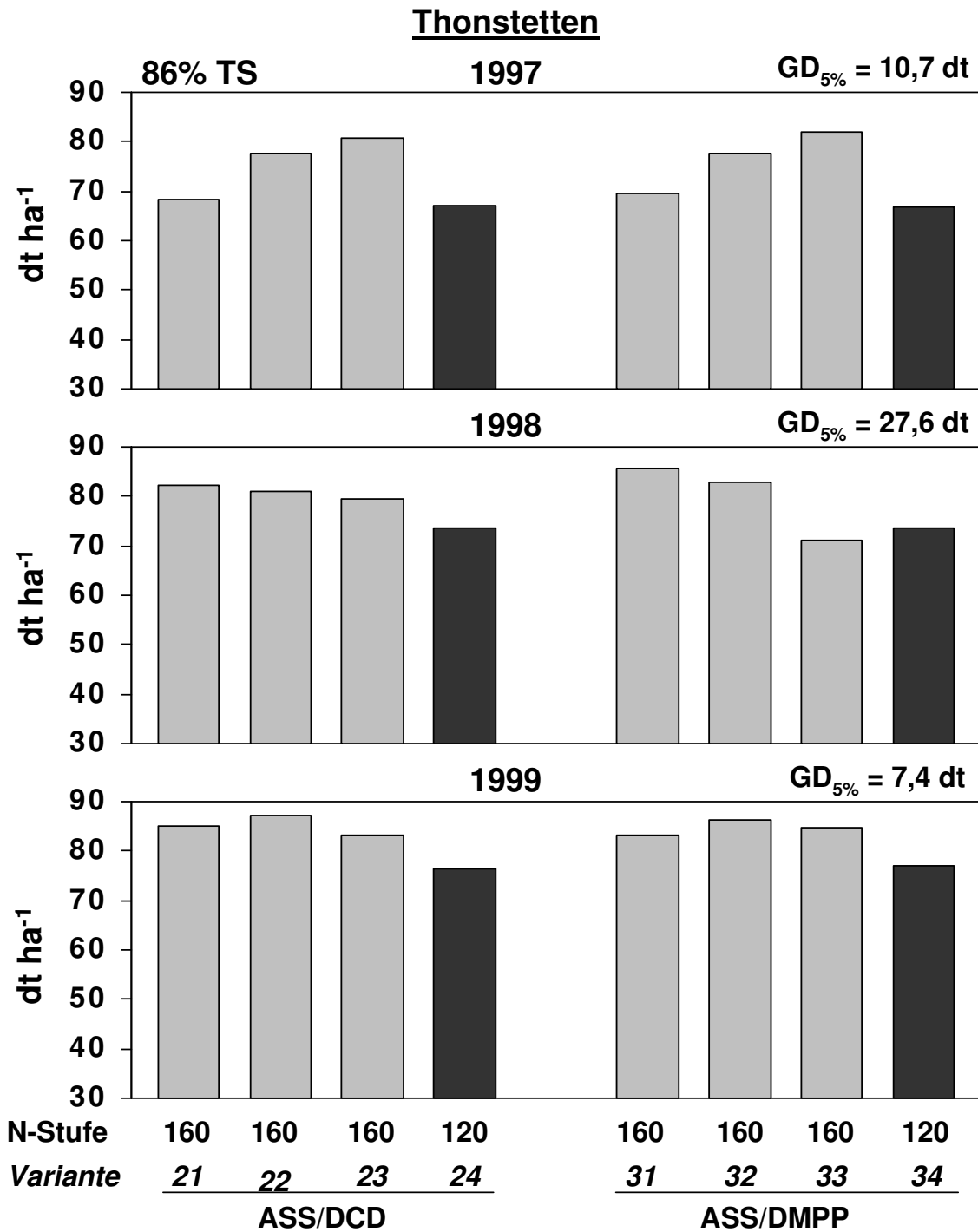


Abbildung 2.4: Kornträge von Winterweizen in Thonstetten (SI) – Vergleich von DCD und DMPP

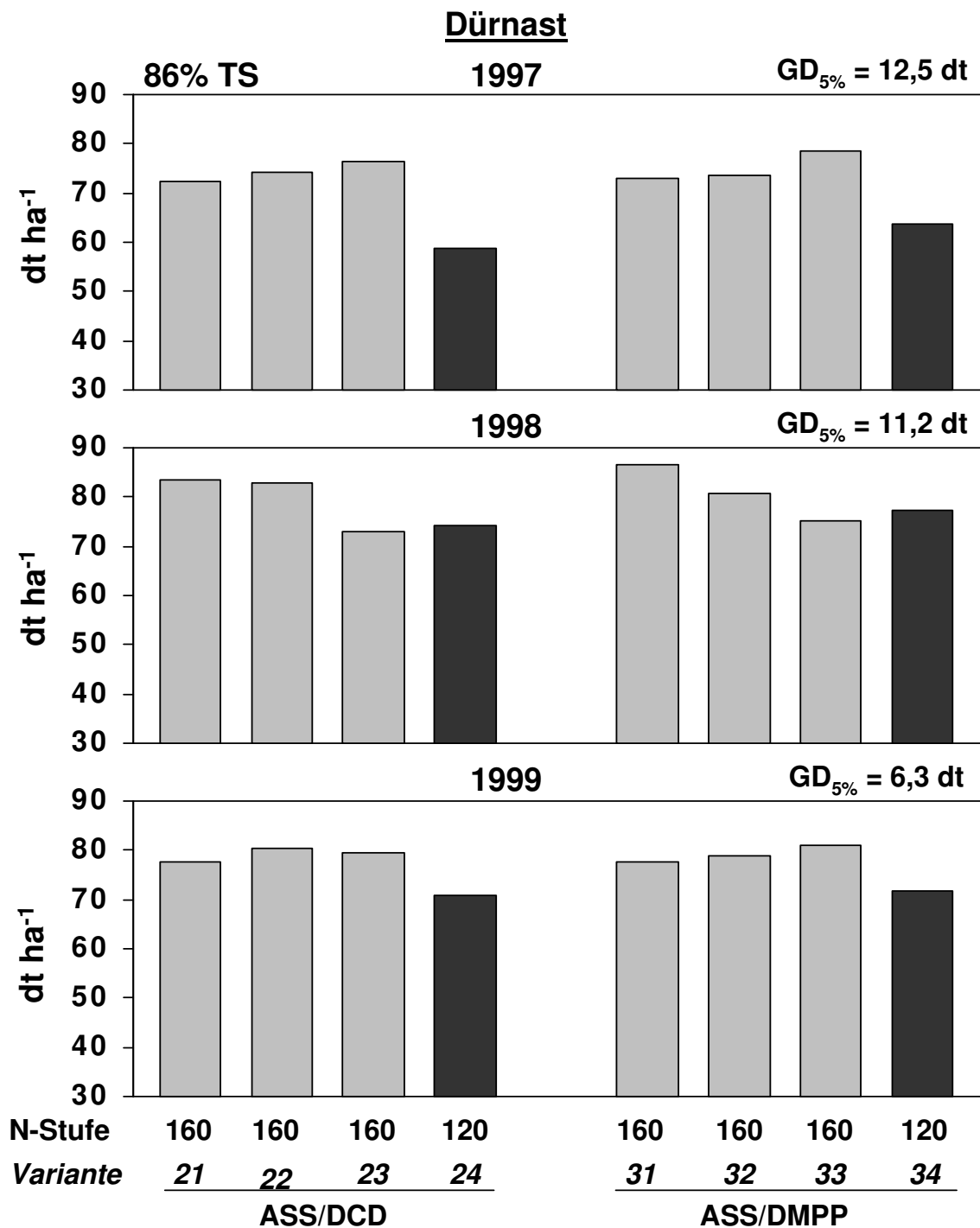


Abbildung 2.5: Kornerträge von Winterweizen in Dürnast (Lu) – Vergleich von DCD und DMPP

2.5.1.2 Einfluss der Witterung

Auf beiden Standorten zeichnet sich ein jahresbedingter Unterschied in der Ertragssituation der Varianten ab, wobei die Niederschlagsverteilung großen Einfluss auf die Düngerwirkung hatte (Abb. 2.1 – 2.5).

1997 waren die stabilisierten Düngervarianten mit schossbetonter Verteilung der frühjahrsbetonten Verteilung überlegen. Die zweite Teilgabe der schossbetonen Varianten wurde zu BBCH 31 appliziert; der darauf folgende geringe Niederschlag reichte aus, die Granulate zu lösen und den Stickstoff für die Pflanzen verfügbar zu machen. Nach der zweiten Teilgabe der frühjahrsbetonten Varianten zu BBCH 32 stellte sich eine längere Trockenperiode ein, sodass der angebotene Stickstoff nicht voll zur Wirkung kam.

1998 erzielte dagegen die frühjahrsbetonte Variante höhere Erträge. Aufgrund der lang anhaltenden Trockenperiode bis Ende Mai kam die zweite Teilgabe der gesplit-teten NI-Varianten erst gegen Ende der Schossphase zur Wirkung. Der höhere Ertrag der frühjahrsbetonten gegenüber der schossbetonen Variante resultierte aus der höheren Andüngung (110 N gegenüber 70 N) zu Vegetationsbeginn mit ausreichender Bodenfeuchte für eine gute N-Wirkung.

1999 unterschieden sich die zeitlichen Verteilungsstrategien nur unwesentlich. Gleichmäßig verteilte Niederschläge sicherten die Wirkung des applizierten Stickstoffs zum beabsichtigten Zeitpunkt.

2.5.2 Qualität Winterweizen

2.5.2.1 Rohprotein

Die Produktion von Qualitätsweizen ist ökonomisch von großer Bedeutung und erfordert darauf abgestimmte Düngungsstrategien. Die Winterweizensorte 'Astron' liefert mit hohen Rohproteingehalten grundsätzlich hervorragende Teigeigenschaften.

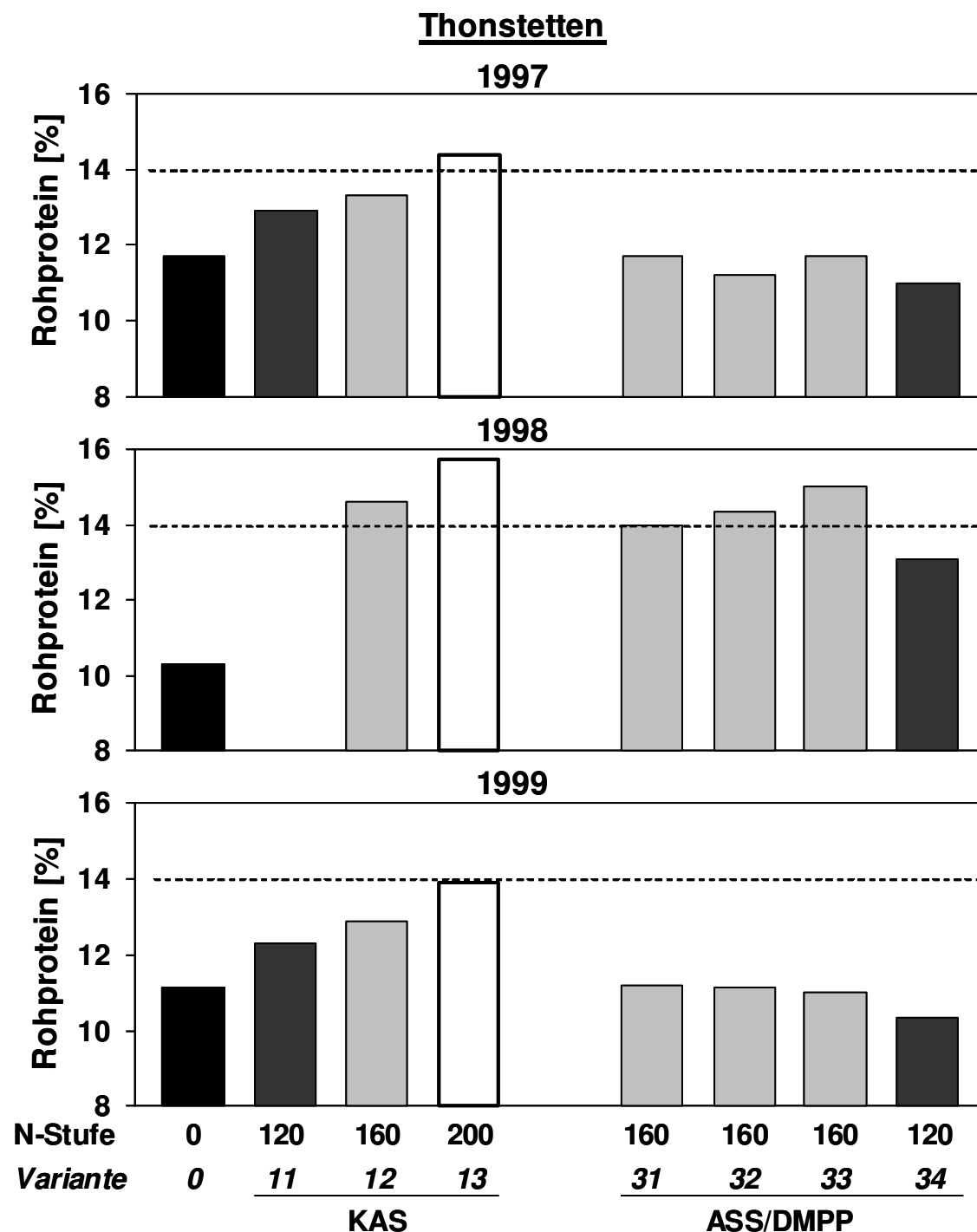


Abbildung 2.6: Rohproteingehalte im Korn von Winterweizen in Thonstetten (SI) – Vergleich von KAS und ASS/DMPP

Die Sorte 'Astron' reagierte auf beiden Standorten und den drei Versuchsjahren auf die steigende KAS-Düngung mit einer deutlichen Zunahme der Rohproteingehalte (Abb. 2.6 und 2.7). Die erzielten Rohproteingehalte waren standort- und jahresbedingt unterschiedlich. In Thonstetten wurden durchwegs höhere Gehalte als in Dürnast erreicht. 1998 zeigten sich stets, v.a. in Thonstetten, sehr hohe Rohproteingehalte.

halte (bis zu 15,7%), hervorgerufen durch eine lang anhaltende Trockenperiode. Der Schwellenwert von 14% Rohprotein wurde in Thonstetten überschritten, nicht jedoch in Dürnast. Unabhängig von der Verteilung konnten mit dem stabilisierten Dünger ASS/DMPP keine entsprechenden Qualitäten erreicht werden. Eine Ausnahme stellte das Jahr 1998 in Thonstetten dar, wobei die hohen Rohproteingehalte in erster Linie auf die Niederschlagsverteilung zurückzuführen waren.

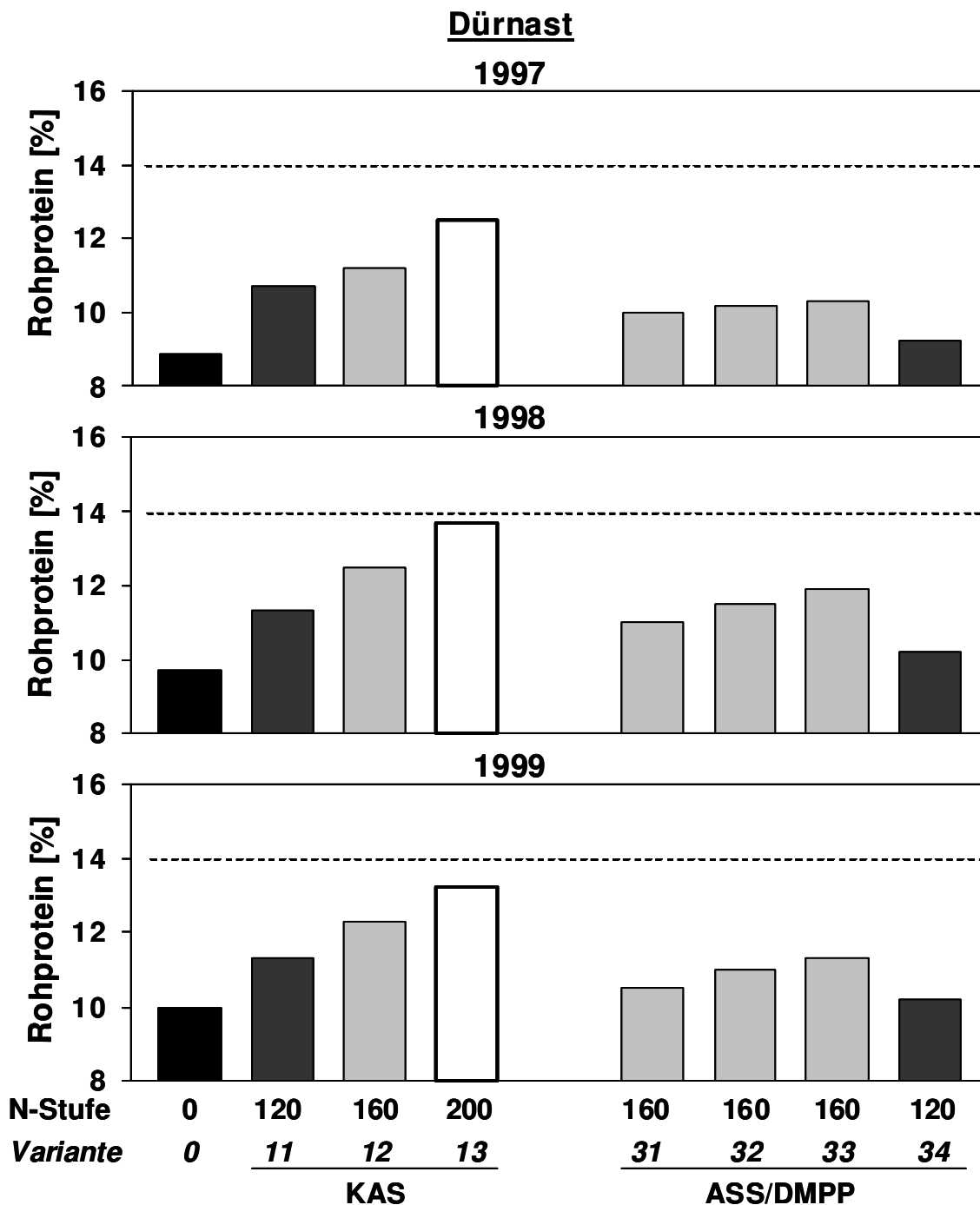


Abbildung 2.7: Rohproteingehalte im Korn von Winterweizen in Dürnast (Lu) – Vergleich von KAS und ASS/DMPP

Mit dem Ziel höherer Rohproteingehalte wurden 1999 zusätzlich Varianten mit ASS/DMPP geprüft. Zum einen wurde das N-Niveau auf 180 kg N ha^{-1} erhöht, zum anderen ASS/DMPP mit KAS-Teilgaben kombiniert. Vor allem das höhere N-Angebot konnte auf beiden Standorten die Rohproteingehalte verbessern (Abb. 2.8 und 2.9). Insbesondere die Kombination ASS/DMPP mit einer Spätgabe KAS führte auf dem N-Niveau 180N zu einer weitgehenden Angleichung der Rohproteingehalte des Weizens mit dem KAS-Vergleichsglied. Dieser Effekt wurde zumindest in Thonstetten erreicht (Abb. 2.8 und 2.9).

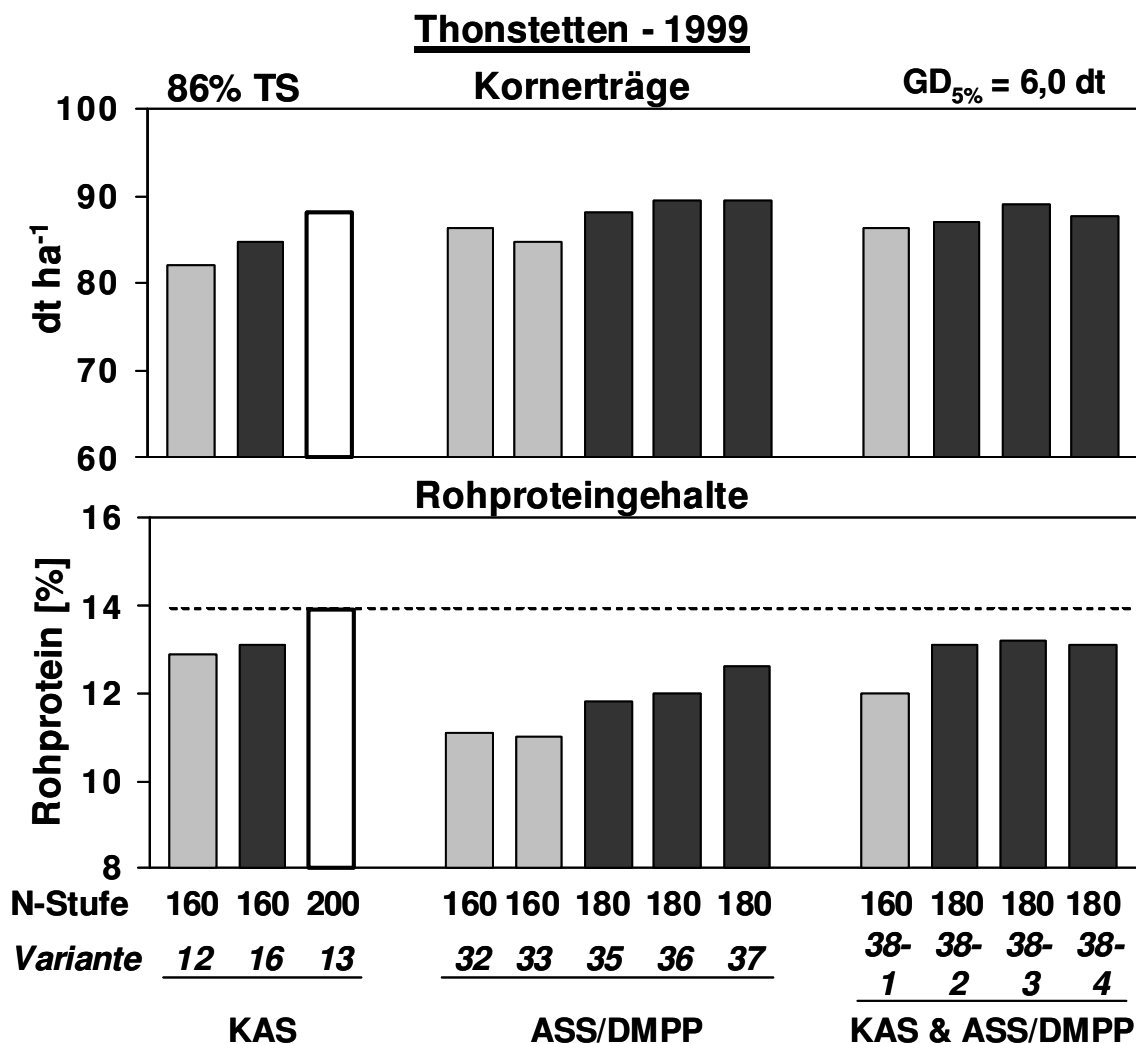


Abbildung 2.8: Kornerträge und Rohproteingehalte im Korn von Winterweizen in Thonstetten (SI) von 1999

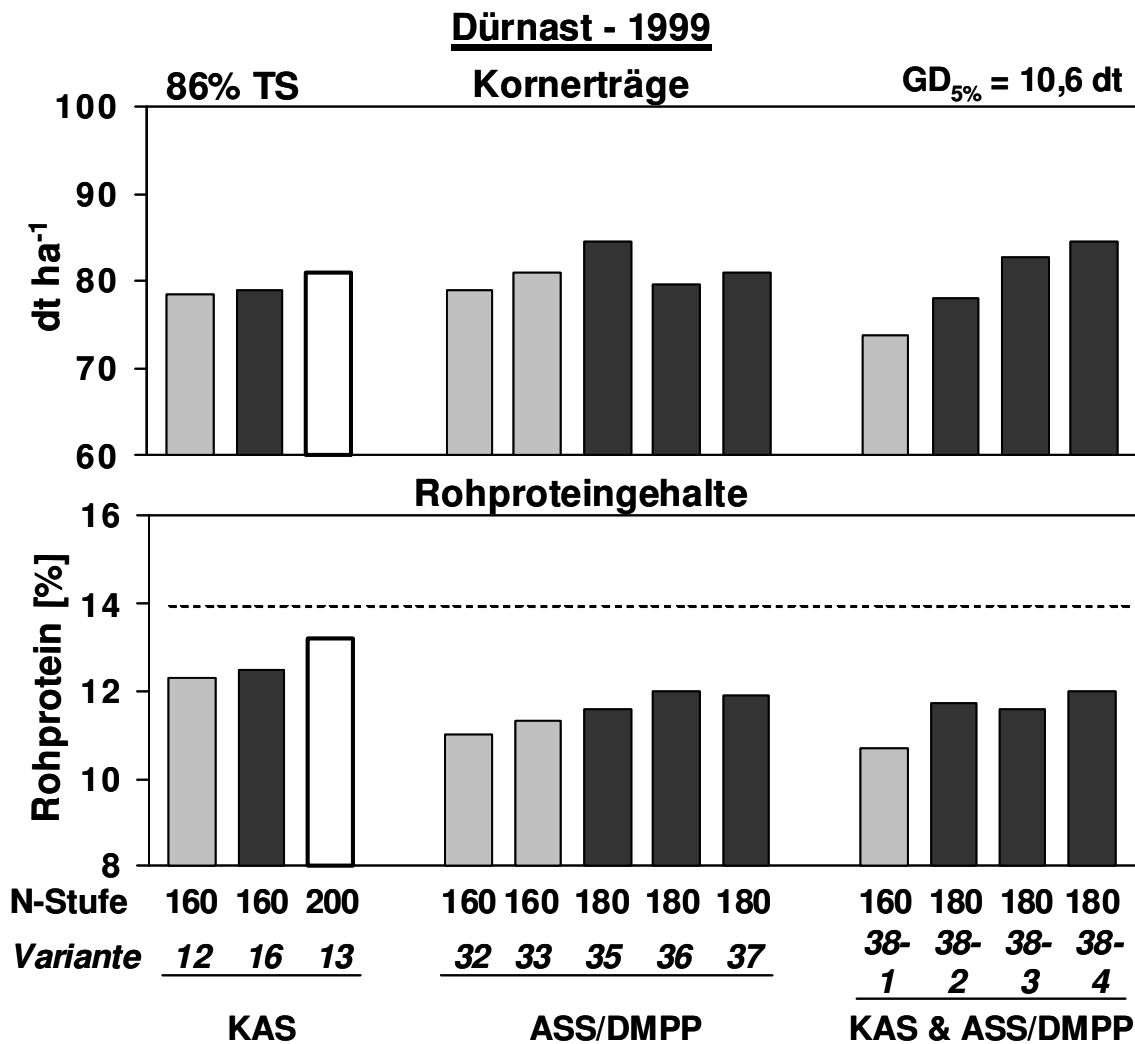


Abbildung 2.9: Kornerträge und Rohproteingehalte im Korn von Winterweizen in Dürnast (Lu) von 1999

Neben höheren Rohproteingehalten waren aufgrund des höheren N-Angebots meist auch Mehrerträge zu verzeichnen. Auf der 160 N-Stufe brachten in Thonstetten die frühjahrsbetonten Verteilungen von ASS/DMPP (Variante 33) und ASS/DMPP kombiniert mit KAS (Variante 38-1, KAS zu BBCH 37) gleiche Erträge mit Vorteilen höherer Rohproteingehalte für die mit KAS kombinierte Variante. In Dürnast hingegen bewirkte die spätere KAS Düngung Mindererträge, ohne Auswirkung auf die Rohproteingehalte. In Thonstetten erzielten die mit KAS kombinierten Düngungsvarianten gegenüber den ausschließlichen ASS/DMPP-Varianten höhere Rohproteingehalte im Korn.

2.5.2.2 Ertragsaufbau von Winterweizen

Der Kornertrag des Getreides setzt sich aus der Bestandesdichte (Zahl der ährentragenden Halme je m²), der Kornzahl pro Ähre und dem Tausendkorngewicht (TKG) zusammen.

2.5.2.2.1 Bestandesdichte – ährentragende Halme je m²

Die Bestandesdichte wird vornehmlich in frühen Entwicklungsstadien der Bestockung und der Schossphase entsprechend den Wachstumsbedingungen festgelegt.

In den drei Versuchsjahren wurden überwiegend in Thonstetten höhere Bestandesdichten erreicht als in Dürnast (Tab. 2.4). Für die NI-Varianten wurden tendenziell mehr ährentragende Halme je m² ermittelt als für die Vergleichsvariante KAS. Generell waren kaum signifikante Unterschiede zwischen den Varianten zu verzeichnen.

Table 2.4: Bestandesdichte von Winterweizen – ährentragende Halme je m²

Variante	N-Stufe (Verteilung) N [kg ha ⁻¹]		Thonstetten			Dürnast		
			1997	1998	1999	1997	1998	1999
ährentragende Halme m ⁻²								
Kontrolle	0	0	439	324	457	353	392	386
KAS	11	120 (60/20/40)	463	420	463	449	402	437
	12	160 (70/40/50)	443	371	480	428	433	439
	13	200 (80/40/80)	515	425	503	433	436	489
	16	180 (60/60/60)			478			464
ASS/ DCD	21	160 (160)	489	371	515	460	425	447
	22	160 (110/50)	472	424	507	438	435	441
	23	160 (70/90)	498	379	512	457	465	429
	24	120 (120)	500	393	515	425	411	483
ASS/ DMPP	31	160 (160)	548	392	498	463	398	433
	32	160 (110/50)	530	396	460	415	442	440
	33	160 (70/90)	505	393	470	474	464	435
	34	120 (120)	478	413	438	432	436	371
	35	180 (100/80)			483			441
	36	180 (100/80)			485			447
	37	180 (80/100)			486			437
	38-1	160 (110/50 KAS)			477			454
38-2	180 (120/60 KAS)			470			398	
38-3	180 (100/40/40 KAS)			496			441	
38-4	180 (60 KAS/120)			530			418	
GD_{5%}			122	78	97	112	108	119

2.5.2.2.2 Kornzahl pro Ähre

Die Anzahl der Körner je Ähre variierte innerhalb der Varianten sehr stark (Tab. 2.5). Auffallend sind auch jahresbedingte Schwankungen, insbesondere 1998 in Thonstetten mit durchwegs höheren Kornzahlen pro Ähre. Unterschiede zwischen den NI- und den konventionellen Düngungssystemen (KAS) in der Anzahl der Körner waren nicht erkennbar.

Table 2.5: Kornzahl pro Ähre von Winterweizen

Variante	N-Stufe (Verteilung)		Thonstetten			Dürnast		
	N [kg ha ⁻¹]		1997	1998	1999	1997	1998	1999
			Kornzahl/Ähre					
Kontrolle	0	0	23,2	38,8	23,5	27,5	20,1	25,4
KAS	11	120 (60/20/40)	35,8	50,9	42,0	32,3	39,0	34,2
	12	160 (70/40/50)	38,4	49,5	42,2	39,6	42,5	41,1
	13	200 (80/40/80)	31,0	43,0	42,4	39,6	44,0	37,5
	16	180 (60/60/60)			43,3			39,5
ASS/ DCD	21	160 (160)	33,5	53,5	42,2	39,3	44,7	43,3
	22	160 (110/50)	38,4	45,0	43,8	42,9	43,6	45,4
	23	160 (70/90)	37,5	50,7	41,8	41,5	37,6	46,3
	24	120 (120)	32,1	45,3	36,2	35,2	41,9	37,6
ASS/ DMPP	31	160 (160)	30,5	52,7	42,8	40,5	51,2	44,8
	32	160 (110/50)	33,5	50,6	47,0	45,7	43,9	45,0
	33	160 (70/90)	38,1	44,8	47,3	40,0	39,6	45,3
	34	120 (120)	33,4	44,1	42,7	38,0	41,1	46,4
	35	180 (100/80)			47,7			49,6
	36	180 (100/80)			45,9			43,7
	37	180 (80/100)			48,9			47,4
	38-1	160 (110/ 50 KAS)			46,5			40,5
	38-2	180 (120/ 60 KAS)			45,2			43,9
	38-3	180 (100/ 40/40 KAS)			44,7			44,2
38-4	180 (60 KAS/120)			46,0			49,8	

2.5.2.2.3 Tausendkorngewicht

Ein steigendes Angebot der N-Düngung (KAS) förderte mehr oder weniger die Tausendkorngewichte des Weizens (Tab. 2.6). Bezüglich der NI-Varianten konnten keine spezifischen Entwicklungen festgestellt werden. Die Standort- und Jahresunterschiede erwiesen sich durchwegs ausgeprägter als die Unterschiede zwischen den Düngungssystemen. Die Jahre mit etwas niedrigeren TKG des Weizens in den NI-Düngungssystemen dürften überwiegen.

Tabelle 2.6: Tausendkorngewicht (TKG) von Winterweizen

Variante	N-Stufe (Verteilung) N [kg ha ⁻¹]		Thonstetten			Dürnast		
			1997	1998	1999	1997	1998	1999
			Tausendkorngewicht [g]					
Kontrolle	0	0	37,6	38,3	38,0	36,8	40,1	38,3
KAS	11	120 (60/20/40)	40,4	41,6	39,5	40,5	43,2	42,4
	12	160 (70/40/50)	40,7	40,7	40,6	41,0	42,7	43,5
	13	200 (80/40/80)	43,6	42,5	41,3	41,4	45,5	44,1
	16	180 (60/60/60)			40,9			43,0
ASS/ DCD	21	160 (160)	41,7	41,4	39,1	40,5	44,1	40,2
	22	160 (110/50)	42,8	42,4	39,3	40,7	43,7	40,2
	23	160 (70/90)	43,2	41,4	39,0	40,6	41,8	40,0
	24	120 (120)	41,7	41,3	40,9	39,4	43,0	39,1
ASS/ DMPP	31	160 (160)	41,7	41,6	39,0	40,2	42,5	40,0
	32	160 (110/50)	43,6	41,4	40,0	38,9	41,6	39,8
	33	160 (70/90)	42,5	40,4	38,1	40,6	41,0	41,2
	34	120 (120)	41,9	40,4	41,3	39,5	43,2	41,7
	35	180 (100/80)			38,2			38,6
	36	180 (100/80)			40,2			40,8
	37	180 (80/100)			37,7			39,0
	38-1	160 (110/50 KAS)			38,9			40,1
38-2	180 (120/60 KAS)			40,8			44,6	
38-3	180 (100/40/40 KAS)			40,2			42,5	
38-4	180 (60 KAS/120)			36,0			40,6	

2.5.2.3 Korn/Stroh Verhältnis

Grundsätzlich sind hohe Anteile verkaufsfähiger Ware an der gesamt gebildeten Biomasse wünschenswert. Neben dem Kornertrag gibt das Korn/Stroh Verhältnis darüber Auskunft.

Tabelle 2.7: Korn/Stroh Verhältnis von Winterweizen

Variante	N-Stufe (Verteilung) N [kg ha ⁻¹]		Thonstetten			Dürnast		
			1997	1998	1999	1997	1998	1999
			Korn/Stroh					
Kontrolle	0	0	0,99	0,84	0,71	1,06	0,91	0,78
KAS	11	120 (60/20/40)	0,98	1,17	0,76	1,17	1,00	0,80
	12	160 (70/40/50)	0,95	1,02	0,75	1,20	1,06	0,89
	13	200 (80/40/80)	0,99	1,01	0,77	1,22	1,05	0,84
	16	180 (60/60/60)			0,86			0,86
ASS/ DCD	21	160 (160)	0,89	1,01	0,66	1,11	0,95	0,74
	22	160 (110/50)	1,16	1,00	0,75	1,21	1,06	0,80
	23	160 (70/90)	1,16	1,08	0,77	1,21	1,02	0,79
	24	120 (120)	0,96	0,98	0,66	1,12	0,94	0,77
ASS/ DMPP	31	160 (160)	0,94	1,00	0,64	1,06	0,97	0,77
	32	160 (110/50)	1,10	0,99	0,83	1,14	1,01	0,85
	33	160 (70/90)	1,06	1,03	0,74	1,20	1,07	0,79
	34	120 (120)	0,95	0,98	0,70	1,05	0,93	0,76
	35	180 (100/80)			0,77			0,83
	36	180 (100/80)			0,87			0,91
	37	180 (80/100)			0,83			0,96
	38-1	160 (110/ 50 KAS)			0,85			0,88
	38-2	180 (120/ 60 KAS)			0,75			0,88
	38-3	180 (100/ 40/40 KAS)			0,80			0,97
38-4	180 (60 KAS /120)			0,90			0,90	

In Thonstetten wurden generell niedrigere Kornanteile festgestellt als in Dürnast (Tab. 2.7). Jahresbedingt lagen auf beiden Standorten 1999 die Kornanteile deutlich niedriger als in den vorangegangenen Jahren. Die N-Steigerung der KAS-Varianten in jeweils drei Teilgaben führte zu keinen größeren Schwankungen bezüglich der Korn/Stroh Verhältnisse. In den einmalig zu Vegetationsbeginn gedüngten NI-Varianten zeigten sich durchwegs geringere Kornanteile als in den gesplitteten Varianten. Hohe N-Gaben zu Vegetationsbeginn, auch als NI-Dünger appliziert, fördern somit vornehmlich die Strohbildung, in erster Linie als Folge einer stärkeren Bestockung.

2.5.2.4 Siebsortierung

In den KAS-Varianten verbesserte sich die Siebsortierung (Kornanteile > 2,8 mm) tendenziell mit steigendem N-Angebot (Tab. 2.8). Vorwiegend in Thonstetten waren für die frühjahrsbetonten NI-Varianten Vorteile bezüglich des Korngrößenanteils > 2,8 mm erkennbar. Auch für die einmaligen Applikationen ergaben sich bessere Sortierungswerte als für die schossbetonten Varianten.

Tabelle 2.8: Siebsortierung (Kornanteile > 2,8 mm) von Winterweizen

Variante	N-Stufe (Verteilung)		Thonstetten			Dürnast		
	N [kg ha ⁻¹]		1997	1998	1999	1997	1998	1999
Siebsortierung größer 2,8 mm [%]								
Kontrolle	0	0	73,5	55,3	58,4	63,3	74,9	61,6
KAS	11	120 (60/20/40)	76,9	63,7	65,6	67,8	74,7	66,9
	12	160 (70/40/50)	78,0	60,8	69,1	68,6	72,7	65,8
	13	200 (80/40/80)	79,6	63,1	60,9	70,8	72,4	69,3
	16	180 (60/60/60)			57,1			65,5
ASS/ DCD	21	160 (160)	75,7	62,8	54,6	67,6	74,4	56,3
	22	160 (110/50)	77,1	64,3	49,6	64,9	73,7	52,9
	23	160 (70/90)	74,3	63,3	45,9	66,5	72,4	49,5
	24	120 (120)	76,2	64,9	59,3	68,5	74,7	55,8
ASS/ DMPP	31	160 (160)	75,4	63,3	56,5	66,6	72,6	54,2
	32	160 (110/50)	78,2	61,1	51,2	61,2	72,5	47,0
	33	160 (70/90)	73,6	60,4	48,6	61,2	72,3	54,8
	34	120 (120)	76,6	63,1	52,8	66,1	72,5	62,7
	35	180 (100/80)			45,8			48,5
	36	180 (100/80)			53,7			51,7
	37	180 (80/100)			42,1			45,0
	38-1	160 (110/50 KAS)			53,5			53,3
38-2	180 (120/60 KAS)			65,4			71,6	
38-3	180 (100/40/40 KAS)			58,1			59,4	
38-4	180 (60 KAS /120)			37,4			46,8	

2.5.3 Energieerträge Silomais

Die Energieerträge lagen in Thonstetten deutlich höher als in Dürnast (Abb. 2.10 und 2.11). 1999 fielen diese in Thonstetten niedriger aus als in den Jahren zuvor. Generell differenzierten die Energieerträge von Silomais weniger als die Kornerträge von Winterweizen.

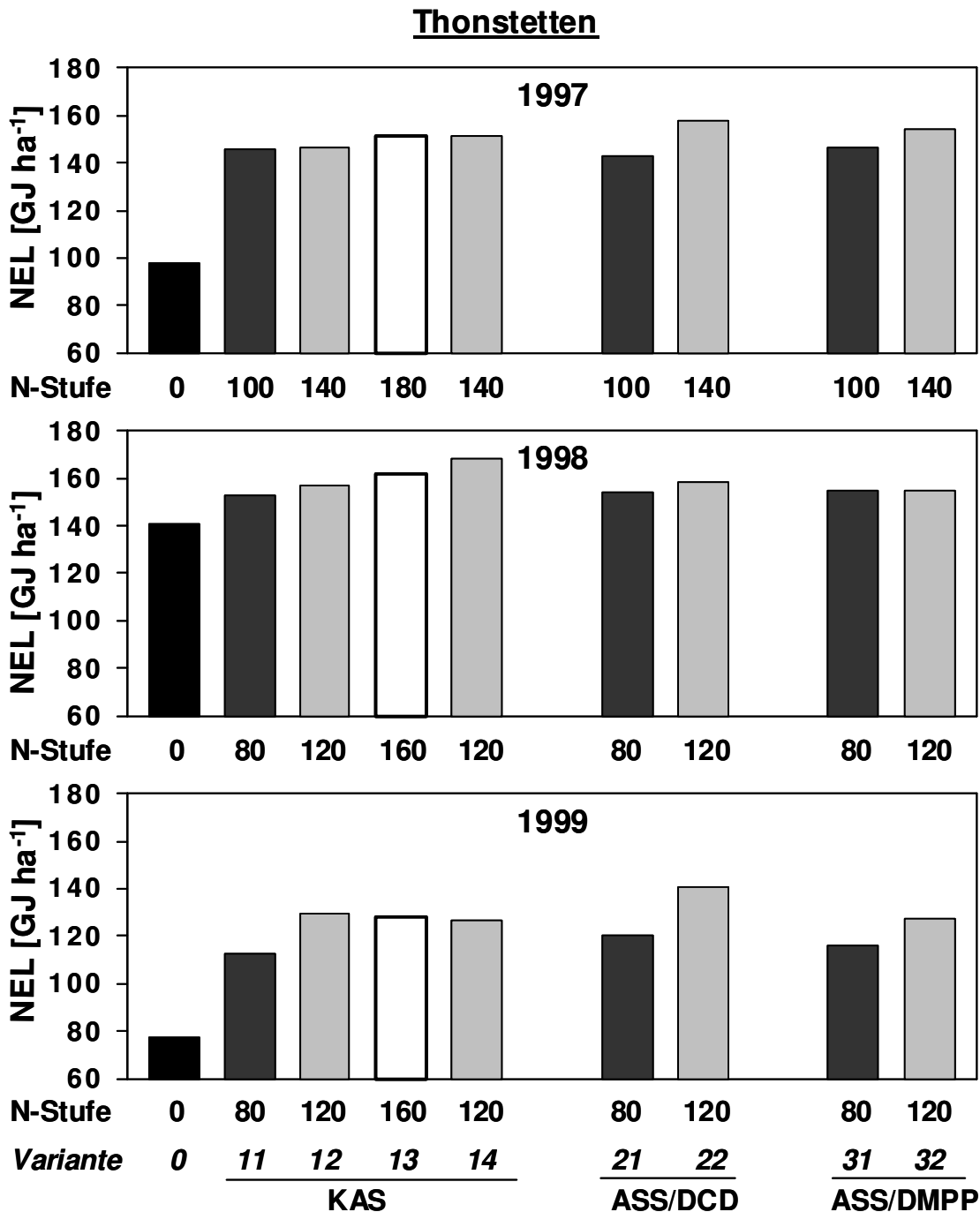


Abbildung 2.10: Energieertrag von Silomais in Thonstetten (SI)

Die N-Steigerung (KAS) führte auf beiden Standorten in der Regel zu einer Zunahme des verwertbaren Ertrages (Energieertrag). Mit der einmaligen KAS-Gabe (Variante

14) konnten in Thonstetten zum Teil höhere oder gleichwertige Erträge erzielt werden als mit den gesplitteten Varianten. Auch die N-Steigerung der NI-Varianten bewirkte überwiegend einen mehr oder weniger deutlichen Mehrertrag an Energie. Zwischen den KAS- und NI-Varianten ergaben sich auf vergleichbarem N-Niveau keine wesentlichen Unterschiede. Generell wirkten Jahreseffekte deutlich stärker auf den Energieertrag als Düngungseffekte.

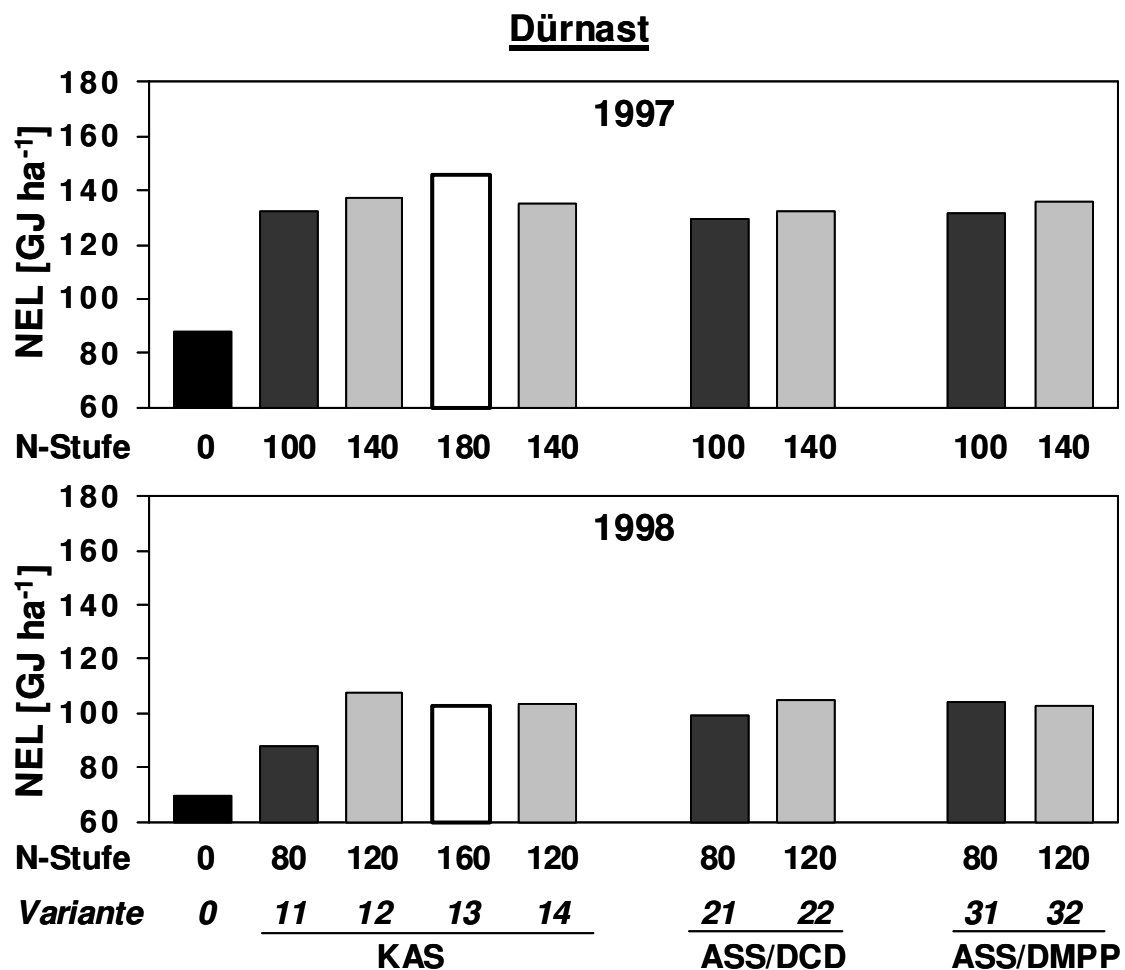


Abbildung 2.11: Energieertrag von Silomais in Dürnast (Lu)

Eine anteilige Unterfußdüngung von 60 N wirkte sich durchwegs mit Mehrerträgen gegenüber der breitflächigen Verteilung des Düngers aus (ohne Abb., vgl. Anhang Tab. 9.15).

2.6 Diskussion

Mineralische Stickstoffdünger mit Nitrifikationsinhibitoren ermöglichen die Anwendung von vereinfachten Düngungssystemen mit reduzierter Zahl von Teilgaben. In den dreijährigen Freilandversuchen zu Winterweizen konnten ertragsmäßig generell Mehrerträge für Systeme mit stabilisierten Düngern gegenüber dem konventionellen Düngungssystem mit KAS in drei Teilgaben ermittelt werden. Dieses Ergebnis deckt sich mit den aussagekräftigen langjährigen Erkenntnissen aus den Lysimeterversuchen in Weihenstephan (Gutser, 1999). Auf beiden Standorten Thonstetten (Sl) und Dürnast (Lu) waren die Ertragsunterschiede der Düngungsvarianten in den einzelnen Jahren in der Tendenz gleichermaßen ausgeprägt. In den Einzeljahren jedoch differenzierten die Erträge unterschiedlich: 1997 erzielte die schossbetonte Variante (33) höhere Erträge gegenüber der frühjahrsbetonten (32), 1998 umgekehrt und 1999 waren beide Varianten relativ ausgeglichen. Die Ertragsunterschiede der Jahre können auf die Witterung, speziell die Niederschlagsverteilung zurückgeführt werden. Der oberflächlich applizierte Dünger bedarf entsprechender Bodenfeuchte/Niederschläge um pflanzenverfügbar wirksam zu werden, was aufgrund lang anhaltender Trockenperioden z.T. nicht möglich war. Entsprechende Hinweise zum dominanten Einfluss der Niederschlagsverteilung auf den Ertrag geben MOKRY und AMBERGER (1992) in Versuchen, ebenfalls in der Region um Weihenstephan. Somit lässt sich folgern, dass der Jahreseffekt vorwiegend aufgrund der Niederschlagsverteilung einen größeren Einfluss auf den Kornertrag zeigt als die Düngungsvariante mit N-Form und -Verteilung und der Standort. Bei gleichmäßiger Wasserversorgung stellten auch ARREGUI und QUEMADA (2008) in ihren Untersuchungen keine wesentlichen Vorteile bei einer Aufteilung der N-Gabe oder Zugabe eines Nitrifikationsinhibitors hinsichtlich des Ertrages fest.

Eine Bewertung der Wirkung des neuen Nitrifikationsinhibitors DMPP ist der von DCD gleichzusetzen. Aus den Ergebnissen zu Winterweizen kann gefolgert werden, dass N-Verteilung und N-Menge den Ertrag stärker beeinflusste als die Wahl des Nitrifikationsinhibitors. In den Winterweizen-Feldversuchen hat sich bezüglich der Kornerträge keine differenzierende Wirkung der beiden Inhibitoren auf den unterschiedlichen Standorten gezeigt.

Neben dem einerseits positiven Effekt der Ertragsteigerung mit den Varianten der stabilisierten Dünger zeichnete sich andererseits ein reduzierter Gehalt an Rohprotein im Korn ab. Diese Erkenntnis aus den Freilandversuchen steht in Einklang mit den Ergebnissen aus den langjährigen Lysimeterversuchen in Weihenstephan (GUTSER, 1999): hier ergaben sich langfristig für die stabilisierten Düngungsvarianten gegenüber den konventionellen KAS-Varianten höhere Trockenmasseerträge bei gleichem N-Entzug, folglich mit geringeren N-Gehalten in den Ernteprodukten/Korn. In Freilandversuchen zu Getreide stellten AMBERGER und GUTSER (1987) den Vorteil von kombinierten Düngungssystemen hinsichtlich höherer N-Gehalte im Korn gegenüber Systemen ohne Qualitäts-Spätdüngung dar. Die Qualitätsanalysen zu Winterweizen-Feldversuchen von SPIELHAUS (1991) erbrachten für die stabilisierten Dünger gegenüber KAS auf mehreren Standorten und Jahre niedrigere Rohproteingehalte und daraus resultierend niedrigere Fallzahlen und Sedimentationswerte. Die vereinfachten Düngungssysteme mit Nitrifikationsinhibitoren bedürfen einer betonten Spätdüngung mit z.T. konventionellen Düngern zum Erreichen hoher Produktqualitäten mit entsprechenden Rohproteingehalten. Die Kombination von NI-Düngungssystemen mit konventionellen, schnell wirkenden N-Düngern als Spät-/Qualitätsdüngung kann eine erfolgreiche Alternative hinsichtlich hoher Produktqualitäten darstellen, wie die Versuchsergebnisse 1999 gezeigt haben (Abb. 2.8 u. 2.9), entsprechend den Ergebnissen nach MOKRY (1986).

Weitere Unterschiede zwischen den Düngungssystemen sollten bezüglich des Ertragsaufbaus (Bestandesdichte, Kornzahl/Ähre, Tausendkorngewicht, Korn/Stroh-Verhältnis, Siebsortierung) erwartet werden. Das vorliegende Datenmaterial, resultierend aus Freilandversuchen lässt aber keine eindeutigen Schlüsse bezüglich N-Form und Düngungssystem auf die genannten Kenngrößen ziehen. In diesem Zusammenhang müssen Erkenntnisse bezüglich der Auswirkung verschiedener angebotener N-Formen auf die Pflanzenernährung Beachtung finden. WIESLER (1997) verweist auf widersprüchliche Aussagen zu Düngungsversuchen aufgrund unterschiedlich verwendeter N-Formen. Die Auswirkungen von NH_4^+ bzw. NO_3^- betontem Angebot auf Pflanzenwachstum und -entwicklung differenzieren bereits in Prozessen im Boden, bei der Nährstoffaufnahme durch die Wurzel und in Stoffwechselprozessen in der Pflanze. In den durchgeführten Versuchen im Freiland ist mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Mischernährung mit NH_4^+ und NO_3^- erfolgt. Zum einen beinhalten die ver-

wendeten stabilisierten Dünger einen NO_3^- -N Anteil von ca. 25% und zum anderen hat die N-Nachlieferung aus dem Boden eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung. Diese Mischernährung mit NH_4^+ und NO_3^- sollte die Effekte der N-Form auf den Ertragsaufbau und die Kornqualität verdeckt haben.

Die Energieerträge von Silomais differenzierten auf standortbedingtem Niveau zwischen den Versuchsorten Dürnast und Thonstetten. In Thonstetten waren die generell höheren Erträge auf eine ergiebige Nährstoffnachlieferung, resultierend aus langjähriger organischer Düngung, zurückzuführen. Mit zunehmender Nährstoffnachlieferung aus dem Bodenpool sind Ertragsunterschiede resultierend aus der N-Düngerform nur bedingt nachzuweisen, worauf auch HEGE und MUNZERT (1991) in N-Düngungsversuchen mit stabilisierten Düngern zu Silomais hinweisen. Aus ihrer Arbeit geht auch hervor, dass die positive Auswirkung von stabilisierten Düngern gegenüber KAS auf den Maisertrag in den einzelnen Jahren sehr unterschiedlich war, vorwiegend abhängig von der Niederschlagsverteilung im Mai. Insbesondere MEISSER und WYSS (1998) weisen den starken Einfluss der Witterung auf die Wachstumsentwicklung und Reifung von Maispflanzen nach.

Die positiven Ertragseffekte traten in den Silomaisversuchen nicht so deutlich hervor wie zu Winterweizen, rückführend auf die mögliche Nährstoffaufnahme aus dem höheren Mineralisationspool des Bodens in der späteren Vegetationszeit von Mais gegenüber Winterweizen. Selbst eine Reduzierung der mineralischen N-Menge um 20 kg N ha^{-1} führte zu keiner deutlicheren Differenzierung. Tendenziell überzeugten aber die stabilisierten Dünger, sowohl DCD als auch DMPP gleichwertig, mit höheren Erträgen als mit KAS gedüngte Varianten. AUFHAMMER et al. (1996) hingegen konnten keinen Einfluss der Düngerform auf den Ertrag von Silomais feststellen, ebenfalls aufgrund hoher N-Nachlieferung des Bodens. Folglich sind die tendenziell höheren Erträge mit dem stabilisierten Dünger in den Silomaisversuchen in Abhängigkeit des Standortes (N-Nachlieferung des Bodens) und des jahresspezifischen Witterungseinflusses zu sehen.

3 Effizienz der Stickstoffverwertung von Düngungsstrategien zu Winterweizen in Freilandversuchen mit dem neuen Nitrifikationsinhibitor 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP)

3.1 Zusammenfassung

Die Effizienz von Düngungsstrategien kann sowohl durch Ertragsparameter als auch mit Hilfe einer Nährstoffbilanzierung bewertet werden. Ziel dieser Arbeit ist die Bilanzierung des zu Winterweizen applizierten Dünger-N und die Bewertung von Düngungsstrategien mit dem neuen Nitrifikationsinhibitor 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP) in mehrjährigen Freilandversuchen.

Auf zwei Standorten wurden vereinfachte mineralische Düngungssysteme mit Nitrifikationsinhibitoren (DMPP und DCD) konventionellen Düngungssystemen mit Kalkammonsalpeter bzw. Ammonsulfatsalpeter in drei Teilgaben gegenübergestellt. Zusätzlich kam in ausgewählten Varianten ^{15}N Tracer zum Einsatz.

Die Düngungssysteme mit Nitrifikationsinhibitoren konnten im Vergleich zu konventionellen Systemen mit Kalkammonsalpeter in drei Teilgaben in der Ertragswirkung deutlich positiv beurteilt werden, nicht aber in der N-Wirkung. Im Vergleich der Nitrifikationsinhibitoren bewirkten die DMPP-Varianten tendenziell höhere Erträge und bessere N-Ausnutzung als die DCD-Varianten.

Es wurden jahresbedingt deutliche Unterschiede ermittelt: Die NH_4^+ -N Ausnutzung durch Winterweizen war in trockenen Versuchsjahren bei den NI-Varianten geringer als in den KAS- bzw. ASS-Varianten ohne NI, jedoch die Trockenmasseerträge waren mindestens gleich bzw. höher. Im gleichmäßig feuchten Jahr 1999, konnten kaum Unterschiede zwischen dem konventionellen Düngungssystem mit KAS und dem DMPP-Düngungssystem bezüglich der N-Verwertung ermittelt werden. Zu allen drei Zwischenernten während der Vegetationsperiode des Winterweizens konnte für ASS ohne Nitrifikationsinhibitor eine bessere N-Verwertung nachgewiesen werden als für die Varianten mit NI: im Pflanzenaufwuchs war sowohl die absolut aufgenommene N-Menge als auch die Wiederfindung des Dünger NH_4^+ -N höher.

Die für die N-Dynamik im Boden ermittelte Nettoimmobilisation bzw. -mineralisation der einzelnen Düngungsvarianten ließ vermuten, dass Varianten mit hohen N-Gaben zu einem frühen Vegetationszeitpunkt eine tendenziell höhere Immobilisation des applizierten Stickstoffs nach sich ziehen als späte Teilgaben.

Mittels ^{15}N -Bodenanalysen waren für frühe Teilgaben nach der Ernte auch anteilig höhere Düngerreste im Boden nachzuweisen. Generell konnten für die Düngungssysteme mit Nitrifikationsinhibitoren bis zur Ernte höhere N-Düngerreste im Boden nachgewiesen werden als für die konventionellen Varianten, bedingt durch die höheren NH_4^+ -Anteile und die mengenmäßig früher applizierten Teilmengen der NI-Varianten.

3.2 Einleitung

In der pflanzlichen Produktion sollte eine effiziente Verwertung des eingesetzten Düngers, speziell des Stickstoffs ein Hauptziel sein. Für diese Betrachtung mit dem Ziel der Bilanzierung, gilt es die komplexen Zusammenhänge des Stickstoffkreislaufes im Freiland mit allen Interaktionen möglichst zu berücksichtigen und zu quantifizieren. Der Stickstoffkreislauf in der Natur ist in vielen Lehrbüchern ausführlich beschrieben, stellvertretend sei hier MENGEL (1991) genannt. In den Stickstoffkreisläufen sind die unterschiedlichen N-Formen und deren spezifische Eigenschaften beschrieben. Insbesondere wird auf die in dieser Arbeit relevanten Formen NO_3^- und NH_4^+ verwiesen, wobei die Eigenschaft der Immobilisation des applizierten NH_4^+ -Düngers im Boden für die Verfügbarkeit der Pflanzen und für die Bilanzierung von besonderer Bedeutung ist.

Ein Maß zur Beurteilung der N-Verwertung kann die Wiederfindung des applizierten Dünger-N in der Pflanze bzw. im Erntegut sein. Eine Vielzahl dieser Untersuchungen wird mittels der ^{15}N -Tracer Methodik durchgeführt. Die Angaben über die Höhe der N-Wiederfindung unterliegen einer großen Spannbreite. Mit 49% N-Wiederfindung für Winterweizen bei mittlerer N-Stufe von 140 kg N ha^{-1} bestimmten DELOGU et al. (1998) in ihren Untersuchungen einen durchschnittlichen Wert. RAUN et al. (1999)

weisen darauf hin, dass in verschiedenen Produktionssystemen eine N-Wiederfindung von 50% selten überschritten wurde. Sie haben in Ihren Versuchen festgestellt, dass mit zunehmendem N-Angebot die prozentuale Wiederfindung in der Pflanze abnimmt. BASHIR et al. (1997) verweisen auch auf eine vom Zeitpunkt der Probenahme abhängige N-Wiederfindungsrate und ermittelten für Winterweizen zum Fahnenblattstadium einen Wert von 75% und zur Ernte von 47%, was auch durch eine Umverteilung der Nährstoffe in der Pflanze begründet wird.

Die enorm große Spannbreite in den Angaben zur N-Wiederfindung beruht wohl auf der Vielzahl von Einflussfaktoren auf den N-Kreislauf im Freiland. Wesentlich bestimmt der Standort mit seinen spezifischen Klimaten die N-Verwertung. So weisen CARRANCA et al. (1999) unter mediterranen Bedingungen für Winterweizen auf eine Wiederfindung zwischen 22% und 40% hin. Aus den Untersuchungen von PILBEAM (1996) geht hervor, dass in humiden Klimaten mehr Dünger-N in der Pflanze zu finden ist als in ariden Klimaten mit entsprechend höherer N-Wiederfindung im Boden und leitet daraus eine geringere N-Effizienz in Trockenjahren bzw. Trockenregionen ab. In humiden Klimaten gibt er für Winterweizen 50% N-Wiederfindung in der Pflanze an. Nicht nur der N-Dünger selbst, sondern auch für spezifische Düngungsstrategien dem Dünger zugesetzte Nitrifikationsinhibitoren unterliegen diesen diversen Einflüssen. Die Wirkung von Nitrifikationsinhibitoren wie DCD und DMPP nimmt nach Untersuchungen von IRIGOYENA et al. (2003) mit zunehmender Bodentemperatur deutlich ab. Wie bei GIOACCHINI et al. (2006), so auch bei BARTH et al. (2001) wird immer wieder darauf verwiesen, dass die Wirkung von Nitrifikationsinhibitoren und der daraus resultierenden N-Effizienz in Abhängigkeit der Bodenart variiert.

Die Bodenart stand auch bei ZERULLA und HÜTHER (1996) als zentraler Faktor in deren Untersuchungen, wobei für Böden mit geringerer Ertragsfähigkeit eine schlechtere Düngerausnutzung ermittelt wurde. Aus diesen Erkenntnissen wird für das Ziel einer optimalen N-Effizienz eine standortspezifische N-Düngung gefordert. Wiederum aufgrund der vielen Einflussfaktoren haben sich FISCHBECK et al. (1990 und 1993) mit standortspezifischen Düngungsstrategien zu Winterweizen in ihren umfangreichen Untersuchungen beschäftigt, mit dem Ziel eine hohe N-Effizienz bei optimierten Produktqualitäten zu erzielen.

Mit dem Ziel einer N-Bilanzierung und unter Berücksichtigung des zeitlich variablen Nährstoffbedarfs der Pflanzen wurden in dieser Arbeit spezifische Düngungsstrate-

gien geprüft, die vorrangig den Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren, hier insbesondere von DMPP vorsehen. Im Zusammenhang mit der Nährstoffverfügbarkeit nach den Düngerapplikationen wurde die Verwertung von Teilgaben mit betrachtet. Die Bilanzierung der spezifischen Düngungsstrategien sollte nicht wie in zahlreichen Untersuchungen unter kontrollierbaren Bedingungen, sondern im Freiland erfolgen.

3.3 Material und Methoden

3.3.1 Standorte

Die Düngungsversuche wurden auf tiefgründigen Böden mit unterschiedlicher Verlustgefährdung für Nitratstickstoff durchgeführt – ein schluffiger Lehm in 'Dürnast' und ein lehmiger Sand in 'Thonstetten' (Tab. 3.1). Beide Standorte liegen im Raum Freising und sind geologisch dem Tertiärhügelland zuzuordnen (\varnothing 800 mm Jahresniederschlag, \varnothing 7,4 °C Lufttemperatur 2 m über Boden). Es handelt sich um durchwegs günstige Ackerstandorte mit geringer Auswaschungsgefährdung während der Vegetationszeit.

Tabelle 3.1: Charakteristik der Versuchsstandorte

	<u>Thonstetten</u> lehmiger Sand SI	<u>Dürnast</u> schluffiger Lehm Lu
Ton [%]	10	24
Schluff [%]	26	51
Sand [%]	64	25
Corg [%]	1,11	1,66
N [%]	0,12	0,15
C / N	9	11

3.3.2 Dünger

Die Versuchsdünger für die Parzellenversuche lagen alle in Granulatform vor. An die Düngergranulate wurde der Nitrifikationsinhibitor aufgebracht.

Tabelle 3.2: Zusammensetzung der Versuchsdünger

Düngerart	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Gesamt-N	Wirkstoffmenge bezogen auf Ware
	[%]	[%]	[%]	[%]
ASS/DMPP	18,5	7,5	26,0	0,305 **
KAS *	13,5	13,5	27,0	-

* KAS als handelsübliches Produkt

** 0,279 - 0,297 analysiert

Der im KAS im Vergleich zu ASS fehlende Schwefel wurde in der Grunddüngung (Superphosphat, Kalimagnesia, Kieserit) ausgeglichen.

3.3.3 Versuchsaufbau

Tabelle 3.3: Düngungsvarianten zu Winterweizen

Variante	N-Stufe	N-Verteilung [kg N ha ⁻¹]			
		Veg.-Beginn	BBCH-Code		
			30/31	32	49/51
Kontrolle	0	0			
KAS	12	160	70	40	50
	13	200	80	40	80
ASS/ DMPP	31	160	160		
	32	160	110		50
	33	160	70	90	

Die Effizienz des gedüngten N wurde an ausgewählten Varianten ermittelt: 160 kg N ha⁻¹ als ASS/DMPP in einer Gabe zu Vegetationsbeginn (Variante 31) und gesplittet

in zwei Teilgaben mit frühjahrsbetonter (Variante 32) oder schossbetonter (Variante 33) Verteilung (Tab. 3.3). Die stabilisierten Düngungsvarianten wurden sowohl der ungedüngten Kontrolle als auch KAS in drei Teilgaben auf mittlerem (160 kg N ha^{-1}) und hohem (200 kg N ha^{-1}) N-Niveau (Varianten 12 und 13) gegenübergestellt.

3.3.4 Mikroplots mit ^{15}N -Tracer

In Dürnast wurden zu Winterweizen auf ausgewählten Varianten Mikroplots mit ^{15}N Tracer angelegt.

Table 3.4: Mikroplots – Varianten und Zusammensetzung der flüssigen Dünger

Variante	Gesamt N	N-Verhältnis $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_3^-$ [%]	Nitrifikations- inhibitor	^{15}N - Anreicherung	N Verteilung [kg ha^{-1}]
1997					
0	-	-	-	-	-
ASS/DCD*	27	71 / 29	DCD	NH_4^+ - 10at%	160
ASS/DCD*	27	71 / 29	DCD	NH_4^+ - 10at%	110/50
ASS/DMPP	26	71 / 29	DMPP	NH_4^+ - 10at%	160
ASS/DMPP	26	71 / 29	DMPP	NH_4^+ - 10at%	110/50
1998					
0	-	-	-	-	-
ASS	26	71 / 29	-	NH_4^+ - 10at%	160
ASS/DCD*	27	71 / 29	DCD	NH_4^+ - 10at%	160
ASS/DMPP	26	71 / 29	DMPP	NH_4^+ - 10at%	160
1999					
0	-	-	-	-	-
KAS**	27	50 / 50	-	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ - 10at%	70/40/50
ASS/DMPP	26	71 / 29	DMPP	$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ - 10at%	110/50

* von Gesamt N ca. 2% DCD-N

** zusätzlich S-Ausgleich

Die Verteilung der stets flüssigen Düngergemische erfolgte mittels Pipette punktuell auf der Mikroplot-Oberfläche, um eine mit Düngergranulaten vergleichbare Verteilung des Düngers auf der Bodenoberfläche zu simulieren.

In den drei Versuchsjahren wurden unterschiedliche Varianten mit ^{15}N angereichert (Tab. 3.5): 1997 ASS mit den Nitrifikationsinhibitoren DCD und DMPP, appliziert in einer Gabe zu Vegetationsbeginn bzw. frühjahrsbetont in zwei Teilgaben. 1998 ASS mit und ohne NI (DCD und DMPP) in einer Gabe zu Vegetationsbeginn. In beiden Jahren war lediglich der $\text{NH}_4^+\text{-N}$ zu 10 at% mit ^{15}N angereichert. 1999 wurde das regional übliche Düngungssystem für Winterweizen mit KAS zu drei Teilgaben (70/40/50) einem System für stabilisierte Dünger, d.h. eine auf zwei Teilgaben reduzierte Applikation von ASS/DMPP (110/50) gegenübergestellt. Von KAS und ASS/DMPP war sowohl der $\text{NH}_4^+\text{-N}$ als auch der $\text{NO}_3^-\text{-N}$ mit 10 at% ^{15}N markiert; somit lässt sich eine Aussage über die Verwertung des insgesamt zugeführten Düngerstickstoffs treffen.

3.3.5 Analytik

Gesamt-Stickstoff (N_t) - Pflanzen

Elementaranalyse nach Dumas mittels N-Analyzer (Makro-N, Firma Foss Heraeus).

N_{min} ($\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$) - Boden

Extraktion mit einer 0,01 M CaCl_2 (Boden : Lösung (Gew. : Vol.) = 1 : 5), Schütteldauer 1 Stunde, Bestimmung von NH_4^+ kolorimetrisch nach Reaktion mit Na-Hypochlorit und Phenol/Na-Nitroprussid am Spektralphotometer bei 546 nm (Indophenol-Blau-Methode, BERNT und BERGMEYER, 1970), Bestimmung von NO_3^- mittels Hochdruckflüssigkeitschromatographie (HPLC) nach VILSMEIER (1984).

Analyse am Massenspektrometer - Pflanzen und Boden

Vermahlung des Probenmaterials mit einer Scheibenschwingmühle. Die N_t - (in % der Trockensubstanz) und ^{15}N -Gehalte (in at% der N-Menge) der Proben wurden mit einem ANCA-MS (Europa Scientific SL 20-20, Crewe, GB) durchgeführt.

Rechnerische Vorgehensweise und die Definition für ermittelte Parameter:

- N-Saldo:
Düngung + Entzug N_0 - Entzug (Korn und Stroh)
- N-Mehrentzug gegenüber N_0 :
Entzug der N-Variante - Entzug der Kontrolle N_0
- N-Ausnutzung mit Differenzverfahren:
Mehrentzug gegenüber N_0 in % der Düngung
- N-Ausnutzung mit ^{15}N -Verfahren:
Da nur der NH_4^+ -N Anteil markiert war, bezieht sich die Ausnutzung [%] nur auf den NH_4^+ -N des Düngers (Ausnahme Versuche 1999)
- N-Nettoimmobilisation, -mineralisation des Bodens:
(N_{\min} vor der Düngung + Düngung) - (Entzug + N_{\min} nach der Ernte)
= positiver Saldo (Nettoimmobilisation)
= negativer Saldo (Nettomineralisation)
- N_{\min} im Boden:
Summe aus NH_4^+ -N bis 30 cm Tiefe und
 NO_3^- -N bis 90 cm Tiefe

3.3.6 Statistische Auswertung

Die varianzanalytische Auswertung der Versuchsergebnisse wurde mit dem Programmpaket „SAS-proc glm“ (SAS Institute Inc., Cary, USA) durchgeführt. Zur Ermittlung der Grenzdifferenz ($P < 0,05$) fand der Tukey-Test Verwendung.

3.4 Witterung

Die Niederschlagsverteilung hat die Düngewirkung der einzelnen Teilgaben zu Winterweizen wesentlich beeinflusst und resultierte somit bedeutend in Auswirkung auf Ertrag, Produktqualität und N-Effizienz. Besonders sei auf länger anhaltende Trockenperioden im Mai 1997 und 1998 verwiesen (Abb. 3.1). 1999 waren die Niederschläge relativ gleichmäßig über die Vegetationszeit verteilt.

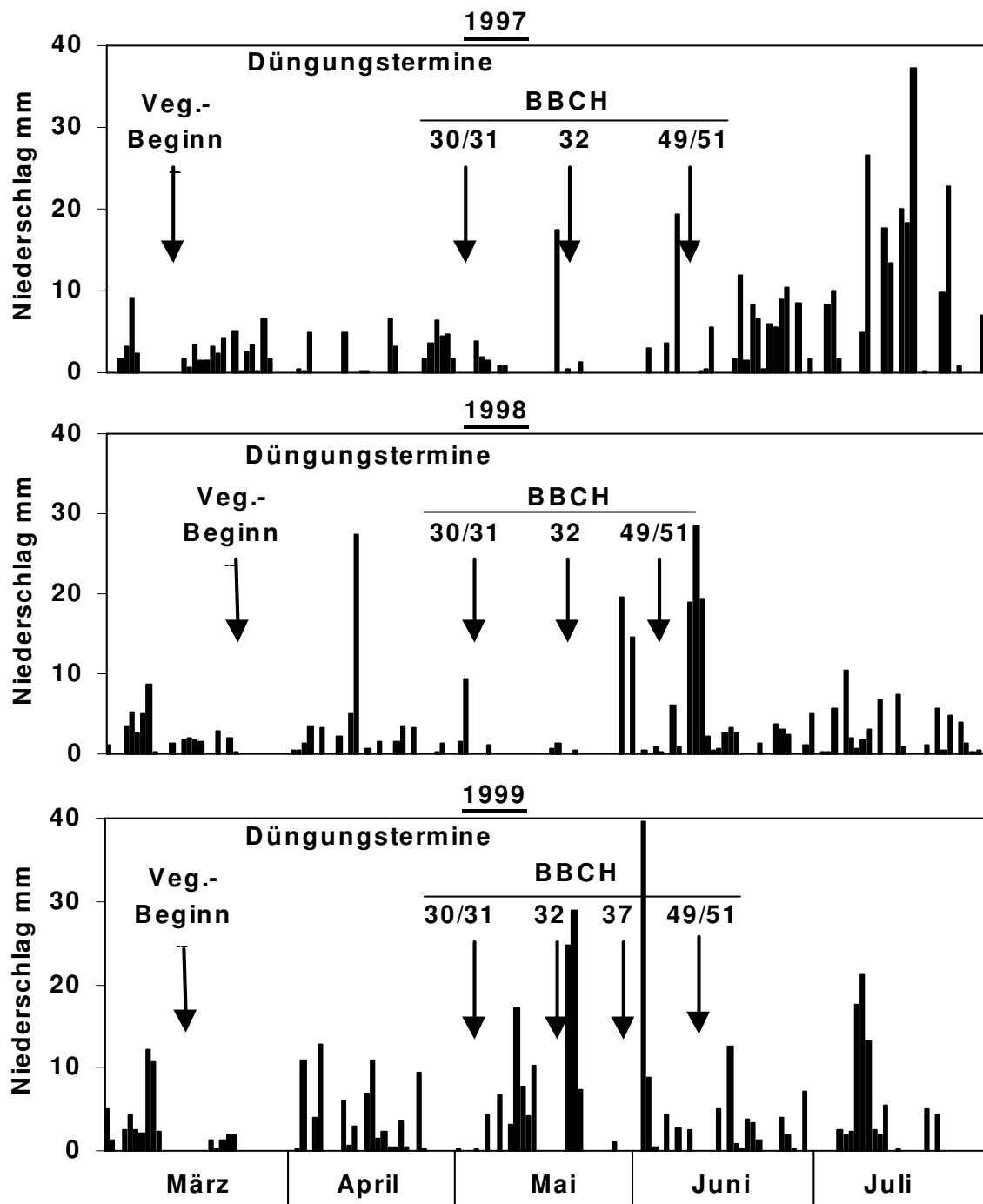


Abbildung 3.1: Regionale Niederschlagsverteilung und Düngungstermine zu Winterweizen

Aus der Niederschlagsverteilung resultieren die jahresspezifisch bedingten Ertragsunterschiede bezüglich der Düngerverteilung. Die trockenen Abschnitte im Mai 1997 brachten noch geringe Niederschläge nach der Düngerapplikation zu BBCH 30/31, jedoch keine Niederschläge nach BBCH 32, was in diesem Jahr Vorteile für die schossbetonte Verteilungsvariante mit der zweiten Teilgabe zu BBCH 30/31 brachte. Der geringe Niederschlag nach der Applikation reichte aus, Stickstoff aus den Granulaten zu lösen und für die Pflanzen verwertbar zu machen. Die zweite Teilgabe der frühjahrsbetonten Verteilung konnte aufgrund des fehlenden Niederschlags nicht termingerecht verwertet und in Ertrag umgesetzt werden.

Im Jahr 1998 fiel weder nach der Applikation zu BBCH 30/31 noch zu BBCH 32 ein nennenswerter Niederschlag. Da in der frühjahrsbetonten wie auch in der einmaligen NI-Variante bereits in der ersten Applikation der größere bzw. der ganze N-Anteil appliziert wurde und pflanzenverfügbar war, waren 1998 diese Varianten vorteilhaft. Die wesentliche N-Menge der schossbetonten Variante, appliziert zur zweiten Teilgabe, konnte aufgrund des fehlenden Niederschlages nicht termingerecht verwertet werden.

Eine ausgeglichene Niederschlagsverteilung im Jahr 1999 bedingte eine termingerechte Verwertung der applizierten N-Teilmengen.

3.5 Ergebnisse

In den Parzellenversuchen zu Winterweizen wurden für jeden Standort und jedes Jahr N-Bilanzen erstellt und statistisch verrechnet. In den folgenden Erläuterungen finden sich jeweils Auszüge aus den im Anhang befindlichen Übersichtstabellen (Anhang Tab. 9.1 – 9.14).

3.5.1 Bewertung der Versuchsstandorte

Die beiden Standorte Dürnast (schluffiger Lehm, Lu) und Thonstetten (lehmiger Sand, Si) boten unterschiedliche Voraussetzungen für die Stickstoff-Dynamik im Boden. Für die Stickstoffaufnahme von Winterweizen in der ungedüngten Kontrolle wurden für Dürnast stets deutlich geringere Werte ermittelt als für den Standort Thonstetten (Tab. 3.5).

Tabelle 3.5: N-Aufnahme von Winterweizen (Korn + Stroh) der ungedüngten Parzelle

Jahr	N-Aufnahme [kg N ha ⁻¹]	
	Dürnast (Lu)	Thonstetten (SI)
1997	50	83
1998	56	95
1999	68	84

Unter Einbezug der gemessenen Werte an mineralisiertem Stickstoff im Boden (N_{\min}) in die Kalkulation ergab sich für den Standort Thonstetten durchwegs eine höhere Nettomineralisation an Stickstoff als für Dürnast (Tab. 3.6). Eine besonders späte N-Freisetzung erfolgte 1998 in Thonstetten, die nicht mehr ertragswirksam werden konnte, aber für höhere Rohproteingehalte im Korn sorgte. Die Versuchsfläche am Standort Thonstetten zeigte in allen drei Prüfjahren ein deutlich höheres N-Freisetzungspotenzial als in Dürnast.

Tabelle 3.6: Nettomineralisation der ungedüngten Parzellen

Jahr	Nettomineralisation [kg N ha ⁻¹]	
	Dürnast (Lu)	Thonstetten (SI)
1997	38	61
1998	43	109
1999	54	79

Das unterschiedlich hohe N-Freisetzungspotenzial der beiden Standorte lässt ein differenziertes Verhalten der N-Dünger in der N-Dynamik im Boden und deren Verwertung durch Winterweizen erwarten.

Eine Bewertung der N-Dynamik ausgewählter Düngungsvarianten auf beiden Standorten ist in Tab. 3.7 dargestellt, positive Werte stellen eine Nettoimmobilisation dar, negative Werte eine Nettomineralisation. Besonders im Jahr 1997 hatte sich für beide Standorte eine höhere Immobilisation errechnet als für die anderen Versuchsjahre. In Thonstetten ergab das Saldo 1998 und 1999 für alle Varianten eine N-Nettomineralisation, insbesondere 1998. Diese Besonderheit war auf eine relativ späte N-Freisetzung zurückzuführen mit sehr hohen N_{\min} - Gehalten im Boden nach der Ernte. Die spät freigesetzte N-Menge konnte nicht mehr steigernd auf die Erträge wirken. Wie bereits in der ungedüngten Kontrolle zu erkennen war, resultierten daraus aber höhere Rohproteingehalte im Korn. Speziell in diesem Jahr konnten in Thonstetten mit den stabilisierten N-Düngern in vereinfachten Düngungsstrategien gleichwertige Rohproteingehalte erzielt werden wie durch KAS mit spezifisch späten Düngerteilgaben. Die Witterung der einzelnen Jahre hatte sehr großen Einfluss auf die N-Dynamik. Die lang anhaltende Trockenperiode im Jahr 1998 zeigte dies am Standort Thonstetten sehr deutlich: Die Düngerteilgaben konnten teils nicht mehr ertragswirksam werden und die spätere Pflanzenverfügbarkeit führte zu hohen Rohproteingehalten im Korn. Zudem zeigte sich eine späte N-Freisetzung zur Ernte.

Tabelle 3.7: N-Nettoimmobilisation / -mineralisation des Bodens

Variante		Nettoimmobilisation / -mineralisation [kg N ha ⁻¹]					
		Dürnast			Thonstetten		
		1997	1998	1999	1997	1998	1999
KAS ₁₆₀	12	34	2	3	17	- 61	- 32
ASS/DMPP	31	44	4	23	37	- 30	- 22
ASS/DMPP _f	32	35	11	20	27	- 57	- 16
ASS/DMPP _s	33	(30) *	(18) *	(10) *	(9) *	(- 37) *	(- 18) *
KAS ₂₀₀	13	54	(4) *	24	44	(- 49) *	-31

* Wert kalkuliert, N_{\min} zur Ernte nicht ermittelt

f = frühjahrsbetont, s = schossetont

Die in Tab. 3.7 für die N-Dynamik im Boden ermittelte Nettoimmobilisation bzw. -mineralisation der einzelnen Düngungsvarianten ließ vermuten, dass Varianten mit hohen N-Gaben zu einem frühen Vegetationszeitpunkt eine tendenziell höhere Immobilisation des applizierten Stickstoffs nach sich ziehen als späte Teilgaben.

3.5.2 Bewertung von TM-Ertrag und N-Entzug

Für eine Beurteilung der Düngungsvarianten kann sowohl der Ertrag als auch die Effizienz der N-Verwertung, d.h. der N-Entzug durch den Pflanzenaufwuchs herangezogen werden (Tab. 3.8).

Die Varianten des stabilisierten N-Düngers ASS/DMPP mit vereinfachten Düngungsstrategien und weniger Teilgaben hatten in der Ertragswirkung auf beiden Standorten und drei Versuchsjahren deutliche Vorteile gegenüber den KAS-Varianten mit drei Teilgaben: auf gleichem N-Niveau von 160 kg N ha^{-1} war ASS/DMPP in 11 Fällen besser und in 6 Fällen mindestens gleichwertig gegenüber KAS. In der N-Wirkung, d.h. im N-Entzug dagegen lagen die Vorteile deutlich bei den KAS-Varianten: ASS/DMPP war hier in 8 Fällen schlechter als KAS und in 8 Fällen gleichwertig. Im Vergleich von ASS/DMPP gegenüber KAS konnte die Ertragswirkung deutlich positiv beurteilt werden, nicht aber die N-Wirkung.

Tabelle 3.8: Relative Ertragswirkung (TM-Ertrag von Korn + Stroh) und N-Wirkung (N-Entzug von Korn + Stroh) der Düngungsvarianten zu Winterweizen. KAS₁₆₀ = 100 relativ.

Variante	Ertragswirkung			N-Wirkung		
	TM-Ertrag (Korn + Stroh)			N-Entzug (Korn + Stroh)		
	1997	1998	1999	1997	1998	1999
Dürnast, KAS ₁₆₀ = 100						
ASS/DMPP ₃₁	110	115	108	95	99	88
ASS/DMPP _{f 32}	109	105	104	99	96	91
ASS/DMPP _{s 33}	112	96	111	102	91	98
KAS _{200 13}	104	112	106	117	122	112
Thonstetten, KAS ₁₆₀ = 100						
ASS/DMPP ₃₁	101	116	112	87	108	96
ASS/DMPP _{f 32}	104	113	100	92	107	91
ASS/DMPP _{s 33}	112	95	104	102	97	90
KAS _{200 13}	98	105	106	108	114	118

Zusammenfassende Bewertung des Düngers mit DMPP relativ zu KAS₁₆₀:

Bereich	ASS/DMPP im Vergleich zu KAS ₁₆₀ [Anzahl]		
	schlechter	gleichwertig	besser
	< 96	96 - 104	> 104
Ertragswirkung	1	6	11
N-Wirkung	8	8	2

f = frühjahrsbetont, s = schossbetont

Mit der Differenzmethode ließ sich die N-Ausnutzung von Winterweizen für die Düngungsvarianten kalkulieren (Tab. 3.9). Auf dem Standort Dürnast konnte die N-Ausnutzung für KAS zweimal durch die schossbetonte Verteilung von ASS/DMPP (Variante 33), einmal durch die frühjahrsbetonte Verteilung (Variante 32) und einmal durch die einmalige Applikation (Variante 31) erreicht werden. In Thonstetten wurde mit dieser Berechnung die N-Ausnutzung von KAS je einmal durch die schossbetonte und die frühjahrsbetonte Verteilung und die einmalige Gabe von ASS/DMPP erreicht bzw. 1998 deutlich überschritten.

Tabelle 3.9: N-Ausnutzung von Winterweizen (Korn + Stroh) nach Differenzmethode

Variante		N-Ausnutzung Differenzmethode [%]					
		Dürnast			Thonstetten		
		1997	1998	1999	1997	1998	1999
KAS ₁₆₀	12	54	75	65	55	66	72
ASS/DMPP	31	50	75 ¹	52	41	77 ¹	67
ASS/DMPP _f	32	53 ¹	71	56	47	75 ¹	61
ASS/DMPP _s	33	56 ¹	66	62 ¹	58 ¹	62	60
KAS ₂₀₀	13	55	80	63	51	67	75

¹ N-Ausnutzung ASS/DMPP mindestens gleichwertig der N-Ausnutzung KAS₁₆₀

f = frühjahrsbetont, s = schossbetont

3.5.3 Betrachtung der N-Verwertung des Düngers mittels ¹⁵N-Tracer

Mit der Differenzmethode lässt sich die N-Dynamik abschätzen, nicht jedoch die Verwertung des eingesetzten N-Düngers, einzelner Teilgaben oder Düngerkomponenten. Um für diese Fragestellung detaillierte Informationen zu erhalten wurden in Dürnast in ausgewählten Varianten Mikroplots mit ¹⁵N-Tracer angelegt.

3.5.3.1 N-Verwertung der gesamten Düngergaben mittels ^{15}N -Tracer

In den Mikroplots war 1997 und 1998 jeweils der NH_4^+ -N Anteil mit ^{15}N angereichert, 1999 der NH_4^+ -N und der NO_3^- -N Anteil. Somit ließen sich insbesondere für 1999 umfangreiche Aussagen über die Wiederfindung des gesamten Dünger-N im Winterweizenaufwuchs treffen. Um für die Versuchsjahre 1997 und 1998 den von der Pflanze aufgenommenen N aus dem Boden zu quantifizieren, wurde zu frühen Ernteterminen (BBCH 31-37) eine Verwertung des Dünger NO_3^- -N von 55% und zu späteren Terminen (BBCH 51 und Kornreife) von 65% angenommen.

Tabelle 3.10: N-Verwertung von Winterweizen in Korn und Stroh zur Kornreife - 1997 in ^{15}N -Mikroplots.

Düngung: 160 kg N ha^{-1} in 1 Gabe			
	117 NH_4^+ -N		
	43 NO_3^- -N		
[kg N ha^{-1}]	ASS/DCD	ASS/DMPP	Kontrolle N_0
N-Entzug (Korn+Stroh)	132	157	50
davon aus Dünger NH_4^+ -N (Wiederfindung)	57 (49%)	60 (51%)	
davon aus Boden + NO_3^- -N	75	97	
davon aus Boden (28kg aus NO_3^- -N)	47	69	
Wiederfindung des Dünger NH_4^+ -N im Korn	46 (39%)	47 (40%)	
Wiederfindung des Dünger NH_4^+ -N im Stroh	12 (10%)	13 (11%)	

Im Vergleich der ASS/DCD und ASS/DMPP-Varianten in einmaliger Gabe von 160 kg N ha⁻¹ ließ sich zur Kornreife ein N-Entzug von 132 kg N ha⁻¹ für DCD gegenüber 157 kg N ha⁻¹ für DMPP quantifizieren. Aufgrund des mittels ¹⁵N angereicherten NH₄⁺-N des Düngers konnte für diesen eine Wiederfindung in der Pflanze von 49% bzw. 51% gemessen werden (Tab. 3.10). In der Annahme, dass 28 kg N ha⁻¹ aus dem Dünger NO₃⁻-N in die Pflanze aufgenommen wurden, stammten in der DCD-Variante 47 kg N ha⁻¹ aus dem Boden gegenüber 69 kg N ha⁻¹ in der DMPP-Variante. ASS/DMPP erzielte eine höhere N-Aufnahme in die Pflanze trotz ähnlicher N-Ausnutzung des Dünger-N als Folge einer verstärkten N-Freisetzung des Bodens. Gegenüber der einmaligen Applikation brachte bezüglich der N-Verwertung ein Splitting der Düngergabe von 160 kg N ha⁻¹ zu 110/50 nur in der DCD-Variante leichte Vorteile, in der DMPP-Variante dagegen Nachteile (nicht dargestellt).

Mit Zwischenernten war es möglich die N-Aufnahme des Winterweizenaufwuchs während der Vegetation zu bestimmen. In den Varianten ASS, ASS/DCD und ASS/DMPP mit 160 kg N ha⁻¹ in einer Gabe zu Vegetationsbeginn war 1998 der NH₄⁺-N Anteil mit ¹⁵N angereichert. Für ASS ohne Nitrifikationsinhibitor konnte zu allen drei Ernteterminen eine bessere N-Verwertung nachgewiesen werden als für die Varianten mit NI (Tab. 3.11): im Pflanzenaufwuchs war sowohl die absolut aufgenommene N-Menge höher als auch die Wiederfindung des Dünger NH₄⁺-N. Für die Varianten mit Nitrifikationsinhibitor DCD und DMPP ergaben sich jeweils zu den Ernteterminen annähernd vergleichbare Wiederfindungsraten des markierten Dünger-N.

Entsprechend zum Jahr 1997 (Tab. 3.10) war die Differenz der N-Aufnahme zwischen der DCD- und der DMPP-Variante auch 1998 auf die höhere N-Aufnahme der DMPP-Variante aus dem Boden zurückzuführen (Tab. 3.11). Die N-Aufnahme aus dem Boden N-Pool war mit 85 kg N ha⁻¹ in der DMPP-Variante gleich der ASS-Variante ohne NI.

Tabelle 3.11: N-Aufnahme von Winterweizen während der Vegetation zu 3 Ernteterminen - 1998 in ^{15}N -Mikroplots.

Düngung: 160 kg N ha ⁻¹ in 1 Gabe				
117 NH ₄ ⁺ -N				
43 NO ₃ ⁻ -N				
[kg N ha ⁻¹]	ASS	ASS/DCD	ASS/DMPP	Kontrolle N ₀
<u>1. Termin: BBCH 30/31 (11.Mai)</u>				
N-Aufnahme (Spross)	73	63	67	18
davon aus Dünger NH ₄ ⁺ -N (Wiederfindung)	30 (26%)	20 (17%)	22 (19%)	
davon aus Boden + NO ₃ ⁻ -N	43	43	45	
davon aus Boden (24 kg aus NO ₃ ⁻ -N)	19	19	21	
<u>2. Termin: BBCH 51 (18.Juni)</u>				
N-Aufnahme (Spross)	187	162	159	39
davon aus Dünger NH ₄ ⁺ -N (Wiederfindung)	64 (55%)	57 (49%)	56 (48%)	
davon aus Boden + NO ₃ ⁻ -N	123	105	103	
davon aus Boden (28kg aus NO ₃ ⁻ -N)	95	77	75	
<u>3. Termin: Kornreife (29.Juli)</u>				
N-Aufnahme (Korn + Stroh)	189	163	181	56
davon aus Dünger NH ₄ ⁺ -N (Wiederfindung)	76 (65%)	67 (57%)	68 (58%)	
davon aus Boden + NO ₃ ⁻ -N	113	96	113	
davon aus Boden (28kg aus NO ₃ ⁻ -N)	85	68	85	
Wiederfindung des Dünger NH ₄ ⁺ -N im Korn	63 (54%)	57 (49%)	57 (49%)	
Wiederfindung des Dünger NH ₄ ⁺ -N im Stroh	12 (10%)	8 (7%)	11 (9%)	

Im Vergleich der Düngungssysteme von KAS in drei Teilgaben mit ASS/DMPP in zwei Teilgaben wurde 1999 der NH_4^+ -N und der NO_3^- -N im Dünger mit ^{15}N angereichert. Die N-Effizienz von ASS/DMPP war zum Zeitpunkt der Kornreife von Winterweizen mit KAS annähernd vergleichbar (Tab. 3.12). Lediglich die Wiederfindung des Dünger-N im Korn war bei der DMPP-Variante um 4% geringer im Vergleich zur KAS-Variante, das im Wesentlichen dem geringeren N-Entzug von 5 kg N ha^{-1} entspricht.

Tabelle 3.12: N-Verwertung von Winterweizen zur Kornreife - 1999 in ^{15}N -Mikroplots.

Düngung: 160 kg N ha^{-1}			
NH ₄ ⁺ -N und NO ₃ ⁻ -N mit ^{15}N markiert			
[kg N ha ⁻¹]	KAS 70/40/50	ASS/DMPP 110/50	Kontrolle N ₀
N-Entzug (Korn+Stroh)	219	214	108
davon aus Dünger (Wiederfindung)	111 (69%)	107 (67%)	
Korn	81 (51%)	77 (47%)	
Stroh	30 (19%)	30 (20%)	
davon aus Boden	108	107	108
Korn	80	79	88
Stroh	28	28	20

3.5.3.2 N-Verwertung von Düngerteilgaben mittels ^{15}N -Tracer

In den ^{15}N -Mikroplots wurden 1997 stabilisierte Düngungsvarianten mit einmaliger Gabe den frühjahrsbetonten Varianten mit zwei Teilgaben gegenübergestellt. Zwischen den Nitrifikationsinhibitoren DCD und DMPP konnte in dieser Versuchsfrage kein nennenswerter Unterschied festgestellt werden, weshalb in Tab. 3.13 lediglich auf den Dünger ASS/DMPP eingegangen wird. Das bis zum Schossen höhere N-Angebot der einmaligen N-Gabe brachte zu diesem Zeitpunkt auch einen um 14 kg N ha^{-1} höheren N-Entzug von Winterweizen. Die Wiederfindung des markierten NH_4^+ -N des Düngers war von diesen frühen Düngungsterminen zu Vegetationsbeginn mit 44% bzw. 42% nahezu gleich.

Tabelle 3.13: NH_4^+ -N-Verwertung von Winterweizen bis zum Schossen BBCH 37 von ASS/DMPP - 1997 in ^{15}N -Mikroplots.

Ernte zum Schossen BBCH 37 am 27. Mai			
[kg N ha $^{-1}$]	ASS/DMPP	ASS/DMPP	Kontrolle N $_0$
	160 in 1 Gabe	110/(50)	
	117 NH_4^+ -N	80 NH_4^+ -N	
	43 NO_3^- -N	30 NO_3^- -N	
N-Entzug (Spross)	98	84	22
davon aus Dünger NH_4^+ -N (Wiederfindung)	51 (44%)	34 (42%)	
davon aus Boden + NO_3^- -N	47	50	
davon aus Dünger NO_3^- -N Annahme 55% Ausnutzung	24	17	
davon aus Boden	23	33	

Mit den Zwischenernten und der ^{15}N -Anreicherung beider Düngerkomponenten konnte im Jahr 1999 die N-Verwertung während der Vegetation detailliert dargestellt werden. In diesem Jahr war die Niederschlagsverteilung sehr homogen, sodass die Düngerapplikationen relativ zeitnah pflanzenverfügbar gewesen sein dürften. Die N-Spätgabe von 50 kg N ha^{-1} der KAS Variante erfolgte nur wenige Tage vor dem zweiten Erntetermin und wurde für nachfolgende Berechnungen in Tab. 3.14 nicht berücksichtigt.

Tabelle 3.14: N-Verwertung von Winterweizen zum Schossen (BBCH 37) und Ährenschieben (BBCH 51) - 1999 in ^{15}N -Mikroplots.

Ernte zum Schossen am 26. Mai und zum Ährenschieben am 17. Juni			
NH ₄ ⁺ -N und NO ₃ ⁻ -N mit ^{15}N markiert			
[kg N ha ⁻¹]	KAS	ASS/DMPP	Kontrolle N ₀
	70/40/(50)	110/50	
	55 NH ₄ ⁺ -N	117 NH ₄ ⁺ -N	
	55 NO ₃ ⁻ -N	43 NO ₃ ⁻ -N	
<u>1. Termin: BBCH 37 (26.Mai)</u>			
N-Aufnahme (Spross)	126	155	50
davon aus Dünger (Wiederfindung)	76 (69%)	107 (67%)	
davon aus Boden	50	48	
<u>2. Termin: BBCH 51 (17.Juni)</u>			
N-Aufnahme (Spross)	171	182	73
davon aus Dünger (Wiederfindung)	74 (67%)	106 (66%)	
davon aus Boden	97	76	

Die prozentuale Wiederfindung des applizierten N aus dem Dünger im Winterweizenaufwuchs war für beide Düngungssysteme zu jedem Erntetermin nahezu identisch. Jedoch ergaben sich für die Varianten unterschiedliche N-Aufnahmen entsprechend der zum Erntezeitpunkt bereits höheren N-Applikation der frühjahrsbetonten Düngungsstrategie mit ASS/DMPP. Es kann deutlich gezeigt werden, dass insbesondere zum ersten Erntetermin die höhere N-Aufnahme von 29 kg N ha^{-1} der DMPP-Variante gegenüber der KAS-Variante auf das höhere, verfügbare Dünger N-Angebot zurückzuführen war. Zu diesem frühen Erntetermin waren die vom Winterweizen aufgenommenen Anteile aus dem Boden-N-Pool für beide Varianten mit ca. 50 kg N ha^{-1} gleich zu bewerten. Zum zweiten Erntetermin lag die N-Aufnahme aus dem Boden N-Pool für die KAS-Variante deutlich höher, entsprechend geringer war nun die Differenz (11 kg N ha^{-1}) zwischen den Varianten in der N-Aufnahme. Sofern angenommen werden kann, dass die letzte Teilgabe der KAS-Variante noch nicht pflanzenwirksam war, so sollte das zwischenzeitliche 'N-Defizit' der KAS-Variante teilweise durch eine erhöhte N-Aufnahme aus dem Boden N-Pool ausgeglichen worden sein.

In einer Bewertung der ausgewählten Varianten in den ^{15}N -Mikroplots konnte für die drei Versuchsjahre gezeigt werden, dass die DMPP-Varianten bezogen auf den Ertrag meist besser waren als die vergleichbaren DCD-Varianten und gleichwertig mit den KAS- bzw. ASS-Varianten ohne NI (Tab. 3.15). Es sollte noch erwähnt werden, dass sämtliche Kornerträge der angeführten Varianten mit NI in den entsprechenden Parzellenversuchen stets gleiche bis höhere Erträge erzielten als die KAS-Vergleichsvariante (nicht dargestellt). Dies wurde in den Mikroplots nicht so deutlich, insbesondere nicht bei den DCD-Varianten.

Die Ausnutzung des Dünger-N von Winterweizen war in den Jahren 1997 und 1998 mittels ^{15}N -Methode nur scheinbar geringer als mit dem Differenzverfahren festgestellt, da lediglich der NH_4^+ -N angereichert war. Hier konnten die Aussagen lediglich auf den NH_4^+ -Anteil vom Dünger-N beschränkt werden. Im Jahr 1999, in dem beide N-Komponenten mit ^{15}N angereichert waren, wurden sowohl mittels ^{15}N -Methode als auch dem Differenzverfahren identische Düngerausnutzungen ermittelt.

Tabelle 3.15: Ausnutzung des Dünger-N von Winterweizen in den ¹⁵N-MikroplotsDüngung 160 kg N ha⁻¹

Variante	Ertrag ¹⁵ N- Mikroplots [relativ]	Düngerausnutzung [%]		¹⁵ N Dün- gerrest im Boden (0-90 cm) [%]	
		¹⁵ N- Mikroplots	Differenz- verfahren (NH ₄ ⁺ + NO ₃ ⁻)		
1997					
ASS/DCD	160	89	49	51	-
	110/50	87	50	51	-
ASS/DMPP	160	= 100	51	67	-
	110/50	90	48	53	-
1998					
ASS	160	= 100	65	83	45
ASS/DCD	160	87	57	67	43
ASS/DMPP	160	100	58	78	44
1999					
KAS	70/40/50	=100	69	69	36
ASS/DMPP	110/50	101	67	66	45

Der mittels ¹⁵N-Methode nachgewiesene N-Düngerrest im Boden ergab 1998 für die geprüften Varianten mit jeweils einmaligen N-Gaben zu Vegetationsbeginn keine Unterschiede (Tab. 3.15). 1999 aber wiesen die Messungen darauf hin, dass im Vergleich zur KAS-Variante der höhere NH₄⁺-N Anteil der DMPP-Variante einer größeren Immobilisation im Boden unterlag.

Deutliche Unterschiede in der N-Verwertung der einzelnen Teilgaben ließen sich mittels ¹⁵N-Methode nachweisen (Tab. 3.16). Die Wiederfindung des gedüngten N im

Winterweizen zur Ernte am 23. Juli 1999 war von frühen Teilgaben geringer als von späteren Teilgaben. Ein großer Anteil des spät applizierten N konnte zur Ernte im Korn nachgewiesen werden. Aus diesen Untersuchungen ist weiter abzuleiten, dass von frühen N-Teilgaben mehr N im Boden verbleibt und immobilisiert wird.

Table 3.16: N-Verwertung einzelner Teilgaben von Winterweizen zur Ernte in den ^{15}N -Mikroplots - 1999

Düngung 160 kg N ha ⁻¹					
Variante	N-Teilgabe [kg N ha ⁻¹]	Düngerausnutzung mittels ^{15}N			^{15}N Düngerrest im Boden (0-90 cm) [%]
		Stroh	Korn	Summe	
KAS					
Teilgabe 1	70	18	39	57	47
Teilgabe 2	40	24	49	73	29
Teilgabe 3	50	15	69	84	26
Ø	160	19	51	69	36
ASS/DMPP					
Teilgabe 1	110	19	42	61	54
Teilgabe 2	50	21	59	80	25
Ø	160	20	47	67	45

Es stellt sich die Frage ob stabilisierte N-Dünger mit höherem und länger anhaltendem NH_4^+ -N Anteil einer stärkeren N-Immobilisation unterliegen? Während der Vegetation 1999 wurden zum ersten Erntetermin höhere Düngerreste im Boden für die DMPP-Variante festgestellt. Die Probenahme erfolgte zwei Wochen nach der zweiten Düngerapplikation von ASS/DMPP, dieses hohe N-Angebot konnte vom Winterweizen noch nicht verwertet werden (Tab 3.17). Folglich sollte von keiner erhöhten N-Immobilisation ausgegangen werden. Zum zweiten Erntetermin, eine Woche nach

der dritten KAS-Gabe, war in beiden Varianten der gleiche Anteil Dünger-N im Boden nachzuweisen. Es kann vorausgesetzt werden, dass der applizierte KAS-N noch nicht von den Pflanzen verwertet wurde und auch keiner Immobilisation unterlag. Andererseits zeichnete sich für die DMPP-Variante bereits eine Festlegung des Dünger-N im Boden ab. Zur Kornreife verblieb in der DMPP-Variante noch mehr Dünger-N im Boden im Vergleich zur KAS-Variante, was auf eine verstärkte Immobilisation zurückzuführen war. Neben Umweltfaktoren wie der Witterung dürfte wesentlich das $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ Verhältnis der eingesetzten Dünger ausschlaggebend für die Höhe der Immobilisation gewesen sein. Es kann davon ausgegangen werden, dass der NH_4^+ -N für eine Immobilisation stärker gefährdet ist.

Tabelle 3.17: Dünger Rest im Boden während der Vegetation in den ^{15}N -Mikroplots - 1999

N-Verhältnis der Dünger		$\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$
KAS		50/50
ASS/DMPP		71/29
^{15}N Düngerrest im Boden (0-90 cm) [%]		
<u>1. Termin: BBCH 37 (26.Mai)</u>		
KAS	70/40	30
ASS/DMPP	110/50	38 ¹⁾
<u>2. Termin: BBCH 51 (17.Juni)</u>		
KAS	70/40/50	30 ²⁾
ASS/DMPP	110/50	31
<u>3. Termin: Kornreife (29.Juli)</u>		
KAS	70/40/50	36
ASS/DMPP	110/50	45

¹⁾ 2 Wochen nach der 2. N-Gabe

²⁾ 1 Woche nach der 3. N-Gabe

3.6 Diskussion

Einfluss der Witterung auf die N-Verwertung

Die Dynamik des mineralisch eingesetzten Stickstoffs zeigt auch in dieser Arbeit wesentliche Unterschiede in den Versuchsjahren. Diese Unterschiede basieren vorwiegend auf dem Einfluss der Witterung, insbesondere der Niederschlagsverteilung. Als wesentliche Faktoren legte ANTONOPOULOS (1999) in seinem Vergleich von Simulationsmodellen zur N-Mineralisation die Bodenfeuchte und Temperatur zugrunde. Des Weiteren konnten die beiden Standorte mit unterschiedlicher Bodenart und C/N-Verhältnis eine differenzierte N-Dynamik erwarten lassen. Basierend auf dieser Betrachtung müssen die unterschiedlichen Düngungssysteme mit den verschiedenen eingesetzten N-Komponenten und Nitrifikationsinhibitoren bewertet werden.

Nicht allein der termingerechte Düngungszeitpunkt, sondern vielmehr die Bodenfeuchte und der Düngungsmaßnahme folgende Niederschläge bestimmen die Pflanzenverfügbarkeit der N-Düngergabe. In diesen Versuchen sorgten länger anhaltende trockene Abschnitte im Mai 1997 und 1998 für eine Differenzierung (Abb. 3.1). 1997 resultierte ein Ertragsvorteil für die schossbetonten Teilgaben, da diese zweiten Teilgaben zu BBCH 30/31 gerade noch Niederschläge bekamen und dem Winterweizen zur Verfügung standen, während die etwas späteren Teilgaben zu BBCH 32 in die Trockenphase fielen. 1998 war die Trockenphase noch ausgeprägter und alle zweiten Teilgaben kamen zu spät zur Wirkung. Diejenigen Varianten mit einer frühjahrsbetonten Düngerverteilung (einmalige Düngergaben und frühjahrsbetonte mit höheren Teilgaben zu Vegetationsbeginn) konnten hier deutliche Ertragsvorteile verzeichnen. Im dritten Versuchsjahr 1999 sorgte eine gleichmäßige Niederschlagsverteilung während des Düngungszeitraumes für eine zeitnahe Verfügbarkeit des eingesetzten N-Düngers. In Versuchen von ARREGUI und QUEMADA (2008) bei gleichmäßiger Wasserversorgung waren keine nennenswerten Vorteile bei einer Aufteilung der N-Gabe oder Zugabe eines Nitrifikationsinhibitors hinsichtlich des Ertrages und der Verwertung des Düngers festzustellen. Die differenzierende N-Verfügbarkeit und N-Aufnahme der einzelnen Jahre spiegelt sich natürlich neben den Erträgen auch in der N-Dynamik wieder und letztlich in der zu bewertenden N-Effizienz.

Der neue Nitrifikationsinhibitor DMPP im Vergleich zu DCD

Der neue Nitrifikationsinhibitor DMPP war einerseits durch den Vergleich mit dem derzeit gängigen Nitrifikationsinhibitor DCD zu bewerten. Sowohl 1997 als auch 1998 erzielte in den ^{15}N -Mikroplots die DMPP Variante stets höhere TM-Erträge als die DCD-Variante (Tab. 3.15). Gleiches gilt für die N-Entzüge der DMPP-Variante gegenüber der DCD-Variante. Die berechnete Dünger-N-Wiederfindung in der Pflanze differenzierte nur geringfügig zwischen DCD und DMPP. Folglich war die N-Freisetzung aus dem Boden N-Pool in der DMPP Variante deutlich höher, was nachfolgende Aspekte bestärken: DCD ist im Boden mobiler als DMPP (FETTWEIS et al., 2001). Je höher im Boden die Anteile an Ton und Schluff sind, desto stärker wird DMPP sorbiert, was anfangs zu einer etwas schwächeren Nitrifikationshemmung führt, die aber länger anhält (BARTH et al., 2001). In der DMPP Variante findet sich kurz nach der Düngung ein größerer Anteil NO_3^- -N und ein geringerer Anteil NH_4^+ -N als in der DCD Variante. Mehr NO_3^- mit zudem höherer Mobilität birgt ein größeres Potential zur Stimulation der Bodenmikroorganismen und führt folglich zu einer höheren N-Mineralisation aus dem Bodenpool, dem sog. ‚Priming-Effekt‘ (JENKINSON et al., 1985). Das mobilere DCD hingegen könnte mit entsprechend hemmender Wirkung ein größeres Bodenvolumen beeinflusst haben.

Vereinfachte Düngungssysteme mit dem neuen Nitrifikationsinhibitor DMPP im Vergleich zu konventionellen Systemen mit KAS

Es galt andererseits die vereinfachten Düngungssysteme mit weniger Teilgaben, welche mit Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren möglich wurden, den konventionellen KAS-Düngungssystemen mit drei Teilgaben gegenüberzustellen. Hier konnten mit den ASS/DMPP Varianten stets gleichwertig und höhere Erträge als mit den KAS Varianten erzielt werden. Auch der Gesamt N-Entzug (Stroh und Korn) war bei diesen Varianten in einer Größenordnung der KAS-Varianten. Meist war der N-Gehalt (Proteingehalt) im Korn der NI-Varianten geringer, was aber, bedingt durch die höheren Erträge, zu gleichen N-Entzügen geführt hat. Dieser Effekt der niedrigeren N-Gehalte der NI-Varianten (DCD) im Korn und der höheren TM-Erträge gegenüber den KAS-Varianten wurde ebenfalls in detaillierten Langzeit-Lysimeterversuchen nachgewiesen (GUTSER, 1999), sowie von BRENNER und SOLANSKY (1989) in weiteren Düngungsversuchen. Der positive Effekt höherer TM-Erträge und einer

verbesserten N-Effizienz konnte ebenso nach Zugabe des Nitrifikationsinhibitors DMPP von ROCO und BLU (2006) nachgewiesen werden.

In den N-Bilanzierungen der ^{15}N -Mikroplots konnte gezeigt werden, dass der N-Entzug der ASS/DMPP Varianten höher war als bei ASS/DCD und nahezu vergleichbar mit KAS. Da 1997 und 1998 lediglich der NH_4^+ -N Anteil des Düngers angereichert war, wurde für eine Bilanzierung angenommen, dass 55% des NO_3^- -Düngers in die Pflanze aufgenommen wurden (= 28 kg N ha^{-1}). Die restliche N-Menge musste folglich aus dem N-Pool des Bodens kommen. Die Varianten ohne NI hatten in diesen beiden Jahren eine höhere Wiederfindung des NH_4^+ -Dünger N, aufgrund der schnelleren Umwandlung in die bevorzugt aufgenommene NO_3^- -N Form. Auf eine bevorzugte Aufnahme von NO_3^- -N verweisen SANTAMARIA et al. (1999). Im Gegenzug lässt sich folgern, dass die längere NH_4^+ -Phase zu einer stärkeren Immobilisation des gedüngten NH_4^+ -N im Boden geführt hat, wie auch AMBERGER und VILSMEIER (1983) in Gefäßversuchen für DCD-Varianten nachgewiesen haben.

Verwertung der Dünger-Teilgaben

GLENDINING et al. (1997) stellten in ihren Versuchsserien eine Wiederfindung des applizierten N von 51% im Pflanzenaufwuchs und 30% im Boden fest. In der vorliegenden Arbeit wurde meist eine höhere Düngerausnutzung durch die Pflanze ermittelt, insbesondere in den Varianten mit einer größeren Anzahl von Teilgaben, die, wie sich vermuten lässt, einer effizienteren Verwertung unterliegen.

Speziell mit der ^{15}N -Methode, in der 1999 jeweils nur die einzelne Teilgabe in den Mikroplots markiert wurde, konnte deutlich gezeigt werden, dass frühe Düngerteilgaben eine geringere Wiederfindung in der Pflanze haben als späte Teilgaben. Dies gilt besonders für die Wiederfindung im Winterweizenkorn. Zu diesen Ergebnissen kam auch BLANKENAU (2000) in seiner Arbeit. Die Applikation der späteren Teilgaben erfolgt unmittelbar in die intensiven Wachstumsphasen mit stärksten Biomassezuwächsen und höchsten Nährstoffbedarf und Nährstoffaufnahme der Pflanze. In Untersuchungen von VAN CLEEMPUT und BAERT (1984), HERSEMANN et al. (1988) und DESTAIN et al. (1989) mit ^{15}N -Düngern zeigte sich, dass während dieser intensiven Wachstumsphasen applizierter Dünger-N größtenteils und unmittelbar vom wachsenden Pflanzenbestand aufgenommen wurde.

In diesem Zusammenhang wurde auf den Verbleib des Rest-N im Boden verwiesen. Die Wiederfindung des gedüngten N, aufsummiert von Pflanze und Boden, ergab

methodisch bedingt teils über 100%. Dennoch lässt sich aus den Untersuchungen eine potentiell höhere Immobilisation für die früheren N-Teilgaben im Boden ableiten. Als weitere Folgerung unterliegen Düngungssysteme mit mengenmäßig hohen und frühen Teilgaben und zusätzlich höherem NH_4^+ -N Anteil einer erhöhten Gefahr der Immobilisation im Boden.

N-Verluste in der Bilanzierung

Auswaschungsverluste konnten während der Vegetationszeit und dem Bilanzierungszeitraum nahezu ausgeschlossen werden. Die Verdunstung sollte in diesem Zeitraum einer Nitratverlagerung in tiefere, den Pflanzen nicht mehr verfügbare Bodenschicht entgegengewirkt haben. Gasförmige Verluste erwiesen sich als gering (vgl. Kapitel 3) und speziell bei NH_3 ermittelte WEBER (2001) selbst bei Ammoniumdüngern zu Winterweizen lediglich Mengen unter 1 kg N ha^{-1} . N-Abreifeverluste waren zu vernachlässigen, da zudem das abgestorbene, am Boden liegende Pflanzenmaterial miteinbezogen wurde. Der natürliche N-Eintrag aus der Luft sollte diese Verluste in der Bilanzierung weitgehend kompensieren.

4 Lachgasemissionen aus dem Boden und von einem ¹⁵N-markierten Stickstoffdünger mit dem neuen Nitrifikationsinhibitor 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP)

4.1 Zusammenfassung

Die N₂O-Emissionsraten auf landwirtschaftlichen Flächen sind nach mineralischer N-Düngung kurzfristig erhöht. Ziel dieser Arbeit ist die quantitative Ermittlung der kurzfristig nach der Applikation des Düngers mit dem neuen Nitrifikationsinhibitor DMPP zu Winterweizen auftretenden N₂O-Emissionen in Freilandversuchen. Die Nitrat- und Ammonium-haltigen Dünger wurden in flüssiger und granulierter Form in spezifischen Düngungsstrategien eingesetzt und mit ¹⁵N-Tracer markiert. N-Dünger mit höheren NO₃⁻-Anteilen verursachen deutlich höhere N₂O-Emissionen als NH₄⁺-Dünger. Stabilisierte N-Dünger in vereinfachten Anwendungsstrategien mit weniger Teilgaben und einer Vorverlegung der N-Düngung in die frühere Vegetationszeit vermindern die N₂O-Freisetzung um ca. 20%. Die Anteile der gesamten N₂O-Emissionen konnten mit 10-40% auf Dünger-N und mit 60-90% auf Boden-N zurückgeführt werden. Als Verlustpotential für N₂O-Emissionen ist neben dem NO₃⁻-N des Düngers auch der mikrobiell verfügbare N-Pool im Boden in Wechselwirkung mit der N-Düngung von großer Bedeutung. Im Vergleich zu flüssigen Düngerformen verursachen Granulate geringere N₂O-Verluste. Eine Verminderung der N₂O-Emissionen ist für stabilisierte Dünger vornehmlich auf deren geringe NO₃⁻-Anteile und die Möglichkeit einer Reduzierung der Zahl der Teilgaben zurückzuführen.

4.2 Einleitung

Lachgas (N₂O), ein klimarelevantes Spurengas, gewinnt auf Grund der Freisetzung durch Landbewirtschaftung zunehmend an Bedeutung. ISERMANN (1994) gibt den Anteil der Landwirtschaft an den globalen jährlichen N₂O-Emissionen mit ca. 35% an. Die freigesetzte N₂O-Menge wird meist auf den zugeführten N der organischen und

mineralischen Düngung bezogen. Die Höhe der N₂O-Emissionen hängt neben der Stickstoffform stark vom Standort (Boden und Klima) und der Kulturart ab (CORRE et al., 1995; KAISER et al., 1998; MAC KENZIE, 1998). Eine umfassende Übersicht der N₂O-Verluste aus der Düngung gibt EICHNER (1990), in welcher die enorme Streubreite auf Grund unterschiedlicher Standortbedingungen und Düngerformen zum Ausdruck kommt. KAISER et al. (1996) geben für neun europäische, landwirtschaftlich genutzte Böden eine Spannweite der N₂O-Emissionen von 0,2 bis 6,6 kg N₂O-N ha⁻¹a⁻¹ an, die gegenüber anderen Studien aber gering erscheint (GRANLI und BØCKMAN, 1994).

Für verschiedene N-Düngemittel mit Nitrifikationsinhibitoren (NI) ist eine reduzierte Verlustgefährdung für N₂O nachgewiesen (BREMNER und BLACKMER, 1978; BRONSON et al., 1992; DE KLEIN et al., 1996; DELGADO und MOSIER, 1996; MICHEL und WOZNIAK, 1998; MOSIER, 1994; MOSIER et al., 1996). Mit 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP) steht ein neuer NI zur Verfügung, der von ZERULLA et al. (2001) vorgestellt wird. Für den Einsatz stabilisierter N-Dünger (TRENKEL, 1997) wurden spezifische Anwendungsstrategien erarbeitet, die gegenüber konventionellen Düngern zu Vorteilen bezüglich Ertrag und N-Verlusten durch Nitratauswaschung führen (GUTSER, 1999; LINZMEIER et al., 1999). Kennzeichnend für Düngungssysteme mit NI sind eine Reduzierung der Anzahl von Teilgaben und die Vorverlegung der Düngergaben in frühere Entwicklungsstadien (kühlere Vegetationszeit) der Pflanzen. Mittlerweile konnte in weiteren Untersuchungen mit Zusatz von DMPP sowohl zu mineralischen Düngern, aber vor allem zu Gülle eine deutliche Reduktion der N₂O-Emissionen nachgewiesen werden (BOECKX et al., 2005; MERINO et al., 2005; HATCH et al., 2005; MACADAM et al., 2003).

Ziel dieser Arbeit ist die quantitative Ermittlung der kurzfristig nach der Applikation des Düngers mit dem neuen Nitrifikationsinhibitor DMPP zu Winterweizen auftretenden N₂O-Emissionen in mehrjährigen Freilandversuchen. Beim Einsatz von stabilisierten Düngern ist insbesondere durch die Möglichkeit der Reduzierung der Zahl der Teilgaben eine Minimierung der N₂O-Emissionen zu erwarten. Ebenso sollte die gedüngte Stickstoffform (vorwiegend NH₄⁺-N oder NO₃⁻-N) Auswirkungen auf die Höhe der N₂O-Freisetzung zeigen. Mittels ¹⁵N-Tracer kann untersucht werden, wel-

che Menge an der gesamten N_2O -Emission direkt aus dem Umsatz des Dünger- oder des Boden-N freigesetzt wird.

4.3 Material und Methoden

4.3.1 Standort und Boden

Die Versuche wurden auf der Versuchsstation des Lehrstuhls für Pflanzenernährung der Technischen Universität München-Weihenstephan (Bayern) durchgeführt. Der Standort ist geologisch dem Tertiärhügelland zuzuordnen. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge beträgt 800 mm und die mittlere Lufttemperatur (2 m über Boden) $7,4^{\circ}\text{C}$. Der Boden (Braunerde) wird als schluffiger Lehm (24% Ton, 51% Schluff, 25% Sand) klassifiziert, mit 2,3% organischer Substanz und einem pH (in 0,01 M CaCl_2) von 6,4.

4.3.2 Versuchsaufbau

Die Untersuchungen erfolgten über zwei Jahre an Winterweizen (*Triticum aestivum* L. var. *Astron*), oberflächlich gedüngt mit 160 kg N ha^{-1} (Tab. 4.1). Zum Einsatz kamen ein vorwiegend Nitrat-haltiger [Kalkammonsalpeter (KAS) = $\text{NH}_4\text{NO}_3 \text{ CaCO}_3$] und ein vorwiegend Ammonium-haltiger [Ammonsulfatsalpeter (ASS) = $\text{NH}_4\text{NO}_3 (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$] Dünger. Zu ASS wurden die Nitrifikationsinhibitoren 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP) oder Dicyandiamid (DCD) gegeben.

Zwei Versuche wurden angelegt: Im ersten Versuch (1998) erfolgte die Düngung von ASS mit und ohne NI (DMPP und DCD) in einer Gabe zu Vegetationsbeginn, sowohl in flüssiger (^{15}N) als auch in granulierter Form. Im zweiten Versuch (1999) wurde das regional übliche Düngungssystem für Winterweizen mit KAS zu drei Teilgaben einem stabilisiertem Düngungssystem mit ASS/DMPP, auf zwei Teilgaben reduziert, gegenübergestellt. Die mit ^{15}N markierten Dünger wurden in flüssiger Form punktuell mittels Pipette auf der Parzelle ausgebracht. 1998 war von ASS (mit und ohne NI) lediglich der NH_4^+ -N zu 10 at% mit ^{15}N angereichert. 1999 wurde von KAS und ASS/DMPP sowohl der NH_4^+ -N als auch der NO_3^- -N zu 30 at% mit ^{15}N markiert.

Tabelle 4.1: Düngungsvarianten und Zusammensetzung der Dünger

Variante	Dünger- form	Gesamt N	N-Verhältnis NH ₄ ⁺ / NO ₃ ⁻ [%]	Nitrifikations- inhibitor	¹⁵ N- Anreicherung	N Verteilung [kg ha ⁻¹]
1998						
0	-	-	-	-	-	-
ASS	flüssig	26	71 / 29	-	NH ₄ ⁺ - 10at%	160
ASS/DCD*	flüssig	27	71 / 29	DCD	NH ₄ ⁺ - 10at%	160
ASS/DMPP	flüssig	26	71 / 29	DMPP	NH ₄ ⁺ - 10at%	160
ASS/DMPP	granuliert	26	71 / 29	DMPP	-	160
1999						
0	-	-	-	-	-	-
KAS**	flüssig	27	50 / 50	-	NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ - 30at%	70/40/50
ASS/DMPP	flüssig	26	71 / 29	DMPP	NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ - 30at%	110/50

* von Gesamt N ca. 2% DCD-N

** zusätzlich S-Ausgleich

4.3.3 Probenahme

Der experimentelle Aufbau zur quantitativen Erfassung von N₂O-Verlusten im Feld erfolgte in Anlehnung an die von HUTCHINSON und MOSIER (1981) beschriebenen „Geschlossene Kammermethode“. In der randomisierten Versuchsanlage wurde die Beprobung auf speziellen Plots für jede Variante an acht festgelegten Messpunkten wiederholt.

4.3.4 Analytik

Die Analyse der Gasproben (20 ml) erfolgte am Massenspektrometer ANCA-MS (Europa-Scientific TG 20-20, Crewe, GB), wobei die absolute N₂O-Menge und der Anteil mit ¹⁵N quantifiziert wurden.

Die Bestimmung des anorganischen N im Boden (N_{min}) wurde für NO₃⁻ nach einstündiger Extraktion mit 0,01 M CaCl₂-Lösung (Boden : Extraktionsmittel = 1 : 5) mittels HPLC und für NH₄⁺ nach einstündiger Extraktion mit 1 M KCl-Lösung (Boden : Extraktionsmittel = 1 : 5) photometrisch durchgeführt.

4.3.5 Statistische Auswertung

Die varianzanalytische Auswertung der Versuchsergebnisse wurde mit dem Programmpaket „SAS-proc glm“ (SAS Institute Inc., Cary, USA) durchgeführt. Zur Ermittlung der Grenzdifferenz ($P < 0,05$) fand der Tukey-Test Verwendung.

4.4 Ergebnisse

4.4.1 Düngerverteilung und Stickstoffform

Die Versuchsanstellung von 1999 sah einen Vergleich zweier Düngungssysteme einschließlich ungedüngter Kontrolle bezüglich der N_2O -Emissionen vor. Die Systeme unterschieden sich in der Stickstoffform, in den Düngungsterminen und der Zahl der Teilgaben. Nach der ersten Stickstoffgabe zu Vegetationsbeginn stiegen für die gedüngten Varianten die N_2O -Emissionen annähernd gleich bis zu einer maximalen Emissionsrate von ca. $30 \text{ g } N_2O\text{-N } \text{ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ an (Abb. 4.1). Zu diesem Düngungstermin waren die ausgebrachten NO_3^- -Mengen in beiden Systemen nahezu gleich: für KAS $70 \text{ kg N } \text{ha}^{-1}$, davon 35 kg als NO_3^- -N und für ASS/DMPP $110 \text{ kg N } \text{ha}^{-1}$, davon 30 kg als NO_3^- -N.

Die darauf folgenden Düngungsmaßnahmen waren zeitlich versetzt: KAS am 4. Mai und 10. Juni, ASS/DMPP am 12. Mai. Sowohl nach Applikation der zweiten als auch der dritten Teilgabe von KAS ($40 \text{ kg N } \text{ha}^{-1}$ bzw. $50 \text{ kg N } \text{ha}^{-1}$) stiegen die N_2O -Emissionen kurzfristig erheblich an ($28 \text{ g } N_2O\text{-N } \text{ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ bzw. $37 \text{ g } N_2O\text{-N } \text{ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$). Für ASS/DMPP war ab der zweiten Messphase lediglich nach der zweiten Gabe ($50 \text{ kg N } \text{ha}^{-1}$, davon $13,5 \text{ kg}$ als NO_3^- -N) ein kleiner Peak erkennbar. Gegen Ende der zweiten Messphase stiegen die N_2O -Emissionen beider Düngungssysteme stetig an, auch die ungedüngte Kontrolle zeigte eine ansteigende Tendenz.

Insgesamt wurden auf der KAS-Variante um ca. 20% höhere N_2O -Emissionen als auf der ASS/DMPP-Variante ermittelt, was vor allem auf die deutlichen Peaks nach der zweiten und dritten KAS-Applikation zurückzuführen war.

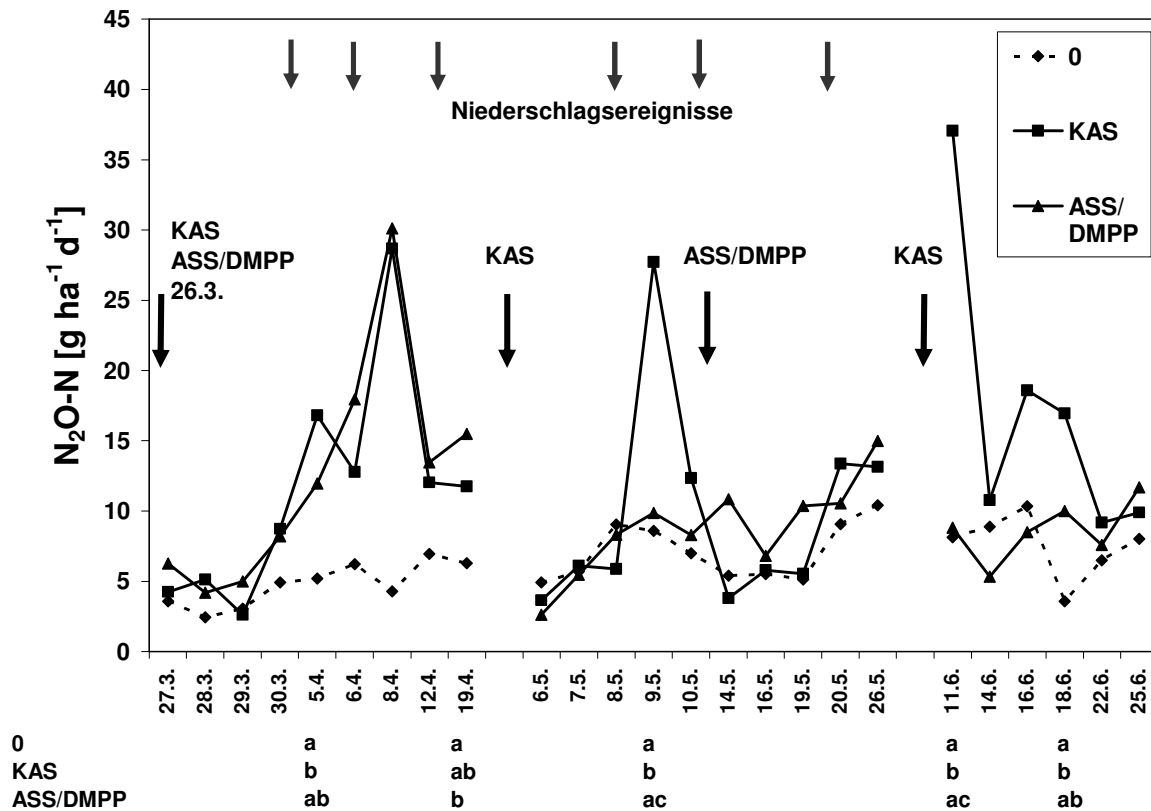


Abbildung 4.1: N₂O-Emissionen (Σ Dünger- und Boden-N) nach Applikation von 160 kg N ha⁻¹ verschiedener Stickstoffdünger in flüssiger Form mit düngerspezifischer N-Verteilung [0 = ohne N; KAS = NH₄NO₃ CaCO₃ in drei Teilgaben (70 / 40 / 50); ASS/DMPP = NH₄NO₃ (NH₄)₂SO₄ +DMPP in zwei Teilgaben (110 / 50)] - 1999. Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede (P < 0,05) der Varianten zum jeweiligen Messtermin.

In einer weiteren Versuchsanstellung (1998) mit einmaliger Applikation von ASS und ASS/NI (DMPP und DCD) zu Vegetationsbeginn wurden in den ersten drei bis vier Wochen nach der Düngung teilweise hohe N₂O-Peaks festgestellt, die auf die Düngung zurückzuführen waren (Abb. 4.2). Die Nitrifikationsinhibitoren veränderten den Verlauf und die Menge der N₂O-Freisetzung insgesamt wenig. Offensichtlich wirkte sich der zugeführte NO₃⁻-N sehr dominant auf die freigesetzten N₂O-Mengen aus. Mit ASS wurden zu jeder N-Variante einheitlich gleiche NO₃⁻-Mengen zu Vegetationsbeginn gedüngt.

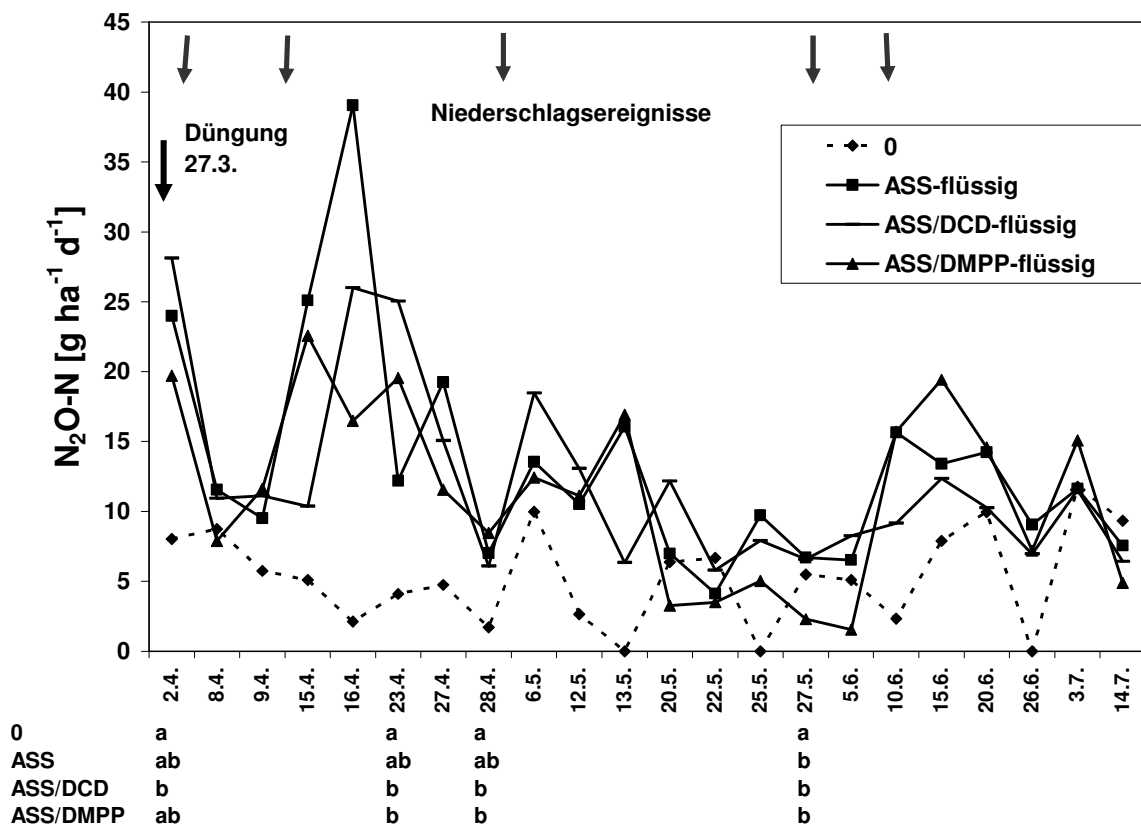


Abbildung 4.2: N_2O -Emissionen (Σ Dünger- und Boden-N) nach Applikation von 160 kg N ha^{-1} verschiedener Stickstoffdünger in einer Gabe zu Vegetationsbeginn in flüssiger Form [0 = ohne N; ASS = NH_4NO_3 (NH_4) $_2SO_4$; ASS/DCD = NH_4NO_3 (NH_4) $_2SO_4$ +DCD; ASS/DMPP = NH_4NO_3 (NH_4) $_2SO_4$ +DMPP] – 1998. Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede ($P < 0,05$) der Varianten zum jeweiligen Messtermin.

4.4.2 N_2O -Verluste aus dem Boden-N und Dünger-N

Die Markierung des NO_3^- -N und NH_4^+ -N im Dünger (^{15}N -Tracer) ermöglichte eine Differenzierung der Zusammensetzung der N_2O -Emissionen aus Dünger-N und Boden-N (Abb. 4.3). Der zeitliche Verlauf der N_2O -Verluste aus dem Dünger entsprach dem der Gesamt-Emissionen (siehe Abb. 4.1, beachte Ordinatenskalierung). Die höchsten N_2O -Flüsse wurden ca. 10 Tage nach der ersten Düngung mit $10,4 \text{ g } N_2O\text{-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ zu KAS bzw. $12,8 \text{ g } N_2O\text{-N ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ zu ASS/DMPP erreicht. Im weiteren Verlauf zeigten sich für KAS deutliche Peaks jeweils nach der Düngung.

Der Anteil des Dünger-N an den Gesamtemissionen an N_2O erreichte in der ersten Messphase 30 – 40% und ging später auf 10 – 20% zurück. Der verbleibende Anteil

ist dem Boden-N zuzuordnen. Die Emissionen aus dem Boden nahmen in den späteren Messphasen daher beachtlich zu.

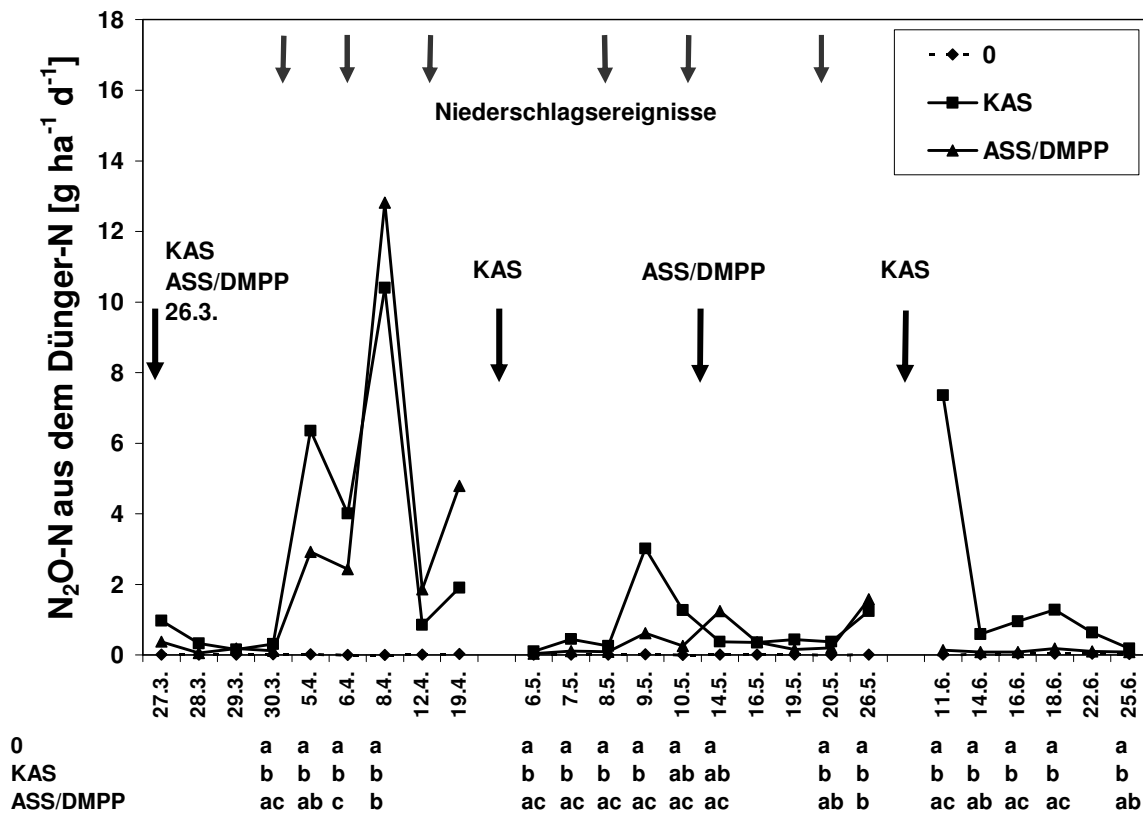


Abbildung 4.3: N₂O-Emissionen aus dem Dünger-N (¹⁵N-Tracer) nach Applikation von 160 kg N ha⁻¹ verschiedener Stickstoffdünger in flüssiger Form mit düngerspezifischer N-Verteilung [0 = ohne N; KAS = NH₄NO₃ CaCO₃ in drei Teilgaben (70 / 40 / 50); ASS/DMPP = NH₄NO₃ (NH₄)₂SO₄ +DMPP in zwei Teilgaben (110 / 50)] – 1999. Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede (P < 0,05) der Varianten zum jeweiligen Messtermin.

4.4.3 Beitrag des stabilisierten Ammonium

Die Wirkung der Nitrifikationsinhibitoren DMPP und DCD auf die N₂O-Emissionen nach einheitlicher Gabe von ASS zu Vegetationsbeginn stand in der Versuchsreihe von 1998 im Vordergrund. Die Anreicherung mit ¹⁵N beschränkte sich in dieser Versuchsanstellung auf den NH₄⁺-Anteil des Dünger-N, der 75% des Gesamt-N betrug.

Grundsätzlich lagen die auf den $\text{NH}_4^+\text{-N}$ des Düngers zurückzuführenden N_2O -Verluste auf sehr geringem Niveau und erreichten nur ca. 5% der gesamten N_2O -Emissionen (Abb. 4.4). Die Nitrifikationsinhibitoren reduzierten die N_2O -Verluste in den ersten vier Wochen nach der Düngung zudem noch beachtlich um ca. 50%. Die Nitrifikationsinhibitoren DMPP und DCD unterschieden sich diesbezüglich nicht in ihrer Wirkung. Der Kurvenverlauf der Gesamtemissionen (Abb. 4.2) war nicht mit dem der Emissionen aus dem NH_4^+ -Anteil des Düngers konform (Abb. 4.4).

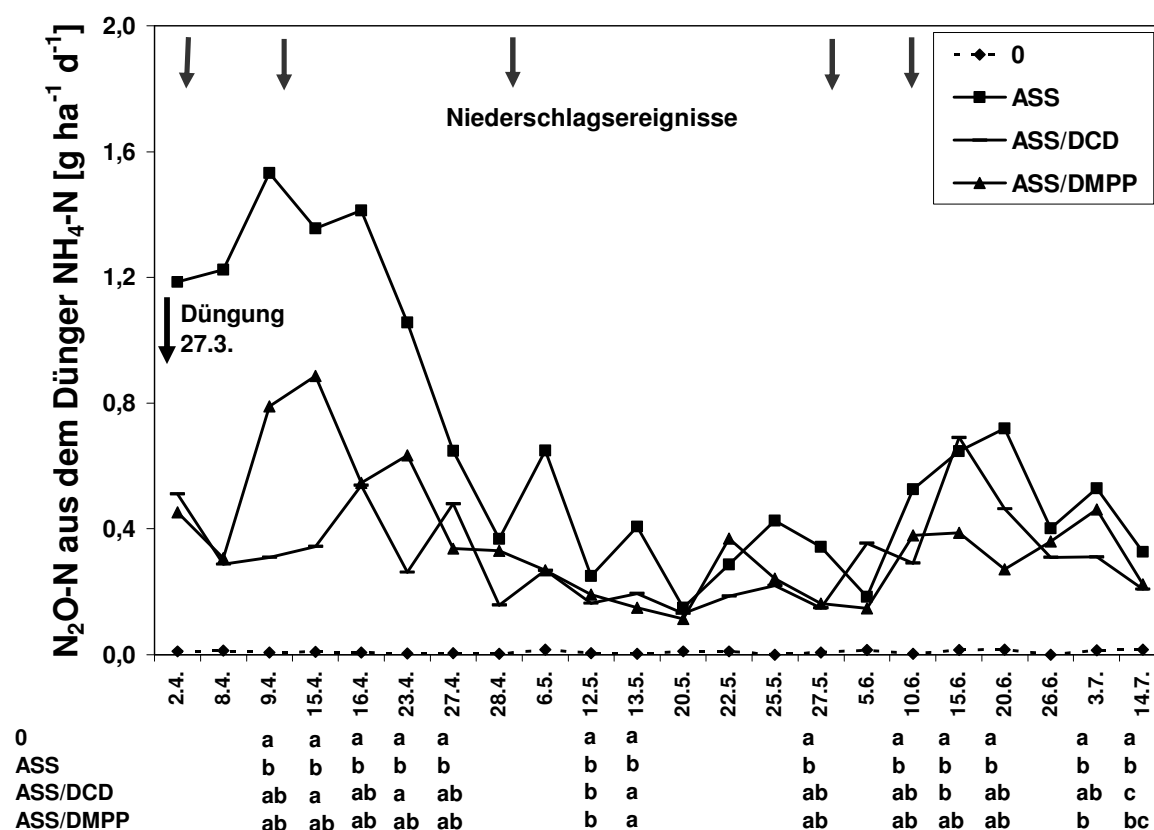


Abbildung 4.4: N_2O -Emissionen aus dem Dünger- $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (^{15}N -Tracer) nach Applikation von 160 kg N ha^{-1} verschiedener Stickstoffdünger in einer Gabe zu Vegetationsbeginn in flüssiger Form [0 = ohne N; ASS = NH_4NO_3 (NH_4) $_2\text{SO}_4$; ASS/DCD = NH_4NO_3 (NH_4) $_2\text{SO}_4$ +DCD; ASS/DMPP = NH_4NO_3 (NH_4) $_2\text{SO}_4$ +DMPP] – 1998. Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede ($P < 0,05$) der Varianten zum jeweiligen Messtermin.

4.4.4 Granulate und flüssige Düngung

ASS/DMPP wurde in der Versuchsanstellung von 1998 auch als Granulat eingesetzt. Tendenziell waren die in der granulierten Variante festgestellten N_2O -Emissionen geringer als nach flüssiger Applikation (Abb. 4.5). Dies war vor allem in der ersten Hälfte der Messperiode erkennbar, in der sich die granulierten Variante kaum vom Verlauf der Kontrolle abhob, im Gegensatz zur flüssigen Düngung mit merklich höheren Verlusten.

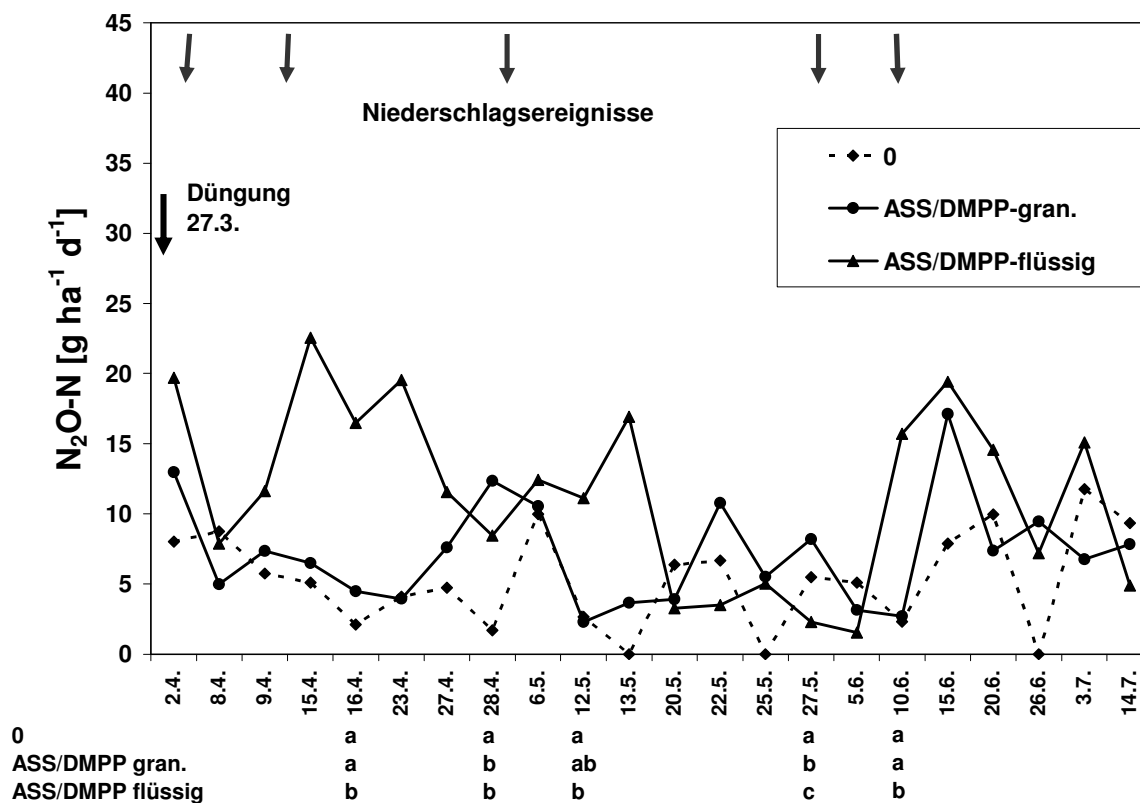


Abbildung 4.5: N_2O -Emissionen nach Applikation von $160\ kg\ N\ ha^{-1}$ als ASS/DMPP in granulierter und flüssiger Form zu Vegetationsbeginn in einer Gabe [0 = ohne N; ASS/DMPP = NH_4NO_3 (NH_4)₂SO₄ +DMPP] – 1998. Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede ($P < 0,05$) der Varianten zum jeweiligen Messtermin.

4.4.5 Einfluss der Witterung

In beiden Versuchsjahren beeinflusste der Witterungsverlauf sowohl die N_2O -Emissionen insgesamt als auch die N_2O -Emissionen aus dem Düngerstickstoff. So waren höhere N_2O -Freisetzungen nicht immer unmittelbar nach Düngungsereignissen, sondern häufig nach stärkeren Niederschlagsereignissen festzustellen. 1999 wurde N_2O in den folgenden Wochen nach der ersten Düngergabe trotz hohem Nitratangebot erst in Kombination mit einem stärkeren Niederschlagsereignis, das möglicherweise eine Wassersättigung des Bodens verursachte, emittiert (Abb. 4.1 und 4.3). Ähnliches traf auch für stärkere N_2O -Freisetzungen nach der zweiten und dritten KAS-Düngung im Mai und Juni zu. Ebenfalls traten 1998 höhere N_2O -Emissionsraten nach Niederschlägen und unabhängig von der Düngung auf. Insbesondere reagierte auch die ungedüngte Kontrolle auf Niederschläge mit steigenden N_2O -Emissionen (Abb. 4.2 und 4.5, Messtermin 6. Mai und 15. Juni).

4.4.6 Anorganischer N im Boden

Die Düngungssysteme KAS und ASS/DMPP zeigten völlig unterschiedliche Verläufe der NH_4^+ - und NO_3^- -Gehalte der Krume, was sich auf die N_2O -Freisetzung auswirken sollte (Abb. 4.6). Die KAS-Variante wies generell höhere NO_3^- -Gehalte auf, im Gegensatz zur ASS/DMPP-Variante mit rasch abfallenden Gehalten auf ein durchwegs niedriges Niveau. Als repräsentativ stellte sich weiterhin die lang anhaltende NH_4^+ -Phase der ASS/DMPP-Variante dar, bedingt durch den Nitrifikationsinhibitor DMPP mit einer ca. acht Wochen anhaltenden Hemmwirkung. Insbesondere im KAS-Düngungssystem wirkten sich die späteren Düngungsmaßnahmen in höheren NH_4^+ - und NO_3^- -Gehalten der Krume aus.

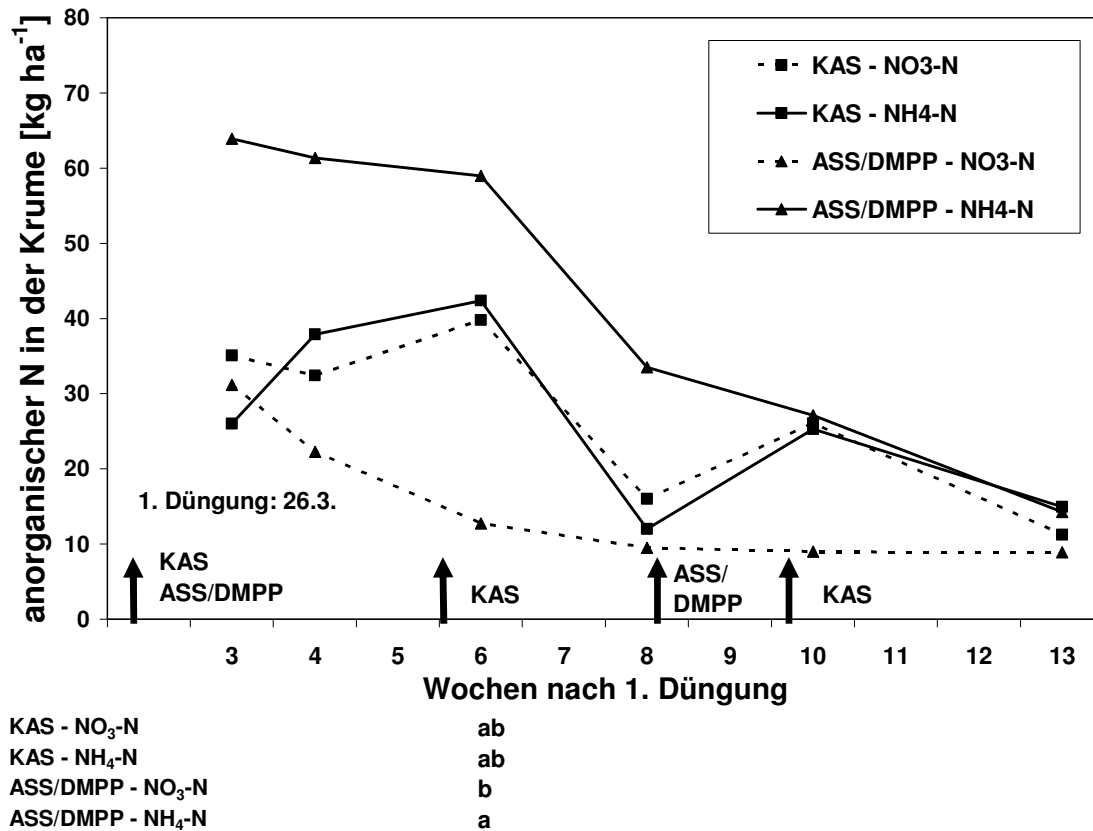


Abbildung 4.6: Typischer Verlauf der NH_4^+ - und NO_3^- -Gehalte in der Krumme auf schluffigem Lehm (Lu) nach Düngung von 160 kg N ha^{-1} als KAS und ASS/DMPP in granulierter Form zu Winterweizen [KAS = $\text{NH}_4\text{NO}_3 \text{ CaCO}_3$ in drei Teilgaben (70 / 40 / 50); ASS/DMPP = $\text{NH}_4\text{NO}_3 (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{DMPP}$ in zwei Teilgaben (110 / 50)] – 1998. Buchstaben (a, b, c) zeigen signifikante Unterschiede ($P < 0,05$) der Varianten zum jeweiligen Messtermin.

4.5 Diskussion

Die Höhe der N_2O -Emissionen hängt stark vom Standort und der Kulturart ab (KAISER et al., 1998). Die gewonnenen Erkenntnisse gelten für den Standort Weihenstephan und die angebaute Kultur Winterweizen.

In beiden Versuchsjahren war der Einfluss stärkerer Niederschlagsereignisse auf die N_2O -Emissionen deutlich erkennbar. Trotz hoher NO_3^- -Zufuhr durch Düngung setzten höhere Emissionen erst in Kombination mit Niederschlägen ein und waren somit überwiegend die Folge von Denitrifikationsverlusten. Nach GRANLI und BØCKMAN (1994) begünstigen wechselnde (aerob/anaerob) Verhältnisse im Boden die N_2O -Freisetzung. Niederschläge wirken insbesondere nach Trockenperioden stimulierend auf die mikrobielle Aktivität im Boden und somit auch auf die Emission von N_2O . Der Effekt der Wiederbefeuchtung des Bodens war vornehmlich an erhöhten N_2O -Emissionsraten der ungedüngten Kontrolle erkennbar.

Der Düngungszeitpunkt und die ausgebrachte NO_3^- -Menge erwiesen sich als entscheidende Größen für die Höhe der N_2O -Emissionen. Die N_2O -Verluste für das Düngungssystem KAS mit drei Teilgaben waren gegenüber dem System ASS/DMPP mit zwei Teilgaben insgesamt um ca. 20% höher, was insbesondere auf die 'späteren' Teilgaben der KAS-Variante zurückzuführen war. Nach der ersten Düngergabe unterschieden sich die Düngungssysteme KAS und ASS/DMPP in den N_2O -Emissionen als Folge gleicher NO_3^- -Mengen nur unwesentlich. Zu den 'späteren' Düngungsterminen ergab sich durch den mit KAS ausgebrachten NO_3^- -N eine Zunahme der N_2O -Emissionen, nicht aber für ASS/DMPP. Für KAS war eine rasch ablaufende Nitrifikation des NH_4^+ -N zu erwarten, welche den NO_3^- -Anteil im Boden entsprechend erhöht. Ein vergleichsweise hoher NO_3^- -Anteil im Boden konnte für ASS/DMPP nach der zweiten Düngergabe nicht erwartet werden, da zum einen der NO_3^- -Anteil im Dünger gering und zum anderen die Nitrifikation des NH_4^+ -N aufgrund des Nitrifikationsinhibitors DMPP verzögert war (vgl. Abb. 4.6).

Die Düngung von ASS in einer Gabe zu Vegetationsbeginn ergab selbst durch Zugabe von Nitrifikationsinhibitoren nur geringe Unterschiede in der N_2O -Freisetzung.

Im Gegensatz hierzu mit Applikation von DMPP in flüssiger Form stellten WEISKE et al. (2001) eine geringere N_2O -Emission zu einmaliger Gabe von DMPP auf den Düngergranulaten fest. Die Unterschiede können sowohl auf Einflüsse der Umwelt und der Düngerplatzierung, als auch auf die Form (flüssig oder granuliert) in welcher der NI ausgebracht wurde, zurückgeführt werden. Der wesentliche Beitrag NI-haltiger Dünger für deutlich verminderte N_2O -Emissionen wird vornehmlich in einer möglichen Reduzierung der Anzahl von Teilgaben und Vorverlegung der Düngung in die frühere, kühlere Vegetationszeit, also in einer düngerspezifischen Anwendungsstrategie, gesehen, was aus beiden Untersuchungen hervorgeht.

Die Anteile der aus dem Boden-N ermittelten N_2O -Verluste stiegen von 60%, im Falle der Frühjahrsapplikation, auf 90% zu den späteren Teilgaben an (insbesondere für KAS). Erhöhte N_2O -Emissionsraten traten vornehmlich nach Düngungsmaßnahmen mit NO_3^- -Stickstoff auf. Der N-Umsatz im Boden wurde möglicherweise durch die Düngung stimuliert ('Priming-Effekt') (JENKINSON et al., 1985), wodurch ein erhöhtes Verlustpotential für N_2O entsteht. Zum einen unterliegt der NO_3^- -N einer Verlustgefährdung als Folge der Denitrifikation und zum anderen wird durch seine gute Beweglichkeit ein größerer Bereich des Bodens in einen möglichen 'Priming-Effekt' einbezogen als z.B. mit NH_4^+ -N. Dünger mit NI (ASS/DMPP) ließen diesen Effekt nicht erkennen (geringere NO_3^- -Gehalte in der Krume – vgl. Abb.4.6), was sich auf die N_2O -Emissionen nach einer Düngungsmaßnahme vermindern auswirkte.

Der NH_4^+ -N des Düngers hat kurzfristig (drei bis vier Wochen nach der Düngung) für die N_2O -Freisetzung die geringere Bedeutung. Der N_2O -Anteil aus dem NH_4^+ -N des Düngers war mit ca. 5% der gesamten N_2O -Emissionen sehr gering. Nitrifikationsinhibitoren vermindern diese N_2O -Verluste zusätzlich, da die gehemmte Nitrifikation und die folglich niedrigen NO_3^- -Gehalte im Boden kaum ein Verlustpotential für N_2O bieten. Dieses geringe Verlustpotential besteht selbst gegen Ende der Hemmphase. Wir konnten bereits in früheren Versuchen nach späten NO_3^- -Gaben zu schossen-dem Weizen erhöhte N_2O -Emissionen feststellen, während eine zeitige NH_4^+ -Düngung mit NI nur eine mäßige N_2O -Freisetzung verursachte (LINZMEIER et al., 1999). Die Dünger verursachten direkt relativ geringe N_2O -Verluste, während die indirekte Wirkung auf die N_2O -Emissionen über das Boden-Verlustpotential von größerer Bedeutung war.

Im Laufe der Vegetation stiegen auch die N_2O -Emissionsraten der Kontrolle geringfügig an, was auf die durch Temperaturanstieg bedingte höhere mikrobielle Aktivität im Boden zurückzuführen sein dürfte. Auch bei der KAS-Variante erhöhten sich zur zweiten und vor allem dritten Messphase die Emissionen, obwohl die applizierten N-Mengen gegenüber der ersten Düngung geringer waren. Das erhöhte Verlustpotential für N_2O dürfte seine Ursache ebenso in einer höheren mikrobiellen Aktivität des Bodens haben, die neben der Temperatur zusätzlich durch die N-Düngung stimuliert wurde.

Die geringen Unterschiede in den N_2O -Emissionen von ASS mit und ohne NI können auf mehrere Aspekte zurückgeführt werden. Zum einen bestand kein Unterschied in den applizierten NO_3^- -Mengen, die sich als entscheidende Ursache für die N_2O -Freisetzung herausstellte. Zudem bewirkten die im Frühjahr üblicherweise kühleren Temperaturen eine allgemein langsame Nitrifikation, wodurch die zusätzlich verzögernde Wirkung der NI nur wenig zur Geltung kam. Zum anderen war als Folge der Trockenheit im Mai keine nennenswerte Denitrifikation zu erwarten. Des Weiteren greift der Pflanzenbewuchs durch N-Entzug mit in den Kreislauf ein. Gerade zur Schossphase liegen ein enormer Zuwachs der Biomasse und eine hohe N-Aufnahmerate der Pflanze vor. Insbesondere das geringe NO_3^- -Angebot der ASS/DMPP-Variante wird vornehmlich vom Pflanzenbestand beansprucht, sodass das Verlustpotential für die Denitrifikation gering ist.

Interessant ist der Befund, dass die Verwendung von Düngergranulaten gegenüber flüssiger Applikation Vorteile bezüglich der N_2O -Freisetzung bringt. Die günstige Wirkung dürfte auf mehrere Ursachen zurückzuführen sein: zum einen stimulieren Düngergranulate den N-Umsatz nur an wenigen 'hot spots'. Dies ist insbesondere für den mobilen NO_3^- -N von besonderer Bedeutung (WANG et al., 1998). Zum anderen wird eine Entmischung von NH_4^+ -N und NI des Düngers weitgehend unterbunden, was eine längere Nitrifikationshemmung und niedrige NO_3^- -Gehalte des Bodens zur Folge hat. Positiv sollte sich zusätzlich die geringe Mobilität von DMPP im Boden auswirken (FETTWEIS et al., 2001), die für DCD nicht gegeben ist (ABDEL-SABOUR et al., 1990).

In Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Düngung schwankte der Anteil des Boden-N an der gesamten N₂O-Emission zwischen 60 und 90%. Damit wird die Bedeutung des mikrobiell verfügbaren N-Pools im Boden als Verlustpotential für N₂O-Emissionen in Wechselwirkung mit der N-Düngung offensichtlich. Es erklärt sich zudem, dass die von BOUWMAN (1996) aufgestellte Regressionsbeziehung zwischen N₂O-Emissionen und N-Düngermenge (N₂O-Emission [kg N₂O-N ha⁻¹a⁻¹] = 1 + 0,0125 x N-Düngung [kg N ha⁻¹a⁻¹]) nur eine grobe Abschätzung der N₂O-Emissionen ermöglichen kann. Auf Basis langjähriger, flächenbezogener N-Salden (N-Zufuhr über Dünger minus N-Abfuhr über Ernte) sollten die Effizienz der N-Düngung und der verfügbare N-Pool quantitativ besser beurteilt werden können. Dies ist vor allem auf Flächen mit stärkerer organischer Düngung zu erwarten.

Wenn auch längerfristig die organische Düngung eine große Bedeutung für die N₂O-Freisetzung mit sich bringt, zeigen auch kurzfristig mineralische Düngungsmaßnahmen einen erheblichen Einfluss auf die Verluste. Diese N₂O-Verluste lassen sich durch die Wahl der Stickstoffform, insbesondere durch stabilisierte (DMPP) Ammoniumhaltige Dünger mit spezifischen Anwendungsstrategien, vermindern.

5 Gesamtdiskussion

Mit 3,4-Dimethylpyrazolphosphat (DMPP) steht ein weiterer, hoch effizienter Nitrifikationsinhibitor zur Verfügung, der es ermöglicht vereinfachte mineralische Stickstoffdüngungssysteme in der pflanzlichen Produktion durchzuführen. Die Ergebnisse dieser Versuchsanstellung unter Freilandbedingungen haben die Effizienz bestätigt.

Strategien für die mineralische Stickstoffdüngung in der pflanzlichen Produktion können je nach Kulturart und Verwertung auf verschiedene Ziele ausgerichtet sein. Aus ökonomischer Betrachtung sei vorrangig eine Absicherung und Steigerung des Ertragsniveaus mit entsprechender Produktqualität genannt, des Weiteren eine hohe Ausnutzung des eingesetzten Produktionsmittels Dünger bei zugleich geringem Arbeitsaufwand für die Applikationen. Dagegen steht aus ökologischer Sichtweise ein möglichst geringes Verlustpotenzial des eingesetzten Düngers hinsichtlich Emissionen, vor allem von Lachgas und Ammoniak und einer geringen Auswaschungsgefahr für Nitrat.

Die Düngemittel mit Nitrifikationsinhibitoren bewirkten auf beiden Standorten einen deutlichen Anstieg der Kornerträge von Winterweizen gegenüber dem Vergleichsdünger KAS. Zum einen können durch die NI-Dünger Teilgaben eingespart werden und zum anderen besteht die Möglichkeit mit gleicher N-Menge höhere Erträge als mit KAS zu erzielen, d.h. eine Verbesserung der N-Effizienz, vergleichbar mit den Ergebnissen aus den langjährigen Lysimeterversuchen in Weihenstephan (GUTSER, 1999). In den Düngungsstrategien mit NI ist das zeitliche und mengenmäßige Splitting der N-Gabe für das Ertragsniveau entscheidend. Die Vorteile der frühjahrsbetonten oder schossbetonten Varianten waren jahresspezifisch unterschiedlich, abhängig von der Niederschlagsverteilung unmittelbar nach der Düngerapplikation. Die Witterung beeinflusst wesentlich die Pflanzenverfügbarkeit des applizierten Düngers und folglich die Erträge von Winterweizen, was auch durch die Untersuchungen von MOKRY und AMBERGER (1992) bestätigt wird.

Die gute Wirkung der NI-Dünger hinsichtlich der Erträge lässt sich für das Qualitätsmerkmal "Rohproteingehalt", welches für eine wesentliche Verwertungsrichtung des Weizens maßgeblich ist, nur bedingt bestätigen. Auf niedrigem N-Niveau erzielen die Varianten mit NI durchwegs geringere Rohproteingehalte gegenüber den konventionellen Systemen mit KAS in drei Teilgaben. Der Effekt der geringeren N-Gehalte im Korn, einhergehend mit geringeren Rohproteingehalten in Düngungsvarianten mit Nitrifikationsinhibitoren wurde in verschiedenen Versuchsanstellungen beschrieben (GUTSER, 1999; SPIELHAUS, 1991; MOKRY, 1986). Allerdings sind auf höherem N-Niveau, insbesondere in Kombination mit KAS, ähnlich gute Qualitäten wie mit dem Vergleichsdünger erreichbar, wie bereits AMBERGER und GUTSER (1987) beschrieben haben.

Die positiven Ertragseffekte der Düngungsvarianten mit Nitrifikationsinhibitoren traten in den Silomaisversuchen nicht so deutlich hervor wie zu Winterweizen, was möglicherweise auf die vermehrte Nährstoffaufnahme aus dem höheren Mineralisationspool des Bodens in der späteren Vegetationszeit von Mais gegenüber Winterweizen zurückzuführen war. Mit zunehmender Nährstoffnachlieferung aus dem Bodenpool sind Ertragsunterschiede resultierend aus der N-Düngerform nur bedingt nachzuweisen, worauf auch HEGE und MUNZERT (1991) und AUFHAMMER et al. (1996) in N-Düngungsversuchen mit stabilisierten Düngern zu Silomais hinweisen. Die tendenziell höheren Silomaiserträge in den Varianten mit stabilisierten Düngern gegenüber den KAS-Varianten waren abhängig von der standortspezifischen N-Nachlieferung und des jahresspezifischen Witterungseinflusses.

Die Düngungssysteme mit Nitrifikationsinhibitoren mit weniger Teilgaben zeigten in den Winterweizenversuchen generell positive Ertragseffekte gegenüber den konventionellen Systemen mit KAS, appliziert in drei Teilgaben. Im Vergleich der Nitrifikationsinhibitoren war der neue Wirkstoff DMPP mindestens vergleichbar mit dem schon länger zugelassenen Wirkstoff DCD.

Der Untersuchungsschwerpunkt hinsichtlich der Verlustpotenziale unmittelbar nach den Düngungsmaßnahmen lag in der Quantifizierung der N_2O -Emissionen. Der Düngungszeitpunkt und die ausgebrachte NO_3^- -Menge erwiesen sich als entscheidende Größen für die Höhe der N_2O -Emissionen. Die N_2O -Verluste für das Düngungssys-

tem KAS mit drei Teilgaben waren gegenüber dem System ASS/DMPP mit zwei Teilgaben insgesamt um ca. 20% höher, was insbesondere auf die 'späten' Teilgaben der KAS-Variante zurückzuführen war.

Die Anteile der aus dem Boden-N ermittelten N_2O -Verluste stiegen von 60% im Falle der Frühjahrsapplikation auf 90% zu den späteren Teilgaben an (insbesondere für KAS). Die kurzfristig nach mineralischen Düngungsmaßnahmen auftretenden N_2O -Verluste lassen sich durch die Wahl der Stickstoffform, insbesondere durch stabilisierte (DMPP) Ammoniumhaltige Dünger mit spezifischen Anwendungsstrategien (weniger Teilgaben), vermindern. Erhöhte N_2O -Emissionsraten traten vornehmlich nach Düngungsmaßnahmen mit NO_3^- -Stickstoff auf. Möglicherweise wurde der N-Umsatz im Boden durch die Düngung stimuliert, dem sog. 'Priming-Effekt' (JENKINSON et al., 1985), wodurch ein erhöhtes Verlustpotential für N_2O entsteht. Der NO_3^- -N unterliegt einer Verlustgefährdung als Folge der Denitrifikation und zusätzlich wird durch seine gute Beweglichkeit ein größerer Bereich des Bodens in einen möglichen 'Priming-Effekt' einbezogen als z.B. mit NH_4^+ -N. Der wesentliche Beitrag NI-haltiger Dünger für deutlich verminderte N_2O -Emissionen wird vornehmlich in einer möglichen Reduzierung der Anzahl von Teilgaben und Vorverlegung der Düngung in die frühere, kühlere Vegetationszeit, also in einer düngerspezifischen Anwendungsstrategie, gesehen.

Die Verwertungseffizienz des applizierten N-Düngers von Winterweizen war in den Düngungsvarianten mit Nitrifikationsinhibitoren mindestens so gut wie die der konventionellen Düngungsstrategien mit KAS in drei Teilgaben. Im Vergleich der Nitrifikationsinhibitoren bewirkten die DMPP-Varianten bessere TM-Erträge und tendenziell höhere N-Entzüge als die DCD-Varianten. Die NH_4^+ -N Ausnutzung aus dem Dünger war von Winterweizen im trockenen Jahr 1998 in den NI-Varianten geringer als in den KAS und ASS-Varianten ohne NI, wobei aber die Kornerträge der stabilisierten Dünger mindestens gleich bzw. höher waren. Im gleichmäßig feuchten Jahr 1999, konnten kaum Unterschiede zwischen dem konventionellen Düngungssystem mit KAS und dem DMPP-Düngungssystem bezüglich der N-Verwertung ermittelt werden. Den jahresspezifischen Witterungseinfluss mit Bodenfeuchte und Temperatur legte ANTONOPOULOS (1999) als wesentlichen Faktor für die Verwertungseffizienz des eingesetzten Dünger-N zugrunde.

Trotzdem waren mit ^{15}N -Bodenanalysen und der Berechnung der N-Immobilisation während der Weizenvegetation für die NI-Variante höhere N-Reste im Boden nachzuweisen als für KAS. Dies dürfte u.a. auch auf dessen höheren NH_4^+ -Anteil von 73% gegenüber 50% bei KAS zurückzuführen sein. Deutlich schlechter war zudem die N-Verwertung durch Winterweizen der frühen Teilgaben gegenüber späteren Applikationen. Entsprechend ergaben sich für die frühen Teilgaben nach der Ernte auch anteilig höhere Düngerreste im Boden.

In einer abschließenden Bewertung kann festgestellt werden, dass der neue Wirkstoff DMPP als Nitrifikationsinhibitor unter Freilandbedingungen hoch effizient eingesetzt werden kann. Er ermöglicht die Anwendung spezifischer, vereinfachter Düngungsstrategien mit weniger Teilgaben, die zudem höhere TM-Erträge erzielen. Welche Düngungsstrategie, die frühjahrsbetonte oder die schossetbetonte, optimaler ist, hängt stark von der Jahreswitterung und der Niederschlagsverteilung im Zeitraum der Düngerapplikationen ab, wie der zugeführte Nährstoff auch pflanzenverfügbar ist. Je nach Verwertungsrichtung der Ernteprodukte und speziell für Weizen mit hohem Rohproteingehalt, ist eine zusätzliche Düngung notwendig, da die N-Gehalte im Korn mit den vereinfachten Düngungssystemen nicht gesichert erreicht werden können. Eine positive Bewertung kann für DMPP im Einsatz mit vereinfachten Düngungsstrategien hinsichtlich der gasförmigen Verlustpotenziale getroffen werden. Bezüglich der N-Verwertung haben die stabilisierten Düngungssysteme Nachteile gegenüber den konventionellen Systemen, da der höhere NH_4^+ -N Anteil einer höheren Festlegung im Boden unterliegt.

Die derzeitige Entwicklung in der Landwirtschaft eröffnet möglicherweise neue Felder für den Einsatz von DMPP-Düngungsstrategien, da im Bereich der Bioenergie andere Qualitätsparameter für die Rohstoffe im Vordergrund stehen. Im Falle der Verwertung von Weizen für die Ethanolherzeugung, der Biogasproduktion oder einer thermischen Nutzung liegen die Rohstoffanforderungen bei einer hohen Biomasseproduktion mit relativ geringem Proteingehalt und möglichst geringem Arbeitsaufwand. Diesen Anforderungen können DMPP-Düngungssysteme gerecht werden.

6 Zusammenfassung

Eine maximale Produktivität hinsichtlich des Einsatzes von Düngemitteln im modernen Pflanzenbau erfordert mineralische Düngungsstrategien, die Erträge und Produktqualität absichern, eine hohe N-Effizienz aufweisen und dabei geringe umweltrelevante Verluste verursachen. Das Ziel dieser Arbeit bestand in der mehrjährigen Bewertung und Prüfung eines neuen Nitrifikationsinhibitors, 3,4-Dimethylpyrazol-phosphat (DMPP), in Freilandversuchen.

Zu Winterweizen konnten mit den stabilisierten Düngern in vereinfachten Düngungsstrategien mit nur einer Teilgabe bzw. zwei Teilgaben bei frühjahrsbetonter oder schossbetonter Applikation höhere Kornerträge gegenüber dem Vergleichsdünger Kalkammonsalpeter in drei Teilgaben erzielt werden. In den Strategien mit Nitrifikationsinhibitor war das zeitliche und mengenmäßige Splitting der Düngung für das Ertragsniveau entscheidend, vor allem bedingt durch die Pflanzenverfügbarkeit des Düngers bei vorwiegendem Einfluss der Witterung, insbesondere der Niederschläge. Die NH_4^+ -N Ausnutzung durch Winterweizen war jahresbedingt in trockenen Versuchsjahren bei den NI-Varianten geringer als in den KAS- bzw. ASS-Varianten ohne NI. Im gleichmäßig feuchten Jahr waren kaum Unterschiede zu ermitteln. Zu allen drei Zwischenernten während der Vegetationsperiode von Winterweizen war im Pflanzenaufwuchs für ASS ohne NI sowohl die absolut aufgenommene N-Menge als auch die Wiederfindung des NH_4^+ -N höher als für die Varianten mit NI. Die für den Boden ermittelte N-Dynamik der einzelnen Düngungsvarianten ließ vermuten, dass hohe N-Gaben zu einem frühen Vegetationszeitpunkt eine tendenziell höhere Immobilisation des applizierten Stickstoffs nach sich ziehen als späte Teilgaben. Höhere NH_4^+ -Anteile im Dünger bedingten eine höhere Immobilisation des applizierten N, was auch mittels ^{15}N -Tracer nachgewiesen werden konnte.

Stabilisierte N-Dünger in vereinfachten Anwendungsstrategien mit weniger Teilgaben und einer Vorverlegung der N-Düngung in die frühere Vegetationszeit vermindern die N_2O -Freisetzung um ca. 20%. Die Anteile der gesamten N_2O -Emissionen konnten mit 10-40% auf Dünger-N und mit 60-90% auf Boden-N zurückgeführt werden. Eine Verminderung der N_2O -Emissionen ist für stabilisierte Dünger vornehmlich auf deren geringe NO_3^- -Anteile und die Möglichkeit einer Reduzierung der Zahl der Teilgaben zurückzuführen.

7 Summary

Optimizing productivity in modern plant production requires mineral fertilizer strategies ensuring high yield and quality by increasing N-efficiency and minimizing environmental perturbations. Aim of this study was to evaluate and test for several years, in field trials a new nitrification inhibitor, 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP).

Single or double applications of stabilized fertilizers to winter wheat using ammonium sulphate nitrate (ASN) with nitrification inhibitors (NI) – emphasizing early tillering or shooting stage applications - increased yields compared to calcium ammonium nitrate (CAN) in three applications. In the fertilizing strategies with nitrification inhibitors timing and splitting of the fertilizers particularly influenced yield. This effect was mainly ascribed to the timing of rainfall events particularly influencing nitrogen availability. In dry years the NH_4^+ -N use efficiency of winter wheat for NI treatments was lower compared to CAN and ASN treatments without NI, whereas in years with regular rainfall no differences were observed. Uptake of N as well the recovery of NH_4^+ -N for ASN without NI was higher than for the NI treatments during the growing season of winter wheat. Investigations of the soil N-dynamics suggest that high N-applications in early growth stages lead to higher immobilisation of the applied nitrogen compared to later applications. Higher NH_4^+ contents in the fertilizer lead to higher immobilisation of the applied N evidenced by ^{15}N tracers as well.

For N-fertilizers with NI, used in simplified fertilizing strategies with fewer applications and an earlier fertilizer application, N_2O emissions were reduced by about 20%. Of the total N_2O emission measured, 10-40% was attributed to fertilizer-N and 60-90% was derived from soil-N. For fertilizers with NI, the decrease of the N_2O emission is mainly ascribed to their lower NO_3^- -N content and the possibility to reduce the number of applications.

8 Literatur

- Abdel-Sabour M.F., Massoud M.A. and Baveye P. (1990) The effect of water movement on the transport of dicyandiamide, ammonium and urea in unsaturated soils. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 153: 245-247.
- Amberger A. (1992) Mineralische und organische Düngung. VCH Verlagsgesellschaft mbH: Pflanzenproduktion im Wandel - Neue Aspekte in den Agrarwissenschaften: 227 - 248.
- Amberger A. und Gutser R. (1987) Wirkung und Einsatz von Nitrifikationshemmstoffen in Kombination mit Mineraldüngern. *Bayer. Landwirtsch. Jahrbuch*, 64. Jhrg., Heft 6: 717 - 726.
- Amberger A. und Vilsmeier K. (1983) Stickstoffbilanz von ¹⁵N-Harnstoff bzw. ¹⁵N-Ammonsulfatsalpeter mit Dicyandiamid in Gefäßversuchen zu Grünhafer und Sommerweizen. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 146: 438 - 448.
- Antonopoulos V.Z. (1999) Comparison of different models to simulate soil temperature and moisture effects on nitrogen mineralization in the soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 162: 667 - 675.
- Appel T. and Mengel K. (1998) Prediction of mineralizable nitrogen in soils on the basis of an analysis of extractable organic N. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 161: 433 - 452.
- Arregui L.M. and Quemada (2008) Strategies to improve nitrogen use efficiency in winter cereal crops under rainfed conditions. *Agronomy Journal*, Vol. 100: 277 - 284.
- Aufhammer W., Kübler E. und Kaul H.-P. (1996) Untersuchungen zur Anpassung des Stickstoff-Angebots aus unterschiedlichen N-Quellen an den Verlauf der N-Aufnahme von Maisbeständen. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 159: 471 - 478.
- Bach M. and Frede H.-G. (1998) Agricultural nitrogen, phosphorus and potassium balances in Germany - Methodology and trends 1970 to 1995. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 161: 385 - 393.

- Barth G., von Tucher S., Schmidhalter U. (2001) Influence of soil parameters on the effect of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) as a nitrification inhibitor. *Biol. Fertil. Soils*, 34: 98 – 102.
- Bashir R., Norman R.J., Bacon R.K. and Wells B.R. (1997) Accumulation and redistribution of fertilizer nitrogen-15 in soft red winter wheat. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61: 1407 - 1412.
- Blankenau K. (2000) Einfluß der Stickstoffimmobilisation auf die Verfügbarkeit von Düngerstickstoff für Getreide. Dissertation, Universität Hannover. Verlag Grauer, Beuren-Stuttgart.
- Bernt E. und Bergmeyer H.U. (1970) Bestimmung von Harnstoff, Indikatorreaktion mit Phenol und Hyperchlorit. In: Bergmeyer, H.U. (Hrsg.): *Methoden der enzymatischen Analyse*. Band II. Verlag Chemie, Weinheim, 1738 – 1741.
- Boeckx P., Xu X. and Van Cleemput O. (2005) Mitigation of N₂O and CH₄ emission from rice and wheat cropping systems using dicyandiamide and hydroquinone. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 72: 41 – 49.
- Bouwman A.F. (1996) Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46: 53 – 70.
- Bremner J.M. and Blackmer A.M. (1978) Nitrous oxide: Emission from soils during nitrification of fertilizer nitrogen. *Science*, 199: 295 – 296.
- Brenner K. (1991) Versuchsergebnisse zur Wirkung stabilisierter Stickstoffdünger auf den Ertrag von Kartoffeln, Mais und Zuckerrüben. Fachtagung 15./16. Okt. 1991 in Würzburg, Stabilisierte Stickstoffdünger - ein Beitrag zur Verminderung des Nitratproblems: 139 - 143.
- Brenner K. und Solansky S. (1989) Bemessung der Stickstoffdüngung mit Alzon unter Berücksichtigung von N_{min}. *VDLUFA-Schriftenreihe* 30, Kongressband 1989: 669 - 674.
- Bronson K.F., Mosier A.R. and Bishnoi S.R. (1992) Nitrous oxide emissions in irrigated corn as affected by nitrification inhibitors. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56: 161 – 165.
- Carranca C., De Varennes A. and Rolston D.E. (1999) Variation in N-recovery of winter wheat under Mediterranean conditions studied with ¹⁵N-labeled fertilizers. *European Journal of Agronomy*, 11: 145 – 155.

- Corre M.D., Van Kessel C., Pennock D.J. and Solohub M.P. (1995) Ambient nitrous oxide emissions from different landform complexes as affected by simulated rainfall. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 26(13 & 14): 2279 – 2293.
- De Klein C.A.M., Van Logtestijn R.S.P., Van de Meer H.G. and Geurink J.H. (1996) Nitrogen losses due to denitrification from cattle slurry injected into grassland soil with and without a nitrification inhibitor. *Plant and Soil*, 183: 161 – 170.
- Delgado J.A. and Mosier A.R. (1996) Mitigation alternatives to decrease nitrous oxides emissions and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux. *J. Environ. Qual.*, 25: 1105 – 1111.
- Delogu G., Cattivelli L., Pecchioni N., De Falcis D., Maggiore T. and Stanca A.M. (1998) Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *European Journal of Agronomy*, 9: 11 – 20.
- Destain J.P., Guiot J., Fracois E. and Riga A. (1989) Fertilizer nitrogen budgets of two doses of Na¹⁵NO₃ dressings split applied to winter wheat in microplots on a loam soil. *Plant and Soil*, 117: 177 – 183.
- Eichner M.J. (1990) Nitrous oxide emissions from fertilized soils: Summary of available data. *J. Environ. Qual.*, 19: 272 - 280.
- Fettweis U., Mittelstaedt W., Schimansky C., Führ F. (2001) Lysimeter experiments on the translocation of the ¹⁴C-labelled nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) in a gleyic cambisol. *Biol. Fertil. Soils*, 34: 126 - 130.
- Fischbeck G., Dennert J. und Müller R. (1990) N-Dynamik des Bodens, Ertragsbildung und Stickstoffentzug von Winterweizen bei unterschiedlicher Höhe und Verteilung der mineralischen N-Düngung. *J. Agronomy & Crop Science* 164: 297 - 311.
- Fischbeck G., Dennert J. und Müller R. (1992) Untersuchungen zur Verwertung des Stickstoffes in der oberirdischen Biomasse von Winterweizen-Feldbeständen bei unterschiedlicher Höhe und Verteilung der mineralischen N-Düngung. *Bayer. Landwirtsch. Jahrbuch*, 69. Jhrg., Heft 2: 131 - 148.
- Fischbeck G., Dennert J. und Müller R. (1993) Untersuchungen zur Optimierung der N-Aufnahme von Winterweizenbeständen durch ergänzende Düngungsmaßnahmen. *J. Agronomy & Crop Science* 171: 82 - 95.

- Gioacchini P., Ramieri N., Montecchio D., Marzadori C. and Ciavatta C. (2006) Dynamics of mineral nitrogen in soils treated with slow-release fertilizers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37 (1-2): 1 - 12.
- Glendining M.J., Poulton P.R., Powlson D.S. and Jenkinson D.S. (1997) Fate of ¹⁵N-labelled fertilizer applied to spring barley grown on soils of contrasting nutrient status. *Plant and Soil*, 195: 83 – 98.
- Goos R.J., Schimelfenig J.A., Bock B.R. and Johnson B.E. (1999) Response of spring wheat to nitrogen fertilizers of different nitrification rates. *Agronomy Journal*, Vol 91: 287 – 293.
- Granli T. and Bøckman O.C. (1994) Nitrous oxide from agriculture. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences*. Suppl. 12.
- Gross F. (1984) Futterkonservierung. In: Zscheischler J., *Handbuch Mais*, 3. Aufl., Verlagsunion-Agrar.
- Gutser R. (1999) Langzeitwirkung nitrifikationsgehemmter Stickstoffdünger im Lysimeterversuch (1982-1998). *VDLUFA-Schriftenreihe 52, Kongressband 1999*: 465 - 468.
- Gutser R. (1998) Die Düngeverordnung auf dem Prüfstand – Zur Problematik von Stickstoffbilanzen. *DLG-Kolloquium v. 03.12.1997 in Kassel*: 27 - 45.
- Gutser R., Amberger A. und Vilsmeier K. (1988) N-Bilanzen nach Mineral- und Gülledüngung mit Dicyandiamid-Zusatz in langjährigen Lysimeter- und Feldversuchen. *VDLUFA-Schriftenreihe 28, Kongressband II 1988*: 503 - 516.
- Hatch D., Trindade H., Cardenas L., Carneiro J., Hawkins J., Scholefield D. and Chadwick D. (2005) Laboratory study of the effects of two nitrification inhibitors on greenhouse gas emissions from a slurry-treated arable soil: impact of diurnal temperature cycle. *Biol. Fertil. Soils*, 41: 225 – 232.
- Hauck R.D. (1980) Mode of action of nitrification inhibitors. Annual meeting of the American Society of Agronomy and Soil Science Society of America in Chicago, Illinois, Dec. 6, 1978: *Nitrification Inhibitors - Potentials and limitations*. ASA Special Publication Nr. 38.
- Hege U. und Munzert M. (1991) Versuchsergebnisse zur Wirkung stabilisierter Stickstoffdünger auf den Ertrag verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen. *Fachtagung 15./16. Okt. 1991 in Würzburg, Stabilisierte Stickstoffdünger - ein Beitrag zur Verminderung des Nitratproblems*: 121 - 128.

- Hersemann H., Sauerbeck D. und Söchting H. (1988) Ausnutzung von ^{15}N markiertem N-Dünger durch Winterweizen im Feldversuch. VDLUFA-Schriftenreihe 28, Kongressband 1988: 149 - 161.
- Hutchinson G.L. and Mosier A.R. (1981) Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45: 311 – 316.
- Irigoyena I., Muro J., Azpilikueta M., Aparicio-Tejo P. and Lamsfus C. (2003) Ammonium oxidation kinetics in the presence of nitrification inhibitors DCD and DMPP at various temperatures. *Australian Journal of Soil Science*, 41 (6): 1177 – 1183.
- Isermann K. (1994) Agriculture's share in the emission of trace gases affecting the climate and some cause-oriented proposals for sufficiently reducing this share. *Environmental Pollution*, 83(1 – 2): 95 – 111.
- Jenkinson D.S., Fox R.H. and Rayner J.H. (1985) Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen – the so-called ‚priming‘ effect. *Journal of Soil Science*, 36: 425 – 444.
- Kaiser E.-A., Eiland F., Germon J.C., Gispert M.A., Heinemeyer O., Henault C., Lind A.M., Maag M., Saguer E., Van Cleemput O., Vermoesen A., Webster C. (1996) What predicts nitrous oxide emissions and denitrification N-loss from European soils? *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 159: 541 – 547.
- Kaiser E.-A., Kohrs K., Kücke M., Schnug E., Heinemeyer O., Munch J.C. (1998) Nitrous oxide release from arable soil: Importance of N-fertilization, crops and temporal variation. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(12): 1553 – 1563.
- Kerschberger M. und Hess H. (1997) Beziehungen zwischen Stickstoffaufwand bzw. Stickstoffbilanz und N_{min} -Gehalt des Bodens in der Pflanzenproduktion Thüringens. *Agribiol. Res.*, 50, 4: 333 - 341.
- Knittel H. (1991) Einfluss von DCD-haltigen Düngern auf den Ertrag von Sonderkulturen und Getreide. Fachtagung 15./16. Okt. 1991 in Würzburg, Stabilisierte Stickstoffdünger - ein Beitrag zur Verminderung des Nitratproblems: 145 - 151.
- Linzmeier W., Schmidhalter U., Gutser R. (1999) Wirkung von DMPP auf Nitrifikation und N-Verluste (Nitrat, NH_3 , N_2O) von Düngerstickstoff im Vergleich zu DCD. VDLUFA-Schriftenreihe 52, Kongressband 1999: 485 - 488.

- Macadam X.M.B., Del Parado A., Merino P., Estavillo J.M., Pinto M. and Gonzalez-Murua C. (2003) Dicyandiamide and 3,4-dimethylpyrazole phosphate decrease N₂O emissions from grassland but dicyandiamide produces deleterious effects in clover. *Journal of Plant Physiology*, 160: 1517 – 1523.
- Mac Kenzie A.F., Fan M.X. and Cadrin F. (1998) Nitrous oxide emission in three years as affected by tillage, corn-soybean-alfalfa rotations and nitrogen fertilization. *J. Environ. Qual.*, 27: 698 – 703.
- Meisser M. und Wyss U. (1998) Wettereinfluss auf Wachstum und Reifung von Silomais. *Agrarforschung* 5 (7): 317 - 320.
- Mengel K. (1991) Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze. Gustav Fischer Verlag Jena. 7., überarbeitete Auflage.
- Merino P., Menendez S., Pinto M., Gonzalez-Murua C. and Estavillo J.M. (2005) 3,4-dimethylpyrazole phosphate reduces nitrous oxide emissions from grassland after slurry application. *Soil Use and Management*, 21: 53 – 57.
- Michel H.-J. und Wozniak H. (1998) Düngung, Nitrifikation und Denitrifikation aus der Sicht klimaverändernder Gasemissionen – ein Überblick. *Agribiol. Res.*, 51, 1: 3 – 11.
- Mokry M. (1986) Wirkung von Nitrat- und Ammoniumdüngung unter Verwendung des Nitrifikationshemmstoffes Dicyandiamid auf Ertragsbildung und Qualität von Weizen. Dissertation, Technische Universität München.
- Mokry M. und Amberger A. (1992) Einsatzmöglichkeiten von Ammoniumsulfat mit Dicyandiamid zu Winterweizen unter dem Einfluss von Standort, Bewirtschaftung und Saatstärke. *Landwirtsch. Jahrbuch* 69. Jhrg., Heft 4/92: 437 - 445.
- Mosier A.R. (1994) Nitrous oxide emissions from agricultural soils. *Fertilizer Research*, 37: 191 – 200.
- Mosier A.R., Duxbury J.M., Freney J.R., Heinemeyer O. and Minami K. (1996) Nitrous oxide emissions from agricultural fields: Assessment, measurement and mitigation. *Plant and Soil*, 181: 95 – 108.
- Oehmichen J. (1986) Pflanzenproduktion. Band 2: Produktionstechnik. Paul Parey Verlag 1986.

- Pilbeam C.J. (1996) Effect of climate on recovery in crop and soil of ^{15}N -labelled fertilizer applied to wheat. *Fertilizer Research*, 45: 209 - 215.
- Prasad R. and Power J.F. (1995) Nitrification inhibitors for agriculture, health and the environment. *Advances in Agronomy*, Vol. 54: 233 - 281.
- Raun W.R., Johnson G.V. and Westerman R.L. (1999) Fertilizer nitrogen recovery in long-term continuous winter wheat. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63: 645 – 650.
- Roco M.M. and Blu R.O. (2006) Evaluation of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate in two Chilean soils. *Journal of Plant Nutrition*, 29: 521 – 534.
- Santamaria P., Elia A., Serio F., Gonnella M. and Parente A. (1999) Comparison between nitrate and ammonium nutrition in fennel, celery and swiss chard. *Journal of Plant Nutrition*, 22: 1091 - 1106.
- Scherer H.W. and Ahrens G. (1996) Depletion of non-exchangeable $\text{NH}_4\text{-N}$ in the soil-root interface in relation to clay mineral composition and plant species. *European Journal of Agronomy*, 5: 1 - 7.
- Sommer K. und Poletschny H. (1972) N-Serve und Simazin bei Ammonium- und Nitraternährung von Weizen. *Landwirtsch. Forsch.* 25, 1972: 203 - 215.
- Spielhaus G. (1991) Stabilisierte Stickstoffdünger in der Weizenproduktion. Fachtagung 15./16. Okt. 1991 in Würzburg, Stabilisierte Stickstoffdünger - ein Beitrag zur Verminderung des Nitratproblems: 129 - 138.
- Trenkel M.E. (1997) Improving fertilizer use efficiency – Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture. International Fertilizer Industry Association, Paris, France.
- Van Cleemput O. and Beart L. (1984) The fate of labelled fertilizer nitrogen split-applied to winter wheat on a clay soil. *Pedologie*, 34: 291 - 299.
- Vilsmeier K. (1984) Bestimmung von Dicyandiamid, Nitrit und Nitrat in Bodenextrakten mit Hochdruckflüssigkeitschromatographie. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 151: 459 - 473.
- Wang F., Bear J. and Shaviv A. (1998) Modelling simultaneous release, diffusion and nitrification of ammonium in the soil surrounding a granule or nest containing ammonium fertilizer. *European Journal of Soil Science*, 49: 351 – 364.

- Weber A. (2001) Austausch stickstoffhaltiger Spurengase (NH₃, NO_x) zwischen Weizenpflanzen und der Atmosphäre. Dissertation, Technische Universität München.
- Weiske A., Benckiser G., Herbert T., Ottow J.C.G. (2001) Influence of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) in comparison to dicyandiamide (DCD) on nitrous oxide emissions, carbon dioxide fluxes and methane oxidation during 3 years of repeated application in field experiments. *Biol. Fertil. Soils* 34: 109 - 117.
- Wiesler F. (1997) Agronomical and physiological aspects of ammonium and nitrate nutrition of plants. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 160: 227 - 238.
- Zerulla W., Erhardt K., Dressel J., Barth T., Horchler von Locquenghien K., Rädle M., Leibold E., Wissemeier A. (2001) 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) – a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture. *Biol. Fertil. Soils*, 34: 79 - 84.
- Zerulla W. und Hüther O. (1996) Auswirkung einer verminderten Ertragsfähigkeit eines Standortes auf Bodenparameter, N-Ausnutzung sowie Eignung verschiedener Bodenuntersuchungsmethoden. *Agribiol. Res.*, 49, 4: 229 - 238.

9 Anhang

Tabelle 9.1: TM Erträge, N-Entzüge von Winterweizen und N_{\min} nach der Ernte auf dem Standort Dürnast 1997

Variante		Ertrag TM [dt ha ⁻¹]			N-Entzug [kg N ha ⁻¹]			N_{\min} im Boden nach Ernte 0 - 90 cm [kg N ha ⁻¹]	Netto- mineralisation/ immobilisation [kg N ha ⁻¹]	Differenzmethode	
		Stroh	Korn	Summe	Stroh	Korn	Summe			N-Saldo Dgg+N0-Entzug [kg N ha ⁻¹]	Düngeraus- nutzung [%]
N0	0	26,1	27,4	53,5	8,1	42,0	50,1	20,3	-38,4	-	-
KAS 160	12	49,9	59,6	109,4	19,2	116,7	135,9	22,3	33,9	74,2	53,6
KAS 200	13	52,3	61,1	113,4	22,9	136,4	159,3	18,3	54,4	90,8	54,6
DMPP 1	31	57,7	62,9	120,6	20,6	108,8	129,3	18,9	43,8	80,8	49,5
DMPP f	32	56,2	63,2	119,4	21,0	113,6	134,6	22,1	35,4	75,5	52,8
DMPP s	33	55,2	67,5	122,7	19,8	119,3	139,0	-	-	71,1	55,6
GD5%		17,6	9,4	25,6	10,1	17,9	26,4	4,6	-	-	-

1 = einmalige Gabe
 f = frühjahrsbetont
 s = schossbetont

Tabelle 9.2: TM Erträge, N-Entzüge von Winterweizen und N_{\min} nach der Ernte auf dem Standort Thonstetten 1997

Variante	Ertrag TM [dt ha ⁻¹]			N-Entzug [kg N ha ⁻¹]			N_{\min} im Boden nach Ernte 0 - 90 cm [kg N ha ⁻¹]	Netto- mineralisation/ immobilisation [kg N ha ⁻¹]	Differenzmethode		
	Stroh	Korn	Summe	Stroh	Korn	Summe			N-Saldo Dgg+N0-Entzug [kg N ha ⁻¹]	Dünger- aus- nutzung [%]	
N0	0	33,5	33,0	66,5	15,1	67,6	82,7	18,2	-61,0	-	-
KAS 160	12	62,8	59,5	122,3	31,6	139,2	170,8	12,2	17,0	72,0	55,0
KAS 200	13	60,5	59,9	120,4	34,0	151,2	185,2	11,0	43,8	97,5	51,2
DMPP 1	31	63,9	59,8	123,7	25,1	123,2	148,3	14,3	37,3	94,4	41,0
DMPP f	32	60,7	66,7	127,3	25,9	131,3	157,3	15,6	27,1	85,5	46,6
DMPP s	33	66,2	70,4	136,7	31,0	144,1	175,0	-	-	67,7	57,7
GD5%	-	-	7,4	-	5,7	16,6	23,4	9,9	-	-	-

1 = einmalige Gabe
f = frühjahrsbetont
s = schossetont

Tabelle 9.3: TM Erträge, N-Entzüge von Winterweizen und N_{\min} nach der Ernte auf dem Standort Dürnast 1998

Variante		Ertrag TM [dt ha ⁻¹]			N-Entzug [kg N ha ⁻¹]			N_{\min} im Boden nach Ernte 0 - 90 cm [kg N ha ⁻¹]	Netto- mineralisation/ immobilisation [kg N ha ⁻¹]	Differenzmethode	
		Stroh	Korn	Summe	Stroh	Korn	Summe			N-Saldo Dgg+N0-Entzug [kg N ha ⁻¹]	Dünger- aus- nutzung [%]
N0	0	30,2	27,2	57,4	10,1	46,1	56,2	17,2	-42,6	-	-
KAS 160	12	64,2	67,7	131,9	28,9	147,9	176,8	12,5	1,6	39,4	75,4
KAS 200	13	72,2	75,1	147,3	34,9	180,5	215,4	-	-	40,8	79,6
DMPP 1	31	77,6	74,5	152,1	32,1	143,6	175,6	11,1	4,2	40,6	74,6
DMPP f	32	68,8	69,3	138,1	29,1	140,2	169,3	11,1	10,5	46,9	70,7
DMPP s	33	61,3	64,7	126,0	26,0	135,6	161,6	-	-	54,6	65,9
GD5%		20,0	12,0	31,0	8,7	24,6	32,3	3,3	-	-	-

1 = einmalige Gabe
f = frühjahrsbetont
s = schossetont

Tabelle 9.4: TM Erträge, N-Entzüge von Winterweizen und N_{\min} nach der Ernte auf dem Standort Thonstetten 1998

Variante	Ertrag TM [dt ha ⁻¹]			N-Entzug [kg N ha ⁻¹]			N_{\min} im Boden nach Ernte 0 - 90 cm [kg N ha ⁻¹]	Netto- mineralisation/ immobilisation [kg N ha ⁻¹]	Differenzmethode		
	Stroh	Korn	Summe	Stroh	Korn	Summe			N-Saldo Dgg+N0-Entzug [kg N ha ⁻¹]	Dünger- aus- nutzung [%]	
N0	0	48,9	41,3	90,3	21,0	74,4	95,4	102,3	-108,8	-	-
KAS 160	12	63,1	64,3	127,4	36,0	165,2	201,1	108,5	-60,7	54,3	66,1
KAS 200	13	66,8	66,7	133,5	45,4	183,5	229,0	-	-	66,5	66,8
DMPP 1	31	74,0	73,8	147,8	37,0	180,8	217,8	61,0	-29,9	37,6	76,5
DMPP f	32	72,4	71,3	143,7	36,9	178,2	215,1	91,2	-57,4	40,3	74,8
DMPP s	33	59,8	61,3	121,1	34,1	161,2	195,2	-	-	60,2	62,4
GD5%		18,5	17,7	35,3	11,2	44,8	55,1	83,6	-	-	-

1 = einmalige Gabe
 f = frühjahrsbetont
 s = schossetont

Tabelle 9.5: TM Erträge, N-Entzüge von Winterweizen und N_{\min} nach der Ernte auf dem Standort Dürnast 1999

Variante		Ertrag TM [dt ha ⁻¹]			N-Entzug [kg N ha ⁻¹]			N_{\min} im Boden nach Ernte 0 - 90 cm [kg N ha ⁻¹]	Netto- mineralisation/ immobilisation [kg N ha ⁻¹]	Differenzmethode	
		Stroh	Korn	Summe	Stroh	Korn	Summe			N-Saldo Dgg+N0-Entzug [kg N ha ⁻¹]	Dünger- aus- nutzung [%]
N0	0	41,1	32,2	73,4	11,5	56,7	68,3	11,9	-53,6	-	-
KAS 160	12	75,7	67,4	143,1	27,3	144,9	172,2	11,4	3,0	56,1	64,9
KAS 200	13	82,8	69,4	152,2	32,3	161,1	193,4	9,4	23,8	74,9	62,6
DMPP 1	31	87,3	66,7	154,0	28,8	123,3	152,2	11,2	23,1	76,1	52,4
DMPP f	32	80,7	67,8	148,5	26,6	130,8	157,4	9,3	19,8	70,8	55,7
DMPP s	33	88,5	69,7	158,3	29,2	138,8	168,0	-	-	60,3	62,3
GD5%		20,3	7,1	25,4	6,9	14,2	19,4	9,7	-	-	-

1 = einmalige Gabe
 f = frühjahrsbetont
 s = schossetont

Tabelle 9.6: TM Erträge, N-Entzüge von Winterweizen und N_{\min} nach der Ernte auf dem Standort Thonstetten 1999

Variante		Ertrag TM [dt ha ⁻¹]			N-Entzug [kg N ha ⁻¹]			N_{\min} im Boden nach Ernte 0 - 90 cm [kg N ha ⁻¹]	Netto- mineralisation/ immobilisation [kg N ha ⁻¹]	Differenzmethode	
		Stroh	Korn	Summe	Stroh	Korn	Summe			N-Saldo Dgg+N0-Entzug [kg N ha ⁻¹]	Dünger- aus- nutzung [%]
N0	0	49,0	35,0	84,0	16,2	67,9	84,0	16,6	-79,2	-	-
KAS 160	12	94,5	70,6	165,1	39,7	159,6	199,3	13,7	-31,6	44,7	72,0
KAS 200	13	98,7	75,7	174,5	50,4	184,0	234,4	18,3	-31,3	49,7	75,2
DMPP 1	31	113,5	71,5	185,0	49,9	140,8	190,8	12,1	-21,5	53,3	66,7
DMPP f	32	91,0	74,2	165,2	37,3	144,8	182,1	15,6	-16,3	62,0	61,3
DMPP s	33	98,8	72,8	171,7	39,5	140,6	180,1	-	-	63,9	60,1
GD5%		22,6	5,3	26,2	9,5	11,0	18,1	16,0	-	-	-

1 = einmalige Gabe
f = frühjahrsbetont
s = schossetont

Tabelle 9.7: Erster Erntetermin 1997 in den ¹⁵N Mikroplots der Varianten ASS/DCD und ASS/DMPP mit N-Stufe 160 kg N ha⁻¹. TM Erträge und N-Entzüge von Winterweizen.

Ernte am 27.5.		TM-Ertrag			N-Entzug			¹⁵ N-markierte N-Menge NH ₄ -N [kg N ha ⁻¹]	Dünger-N Wiederfindung			ged. N- Menge [kg N ha ⁻¹]	N-Ausnutzung Differenzmethode [%] (NH ₄ +NO ₃)
Variante	Termin Düngung	Stroh	Korn [dt ha ⁻¹]	Summe	Stroh	Korn [kg N ha ⁻¹]	Summe		Pflanze				
								[%] des NH ₄ -N					
N₀		12			22								
ASS/DCD	1*	2.4.	33			83			117	36			
	f 1**	2.4.	34			79			80	43			
	f 2**	23.5.											
	Ø		34			79							
ASS/DMPP	1*	2.4.	39			98			117	44			
	f 1**	2.4.	35			84			80	42			
	f 2**	23.5.											
	f Ø		35			84							
GD_{5%}		7			18								

* einmalige Gabe zu Vegetationsbeginn

** frühjahrsbetonte Variante mit Gabe 1 und 2

Tabelle 9.8: Zweiter Erntetermin 1997 in den ^{15}N Mikroplots der Varianten ASS/DCD und ASS/DMPP mit N-Stufe 160 kg N ha^{-1} . TM Erträge und N-Entzüge von Winterweizen.

Ernte am 06.8								^{15}N -markierte	Dünger-N Wiederfindung			ged. N-Menge [kg N ha $^{-1}$]	N-Ausnutzung Differenzmethode [%] (NH_4+NO_3)	
Variante	Termin Düngung	TM-Ertrag			N-Entzug			N-Menge $\text{NH}_4\text{-N}$ [kg N ha $^{-1}$]	Pflanze					
		Stroh	Korn	Summe	Stroh	Korn	Summe		Stroh	Korn	Summe			
N_0		26	27	53	8	42	50							
ASS/DCD	1*	2.4.	66	62	128	28	104	132	117	10	39	49	160	51
	f 1**	2.4.	62	64	126	25	114	139	80	9	40	49	-	-
	f 2**	23.5.	60	59	119	25	101	126	37	9	44	53	-	-
	Ø		61	61	123	25	107	132				50	160	51
ASS/DMPP	1*	2.4.	77	70	147	39	118	157	117	11	40	51	160	67
	f 1**	2.4.	65	69	134	26	125	151	80	9	39	48	-	-
	f 2**	23.5.	57	58	115	23	95	117	37	8	40	48	-	-
	f Ø		61	63	124	25	110	134				48	160	53
GD_{5%}		10	9	17	6	19	23							

* einmalige Gabe zu Vegetationsbeginn

** frühjahrsbetonte Variante mit Gabe 1 und 2

Tabelle 9.9:

Erster Erntetermin 1998 in den ^{15}N Mikroplots der Varianten ASS, ASS/DCD und ASS/DMPP mit N-Stufe 160 kg N ha^{-1} in einer Gabe zu Vegetationsbeginn. TM Erträge, N-Entzüge von Winterweizen und N_{min} zur Ernte.

Variante	TM-Ertrag			N-Entzug			^{15}N -markierte N-Menge $\text{NH}_4\text{-N}$ [kg N ha $^{-1}$]	Dünger-N Wiederfindung			ged. N- Menge [kg N ha $^{-1}$]	N-Ausnutzung Differenzmethode [%] ($\text{NH}_4\text{+NO}_3$)	
	Stroh	Korn	Summe	Stroh	Korn	Summe		Pflanze					Boden 0-90cm
								Stroh	Korn	Summe			
N_0			8			18				-	-		
ASS			22			73	117			26	62	160	34
ASS/DCD			19			63	117			17	69	160	28
ASS/DMPP			20			67	117			19	44	160	31
$\text{GD}_{5\%}$			14			46							

Tabelle 9.10: Zweiter Erntetermin 1998 in den ^{15}N Mikroplots der Varianten ASS, ASS/DCD und ASS/DMPP mit N-Stufe 160 kg N ha^{-1} in einer Gabe zu Vegetationsbeginn. TM Erträge, N-Entzüge von Winterweizen und N_{min} zur Ernte.

Variante	TM-Ertrag			N-Entzug			^{15}N -markierte N-Menge $\text{NH}_4\text{-N}$ [kg N ha $^{-1}$]	Dünger-N Wiederfindung			ged. N- Menge [kg N ha $^{-1}$]	N-Ausnutzung Differenzmethode [%] ($\text{NH}_4\text{+NO}_3$)	
	Stroh	Korn	Summe	Stroh	Korn	Summe		Pflanze					Boden 0-90cm
								Stroh	Korn	Summe			
[dt ha $^{-1}$]			[kg N ha $^{-1}$]			[%] des $\text{NH}_4\text{-N}$							
N_0			39			39				-	-		
ASS			122			187	117			55	79	160	93
ASS/DCD			113			162	117			49	56	160	77
ASS/DMPP			122			159	117			48	56	160	75
$\text{GD}_{5\%}$			22			28							

Tabelle 9.11: Dritter Erntetermin 1998 in den ^{15}N Mikroplots der Varianten ASS, ASS/DCD und ASS/DMPP mit N-Stufe 160 kg N ha^{-1} in einer Gabe zu Vegetationsbeginn. TM Erträge, N-Entzüge von Winterweizen und N_{min} zur Ernte.

Variante	TM-Ertrag			N-Entzug			^{15}N -markierte N-Menge $\text{NH}_4\text{-N}$ [kg N ha $^{-1}$]	Dünger-N Wiederfindung				ged. N- Menge [kg N ha $^{-1}$]	N-Ausnutzung Differenzmethode [%] ($\text{NH}_4\text{+NO}_3$)
	Stroh	Korn	Summe	Stroh	Korn	Summe		Pflanze			Boden 0-90cm		
								Stroh	Korn	Summe			
N_0	30	27	57	10	46	56	-	-	-	-	-	-	-
ASS	75	78	153	33	156	189	117	10	54	65	45	160	83
ASS/DCD	65	68	133	26	137	163	117	7	49	57	43	160	67
ASS/DMPP	77	78	155	31	150	181	117	9	49	58	44	160	78
GD$_{5\%}$	14	10	24	7	22	28							

Tabelle 9.12: Erster Erntetermin 1999 in den ^{15}N Mikroplots der Varianten KAS und ASS/DMPP mit N-Stufe 160 kg N ha^{-1} .
TM Erträge, N-Entzüge von Winterweizen und N_{min} zur Ernte.

Ernte am 26.5.			Dünger-N Wiederfindung											
Variante	Termin Düngung	TM-Ertrag			N-Entzug			^{15}N -markierte N-Menge [kg N ha^{-1}]	Pflanze			Boden <i>0-90cm</i>	ged. N- Menge [kg N ha^{-1}]	N-Ausnutzung Differenzmethode [%]
		Stroh	Korn [dt ha^{-1}]	Summe	Stroh	Korn [kg N ha^{-1}]	Summe		Stroh	Korn [%]	Summe			
N_0				32			50	0			-	-		
KAS	1	26.3.		52			124	70			57	33		
	2	4.5.		51			128	40			90	26		
	3	10.6.												
	Ø			52			126				69	30	110	69
ASS/DMPP	1	26.3.		58			154	110			62	36		
	2	12.5.		57			156	50			78	43		
	Ø			57			155			67	38	160	65	
$\text{GD}_{5\%}$			4			8								

Tabelle 9.13: Zweiter Erntetermin 1999 in den ¹⁵N Mikroplots der Varianten KAS und ASS/DMPP mit N-Stufe 160 kg N ha⁻¹.
 TM Erträge, N-Entzüge von Winterweizen und N_{min} zur Ernte.

Variante		Termin Düngung	TM-Ertrag			N-Entzug			¹⁵ N-markierte N-Menge [kg N ha ⁻¹]	Dünger-N Wiederfindung			ged. N- Menge [kg N ha ⁻¹]	N-Ausnutzung Differenzmethode [%]
			Stroh	Korn [dt ha ⁻¹]	Summe	Stroh	Korn [kg N ha ⁻¹]	Summe		Pflanze		Boden 0-90cm		
									Stroh	Korn [%]	Summe			
N₀					68		73	0			-	-		
KAS	1	26.3.			106		172	70			59	34		
	2	4.5.			102		170	40			80	24		
	3	10.6.												
	Ø				104		171				67	30	160	61
ASS/DMPP	1	26.3.			107		179	110			61	35		
	2	12.5.			113		184	50			76	23		
	Ø				110		182				66	31	160	68
GD_{5%}					11		21							

Tabelle 9.14: Dritter Erntetermin 1999 in den ^{15}N Mikroplots der Varianten KAS und ASS/DMPP mit N-Stufe 160 kg N ha^{-1} .
TM Erträge, N-Entzüge von Winterweizen und N_{min} zur Ernte.

Ernte am 23.7.		Termin Düngung	TM-Ertrag			N-Entzug			^{15}N -markierte N-Menge [kg N ha $^{-1}$]	Dünger-N Wiederfindung				ged. N- Menge [kg N ha $^{-1}$]	N-Ausnutzung Differenzmethode [%]
			Stroh	Korn [dt ha $^{-1}$]	Summe	Stroh	Korn [kg N ha $^{-1}$]	Summe		Pflanze			Boden 0-90cm		
Variante									Stroh	Korn	Summe				
N₀			55	52	107	20	88	108	0	-	-	-	-		
KAS	1	26.3.	93	78	171	57	166	222	70	18	39	57	47		
	2	4.5.	96	76	171	61	161	222	40	24	49	73	29		
	3	10.6.	88	72	159	57	156	213	50	15	69	84	26		
	Ø		92	75	167	58	161	219		19	51	69	36	160	69
ASS/DMPP	1	26.3.	96	77	174	60	160	219	110	19	42	61	54		
	2	12.5.	92	75	167	55	153	208	50	21	59	80	25		
	Ø		94	76	170	57	156	214		19	48	67	45	160	66
GD_{5%}			10	7	17	10	20	29							

Tabelle 9.15: Erträge von Siomais

Variante	N-Stufe (1997) kg N ha ⁻¹		1997		1998		1999
			Thonstetten MJ NEL ha ⁻¹	Dürnast MJ NEL ha ⁻¹	Thonstetten MJ NEL ha ⁻¹	Dürnast MJ NEL ha ⁻¹	Thonstetten MJ NEL ha ⁻¹
Kontrolle	0	0	98227	87874	140577	69598	77008
KAS	11	80 (100)	145226	132400	152544	87882	112758
KAS	12	120 (140)	146810	137291	157180	107868	129273
KAS	13	160 (180)	151224	145534	161956	102686	128113
KAS	14	120 (140)	151531	134988	168084	103543	126944
KAS + U	15	120 (140)	163171	151198	175563	94545	136370
ASS/DCD	21	80 (100)	142764	129903	153926	99229	120553
ASS/DCD	22	120 (140)	157757	131918	158368	104697	140405
ASS/DCD + U	23	80 (100)	151839	141984	165272	98782	120609
ASS/DCD + U	24	120 (140)	154011	140245	152459	106577	143475
ASS/DMPP	31	80 (100)	146564	131666	154270	104300	116651
ASS/DMPP	32	120 (140)	154208	135927	154364	103323	127124
ASS/DMPP + U	33	80 (100)	156509	139079	163566	110511	121846
ASS/DMPP + U	34	120 (140)	159236	151920	159598	106052	136829

U = Unterfußdüngung 60 kg N ha⁻¹

Lebenslauf

Name: Werner Linzmeier

geboren: 04. August 1969 in Traunstein

Familienstand: verheiratet, 2 Kinder

Schulbildung:

1975 - 1980

Grund- und Hauptschule in Übersee

1980 – 1989

Gymnasium in Marquartstein

Abschluss: Allgemeine Hochschulreife 1989

Grundwehrdienst:

1989 - 1990

Wehrdienst in Traunstein

Hochschulstudium:

1990 – 1996

Studium der Agrarwissenschaften,

Fachrichtung Pflanzenbauwissenschaften

an der Technische Universität München-Weihenstephan

Abschluss: Diplom-Agraringenieur (Dipl.-Ing.agr.Univ.)

Wissenschaftliche Tätigkeit:

1996 – 2000

Wissenschaftlicher Angestellter

am Lehrstuhl für Pflanzenernährung

der Technischen Universität München-Weihenstephan

Berufliche Tätigkeit

seit 2000

Mitarbeiter der KWS SAAT AG in Einbeck

Beratungsstellenleiter im Vertrieb Zuckerrübe Inland