

A Einleitung

Unter den in Deutschland angebauten landwirtschaftlichen Kulturen weist Winterraps mit die höchsten N-Bilanzüberschüsse auf (GÄTH, 1997). Dieses wird vor allem darauf zurückgeführt, daß traditionelle Winterrapsorten durch eine hohe Stickstoffaufnahme bis Blühbeginn, jedoch eine nur unvollständige Retranslokation von Stickstoff aus den vegetativen Organen in die Samen während der reproduktiven Wachstumsphase gekennzeichnet sind (AUFHAMMER et al., 1994; DRECCER et al., 2000). Dieses erfordert eine weit über den Entzug durch die Samen hinausgehende N-Düngung und führt aufgrund der Mineralisierung von N-reichen Ernterückständen nach Vegetationseende zu stark ansteigenden N_{\min} -Gehalten im Boden und damit zu einer potentiellen Gefährdung der Wasserqualität (LICKFETT und PRZEMECK, 1997). Abhilfe kann eine Erhöhung der Effizienz des gedüngten Stickstoffs gewährleisten.

Zu einer höheren N-Effizienz in der Pflanzenproduktion können verschiedene Maßnahmen beitragen. Einige dieser Maßnahmen sind in Tabelle E-1 dargestellt. Die Gestaltung von Fruchtfolgen und der Anbau von Zwischenfrüchten zur Verminderung von N-Verlusten sowie die Förderung der Pflanzengesundheit durch ausreichende Pflanzenschutzmaßnahmen werden bereits seit Jahren im Winterrapsanbau angewendet (KRÜGER, 1980; LICKFETT und PRZEMECK, 1997). Auch die Ermittlung des N-Düngerbedarfs erfolgt bei Winterraps bereits unter Berücksichtigung der Mineralstickstoffgehalte im Boden.

Bedeutend weniger ist jedoch bislang über die Erhöhung der N-Effizienz bei Winterraps durch eine zeitlich an den Bedarf angepaßte N-Düngung bekannt. Ergebnisse von WIESLER (1998) zeigen anhand von Nährlösungs- und Feldversuchen, daß 'kritische' Entwicklungsabschnitte in der N-Ernährung von Pflanzen bestehen, wobei einem limitierten N-Angebot in verschiedenen Entwicklungsabschnitten eine unterschiedliche Bedeutung für die Ertragsbildung zukommen kann. In einem Nährlösungsversuch wiesen HOCKING et al. (1987) auch bei Winterraps auf die Bedeutung einer zeitlich angepaßten N-Düngung für die Ertragsbildung hin. In Feldversuchen führte eine Variation des Düngungszeitpunktes bei Winterraps dagegen bislang zu widersprüchlichen Ergebnissen (ANIOL, 1993; MAKOWSKI et al., 1993). Mögliche Gründe dafür können die Auswirkungen von unterschiedlichen Umweltbedingungen auf den verschiedenen Standorten wie beispielsweise ein unterschiedlich hohes N-Nachlieferungspotential sowie ein unterschiedliches Wasserangebot in der reproduktiven Wachstumsphase sein (SCHWAPPACH, 1994). Eine Erhöhung der N-Effizienz bei Winterraps wäre bei einer zeitlich angepaßten N-Düngung von Bedeutung, wenn (a) infolgedessen N-Verluste vermindert werden und (b) sich die Auswirkungen von Stickstoff in den einzelnen Entwicklungsabschnitten unterscheiden. Dazu ist es

unabdingbar, auch bei Winterraps “kritische“ Entwicklungsabschnitte in der N-Ernährung zu ermitteln.

Tab. E-1: Maßnahmen zur Verbesserung der Effizienz der Stickstoffdüngung (verändert nach WIESLER, 1998)

Maßnahme	Ziel
• Gestaltung der Fruchtfolge	→ Vermeidung von Verlusten durch Kürzung der vegetationsfreien Zeit
	→ Nutzung von in tiefere Bodenschichten verlagertem Nitrat durch Tiefwurzler
• Anbau von Zwischenfrüchten	→ Konservierung von Stickstoff in der vegetationsfreien Zeit
• Bewässerung und Pflanzenschutz	→ Steigerung der N-Aufnahme bzw. Vermeiden von N-Verlusten durch gesunde Pflanzen
• Ermittlung des N-Düngerbedarfs	→ Gezielter Einsatz von N-Düngemitteln unter Berücksichtigung des im Boden vorhandenen und während der Vegetationsperiode mineralisierbaren Stickstoffs
• Wahl der Düngerform	→ Vermeidung von N-Form-spezifischen Verlusten
	→ Steigerung der physiologischen Effizienz durch Berücksichtigung der Präferenz von Pflanzenarten für eine bestimmte N-Form
• Zeitpunkt der N-Düngung	→ Vermeidung von N-Verlusten
	→ gezielte Förderung einzelner Ertragskomponenten
• Düngungstechnik	→ Vermeiden von N-Verlusten
	→ Verbesserung der räumlichen Verfügbarkeit
	→ Verminderung der N-Immobilisierung
• Wahl der Sorte	→ Nutzung genotypischer Unterschiede in der N-Aufnahme- und N-Verwertungseffizienz

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der N-Effizienz bietet die Variation der N-Form. So führte ein erhöhtes Ammoniumangebot im Vergleich zu ausschließlichem Nitratangebot bei gleicher Düngermenge bei Getreide zu beträchtlichen Ertragssteigerungen (CAMBERATO und BOCK, 1990a,b; BELOW und GENTRY, 1992; SMICKLAS und BELOW, 1992). Gründe für ein gefördertes Wachstum von Pflanzen sind positive Effekte von Ammonium auf stoffwechselphysiologische Prozesse der Pflanze sowie eine Verminderung von N-Verlusten beispielsweise durch Auswaschung oder Denitrifikation aus dem durchwurzelteten Boden (WIESLER, 1998). Für Winterraps liegen zu diesem Themenkomplex bisher kaum Ergebnisse vor.

Für eine Verbesserung der N-Effizienz ist die Sortenwahl von ganz besonderer Bedeutung. N-effiziente Sorten zeichnen sich nach GRAHAM (1984) bei limitiertem N-Angebot und nach SATTELMACHER et al. (1994) auch bei hohem N-Angebot durch einen höheren Ertrag aus als Standardsorten. Sortentypische Unterschiede in der N-Effizienz konnten bereits bei vielen Pflanzenarten wie Körnerleguminosen (RIEMER et al., 2000), Wintergerste (MAIDL et al., 2000), Winterweizen (SPANAKAKIS, 2000) und Mais (PRESTERL et al., 2000) festgestellt werden. Auch bei Sommer- (YAU und THURLING, 1987a,b) und Winterrapsorten (ANIOL, 1993; MÖLLERS et al., 2000) wurden signifikante Unterschiede hinsichtlich Ertrag und N-Aufnahme unter Bedingungen eines hohen bzw. reduzierten N-Angebots ermittelt.

Über die Ursachen sortentypischer Unterschiede in der Ertragsbildung ist besonders bei Winterraps bislang wenig bekannt. Generell kann die Ursache einer unterschiedlichen N-Effizienz in einer höheren Aufnahme- und/oder einer höheren Verwertungseffizienz beruhen (SATTELMACHER et al., 1994). Die N-Aufnahmeeffizienz gibt an, wie effektiv Stickstoff aus dem Boden aufgenommen wird, während die N-Verwertungseffizienz ein Maß für die pro Einheit aufgenommenen Stickstoffs gebildete Samentrockenmasse darstellt (MOLL et al., 1982). Die Stickstoffaufnahmeeffizienz hängt maßgeblich von der räumlichen Erschließung des Bodens durch die Wurzeln (Durchwurzelungstiefe, Durchwurzelungsintensität) und von der Aufnahme des erschlossenen Stickstoffs (Leistungsfähigkeit des Aufnahmesystems, N-Bedarf der Pflanze) ab. Die Aufnahmeeffizienz könnte vor allem in zwei Entwicklungsabschnitten begrenzend für die N-Aufnahme sein: (a) zu Beginn der Vegetationsperiode aufgrund vergleichsweise geringer Temperaturen (MACDUFF et al., 1986; ENGELS, 1996) und (b) ab der Blüte, wenn die Konkurrenz um Assimilate Wurzelwachstum und Wurzelaktivität hemmt. Dieses erscheint bei Raps insofern nicht unwahrscheinlich, als die älteren Blätter, die als Hauptquellen für die Assimilatversorgung der Wurzeln dienen (BRAR und THIES, 1977; MAJOR et al., 1978), ab Blühbeginn sehr schnell seneszent werden und so ihre Funktion verlieren. Eine hohe Verwertungseffizienz kann auf einer effektiven Retranslokation von Stickstoff in die Organe mit besonderem hohem Bedarf oder auf einem niedrigen Bedarf auf zellulärer Ebene beruhen. Zur Erhöhung des Stickstoff-Harvestindex (NHI) ist bei Raps eine hohe Retranslokation von Stickstoff aus den Blättern/Stengeln in die Samen erwünscht (AUFHAMMER et al., 1994). Andererseits ist es möglich, daß eine hohe bzw. frühe Remobilisierung des Stickstoffs aus den Blättern zu einer Verminderung der Nettphotosyntheserate der vegetativen Organe und damit zu einer Verminderung der N-Effizienz beiträgt. Arbeiten von WIESLER (1998) mit Mais sowie KULLMANN et al. (1989) mit Raps deuten daraufhin, daß den einzelnen Faktoren der N-Aufnahme- und N-Verwertungseffizienz in verschiedenen Entwicklungsabschnitten eine ganz unterschiedliche Bedeutung zukommen kann.

Im Hinblick auf eine zielgerichtete Züchtung von Genotypen mit erhöhter N-Effizienz ist es erforderlich, die Bedeutung einzelner Faktoren der N-Effizienz in verschiedenen Entwicklungsabschnitten zu ermitteln. Dieses Wissen ist auch im Hinblick auf eine Verminderung der N-Düngermenge durch eine zeitlich an den N-Bedarf der Pflanze angepaßte N-Düngung von großer Bedeutung. Als Arbeitshypothesen wurden zwei mögliche Ansatzpunkte für in der N-Effizienz verbesserte Ideotypen untersucht.

Ein verbesserter *“traditioneller“* Ideotyp, der sich durch eine hohe N-Aufnahme bis Blühbeginn, eine wesentlich effizientere Rückverlagerung von Stickstoff und Kohlenhydraten aus den vegetativen Organen ab der Blüte und eine hohe photosynthetische Aktivität auch bei reduzierten N-Gehalten in Blättern, Stengel und Schotenwänden auszeichnen sollte.

Ein *“alternativer“* Ideotyp sollte dagegen ein vermindertes vegetatives Wachstum und somit einen geringeren täglichen N-Bedarf bis Blühbeginn, eine anhaltende N-Aufnahme nach Blühbeginn, eine verzögerte N-Retranslokation aus den Blättern in die Samen und damit eine längere Aufrechterhaltung der photosynthetisch aktiven Blattfläche aufweisen.

Beide Ideotypen sollen sich im Vergleich zu traditionellen Sorten durch einen verminderten Düngungsbedarf und niedrigere Nitratrestmengen im Boden nach der Ernte auszeichnen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, mit Hilfe von Sortenwahl und einer in Menge, Zeit und Form variierten N-Düngung einen Beitrag zur Steigerung der Stickstoffeffizienz von Winterraps zu leisten. Insgesamt ergaben sich dabei folgende vier Hauptfragestellungen, an denen sich auch die Gliederung der Arbeit orientiert:

- In welchen ‘kritischen Entwicklungsabschnitten‘ kommt einem hohen N -Angebot (und daraus abgeleitet einer hohen N-Effizienz) eine besonders große Bedeutung für die Ertragsbildung von Winterraps zu ? (Kapitel I)
- Hat die applizierte Stickstoffform Auswirkungen auf Wachstum und Ertrag und bestehen Wechselwirkungen zwischen N-Form und Sorte ? (Kapitel II)
- Unterscheiden sich Sorten in der Ertragsbildung bei einem in Menge und Zeit variierten N-Angebot und beruhen die Unterschiede auf einer unterschiedlichen N-Aufnahme- oder N-Verwertungseffizienz ? (Kapitel III)
- Welche Bedeutung kommt den Blättern in der reproduktiven Wachstumsphase hinsichtlich Ertragsbildung und N-Bilanz von Winterrapsorten zu ? (Kapitel IV)

B Material und Methoden

Um die Auswirkungen eines variierten Stickstoffangebots auf Wachstum, N-Aufnahme und Ertragsbildung von Winterrapsorten zu untersuchen, wurden in den Versuchsjahren 1996-97, 1997-98 und 1998-99 Nährlösungs- und Feldversuche durchgeführt.

1 Nährlösungsversuche

1.1 Kultursysteme

Die Nährlösungsversuche wurden in den Gewächshäusern des Instituts für Pflanzenernährung der Universität Hannover angelegt. Für die Nährlösungsversuche wurden Samen in tiefgründigen Gefäßen auf Sand gekeimt. Die Keimung erfolgte bei 25/20°C und 60-70% relativer Luftfeuchtigkeit. Nach einer Keimdauer von 11 Tagen, wobei nur mit 1 mM CaSO₄-Lösung gegossen wurde, wurde der Sand ausgewaschen und die Keimlinge mit einer etwa 6 cm langen Wurzel einzeln zwischen Schaumstoffstreifen in die Löcher der PVC-Deckel der jeweiligen Kulturgefäße überführt.

In mehreren Kurzzeitexperimenten wurden mögliche Einflüsse des N-Angebots auf die Trockenmassebildung in den ersten Entwicklungsabschnitten bis Schoßbeginn untersucht. Dabei wurden die Pflanzen in PE-Gefäßen kultiviert (Volumen 8 L bzw. 21 L), wobei die Nährlösung in den Versuchsgefäßen kontinuierlich belüftet wurde. Die Größe der Gefäße richtete sich nach der im Versuch benötigten Pflanzenzahl von 4 bzw. 9 Pflanzen pro Gefäß. Nach etwa 4 - 6 Wochen Kulturdauer erfolgte die Ernte der Pflanzen.

Für die über die gesamte Kulturdauer durchgeführten Langzeitexperimente wurde ein Nährlösungszirkulationssystem konzipiert (Abb. MM-1), das einen kontinuierlichen Austausch der Nährlösung zwischen einem Vorratsbehälter (Volumen 240 L) und den Kulturgefäßen (Volumen 29 L) gewährleistet. Die Nährlösung aus den Vorratsbehältern wurde über ein zweistufiges Filtersystem in ein Tropfersystem gepumpt. Die Verteilung der Nährlösung in die Kulturgefäße der Varianten geschah gleichmäßig über druckkompensierte Tropfer (Netafin, Typ-Nr.01-WTFL-08) mit festgelegter Ausflußmenge (8 L / h). Über Überläufe gelangte die Nährlösung wieder zurück in die Vorratsbehälter. In diesen Vorratsbehältern wurden Messungen zu pH-Wert und Nährstoffkonzentration sowie das Nachdüngen der Nährstoffe durchgeführt. Vorratsbehälter und Versuchsgefäße wurden kontinuierlich belüftet. Das Gesamtsystem bestand aus 12 Vorratsbehältern und 144 Kulturgefäßen, die wahlweise miteinander verbunden werden konnten.