

Ableitung der Stickstoffdüngungsnormen von Ackerkulturen

Walter Richner¹, René Fleisch¹, Sokrat Sinaj² und Raphaël Charles²

¹Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 8046 Zürich

²Station de recherche Agroscope Changins-Wädenswil ACW, 1260 Nyon

Auskünfte: Walter Richner, E-Mail: walter.richner@art.admin.ch, Tel. +41 44 377 71 65



Kleinparzellen-Düngungsversuch

Einleitung

Die Düngung mit Stickstoff (N) wirkt sich stark auf die Ertragshöhe und die Qualität des Ernteguts von Ackerkulturen aus (Feil 1998). Deshalb ist eine gute Versorgung der wachsenden Pflanzenbestände mit Stickstoff eine der wichtigsten Bewirtschaftungsmassnahmen. Andererseits kann eine Zufuhr von zu hohen N-Mengen oder die Verabreichung von Dünger-N zu ungünstigen Zeitpunkten zu Qualitätsverminderungen der Produkte und/oder zu bedeutenden Verlusten von N in die Umwelt führen, hauptsächlich als Nitrat (NO_3) in das Grundwasser oder als Lachgas (N_2O) in die Luft. Solche N-Verluste sind so weit wie möglich zu vermeiden, weil zu hohe Nitratgehalte die Qualität des Grundwassers beeinträchtigen und weil Lachgas in der Atmosphäre zur Klimaerwärmung beiträgt. Zudem soll eine angepasste N-Düngung eine gute, den Marktbedürfnissen entsprechende Produktequalität sicherstellen.

Wegen des oben beschriebenen Zielkonfliktes zwischen Ertragssteigerung durch N-Düngung und Sicherung der Produktequalität auf der einen Seite und Mini-

mierung der N-Verluste in die Umwelt auf der anderen ist die Ableitung der optimalen Höhe der N-Düngung eine wichtige Aufgabe. In Düngungsgrundlagenwerken wie den GRUDAF 2009 (Fleisch *et al.* 2009) wird die optimale N-Düngung durch N-Düngungsnormen angegeben. Es stellt sich somit die Frage nach der Art der Ableitung der Normwerte. Früher orientierte sich die Düngung meist am Maximalertrag, während heute ein Konsens besteht, die N-Düngung am ökonomischen Optimum zu orientieren.

Die N-Düngung ist wirtschaftlich, solange die Kosten für eine zusätzlich verabreichte Menge N durch den damit erzielten Mehrerlös (Mehrertrag \times Produktpreis) abgedeckt wird. Die ökonomisch optimale N-Düngung (N_{opt}) ist dann erreicht, wenn die Mehrkosten für zusätzliche N-Düngung (Grenzkosten) dem damit erzielten Mehrerlös (Grenzerlös) entsprechen. Der Ertrag bei N_{opt} ist stets etwas tiefer als der theoretisch zu realisierende Maximalertrag (Abb. 1).

Verschiedene Arbeiten haben gezeigt, dass bei einer Steigerung der N-Düngung bis zu N_{opt} die Menge des zur Ernte noch im Boden vorhandenen mineralischen Stick-

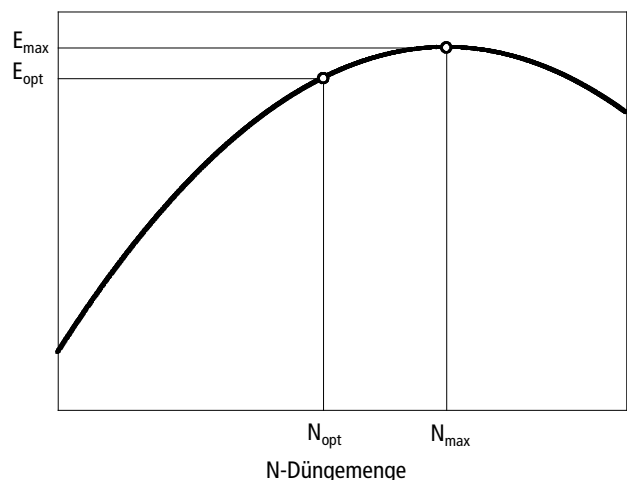


Abb. 1 | Schematische Darstellung einer N-Produktionsfunktion mit Abbildung der N-Düngemengen (N_{max} , N_{opt}) für die Erzielung des Maximalertrags (E_{max}) und des Ertrags bei ökonomisch optimaler N-Düngung (E_{opt}).

stoffs (N_{\min}) und somit das Risiko für Stickstoffverluste nach der Ernte nur geringfügig zunimmt (Bélanger *et al.* 2003; Hong *et al.* 2007). Bei Stickstoffgaben, die deutlich grösser sind als N_{opt} , nehmen die Nacherntegehalte von N_{\min} deutlich zu. N_{opt} stellt somit einen guten Kompromiss zwischen den wirtschaftlichen (hoher Ertrag bei guter Produktequalität) und ökologischen Zielen (geringe N-Verluste) des Ackerbaus dar.

In dieser Publikation wird aufgezeigt, wie basierend auf N_{opt} die N-Düngungsnormen wichtiger Ackerkulturen für die Revision 2009 der GRUDAF erarbeitet worden sind.

Material und Methoden

Die Ableitung der N-Düngungsnormen von Winterweizen, Wintertriticale, Winterroggen, Wintergerste, Winterraps und Körner- und Silomais für die GRUDAF 2009 beinhaltete die unten beschriebenen Schritte.

1. Anlage von N-Steigerungsversuchen

Die Grundlage für die Ableitung von Stickstoffdüngungsnormen sind N-Steigerungsversuche (Schilling 2000). Dabei werden gestaffelte Mengen N gedüngt, für Ackerkulturen meist in gleichmässigen Stufen von 20 bis 40 kg N ha⁻¹. In den N-Düngungsversuchen für die GRUDAF 2009 wurden ausgehend von den Düngungsnormen der GRUDAF 2001 (Walther *et al.* 2001) die folgenden N-Stufen angewendet (in kg N ha⁻¹): 0, Normdüngung - 40, Normdüngung, Normdüngung + 40, Normdüngung + 80, Normdüngung + 120. Die höchste N-Stufe wurde nur bei Wintertriticale, Winterroggen und Winterraps untersucht.

Der Bereich der untersuchten N-Düngegaben in N-Steigerungsversuchen geht von keiner N-Düngung bis zu N-Gaben, die deutlich über der N-Düngungsnorm von 2001 liegen. Dies ist für die korrekte Anpassung von mathematischen Produktionsfunktionen zu Bestimmung des Düngeoptimums nötig (siehe unten).

Zur Begrenzung des Versuchsaufwands werden N-Steigerungsversuche als Kleinparzellenversuche durchgeführt. Die Versuche werden dabei in der Regel in drei- bis vierfacher Wiederholung angelegt, um die Einflüsse von allfälliger Bodenheterogenität innerhalb der Versuchsparzelle zu reduzieren.

Die N_{opt} einer Kultur kann auf verschiedenen Standorten (Feldern) und in unterschiedlichen Jahren stark variieren (Lory und Scharf 2003; Brentrup und Link 2004). Zudem können Sorten unterschiedliche N-Düngeoptima aufweisen (Colwell 1994). Aus diesen Gründen werden in der Regel mehrortige und mehrjährige N-Steigerungsversuche mit meist mehreren Sorten einer Kultur angelegt, um möglichst robuste N-Düngeoptima ableiten zu können. Für die im Rahmen der GRUDAF-Revision 2009 zu überprü-

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird das Prinzip der ökonomisch optimalen N-Düngung (N_{opt}) erläutert. Es erlaubt die quantitative Ableitung von Stickstoffdüngungsnormen anhand von N-Düngungsversuchen. Das so gefundene optimale Niveau der N-Düngung stellt einen guten Kompromiss dar zwischen den ökonomischen und ökologischen Zielen des Ackerbaus. Im Rahmen der Arbeiten für die «Grundlagen der Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF) 2009» wurde basierend auf umfangreichen N-Düngungsversuchen die N_{opt} für mehrere wichtige Ackerkulturen bestimmt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen führten bei allen Kulturen mit Ausnahme von Mais zu einer Anhebung der optimalen N-Düngung um 10 bis 40 kg N ha⁻¹. Um eine der Standortproduktivität angepasste N-Düngung zu fördern, wurden die N-Düngungsnormen dieser Kulturen jedoch nicht generell erhöht. Es wurden ertragsabhängige Korrekturfaktoren für die zu düngende N-Menge eingeführt.

fenden N-Düngungsnormen wurden je nach Kultur zwischen sieben und 19 Versuchsumwelten im schweizerischen Mittelland herangezogen, in denen zwischen zwei und sechs Sorten pro Kultur angebaut wurden (Tab. 1).

2. Anpassung von Produktionsfunktionen

In den N-Steigerungsversuchen wurden die Korn- und – im Falle von Körnermais – die Biomasseerträge der angebauten Kulturen bei unterschiedlichen N-Stufen ermittelt, damit mathematische Funktionen, sogenannte Produktionsfunktionen, an die bei den einzelnen N-Düngeintensitäten festgestellten Erträge angepasst werden konnten. Es wurden verschiedene Funktionstypen herangezogen; die Auswahl der am besten angepassten Funktion erfolgte aufgrund visueller und statistischer Beurteilungen (z. B. anhand des Bestimmtheitsmasses der Regressionen). In den meisten Fällen führte das Quadratwurzelmodell (Bélanger *et al.* 2000) vom Typ $Y = a + bN^{1/2} + cN$ (Y steht für Ertrag, N für die gedüngte N-Menge und a , b und c sind Koeffizienten der Regressionsgleichung) zu den besten Kurvenanpassungen. Dieses Modell wurde dementsprechend für alle Kulturen ausser Raps, bei dem das linear-limitationale Plateaumodell (Gandorfer 2006) deutlich besser passte, verwendet. Bei jeder Kultur wurde eine individuelle Produktionsfunktion für jede Versuchsumwelt angepasst.

Tab. 1 | Angaben zu den N-Düngungsversuchen mit verschiedenen Ackerkulturen für die GRUDAF 2009.

Kultur	Versuchsjahre	Versuchsstandorte	Anzahl Versuchsumwelten ¹⁾ (Jahre × Orte)	Anzahl Sorten
Winterweizen	2005 – 2007	Changins (VD) Goumoëns (VD) Zollkofen (BE) Gränichen (AG) Ossingen (ZH) Tänikon (TG) Arenenberg/ Fruthwilen (TG)	19	6 (4 Brot und 2 Futterweizensorten)
Wintertriticale	2005 – 2007	Zollkofen (BE) Gränichen (AG) Tänikon (TG) Arenenberg/ Fruthwilen (TG)	12	2
Winterroggen	2006 – 2007	Zollkofen (BE) Gränichen (AG) Tänikon (TG) Arenenberg/ Tägerwilen (TG)	7	2 (1 Populations- und 1 Hybrid-sorte)
Wintergerste	2006 – 2007	Changins (VD) Goumoëns (VD) Zollkofen (BE) Gränichen (AG) Tänikon (TG) Tägerwilen/ Fruthwilen (TG)	11	4
Mais	2005 – 2007	Changins (VD) Zollkofen (BE) Gränichen (AG) Tänikon (TG) Kreuzlingen/ Bonau/ Wigoltingen (TG)	15	3 Zweinutzungs- sorten (Silo- und Körnermais)
Winterrapen	2006 – 2007	Changins (VD) Oensingen (SO) Reckenholz (ZH) Gennersbrunn SH)	7	3

¹⁾ Weil aus verschiedenen Gründen einzelne Versuche ausgefallen sind, entspricht die Zahl der Versuchsumwelten nicht in allen Fällen dem Produkt aus Versuchsjahren und -standorten.

3. Ableitung der ökonomisch optimalen N-Düngemenge

Mit Hilfe der an die Ertragsdaten angepassten Produktionsfunktionen konnte N_{opt} für die einzelnen Versuchsumwelten berechnet werden. N_{opt} ist definiert als die N-Menge, bei welcher der Grenzerlös den Grenzkosten der N-Düngung entspricht. Die Berechnung von N_{opt} erfolgte für Produktionsfunktionen, die auf dem Quadratwurzelmodell basieren, nach der Gleichung $N_{opt} = (0.5b/CP - c)^2$ (Bélanger *et al.* 2000), wobei b und c Koeffizienten des Quadratwurzelmodells sind und CP für das Verhältnis von Düngerkosten und Produktpreis steht. Bei der linear-limitationalen Produktionsfunktion ist N_{opt} unabhängig von den Dünger- und Produktpreisen durch den Schnittpunkt der beiden linearen Abschnitte der Funktion definiert (Gandorfer, 2006).

Für die Berechnung von N_{opt} wurden die zum Zeitpunkt der Auswertungen (Frühjahr 2008) gültigen Preise für N-Dünger (2 Fr./kg N) und Ernteprodukte (Preise gemäss den Angaben von swiss granum und AGRIDEA) verwendet.

In wenigen Fällen ergab die Berechnung hohe N_{opt} -Werte, die grösser waren als die grösste angewendete N-Düngemenge. Dann wurde N_{opt} gleich der grössten N-Stufe gesetzt, weil die Ableitung von N_{opt} nur innerhalb des Bereichs der geprüften N-Düngemengen zulässig ist.

Für die Ableitung der N-Düngungsnormen der GRUDAF 2009 wurde für jede Kultur der Medianwert der N_{opt} -Werte aller Versuchsumwelten berechnet. Die GRUDAF-N-Düngungsnormen entsprechen den auf 10 kg N gerundeten Medianwerten.

Die abgeleiteten N-Düngungsnormen wurden anhand verschiedener Kriterien überprüft:

- Qualitätseigenschaften des Ernteguts (z. B. Backqualität von Brotweizen);
- Residual- N_{min} -Werte zur Ernte als grobes Mass für potenzielle Nachernte-N-Verluste.

Wenn sich bei N-Düngemengen im Bereich von N_{opt} weder die Qualität des Ernteguts verschlechterte noch erhöhte Nachernte- N_{min} -Gehalte im Boden festgestellt wurden, wurde N_{opt} auf 10 kg N ha⁻¹ gerundet und als N-Düngungsnorm übernommen.

Ergebnisse und Diskussion

Ökonomische Optima der N-Düngung in den verschiedenen Versuchsumwelten

In Tabelle 2 sind die N_{opt} -Werte der verschiedenen Kulturen und Versuchsumwelten zusammengefasst. Die Spannweite, d. h. die Differenz zwischen Minimum und Maximum, der ökonomischen Optima der einzelnen Kulturen ist gross. Sie ist mit Ausnahme von Wintergerste und Winterrapen stets grösser als 100 kg N ha⁻¹ und beläuft sich bei den beiden Nutzungsformen von Mais sogar auf ca. 150 respektive 190 kg N ha⁻¹. Diese grosse Variationsbreite von N_{opt} bestätigt die Ergebnisse von anderen Studien (u. a. Lory und Scharf 2003; Brentrup und Link 2004), in denen eine grosse Umweltabhängigkeit der optimalen N-Düngung gefunden wurde.

Nebst klimatisch bedingten Variationen der Kulturerträge ist vermutlich die jahres- und standortbedingte Variabilität der N-Nachlieferung aus der organischen Bodensubstanz hauptsächlich verantwortlich für die grosse Streuung von N_{opt} über die Versuchsumwelten. Die grosse Variation des bodenbürtigen Stickstoffs kann anhand der N_{min} -Werte, die während des Jugendwachs-

Tab. 2 | Minimum-, Median- und Maximalwerte des ökonomischen Optimums der N-Düngung der für die GRUDAF 2009 untersuchten Ackerkulturen.

Kultur	Anzahl Versuchsumwelten	Ökonomisches Optimum der N-Düngung (kg N ha ⁻¹)		
		Minimumwert	Medianwert	Maximalwert
Winterweizen (Brotgetreide)	19	97	165	234
Winterweizen (Futtergetreide)	19	85	157	224
Winterroggen (Populations-sorten)	7	56	114	184
Winterroggen (Hybridsorten)	7	60	133	207
Wintertriticale	12	89	118	203
Wintergerste	11	109	134	190
Winterraps	7	105	168	193
Silomais	15	39	97	190
Körnermais	15	29	113	220

tums des Mais in den 15 Versuchsumwelten gemessen worden sind, aufgezeigt werden: Die Differenz zwischen dem kleinsten und grössten gemessenen N_{\min} -Wert beträgt mehr als 100 kg N ha⁻¹ (Detailergebnisse aus Platzgründen nicht dargestellt).

Mais ist aufgrund seines bis in den Herbst andauernden Wachstums besonders gut in der Lage, den während der warmen Jahreszeit mineralisierten Boden-N aufzunehmen (Hugger 1992) und reagiert dadurch stärker als andere Kulturen auf Standort- und Jahresunterschiede in der bodenbürtigen N-Mineralisierung. Dies könnte erklären, weshalb bei Mais die kleinsten N_{opt} -Werte von ca. 30 (Körnermais) beziehungsweise 40 kg N ha⁻¹ (Silomais) gefunden worden sind und die Spannweite von N_{opt} am grössten war (Tab. 2).

Bei Weizen ist auffallend, dass die N_{opt} -Medianwerte von Brot- und Futterweizen fast identisch waren. Der Medianwert von Brotweizen war trotz seines geringeren Ertragsniveaus sogar grösser als der von Futterweizen. Die untersuchten Futterweizensorten sind offenbar in der Lage, bei gleichem N-Angebot deutlich mehr Ertrag zu bilden als die Brotweizensorten. Im Gegensatz zu den Weizensortentypen unterschieden sich die beiden Sortenformen von Winterroggen bezüglich N_{opt} deutlich; das wirtschaftlich optimale N-Düngeniveau des ertragreicheren Hybridroggens lag ca. 20 kg N ha⁻¹ über dem des Populationsroggens. Die N_{opt} -Werte der als Silo- oder Körnermais angebauten Doppelnutzungs-Maissorten waren um ca. 15 kg N ha⁻¹ unterschiedlich; offenbar

wurde mehr Stickstoff benötigt für eine gute Kornausbildung (Körnermais) als nur für die Erzielung einer hohen Biomasse (Silomais).

Die in Tabelle 2 abgebildeten Medianwerte von N_{opt} bilden die Grundlage für die N-Düngungsempfehlungen in den GRUDAF 2009.

Ableitung der neuen ertragsabhängigen Korrektur der N-Düngung für die GRUDAF 2009

Im Vergleich zu den N-Düngungsnormen der GRUDAF 2001 (Walther *et al.* 2001) liegt die N_{opt} aller untersuchten Kulturen mit Ausnahme von Mais zwischen 10 (Wintertriticale) und 40 kg N ha⁻¹ (Hybrid-Winterroggen) höher (Tab. 3), wobei der Unterschied zur alten N-Düngungsempfehlungen bei den meisten Kulturen 20 kg N ha⁻¹ beträgt. Bei Körnermais ist N_{opt} gleich hoch wie die alte N-Düngungsnorm und bei Silomais sogar 10 kg N ha⁻¹ tiefer. Weil der geringe Unterschied von N_{opt} zwischen den beiden Nutzungsformen von Mais keine differenzierte N-Düngungsempfehlung rechtfertigt und N_{opt} im Mittel beider Nutzungsformen nur 5 kg N ha⁻¹ tiefer liegt als die bisherige N-Düngungsnorm, wurde entschieden, in den GRUDAF weiterhin eine einheitliche N-Düngungsempfehlung für Mais abzugeben und die N-Düngungsnorm bei 110 kg N ha⁻¹ zu belassen.

Die durch die in dieser Arbeit beschriebenen N-Düngungsversuche begründete moderate, aber systematische Anhebung der optimalen N-Düngung aller untersuchten Kulturen, mit Ausnahme von Mais, ist wenig überraschend. Die Düngungsversuche, die den N-Düngungsnormen der GRUDAF 2001 (Walther *et al.* 2001) zugrunde liegen, wurden vor ca. zehn Jahren oder noch früher durchgeführt. Nebst Unterschieden in den Versuchsbedingungen und in der Auswertungsmethodik der Versuchsergebnisse haben sich seit der Erarbeitung der GRUDAF 2001 verschiedene für das Niveau der N-Düngung wichtige Faktoren verändert: Entwicklung des Fachwissens und der Produktionstechnik, allgemeiner züchterischer Fortschritt und die Einführung von neuen, ertragreichen Sortentypen (z. B. Futterweizen, Hybridroggen). Dementsprechend können heute unter günstigen Standortbedingungen und bei entsprechenden Anbautechniken etwas grössere N-Düngemengen wirtschaftlich in Ertrag umgesetzt werden. Obwohl die in dieser Arbeit beschriebenen N-Düngungsversuche eine moderate Erhöhung der N-Düngung der untersuchten Kulturen rechtfertigen würden, wurde bei der Erarbeitung der GRUDAF 2009 aus den nachfolgend aufgeführten Gründen davon abgesehen, die N-Düngungsnormen der GRUDAF 2001 zu erhöhen. Die Düngungsversuche sind auf guten, produktiven Ackerstandorten des schweizerischen Mittellandes durchgeführt worden und die Ausnutzung des Dünger-N war generell

Tab. 3 | Berechnungsgrundlagen für die Korrektur der N-Düngungsnormen der GRUDAF 2009 in Abhängigkeit des Mehr- beziehungsweise Minderertrags im Vergleich zum Referenzertrag. Die Angaben stammen mit Ausnahme von N_{opt} aus den GRUDAF, Ausgabe 2001 (Walther et al. 2001) und Ausgabe 2009 (Flich et al. 2009).

Kultur	Referenzertrag ¹⁾ (dt Körner bzw. Biomasse ha ⁻¹)	Maximaler Ertrag für die N-Korrektur (dt Körner ha ⁻¹)	N-Düngungsnorm (kg N ha ⁻¹)	Ökonomisches Optimum der N-Düngung (N_{opt}) (kg N ha ⁻¹)	Ertragsabhängige Korrektur der N-Düngung (kg N dt ⁻¹ Körner)
Winterweizen (Brotgetreide)	60	80	140	160	1,0
Winterweizen (Futtergetreide)	75	95	140	160	1,0
Winterroggen (Populationssorten)	55	80	90	110	0,8
Winterroggen (Hybridsorten)	65	90	90	130	1,2
Wintertriticale	60	95	110	120	0,3
Wintergerste	60	90	110	130	0,7
Winterraps	35	40	140	160	4,0
Silomais	175	– ²⁾	110	100	– ²⁾
Körnermais	95	– ²⁾	110	110	– ²⁾

1) Der Referenzertrag entspricht einem Ertragsniveau, das von den meisten Betrieben im Durchschnitt der Jahre erreicht wird (Flich et al. 2009). Er basiert primär auf den statistischen Erhebungen des Schweiz. Bauernverbandes (SBV).

2) Diese Grössen werden für Silo- und Körnermais nicht angegeben, weil für Mais wegen des geringen Unterschieds zwischen bisheriger N-Düngungsnorm und N_{opt} keine ertragsabhängige Korrektur der N-Düngung abgeleitet wurde.

hoch. In der Praxis wird dagegen auch in Grenzlagen (höhere Lagen, ungünstigere Böden etc.) weiterhin Ackerbau betrieben. Somit kann nicht davon ausgegangen werden, dass das in den Versuchen als optimal gefundene N-Düngungsniveau unter allen Produktionsbedingungen der Schweiz in Wert gesetzt werden kann. Deshalb wurde entschieden, anstelle einer generellen Anhebung der N-Düngungsnormen neu kulturspezifische Faktoren für die ertragsabhängige Korrektur der bisherigen N-Düngungsnormen in die GRUDAF 2009 zu integrieren. Diese Korrekturfaktoren sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Die Ableitung der Korrekturfaktoren erfolgte wie folgt: Die Differenz zwischen dem ökonomisch abgeleiteten Optimum der N-Düngung und der N-Düngungsnorm der GRUDAF 2001 wurde dividiert durch die Differenz zwischen dem als realistisch betrachteten Maximalertrag und dem Referenzertrag der GRUDAF 2001. Für Brotweizen wurde somit eine Differenz der N-Düngung von 20 kg N (160 – 140 kg N) durch eine Ertragsdifferenz von 20 dt (80 – 60 dt) dividiert, was eine ertragsabhängige Korrektur der N-Düngung von 1,0 (kg N dt⁻¹ Körner) ergibt.

Die ertragsabhängige Korrektur der N-Düngung, die nur bis zu einem für die Schweiz als realistisch betrachteten Maximalertrag angewendet werden kann, um N-Überdüngungen aufgrund von zu optimistisch geschätzten Ertragserwartungen zu vermeiden, ist eine Neuerung im Vergleich zu den GRUDAF 2001, in denen noch keine ertragsabhängige Korrektur der N-Düngung möglich war.

Geringe Abhängigkeit des ökonomischen Optimums der N-Düngung von den Preisverhältnissen

Obwohl nach dem Prinzip des ökonomischen Optimums abgeleitete N-Düngungsempfehlungen international weit verbreitet sind, wird zum Teil kritisch dagegen ins Feld geführt, dass die Höhe der empfohlenen N-Düngung stark von schwankenden N-Dünger- und Produktpreisen abhängig sei. Eigene Sensitivitätsanalysen für Weizen (Detailergebnisse aus Platzgründen nicht dargestellt) ergaben, dass sich N_{opt} bei einer Veränderung des Weizenpreises um 10 Fr. oder des N-Düngerpreises um 10 % nur geringfügig ändert (um ca. 5 bzw. 3 kg N ha⁻¹). Weil die den Berechnungen von N_{opt} zugrundeliegenden Produktionsfunktionen nicht linear sind, können diese Veränderungen von N_{opt} bei stärkeren Änderungen von Weizen- oder Düngerpreis nicht linear extrapoliert werden. Zudem können sich die Auswirkungen veränderter N-Dünger- und Produktpreise auf N_{opt} gegenseitig aufheben, indem z. B. eine Abnahme des Produkterlöses eine Verringerung von N_{opt} bewirkt, während eine gleichzeitige Abnahme des N-Düngerpreises zu einer Erhöhung von N_{opt} führt. Somit muss N_{opt} nicht laufend wegen üblicher Veränderungen von Produkte- oder Düngerpreisen kontrolliert und angepasst werden.

Schlussfolgerungen

Das Prinzip der ökonomisch optimalen N-Düngung erlaubt die quantitative Ableitung von N-Düngungsnor-

men von Ackerkulturen anhand von N-Düngungsversuchen. Das so erhaltene optimale Niveau der N-Düngung bildet einen guten Kompromiss zwischen ökonomischen und ökologischen Zielsetzungen des Ackerbaus. ■

Riassunto

Derivazione delle norme di concimazione azotata per la coltura di cereali

Nel presente lavoro viene spiegato il principio della concimazione azotata economicamente ottimale (N_{ott}), secondo cui è consentita una derivazione quantitativa delle norme di concimazione azotata sulla base di prove incentrate su tale aspetto. Il livello ottimale di concimazione così calcolato costituisce un valido compromesso tra gli obiettivi economici e quelli ecologici della coltura di cereali. Nell'ambito dei lavori attinenti ai «Dati di base per la concimazione in coltura di cereali e foraggicoltura (DBC)» 2009, è stato determinato, in base a numerose prove di concimazione azotata il livello di N_{ott} per diverse importanti colture di pieno campo. I risultati di queste prove hanno determinato per quasi tutte le colture, eccezion fatta per il mais, un aumento della norma di concimazione azotata compreso tra 10 e 40 kg N ha⁻¹. Affinché la concimazione azotata risulti comunque adeguata alla produttività del luogo, le norme di concimazione di queste colture non sono state aumentate in modo generalizzato, bensì si è effettuata l'introduzione di una correzione del quantitativo di azoto da apportare in funzione della resa.

Literatur

- Bélanger G., Walsh J. R., Richards J. E., Milburn P. H. & Ziadi N., 2000. Comparison of three statistical models describing potato yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal* **92**, 902–908.
- Bélanger G., Ziadi N., Walsh J.R., Richards J.E. & Milburn P.H., 2003. Residual soil nitrate after potato harvest. *Journal of Environmental Quality* **32**, 607–612.
- Brentrup F. & Link A., 2004. Stickstoffdüngung zur richtigen Zeit. *Getreidemagazin* **9**, 230–232.
- Feil B., 1998. Physiologische und pflanzenbauliche Aspekte der inversen Beziehung zwischen Ertrag und Proteinkonzentration bei Getreidesorten: Eine Übersicht. *Pflanzenbauwissenschaften* **2**(1), 37–46.
- Flisch R., Sinaj S., Charles R. & Richner W., 2009. GRUDAF 2009 – Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. *Agrarforschung* **16** (2), 1–97.

Abkürzungen

GRUDAF: Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau

N: Stickstoff; N_{min} : Mineralischer Stickstoff

N_{opt} : Ökonomisch optimale Stickstoffdüngung

Summary

Determination of nitrogen fertilization standards for arable crops

This paper explains the principle of economically optimal N fertilization (N_{opt}). This principle allows the quantitative derivation of N fertilization standards based on N fertilization trials. The optimum level of N fertilization thus found represents a good compromise between the economic and ecological aims of arable farming. Within the framework of the studies concerning the «Principles of Fertilization in Arable and Forage-Crop Production» (GRUDAF) 2009, the N_{opt} for several important arable crops was determined based on extensive N fertilization trials. For all crops but maize, the results of these studies have led to an increase in optimum N fertilization by 10 to 40 kg N ha⁻¹. In order to promote N fertilization adapted to site productivity, however, the N fertilization standards of these crops were not as a rule raised, but rather yield-dependent correction factors were introduced for the N quantities to be applied.

Key words: Arable crops, economically optimal nitrogen rate, nitrogen fertilization recommendations, nitrogen losses, product quality, yield.

- Gandorfer M., 2006. Bewertung von Precision Farming dargestellt am Beispiel der teilflächenspezifischen Stickstoffdüngung. Dissertation Technische Universität München, Weihenstephan.
- Hong N., Scharf P. C. Davis J. G., Kitchen N. R. & Sudduth K. A., 2007. Economically optimal nitrogen rate reduces soil residual nitrate. *Journal of Environmental Quality* **36**, 354–362.
- Hugger H., 1992. Stickstoffdüngung zu Mais unter Berücksichtigung der Bodennachlieferung. *Mais* 2/1992, 14–16.
- Lory J. A. & Scharf P. C., 2003. Yield goal versus delta yield for predicting fertilizer nitrogen need in corn. *Agronomy Journal* **95**, 994–999.
- Colwell J.D., 1994. Estimating fertilizer requirements: A quantitative approach. CAB Int., Wallingford, Oxfordshire, UK.
- Schilling G., 2000. Pflanzenernährung und Düngung. Ulmer, Stuttgart, 464 S.
- Walther U., Ryser J.P. & Flisch R. 2001. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF). *Agrarforschung* **8**, 1–80.