

Depotstabilität von lokal injiziertem Ammonium und Einfluss auf den Metabolismus von Sommerweizen

Ute Menge-Hartmann und Siegfried Schittenhelm*

Zusammenfassung

Für eine erfolgreichere Umsetzung des CULTAN-Verfahrens (Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition) zur Stickstoffdüngung von Ackerkulturen, bei dem zur Verminderung von N-Verlusten Ammoniuminjektionsdepots angelegt werden, sind sowohl Überprüfungen der Stabilität dieser Depots als auch der Auswirkungen möglicher N-Transformationen auf den Metabolismus der Pflanzen erforderlich. Hierzu wurde Sommerweizen (*Triticum aestivum* L.) in zweijährigen Gefäßversuchen mit lokal injizierter Diammoniumphosphatlösung (NH₄-N) angebaut im Vergleich zu konventionell oberflächlich appliziertem Calciumnitrat (NO₃-N) und einer Kontrolle ohne N-Düngung (-N). Zu drei Ernteterminen wurden N-Status und pH-Werte von Bodenzonen bestimmt und in den Pflanzen Konzentrationen von anorganischen Kationen, Gesamtstickstoff, löslichem Protein, sowie von Metaboliten und Aktivitäten von Leitenzymen des N-Metabolismus gemessen.

Zu Beginn des Streckungswachstums wurde infolge von Nitrifikation in den peripheren Zonen der Ammoniumdepots Nitrat akkumuliert, welches bei den beiden späteren Ernteterminen nicht mehr nachweisbar war. Weiterhin erfolgte eine nach Depotzonen differenzierte Absenkung des Boden-pHs. Aufnahme und Assimilation des gebildeten Nitrats trug möglicherweise zur Abmilderung von unter Ammoniumernährung häufig beobachteten Toxizitätssymptomen bei. Nur einige der für Ammoniumernährung typischen Effekte wie z. B. niedrigere Konzentrationen von anorganischen Kationen und organischen Anionen, sowie höhere Amidkonzentrationen, waren zu Beginn der Stängelstreckung zu beobachten, während in späteren Stadien keine Unterschiede zu den NO₃-N-Pflanzen bestanden. Es ist davon auszugehen, dass das unter CULTAN-Düngung durch Nitrifikation gebildete Nitrat kontinuierlich von den ammoniumgedüngten Pflanzen aufgenommen wird und so das Risiko von N-Verlusten durch Nitratauswaschung reduziert.

Schlüsselwörter: Weizen, CULTAN, Ammoniuminjektionsdüngung, Depotstabilität, N-Metabolismus, Nitratreduktase, Glutaminsynthetase, Ertrag, Ertragskomponenten

Abstract

Depot stability of locally injected ammonium and effect on the metabolism of spring wheat

In order to successfully implement the CULTAN (Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition) fertilization technique, in which ammonium injection depots are created to reduce N losses, a monitoring of both the stability of these depots as well as of the effects of possible N transformations on the metabolism of plants is required. Spring wheat (*Triticum aestivum* L.) was planted in two-year pot experiments with locally injected di-ammonium-phosphate solution (NH₄-N) compared with conventional surface applied calcium nitrate (NO₃-N) and a control without N fertilisation (-N). On all three harvest dates, the N status and pH values of soil zones were determined, and the concentrations of inorganic cations, total nitrogen, soluble protein and metabolites, as well as the activity of marker enzymes for N-metabolism were measured in the plants.

At the beginning of stem elongation, nitrate due to nitrification accumulated in the periphery zones of the ammonium depot, but this was no longer discernible in the two later harvest dates. Furthermore, a differing reduction of the soil pH value was found depending on depot zone. The uptake and assimilation of the nitrate by the ammonium-fertilized plants possibly contributed to a lessening of the commonly observed toxicity symptoms under ammonium nutrition. Only some of the effects typical for the ammonium nutrition, such as low concentrations of inorganic cations and organic anions, as well as higher amide concentrations could be observed at the beginning of the stem growth, while in later stages, there were no differences to the NO₃-N plants. It can be assumed that nitrate developed through nitrification under CULTAN fertilization is continuously taken up by ammonium fertilized plants and thus reduces the risk of N losses through nitrate leaching.

Keywords: Wheat, CULTAN, ammonium injection fertilization, depot stability, N metabolism, nitrate reductase, glutamine synthetase, yield, yield components

* Julius Kühn-Institut (JKI), Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig/Deutschland; Email: ute.menge@jki.bund.de

1 Einleitung

Die Notwendigkeit N-Verluste durch Nitratauswaschung und Denitrifikation sowie durch Ammoniumverluste an die Atmosphäre zu reduzieren und die Nutzung der derzeit mit weltweit geschätzten 100 Mio. t N eingesetzten Dünger durch Nahrungs- und Energiepflanzen zu verbessern, erfordert die ständige Suche nach effizienteren Düngungskonzepten (Lea und Azevedo, 2006). Eine solche N-Managementstrategie basiert auf der Verwendung von Ammonium- anstelle von Nitrat-dominierten N-Düngern. Bekannt sind diese Konzepte unter Bezeichnungen wie Enhanced Ammonium Supply (EAS) bzw. Enhanced Ammonium Nutrition (EAN). Eine ausführliche Beschreibung zu EAS und EAN findet sich in Camberato und Bock (1990) sowie Bock et al. (1991). Zum Zwecke einer effizienteren N-Düngung in granulärer oder flüssiger Form praktizieren Landwirte weltweit eine platzierte Düngung als Bandablage auf die Bodenoberfläche bzw. mittels Messerscharen in den Boden oder als Punktinjektion mit Hilfe von Injektionsrädern in den Boden (Page, 1975; Roberts et al., 1992; Sharratt und Cochran, 1992; Stecker et al., 1993; Baker und Timmons, 1994; Sowers et al., 1994; Petersen et al., 2004). In Deutschland wurde ein als Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition (CULTAN) bezeichnetes Düngeverfahren durch Sommer (2000) eingeführt. Bei der CULTAN-Düngung wird der gesamte N-Dünger als hochkonzentrierte Lösung von Ammonium und/oder Harnstoff lokal in den Wurzelraum injiziert. In Landwirtschaft und Gartenbau werden solche Lösungen u.a. mit Injektionsrädern einmalig zu Vegetationsbeginn appliziert und dadurch weitere Überfahrten eingespart. Sommer (2000) geht davon aus, dass N-Verluste durch Nitratauswaschung aufgrund der Stabilität der Ammoniumdepots gegenüber Nitrifikation reduziert werden und mithin die Effizienz der N-Düngung zunimmt.

Im Gegensatz zu dem im Boden leicht beweglichen Nitrat ist Ammonium wegen der Adsorption an Bodenpartikel ein N-Dünger mit langsamer Mobilisierung. Als primär anorganische, von mineralisierter organischer Materie freigesetzte Stickstoffkomponente, spielt Ammonium neben seinem Nitrifikationsprodukt Nitrat eine Schlüsselrolle in der Stickstoffernährung von Pflanzen und Mikroorganismen (Loqué und von Wirén, 2004). Diese Rolle wird unterstrichen durch eine, insbesondere bei niedriger N-Düngermenge, im Vergleich zu Nitrat bevorzugte Aufnahme durch viele Pflanzenarten (Gazzarini et al., 1999). Hohe und ausschließliche $\text{NH}_4\text{-N}$ -Düngung kann dagegen zum sogenannten Ammoniumsyndrom führen (Wiesler, 1998), d. h. das Pflanzenwachstum hemmen (Walch-Liu et al., 2001), den Gehalt an mineralischen Kationen und organischen Anionen absenken und Zellen das osmotische Gleichgewicht entziehen (Salsac et al., 1987) oder einen

allgemeinen Stress für den pflanzlichen Stoffwechsel erzeugen (Britto und Kronzucker, 2002). Als Stressursache wird u.a. das energieintensive sinnlose Ein- und Ausschleusen von Ammoniumionen durch die Plasmamembranen der Wurzelzellen diskutiert (Britto und Kronzucker, 2006). Die Reaktion der Pflanzen auf ausschließliche Ammoniumversorgung ist ähnlich wie bei Vorliegen von Salz- und Wasserstress (Brück und Guo, 2006). Sommer (2000) nimmt an, dass die genannten Effekte einer starken oder ausschließlichen Ammoniumernährung nicht auf die CULTAN-Düngung übertragbar sind, da die meisten dieser Beobachtungen aus Experimenten mit ungepufferten Nährlösungen oder Sandkulturen abgeleitet wurden. In den Böden der landwirtschaftlichen Praxis sind dagegen die Nährstoffe nicht gleichmäßig verfügbar, Wurzelexsudate bleiben in der Rhizosphäre erhalten und es bestehen Wechselwirkungen von Bodenmikroflora bzw. -fauna (Miller und Cramer, 2004).

Um die im vorangegangenen Absatz genannten Hypothesen von Sommer (2000) zu prüfen und wegen widersprüchlicher Befunde aus anderen CULTAN-Experimenten (Wiesler, 1998; Kücke, 2003; Hermann et al., 2006) sind weitere vergleichende Feld- und Gefäßversuche zur Ammoniuminjektionsdüngung erforderlich. So wurden am ehemaligen Institut für Pflanzenbau und Grünlandwirtschaft der FAL durch Einsatz von Sickerwassersammlern und Lysimetern umfangreiche CULTAN-Feldversuche zur Prüfung der These einer verminderten Nitratauswaschung durchgeführt (Kücke, et al., 2006). Des Weiteren erfolgten Gefäßversuche zur Frage der Qualität und Quantität der mit den Ammoniumdepots assoziierten Bodenmikroorganismen (Matoka et al., 2007). In einem Gefäßversuch mit Sommergerste wurden physiologische Aspekte der oberirdischen Pflanzenteile unter konventioneller $\text{NO}_3\text{-N}$ -Düngung mit $\text{NH}_4\text{-N}$ -Injektionsdüngung verglichen (Schittenhelm und Menge-Hartmann, 2006). Durch die vorliegende Arbeit mit Sommerweizen sollte die Untersuchung nicht nur auf eine weitere Kulturart ausgedehnt sondern neben der Pflanze auch der Boden analysiert werden. Darüber hinaus sollten im Hinblick auf eine erfolgreiche Umsetzung der CULTAN-Düngung in die Praxis das Ausmaß und mögliche Auswirkungen von Umsetzungsprozessen in den Depots auf Pflanzenwachstum, Ionenantagonismus, repräsentative Markermetaboliten und Enzymaktivitäten der primären N-Assimilation geklärt werden.

2 Material und Methoden

2.1 Kulturbedingungen

Der Versuch wurde in den Jahren 2003 und 2004 in 80-Liter Gefäßen in der Vegetationshalle des Instituts für Pflanzenbau und Grünlandwirtschaft der Bundesfor-

schungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in Braunschweig durchgeführt. Die Aussaat der Sommerweizensorte Vinjett erfolgte am 26. März 2003 sowie am 29. März 2004 im 5 x 5 cm Quadratverband (400 Pflanzen m⁻²). Der Versuch war als zweifaktorielle randomisierte Blockanlage mit drei Wiederholungen angelegt. Die Versuchsfaktoren bestanden aus drei N-Düngungsvarianten und vier über die Vegetationsperiode verteilte Erntetermine. Folgende N-Varianten wurden untersucht: 4 g NO₃-N als Calciumnitrat, 4 g NH₄-N als Diammoniumphosphat (DAP; 10 %ig, nahe Sättigung, pH 7,8) und eine Kontrolle ohne N-Düngung (-N). Der NO₃-N wurde zur Aussaat auf der Bodenoberfläche verteilt. Um die Injektion mit einem praxisüblichen Injektionsrad (Kücke, 2003) zu simulieren wurde die DAP-Lösung jeweils am Tag nach der Aussaat an fünf Stellen pro Gefäß in einer Tiefe von 7 cm mit einer Pipette injiziert. Zum Ausgleich für das über die DAP-Lösung applizierte Phosphat erhielten die NO₃-N- und die -N-Variante eine P-Kompensation als CaH₂PO₄·H₂O. Details zum Bodensubstrat, den zugesetzten Makro- und Mikronährstoffe und der Bewässerungsmodalitäten sind in Schittenhelm und Menge-Hartmann (2006) dargestellt.

2.2 Bodenbeprobung, Bestimmung von Nitrat, Ammonium und pH-Wert

Im Jahr 2004 wurde zur Analyse der in definierten Depotdiffusionszonen vorliegenden Nitrat- bzw. Ammoniumkonzentration unmittelbar nach Anlage der Depots, in zwei, und zu den Ernteterminen, in drei Wiederholungen, durch Abtragen einer 7 cm starken Bodenschicht eine horizontal das Depotzentrum schneidende Querschnittsfläche freigelegt. Danach wurden Bodenproben aus dem Depotzentrum (Zone Z1; Ø 2 cm) und aus den sich konzentrisch anschließenden Diffusionszonen Z2 (Ø 3 cm), Z3 (Ø 2 cm) und Z4 (Ø 2 cm) in einer Tiefe von bis zu 2 cm entnommen. Der Gesamtdurchmesser der beprobten Zonen betrug 16 cm. In den NO₃-N und -N-Varianten wurden entsprechend 7 cm unter der Bodenoberfläche Proben entnommen. Alle drei N-Varianten wurden darüber hinaus vertikal in 25 cm Bodentiefe beprobt. Die Bodenproben wurden manuell von Wurzeln bereinigt und bis zur Analyse bei -20 °C gelagert. Das Vordringen der Wurzeln in die Depotzonen wurde zu den verschiedenen Ernteterminen visuell begutachtet. In den Proben der Depotbodenzone wurde die NO₃-N- und die NH₄-N-Konzentration durch einstündige Extraktion der feuchten, homogenisierten und gesiebten Böden (5 mm-Sieb) mit einer 0,0125 M CaCl₂-Lösung (VDLUFA, 1991) im Verhältnis 1:4 (Boden : Lösung) und anschließender Messung der Filtrate mit einem SKALAR-Autoanalyser (SKALAR-Analytik GmbH, Erkelenz) ermittelt. Die pH-Werte wurden nach einstündigem Aufschlämmen von 10 g lufttrockenem, gesiebttem Boden

(2 mm Sieb) in 25 ml einer 0,01 M CaCl₂-Lösung bestimmt (VDLUFA, 1991).

2.3 Bestimmung von Ertrag und Ertragskomponenten, Chlorophyll, Kationen, Metaboliten und Enzymaktivitäten

Bei der Ernte wurden 40 Pflanzen unmittelbar über dem Boden abgeschnitten und die Erträge und Ertragskomponenten ermittelt wie in Schittenhelm und Menge-Hartmann (2006) beschrieben. Außerdem wurden jeweils 15 Haupttriebe pro Gefäß zu Beginn (41 Tage nach Aussaat, TnA), bzw. auf halbem Weg der Stängelstreckung (55 TnA) sowie zum Ährenschieben (69 TnA) unmittelbar über dem Boden abgeschnitten. Die jeweils oberen und unteren Blätter wurden unmittelbar in flüssigem Stickstoff eingefroren, in einem Mörser pulverisiert und bis zur Analyse bei -80 °C gelagert. Angaben zur Bestimmung von Blattpigmenten, Nitrat und Gesamt-N finden sich in Schittenhelm und Menge-Hartmann (2006). Die Bestimmung der *in vitro*-Aktivität der Nitratreduktase erfolgte entsprechend nach Basra et al. (2002). Die Enzyme wurden aus 0,2 g gemörselter Blattprobe mit 1 ml Extraktionspuffer extrahiert, der 0,05 M Tris-HCl (pH 8,5), 1 mM Dithiothreitol, 10 µM FAD, 1 µM Na₂MoO₄, 1 mM EDTA und 10 µM Leupeptin enthält. 100 µl des Überstandes des zentrifugierten Homogenats wurden der Testlösung hinzugefügt, die 50 µmol Kalium-Puffer (pH 7,5) und 20 µmol KNO₃ in einem finalen Volumen von 2,0 ml enthält. Die Reaktion wurde durch Hinzufügen von 0,1 ml NADH (5,64 mM) gestartet und die Mischung für 10 Min. bei 30 °C inkubiert. Das gebildete Nitrit wurde nach Farbentwicklung für 30 Min. mit einer 1:1-Mischung von 1 % (w : v) Sulphanilamid in 1,5 M HCl und 0,02 % (w : v) N-Naphthylethylen-diamin-Dihydrochlorid durch Messen der Absorption bei 540 nm bestimmt.

Die Aktivität der Glutaminsynthetase wurde entsprechend nach Sohn (1986) ermittelt. Hierzu wurde HEPES-NaOH-Puffer (pH 7,0), der 50 mM HEPES, 10 mM Cystein und 5 % (w : v) Polyvinylpyrrolidon enthält, den gefrorenen Proben hinzugefügt. Achthundert-Mikroliter-Aliquots des Überstandes der zentrifugierten Homogenate (20900 g, 30 Min., 4 °C) wurden für den Enzymtest eingesetzt. Die Testmischung enthielt 600 µl HEPES-Puffer, 200 µl MgSO₄ (40 mM), 800 µl L-Glutamat (320 mM), 200 µl Hydroxylamin (NH₂OH x HCl, 23,3 mM) und 400 µl ATP (8 mM). Die Reaktion wurde nach 30 Min. bei 40 °C beendet durch Hinzufügen von 800 µl einer Lösung, die gleiche Volumina von 10 % FeCl₃ x H₂O in 0,2 M HCl, 25 % TCA in H₂O und halbkonzentrierte HCl enthält. Das Präzipitat wurde zentrifugiert (20 900 g, 10 Min.) und das gebildete -Glutamylhydroxamat spektralphotometrisch bei 540 nm quantifiziert.

Ammonium wurde mit dem SKALAR-System nach dem Phenolhypochloridtest (Berthelot-Reaktion) bestimmt, der bei niedrigen Konzentrationen für vergleichende Untersuchungen verlässliche Werte liefert (Hirel et al., 2005). Nach Aufschluss durch Nassveraschung von getrocknetem und gemahlenem Pflanzenmaterial (VDLUFA, 1991) wurden die Konzentrationen an Phosphor spektralphotometrisch nach der Ammoniummolybdatmethode (Blaufärbung, Methodenblatt Braun-Melsungen Apparatebau, Melsungen) an einem Zeiss-Braun-Analysensystem B 2000 gemessen. Die Konzentrationen an Kalium und Calcium wurden mit einem Atomabsorptionsspektrometer (Perkin-Elmer 430, Waltham, USA) bestimmt. Organische Säuren wurden aus zermörserten gefrorenen Blattproben (0,2 g Frischmasse) zweimal in jeweils 1 ml kochendem destilliertem Wasser für jeweils 30 Minuten extrahiert (Callaway et al., 1996) und nach Zentrifugation (10 Min., 20 900 g) die kombinierten Überstände mit einem HPLC (Kontron Instruments) mit Rezex ROH-Organic Acid H⁺-Säule (Phenomenex Ltd., Torrance, USA) analysiert [30 °C, 0,005 M H₂SO₄, Flussrate von 0,5 ml Min.⁻¹, Refraktionsindexdetektor Shodex RI-71 (Showna Denko K.K., Tokio, Japan)]. Freie Aminosäuren wurden aus gefrorenen gemörserten Blattproben (0,2 g FM) mit 1,5 ml kalter Extraktionslösung [(Ethanol abs.: 0,25 M HCl (80:20, v:v)] für 1 Std. bei 4 °C extrahiert, 10 Min. bei 15 300 g zentrifugiert und der Überstand bei 34 °C unter N₂-Strom eingeeengt. Die Aminosäuren wurden nach Probenvorbereitung und Derivatisierung mit einem kommerziellen Kit (EZ:faast; Phenomenex Ltd., Torrance, USA) gaschromatographisch analysiert (Hewlett-Packard, HP 6890, FID-Temperatur 250 °C, Split-Verhältnis 1:15, Trägergas N₂, Ofentemperaturanstieg von 110 °C auf 320 °C in 7 Min.). Zur Quantifizierung wurde Norvalin als interner Standard eingesetzt.

2.4 Statistische Analyse

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Statistikprogramm SAS (Statistical Analysis System) Version 9.1. Der Mittelwertvergleich wurde mit dem multiplen t-Test (LSD-Test; $P < 0,05$) durchgeführt.

3 Ergebnisse

3.1 Ertrag und Ertragskomponenten

Die drei N-Varianten hatten im Jahr 2004 höhere Korn-, Stroh- und Biomasseerträge als im Jahr 2003 (Tabelle 1). Besonders ausgeprägt war der Jahreseffekt bei der -N-Variante, deren Ertrag sich im zweiten Versuchsjahr mehr als verdoppelte. Im Jahr 2003 erbrachten die NH₄-N-Pflanzen gegenüber den NO₃-N-Pflanzen einen um 23 % höheren Kornertrag. Dieser Mehrertrag war auf eine deutlich höhere Ährendichte (+14 %) und eine leicht höhere Tausendkornmasse (+ 7%) zurückzuführen. Ähnliche Ergebnisse lieferte auch das Versuchsjahr 2004. Dort erbrachten die NH₄-N-Pflanzen im Vergleich zu den NO₃-N-Pflanzen einen um 19 % höheren Kornertrag, die Ährendichte war um 17 % und die Tausendkornmasse um 2 % erhöht. Allerdings waren die Unterschiede für Kornertrag und Ertragskomponenten im Gegensatz zu denen im Jahr 2003 statistisch nicht signifikant. In beiden Versuchsjahren und für sämtliche Merkmale wies die -N-Variante signifikant niedrigere Werte auf als die NO₃-N- bzw. NH₄-N-Variante.

3.2 Depotstabilität

Drei Tage nach Depotinjektion betrug die Konzentration an NH₄-N im trockenen Boden im Depotzentrum (Z1) 3934 mg kg⁻¹ (± 813; n = 2), in der Diffusionszone Z2 (äu-

Tabelle 1:

Einfluss der N-Düngungsvarianten auf Ertrag und Ertragsstruktur der Sommerweizensorte Vinjett in den Jahren 2003 und 2004. Mittelwerte innerhalb einer Zeile und eines Jahres mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant ($P < 0,05$)

Parameter	2003			2004		
	-N	NO ₃ -N	NH ₄ -N	-N	NO ₃ -N	NH ₄ -N
Ertrag						
Korn (g pro Pflanze)	0,42 a	1,97 b	2,43 c	0,95 a	2,82 b	3,36 b
Stroh (g pro Pflanze)	0,47 a	1,96 b	2,14 b	1,14 a	3,06 b	3,04 b
Biomasse (g pro Pflanze)	0,89 a	3,93 b	4,56 c	2,09 a	5,89 b	6,41 b
Ernteindex (%)	47,44 a	50,16 a	53,12 b	45,46 a	48,01 b	52,43 c
Ertragsstruktur						
Ähren (Anzahl pro Pflanze)	1,00 a	1,90 b	2,16 b	1,01 a	2,21 b	2,58 b
Körner (Anzahl pro Ähre)	15,44 a	30,41 b	30,96 b	29,06 a	33,21 b	33,20 b
1000-Kornmasse (g)	27,25 a	34,05 b	36,32 c	32,38 a	38,61 b	39,46 b

Berer Durchmesser 8 cm) 1809 mg kg⁻¹ (± 977; n = 2), in Z3 92 mg kg⁻¹ (± 49; n = 2), in Z4 nur noch 5 mg kg⁻¹ und im Ausgangsboden ohne Depot lediglich 1 mg kg⁻¹ TM. Die NO₃-N-Konzentration rangierte in allen Zonen zwischen 2,1 und 4,1 mg kg⁻¹ Bodentrockenmasse und war damit niedriger als im Ausgangsboden ohne Depot (7,6 mg kg⁻¹). Der pH-Wert lag in den Depotzonen sowie im Ausgangsboden zwischen 7,3 und 7,6.

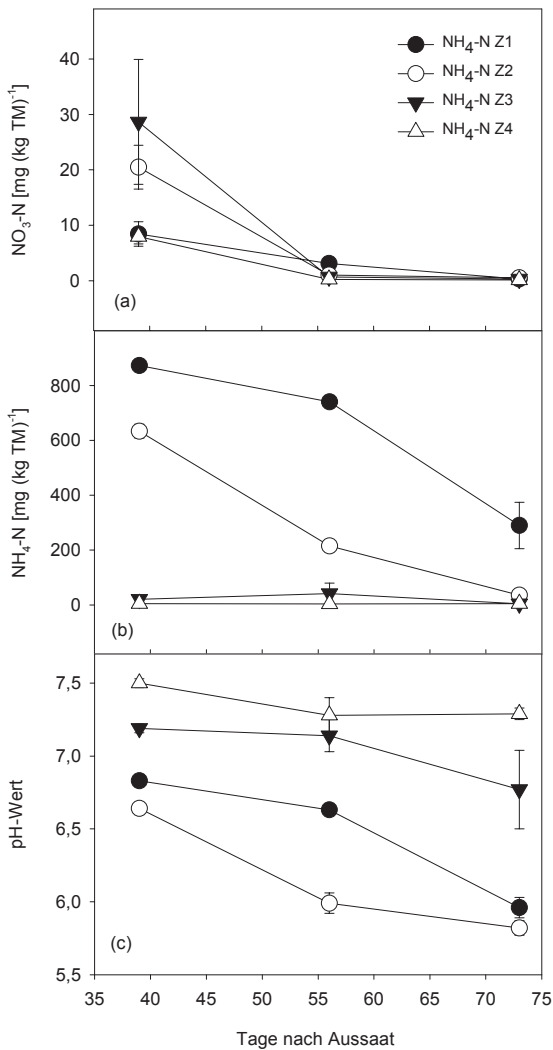


Abbildung 1:

NO₃-N- (a), NH₄-N-Konzentrationen (b) und pH-Werte (c) von Ammoniumdepot-Diffusionszonen (Z1 bis Z4) in einem Gefäßversuch mit der Sommerweizensorte Vinjett als Funktion der Tage nach Aussaat (TnA) des Jahres 2004. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardfehler der Mittelwerte der einzelnen Merkmale

Bei der ersten Zeiternte (41 TnA) hatte die NH₄-N-Konzentration in den Zonen Z1, Z2 und Z3 um 78, 65 bzw. 78 % abgenommen während Z4 unverändert blieb (Abbildung 1b). Die NO₃-N-Konzentration war in Z3 auf 29, in Z2 auf 21 und in Z1 und Z4 auf 8 mg kg⁻¹ Bodentrockenmasse angestiegen (Abbildung 1a). Mit dem Anstieg der NO₃-N-

Konzentration war eine Absenkung des pH-Wertes, besonders in Z2 verbunden (Abbildung 1c).

Im weiteren Verlauf nahm die NH₄-N-Konzentration in den Zonen Z1 und Z2 kontinuierlich ab. Die NO₃-N-Konzentration lag ab 55 TnA in allen Diffusionszonen unter 3,1 mg kg⁻¹ Bodentrockenmasse. Der pH-Wert nahm in Z1 und Z2 bis 69 TnA kontinuierlich bis auf pH 5,8 ab. Unterhalb der Depots (ca. 5 cm über Gefäßboden) wurden zu allen Untersuchungsterminen keine erhöhten NH₄-N- oder NO₃-N-Konzentrationen beobachtet. Die Wurzeln wuchsen 41 TnA bis in Z3 hinein. In dieser Zone war die Konzentration für NO₃-N annähernd gleich hoch wie die für NH₄-N (29 bzw. 21 mg kg⁻¹ Bodentrockenmasse) bei schwach alkalischem pH-Wert. Fünfundfünfzig Tage nach Aussaat drangen die Wurzeln in Z2 und 69 TnA bis in das Depotzentrum (Z1) vor. In diesen Zonen lag die NH₄-N-Konzentration zu beiden Ernteterminen noch relativ hoch und der pH-Wert war deutlich abgesenkt.

3.3 Ionen, Gesamtstickstoff, lösliches Protein und N-Metaboliten

Wegen weitgehender Übereinstimmung der Ergebnisse für die oberen und unteren Blätter werden im Folgenden hauptsächlich die Ergebnisse für die unteren Blätter dargestellt. Die Ernährung der Weizenpflanzen durch Nitrat und Ammonium zeigte entweder keinen oder einen nach Entwicklungsstadien differenzierten Einfluss auf die Untersuchungsparameter. So bildeten die Haupttriebe der NO₃-N- und NH₄-N-Pflanzen zu den drei Untersuchungsterminen vergleichbare Trockenmassen (Abbildung 2).

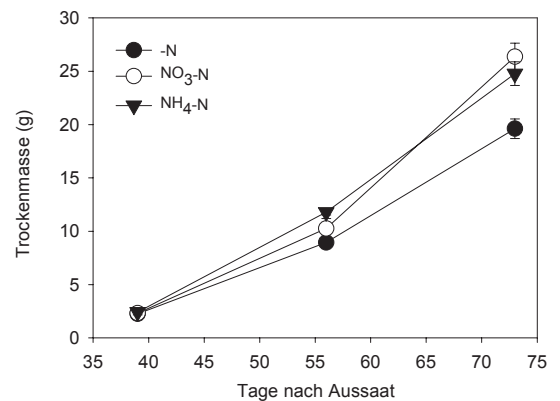


Abbildung 2:

Trockenmasse von 15 Haupttrieben der Sommerweizensorte Vinjett eines Gefäßversuchs mit verschiedenen N-Düngungsvarianten als Funktion der Tage nach Aussaat (TnA). Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardfehler der Mittelwerte der einzelnen Merkmale

Auch die Konzentrationen an Chlorophyll, Gesamt-N und löslichem Protein in den Blättern der NO₃-N- und der NH₄-N-Pflanzen unterschieden sich innerhalb der einzel-

nen Ernten und Jahre meist nicht signifikant (Tabelle 2), während die -N-Pflanzen jeweils deutlich niedrigere Werte aufwiesen. Entsprechendes wurde auch für die Konzentrationen an Saccharose, Glucose und Fructose gefunden (nicht dargestellt).

Die Form der N-Düngung hatte einen Einfluss auf die Aminosäurekonzentrationen in den Blättern. Als Hauptaminosäuren wurden Alanin und Serin, gefolgt von Glutaminsäure (Glu) und Asparaginsäure (Asp) identifiziert (nicht dargestellt). Für die Stickstoffernährung sind Glu und Asp sowie die Amide Glutamin (Gln) und Asparagin (Asn) besonders wichtig. Im Mittel der Jahre enthielten die Blätter der -N-Pflanzen zum Zeitpunkt 41 TnA die niedrigste Glu-Konzentration ($2,3 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$). In den $\text{NO}_3\text{-N}$ -Pflanzen war sie um etwa 30 % höher als in den $\text{NH}_4\text{-N}$ -Pflanzen ($5,3$ bzw. $3,7 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$) und die Konzentration an Asp entsprechend um etwa 33 % höher ($2,4$ bzw. $1,6 \text{ mg g}^{-1} \text{ TM}$). Diese Relation zwischen den gedüngten Varianten bestand auch 55 TnA für Glu während sich die Asp-Konzentrationen nicht mehr unterschieden (nicht dargestellt). Die Konzentration der Amide war 41 TnA im Mittel der Jahre bei den $\text{NH}_4\text{-N}$ -Pflanzen etwa doppelt so hoch wie bei den $\text{NO}_3\text{-N}$ -Pflanzen (Tabelle 2). Fünfundfünfzig Tage nach Aussaat bestand kein signifikanter Unterschied mehr zwischen den gedüngten Varianten. Die -N-Pflanzen wiesen in der Regel die niedrigsten Amidkonzentrationen auf (Tabelle 2).

Die Applikation der beiden unterschiedlichen N-Formen beeinflusste auch die Konzentration der Makronährstoffe Kalium, Calcium und Phosphor. In den Blättern der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Pflanzen lag die K-Konzentration 55 TnA und die Ca-Konzentration 41 TnA über derjenigen für die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Pflanzen (Abbildung 3a, 3b, Jahr 2004). Bei den anderen Ernteterminen bestanden nur geringfügige Unterschiede in den Konzentrationen dieser beiden Kationen. Die P-Konzentrationen zeigten 55 und 69 TnA ein leicht erhöhtes Niveau in den $\text{NH}_4\text{-N}$ - gegenüber den $\text{NO}_3\text{-N}$ -Pflanzen (Abbildung 3c). Die Analyse der organischen Anionen ergab in den Blättern der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Pflanzen eine höhere Malatkonzentration als in denen der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Pflanzen (Tabelle 2). Eine zusätzliche Bestimmung von Citrat und Succinat im Jahr 2004 zeigte, dass 41 TnA die Summe aus Malat, Citrat und Succinat in den $\text{NO}_3\text{-N}$ -Blättern um etwa 70 % höher war als in den $\text{NH}_4\text{-N}$ -Blättern (entsprechend 20 bzw. 6 $\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$) und dass sich 55 TnA die entsprechenden Werte der $\text{NO}_3\text{-N}$ und der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Pflanzen stärker angeglichen hatten (15 bzw. 13 $\text{mg g}^{-1} \text{ TM}$).

Tabelle 2:

Einfluss der N-Düngungsvarianten auf die Konzentrationen von Chlorophyll, Gesamtstickstoff, löslichem Protein und von Metaboliten in Blättern des Haupttriebs der Sommerweizensorte Vinjett zum Zeitpunkt 41 und 55 Tage nach Aussaat (TnA) in den Jahren 2003 und 2004. Mittelwerte innerhalb einer Zeile und eines Jahres mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant ($P < 0,05$)

TnA/Parameter	2003			2004		
	Ohne N	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	Ohne N	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$
41 TnA						
Chlorophyll [mg (g TM)^{-1}]	9,31 a	15,68 b	13,12 b	11,77 a	11,12 a	13,65 a
Gesamt-N [mg (g TM)^{-1}]	32,10 a	65,40 c	56,60 b	49,25 a	61,25 b	62,97 b
Protein [mg (g TM)^{-1}]	43,71 a	78,96 b	65,96 b	74,60 a	73,60 a	89,30 a
Amide [mg (g TM)^{-1}]*	0,00 a	3,25 b	7,06 c	0,85 a	1,29 a	2,14 b
Malat [mg (g TM)^{-1}]*	4,28 a	10,90 b	6,47 a	9,95 a	9,30 a	3,49 a
$\text{NO}_3\text{-N}$ [mg (g TM)^{-1}]	0,00 a	6,07 b	1,60 a	0,36 a	7,09 c	4,43 b
55 TnA						
Chlorophyll [mg (g TM)^{-1}]	4,89 a	12,44 b	12,84 b	4,80 a	9,95 c	9,25 b
Gesamt-N [mg (g TM)^{-1}]	22,20 a	52,60 b	48,70 b	19,12 a	44,23 b	42,11 b
Protein [mg (g TM)^{-1}]	29,43 a	65,35 b	59,52 b	42,10 a	91,10 b	80,80 b
Amide [mg (g TM)^{-1}]*	0,04 a	2,21 b	1,50 b	0,00 a	1,01 b	0,78 b
Malat [mg (g TM)^{-1}]*	2,54 a	3,87 b	3,36 ab	8,32 a	13,94 b	10,95 a
$\text{NO}_3\text{-N}$ [mg (g TM)^{-1}]	0,00 a	0,74 b	0,00 a	0,00 a	1,78 b	0,00 a

* Aus mittleren Blättern

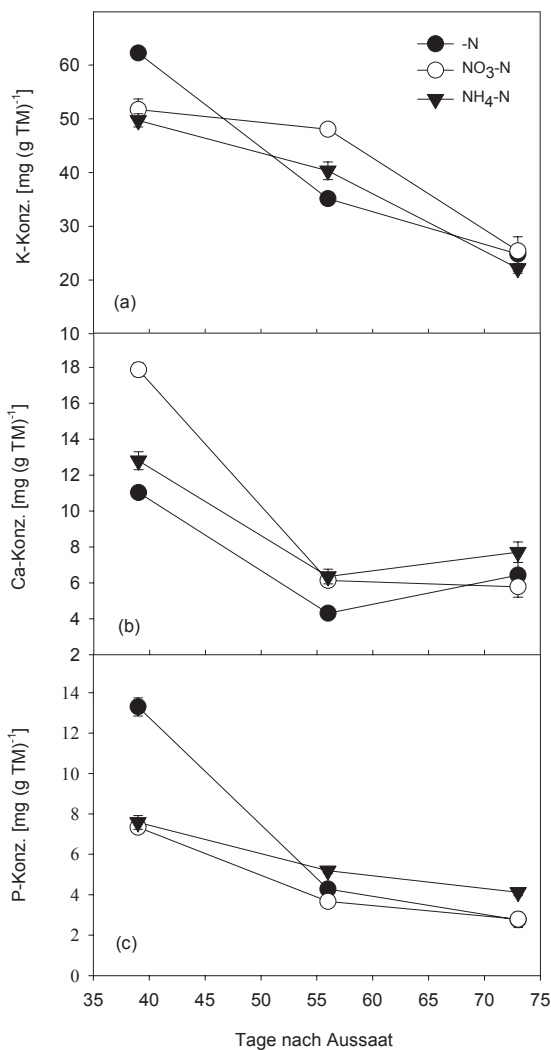


Abbildung 3:

Konzentrationen an Kalium (a), Calcium (b) und an Phosphor (c) in Blättern der Sommerweizensorte Vinjett eines Gefäßversuchs mit verschiedenen N-Düngungsvarianten als Funktion der Tage nach Aussaat (TnA). Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardfehler der Mittelwerte der einzelnen Merkmale

Die NO₃-N-Pflanzen hatten zum Zeitpunkt 41 TnA in beiden Jahren sowohl in den Blättern als auch in ihren Pseudostängeln signifikant mehr Nitrat akkumuliert als die anderen Varianten (Tabelle 2, Abbildung 4a). Insbesondere im Jahr 2004 war in den Blättern der NH₄-N-Pflanzen die NO₃-N-Akkumulation mit 7 % der Gesamtstickstoffkonzentration gegenüber 12 % bei der NO₃-N-Variante relativ hoch (Tabelle 2) und in den Pseudostängeln mit etwa 39 % (2003) bzw. 60 % (2004) der NO₃-N-Konzentration der NO₃-N-Varianten beträchtlich (Abbildung 4a). Generell enthielten die Pseudostängel pro TM-Einheit etwa doppelt so viel NO₃-N wie die Blattspreiten. In den -N-Pflanzen waren nur geringe Mengen NO₃-N nachweisbar. Zum Zeitpunkt 55 TnA hatte die NO₃-N-Konzentration in den Stän-

geln der NO₃-N-Variante um 75 % (2003, nicht dargestellt) und um 84 % (2004, s. Abbildung 4a) abgenommen und war in den anderen Varianten entweder nur noch in Spuren oder nicht mehr nachweisbar. Neunundsechzig Tage nach Aussaat war in keiner Variante eine NO₃-N-Akkumulation zu beobachten. In den Pseudostängeln der NH₄-N-Pflanzen war die NH₄-N-Konzentration 41 TnA um etwa 22 % höher als in den NO₃-N-Pflanzen (Abbildung 4b, nur 2004 dargestellt), sank zum folgenden Erntetermin unter den Wert der NO₃-N-Pflanzen ab, während sich die Werte zum dritten Erntetermin nicht mehr unterschieden. Die -N-Pflanzen hatten zu allen drei Ernteterminen niedrigere Konzentrationen als die gedüngten Pflanzen.

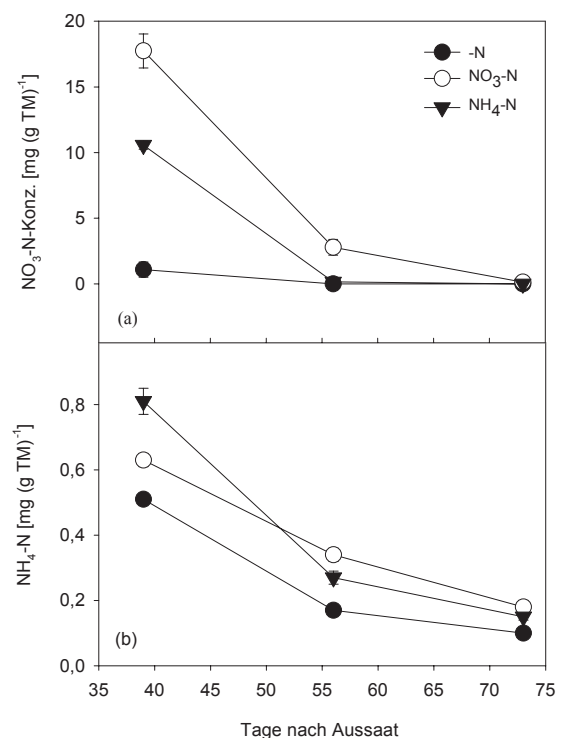


Abbildung 4:

Konzentration an NO₃-N (a) und an NH₄-N (b) in Haupttrieb-Stängeln der Sommerweizensorte Vinjett eines Gefäßversuchs mit verschiedenen N-Düngungsvarianten als Funktion der Tage nach Aussaat (TnA) des Jahres 2004. Die Fehlerbalken repräsentieren die Standardfehler der Mittelwerte der einzelnen Merkmale

3.4 Enzymaktivitäten

Die Aktivitätsniveaus der für den N-Metabolismus maßgeblichen Enzyme Nitratreduktase (NR) und Glutaminsynthetase (GS) zeigten keine eindeutige Tendenz. Zum Zeitpunkt 41 TnA besaßen die oberen Blätter der NO₃-N- und NH₄-N-Pflanzen in beiden Jahren eine vergleichbare Nitratreduktaseaktivität (NRA, nicht dargestellt), während die unteren Blätter der NO₃-N-Pflanzen eine höhere NRA als die NH₄-N-Pflanzen hatten und die -N-Pflanzen generell

die niedrigsten Werte aufwiesen (Tabelle 3). Diese Unterschiede waren allerdings nicht signifikant. Innerhalb eines Jahres ging jeweils mit einer höheren NRA eine relativ höhere $\text{NO}_3\text{-N}$ -Akkumulation einher. Zum Zeitpunkt 55 TnA war die Aktivität in den beiden Jahren uneinheitlich. Im Jahr 2003 zeigten die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Pflanzen eine signifikant höhere NRA als die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Pflanzen, 2004 unterschieden sich die beiden N-Varianten dagegen nicht, obwohl in den $\text{NH}_4\text{-N}$ - im Gegensatz zu den $\text{NO}_3\text{-N}$ -Pflanzen kein $\text{NO}_3\text{-N}$ mehr nachgewiesen werden konnte. Die Glutaminsynthetaseaktivität der einzelnen Varianten war hingegen relativ konstant. Die Aktivität der -N-Variante war niedriger als die der beiden mit Stickstoff gedüngten Varianten, die sich ihrerseits nicht signifikant voneinander unterschieden.

(Robbins und Voss, 1989; Parr, 1969). In Untersuchungen zur Nitrifikationskinetik stiegen die Nitrifikationsraten unter zunehmendem mineralischem $\text{NH}_4\text{-N}$ an und konnten dem Wachstum von Nitrifizierern zugeschrieben werden, wenn das applizierte $\text{NH}_4\text{-N}$ über 50 mg N kg^{-1} Boden lag (Nishio und Fujimoto, 1990). Ashworth (1973) konnte zeigen, dass die Populationsdichte von Nitrifikanten fünf Wochen nach der N-Düngung im Bereich der Depots um den Faktor 90 höher lag als im übrigen Boden. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die zum Zeitpunkt 41 TnA in den $\text{NH}_4\text{-N}$ -Diffusionszonen Z2 und Z3 nachgewiesene höhere $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration auf die Nitrifikation des injizierten Ammoniums zurückzuführen ist. Aufgrund der vorliegenden höheren $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen in den Diffu-

Tabelle 3:

Einfluss der N-Düngungsvarianten auf die Aktivität von Nitratreduktase (NR) und Glutaminsynthetase (GS) in Blättern des Haupttriebs der Sommerweizensorte Vinjett zum Zeitpunkt 41 und 55 Tage nach Aussaat (TnA) in den Jahren 2003 und 2004. Mittelwerte innerhalb einer Zeile und eines Jahres mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant ($P < 0,05$)

TnA/Parameter	2003			2004		
	ohne N	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	ohne N	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$
41 TnA						
NR [$\mu\text{mol (g FM)}^{-1} \text{ min}^{-1}$]	0,47 a	5,64 b	3,10 ab	1,71 a	2,61 a	1,10 a
GS [$\mu\text{mol (g FM)}^{-1} \text{ min}^{-1}$]	4,53 a	6,54 b	6,13 b	4,14 a	5,51 ab	6,18 b
55 TnA						
NR [$\mu\text{mol (g FM)}^{-1} \text{ min}^{-1}$]	0,49 a	11,29 b	2,05 a	0,46 a	5,33 b	5,72 b
GS [$\mu\text{mol (g FM)}^{-1} \text{ min}^{-1}$]	5,12 a	7,69 b	8,26 b	5,42 a	6,93 a	7,57ab

4 Diskussion

4.1 Abläufe im Boden

Bei punktförmiger Injektion hochkonzentrierter Ammoniumsalzlösungen entstehen durch Bindung von Ammonium an die Sorptionskomplexe des Bodens hochkonzentrierte N-Depots (Kranz, 1993). Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration ist nahe am Injektionspunkt am höchsten. Um den Kernbereich der Depots herum bilden sich Diffusionszonen mit abnehmender $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration (Page, 1975). Zum Zeitpunkt der Anlage der Depots betrug die Ammoniumkonzentration im Kernbereich $>2500 \text{ ppm}$. Eine derart hohe Konzentration ist für Bodenmikroorganismen toxisch. Sie führt zu einer Sterilisation des Bodens und mithin zur Hemmung von Nitrifikationsvorgängen (Parr, 1969). In den äußeren Diffusionszonen lag die Ammoniumkonzentration bereits bei der Depotanlage unter diesem kritischen Wert. Nitrifikationsvorgänge hätten daher mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung von den Randbereichen der Ammoniumdepots her einsetzen können

sionszonen wäre im weiteren Verlauf ein starker Anstieg der Nitrifikation zu erwarten gewesen. Indessen war die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration zum Zeitpunkt 41 TnA im Vergleich zum Gesamtstickstoff niedrig. Möglicherweise lagen vor diesem Untersuchungstermin in den äußeren Diffusionszonen auch höhere Nitratgehalte vor.

Die Abnahme der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration in den Diffusionszonen Z1 und Z2 um etwa 70 % gegenüber der Ausgangskonzentration zum Zeitpunkt 41 TnA scheint nicht mit der unmittelbaren Aufnahme durch die Pflanzen in Zusammenhang zu stehen, da die Wurzeln zu diesem Zeitpunkt lediglich bis Z3 vorgedrungen waren. Möglicherweise wurde das Ammonium nach der DAP-Injektion in andere Stickstoffformen umgewandelt, die dann durch Vaporisation, Auswaschung oder Fixierung im Rahmen chemischer oder mikrobiologischer Prozesse verloren gegangen sind (Zhang und Rengel, 2002). Denkbar ist auch, dass Ammonium aus dem Kernbereich der Depots in äußere bereits von den Wurzeln ausgebeutete und somit N-verarmte Zonen diffundiert ist und dort in einer von den Pflanzen verträglichen Konzentration als $\text{NH}_4\text{-N}$ und/oder

$\text{NO}_3\text{-N}$ aufgenommen wurde. Diese Vermutung wird gestützt durch einen entsprechenden Gefäßversuch mit Sommergerste bei dem sowohl bei den $\text{NO}_3\text{-N}$ - als auch den $\text{NH}_4\text{-N}$ -Pflanzen in einem vergleichbar frühen Stadium bereits etwa 70 % des Gesamt-N aufgenommen wurden (Schittenhelm und Menge-Hartmann, 2006).

In den Depotzonen war 55 TnA kaum noch Nitrat nachweisbar. In der nun von den Wurzeln erschlossenen Zone Z2 sank der pH-Wert ab. Als Erklärung für die pH-Absenkung kommt sowohl die H^+ -Produktion bei der Nitrifikation als auch die H^+ -Abgabe bei einer NH_4 -Aufnahme durch die Wurzeln in Frage (Haynes und Goh, 1987; Mengel, 1984; Claussen und Lenz, 1995). Nach Wiesler (1998) ist eine von den Wurzeln ausgehende Erniedrigung des pH-Wertes in der Rhizosphäre effektiver als eine durch Nitrifikation verursachte Versauerung des Bodens.

Die zahlreichen stark verzweigten Wurzeln des für eine CULTAN-Düngung typischen Wurzelkranzes (Sommer, 2000) befanden sich zur dritten Zeiternte in einer Diffusionsregion mit abgesenktem pH-Wert von etwa 8 cm Durchmesser. Auch Robbins und Voss (1989) sowie Kreusel (1996) beobachteten ein Absinken des pH-Werts im Depotzentrum. Die im vorliegenden Versuch ermittelte Abnahme betrug bis zu 2 pH-Einheiten (pH 7,6 bis 5,8) und lag damit höher als bei Kreusel und bei Robbins und Voss (-0,9 pH-Einheiten). Die Ergebnisse der genannten Autoren und die eigenen Befunde stehen in Widerspruch zu der These von Sommer et al. (1987), wonach eine CULTAN-Düngung keine Bodenversauerung zur Folge hat. Untersuchungen der Depots zu späteren (hier nicht dargestellten) Zeitpunkten zeigten, dass die pH-Absenkung reversibel war und sich die Böden im Injektionsbereich wieder „normalisierten“.

4.2 Physiologische Prozesse in der Pflanze

Die Annahme, dass es sich bei der CULTAN-Düngung eher um eine gemischte N-Ernährung als um eine reine Ammoniumernährung handelt, gründete sich in einem vorausgegangenen Experiment mit Sommergerste allein auf der Analyse oberirdischer Pflanzenteile (Schittenhelm und Menge-Hartmann, 2006). Die vorliegende, den Boden einbeziehende Untersuchung bestätigt das Vorhandensein unterschiedlicher N-Formen in den für die Wurzeln zugänglichen Depotzonen.

Die Akkumulation von $\text{NO}_3\text{-N}$ war in Relation zum bereitgestellten Gesamt-N, zu den untersuchten Zeiten und in den spezifischen Depotzonen niedrig. Nach Schortemeyer et al. (1997) können aber bereits geringe Nitratkonzentrationen ausreichen, um Ammoniumtoxizitätssymptome an Pflanzen abzumildern. Kritisch ist auch weniger die Konzentration an NH_4 , als das Verhältnis von NO_3 zu NH_4 , wobei sich die optimale Relation im Verlauf

des Pflanzenwachstums ändern kann (Chaillou und Lamaize, 2001). Durch die für eine CULTAN-Düngung typische hohe Wurzeldichte im Depotbereich kann von einer hohen Ausnutzung des durch NH_4 -Nitrifikation gebildeten NO_3 ausgegangen werden. Offensichtlich stand für die NH_4 -N-Pflanzen mehr Nitrat bereit, als in den Wurzeln assimiliert werden konnte, da es zur Speicherung und späteren Assimilation in den Spross transportiert wurde (Marschner, 1995; Justes et al., 1997). Im Spross war die Aktivität der Nitratreduktase in den NH_4 -N-Pflanzen teilweise ähnlich hoch wie in den NO_3 -N-Pflanzen und nicht generell gehemmt, wie es bei NH_4 -N-dominanter Ernährung in der Literatur diskutiert wird (Marschner, 1995; Kranz, 1993). Da die Höhe der NR-Aktivität nicht immer mit der Höhe der Nitratkonzentration im selben Gewebe verbunden war, besteht offensichtlich eine räumliche Trennung des in den Vakuolen gespeicherten Nitrats von der stoffwechselaktiven Nitratfraktion. Die Induktion der NR wird eher bestimmt von der metabolisch aktiven cytosolischen Nitratfraktion und damit von der Menge frisch importierten Nitrats aus dem Transpirationsstrom (Justes, et al., 1997; Cookson et al., 2005) das offensichtlich aus den nitrifizierten Depots kontinuierlich nachgeliefert werden konnte.

Die CULTAN-Düngung führte vermutlich aufgrund des verfügbaren Nitrats zu keinem ausgeprägten Ammoniumsyndrom, zeigte jedoch insbesondere zu Beginn des Schossens (41 TnA) einige für eine höhere kationische NH_4 -N-Ernährung typischen Effekte auf Ionenkonzentrationen und Metabolitenpool. Hierzu zählen die dem Ionenantagonismus zuzuschreibenden teilweise niedrigeren Konzentrationen an mineralischen Kationen (Ca und K) sowie organischen Anionen (Citrat, Succinat und Malat) der NH_4 -N- gegenüber den NO_3 -N-Pflanzen. Bei der Assimilation von Ammonium führt der Bedarf an Kohlenstoffgerüsten direkt zur Verarmung an organischen Säuren, während die Reduktion von $\text{NO}_3\text{-N}$ zum cytoplasmatischen Ausgleich des pH-Wertes mit der Synthese organischer Säuren verbunden ist (Wiesler, 1998; Stitt et al., 2002).

Als weitere typische Indikatoren für Ammoniumernährung können die im Vergleich zu den NO_3 -N-Pflanzen in den Pseudostängeln der NH_4 -N-Pflanzen erhöhten Gehalte an Ammonium und Aminoverbindungen gewertet werden. Deren Akkumulation wird als Pendant zu dem in den NO_3 -N-ernährten Pflanzen gespeicherten $\text{NO}_3\text{-N}$ für spätere Entwicklungsstadien gesehen (Millard, 1988). Auch die zur ersten Ernte in den Blättern der NH_4 -N-Pflanzen erhöhte Amidkonzentration gegenüber den NO_3 -N-Pflanzen ist ein für Ammoniumernährung bekannter Effekt (Finnemann und Schjoerring, 1998). Die dargestellten Unterschiede von für die jeweiligen N-Ernährungsformen repräsentativen ionischen und metabolischen Markern waren insbesondere zu Beginn der Stängelstreckung deutlich ausgeprägt.

Wie Wiesler (1998) in einer Literaturübersicht zeigen konnte, bringt Weizen unter kontrollierten Bedingungen (Nährlösungsversuche und Gefäßversuche in Erde) unter gemischter Ammonium- und Nitraternährung immer höhere Kornerträge als unter vorherrschender oder ausschließlicher Nitraternährung. Die Ertragsüberlegenheit der Pflanzen mit gemischter N-Versorgung war einer höheren Anzahl Ähren pro Pflanze zuzuschreiben und ist somit vergleichbar mit den Ergebnissen des vorliegenden Versuchs und mit denen eines entsprechenden Gefäßversuchs mit Sommergerste (Schittenhelm und Menge-Hartmann, 2006). Es konnte gezeigt werden, dass nicht nur die Pflanzen Vorteile aus einer Mischung von NO_3^- - und $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ernährung zogen, sondern darüber hinaus möglicherweise auch die Böden. Das durch partielle Nitrifikation der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Depots gebildete Nitrat wurde offensichtlich kontinuierlich durch die Pflanzen aufgenommen und assimiliert. Das Risiko einer Nitratauswaschung ist somit deutlich reduziert.

Danksagung

Die Autoren danken Sabine Peickert, Claudia Lüders und Claudia Wilkes für die ausgezeichnete technische Assistenz.

5 Literatur

- Ashworth J (1973) On measuring nitrification and recovery of aqueous ammonia applied to grassland. *J Agric Sci* 81:145-150
- Baker JL, Timmons DR (1994) Fertilizer management effects on leaching of labelled nitrogen for no-till corn in-field lysimeters. *J Environ Qual* 23:305-310
- Basra AS, Dhawan AK, Goyal SS (2002) DCMU inhibits in vivo nitrate reduction in illuminated barley (C_3) leaves but not in maize (C_4): a new mechanism for the role of light? *Planta* 215:855-861
- Bock BR, Camberato JJ, Below FE, Pan WL, Koenig RT (1991) Wheat responses to enhanced ammonium nutrition. In: Huffmann JR (ed) Effects of enhanced ammonium diets on growth and yield of wheat and corn : proceedings of a symposium, Denver, Colorado, October 30, 1991. Atlanta, pp 93-106
- Britto DT, Kronzucker HJ (2002) NH_4^+ toxicity in higher plants : a critical review. *J Plant Physiol* 159:567-584
- Britto DT, Kronzucker HJ (2006) Futile cycling at the plasma membrane : a hallmark of low-affinity nutrient transport. *Trends Plant Sci* 11(11):529-534
- Brück B, Guo S (2006) Influence of N form on growth and photosynthesis of *Phaseolus vulgaris* L. plants. *J Plant Nutr Soil Sci* 169:849-856
- Callaway TR, Martin SA, Wampler JL, Hill NS, Hill GM (1996) Malate content of forages. *Ann Rep / Anim Dairy Sci / Univ Georgia*, pp161-167
- Camberato JJ, Bock BR (1990) Spring wheat response to enhanced ammonium supply : I. Dry matter and nitrogen content. *Agron J* 82:463-467
- Chaillou S, Lamaze T (2001) Ammoniacal nutrition of plants. In: Morot-Gaudry J-F (ed) Nitrogen assimilation by plants : physiological, biochemical and molecular aspects. Enfield : Science Publ, pp 53-69
- Claussen W, Lenz F (1995) Effect of ammonium and nitrate on net photosynthesis, flower formation, growth and yield of eggplants (*Solanum melongena* L.). *Plant Soil* 171:267-274
- Cookson SJ, Williams LE, Miller AJ (2005) Light-dark changes in cytosolic nitrate pools depend on nitrate reductase activity in *Arabidopsis* leaf cells. *Plant Physiol* 138:1097-1105
- Finnemann J, Schjoerring JK (1998) Ammonium and soluble amide-bound nitrogen in leaves of *Brassica napus* as related to glutamine synthetase activity and external N supply. *Plant Physiol Biochem* 36:339-346
- Gazzarini S, Lejay L, Gojon A, Ninnemann O, Frommer WB, von Wirén N (1999) Three functional transporters for constitutive, diurnally regulated, and starvation-induced uptake of ammonium into *Arabidopsis* roots. *Plant Cell* 11:937-947
- Haynes RJ, Goh KM (1987) Effects of nitrogen and potassium applications on strawberry growth, yield and quality. *Commun Soil Sci Plant Anal* 18:457-471
- Hermann W, Weber A, Graeff S, Claupein W (2006) Neue Wege in der Stickstoffdüngung bei Weizen? *GetreideMagazin* 11:56-59
- Hirel B, Martin A, Trecé-Laforgue T, Gonzalez-Moro MB, Estavillo JM (2005) Physiology of maize I : a comprehensive and integrated view of nitrogen metabolism in a C_4 plant. *Physiol Plant* 24:167-177
- Justes E, Meynard JM, Mary B, Plenét D (1997) Diagnosis using stem base extract : JUBIL method. In: Lemaire G (ed) Diagnosis of the nitrogen status in crops. Berlin : Springer, pp 163-187
- Kranz P (1993) Verminderung der NO_3^- -Belastung von Gemüse und Grundwasser durch Einsatz der Ammonium-Depotdüngung unter Praxisbedingungen. 139 p, Bonn, Univ, Landwirtschaftliche Fakultät, Diss
- Kreusel U (1996) Senkung von Nitratauswaschungen mit Hilfe der $\text{NH}_4\text{-Depot}$ -düngung und ihr Einfluß auf die Entwicklung von Erdbeeren. Göttingen : Cuvillier, 160 p
- Kücke M (ed) (2003) Anbauverfahren mit N-Injektion (CULTAN) : Ergebnisse, Perspektiven, Erfahrungen. Beiträge des Workshops am 29. November 2001 in Braunschweig. Braunschweig : FAL, 149 p, Landbauforschung Völknerode SH 245
- Kücke M, Bramm A, Höpner F, Laws W (2006) Aufbau und Zielsetzung der neuen Lysimeteranlage des Instituts für Pflanzenbau und Grünlandwirtschaft der FAL (Braunschweig). In: Deutsch-türkische Agrarforschung : 8. Symposium vom 04.-08. Oktober 2005 an der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in Braunschweig, Göttingen : Cuvillier, pp 379-386
- Lea PJ, Azevedo RA (2006) Nitrogen use efficiency. 1. Uptake of nitrogen from the soil. *Ann Appl Biol* 149:243-247
- Loqué D, von Wirén N (2004) Regulatory levels for the transport of ammonium in plant roots. *J Exp Bot* 55:1293-1305
- Marschner H (1995) Mineral nutrition of higher plants. London : Academic Press, 889 p
- Matoka CM, Menge-Hartmann U, Schittenhelm S, Schubert S, Schnell S, Greef JM, Tebbe CC (2007) Characterisation of bacterial communities associated with soil injected liquid ammonium nutrition for spring barley (*Hordeum vulgare* L.) production. 10th International symposium on Frontiers in Wetland Biogeochemistry, April 1-7, 2007, Annapolis, Maryland, USA
- Mengel K (1984) Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze, Stuttgart : Fischer, 431 p
- Millard P (1988) The accumulation and storage of nitrogen by herbaceous plants. *Plant Cell Environ* 11:1-8
- Miller AJ, Cramer MD (2004) Root nitrogen acquisition and assimilation. *Plant Soil* 274:1-36
- Nishio T, Fujimoto T (1990) Kinetics of nitrification of various amounts of ammonium added to soils. *Soil Biol Biochem* 22:51-55
- Page ER (1975) The location and persistence of ammonia (aqueous, anhydrous and anhydrous + 'N-serve') injected into a sandy loam soil, as shown by changes in concentrations of ammonium and nitrate ions. *J Agric Sci* 85:65-74
- Parr JF (1969) Retention of anhydrous ammonia by soil : 4. Recovery of microbiological activity and effect of organic amendments. *Soil Sci* 107:94-104
- Petersen J, Hansen B, Sorensen P (2004) Nitrification of N-15-ammonium sulphate and crop recovery of N-15-labelled ammonium nitrates injected in bands. *Eur J Agron* 21:81-92
- Robbins SG, Voss RD (1989) Acidic zones from ammonia application in conservation tillage systems. *Soil Sci Soc Am J* 53:1256-1263
- Roberts T, Janzen HH, Lindwall CW (1992) Nitrogen fertilization of spring wheat by point-injection. *J Prod Agric* 5:586-590
- Salsac L, Chaillou S, Morot-Gaudry JF, Lesaint C, Jolivet E (1987) Nitrate and ammonium nutrition in plants. *Plant Physiol Biochem* 25:805-812

- Schittenhelm S, Menge-Hartmann U (2006) Yield formation and plant metabolism of spring barley in response to locally injected ammonium. *J Agron Crop Sci* 192:434-444
- Schortemeyer M, Stamp P, Feil B (1997) Ammonium tolerance and carbohydrate status in maize cultivars. *Ann Bot* 79:25-30
- Sharratt BS, Cochran VL (1992) Skip-row and equidistant-row barley with nitrogen placement : yield, nitrogen uptake, and root density. *Agron J* 85:246-250
- Sohn SM (1986) Über die Aktivität der Glutaminsynthetase in den Blättern von Weizen im Vegetationsverlauf und in Abhängigkeit von der N-Ernährung. 146 p, Göttingen, Univ, Fachber Agrarwissenschaften, Diss
- Sommer K (2000) "CULTAN" cropping system : fundamentals, state of development and perspectives. In: Martins-Loução MA (ed) Nitrogen in a sustainable ecosystem : from the cell to the plant. Leiden : Backhuys, pp 361-375
- Sommer K, Titz R, Wendt T (1987) Ammonium-Depotdüngung – eine Möglichkeit zur umweltverträglichen Stickstoffdüngung im Feldgemüsebau. *Forsch Berat B* 36:18-41
- Sowers KE, Pan WL, Miller BC, Smith JL (1994) Nitrogen use efficiency of split nitrogen applications in soft white winter wheat. *Agron J* 86:942-948
- Stecker JA, Buchholz DD, Hanson RG, Wollenhaupt NC, McVay KA (1993) Application placement and timing of nitrogen solution for no-till corn. *Agron J* 85:645-650
- Stitt M, Müller C, Matt P, Gibon Y, Carillo P, Morcuende R, Scheible WR, Krapp A (2002) Steps towards an integrated view of nitrogen metabolism. *J Exp Bot* 53:959-970
- VDLUFA (1991) Methodenbuch : die Untersuchung von Böden. Darmstadt : VDLUFA-Verl, VDLUFA-Methodenbuch 1
- Wiesler F (1998) Agronomische und physiologische Aspekte der Ertragsbildung von Mais (*Zea mays* L.), Weizen (*Triticum aestivum* L.) und Lein (*Linum usitatissimum* L.) bei einem in Zeit und Form variierten Stickstoffangebot. Stuttgart : Grauer, 330 p
- Walch-Liu P, Neumann G, Engels C (2001) Response of shoot and root growth to supply of different nitrogen forms is not related to carbohydrate and nitrogen status of tobacco plants. *J Plant Nutr Soil Sci* 164:97-103
- Zhang XK, Rengel Z (2002) Temporal dynamics of gradients of phosphorus, ammonium, pH, and electrical conductivity between di-ammonium phosphate band and wheat roots. *Aust J Agric Res* 53:985-992