

Evaluation zweier Methoden für eine optimale Stickstoffdüngung im Ackerbau

Alexandra Maltas, Raphaël Charles, Didier Pellet, Brice Dupuis, Lilia Levy, Alice Baux, Bernard Jeangros und Sokrat Sinaj
Agroscope, Institut für Pflanzenbauwissenschaften IPB, 1260 Nyon, Schweiz

Auskünfte: Sokrat Sinaj, E-Mail: sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch



Einfluss der Stickstoffdüngung auf das Wachstum von Raps, Parzelle 24A in Changins. (Foto: Carole Parodi)

Einleitung

Wenn das Stickstoffangebot im Boden mit der auf den Bedarf der Kulturen abgestimmten Menge an Stickstoffdünger ergänzt wird, können gleichzeitig die landwirtschaftliche Produktion optimiert und die Auswirkungen auf die Umwelt begrenzt werden. Die optimale Dosis des Stickstoffs (N) hängt jedoch stark von den Anbau- und Bodenbedingungen der Parzelle ab, da zahlreiche Faktoren den Stickstoffkreislauf beeinflussen und miteinander wechselwirken. Aus diesem Grund ist es für die Landwirtschaftsbetriebe schwierig, diese Dosis richtig abzuschätzen. Deshalb ist es wichtig, Werkzeuge als Entscheidungshilfe zu entwickeln, mit denen die optimale Dosis einfach und zuverlässig berechnet werden kann.

Gegenwärtig werden in der Schweiz zwei Methoden zur Berechnung des erforderlichen Stickstoffdüngers eingesetzt: die Methode der korrigierten Normen, auch Schätzmethode genannt, und die Nmin-Methode. Diese Methoden werden in den Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF) 2009 beschrieben (Sinaj *et al.* 2009).

Die Methode der korrigierten Normen

Bei dieser Methode wird die erforderliche Stickstoffmenge geschätzt, indem eine Referenzdosis an die Anbau- und Bodenbedingungen des Standorts angepasst wird. Diese Referenzdosis, die sogenannte **Düngungsnorm**, entspricht bei einer bestimmten Kultur der Stickstoffmenge, die unter durchschnittlichen Bedingungen erfor-

derlich ist, um einen in der Schweiz bei der betreffenden Kultur beobachteten mittleren Ertrag, den sogenannten **Referenzertrag**, zu erreichen. Bei der Festlegung dieser Düngungsnormen und Referenzerträge werden Kurven, welche die Reaktion der Kulturen auf die Stickstoffdüngung beschreiben, sowie Erfahrungen der Landwirtschaftsbetriebe und Expertenwissen berücksichtigt.

Wenn die pedoklimatischen Bedingungen von den Standardbedingungen abweichen, werden Korrekturfaktoren auf die Düngungsnormen angewendet. Es werden sechs verschiedene Korrekturfaktoren berücksichtigt (Gleichung 1), die positive und negative Werte annehmen können. Der Faktor Ertrag ($fErtr$) schätzt den Stickstoffbedarf bei einem prognostizierten unter- oder überdurchschnittlichen Ertrag (Sinaj *et al.* 2009; Richner *et al.* 2010). Mit den weiteren fünf Faktoren lassen sich die Auswirkungen der pedoklimatischen Bedingungen der Parzelle auf das Stickstoffangebot im Boden berücksichtigen (Sinaj *et al.* 2009). Unter der Annahme, dass sich diese Faktoren addieren und nicht miteinander interagieren, lässt sich die erforderliche Stickstoffgabe (X) mit der folgenden Gleichung 1 berechnen:

$$X = Norm + (fErtr + fMos + fPc + fMa + fRegen + fTs)$$

(Gleichung 1)

Der Faktor $fMos$ berücksichtigt den Einfluss des Gehalts an Ton und organischer Substanz im Boden auf die Mineralisierung der organischen Substanz. Der Faktor fPc berücksichtigt den Einfluss der Art der Vorkultur und des Zeitpunktes ihrer Einarbeitung auf die Mineralisierung von Pflanzenresten im Boden. Der Faktor fMa quantifiziert den Anteil des Stickstoffs in den organischen Düngern, der im Jahr nach dem Düngereintrag zur Verfügung stehen wird. Mit dem Faktor $fRegen$ wird der Einfluss des Regens auf den Stickstoffverlust durch Auswaschung während des Winters und Frühlings einbezogen. Der Faktor fTs schliesslich simuliert den positiven Effekt des wiederholten Hackens auf die Mineralisierung der organischen Substanz im Boden.

Die Nmin-Methode

Diese Methode beruht auf der Messung des Gehalts an mineralischem Stickstoff im Boden. Sie bezieht sich auf einen Referenzwert, von dem der gemessene Nmin-Wert subtrahiert wird. Dieser Nmin-Wert entspricht dem Vorrat an mineralischem Stickstoff, der sich zu einem gegebenen Zeitpunkt im Boden befindet (vor der ersten und zweiten Stickstoffdüngung). Zeitpunkt und Tiefe der Probenahme für die Nmin-Bestimmung hängen von der angebauten Kultur ab (Sinaj *et al.* 2009). Der gemessene Nmin-

Zusammenfassung

In der Schweiz werden zwei Methoden verwendet, um die Stickstoffdüngung im Ackerbau zu optimieren: die Methode der korrigierten Normen und die Nmin-Methode. Diese beiden Methoden beruhen auf zwei unterschiedlichen Ansätzen. Die Methode der korrigierten Normen berücksichtigt verschiedene Eigenschaften der betroffenen Parzelle, welche die Stickstoffverfügbarkeit beeinflussen. Die Nmin-Methode basiert dagegen auf der Messung des Mineralstickstoffgehalts im Boden während Perioden, die für das Wachstum der Kulturen entscheidend sind. In diesem Artikel werden die beiden Methoden auf der Grundlage von Versuchen zur Stickstoffdüngung evaluiert. Diese Versuche wurden von Agroscope für eine breite Auswahl von Ackerbaukulturen und pedoklimatischen Bedingungen durchgeführt. Es werden Vorteile und Grenzen der beiden Methoden diskutiert und Stossrichtungen für Verbesserungen vorgeschlagen.

Wert widerspiegelt die spezifischen Eigenschaften der Parzelle, da die verschiedenen oben aufgeführten Faktoren indirekt in dieser Messung enthalten sind. Diese Methode vereinfacht die Berechnung der optimalen Stickstoffmenge. Allerdings lässt sich der Einfluss der genannten Faktoren nach dem Zeitpunkt der Nmin-Messung nicht mehr berücksichtigen. Um diesen Mangel auszugleichen, werden wie bei der Methode der korrigierten Normen Korrekturfaktoren verwendet. Die Zahl dieser Faktoren ist jedoch begrenzt und es werden nur negative Korrekturfaktoren berücksichtigt (Sinaj *et al.* 2009).

Der vorliegende Artikel evaluiert die Leistungsfähigkeit der beiden Methoden mit Hilfe von Stickstoffdüngungsversuchen, die von Agroscope bei einer breiten Auswahl von Kulturen und pedoklimatischen Bedingungen durchgeführt wurden. Er ist als Ergänzung zum Artikel von Richner *et al.* (2010) zu verstehen, dessen Ziel die Verifizierung der Werte der Stickstoffdüngungsnormen bei Ackerkulturen war.

Tab. 1 | Eigenschaften der Versuche Kultur*Standort*Jahr. Die Zahl in Klammern bezeichnet die Anzahl Versuche

Eigenschaften der Standorte						
Jahr	Ort			Bodentextur ¹		
1996 (1), 1997 (2), 1998 (2), 1999 (3), 2000 (2), 2002 (1), 2003 (1), 2004 (1), 2005 (15), 2006 (19), 2007 (15), 2008 (1), 2009 (1), 2010 (1).	Changins (33), Goumoëns (8), Tänikon (21), Reckenholz (2), Oensingen (1).			Ton (1), lehmiger Ton (2), toniger Lehm (8), Lehm (39), sandiger Lehm (14), stark lehmiger Sand (1).		
Vorgeschichte des Anbaus						
Bodenarbeit	Erntereste	Zwischenfrucht	Hofdünger		Wiese	
regelmässiges Pflügen (65)	Westschweiz: immer Einarbeitung (41).	Alle (65): 1 Jahr von 2	Westschweiz (41): im Allgemeinen seit mehr als 10 Jahren ohne Hofdünger		Westschweiz (41): nie Wiesen in der Fruchtfolge	
	Deutscheschweiz: Einarbeitung jedes zweite Mal (24).		Deutscheschweiz (24): immer mit Hofdünger, im Allgemeinen letzter Eintrag von Mist in den letzten 1-3 Jahren		Deutscheschweiz (24): immer mit Wiesen, Umbruch im Allgemeinen vor mehr als 3 Jahren	
Beschreibung der zu düngenden Kultur						
Kultur	Bodenarbeit	Erntereste	Stickstoffdünger	Hofdünger	Zwischenfrucht	Vorhergehende Kultur
Westschweiz: Brotweizen (10), Futterweizen (4), Raps (7), Gerste (5), Kartoffel (9), Körnermais (3), Silomais (3) Deutscheschweiz: Brotweizen (3), Futterweizen (3), Raps (3), Gerste (2), Roggen (4), Triticale (3), Körnermais (3), Silomais (3).	Westschweiz: Pflügen (18), reduzierte Bodenbearbeitung (23) Deutscheschweiz: reduzierte Bodenbearbeitung (24).	Immer Einarbeitung (53), ohne Einarbeitung bei Silomais (2)	NH ₄ NO ₃ (65)	Nie (64), Kuhmist (1)	vor Mais und Kartoffel immer (18)	Winterweizen (15), Sommerweizen (1), Raps (11), Wintergerste (4), Sommergerste (2), Triticale (8), Futtererbse (8), Soja (3), Silomais (12), Kartoffel (1)

¹Klassifikation der Böden der Schweiz, Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, 2010.

Material und Methoden

Für die Evaluation berücksichtigte Versuche

Zwischen 1996 und 2010 wurden von den Agroscope-Forschungsstationen 65 durch die Kombination Kultur*Standort*Jahr definierte Versuche zu den wichtigsten Ackerbaukulturen der Schweiz durchgeführt (Tab. 1), die Mehrheit davon (46) im Rahmen der Revision der GRUDAF 2009 (Sinaj *et al.* 2009; Richner *et al.* 2010). Die 19 ergänzenden Versuche (neun mit Kartoffeln, sechs mit Brotweizen und vier mit Raps) waren von Richner *et al.* (2010) nicht berücksichtigt worden.

Bei diesen Versuchen wurden die Auswirkungen der Stickstoffdüngung auf den Ertrag untersucht, wobei vier bis sechs der folgenden Stickstoffgaben eingesetzt wurden: (i) 0 kg N·ha⁻¹ (bei allen Versuchen), (ii) Norm - 40 kg N·ha⁻¹, (iii) Norm, (iv) Norm + 40 kg N·ha⁻¹, (v) Norm + 80 kg N·ha⁻¹ und (vi) Norm + 120 kg N·ha⁻¹. Die Dosen wurden gemäss den Empfehlungen von Sinaj *et al.* (2009) aufgeteilt.

Die Versuche fanden in der Westschweiz (Changins und Goumoëns) und in der Deutscheschweiz (Reckenholz, Oensingen und Tänikon) statt. Kennzeichnend für die Deutscheschweizer Standorte waren (i) tiefere Tempera-

turen und höhere Niederschläge als an den Standorten der Romandie (Tab. 2) und (ii) ein häufigerer Einsatz von organischen Düngemitteln und von Wiesen in der Fruchtfolge (Tab. 1).

In jedem Versuch Kultur*Standort*Jahr wurden zwischen einer und sechs Sorten getestet: Brotweizen (Arina, Pegassos, Runal, Zinal, Titlis), Futterweizen (Tapidor, Drifter), Wintergerste (Boreale, Verticale, Fridericus, Franziska), Winterroggen (Matador), Hybrid-Winterroggen (Picasso), Wintertriticale (Triamant, Lamberto), Winterraps (Trabant, Cormoran, Express), Kartoffeln (Appell, Bintje, Derby, Gourmandine, Eden, Fontane, Innovator, Jelly, LadyClaire, LadyFelicia, LadyJo, LadyRosetta, Laura, Marlen, Naturella, Victoria), Körnermais (Delitop, Atendo, LG2275) und Silomais (Delitop, Atendo, LG2275).

Bestimmung der wirtschaftlich optimalen Stickstoffdosis

Bei der Bestimmung der aus wirtschaftlicher Sicht optimalen Stickstoffdosis wird zuerst die Abhängigkeit des Ertrags von der Stickstoffdüngung mit Hilfe einer nicht-linearen Regression beschrieben. Diese Regressionskurve kann verschiedene Formen aufweisen: eine Gerade mit einem Plateau, quadratische Kurven ohne und mit Plateau oder die Quadratwurzel. Bei den Versuchen dieser

Tab. 2 | Klimatische Bedingungen an den Versuchsstandorten, Durchschnitt 2005–2007

	Westschweiz		Deutschschweiz		
	Changins (VD)	Goumoëns (VD)	Tänikon (TG)	Reckenholz (ZH)	Oensingen (SO)
Höhe (m)	430	600	540	440	460
Durchschnitts- temperatur (°C)	10,4	9,5	8,9	9,9	9,2
Kumulierte Nieder- schläge (mm)	897	964	1130	1024	1161

Studie wurde mit diesen vier Modellen eine gute und ähnliche Annäherung erreicht, die Wahl des Modells beeinflusste allerdings die geschätzte optimale Dosis erheblich (Abb. 1). Cerrato und Blackmer (1990) kamen bei Mais zum selben Ergebnis, schlossen jedoch daraus, dass der Determinationskoeffizient kein relevantes Kriterium für die Wahl des Modells ist, da die Zahl getesteter Dosen oft beschränkt ist und landwirtschaftliche Kriterien zu berücksichtigen sind. In dieser Studie wurde das quadratische Modell mit Plateau gewählt. Das lineare Modell mit Plateau wurde verworfen, weil es die

fortschreitende Reduktion der Wirksamkeit der Stickstoffdüngung mit zunehmender Dosis ausser Acht lässt und die optimale Dosis deshalb unterschätzt (Cerrato und Blackmer 1990). Schliesslich wurden auf das quadratische Modell und das Quadratwurzelmodell verzichtet, weil sie die optimale Dosis tendenziell überschätzen (Cerrato und Blackmer 1990, Bullock und Bullock 1994, Godard 2005).

Das quadratische Modell mit Plateau wird wie folgt beschrieben:

falls Dosis > Xmax ist Y = Emax sonst $Y = Emax - A * (Dosis - Xmax)^2$

mit Y: Ertrag bei Standardfeuchtigkeit in dt/ha

Dosis: Stickstoff-Gabe in kg N/ha

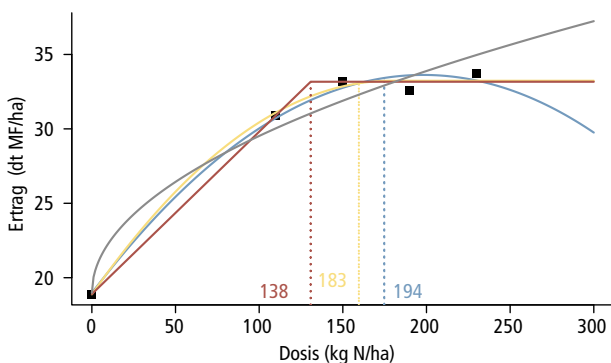
A, Emax und Xmax: Parameter der Kurve, die je nach Sorte für jeden Versuch Kultur*Standort*Jahr angepasst werden. Emax: Maximalertrag und Xmax: Dosis, mit der Emax erreicht wird.

Die Dosis, mit der sich das wirtschaftliche Optimum erreichen lässt (Nopt) wurde anschliessend bestimmt, indem der Punkt gesucht wurde, ab dem gemäss der nachfolgenden Gleichung 2 der zusätzliche Ertrag den zusätzlichen Dünger nicht mehr kompensiert:

$$Nopt = \min[0, (CP/-2A) + Xmax] \quad (\text{Gleichung 2})$$

wobei CP: Verhältnis zwischen Düngerpreis (1,57 Fr./kg) und Verkaufspreis für die Ernte (Fr./dt). Die Referenzpreise für die Ernten betragen 36,5 Fr./dt für Futterweizen und Körnermais, 53 Fr./dt für Brotweizen der Klasse Top (Runal und Titlis), 50 Fr./dt für Brotweizen der Klasse I (Arina und Zinal), 44 Fr./dt für Brotweizen der Klasse III (Pegassos), 34,5 Fr./dt für Gerste und Triticale, 40 Fr./dt für Roggen, 90 Fr./dt für klassischen Raps und 36 Fr./dt für Kartoffeln (nicht sortiert) (Pilet und Frei 2012).

Der mit dem Modell errechnete Nopt-Wert ist nicht zuverlässig, wenn er über der getesteten maximalen Dosis liegt (Burns 2006, Hernandez und Mulla 2008). Um unzuverlässige Extrapolationen zu vermeiden, haben wir in diesen



1. Getestete Modelle	Nopt (kg N/ha)	Yopt (dt/ha)	R ²	RMSE (dt/ha)
Linear mit Plateau	138	45,7	0,967	1,3
Quadratisch mit Plateau	183	45,8	0,988	0,8
Quadratisch	194	46,2	0,986	0,8
Quadratwurzel	1643	83,5	0,985	0,9

Abb. 1 | Einfluss des gewählten Modells auf die Schätzung der optimalen Dosis (Nopt). Im Beispiel ein Versuch mit Raps, 2006 in Oensingen angebaut (Sorte Expert).

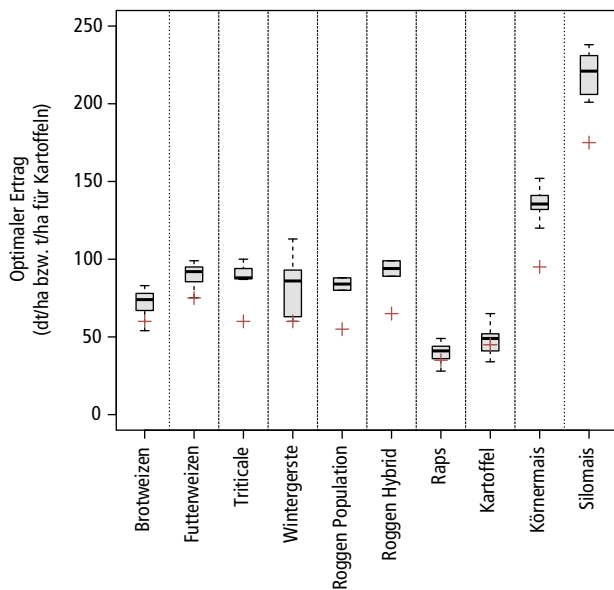


Abb. 2 | Median der optimalen Erträge¹, festgestellt mit Hilfe des quadratischen Modells mit Plateau. Die roten Kreuze bezeichnen die Referenzerträge gemäss den GRUDAF 2009, das heisst die in der Schweiz beobachteten durchschnittlichen Erträge.

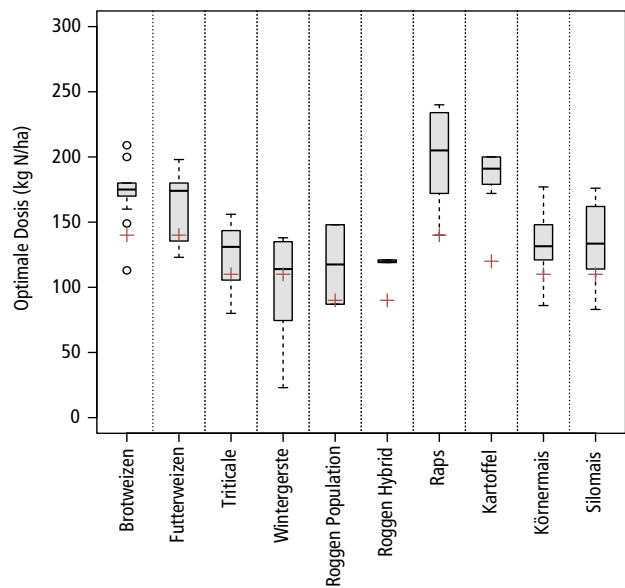


Abb. 3 | Median der optimalen Stickstoffdosen¹, festgestellt mit Hilfe des quadratischen Modells mit Plateau. Die roten Kreuze bezeichnen die Düngungsnormen gemäss den GRUDAF 2009.

¹Bedeutung der Boxplots: Die Box wird jeweils durch das erste und dritte Quartil begrenzt. Der dicke Strich innerhalb der Box bezeichnet den Median. Die Antennen erstrecken sich zum kleinsten bzw. grössten Wert, sofern deren Länge den 1,5-fachen Wert des Interquartilabstandes nicht überschreitet. Andernfalls werden die Extremwerte nicht durch die Antennen erfasst, sondern gelten als Ausreisser, die mit kleinen Kreisen dargestellt sind.

Fällen Nopt beim maximalen getesteten Wert festgelegt (Hernandez et Mulla 2008, Richner et al. 2010). Davon betroffen waren hauptsächlich Brotweizen (57 % der Fälle), Raps (45 % der Fälle) und Kartoffeln (71 % der Fälle). Unter Verwendung der Parameter des im vorherigen Schritt gewählten Modells wurden anschliessend folgende Werte berechnet: der mit der Dosis Nopt erreichte wirtschaftliche Ertrag (Yo_{opt}), die durch die Düngungsnormen erhaltenen Erträge, die korrigierten Normen und der empfohlene N_{min}. Bei allen Kulturen lag Yo_{opt} zwischen 97,4 und 99,8 % von E_{max} (Ergebnisse nicht vorgelegt). Für jede getestete Sorte wurde das Modell individuell angepasst. Anschliessend wurde der Durchschnittswert der verschiedenen Sorten für die unterschiedlichen Erträge und Dosen (wirtschaftliches Optimum, Düngungsnorm, korrigierte Normen, N_{min}) errechnet, um jeweils einen Wert pro Kultur und Umgebung (Standort*Jahr) für die 65 Versuche Kultur*Standort*Jahr zu erhalten. Die Eigenschaften dieser Versuche sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengefasst.

Der optimale Ertrag wurde als Zielertrag in der Methode der korrigierten Normen verwendet für die Kulturen, bei denen der Korrekturfaktor *f*Ertr einbezogen wurde (Getreide und Winterraps). Wenn Yo_{opt} über dem durch diesen Korrekturfaktor vorgesehenen Ertrag lag, wurde der Maximalwert des Ertrags verwendet (Sinaj et al. 2009; Richner et al. 2010).

Messung des mineralischen Stickstoffs im Boden (N_{min})

Die Proben zur Bestimmung der Reserven an mineralischem Stickstoff im Rahmen der N_{min}-Methode wurden in den obersten 60 cm des Bodens bei Kartoffelkulturen und im Horizont 0–90 cm bei den anderen Kulturen entnommen. Die Entnahmen erfolgten am Ende des Winters bei den Winterkulturen und 15 bis 30 Tage nach der Saat bei den Maiskulturen in Tänikon. Bei den Mais- und Kartoffelkulturen in Changins erfolgten die Entnahmen bei der Saat, das heisst vor dem Zeitpunkt, der nach der N_{min}-Methode empfohlen wird (Stauden etwa 10 cm hoch bei Kartoffeln und im 5- bis 6-Blatt-Stadium bei Mais, Sinaj et al. 2009).

Kriterien zur Evaluation der Methoden

Die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE, *Root Mean Squared Error*, Gleichung 3) und der Median der Abweichung zwischen der beobachteten Dosis und der Dosis, die von der Methode der korrigierten Normen bzw. der N_{min}-Methode empfohlen wird, wurden als Kriterien für die Evaluation dieser Methoden verwendet. Diese beiden Kriterien ergeben eine Schätzung des Fehlers der Empfehlung in kg N/ha. Der Median der Abweichung zeigt an, ob die Empfehlung die optimale Dosis im Durchschnitt überschätzt (negativer Wert) oder unterschätzt (positiver Wert), Fehler unterschiedlichen Vorzeichens kompensieren sich aber.

Aus diesem Grund wird mit dem RMSE ein zweites Kriterium eingesetzt, dessen Wert möglichst tief sein sollte.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \hat{x}_i)^2}{n}} \quad (\text{Gleichung 3})$$

wobei n die Anzahl Situationen bezeichnet, x_i den beobachteten Nopt-Wert für die Situation i , \hat{x}_i die empfohlene Dosis nach der untersuchten Methode (Methode der korrigierten Normen oder Nmin-Methode).

Resultate und Diskussion

Optimale Stickstoffdosen und Erträge

Die Versuche von Agroscope waren im gesamten Schweizer Mittelland an für den Ackerbau günstigen Standorten angesiedelt. In der Praxis werden die wichtigsten Ackerbaukulturen auch in den am wenigsten produktiven Zonen angebaut (Richner *et al.* 2010). Deshalb liegen die Mediane der optimalen Erträge im Allgemeinen über den Referenzerträgen der GRUDAF (Sinaj *et al.* 2009; Abb. 2) und über den mittleren in der Schweiz beobachteten Erträgen (Pilet und Frei 2012). Der Unterschied ist bei Wintergetreide (Triticale, Gerste, Roggen) und Mais (Körnermais und Silomais) besonders ausgeprägt.

Bei allen Kulturen sind die in den GRUDAF aufgeführten Düngungsnormen ebenfalls oft niedriger als die in dieser Studie festgestellten optimalen Dosen (Abb. 3). Dies kann auf die hohen Erträge von Wintergetreide und Mais in den für diese Studie analysierten Versuchen zurückgeführt werden (Abb. 2). Diese Tatsache war der Anlass für die Einführung des Korrekturfaktors $fRdt$ im Jahr 2009 in die GRUDAF (Sinaj *et al.* 2009, Richner *et al.* 2010). Die beobachteten starken Abweichungen bei Raps und Kartoffeln (Median der Abweichung 65 beziehungsweise 71 kg N/ha; Tab. 3) überraschen dagegen. Bei diesen beiden Kulturen war der Median der beobachteten Erträge nahe beim entsprechenden Referenzertrag (Abb. 2), die Düngungsnorm scheint eine Unterschätzung zu sein. Trotz Veränderungen bei Anbaumethoden und Sorten wurden die Düngungsnormen in den vergangenen 20 Jahren oder noch länger nicht weiterentwickelt [seit 1987 bei Weizen und Winterroggen (Ryser *et al.* 1987) und seit 1994 bei den anderen Kulturen (Ryser *et al.* 1994)]. Dennoch müssen die Abweichungen der optimalen Dosis relativiert werden. So sind einerseits ihre Auswirkungen auf die Erträge begrenzt (Tab. 3). Andererseits werden zwar die Düngerkosten miteinbezogen, der gewählte Ansatz der optimalen Dosis berücksichtigt

aber weder die Auswirkungen der Stickstoffdüngung auf die Erntequalität noch die Kosten für das Ausbringen von Stickstoffdüngern, Fungiziden oder Wachstumsregulatoren, noch den Einfluss einer aufgeteilten Düngung auf den Ertrag. Gemäss den Empfehlungen von Sinaj *et al.* (2009) sollte die Dosis auf drei Gaben aufgeteilt werden bei mehr als 140 kg N/ha für Winterkulturen (Getreide und Raps) und bei mehr als 160 kg N/ha für Sommerkulturen (Mais und Kartoffeln). Damit würden für Weizen, Raps und Kartoffeln zwei Gaben bei der Anwendung der Düngungsnormen ausreichen, während bei den optimalen Dosen drei Gaben erforderlich wären (Tab. 3).

Bei derselben Kultur können grosse Abweichungen zwischen den einzelnen Versuchen festgestellt werden: bei Brotweizen reichen die Werte zum Beispiel von 113 bis 209 kg N/ha und bei Wintergerste von 23 bis 137 kg N/ha (Abb. 3). Selbst wenn die Düngungsnorm deshalb im Durchschnitt im Bereich des Optimums liegt (mit Ausnahme von Raps und Kartoffeln), kann die Anwendung der Düngungsnorm ohne Berücksichtigung der Situation eine starke Unter- oder Überdüngung zur Folge haben (Abb. 4). Eine Anpassung der Dosis auf die Gegebenheiten der Parzelle ist also wichtig, um Einkommensverluste (Tab. 3) und Stickstoffverluste in die Umwelt zu vermeiden.

Evaluation der Methode der korrigierten Normen

Wenn bestimmte Eigenschaften der Parzellen miteinbezogen werden, ermöglicht die Methode der korrigierten Normen eine gute Voraussage zur Variabilität der optimalen Dosis (Abb. 4). Im Vergleich zu den unkorrigierten Normen wird eine leichte Verbesserung des RMSE erreicht. Die optimale Dosis wird weiterhin häufig unterschätzt, besonders ausgeprägt bei Raps und Kartoffeln (Median der Abweichung zwischen 41 und 80 kg N/ha; Tab. 3). Auch hier bleiben aber die Auswirkungen auf Ertrag und Bruttogewinn begrenzt (Median des maximalen Verlusts bei 7% für Kartoffeln; Tab. 3). Diese Unterschätzungen bestätigen die von Favre und Charles (2006) zwischen 2001 und 2004 untersuchte landwirtschaftliche Praxis. Nach diesen Autoren setzten die Landwirtschaftsbetriebe in der Westschweiz und im Tessin je nach Kultur durchschnittlich zwischen 10 und 36 kg N/ha mehr ein als nach der korrigierten Norm, wobei der Überschuss bei Raps am grössten war. Die Autoren stellten dagegen bei Kartoffeln einen mittleren Überschuss von nur 10 kg N/ha fest, wahrscheinlich wegen den Anforderungen an die Erntequalität (das heisst den Stärkegehalt und den Knollendurchmesser, zwei Parameter, die in dieser Studie nicht in die Berechnung des Optimums einfließen).

Tab. 3 | Median der Stickstoffdosis, des Ertrags und des vereinfachten Bruttogewinns beim Optimum, und Median der Abweichung zwischen dem beim Optimum festgestellten Wert und dem Wert, der erreicht wird, wenn die Düngungsnorm, die empfohlene Dosis gemäss Methode der korrigierten Normen oder die empfohlene Dosis gemäss Nmin-Methode eingesetzt wird. Ein positiver Wert für den Median der Abweichung zeigt eine Verminderung gegenüber dem Optimum an.

		Brotweizen	Futterweizen	Triticale	Gerste	Roggen	Raps	Kartoffel	Körnermais	Silomais	
Dosis (kg N/ha)	beim Optimum	175	174	131	114	120	205	191	132	134	
	Median der Abweichung	Normen	35	34	21	4	30	65	71	22	24
		korrigierte Normen	32	42	34	8	20	41	80	2	-22
		Nmin	32	21	38	22	22	61	21	38	31
Ertrag ¹ (dt/ha)	beim Optimum	74,0	92,1	87,8	85,7	88,4	40,6	487	135,9	221,3	
	Median der Abweichung	Normen	3,2	3,2	3,1	2,5	3,0	2,9	39	3,1	4,5
		korrigierte Normen	2,8	3,3	3,7	1,1	1,6	1,6	35	1,8	-0,2
		Nmin	2,1	2,6	4,1	2,2	1,7	2,8	11	5,6	5,0
Vereinfachter Bruttogewinn (Fr./ha) ²	beim Optimum	3415	3077	2905	2749	3324	3390	17232	4577	3365	
	Median der Abweichung	Normen	113	67	112	65	72	155	1291	69	66
		korrigierte Normen	90	53	70	62	31	67	1128	60	57
		Nmin	62	73	81	77	34	150	354	117	33

¹Die Erträge bei «Normen», «korrigierte Normen» und «Nmin» wurden für jede Sorte und für jeden der 65 Versuche mit Hilfe der Parameter des quadratischen Modells mit Plateau und unter Verwendung der entsprechenden Stickstoffdosis separat berechnet.

²Vereinfachter Bruttogewinn = (Ertrag * Verkaufspreis) - (Dosis * Düngerpreis)

Im Gegensatz dazu überschätzen die korrigierten Normen die Stickstoffdüngung bei zwei Mais-Situationen (Abb. 4) und zwar bei 2007 in Tänikon angebautem Mais auf einer Parzelle mit hohem Mineralstickstoffgehalt bei der Aussaat (153 kg N/ha). Der Zeitraum zwischen Winterende und Mais-Aussaat, in der von den Kulturen kein Stickstoff aufgenommen wird, aber eine gute Mineralisierung der organischen Substanz im Boden stattfindet, ist bei dieser Kultur relativ lang. Wenn Niederschlagsmengen und Temperaturen während dieser Zeit für die Mineralisierung günstig sind, können die Reserven an mineralischem Stickstoff bei der Aussaat sehr gross sein, wie dies 2007 der Fall war. Bei der aktuellen Version der korrigierten Normen kann dieses grosse Stickstoffangebot nicht berücksichtigt werden, weil die Auswirkungen von Wasserhaushalt und Temperaturen im Frühling auf die Mineralisierung der organischen Substanz im Boden nicht in die Berechnung einfließen. Einzig die Wirkungen der Frühlingsniederschläge auf die Auswaschung des Stickstoffs werden mit dem Faktor Regen (*fRegen*) berücksichtigt. In der französischen Version von 1987 (Ryser *et al.* 1987) gab es einen Korrekturfaktor, der die Auswirkungen der Bedingungen im Frühling auf die Mineralisierung der organischen Substanz im Boden und auf die Verfügbarkeit des Stickstoffs in die Berechnung integrierte. Dieser Faktor wurde für die Version 1994 (Ryser *et al.* 1994) ersetzt durch eine neue Spalte, welche die Frühlingsniederschläge integriert

(*fRegen*). Aufgrund der Ergebnisse dieser Studie wäre es sinnvoll, die Auswirkungen der Wiedereinführung dieses Faktors auf die Qualität der Empfehlungen nach der Methode der korrigierten Normen zu untersuchen.

Die Berücksichtigung der Boden- und Anbaubedingungen beschränkt sich auf nur sechs Faktoren, deren Einfluss als bestimmend erachtet wird. Die Zahl der Faktoren ist begrenzt, weil für jeden Faktor Referenztabelle bereitgestellt werden müssen. Dadurch kann der Vielfalt der Situationen jedoch nur teilweise Rechnung getragen werden. Ein weiteres Problem im Zusammenhang mit den korrigierten Normen besteht darin, dass der Einfluss der verschiedenen Faktoren nicht einfach kumulativ ist und dass die Wirkungen beinahe unbeschränkt miteinander interagieren können (Walther *et al.* 1998). Für dieses Problem gibt es zwei Gründe: (i) Die Standardsituation, deren Stickstoffversorgung als normal gilt, ist nicht genau definiert. (ii) Die Korrekturfaktoren, deren Ursprung teilweise alt oder unbekannt ist, wurden im Laufe der Weiterentwicklung der Methode schrittweise und unabhängig voneinander eingeführt, wobei oft auf «Expertenwissen» zurückgegriffen wurde. Es ist heute schwierig, diese Faktoren mit der internationalen Literatur zu vergleichen, da sie sich auf die Korrektur einer Norm beziehen und nicht auf den Wert einer Position in der N-Bilanz (wie die Mineralisierung des Humus, die Auswaschung usw.).

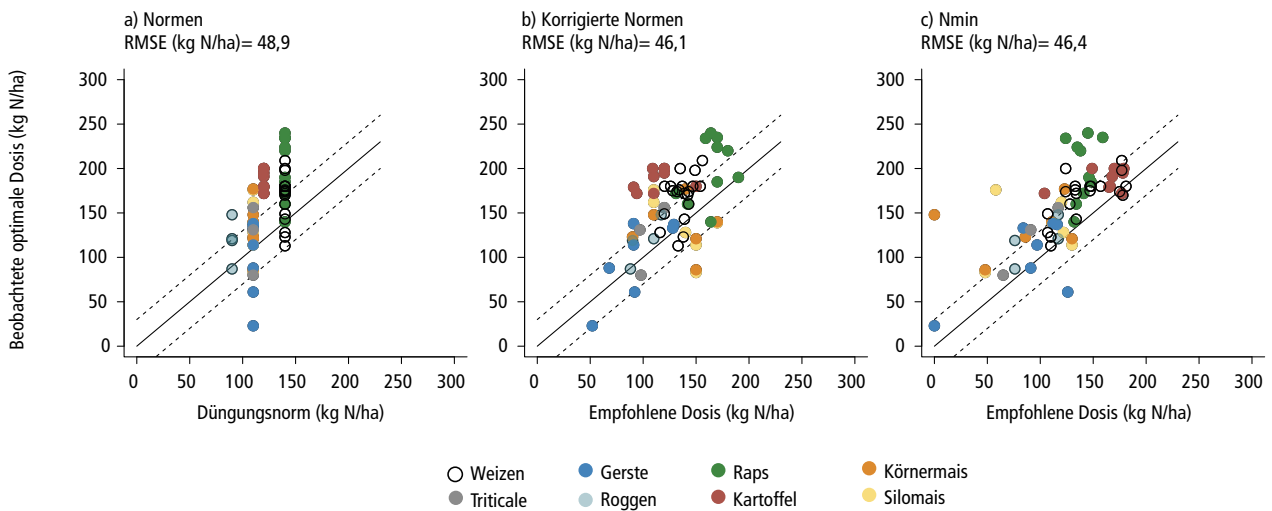


Abb. 4 | Abweichung der optimalen Dosis von a) der Düngungsnorm, b) der Empfehlung gemäss Methode der korrigierten Normen und c) der Empfehlung gemäss Nmin-Methode. Die unterbrochenen Linien bezeichnen die optimale Dosis ± 30 kg N/ha.

Evaluation der Nmin-Methode

In diesen Versuchen konnte die Variabilität von Nopt bei den verschiedenen Kulturen durch die Nmin-Methode am besten beschrieben werden (beste Verteilung der Punkte um die Diagonale; Abb. 4). Diese Methode erreicht besonders bei Kartoffeln bessere Ergebnisse als die Methode der korrigierten Normen. Es sei aber daran erinnert, dass bei den Kartoffeln die Entnahme der Probe für die Nmin-Bestimmung vor dem Zeitpunkt erfolgte, der von der Methode vorgeschlagen wurde. Die Hälfte der Maiskulturen (sechs von insgesamt zwölf) befand sich in der gleichen Situation und dies führte zu einer starken Unterschätzung des Bedarfs in zwei Fällen. Es handelte sich um zwei 2007 in Changins angebaute Kulturen mit sehr grossen Vorräten an mineralischem Stickstoff bei der Aussaat (209 und 142 kg N/ha), die vermutlich teilweise durch die bedeutenden Niederschläge nach der Messung ausgewaschen wurden (60 mm in den sechs Tagen nach der Messung). Die Nmin-Empfehlung wäre vermutlich näher bei der optimalen Dosis gewesen, wenn die Probenahme vor der zweiten Stickstoffgabe erfolgt wäre, wie dies von der Nmin-Methode empfohlen wird (Sinaj *et al.* 2009). Diese Ergebnisse bei Kartoffeln und Mais in Changins können deshalb Hinweise geben, lassen aber nicht auf den Wert schliessen, den man erhalten hätte, wenn die Nmin-Messungen zu den empfohlenen Zeitpunkten stattgefunden hätten. Bei den anderen Mais-Versuchen und den Wintergetreiden ergibt die

Nmin-Methode zufriedenstellende Ergebnisse, die mit den Ergebnissen der Methode der korrigierten Normen vergleichbar sind. Nicht geeignet war die Methode dagegen für Raps (Abb. 4) und insbesondere wenn die Raps-Pflanzen bei Winterende erst wenig entwickelt waren. Rapskulturen können vor dem Winter grosse Mengen an Stickstoff akkumulieren, mit grossen Abweichungen im folgenden Jahr und je nach klimatischen Bedingungen. In Frankreich stellte das COMIFER (Comité français d'études et de développement de la fertilisation raisonnée; 2013) fest, dass der vor Vegetationsbeginn aufgenommene N bei Winterraps von 25 bis mehr als 150 kg N/ha variieren kann. In den Agroscope-Versuchen wurden Mengen von 15 bis 97 kg N/ha beobachtet. Eine gut entwickelte Rapskultur zeigte bei identischer Nmin-Messung einen geringeren N-Bedarf als eine wenig entwickelte Kultur, da sie bereits einen Grossteil des benötigten Stickstoffs aufgenommen hatte. Aus diesem Grund entwickelte das CETIOM (Centre technique interprofessionnel des oléagineux et du chanvre) in Frankreich einen Stickstoff-Rechner für Raps. Dieser Rechner subtrahiert von der empfohlenen Dosis den vom Raps bei Winterende bereits aufgenommenen Stickstoff aufgrund einer visuellen Schätzung der Biomasse der Kultur.

Sinaj *et al.* (2009) weisen bereits darauf hin, dass die Genauigkeit der Nmin-Methode reduziert ist, wenn der Gehalt an organischer Substanz im Boden mehr als 20% beträgt und dass die Methode unbrauchbar ist, wenn der

Grundwasserspiegel hoch ist oder stark schwankt. In dieser Studie wurde zusätzlich gezeigt, dass die Methode bei Rapskulturen ungeeignet ist, wenn die Pflanzen bei Winterende besonders klein oder gross sind. Die Ergebnisse könnten verbessert werden, wenn ein neuer Korrekturfaktor eingeführt wird, der den Zustand der Kultur zum Zeitpunkt der N_{min}-Messung berücksichtigt.

Schlussfolgerungen

Sowohl die Methode der korrigierten Normen als auch die N_{min}-Methode führen zu empfohlenen Dosen, die nahe bei den optimalen Dosen liegen. Im Vergleich zu einer festen Stickstoffdosis gemäss der Düngungsnorm lassen sich mit den beiden Methoden die Fälle mit einer Unter- oder Überdüngung reduzieren. Andererseits hat sich gezeigt, dass eine Anpassung der Stickstoffdüngung an die pedoklimatischen Bedingungen sinnvoll ist.

Bei den guten Produktionsbedingungen dieser Studie liegen die gemäss den beiden Methoden empfohlenen Dosen im Durchschnitt unter der optimalen Dosis. Zu den grössten Unterschätzungen der erforderlichen Stickstoffgabe kam es bei Kartoffeln mit der Methode

der korrigierten Normen und bei Raps mit beiden Methoden. Beide Methoden erzielten die besten Empfehlungen bei den Wintergetreiden: Bei diesen Kulturen werden Dosen vorgeschlagen, die ziemlich nahe bei der optimalen Dosis liegen.

Aufgrund der vorliegenden Studie lassen sich die folgenden methodologischen Verbesserungen vorschlagen: Schätzung der Raps-Biomasse bei Winterende zur Anpassung der Stickstoffdüngung an den Zustand der Kultur und Berücksichtigung der Mineralisierung im Frühling bei Sommerkulturen von Hackfrüchten.

Durch die Kombination dieser Verbesserungen in einem Tool zur Diagnose des Stickstoff-Ernährungszustands der Kultur könnte ein Stickstoffmangel, der durch die Unterschätzung der optimalen Dosis entstanden ist, korrigiert werden.

Das Potenzial neuer Beratungstools, die auf dem Europäischen Markt angeboten werden und Eigenschaften der Parzellen und klimatische Bedingungen berücksichtigen, muss noch getestet werden. ■

Riassunto

Valutazione dei due metodi per ottimizzare la fertilizzazione azotata delle colture

In Svizzera per l'ottimizzazione della concimazione azotata in coltura si basa su due metodi: il metodo delle norme corrette e il metodo Nmin. Questi due metodi si differenziano tra loro nell'approccio all'analisi: il metodo delle norme corrette tiene conto delle varie caratteristiche di una parcella che influenzano la disponibilità dell'azoto, mentre il metodo Nmin si basa su misurazioni dell'azoto minerale presente nel suolo in periodi decisivi per la crescita delle piante. In questo articolo i due metodi sono valutati sulla base di esperimenti inerenti la concimazione azotata su diverse colture e in condizioni pedoclimatiche diverse fra loro realizzati da Agroscope. L'articolo mette in evidenza vantaggi e limiti dei due metodi, così come alcune proposte di miglioramento.

Summary

Evaluation of two methods for optimising nitrogen fertilisation of field crops

Two methods are used in Switzerland to optimise the nitrogen fertilisation of field crops: the «corrected norms» method and the Nmin method. Each of the methods suggests a different approach: the «corrected norms» method takes into account field characteristics influencing nitrogen availability, while the Nmin method is based on the measurement of mineral nitrogen present in the soil during periods that are crucial for the plants growth. In this article, both methods are evaluated using nitrogen fertilisation experiments performed by Agroscope for a wide range of arable crops and pedoclimatic conditions. The advantages and limits of each method are presented, and ways for improvement are suggested.

Key words: field crops, nitrogen fertilization, fertilizer recommendation, «corrected norms» method, Nmin method.

Literatur

- Bullock D.G. & Bullock D. S., 1994. Quadratic and quadratic-plus-plateau models for predicting optimal nitrogen rate of corn: a comparison. *Agronomy Journal* **86**, 191–195.
- Burns I. G., 2006. Assessing N fertilizer requirements and the reliability of different recommendation systems. *Acta horticulturae* **700**, 35–48.
- Cerrato M. E. & Blackmer A. M., 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen-fertilizer. *Agronomy Journal* **82** (1), 138–143.
- COMIFER, 2013. Calcul de la fertilisation azotée. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. COMIFER, Groupe Azote. 159 S.
- Favre G. & Charles R., 2006. Gestion de la fumure azotée en grandes cultures de 1992 à 2004. Agridea. 54 p.
- Godard C., 2005. Modélisation de la réponse à l'azote du rendement des grandes cultures et intégration dans un modèle économique d'offre agricole à l'échelle européenne: application à l'évaluation des impacts du changement climatique. Thèse de doctorat. Institut National Agronomique Paris Grignon. 278 S.
- Hernandez J. A & Mulla D. J., 2008. Estimating uncertainty of economically optimum fertilizer rates. *Agronomy Journal* **100** (5), 1221–1229.
- Pilet F. & Frei C., 2012. Mémento agricole 2013. Agridea. 240 S.
- Richner W., Flisch R., Sinaj S & Charles R., 2010. Ableitung der Stickstoffdüngungsnormen von Ackerkulturen. *Agrarforschung Schweiz* **1** (11–12), 410–415.
- Ryser J. P., Charles J. P., Chauvin B., Degallier J., Dougoud R., Felber R., Maillard A., Rossier D., Thöni E. & Vullioud P., 1987. Directives de fumure pour les grandes cultures et les herbages en Suisse romande. *Revue suisse d'Agriculture* **19** (6), 297–318.
- Ryser J.P., Walther U. und Menzi H. 1994. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. *Agrarforschung Schweiz* **1** (07), 1–40.
- Sinaj S., Richner W., Flisch R. & Charles R., 2009. GRUDAF 2009 – Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau. *Agrarforschung Schweiz* **16** (2), 1–100
- Walther U., Weisskopf P. & Jaggli F., 1998. Schätzung der optimalen N-Düngung zu Wintergetreide? *Agrarforschung Schweiz* **5**, 185–188.