



8/ Düngung von Ackerkulturen

Sokrat Sinaj¹, Raphaël Charles¹, Alice Baux¹, Brice Dupuis¹,
Jürg Hiltbrunner², Lilia Levy¹, Didier Pellet¹, Guillaume Blanchet¹ und
Bernard Jeangros¹

¹ Agroscope, 1260 Nyon, Schweiz

² Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz

Auskünfte: sokrat.sinaj@agroscope.admin.ch

Inhalt

1. Einleitung	8/3
2. Allgemeine Eigenschaften und Nährstoffbedarf	8/3
2.1 Getreide	8/3
2.2 Kartoffeln	8/5
2.3 Ölpflanzen (Raps und Sonnenblumen)	8/7
2.4 Eiweisspflanzen	8/9
2.5 Mais	8/10
2.6 Zuckerrübe	8/12
2.7 Anbausysteme und Zwischenkulturen	8/13
3. Düngungsnormen	8/16
3.1 Stickstoffdüngung	8/16
3.2 Phosphor-, Kalium- und Magnesiumdüngung	8/28
3.3 Schwefel	8/29
3.4 Bor, Mangan und andere Spurenelemente	8/30
4. Ernterückstände	8/32
5. Düngung in der Praxis	8/32
5.1 Düngungsplan	8/32
5.2 Wahl der Dünger	8/32
5.3 Zeitpunkt und Aufteilung der Düngergaben	8/34
5.4 Ausbringungstechnik	8/37
5.5 Möglichkeiten zur Optimierung oder Reduktion der Stickstoffdüngung	8/37
5.6 Möglichkeiten zur Vereinfachung der Düngung mit P, K und Mg	8/37
6. Literatur	8/38
7. Tabellenverzeichnis	8/41
8. Abbildungsverzeichnis	8/42
9. Anhang	8/43

Vorderseite: Einfluss der Stickstoffdüngung auf das Wachstum von Weizen in einem Langzeitversuch in Changins (Foto: Carole Parodi, Agroscope).

1. Einleitung

Für eine ausgewogene Düngung der Ackerkulturen müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden: der Nährstoffbedarf der Pflanzen, die Verfügbarkeit der Nährstoffe im Boden, die Rückführung von Nährstoffen durch Ernterückstände, die Mengen und chemischen Formen der durch Mineraldünger und Hofdünger eingetragenen Nährstoffe, das Verhalten der Nährstoffe im System Boden – Pflanze – Umwelt (Luft, Wasser) sowie die Wirtschaftlichkeit der Kultur.

Die verschiedenen Methoden und Ansätze der Düngung von Ackerkulturen verfolgen das Ziel, diese Kulturen mit ausreichenden Mengen an Nährstoffen zu versorgen, damit die Verfügbarkeit der Nährstoffe nicht zum limitierenden Faktor für die Entwicklung der Kultur wird. Die Düngung ist dabei nur einer von zahlreichen Faktoren, die zum Erfolg einer Kultur beitragen: Die Sortenwahl, die klimatischen Bedingungen (Niederschläge, Temperatur), Befallsdruck durch Krankheiten und Schädlinge usw. spielen ebenfalls eine Rolle.

Das vorliegende Modul stellt der Landwirtschaft aktuelles Wissen zu folgenden Punkten zur Verfügung: (i) Besonderheiten der einzelnen Ackerkulturen im Hinblick auf die Düngung (Physiologie der Nährstoffaufnahme, Anforderungen an die Fruchtbarkeit des Bodens und an die Umwelt, Anforderungen an die Qualität der Ernte usw.), (ii) Nährstoffbedarf der verschiedenen Kulturen, (iii) Methoden zum Abschätzen einer geeigneten Düngung und zur Bestimmung der Düngungsnormen für die einzelnen Kulturen oder Gruppen von Kulturen sowie (iv) die Düngung in der Praxis.

Diese Informationen konnten im Vergleich zur Vorgängerversion «Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF)» (Flich et al. 2009) aufgrund der in den letzten sieben Jahren von Agroscope durchgeführten Arbeiten aktualisiert werden.



Phacelia (Foto: Agroscope).

2. Allgemeine Eigenschaften und Nährstoffbedarf



Weizen (Foto: Agroscope).

2.1 Getreide

2.1.1 Allgemeine Eigenschaften

2015 wurden in der Schweiz 128 135 ha Getreide angebaut, davon 75 248 ha Brotweizen, 8 182 ha Futterweizen, 28 182 ha Gerste, 8 447 ha Triticale, 1 974 ha Roggen, 1 633 ha Hafer sowie 4 146 ha Dinkel und weitere Brotgetreide (swiss granum 2015).

Wintergetreide wird zwischen Ende September (beispielsweise Gerste) und Ende Oktober (Weizen oder Triticale) ausgesät. Getreide kann auch später gesät werden, dann nimmt aber die Bestockung und damit das Kornertragspotenzial ab. Die Ernte erfolgt je nach Getreideart und Umweltbedingungen zwischen Ende Juni und Mitte August.

Weizen und Dinkel entwickeln sich gut auf mittelschweren bis schweren Böden mit neutralem pH, während Triticale auch in Randgebieten angebaut werden kann (Vulliod 2005). Roggen kommt mit leichten, kargen Böden mit saurem pH zurecht, Gerste gedeiht nicht gut auf sauren Böden und zieht gut durchlüftete Böden vor. Hafer verfügt über ein leistungsfähiges Wurzelsystem und toleriert saure Böden mit schlechter Struktur solange genügend Wasser vorhanden ist.

Schwierigkeiten bei der Bodenbearbeitung und Saat können eine ungenügende Wurzelentwicklung zur Folge haben, durch die das Wachstum aufgrund einer mangelhaften Aufnahme von Wasser oder Nährstoffen begrenzt wird. Eine Bodenverdichtung oder unzureichende Behandlung von Wurzelkrankheiten wie Schwarzbeinigkeit können ebenfalls zu einer schlechten Wurzelentwicklung führen. Aber auch in diesen Fällen ist der Ertrag von weiteren Faktoren wie den Niederschlägen abhängig (Lucas et al. 2000).

2.1.2 Nährstoffbedarf

Getreide hat einen ziemlich hohen Bedarf an Stickstoff (N), aber keine hohen Ansprüche an die Versorgung mit Phosphor (P) und Kalium (K). Der Schwefel(S)-Bedarf ist zwar nicht hoch, in Risikosituationen (auf leichten Böden mit geringem Wasserrückhaltevermögen oder bei bedeutenden Niederschlägen im Winter) wird eine Düngung in Form von Sulfat empfohlen (UNIFA 2015). Diese Düngung kann mit einer N-Gabe verbunden werden.

In Abbildung 1 ist die Aufnahme der Nährstoffe (N, P, K, S) während des Wachstums des Weizens dargestellt. Die Dynamik der Aufnahme ist je nach Nährstoff unterschiedlich: Die Aufnahme von Kalium, das in

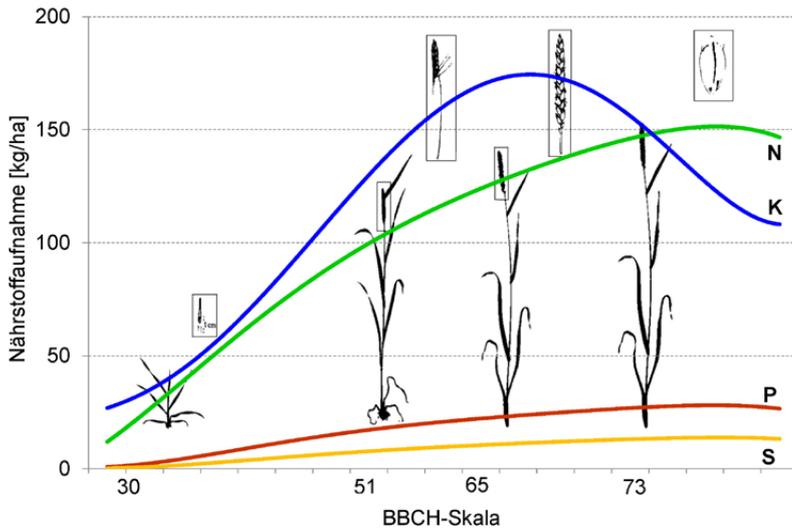


Abbildung 1 | Aufnahme von Nährstoffen (N, P, K und S) durch die Weizenkultur (ganze Pflanze) auf der Grundlage eines Ertrags von 60 dt/ha (SCPA 1995) und in Abhängigkeit des physiologischen Entwicklungsstadiums der Pflanze (BBCH-Skala nach Hack 1993).

grossen Mengen in den Blättern vorkommt, nimmt früh zu und verlangsamt sich dann während der Kornfüllung und Kornreife. N, P und S werden dagegen über das gesamte Wachstum regelmässig aufgenommen. P und N werden während der Kornfüllung in die Körner transportiert, wohingegen K weitgehend in den Blättern verbleibt (Schvartz *et al.* 2005). Bei Gerste variiert der Nährstoffgehalt in den Körnern und im Stroh stark, je nach Umweltbedingungen und je nach Sortentyp (zwei- oder sechszeilig; Charles *et al.* 2012). Die K-Konzentration ist im Stroh drei Mal höher als in den Körnern.

2.1.3 Stickstoffdüngung und Kornertrag

Der Kornertrag von Getreide wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Die N-Düngung spielt dabei eine wichtige Rolle (Levy und Brabant 2016; Charles *et al.* 2012; Levy und Schwaerzel 2009; Levy *et al.* 2007; Levy *et al.* 2009). Vielfach erhöht die N-Düngung den Kornertrag. Wenn die optimale Düngungsmenge allerdings überschritten wird, nimmt der Einfluss der N-Düngung auf den Kornertrag ab (Levy und Brabant 2016; Levy und Schwaerzel 2009).

2.1.4 Düngung und Erntequalität

Getreide wird in unterschiedlichen Bereichen verwendet. Der grösste Teil der Produktion wird für die Brotherstellung (Weizen, Roggen, Dinkel) und für Futter (Triticale, Gerste, Futterweizen, Hafer) eingesetzt. Ein geringer Teil fliesst in die Herstellung anderer Produkte wie Biskuits, Flocken, Suppen usw. In der Schweiz werden die Sorten nach ihrer Eignung für die Brotherstellung in Klassen eingeteilt und für verschiedene Anwendungsgebiete empfohlen. Für Weizen der Klasse Top (qualitativ hochstehende Sorten für die Brotherstellung) wurde kürzlich von der Branche ein System zur Bezahlung der Ernte nach ihrem Proteingehalt eingerichtet (Sonderegger und Scheuner 2014). Die Qualitätsanforderungen für die Weiterverarbeitung hängen vom Verwendungszweck ab.

2.1.4.1 Einfluss der N-Düngung auf die Qualität von Brotweizen

Ein Drittel der Variabilität des Eiweissgehalts von Weizen ist auf die Sortenwahl zurückzuführen (Levy und Brabant 2016). Die N-Düngung übt einen ähnlich grossen Einfluss auf den Proteingehalt aus. Der Unterschied zwischen Situationen mit N-Mangel (0 kg N/ha) und Situationen mit einer N-Gabe nahe der Düngungsnorm (140 kg N/ha) ist beim Proteingehalt ausgeprägter als beim Ertrag (Levy und Brabant 2016).

Tabelle 1 | Einfluss der Stickstoffdüngung auf die Eigenschaften von Weizen, welche die Qualität beeinflussen.

Eigenschaft	Wirkung der Stickstoffdüngung	Wirkung der Eigenschaft auf die Qualität		
		Brotweizen	Biskuitweizen	Futterweizen
Hektolitergewicht	o/+	o/+	o/+	o/+
Tausendkorngewicht	o	o	o	o
Proteingehalt	+	+	-	+
Zelenywert ¹	+	+	-	o
Kornhärte	+	+	-	o
Wasseraufnahme des Mehls	o/+	o/+	o/-	o
Stabilität des Teiges	+	+	-	o
Konsistenzverlust des Teiges	+	+	-	o
Zähigkeit des Teigs	+	+	-	o
Zähigkeit/Dehnbarkeit des Teigs	+	+	+	o
Maximale Verkleisterung	+	o/+	o	o

o kein Einfluss; + positiver Einfluss; - negativer Einfluss.

¹ Zelenywert: Masseinheit für die Eiweissqualität, d. h. die Quellfähigkeit des Eiweisses.

Selbst wenn die N-Düngung den Proteingehalt erhöht, bedeutet ein höherer Gehalt nicht zwingend eine bessere Backqualität (Brabant und Levy 2016). Eine höhere N-Düngung geht mit einer Veränderung der Proteinzusammensetzung einher: Der Feuchtglutengehalt wird erhöht, während der Glutenindex (Indikator für die Gluten-Qualität) sinkt (Brabant und Levy 2016). Der Zelenywert wiederum steigt mit einer Aufteilung der Düngung in drei Gaben, reagiert aber nicht mehr auf eine Intensivierung. Das Hektolitergewicht wird in erster Linie durch die Sorte bestimmt, eine höhere N-Düngung kann dieses Kriterium jedoch positiv beeinflussen (Levy *et al.* 2007; Levy und Brabant 2016).

2.1.4.2 Einfluss der N-Düngung auf die Qualität von Biskuitweizen

Die Anforderungen, die von der Biskuitbranche an die Mehlqualität gestellt werden, sind sehr unterschiedlich und oft gerade gegensätzlich zu den Anforderungen für die Brotherstellung. Die Biskuitbranche verlangt Weizen mit geringem Proteingehalt und geringer Wasseraufnahmefähigkeit sowie einer hohen Dehnbarkeit und einem schwachen Dehnwiderstand des Teigs. Diese Parameter werden nicht nur durch die Sorte, sondern auch durch die N-Düngung beeinflusst (Tabelle 1).

2.1.4.3 Einfluss der N-Düngung auf die Qualität von Futtergetreiden

Verschiedene Getreidearten werden zur Verwendung als Futtermittel angebaut, namentlich Gerste und Triticale. Seit der Liberalisierung des Getreidemarktes 2001 wurde deklassierter Brotweizen durch Futterweizensorten mit hohen Erträgen aber tiefem Proteingehalt ersetzt. Gegenwärtig erfolgt die Einschätzung der Qualität von Futtergetreiden hauptsächlich aufgrund des Hektolitergewichts, ein leicht messbares, aber wenig zuverlässiges Kriterium (Tabelle 1). Das Hektolitergewicht wird nur geringfügig durch die N-Düngung beeinflusst (Charles *et al.* 2012). Weitere Kriterien, die für spezifische Anwendungen relevant sind, spielen ebenfalls eine wichtige Rolle (Gehalt an Proteinen, Lysin, Fettsäuren usw.). Der bei Wintergerstensorten konsequent angegebene Pufa-Mufa-Index (PMI) (Courvoisier *et al.* 2015) ist bei Gerste höher als bei Weizen, aber unabhängig von der N-Ernährung der Pflanze. Ebenso wird auch die Viskosität bei Futtergetreide nicht durch die N-Düngung beeinflusst. Die Viskosität ist für die Fütterung von monogastrischen Tieren wichtig, da sie einen negativen Einfluss unter anderem auf die Nährstoffaufnahme hat (Levy *et al.* 2013).

2.1.5 Düngung und Krankheiten

Mehrere Studien (Neumann *et al.* 2004; Olesen *et al.* 2003; Jordan *et al.* 1989; Smiley und Cook 1973) zeigen, dass nicht nur die Düngermenge, sondern auch der Zeitpunkt und die chemische Form des angewendeten Düngers einen Einfluss auf die Entwicklung von Getreidekrankheiten haben. Bedingungen mit N-Überfluss begünstigen die Entwicklung von Echtem Mehltau (*Blumeria graminis*) und Braunrost (*Puccinia triticina*) und die Massenvermehrung von Läusen auf den Ähren (Charles *et al.* 2011; Mascagni *et al.* 1997; Gash 2012). Andere Krankheiten wie die Ährenfu-

sariose werden weder durch die chemische Form noch durch die Menge des N-Düngers beeinflusst (Krnjaja *et al.* 2015; Lemmens *et al.* 2004). Es ist aber mit Sicherheit keine gute Lösung, die Verfügbarkeit von N oder anderen Nährstoffen zu begrenzen oder die Kultur anderem Stress auszusetzen. Bestimmte Studien (Buschbell und Hoffmann 1992; Olesen *et al.* 2000) zeigen, dass geschwächte Kulturen leichter von Krankheitserregern oder Schädlingen befallen werden.



Kartoffeln (Foto: Agroscope).

2.2 Kartoffeln

2.2.1 Allgemeine Eigenschaften

Kartoffeln werden in der Schweiz auf einer Fläche von 11330 ha angebaut (Swisspatat 2015), davon werden 1500 ha für die Vermehrung eingesetzt. Sorten für den Verzehr machen 60 % der Produktion aus, 40 % fließen in die industrielle Verarbeitung.

Kartoffeln werden normalerweise zwischen Ende März und Anfang Mai gesetzt. Nach dem Setzen braucht es je nach Vorkeimstadium und der Umgebungstemperatur zwei bis drei Wochen, bis die Kartoffelpflanze aus dem Boden austritt. Anschliessend dauert es mehrere Wochen, bis die Pflanzen den Boden vollständig bedecken. Das Wurzelsystem ist sehr oberflächlich und konzentriert sich auf die obersten 30 cm des Bodens. Je nach Sorte bestehen beträchtliche Unterschiede bei der Wurzelmasse, was erklärt, weshalb bestimmte Sorten Nährstoffe besser aufnehmen können (Iwama 2008; Sinaj *et al.* 2014). Diese sortenbedingten Unterschiede sind – unabhängig von Standort, Bodenart, Düngung oder Anbaudichte – ziemlich stabil. Unter günstigen Wachstumsbedingungen, d. h. ohne Wasser- oder Nährstoffmangel, sind die Unterschiede bei der Wurzelmasse vor allem mit der Fröhreife der Sorten verbunden. Spätreife Sorten haben Wurzeln mit grösserem Längenwachstum, die eine höhere Masse erreichen und

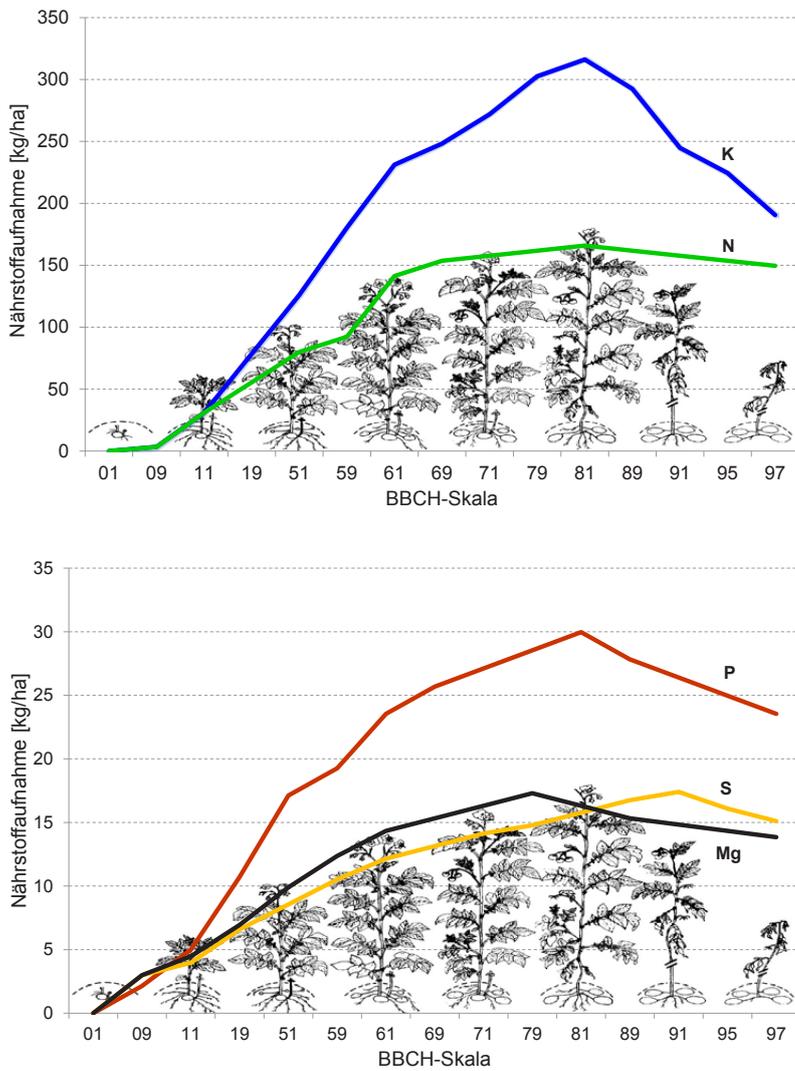


Abbildung 2 | Aufnahme von Nährstoffen (N, P, K, S, Mg) durch die Kartoffelpflanze (Sorte José, Ertrag 45 t/ha; SCPA 1995) in Abhängigkeit des physiologischen Entwicklungsstadiums der Pflanze (BBCH-Skala nach Hack 1993).

tiefer in den Boden eindringen, manchmal bis in eine Tiefe von einem Meter (Iwama 2008). Die Temperatur spielt ebenfalls eine wichtige Rolle für die Entwicklung des Wurzelsystems, wobei rund 20 °C optimal sind (Sattelmacher et al. 1990).

2.2.2 Nährstoffbedarf

Die Kartoffelpflanze braucht viel N, aber auch viel P und K (Abbildung 2). Man schätzt, dass pro Tonne geernteter Knollen Nährstoffe im Umfang von 0,45–0,90 kg P und 3,5–5,0 kg K exportiert werden. Die Pflanze reagiert auch empfindlich auf einen Mangel an Mangan (Mn) und Bor (B).

Im Allgemeinen begünstigen hohe N-Gaben eine starke Entwicklung des Blattwerks und verlängern die Vegetationsperiode, während eine moderate N-Düngung die Alterung der Pflanze beschleunigt und den Trockensubstanzgehalt der Knollen (hauptsächlich Stärke) erhöht (Westermann und Kleinkopf 1985; Cao und Tibbitts 1998).

P ist ein essenzielles Element für Kartoffeln. Ein Verzicht auf eine P-Düngung ist gerechtfertigt, wenn die Bodenanalyse zeigt, dass ausreichende P-Reserven vorliegen. Es ist jedoch Vorsicht angebracht, weil ein P-Mangel zu Ertragsausfällen von bis zu 10 % führen kann (Ryckmans 2009). Der maximale Ertrag wird erreicht, wenn für die Pflanze zu Beginn ihres Vegetationszyklus und während des gesamten Wachstums der Knollen genügend P verfügbar ist. Die P-Aufnahme steigt während der Anfangsphase der Knollenbildung schnell, bleibt dann während des Wachstums der Knollen stabil und kommt schliesslich zum Erliegen, wenn die Alterung der Pflanzen einsetzt (Abbildung 2; Ryckmans 2009; Tindall et al. 1993).

Die Kartoffel gehört zu den Kulturen mit den höchsten Ansprüchen an die K-Versorgung. Ein Verzicht auf die K-Düngung wird nicht empfohlen, da es zu Ernteverlusten von bis zu 40 % führen kann, wenn der Boden nicht gut mit K versorgt ist (Allison et al. 2001b). Der Trockensubstanzgehalt (hauptsächlich Stärke) der Knollen nimmt ab, wenn reichlich mit K gedüngt wird, wobei die Wirkung ausgeprägter ist, wenn K als Kaliumchlorid und nicht in Form von Kaliumsulfat vorliegt (Allison et al. 2001b). Das Maximum der K-Aufnahme liegt im Zeitraum des Knollenwachstums, am Ende der Blüte der Pflanze (Kolbe und Stephan-Beckmann 1997; SCPA 1995; Abbildung 2). Sorten mit ausgeprägter Wurzelentwicklung nehmen mehr K auf (Karam et al. 2009; Trehan und Sharma 2002).

Tabelle 2 | Einfluss der Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumdüngung auf die Qualität von Kartoffelknollen.

Eigenschaft	N	P	K
Marktfähigkeit der Knollen (Kaliber)	+	o	+
Schlagempfindlichkeit und Blaufleckigkeit	–	+	+
Stärkegehalt	–	+	o/+
Trockensubstanzgehalt	–	o	o/+
Schwarzfleckigkeit	–	o	+
Braunverfärbung beim Frittieren (Stärkegehalt)	–	o	o/+
Schwarzverfärbung nach dem Kochen	o/–	o/+	o/+
Gewichtsverlust bei der Lagerung	o	o	o

o kein Einfluss; + positiver Einfluss; – negativer Einfluss.

Magnesium (Mg) wird im Zusammenhang mit der Photosynthese und dem N- und P-Metabolismus benötigt und ist für die Pflanzen überlebenswichtig (Colomb 1992). Über den gesamten Vegetationszyklus wird der grösste Teil des von der Pflanze benötigten Mg aus dem Boden aufgenommen. Bei Böden mit Mg-Unterversorgung ist der relative Zuwachs des Ertrags bei einer Mg-Düngung mässig und selten grösser als 15 % (Allison *et al.* 2001a; Colomb 1992). In mehreren Studien wurde festgestellt, dass eine Intensivierung der K-Düngung mit einem Rückgang der Mg-Konzentration in Blattstielen und Knollen verbunden war (induzierter Mangel). Es gibt jedoch keine wissenschaftlichen Beweise dafür, dass diese Konkurrenz zwischen K und Mg einen Einfluss auf den Ertrag hat.

Der Bedarf an S ist gering (Abbildung 2) und die Wachstumsphase der Pflanze fällt mit der Phase der intensivsten Mineralisierung von organischem S im Boden zusammen, wodurch der Boden den grössten Teil des S-Bedarfs der Pflanzen zu decken vermag (Cohan 2014; Fritsch 2003).

2.2.3 Düngung und Erntequalität

Die N-Düngung gehört zu den Faktoren, welche die Qualität der Kartoffelernte entscheidend beeinflussen (Tabelle 2; Reust *et al.* 2006). Sie muss auf die Bodenart, auf die organische Düngung, die klimatischen Bedingungen und die vorgesehene Verwendung der Kartoffeln abgestimmt werden. Weil die Aufteilung der N-Düngung (Tabelle 26) die Qualität der Knollen beeinflusst, ist es ratsam, den Zeitpunkt für die letzte N-Gabe vor die Knollenbildung zu legen. Eine übermässige N-Düngung verlängert die Vegetationsperiode, wobei die Alterung der Pflanzen und die Reifung der Knollen verzögert werden. Die Knollenschale bleibt dadurch verletzlich, was die Knollen gegenüber mechanischen Schäden bei der Ernte anfällig macht und die Lagerungsfähigkeit beeinträchtigt (beschleunigtes Welken).

Auch die P- und K-Düngung beeinflussen die Knollenqualität (Tabelle 2). Eine lokale P-Gabe bei der Pflanzung beschleunigt die Entwicklung der Kartoffel.

2.2.4 Düngung und Krankheiten

Ein N-Überschuss begünstigt die Entwicklung der Kraut- und Knollenfäule, wenn der Druck des Erregers gross ist. Das hohe N-Angebot sorgt für üppiges Wachstum der Blätter, die viel Feuchtigkeit enthalten, was die Entwicklung des Falschen Mehltaus begünstigt. Ausserdem erreichen Fungizide die tieferen Blattschichten schlechter, die damit nicht vor Infektionen geschützt sind (Agu 2006; Kolbe und Stephan-Beckmann 1997).

In sehr kalkreichen Böden besteht ein beträchtliches Risiko für die Entwicklung von Gewöhnlichem Schorf. Dieses Risiko lässt sich durch den Einsatz von Düngern wie Ammoniumsulfat und/oder Kaliumsulfat reduzieren, die eine ansäuernde Wirkung aufweisen (Colin und Goffart 1998; Pavlista 2005).

Vom Einsatz strohreicher organischer Dünger wird bei Kartoffelkulturen wegen des Risikos der Entwicklung von *Rhizoctonia* und Gewöhnlichem Schorf abgeraten.



Raps (Foto: Agroscope).

2.3 Ölpflanzen (Raps und Sonnenblumen)

2.3.1 Allgemeine Eigenschaften

Winterraps ist mit einer Anbaufläche von rund 23 000 ha die wichtigste Ölpflanzenkultur in der Schweiz. Die seit Mitte der 1990er-Jahre in der Schweiz angebaute Sonnenblume bedeckt heute dank der Züchtung leistungsfähiger frühreifer Hybridsorten eine Fläche von rund 3500 ha. Diese beiden Kulturen sind sehr unterschiedlich, was ihre Rolle in der Fruchtfolge und ihren Nährstoffbedarf betrifft.

Der zwischen Ende August und Anfang September ausgesäte Raps kann im Herbst grosse N-Mengen aufnehmen. Er verwertet dabei nicht nur aus organischen Einträgen stammenden N, sondern tritt in diesem Zeitraum auch als Senke für Nitrat auf. Raps nimmt N bis zur Blüte auf, danach werden die in Blättern und Stängeln enthaltenen Reserven für die Proteinbildung in den Körner mobilisiert. Diese einjährige Kultur bedeckt den Boden über einen sehr langen Zeitraum (zehn bis elf Monate), da die Ernte im Allgemeinen im Juli erfolgt. Raps besitzt eine Pfahlwurzel, deren Entwicklung durch verdichtete Bereiche und eine Pflugsohle gestört wird.

Die Sonnenblume ist eine Sommerkultur mit schneller vegetativer Entwicklung, die ziemlich tolerant gegenüber Trockenstress ist und traditionell in warmen Regionen angebaut wird. Sie reagiert weniger empfindlich auf tiefe Temperaturen als Mais und kann ab April und damit etwas früher ausgesät werden. Während den ersten Tagen nach dem Auflaufen hat die Entwicklung des Wurzelsystems gegenüber den oberirdischen Pflanzenteilen Vorrang. Der Lebenszyklus dauert rund 130 bis 150 Tage. Die Sonnen-

blume entwickelt eine Pfahlwurzel, die sehr empfindlich gegenüber strukturellen Störungen in der gepflügten Bodenschicht reagiert, und ein ausgedehntes System sekundärer Wurzeln. Wenn die Wurzel nicht auf Hindernisse trifft, kann sie den Boden bis in eine Tiefe von 2 m nutzen, was ihr eine gewisse Unabhängigkeit von der Nährstoffversorgung und eine gute Toleranz gegenüber Trockenstress verleiht.

2.3.2 Nährstoffbedarf

Der N-Bedarf von Raps ist hoch (Abbildung 3). Rapskulturen können im Herbst bedeutende N-Mengen aufnehmen. Ein Teil dieses N bleibt aufgrund des Abfallens von Blättern im Winter nicht in der Pflanze, kann aber teilweise im Frühling wieder aufgenommen werden. Durch die Düngung im Frühling soll der im Herbst dem Boden entnommene N ergänzt werden. Entsprechend kann der N-Bedarf je nach der Menge, die von der Pflanze Ende Winter bereits aufgenommen wurde, stark variieren. «Terres Inovia» (Frankreich) hat ein System zur Berechnung der erforderlichen N-Düngung entwickelt, das den Zustand des Pflanzenbestands berücksichtigt und somit eine Reduktion der N-Gaben bei hoch gewachsenem Raps ohne Ertragseinbußen ermöglicht (Lagarde und Champolivier 2006). Es werden zwei N-Gaben ab Vegetationsbeginn empfohlen. Abgesehen von wenigen Ausnahmen wird von einer Düngung im Herbst entschieden abgeraten, da ein zu schnelles Wachstum vor dem Winter nicht erwünscht ist und zum Schossen führen kann. Eine Ausnahme bildet zum Beispiel die N-Düngung nach dem Einarbeiten von Stroh einer Getreidekultur.

Raps gehört zu den Kulturen mit hohen Ansprüchen an die P-Versorgung über den gesamten Vegetationszyklus (Abbildung 3), kann aber

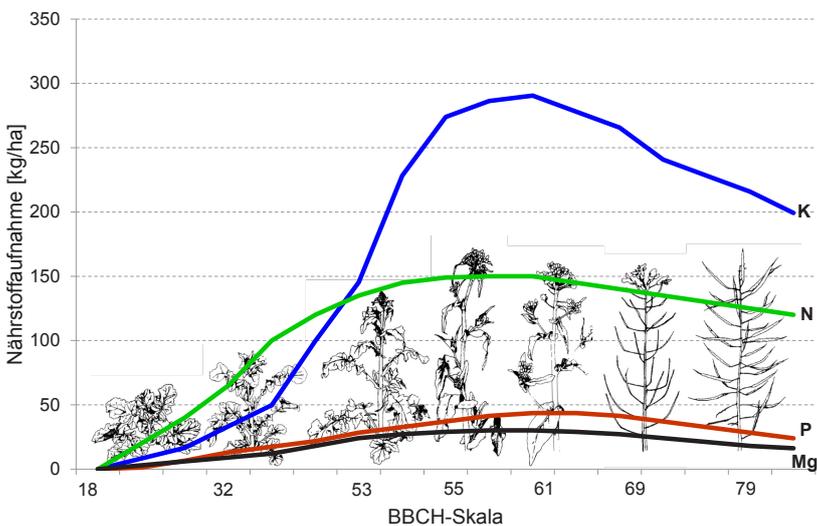


Abbildung 3 | Aufnahme von Nährstoffen (N, P, K, Mg) durch die Rapskultur in Abhängigkeit des physiologischen Entwicklungsstadiums der Pflanze (BBCH-Skala nach Hack 1993).

die Reserven des Bodens nur schwer mobilisieren. Aus diesem Grund kann es zu einem P-Mangel kommen, wenn auf die Düngung verzichtet wird.

K ist für Raps ein essenzielles Element (Abbildung 3). Die Kultur nimmt bedeutende Mengen auf, die mehrheitlich in den Stängeln und Blättern in löslicher Form gelagert werden und bei der Zersetzung der Ernterückstände für die nachfolgende Kultur freigesetzt werden.

Im Frühling weist Raps einen hohen S-Bedarf auf. Wenn dieser Bedarf nicht durch die Mineralisierung von organischem S des Bodens gedeckt werden kann (je nach Bodenart und klimatischen Bedingungen), ist eine S-Düngung am Winterende in Form von Sulfaten unerlässlich, um einen Mangel zu vermeiden, der beträchtliche Ertragseinbußen zur Folge haben kann. Wenn regelmässig organische Substanz zugeführt wird, ist jedoch das Risiko eines Mangels geringer und eine S-Düngung kann überflüssig sein.

Der N-Bedarf von Sonnenblumenkulturen ist mässig und kann aufgrund der gut ausgebildeten Wurzeln zu einem grossen Teil durch die N-Aufnahme in tiefen Bodenschichten gedeckt werden. Der Bedarf wird auf rund 45 kg N pro Tonne geschätzt. Die N-Düngung erfolgt bei der Saat. Eine übermässige Düngung der Sonnenblume ist nicht erwünscht, da sie die Entwicklung von Krankheiten begünstigt, die Reifung verzögert und zu einer Verminderung des Ölgehalts führen kann. Es ist manchmal möglich, auf eine N-Düngung ganz zu verzichten (siehe Kapitel 3.1.3).

Die Sonnenblume hat einen mässigen K-Bedarf und geringe Anforderungen an die P-Versorgung. Ein Mangel kann jedoch das Wachstum verlangsamen und den Ertrag beeinträchtigen. Zu einer Unterversorgung kann es kommen, wenn der Boden arm an diesen Nährstoffen oder das Wurzelwerk ungenügend ausgebildet ist.

2.3.3 Düngung und Erntequalität

Der Ölgehalt und der Gehalt an Glukosinolat beim Raps sind zwei wichtige Qualitätsmerkmale, die durch die Düngung beeinflusst werden können. Nebst der Düngung wird der Ölgehalt von anderen Faktoren wie der Sorte oder den Umweltbedingungen bestimmt. Der Ölgehalt wird bei der Festlegung des Produktpreises in der Schweiz gegenwärtig nicht berücksichtigt.

Tabelle 3 | Einfluss der Stickstoff- und Schwefeldüngung auf den Ölgehalt und den Glukosinolatgehalt bei Raps.

Düngung	Ölgehalt	Glukosinolatgehalt
N-Düngung	–	o
S-Düngung (Risiko für Mangel mittel/hoch)	+	+
S-Düngung (Risiko für Mangel gering)	o	+

o kein Einfluss; + Zunahme; – Abnahme.

2.3.3.1 Einfluss der N- und S-Düngung auf den Ölgehalt

Mit steigender N-Düngung nimmt der Rapserttrag bis zum optimalen N-Angebot zu, während der Ölgehalt mit zunehmender N-Düngung abnimmt (Tabelle 3). Der Ölertrag nimmt also nur bis zu einer optimalen N-Düngung zu, die unter der optimalen Düngermenge für den Kornertrag liegt. Der Ölgehalt nimmt um 0,3 bis 1,2 Prozentpunkte pro 40 kg N/ha über dem optimalen N-Angebot ab (Champolivier und Reau 2005). Bei der Sonnenblume lässt sich ein ähnliches Verhalten beobachten.

Die S-Düngung von Raps kann bei mässigem S-Mangel einen positiven Einfluss auf den Ölgehalt in den Rapskörnern haben. Bei geringem Risiko einer Unterversorgung (keine Empfehlung einer S-Düngung) hat eine S-Gabe keine Auswirkung auf den Ölgehalt (Pellet *et al.* 2003a).

2.3.3.2 Einfluss der S-Düngung auf den Glukosinolatgehalt

Glukosinolate sind S-Verbindungen, welche die Qualität des Rapspresskuchens für die Fütterung von Monogastriern (Schweine und Geflügel) vermindern. Als Höchstwert in den Samen gilt in der Schweiz ein Glukosinolatgehalt von 20 µmol/g. Beim Glukosinolatgehalt sind grosse Sortenunterschiede bekannt, doch er wird auch durch die Verfügbarkeit des S im Boden bestimmt. Bei einer Reihe von Versuchen auf Böden mit kleinem und mittlerem Risiko von S-Mangel konnte eine starke Zunahme des Glukosinolatgehalts in Abhängigkeit der S-Düngung festgestellt werden (Tabelle 3). Dieser Effekt war in Situationen, die eine S-Düngung erforderten, besonders ausgeprägt (Pellet *et al.* 2003a). Eine zu hohe S-Düngung sollte deshalb vermieden werden.

2.3.4 Düngung und Krankheiten

Söchting und Verreet (2004) haben festgestellt, dass eine hohe N-Düngung bei Raps die Entwicklung von Rapskrebs begünstigt, aber keinen Einfluss auf die Wurzelhals- und Stängelfäule hat. Im Gegensatz dazu zeigten Aubertot *et al.* (2003), dass eine hohe N-Verfügbarkeit im Herbst die Entwicklung der Wurzelhals- und Stängelfäule fördert.

Dank ihrer tiefreichenden Wurzeln kann die Sonnenblume die N-Reserven tiefer Bodenschichten nutzen, mit denen sie einen Grossteil ihres Bedarfs zu decken vermag. Eine zu starke Düngung führt zu einer üppigen Entwicklung des Blattwerks, wodurch sich das Risiko einer beeinträchtigten Standfestigkeit und von Krankheiten erhöht. Debaeke und Estragnat (2003) haben gezeigt, dass bei niedrigem Krankheitsdruck die Intensivierung der N-Düngung zu einem Anstieg der mit *Phomopsis* befallenen Stängel führte. Im Gegensatz dazu begünstigte ein N-Mangel bei höherem Krankheitsdruck und günstigen Feuchtigkeitsbedingungen die Krankheitsentwicklung. Diese wird durch einen dichten Bestand zusätzlich gefördert. Im Gegensatz zur Wurzelhalsfäule wird die Stängelfäule durch die N-Verfügbarkeit positiv beeinflusst (Debaeke und Perez 2003). Schliesslich wird Rapskrebs (*Sclerotinia*), der hauptsächlich

durch ungünstige Witterungsbedingungen und Bewässerung gefördert wird, nur teilweise durch die N-Düngung beeinflusst (Mestries *et al.* 2011).



Schoten von Eiweisserbsen (Foto: Agroscope).

2.4 Eiweisspflanzen

2.4.1 Allgemeine Eigenschaften

Eiweisserbse, Sojabohne, Ackerbohne und Lupine sind die wichtigsten in der Schweiz angebaute Eiweisspflanzen. Die Eiweisserbse nimmt dabei mit rund 3700 ha die Spitzenposition ein. Ackerbohne (465 ha) und Lupine (80 ha) sind weit weniger wichtig. Die wegen des Öls und der Proteine angebaute Sojabohne bedeckt eine Fläche von etwa 1400 ha. Alle diese Kulturen können mit Hilfe von Knöllchenbakterien N aus der Luft fixieren. Die Kulturen lassen sich aufgrund der Struktur ihres Wurzelsystems unterscheiden. Die Eiweisserbse hat eine Pfahlwurzel mit wenig entwickelten Sekundär- und Tertiärwurzeln, an denen sich die Wurzelknöllchen bilden. Aus diesem Grund reagiert diese Kultur empfindlich auf eine schlechte Bodenstruktur oder Verdichtungen. Die Lupine und die Ackerbohne besitzen starke Pfahlwurzeln, die eine Rolle für die Struktur- bildung des Bodens spielen. Die Lupine verfügt über die Fähigkeit, den pH in der Rhizosphäre (um bis zu zwei Einheiten) zu verändern, wodurch sie sich sonst nicht verfügbare Formen von Nährstoffen (P, K, Zn usw.) zugänglich machen kann. Die Sojabohne hat ebenfalls eine Pfahlwurzel, mit der sie den Boden durchdringen kann. Normalerweise beschränkt sie ihr Wachstum aber auf die gepflügten Bodenschichten. Mit vier Reihen von Sekundärwurzeln, die ihrerseits zahlreiche Verästelungen tragen, konzentriert sich die Wurzelmasse der Sojabohne grösstenteils auf die obersten 15–20 cm des Bodens.

Bei den Eiweisserbsen lassen sich zwei Sortengruppen unterscheiden: Wintereiweisserbsen, die Mitte Oktober ausgesät und Anfang Juli geerntet werden, und Sommereiweisserbsen, die etwas kälteempfindlicher sind und im

Februar gesät und im Juli geerntet werden. Die Sojabohne ist eine Sommerkultur, die in einen erwärmten Boden (im Mai) gesät und im Herbst geerntet wird.

2.4.2 Nährstoffbedarf

Eiweisserbse, Lupine, Ackerbohne und Sojabohne benötigen wie alle Eiweisspflanzen keine N-Düngung. Beim Anbau von Lupine und Sojabohne ist eine Inokulation mit den spezifischen Knöllchenbakterien (*Rhizobium*) notwendig. Bei einem regelmässigen Anbau auf einer Parzelle können sich die Bakterien von einer Kultur bis zur nächsten halten. Gelegentlich können Eiweisspflanzen Hofdünger erhalten, der sonst keine Verwendung findet. Wie die Eiweisserbse hat auch die Ackerbohne einen mittleren Bedarf an P und K. Lupine und Sojabohne haben einen geringen P-Bedarf und einen mittleren K-Bedarf.

Der Anbau von Leguminosen hat eine günstige Wirkung auf die Bodenfruchtbarkeit. Die Eiweisserbse ist eine hervorragende Vorkultur für Winterkulturen (Raps, Weizen), bei denen sich dadurch N-Einsparungen ergeben. Besonders hohe Einsparungen sind möglich bei Kulturen wie Raps, die Ende Sommer ausgesät werden und im Herbst grosse N-Mengen aufnehmen können (Charles und Vullioud 2001).



Reife Maiskolben (Foto: Agroscope).

2.5 Mais

2.5.1 Allgemeine Eigenschaften

Obwohl Mais weltweit gesehen ein wichtiges Nahrungsmittel für Menschen ist, wird Mais in der Schweiz zum grössten Teil für die Produktion von Tierfutter angebaut. Insgesamt ist der Maisanbau in der Schweiz mit rund 61 000 ha nach Brot- und anderen Futtergetreidearten flächenmässig die zweitwichtigste Ackerkultur. Aufgrund des Verwendungszweckes ist entweder die Ertragsleistung und die Qualität der gesamten Pflanze (Silomais, Grün-

mais) oder aber vorwiegend der Ertrag und die Qualität der Körner (Körnermais) wichtig. Je nach Anteil in der Futterration, dem Verwendungszweck und den anderen verwendeten Komponenten kommt der Qualität des Mais eine unterschiedliche Bedeutung zu.

Das Wurzelsystem der Maispflanze setzt sich aus sehr kräftigen Keimwurzeln und zahlreichen Kronenwurzeln zusammen, die entweder aus den Stängelknoten (Nodien) im unterirdischen Bereich hervorgehen oder als Luft- und Stützwurzeln am zweiten oder dritten oberirdischen Stängelknoten entstehen. Mit zunehmender Wachstumsdauer und Ausbildung der sprossbürtigen Kronenwurzeln verlieren die Keimwurzeln an Bedeutung. Ihre Ausbildung ist häufig sortenspezifisch. Sobald sie in die Erde eindringen, übernehmen sie Wurzelfunktionen. Mais wurzelt in Abhängigkeit von Bodenart und Nährstoffangebot sowohl flach als auch tief. Die seitliche Ausdehnung der Wurzeln reicht bis zu 1 m, ein Teil kann bis in Tiefen von 2,5 m vordringen. Die Entwicklung hängt jedoch auch vom Bodenzustand (Verdichtungen, Mächtigkeit) und der Wasserverfügbarkeit ab. Bis zum 6-Blattstadium wächst der Mais eher langsam, und auch der Nährstoffbedarf ist verhältnismässig gering (Abbildung 4). Dann steigt der Nährstoffbedarf an, ist aber sehr gut mit der Zunahme der Nährstoffverfügbarkeit im Boden (insbesondere des durch die Mineralisierung freigesetzten N) synchronisiert. Da die Wurzeln erst mit zunehmendem Alter der Pflanzen in tiefere Regionen vordringen, kann das Wachstum mit einer entsprechenden Erhöhung der Nährstoffverfügbarkeit (z.B. Unterfussdüngung) in der Jugendentwicklung begünstigt werden – insbesondere im Falle der Nährstoffe, die im Boden wenig mobil sind (P), oder auch in sich langsam erwärmenden Böden. In diesem Zusammenhang kann auch die Begünstigung von nützlichen Bodenmikroorganismen (Mykorrhizapilze) durch die geschickte Wahl der Hauptkulturenabfolge oder die Verwendung geeigneter Zwischenfrüchte einen positiven Effekt auf die Jugendentwicklung von Mais haben. Die Kornbildung erfolgt, nachdem das Wurzelwachstum eingestellt wurde (Arnon 1975).

2.5.2 Boden- und Nährstoffansprüche

Mais hat grundsätzlich geringe Ansprüche an den Boden, wobei sich günstige Bedingungen positiv auf die Leistung auswirken. Der pH liegt idealerweise zwischen 5,3 und 7,0. Beim Maisanbau sind öfter klimatische als bodenbezogene Faktoren limitierend (Holzkämper et al. 2015). Tiefgründige, nicht zu schwere Böden, die gut durchlüftet sind und sich folglich im Frühjahr schnell erwärmen, eignen sich gut. Obwohl sich auch sandige Böden rasch erwärmen und eine rasche Entwicklung der Maispflanzen im Frühjahr ermöglichen, ist das Risiko für Trockenstress und eine nicht optimale Nährstoffversorgung aufgrund des geringeren Wasser- und Nährstoffrückhaltevermögens erhöht. Grundsätzlich ist der Maisanbau auch auf Moorböden möglich, diese Böden begünstigen aber das Auftreten von Früh- und Spätfrösten. In niederschlagsarmen Gebieten sind Böden mit einem hohen Wasserspeichervermögen (Lehm-böden) geeignet. Verdichtete und zu Staunässe neigende Standorte sind für den Maisanbau nicht geeignet. Ebenso

sind zu Verschlammung neigende Böden wenig geeignet, da aufgrund des Anbaus von Mais in Reihenabständen von 75–80 cm das Risiko für Erosion und Verschlammung erhöht ist – insbesondere in Steillagen und Böden mit einer schlecht ausgebildeten Krümelstruktur. Ebenso sind Böden mit einem tiefen Humusgehalt beziehungsweise zu fein bearbeitete Böden risikoreicher.

Mais verwertet Hofdünger sehr gut. Aufgrund seines Bedarfs und seines Wachstumszyklus kann Mais den mineralisierten N im Boden sehr gut nutzen. Unter günstigen Bedingungen und bei ausreichender Wasserversorgung kann die tägliche N-Aufnahme eines Maisbestandes in der Hauptwachstumsphase bis zu 5 kg N/ha betragen (Abbildung 4).

Für eine gute Entwicklung ist die Versorgung mit P in der Jugendphase (Wachstumswochen 4–10) wichtig. Aufgrund des noch wenig entwickelten Wurzelwerks in dieser Zeit kann ein Angebot von leicht verfügbarem P in der Nähe des Samens die Jugendentwicklung begünstigen. Nach der Befruchtung bis zur Abreife ist die P-Aufnahme sehr gross, und die Pflanzenwurzeln nehmen in dieser Zeit rund 63 % des gesamten P-Bedarfs auf (Arnon 1975).

Gut mit K versorgte Maispflanzen weisen einen ökonomischen Wasserverbrauch auf. Dies hat positive Auswirkungen auf ihre Dürre- und Kälteresistenz. K fördert die Kohlenhydratbildung und erhöht die Standfestigkeit sowie die Widerstandskraft gegen Krankheits- und Schädlingsbefall. Der Hauptbedarf liegt zwischen der Ausbildung des sechsten Blattes und dem Ende der Blüte (Abbildung 4). Während dieser Phase werden täglich bis zu 10 kg K/ha aufgenommen.

Der Bedarf für Mg ist bei Mais im Vergleich zu den anderen Nährstoffen gering, und die Zufuhr wird auf viehhaltenden Betrieben grösstenteils über die Gülle sichergestellt. Ansonsten kann der Mg-Bedarf über magnesiumhaltige Kalke, Kieserit oder auch andere Handelsdünger gedeckt werden.

Der S-Bedarf von Mais beträgt ca. 30 kg/ha und wird in der Regel auf Flächen mit regelmässiger Hofdüngerzufuhr über diese gedeckt bzw. kann über die Mineralisation aus dem Bodenvorrat sichergestellt werden. Auf leichten Böden kann der Einsatz von schwefelhaltigen Düngern sinnvoll sein, da S wie N leicht ausgewaschen wird.

Der grösste Anteil des K wird früh aufgenommen. Bereits im Entwicklungsstadium BBCH 19 (Hack 1993) sind rund 80 % der Gesamtmenge in der Biomasse vorhanden, während dies für N erst kurz vor der Blüte (BBCH 59) und für P und Mg erst nach der Blüte (BBCH 80) der Fall ist.

2.5.3 Düngung und Qualität

Die Qualität bei *Silomais* wird zu einem Teil über den Kolben (Stärkegehalt) bestimmt und zu einem weiteren Teil über die Verdaulichkeit der Restpflanze. In diesem Zusammenhang spielt die Bestandesdichte eine zentrale Rolle, da der Kolben bei einer höheren Bestandesdichte weniger stark entwickelt wird als bei geringeren Bestandesdichten. Allgemein kann mit zunehmendem N-Niveau der Anteil an vollständig ausgebildeten Zweitkolben erhöht werden. Dies ist aber nicht in jedem Fall erwünscht, da die unvollständige Ausbildung der Zweitkolben auch den Befall mit Fusarien begünstigen kann. Übermässige Düngung mit N und P ohne gleichzeitige Düngung mit K, beziehungsweise ohne ausreichende Verfügbarkeit von K, kann zudem die Lageranfälligkeit

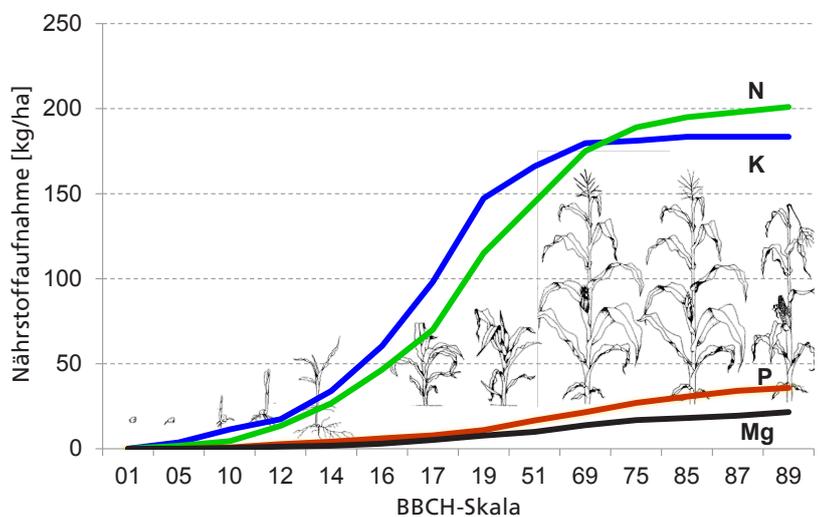


Abbildung 4 | Summe der bis zu einem bestimmten Entwicklungsstadium von Mais aufgenommenen Nährstoffmenge (verändert nach Buchner und Sturm 1985 und UNIFA 2015; BBCH-Skala nach Hack 1993).

Tabelle 4 | Begünstigung verschiedener Maiskrankheiten bei Mangel oder Überschuss von N, K, Mg, und S (Datnoff et al. 2009).

Nährstoffverfügbarkeit	Krankheit/Funktionsstörung	Pathogen
N-Überschuss	Cercospora-Blattflecken	<i>Cercospora zeae-maydis</i>
N-Mangel	Stängelfäule	<i>Gibberella zeae</i> (Schwein.) Petch*; <i>Diplodia maydis</i> (Berk.) Sacc.
N-Mangel	Aflatoxinbildung	<i>Aspergillus-flavus</i> -Gruppe
K-Mangel	<i>Helminthosporium</i> -Blattflecken	<i>Exserohilum turcicum</i>
K-Mangel	Stängelfäule	<i>Fusarium moniliforme</i> ; <i>Gibberella zeae</i> (Schwein.); <i>Diplodia zeae</i> ; <i>Diplodia maydis</i> (Berk.) Sacc.; <i>Fusarium verticilloides</i> (Sacc.) Nirenberg; <i>Colletotrichum graminicola</i> (Ces.) G. W. Wils; <i>Pythium</i> sp.; <i>Fusarium culmorum</i>
Mg-Überschuss	Maydis-Blattflecken	<i>Bipolaris maydis</i>
S-Mangel	Stängelfäule	<i>Pythium aphanidermatum</i> ; <i>Fusarium moniliforme</i> J. Sehd.

* Oder auch bei NH₄-Düngung und tiefem pH-Wert.

erhöhen (Arnon 1975). Dies kann indirekt ebenfalls die Qualität und das Ertragsniveau negativ beeinflussen sowie Folgeprobleme mit Wildschweinen in einer nachfolgend gesäten Kultur verursachen. Mit zunehmender N-Düngung kann der Proteingehalt bei *Körnermais* gesteigert werden (Arnon 1975; Buchner und Sturm 1985). Rund 60 % des für die Kornentwicklung benötigten N wird aus den Blättern, rund 10 % aus den Lieschblättern und 20–25 % aus den Stängeln und weiteren Pflanzenteilen transloziert. Bei einer geringeren Nährstoffaufnahme sind später auch weniger Nährstoffe für den Transfer in den Kolben verfügbar. Dies beeinflusst nicht nur den Gesamtertrag, sondern auch die Qualität negativ. Aufgrund des starken Wachstums um den Zeitpunkt der Blüte kann aber auch mangelnde Wasserverfügbarkeit die Nährstoffaufnahme und damit die Bildung der Biomasse sowie die Qualität beeinträchtigen (Arnon 1975).

2.5.4 Düngung und Krankheiten

Die Nährstoffverfügbarkeit kann die Krankheitsanfälligkeit von Mais beeinflussen. Insgesamt wird die Toleranz gegen Krankheiten bei unterernährten Pflanzen geschwächt. In den meisten Fällen begünstigt eine Unterversorgung den Befall – es gibt jedoch Ausnahmen (Tabelle 4).



Zuckerrüben (Foto: Agroscope).

2.6 Zuckerrübe

2.6.1 Allgemeine Eigenschaften

Die Zuckerrübe wurde 2014 auf rund 21 000 ha angebaut. Es wurden 1,9 Millionen t Wurzeln mit einem Zuckergehalt von 17,7 % produziert, was 340 000 t Zucker entspricht. Die Zuckerrübe ist eine zweijährige Pflanze, deren Anbau sich auf die vegetative Phase (im ersten Jahr) konzentriert, während derer das Wachstum sehr stark von den Umweltbedingungen beeinflusst wird. Die Kultur wächst zu Beginn langsam und der Boden ist der Gefahr der Verschläm- mung und Erosion ausgesetzt. Im Sommer hängt das

Wachstum stark von der Wasserverfügbarkeit (Niederschläge, Bodentiefe) ab. Das Wachstum setzt sich im Herbst fort und die Kultur kann beträchtliche Mengen an Biomasse zulegen. Der Zeitpunkt der Ernte wird vor allem durch die Anforderungen der Verarbeitung, die Bodenbedingungen, den Gesundheitszustand der Kultur und den Wintereinbruch bestimmt. Durch die Züchtung neuer Sorten konnte in den letzten Jahrzehnten ein kontinuierliches jährliches Ertragswachstum von rund 1 % erreicht werden. Die auf der Entwicklung der Ernten von 1995–2014 basierende Hochrechnung ergibt für 2020 einen durchschnittlichen Ertrag von 90 t/ha mit einem Verhältnis von 1,9 für die frische Biomasse der Wurzeln zur Biomasse der Blätter. Das Wurzelsystem ist bei der Zuckerrübe besonders gut entwickelt, sowohl hinsichtlich der Dichte als auch der Tiefe. Die Kultur bevorzugt mittlere Böden, kommt aber auch mit schweren Böden zurecht. Sie kann auch in humusreichen, schwarzen Böden angebaut werden. Aufgrund der tiefreichenden Wurzeln übersteht die Kultur Trockenperioden gut. Der optimale pH liegt zwischen 6,5 und 7,5.

2.6.2 Nährstoffbedarf und Erntequalität

Mit der Düngung sollen ein hoher Rübenantrag, ein hoher Zuckergehalt und eine hohe Extrahierbarkeit des Zuckers gewährleistet werden, um eine maximale Zuckerproduktion und Wirtschaftlichkeit der Kultur zu erreichen.

Mit der N-Düngung sollen die dem Boden entzogenen 265 kg N/ha ergänzt werden, die für die Produktion der ober- und unterirdischen Biomasse (90 t/ha Wurzeln) erforderlich sind. Nicht zum Ausdruck kommt bei der Düngungsnorm von 100 kg N/ha die enorme Bandbreite des N-Bedarfs, der zwischen 0 und 200 kg N/ha liegt. Im Hinblick auf eine optimale N-Düngung ist es deshalb wichtig, die Fähigkeit des Bodens zur Mineralisierung der organischen Substanz (OS) genau zu kennen. Höhere N-Mengen sind nur bei Böden mit einem geringen Anteil OS sowie auf viehlosen Betrieben denkbar. Eine Reduktion der N-Düngung sollte für Parzellen erwogen werden, auf denen regelmässig Hofdünger ausgebracht werden oder deren Böden tief, schwer und reich an OS sind, sowie in milden Frühlingen. In jedem Fall sollten die N-Gaben auf den Beginn der Wachstumsphase konzentriert werden und vor dem 6–8-Blattstadium erfolgen, wenn die Mineralisierung der OS noch beschränkt ist. Eine übermässige und späte Düngung beeinträchtigt die Qualität der Zuckerrüben, wobei die Anreicherung mit Zucker begrenzt und der Gehalt an N-Verbindungen, welche die Zuckerextraktion beeinträchtigen, erhöht wird (Tabelle 5). Ein Programm zur

Tabelle 5 | Einfluss der Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumdüngung auf Qualitätseigenschaften von Zuckerrüben.

Qualität/Düngung	N	P	K
Zuckergehalt	–	o	+
Extrahierbarkeit	–	o	– (wenn im Überfluss)

o ohne Einfluss; + positiver Einfluss; – negativer Einfluss.

Berechnung des totalen Bedarfs an mineralischem N, mit dem sich zahlreiche Korrekturfaktoren zur N-Düngung berücksichtigen lassen, steht auf der Webseite der Schweizerischen Fachstelle für Zuckerrübenanbau zur Verfügung <http://www.zuckerruebe.ch/deutsch/entscheidungshilfenl.html>.

Die Zuckerrübe vermag das Nährstoffangebot des Bodens gut zu nutzen. Dies gilt auch für ihren K-Bedarf, den sie aus tieferen Bodenschichten decken kann. Unter Berücksichtigung dieser Fähigkeit kann die K-Düngung auf 80 % der entnommenen K-Mengen beschränkt werden. K hat ebenso wie Natrium (Na) einen positiven Effekt auf den Zuckergehalt. Eine übermässige Verfügbarkeit dieses Elements wirkt sich aber ungünstig auf die Verarbeitungsqualität der Zuckerrübe aus, wodurch die Ausbeute bei der Raffinierung beeinträchtigt wird.

Hinsichtlich der Versorgung der Zuckerrübe mit Spurenelementen spielt insbesondere B eine wichtige Rolle, da ein B-Mangel die Herz- und Trockenfäule, eine physiologische Krankheit, hervorruft. Der Mn-Bedarf muss ebenfalls berücksichtigt werden. Allfällige Düngergaben sollten in Form von Blattdünger spätestens beim Reihenschluss erfolgen.

Da die Qualität beim Preissystem für die Zuckerrübenerten direkt berücksichtigt wird, ist es sinnvoll, der Düngung besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Die Lieferungsbestätigung der Zuckerfabrik ist ein gutes Mittel, um zu beurteilen, ob die angewendeten Dünger richtig dosiert wurden. Bei einem Zuckergehalt der Rübe von 18 % rechnet man mit einem Verlust von etwa zwei Prozentpunkten, was einer Ausbeute von rund 90 % entspricht. Verluste bei der Raffinierung von Zucker werden direkt durch bestimmte Inhaltsstoffe der Zuckerrübe verursacht, welche die Extraktion beeinträchtigen, z. B. Alpha-Aminostickstoff (akzeptierbarer Bereich 0,6–1,2 mmol/100 g), Kaliumsalze (3–4 mmol/100 g), Natriumsalze (0,1–0,3 mmol/100 g) sowie weitere lösliche Verbindungen (organische Verbindungen mit und ohne N sowie Mineralstoffe). Alle Werte ausserhalb der oben angegebenen Bandbreiten können für die Korrektur der Düngung in den nachfolgenden Jahren herangezogen werden.



Zwischenkultur mit verschiedenen Arten (Foto: Agroscope).



Bodenbearbeitung. Links: Direktsaat, rechts: Aussaat nach dem Pflügen (Foto: Agroscope).

2.7 Anbausysteme und Zwischenkulturen

Durch die Bemühungen zur Reduktion der Bodenbearbeitung und zur systematischen Bodenbedeckung durch Pflanzen werden die Nährstoffkreisläufe des Ackerbodens verändert. Für eine auf das Anbausystem abgestimmte Düngung sollten die drei wichtigsten Prozesse berücksichtigt werden: (i) Die Reduktion der Bodenbearbeitungsintensität verändert die Dynamik (zeitlicher Verlauf) und die Stärke (Menge) der Mineralisierung der OS im Boden; (ii) eine Zwischenkultur (Gründüngung) nimmt Nährstoffe verschiedenen Ursprungs und in unterschiedlichen chemischen Formen auf, die dem Boden schliesslich in einer für die Nachfolgekultur gut verfügbaren Form wieder zugeführt werden; und (iii) die Leguminosen einer Zwischenkultur erschliessen dem System über die symbiotische N-Fixierung neuen N. Diese Prozesse können eine Anpassung der Düngung der Hauptkulturen erforderlich machen, einerseits um ihre Ernährung sicherzustellen und andererseits um die Effizienz der Düngung zu verbessern.

2.7.1 Auswirkungen einer reduzierten Bodenbearbeitungsintensität

Durch jede Bodenbearbeitung werden die Struktur, die Durchlüftung und die Temperatur des Bodens verändert. Dabei kommt es zu einer Zunahme der Aktivität der Mikroorganismen des Bodens und zu einer Steigerung der Mineralisierung der OS. Die Bodenart und die klimatischen Bedingungen legen die Dynamik dieser Prozesse fest, die bei der Düngung berücksichtigt werden sollten.

Wegen der geringen Durchmischung bei minimaler Bodenbearbeitung oder Direktsaat wird keine zusätzliche Mineralisierung ausgelöst. Im Vergleich zur intensiven Bodenbearbeitung bleibt in diesen Systemen deshalb die N-Freisetzung in die Bodenlösung bei der Jugendentwicklung der Kulturen reduziert. Bei Sommerkulturen führt eine fehlende Bodenbearbeitung zu einer Verzögerung der Mineralisierung der OS, die noch dadurch verstärkt

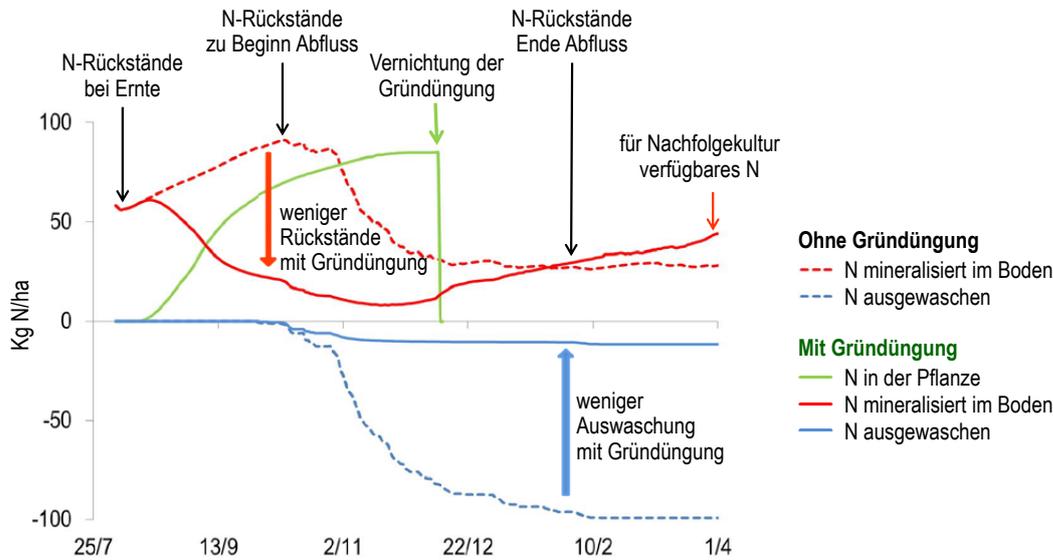


Abbildung 5 | Stickstoff-Management durch Gründüngung als Zwischenkultur von Ende Juli bis Ende März (Justes et al. 2013).

wird, dass der Boden während des Auflaufens der Kulturen länger kalt bleibt. Aus diesem Grund kann eine intensivierte N-Düngung bei der Saat erforderlich sein, insbesondere um eine schnelle Jugendentwicklung und ein rasches Auflaufen der Kultur sicherzustellen. Andererseits hängt die Mineralisierung der OS während des Sommers und Herbsts hauptsächlich von der Vorkultur, vom Gehalt des Bodens an OS und von der Bodenfeuchtigkeit ab. Bei unseren klimatischen Bedingungen reicht der während des Sommers mineralisierte N für die meisten Kulturen aus oder ist sogar im Überschuss vorhanden. Die Einarbeitung von Stroh, die minimale Bodenbearbeitung oder eine länger andauernde Trockenheit können bei frühreifen Winterkulturen (Bodenbedeckungen, Raps, Kunstwiesen, Gerste usw.) zu Situationen mit N-Mangel führen. Dieses Risiko ist bei schlecht mit OS versorgten Böden, viehlosen Betrieben oder Betrieben, die erst seit kurzer Zeit eine reduzierte Bodenbearbeitung praktizieren, erhöht. In diesen Fällen kann der N-Mangel durch ver-

schiedene Massnahmen verringert werden: Bodenbearbeitung (Stoppelbearbeitung), Aufschub der Saat, Anbau von Leguminosen (Mischkultur, Gründüngung) oder N-Gabe (empfohlen bei der Einarbeitung von Stroh).

2.7.2 Auswirkungen von Gründüngern auf den Nährstoffzyklus

Gründünger verbessern die Verfügbarkeit von Nährstoffen für die nachfolgende Kultur durch verschiedene Prozesse. Durch eine hohe Produktion von Biomasse und einen hohen Nährstoffgehalt der Pflanzen können Gründünger grosse Mengen von Nährstoffen speichern (Wendling et al. 2016). Zudem werden durch die Reduktion des Abflusses und den Schutz des Bodens vor Erosion Nährstoffverluste vermieden. Diese in den Pflanzen gelagerten Nährstoffe werden anschliessend bei der Vernichtung der Gründünger dem Boden wieder zugeführt. Das N-Management mit Gründüngern beinhaltet drei aufeinanderfolgende Schritte: das Management der N-Rückstände der Vorkultur, die Aufnahme des mineralisierten N durch die Gründünger und die Bereitstellung dieses N für die Nachfolgekultur (Abbildung 5).

Die Extraktion von Nährstoffen, die für bestimmte Kulturen schwer zugänglich sind, aus dem Boden und deren Verfügbarkeit für die Nachfolgekulturen spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. In den vorangehenden Versionen der Düngungsgrundlagen wurden der Nährstoffgehalt von Gründüngern und ihre Nährstoffaufnahme als zusammenfassender Wert angegeben. In Tabelle 6 sind diese Werte genauer aufgeschlüsselt. Das Nährstoffmanagement zielt darauf ab, den Düngewert dieser Gründünger bei ihrer Vernichtung zu berücksichtigen.

Die Rückführung des in der Gründüngung enthaltenen N zugunsten der nachfolgenden Kultur hängt

Tabelle 6 | Aufnahme von Nährstoffen durch ausgewählte Gründünger.

Gründüngungen	Ertrag	Aufnahme (kg/ha)			
	TS ¹ dt/ha	N	P	K	Mg
Rauhafer	35	85	14	142	6
Kreuzblütler	35	73	12	134	6
Phacelia	35	90	19	181	6
Futtererbse	35	156	19	107	11

¹ Trockensubstanz.

Tabelle 7 | Schätzung des für die Nachfolgekultur freigesetzten bzw. blockierten Stickstoffs durch die Gründüngung in Abhängigkeit der Art und ihres Wachstums (Justes et al. 2009).

Kriterium	Leguminosen	Senf	Gräser
C:N-Verhältnis	10 bis 15	15 bis 20	20 bis 30
mineralisierter N in % des N der Zwischenkultur	40 bis 50	15 bis 30	-15 bis 15
freigesetzter bzw. blockierter N (kg/ha)			
- mittleres Wachstum	20 bis 25	7 bis 15	-7 bis 7
- starkes Wachstum	40 bis 50	15 bis 30	-15 bis 15

Tabelle 8 | Zusammenfassung der Auswirkungen, Vorteile und Grenzen der verschiedenen Arten von Gründüngern (Justes *et al.* 2013).

Kriterium	Nicht-Leguminosen Gräser	Nicht-Leguminosen Kreuzblütler	Leguminosen	Mischungen Leguminosen und Nicht-Leguminosen
Voraussetzungen	ziemlich frühe Saat; nicht oder wenig frostempfindlich	frühe Saat; frostempfindlich je nach Art und Temperatur	sehr frühe Saat; frostempfindlich	Mischung an die Bodenbedingungen anpassen
Verminderung der Auswaschung	30 bis 80 %	30 bis 90 %	0 bis 40 %	20 bis 60 %
kurzfristige Auswirkungen auf N (freigesetzter N in % des aufgenommenen N)	-20 bis +10 %	-10 bis +30 %	+1 bis +50 %	+10 bis +40 %
Vorteile	Wirksamkeit bei hohem N-Input	breite Wirksamkeit	Wirksamkeit bei niedrigem N-Input	mittlere Wirksamkeit, unterschiedlich nach Umweltbedingungen
ungünstige Bedingungen	toniger Boden falls Vernichtung spät	toniger Boden falls nicht frostempfindlich oder falls Vernichtung spät	Systeme mit intensiver N-Düngung und Eintragung	Systeme mit intensiver N-Düngung

von den relativen Anteilen des Kohlenstoffs (C) bzw. des N in der Biomasse bei der Einarbeitung in den Boden ab. Das C:N-Verhältnis legt die Geschwindigkeit der Mineralisierung der OS fest. Ein hoher N-Gehalt begünstigt die Verrottung des Gründüngers und erhöht den Anteil von N, der für die Nachfolgekultur zur Verfügung steht. Umgekehrt bewirkt der Abbau einer verholzten Gründüngung, die einen hohen C-Gehalt aufweist, die Aufnahme von N durch die Bodenmikroorganismen nach dem Winter. Diese Aufnahme stellt eine Konkurrenz zur Ernährung der Pflanzen dar und kann zu einem N-Mangel führen, der sich mit der Situation vergleichen lässt, die sich bei der Einarbeitung von Stroh ergibt (Maltas *et al.* 2012a & b; Maltas *et al.* 2013). In Tabelle 7 sind verschiedene Werte für die N-Rückführung bei verschiedenen Arten von Zwischenkulturen unter Berücksichtigung des C:N-Verhältnisses dargestellt.

Um das Potenzial einer Gründüngung zur Humusbildung besser auszuschöpfen, sollte sie noch in frischem Zustand vernichtet und mit dem Boden in Kontakt gebracht werden (im Allgemeinen vor dem Winter). Im Falle einer Einarbeitung einer verholzten Gründüngung sollte diese Arbeit rechtzeitig vor der nachfolgenden Kultur erfolgen oder die N-Düngung bei der Jugendentwicklung der nachfolgenden Kultur sogar erhöht werden. Dies betrifft insbesondere Sommerkulturen nach einer Gründüngung, die den Boden während des Winters geschützt hat. Tabelle 8 fasst die Auswirkungen, Vorteile und Grenzen der Gründüngung im Hinblick auf den N-Haushalt zusammen (Justes *et al.* 2013).

Es wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass die Gründünger keine wesentlichen Auswirkungen auf die Kreisläufe der anderen Nährstoffe (P, K, Mg) haben. Dabei wird allerdings die Fähigkeit bestimmter Arten vernachlässigt, dem Boden schwer zugängliche Nährstoffe zu entnehmen und diese bei ihrer Zersetzung in bioverfügbarer Form freizusetzen. Mit der Berücksichtigung der in Gründüngungen enthaltenen Nährstoffmengen (Büchi *et al.* 2016) soll diesen Mechanismen, insbesondere bei Arten mit einer ausgeprägten Fähigkeit zur Nährstoffaufnahme, noch besser Rechnung getragen werden. Bei einem nor-

mal oder gut mit Nährstoffen versorgten Boden wird deshalb empfohlen, alle in der Biomasse enthaltenen Nährstoffe als verfügbar zu betrachten und von der berechneten erforderlichen Düngermenge für die nachfolgende Kultur abzuziehen. Bei schlecht versorgten Böden empfiehlt es sich hingegen, vorsichtshalber davon auszugehen, dass die Gründünger keine Auswirkungen auf die Nährstoffkreisläufe von P, K und Mg haben.

2.7.3 Auswirkungen von Leguminosen in den Anbausystemen

Leguminosen werden immer öfter angebaut, sei es als Gründüngung vor der Kultur oder mit der Kultur (mit Raps) oder als Mischkultur (mit Getreiden). Bei günstigen Wachstumsbedingungen nehmen Leguminosen N aus dem Boden auf (0–50 kg N/ha) und binden über die symbiotische N-Fixierung bis zu 100 kg N/ha (Büchi *et al.* 2015). Diese N-Mengen sind als direkter Ersatz für eine N-Düngung oder als Ausgleich einer Situation mit unzureichender Mineralisierung interessant. Sie bergen aber auch das Risiko von N-Verlusten in Form von Nitraten.

Die Integration von Leguminosen in Anbausysteme bietet verschiedene Vorteile. Der Düngewert einer Gründüngung, die ausschliesslich aus Leguminosen besteht, kann 40 bis 80 kg N/ha erreichen (Büchi *et al.* 2015). Durch den Anbau einer Leguminose als Gründüngung nach dem Einarbeiten von Stroh kann bei schlecht mit OS versorgten Böden oder bei minimaler Bodenbearbeitung eine wirksame Bodenbedeckung erreicht werden. Zudem kann die Gabe einer N-Menge, die für die Zersetzung des Strohs erforderlich ist, eingespart werden (Maltas *et al.* 2012a). Eine Leguminose in Mischkultur mit Raps setzt bis zu 30 kg N/ha frei, die bei der Düngung dieses Kreuzblütlers eingespart werden können (Terres Inovia). Die Nährstoffeffizienz einer Mischung von Getreide und Eiweisspflanze ist einem reinen Anbau überlegen (Bedoussac *et al.* 2015). Ein häufigerer Einsatz von Leguminosen in den Anbausystemen verdient deshalb besondere Beachtung, da dies sowohl im Hinblick auf die Mengen als auch auf die Wirksamkeit der angewendeten N-Dünger interessant ist.

3. Düngungsnormen

Die Düngungsnormen entsprechen den Nährstoffbedarf an N, P, K und Mg der Ackerkulturen, um einen durchschnittlichen Ertrag zu erreichen. Diese Normen werden in Abhängigkeit verschiedener Faktoren bezüglich der Pflanzen, des Bodens und/oder des Klimas korrigiert.

Die Entzüge von N, P, K, Mg sowie die entsprechenden Düngungsnormen sind in Tabellen 9 und 10 aufgeführt. Beim berücksichtigten Ertragsniveau handelt es sich um den in der Schweiz durchschnittlich erreichten Ertrag. Er beruht auf den landwirtschaftlichen Statistiken des Schweizer Bauernverbands (SBV 2014). Die Werte der Nährstoffgehalte stammen aus zahlreichen Versuchen, die von Agroscope durchgeführt wurden. Die Normen für P, K und Mg gehen direkt aus dem entsprechenden Nährstoffentzug hervor, der ausgehend von diesen Daten berechnet wurde. Im Gegensatz dazu umfassen die Normen für N, die auf den von Agroscope durchgeführten Versuchen beruhen, nur einen Teil des effektiven Nährstoffentzugs.

3.1 Stickstoffdüngung

Eine begründete N-Düngung lässt sich als Methode bezeichnen, mit der die Gaben von mineralischen und organischen Düngern auf den Bedarf der Kultur abgestimmt werden können, um ein gegebenes Produktionsziel zu er-

reichen, wobei weitere N-Beiträge des Bodens berücksichtigt werden (COMIFER 2013). Diese auf Bedarf und Angebot abgestimmte Anpassung der Normen trägt zu den technischen und wirtschaftlichen Aspekten der Produktion und zur Vermeidung von N-Verlusten in die Umwelt bei. Das N-Angebot des Bodens lässt sich errechnen, indem zum mineralischen N, der zu einem gegebenen Zeitpunkt vorhanden ist, der gesamte N addiert wird, der ab diesem Zeitpunkt und während des Wachstums der Kultur freigesetzt wird, und der N subtrahiert wird, der im gleichen Zeitraum verloren geht. Es muss jedoch zusätzlich die Entwicklung der zeitlichen und räumlichen Verfügbarkeit des N sowie die Entwicklung der Kultur beachtet werden. So wird einer Kultur mit tief reichenden Wurzeln eine höhere N-Menge zugänglich sein als einer Kultur mit einem oberflächlichen Wurzelsystem. Ausserdem kann eine junge Pflanze den N nicht aufnehmen, der in tieferen Schichten ausserhalb der Reichweite ihrer Wurzeln vorliegt (siehe Modul 2/ Bodeneigenschaften und Bodenanalysen).

3.1.1 Stickstoffkreislauf

N ist ein für das Wachstum der Kulturen unerlässliches Element. Auf einer Parzelle kann N durch das Ausbringen von synthetischem Mineraldünger, durch das Rezyklieren von Ernterückständen und Hofdünger oder durch biologische Fixierung von atmosphärischem N_2 durch Leguminosen zugeführt werden. Im N-Kreislauf (Abbildung 6) erhöhen die

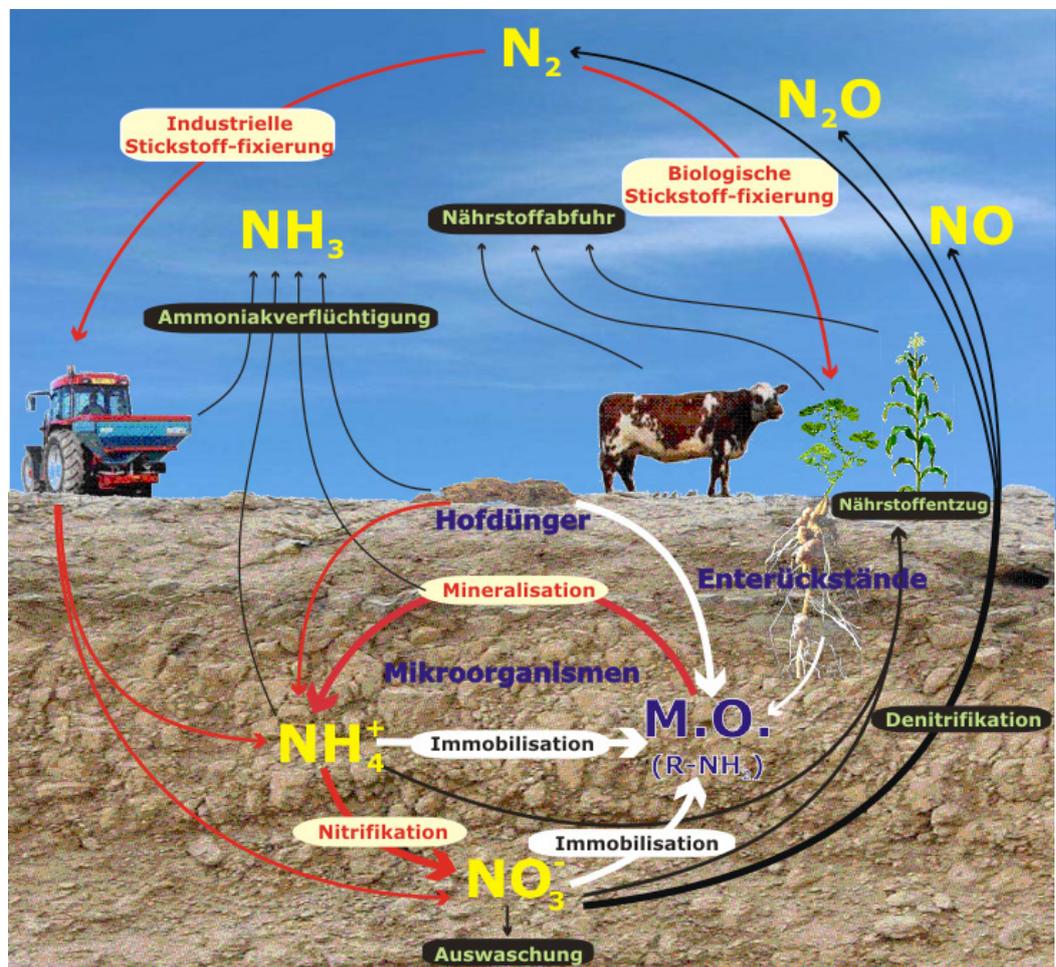


Abbildung 6 | Stickstoffkreislauf auf Parzellenebene.

Tabelle 9 | Referenzertrag, Nährstoffentzug und Düngungsnormen bezüglich N, P, K und Mg für die Ackerkulturen.

Die Düngungsnormen für P, K und Mg berücksichtigen das Nährstoffaneignungsvermögen der Kulturen (Tabelle 21).

Anmerkungen: Als Grundlage für die Berechnung dient der Entzug von P, K und Mg durch die Ernte und die Rückstände.

Der gesamte Nährstoffentzug wurde als Summe der Nährstoffentzüge durch die Ernteprodukte und -rückstände berechnet.

Kultur	Referenzertrag ¹	Produkt	Nährstoffentzug basierend auf dem Referenzertrag				Düngungsnorm			
			N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg
	dt/ha	kg/ha				kg/ha				
Winterweizen (Brot- und Biskuitweizen)	60	Körner	121	21 (49)	22 (26)	7				
	70	Stroh	22	6 (13)	62 (75)	5				
	total		143	27 (63)	84 (101)	12	140	27 (63)	67 (81)	15
Futterweizen	75	Körner	130	27 (62)	27 (32)	9				
	75	Stroh	21	6 (14)	66 (80)	5				
	total		151	33 (76)	93 (113)	14	140	33 (76)	74 (90)	15
Sommerweizen	50	Körner	101	18 (41)	18 (22)	6				
	60	Stroh	19	5 (11)	53 (64)	4				
	total		120	23 (52)	71 (86)	10	120	23 (52)	71 (86)	10
Wintergerste	60	Körner	89	22 (50)	27 (32)	7				
	60	Stroh	26	6 (13)	80 (96)	4				
	total		115	28 (64)	107 (128)	11	110	28 (64)	86 (103)	15
Sommergerste	55	Körner	81	20 (46)	25 (30)	6				
	55	Stroh	24	5 (12)	73 (88)	3				
	total		105	25 (58)	98 (118)	9	90	25 (58)	98 (118)	10
Winterhafer	55	Körner	88	19 (44)	23 (28)	6				
	70	Stroh	35	8 (19)	122 (147)	6				
	total		123	27 (63)	145 (175)	12	90	27 (63)	116 (140)	15
Sommerhafer	55	Körner	91	19 (44)	23 (28)	6				
	70	Stroh	29	8 (19)	122 (147)	6				
	total		120	27 (63)	145 (175)	12	90	27 (63)	145 (175)	15
Winterroggen	55	Körner	72	19 (44)	23 (28)	6				
	70	Stroh	21	6 (14)	70 (84)	7				
	total		93	25 (58)	93 (112)	13	90	25 (58)	74 (89)	15

¹ Mit einem bei der Ernte üblichen Wassergehalt.

Tabelle 9 (Fortsetzung)

Kultur	Referenz- ertrag ¹ dt/ha	Produkt	Nährstoffentzug basierend auf dem Referzertrag				Düngungsnorm			
			N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg
			kg/ha				kg/ha			
Winterroggen (Hybridsorten)	65	Körner	85	23 (52)	27 (33)	7				
	75	Stroh	23	7 (15)	75 (90)	8				
	total		108	30 (67)	102 (123)	15	90	30 (67)	82 (98)	15
Dinkel	45	Körner	72	16 (36)	19 (23)	5				
	70	Stroh	35	8 (18)	70 (84)	7				
	total		107	24 (54)	89 (107)	12	100	24 (54)	71 (85)	15
Wintertriticale	60	Körner	96	19 (43)	24 (29)	5				
	75	Stroh	25	5 (11)	112 (135)	5				
	total		121	24 (54)	136 (164)	10	110	24 (54)	109 (132)	10
Sommertriticale	55	Körner	88	17 (40)	22 (27)	5				
	70	Stroh	23	4 (10)	105 (126)	4				
	total		111	21 (49)	127 (153)	9	100	21 (49)	127 (153)	10
Emmer, Einkorn	25	Körner	55	9 (20)	11 (13)	4				
	45	Stroh	18	6 (14)	34 (41)	3				
	total		73	15 (34)	45 (53)	7	30	15 (34)	36 (42)	10
Hirse	35	Körner	58	10 (23)	8 (10)	4				
	45	Stroh	75	11 (25)	85 (102)	11				
	total		133	21 (48)	93 (112)	15	70	22 (51)	95 (114)	12
Körnermais	100	Körner	130	26 (59)	33 (40)	9				
	110	Stroh	80	12 (26)	160 (191)	14				
	total		210	38 (85)	193 (231)	23	110	46 (103)	195 (235)	25
Silomais	185 ²	Ganzpflanze	218	38 (89)	200 (241)	24				
	total		218	38 (89)	200 (241)	24	110	46 (103)	195 (235)	25
Grünmais	60 ²	Ganzpflanze	114	17 (39)	134 (162)	6				
	total		114	17 (39)	134 (162)	6	70	17 (39)	134 (162)	10

¹ Mit einem bei der Ernte üblichen Wassergehalt.

² Trockensubstanzertrag.

Tabelle 9 (Fortsetzung)

Kultur	Referenz- ertrag ¹ dt/ha	Produkt	Nährstoffentzug basierend auf dem Referzertrag				Düngungsnorm			
			N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg
			kg/ha				kg/ha			
Kartoffeln (Speisekartoffeln und Kartoffeln für die technische Verarbeitung) Gruppe 1 ^a Gruppe 2 ^b Gruppe 3 ^c	450	Knollen	135	26 (59)	202 (243)	9				
	200	Kraut	28	4 (10)	108 (130)	8				
	total		163	30 (69)	310 (373)	17	80 ^a 120 ^b 160 ^c	36 (82)	372 (448)	20
Kartoffeln (Frühkartoffeln) Gruppe 1 ^a Gruppe 2 ^b Gruppe 3 ^c	300	Knollen	69	20 (45)	125 (150)	6				
	200	Kraut	66	6 (14)	116 (140)	12				
	total		135	26 (59)	241 (290)	18	70 ^a 110 ^b 150 ^c	31 (71)	289 (348)	20
Kartoffeln (Pflanzkartoffeln) Gruppe 1 ^a Gruppe 2 ^b Gruppe 3 ^c	250	Knollen	58	17 (38)	104 (125)	5				
	200	Kraut	66	6 (14)	116 (140)	12				
	total		124	23 (52)	220 (265)	17	60 ^a 100 ^b 140 ^c	28 (62)	264 (318)	20
Zuckerrüben	900	Rüben	108	24 (54)	149 (180)	27				
	475	Kraut/Köpfe	157	17 (38)	248 (299)	43				
	total		265	41 (92)	397 (479)	70	100	40 (92)	318 (383)	70
Futterrüben	175 ²	Rüben	193	38 (88)	261 (315)	23				
	400	Kraut	140	14 (32)	232 (280)	36				
	total		333	52 (120)	493 (595)	59	100	52 (120)	394 (476)	60
Winterraps	35	Hauptprodukt	102	22 (51)	25 (30)	8				
	90	Nebenprodukt	54	6 (14)	142 (171)	4				
	total		156	28 (64)	167 (201)	12	150	28 (69)	167 (202)	15
Sommerraps	25	Hauptprodukt	65	16 (37)	17 (21)	7				
	45	Nebenprodukt	32	4 (9)	46 (56)	7				
	total		97	20 (46)	63 (77)	14	120	20 (46)	63 (77)	15

¹ Mit einem bei der Ernte üblichen Wassergehalt.

² Trockensubstanzertrag.

^{a,b,c} Bei Kartoffeln werden sortenspezifische Korrekturen vorgeschlagen, um Ertrag und Erntequalität sicherzustellen. Die Sorten der Sortenliste für Kartoffeln (Schwaerzel *et al.* 2016) werden nach ihrem N-Bedarf in drei Gruppen eingeteilt (Tabelle 10). Es lassen sich bedeutende Unterschiede in der Reaktion auf die N-Düngung je nach Sorte und Standort feststellen, hauptsächlich aufgrund des Gehalts des Bodens an OS zum Zeitpunkt der Pflanzung (Dupuis *et al.* 2009). Es wird deshalb empfohlen, die N-Düngung nicht nur auf den N-Bedarf der betreffenden Sorte, sondern auch auf den zum Zeitpunkt der Pflanzung im Boden verfügbaren N abzustimmen (Hebeisen *et al.* 2012; Dupuis *et al.* 2009; Fleisch *et al.* 2009; Reust *et al.* 2006).

Tabelle 9 (Fortsetzung)

Kultur	Referenz- ertrag ¹ dt/ha	Produkt	Nährstoffezug basierend auf dem Referenzertrag				Düngungsnorm			
			N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg
			kg/ha				kg/ha			
Sonnenblume	30	Körner	95	14 (33)	21 (25)	9				
	60	Stroh	54	7 (16)	306 (369)	45				
	total		149	21 (49)	327 (394)	54	60	21 (49)	327 (394)	55
Ölhaf	13	Körner	60	14 (33)	12 (14)	7				
	60	Stroh	54	10 (23)	70 (84)	9				
	total		114	24 (56)	82 (98)	16	60	24 (56)	82 (98)	20
Faserhanf ³	100	Hauptprodukt	30	13 (30)	75 (90)	5				
	40	Nebenprodukt	110	26 (60)	91 (110)	20				
	total		140	39 (90)	166 (200)	25	100	39 (90)	166 (200)	25
Öllein	20	Körner	109	10 (24)	16 (19)	1				
	25	Stroh	15	6 (13)	37 (45)	2				
	total		124	16 (37)	53 (64)	3	80	16 (37)	53 (64)	5
Faserlein	45	Körner	45	14 (32)	75 (90)	9				
	15	Stroh	82	8 (18)	12 (14)	1				
	total		127	22 (50)	87 (104)	10	60	22 (50)	87 (104)	10
Chinaschilf	200 ²	Ganzpflanze	42	9 (20)	93 (112)	6				
	total		42	9 (20)	93 (112)	6	30	9 (20)	93 (112)	10
Kenaf	50 ²	Ganzpflanze	100	26 (60)	66 (80)	10				
	total		100	26 (60)	66 (80)	10	70	26 (60)	66 (80)	10
Eiweisserbsen	40	Körner	140	17 (39)	40 (48)	5				
	50	Stroh	100	17 (39)	66 (80)	11				
	total		240	34 (78)	106 (128)	16	0	34 (78)	127 (154)	20
Ackerbohnen	40	Körner	160	24 (56)	46 (56)	10				
	45	Stroh	135	7 (16)	75 (90)	15				
	total		295	31 (72)	121 (146)	25	0	31 (72)	145 (175)	25

¹ Mit einem bei der Ernte üblichen Wassergehalt.² Trockensubstanzertrag.³ Je nach Erntezeitpunkt und -methode werden die Ganzpflanzen oder nur die Stängel geerntet.

Tabelle 9 (Fortsetzung)

Kultur	Referenz- ertrag ¹ dt/ha	Produkt	Nährstoffezug basierend auf dem Referenzertrag				Düngungsnorm			
			N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	Mg
			kg/ha				kg/ha			
Sojabohne	30	Körner	180	15 (35)	48 (58)	6				
	30	Stroh	105	15 (35)	53 (64)	9				
	total		285	30 (70)	101 (122)	15	0	30 (71)	121 (147)	15
Süsslupine	30	Körner	165	13 (30)	34 (41)	6				
	30	Stroh	105	5 (12)	50 (60)	12				
	total		270	18 (42)	84 (101)	18	0	18 (42)	101 (121)	20
Gründünger (Leguminosen)	35 ²	Ganzpflanze	153	16 (37)	102 (123)	9				
	total		153	16 (37)	102 (123)	9	0	0 (0)	0 (0)	0
Gründünger (Nicht-Leguminosen)	35 ²	Ganzpflanze	85	14 (32)	143 (173)	8				
	total		85	14 (32)	143 (173)	8	0	0 (0)	0 (0)	0
Zwischenfrüchte (pro Nutzung)	25 ²	Ganzpflanze	70	10 (24)	75 (90)	6				
	total		70	10 (24)	75 (90)	6	30	10 (24)	55 (67)	10
Tabak Burley	25 ²	Blätter	75	8 (18)	104 (125)	7				
	30 ²	Stängel	69	10 (22)	112 (135)	6				
	total		144	18 (40)	216 (260)	13	170	18 (40)	216 (260)	15
Tabak Virginie	25 ²	Blätter	63	6 (14)	99 (119)	5				
	25 ²	Stängel	25	9 (21)	104 (125)	10				
	total		88	15 (35)	203 (244)	15	30	15 (35)	203 (244)	15
Reis	60	Körner	66	18 (41)	27 (32)	5				
	60	Stroh	39	8 (18)	102 (123)	11				
	total		105	26 (60)	129 (155)	16	110	26 (60)	120 (145)	10

¹ Mit einem bei der Ernte üblichen Wassergehalt.

² Trockensubstanzertrag.

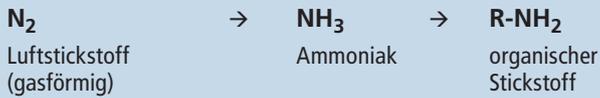
Tabelle 10 | Korrektur der Stickstoffdüngung in Abhängigkeit der Kartoffelsorte.

Gruppe	Sorten	Korrektur der Norm
Gruppe 1 (Sorten mit geringem Bedarf)	Agria, Fontane, Jelly und Nicola	Norm – 40 kg N/ha
Gruppe 2 (Sorten mit mittlerem Bedarf)	Agata*, Annabelle*, Amandine*, Bintje, Celtiane*, Challenger, Désirée*, Ditta*, Erika*, Gourmandine, Gwenne*, Hermes*, Lady Christl, Laura, Markies, Panda, Pirol*, Venezia* und Verdi	Norm
Gruppe 3 (Sorten mit hohem Bedarf)	Charlotte, Innovator, Lady Claire, Lady Rosetta und Victoria	Norm + 40 kg N/ha

* Die mit einem Stern versehenen Sorten wurden vorerst standardmässig in die Gruppe 2 eingeteilt, es werden aber Versuche weitergeführt, um ihren N-Bedarf genauer zu bestimmen.

Prozesse Fixierung, Mineralisierung und Nitrifikation den verfügbaren N im Boden, während die Prozesse Denitrifikation, Verflüchtigung, Immobilisation, Auswaschung und Entzug durch die Pflanzen eine Reduktion des N im Bereich des Wurzelsystems zur Folge haben.

Bei der **Stickstofffixierung** wird Luftstickstoff (N_2) in eine von den Pflanzen aufnehmbare N-Form überführt.



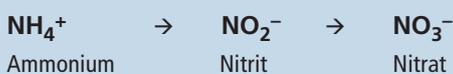
Dies kann industriell (Herstellung von Mineraldüngern) oder biologisch (N-Fixierung durch Bakterien in den Wurzelknöllchen von Leguminosen) erfolgen. Für die N-Fixierung werden Energie, Enzyme und Mineralstoffe benötigt. Falls verfügbarer N im Boden vorhanden ist, ist es für die Pflanze günstiger, diesen zu verwenden, statt N aus der Luft zu fixieren.

Die **Mineralisierung** ist der Prozess, bei dem organischer Stickstoff (Hofdünger, Ernterückstände, organische Substanz des Bodens) durch Mikroorganismen zu Ammoniak (NH_3) abgebaut wird.



Die Intensität der Mineralisierung hängt von vielen Faktoren wie dem Gehalt und der Qualität der OS des Bodens, der Vorkultur, der Nachwirkung von organischen Düngern (Hofdünger, Ernterückstände, Gründüngung), dem Klima (Temperatur, Feuchtigkeit) und dem Vorhandensein von Sauerstoff im Boden (Durchlüftung) ab.

Die **Nitrifikation** ist der Prozess, bei dem Mikroorganismen (*Nitrosomonas* und *Nitrobacter*) zur Energiegewinnung Ammonium in Nitrit und nachfolgend in Nitrat umwandeln.



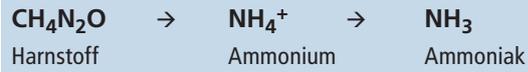
Nitrat ist die für Pflanzen am besten verfügbare N-Form im Boden, gleichzeitig aber am stärksten gefährdet bezüglich Auswaschungsverlusten.

Die **Denitrifikation** ist das Resultat der Umwandlung von Nitrat in gasförmige N-Verbindungen wie Stickstoffmonoxid (NO), Lachgas (N_2O) und molekularer Stickstoff (N_2).



Da die Denitrifikation unter anaeroben Bedingungen abläuft, treten Emissionen von Lachgas vor allem in schweren, verdichteten oder schlecht drainierten Böden sowie in stau- oder grundwasserbeeinflussten Böden auf.

Ammoniakverflüchtigung tritt hauptsächlich während der ersten Stunden nach der oberflächlichen Ausbringung von ammoniumhaltigen Düngern auf.



Dieses Phänomen betrifft vor allem Hofdünger mit einem hohen Gehalt an NH_4^+ . Dadurch kann die N-Wirksamkeit dieser Dünger stark reduziert werden. Eine Einarbeitung – auch oberflächlich – am Tag der Ausbringung der Gülle oder des Mists ist das beste Mittel, um Ammoniakverluste zu vermeiden. Die Wetterbedingungen und die Ausbringtechnik haben ebenfalls einen grossen Einfluss.

Immobilisierung ist der gegenläufige Prozess zur Mineralisation.



Dabei werden dem Boden durch Mikroorganismen Nitrate und Ammonium entnommen und in organische N-Formen überführt, was eine Reduktion des pflanzenverfügbaren Stickstoffs im Boden zur Folge hat.

Auswaschung von Nitraten aus dem Boden tritt dann auf, wenn mehr Wasser in den Boden gelangt, als dieser aufnehmen kann. Das überflüssige Wasser verlässt zusammen mit dem leicht wasserlöslichen Nitrat den Wurzelraum und gelangt ins Grundwasser oder in Gewässer. Dieser Vorgang tritt hauptsächlich in leichten Böden mit einem geringen Wasserspeichervermögen oder in bereits wassergesättigten Böden auf. Die Verlagerungstiefe des Nitrats hängt von der Menge des Sickerwassers, vom Feuchtigkeitszustand des Bodens vor dem Regen und von der Bodenart ab. Nitrathaltige N-Dünger unterliegen der potenziellen Auswaschungsgefahr ab dem Zeitpunkt der Ausbringung. Ammoniumverluste durch Auswaschung können auch in sandigen Böden mit schwachem Adsorptionsvermögen auftreten.

Aufnahme durch die Pflanzen: Eine effiziente Ausnutzung des N durch die Pflanzen ist das hauptsächliche Ziel bei der Planung und Durchführung der N-Düngung. Dabei gilt es, die spezifischen Eigenschaften mineralischer und organischer Düngemittel zu beachten. Um eine möglichst hohe Stickstoffeffizienz zu erreichen und unerwünschte Verluste in die Umwelt sowie daraus folgende ökonomische Verluste zu vermeiden, muss der Landwirt vor allem drei Punkte beachten: (i) *die N-Menge* (mehrere Versuche zeigen, dass beim Überschreiten des optimalen Düngungsniiveaus die N-Ausnutzungseffizienz bei verschiedenen Kulturen stark abnimmt und das Risiko von Verlusten zunimmt), (ii) *der Anwendungszeitpunkt* (Tabelle 26) und (iii) *der Bodenzustand* (die meisten Umwandlungsprozesse der verschiedenen N-Formen sind von der biologischen Aktivität des Bodens abhängig, die von den klimatischen Verhältnissen und vom physikalisch-chemischen Zustand des Bodens beeinflusst wird. Eine gute Struktur und

Wasserführung des Bodens ist Voraussetzung für eine hohe Wirksamkeit der N-Dünger).

3.1.2 Methoden zur Berechnung der Stickstoffdüngermenge

In der Schweiz werden zwei Methoden zur Berechnung der N-Düngermenge verwendet:

- (i) die Methode der korrigierten Normen, auch Schätzmethode genannt, und
- (ii) die N_{min} -Methode. In einer kürzlich veröffentlichten Studie (Maltas *et al.* 2015) wurde gezeigt, dass beide Methoden gleich leistungsfähig sind und nach beiden Methoden eine N-Düngermenge empfohlen wird, die nahe an der optimalen Menge liegt.

3.1.2.1 Methode der korrigierten Normen

Die Methode der korrigierten Normen schätzt die erforderliche N-Düngermenge, wobei eine Referenzmenge aufgrund von Boden-, Klima- und Anbaubedingungen des Standorts korrigiert wird. Bei dieser Referenzmenge handelt es sich um die Düngungsnorm. Sie entspricht der N-Düngermenge, die einer gegebenen Kultur in einer Standardsituation (normal mit N versorgter Boden) gegeben werden muss, um einen bestimmten Referenzertrag zu erreichen, das heisst den durchschnittlichen Ertrag, der in der Schweiz bei dieser Kultur zu erwarten ist (Tabelle 9). Die Düngungsnormen und Referenzerträge beruhen auf Versuchen, bei denen die Reaktionskurve der Kulturen in Abhängigkeit der N-Düngung ermittelt wurde, auf der Erfahrung der Landwirte und auf Expertenwissen.

Wenn die Situation hinsichtlich der Boden- und Klimabedingungen von der Standardsituation abweicht, werden Korrekturfaktoren auf die Düngungsnorm angewendet. Dabei kommen sieben mögliche Korrekturfaktoren, die negative oder positive Werte annehmen können, zur Anwendung (Gl. 1). Der Faktor Ertrag (f_{Ertrag}) schätzt die Korrektur des N-Bedarfs, wenn ein höherer oder tieferer Ertrag im Vergleich zum Referenzertrag angestrebt wird (Tabelle 11; Richner *et al.* 2010). Mit fünf weiteren Faktoren werden die Auswirkungen von parzellenspezifischen Boden- und Klimabedingungen auf das N-Angebot des Bodens geschätzt. Unter der Annahme, dass sich die Auswirkungen dieser Faktoren einfach addieren und nicht gegenseitig beeinflussen, lässt sich die erforderliche N-Menge (X) mit der folgenden Gleichung beschreiben:

$$X = \text{Norm} + (f_{Ertrag} + f_{OSB} + f_{VF} + f_{NOD} + f_{Regen} + f_{Hacken} + f_{Fr}) \quad \text{Gl.1}$$

Der Faktor f_{OSB} berücksichtigt die Auswirkungen des Gehalts an OS und des Tongehalts des Bodens auf die Mineralisierung der OS (Tabelle 12), f_{VF} berücksichtigt den Einfluss der Vorfrucht und des Zeitpunkts ihrer Einarbeitung in den Boden auf die Mineralisierung der Ernterückstände (Tabelle 13), f_{NOD} bezeichnet den Anteil des mit organischen Düngern ausgebrachten N, der im zweiten Jahr nach der Ausbringung pflanzenverfügbar ist (Tabelle 14), f_{Regen} schätzt den Einfluss von Regen auf die N-Verluste durch Auswaschung während Winter und Frühling (Tabelle 15) und f_{Hacken} simuliert den positiven Effekt von wiederholtem Hacken auf die Mineralisierung der OS (Tabelle 16).

Bei im Frühling gesäten bzw. gepflanzten Kulturen (Mais, Rüben, Sonnenblumen, Kartoffeln usw.) ist der Zeitraum zwischen Winterende und Saat, während dessen kein N von der Kultur aufgenommen wird, aber eine gute Mineralisierung der OS stattfindet, relativ lang. Wenn Niederschläge und Temperaturen während dieses Zeitraums für die Mineralisierung günstig sind, können die Reserven an mineralischem N zum Zeitpunkt der Saat sehr hoch sein (Maltas *et al.* 2015).. Tabelle 17 berücksichtigt diese Situation und beschreibt einen neuen Korrekturfaktor (f_{Fr}), der die Auswirkungen der Bedingungen im Frühling (Feuchtigkeit und Temperatur) auf die Mineralisierung der OS und die N-Verfügbarkeit aufnimmt.

Tabelle 11 | Korrektur der N-Düngung bei einem Zielertrag, der vom Durchschnittsertrag (Referenzertrag) abweicht.

Kultur	Korrektur der N-Düngung in Abhängigkeit des Ertrags (kg N/dt zusätzlicher Kornertrag)	Maximaler Zielertrag (dt Körner/ha)
Winterweizen (Brotgetreide)	1,0	80
Winterweizen (Futtergetreide)	1,0	95
Wintergerste	0,7	90
Winterroggen	0,8	80
Winterroggen (Hybridsorten)	1,2	90
Wintertriticale	0,3	95
Winterraps	3,0	45

Beispiel: Für einen erwarteten Ertrag von 75 dt/ha Winterweizen (Brotgetreide), d. h. 15 dt/ha Mehrertrag im Vergleich zum Referenzertrag, müssen zusätzlich zur Düngungsnorm 15 kg/ha N addiert werden.

Tabelle 12 | Korrektur der Stickstoffdüngung in Abhängigkeit des Mineralisierungspotenzials der organischen Substanz (OS).

Mineralisierungspotenzial der OS	OS-Gehalt des Bodens (%)			Korrektur gegenüber Norm (kg N/ha)
	Ton < 15 %	Ton 15–30 %	Ton > 30 %	
schwach bis mittel	< 1,2	< 1,8	< 2,5	0 bis +40
mittel	1,2–2,9	1,8–3,9	2,5–5,9	0
mittel bis hoch	3,0–6,9	4,0–7,9	6,0–9,9	0 bis –40
hoch bis sehr hoch	7,0–19,9	8,0–19,9	10,0–19,9	–40 bis –80
sehr hoch	≥ 20,0	≥ 20,0	≥ 20,0	–80 bis –120

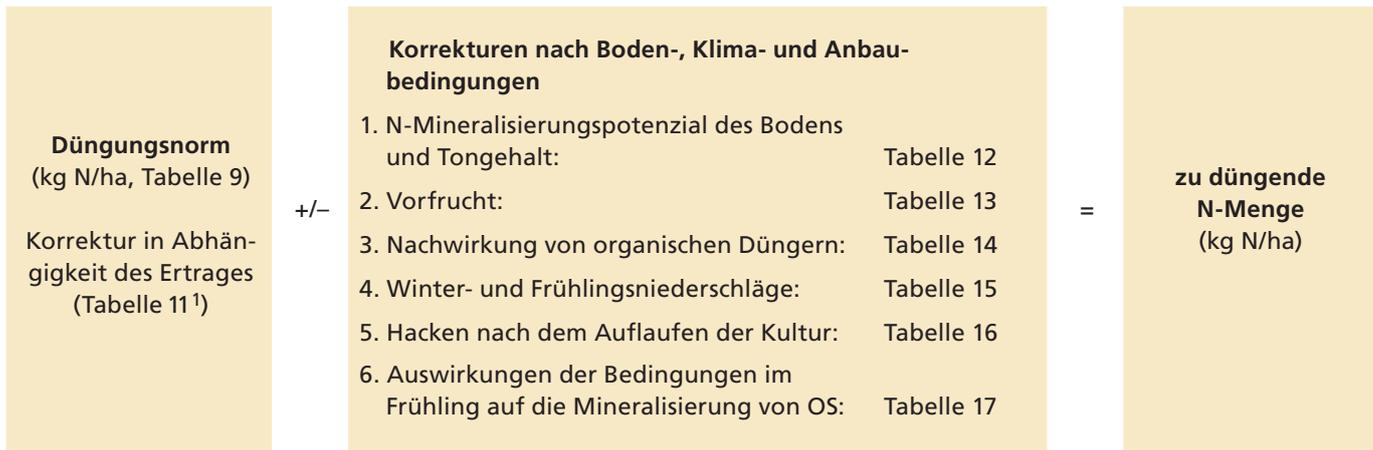


Abbildung 7 | Schematische Darstellung der Methode der korrigierten Normen (Schätzmethode). OS = organische Substanz. ¹Die Düngungsnorm wird nur für die in Tabelle 11 aufgeführten Kulturen in Abhängigkeit des Ertrages korrigiert.

Tabelle 13 | Korrektur der Stickstoffdüngung in Abhängigkeit der Vorkultur.

Vorkultur	Korrektur der Folgekultur (kg N/ha)	
	Umbruch/Einarbeitung	
	Herbst	Frühling
Natur- oder Kunstwiese (drei Jahre und älter)	-30	-40
Kunstwiese (zwei Jahre)	-20	-30
Kunstwiese (ein Jahr)	-10	-20
Natur- oder Kunstwiese (drei Jahre und älter) als Vor-Vorkultur ¹	-10	-10
vor Rispenschieben der Gräser gemulchte Kunstwiese		-30 bis -60 ²
vor Blüte der Gräser gemulchte Kunstwiese		-20 bis -40 ²
Getreide oder Mais (Stroh eingearbeitet) vor:		
- im Herbst gesäten Kulturen	+ 20	
- im Frühjahr (Februar–März) gesäten Kulturen	+ 10	
Körnerleguminosen (Eiweisserbsen, Ackerbohnen, Sojabohnen, Lupinen) vor:		
- im Herbst gesäter frühreifer Kultur	40 bis 60	
- im Herbst gesäter spätreifer Kultur	20 bis 40	
- im Frühjahr gesäter bzw. gepflanzter Kultur	0 bis 20	
Rüben (Kraut eingearbeitet)	-20	
Gründüngung mit nicht winterharten Arten (Phacelia, Gelbsenf)	-10	0
Gründüngung mit nicht winterharten Leguminosen	-20	-10
Gründüngung mit winterharten Arten (Raps, Rübsen usw.)	0	-20
Gründüngung mit winterharten Leguminosen	0	-30
Faserhanf	-10	
Kartoffeln	-10	
andere Vorkulturen ³	0	

¹ Diese Korrektur kann zu einer anderen Korrektur dieser Tabelle addiert werden.

² Kleinerer Wert: bei geringem Leguminosenanteil; grösserer Wert: bei hohem Leguminosenanteil.

³ Getreide (abgeführtes Stroh), Silomais, Raps, Sonnenblumen, Sojabohnen, Tabak usw.

Die Vorgehensweise bei der Anwendung dieser Methode zur Optimierung der N-Düngung im Ackerbau ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt.

3.1.2.2 N_{min}-Methode

Die zweite Methode zur Berechnung der erforderlichen N-Menge beruht auf der Messung des mineralischen N im Boden (N_{min}-Methode). Diese Methode beruht auf einem Referenzwert (Schwelle), von dem N_{min} subtrahiert wird. N_{min} entspricht dabei der Messung der Reserven von mineralischem N im Boden zu einem gegebenen Zeitpunkt (vor

der ersten N-Gabe). Der Referenzwert ist höher als die Düngungsnorm, da er den N_{min}-Betrag miteinbezieht. Er wurde mit zahlreichen Feldversuchen ermittelt, bei denen die N_{min}-Messung mit der optimalen N-Menge in Beziehung gesetzt werden konnte (Neeteson 1990). Im Vergleich zur Methode der korrigierten Normen hat dieser Ansatz den Vorteil, dass N_{min} im Boden direkt gemessen werden kann und keine Schätzungen aufgrund von Tabellen mit Referenzwerten erforderlich sind. Der Zeitpunkt und die Tiefe der Entnahme von Proben für die N_{min}-Bestimmung hängen von der Kultur ab (Tabelle 18).

Tabelle 14 | Korrektur der Stickstoff-Normdüngung infolge Nachwirkung organischer Dünger.

Die Stickstoffwirkung der Hofdünger im Anwendungsjahr ist in Tabelle 7 von Modul 4/ Eigenschaften und Anwendung von Düngern enthalten.

Organischer Dünger	Anteil (%) des ausgebrachten Gesamtstickstoffs, der im zweiten Jahr nach der Ausbringung pflanzenverfügbar wird und von der Normdüngung abzuziehen ist
Vollgülle und kotarme Gülle (Rindvieh)	10
Stapelmist und Laufstallmist	10
Rottemist	15
Mistkompost	20
Pferdemist	5
Schaf- und Ziegenmist	10
Schweinegülle und Schweinemist	10
Hennenkot (Kotband)	10
Hennenmist (Bodenhaltung)	10
Geflügelmist (Mast), Poulet, Truten	5
Kompost	0
Ricokalk	10

Tabelle 15 | Korrektur der Stickstoff-Normdüngung in Abhängigkeit der Winter- und Frühjahrsniederschläge.

Kultur	Korrektur der N-Düngung (kg N/ha)			
	Niederschlagsperiode und -intensität			
	Winterruhe (November–Januar)		Vegetationsbeginn/Saat (März–Mai)	
	gering (< 60 mm/Monat)	hoch (> 90 mm/Monat)	gering (< 60 mm/Monat)	hoch (> 90 mm/Monat)
Winterraps	-10	+10	0	0
Wintergetreide	-20	+20	0	0
Sommergetreide	-20	0	-10	+10
Frühkartoffeln	-20	+10	-10	+30
Rüben, Mais, Kartoffeln (Pflanzkartoffeln, Kartoffeln für Speisezwecke und technische Verarbeitung)	0	+10	-10	+30

Tabelle 16 | Zusätzliche N-Nachlieferung des Bodens durch mehrmaliges Hacken nach dem Auflaufen der Kultur in Abhängigkeit des Gehaltes an organischer Substanz des Bodens.

OS-Gehalt des Bodens (%)	Korrektur der N-Düngung (kg N/ha)
< 8	-10
8–20	-15
> 20	-20

Für ein einmaliges Hacken von Rüben, Kartoffeln und Mais sind diese Korrekturen nicht zu verwenden, da in den meisten Versuchen, die den N-Normen zugrunde liegen, diese Kulturen einmal gehackt wurden.

Tabelle 17 | Korrektur der N-Normdüngung in Abhängigkeit der Witterungsbedingungen im Frühling (Feuchtigkeit und Temperatur) und des Bodenzustands.

Bedingungen im Frühling	Korrektur der N-Düngung (kg N/ha)
warmer Frühling mit ausreichend mit Wasser versorgtem und gut strukturiertem Boden	-20
durchschnittliche Bedingungen	0
kalter Frühling mit sehr feuchtem oder sehr trockenem Boden mit ungünstiger Struktur	+20

Tabelle 18 | Zeitpunkt und Probennahmetiefe für die N_{\min} -Bestimmung.

Kultur	Zeitpunkt der Probennahme	Probennahmetiefe (cm) ¹
Wintergetreide, Raps	kurz vor Vegetationsbeginn	0–30, 30–60, 60–90
Sommergetreide		0–30, 30–60, 60–90
Rüben ²	4- bis 6-Blattstadium	0–30, 30–60, 60–90
Mais ²	5- bis 6-Blattstadium (nur voll entwickelte Blätter zählen!)	0–30, 30–60, 60–90
Kartoffeln	kurz vor der Pflanzung	0–30, 30–60

¹ In der Praxis wird die Beprobung z. T. nur noch bis auf 60 cm Bodentiefe vorgenommen. Dabei sind an diese Probennahmetiefe angepasste Sollwerte für die Bestimmung der N-Gaben zu verwenden. Diese sind bei den entsprechenden Beratungsdiensten oder Bodenlabors erhältlich.

² Die N_{\min} -Methode liefert nur bei geringer N-Düngung (höchstens 40 kg N/ha) kurz vor oder zur Saat beziehungsweise Pflanzung zuverlässige Ergebnisse.

Tabelle 19 | Stickstoffdüngung im Getreidebau aufgrund des N_{\min} -Gehalts des Bodens.

Kultur	Erste N-Gabe	Zweite N-Gabe ¹	Dritte N-Gabe ^{1,2}
	kg N/ha		
Winterweizen	120 – N_{\min}	30	40
Sommerweizen, Dinkel	110 – N_{\min}	30	40
Wintergerste	80 – N_{\min}	30	40
Wintertriticale	90 – N_{\min}	30	40
Sommergerste, Winterroggen, Sommertriticale	80 – N_{\min}	30	30
Hafer	100 – N_{\min}	30	30

Die oben stehenden Empfehlungen gelten nur unter folgenden Voraussetzungen:

- Ertragspotenzial des Standortes: den Angaben in Tabelle 9 entsprechend oder höher
- Risiko der Lagerung minimal (eventuell Einsatz von Wachstumsregulatoren)
- Ertragsausfälle durch Krankheiten & Schädlinge minimal (Sortenwahl, Anbautechnik, Fruchtfolge, eventuell Einsatz von Pflanzenschutzmitteln)
- OS-Gehalt des Bodens unter 5 %, pflanzennutzbare Gründigkeit des Bodens über 70 cm.

Bei speziellen Fällen sind Abzüge vorzunehmen (die Abzüge sind nicht additiv, der maximale Abzug pro Gabe beträgt 30 kg N/ha):

Korrekturgrund	Erste N-Gabe	Zweite N-Gabe	Dritte N-Gabe
	kg N/ha		
mehrfährige Kunstwiese oder Naturwiese als Vorfrucht	-20	-10	-20
Boden mit 5–20 % organischer Substanz	-10	-20	-20
pflanzennutzbare Gründigkeit des Bodens unter 70 cm oder geringes bis mittleres Ertragspotenzial des Standortes (Grenzlagen des Ackerbaus)	-10	-10	-20
genereller Verzicht auf Wachstumsregulatoren	-10 ³ bis -20 ⁴	-10	0

Die Angaben zur Aufteilung der N-Düngung sowie zu den maximalen Mengen pro Gabe befinden sich in Tabelle 26.

¹ In Abhängigkeit der allgemeinen Wachstumsbedingungen und der Entwicklung der Kulturen können diese N-Gaben um 10 kg N/ha reduziert oder erhöht werden.

² Bei stärkerem Krankheitsbefall ist auf die dritte N-Gabe zu verzichten.

³ Gerste, Triticale, Roggen.

⁴ Weizen, Dinkel, Hafer.

Tabelle 20 | Stickstoffdüngung von Hackfrüchten aufgrund des N_{\min} -Gehaltes des Bodens (Probennahmetiefe 0–90 cm).

Kultur	Erste N-Gabe (kg N/ha)	Zweite N-Gabe ¹ (kg N/ha)
Mais	0–30	$N_{\min} > 120$: 200 – N_{\min} $N_{\min} < 120$: 180 – N_{\min}
Zucker- und Futterrüben	0–30	180 – N_{\min}
Kartoffeln für Speisezwecke und technische Verarbeitung	200 – N_{\min} (bei Pflanzung)	
Früh- und Pflanzkartoffeln	180 – N_{\min} (bei Pflanzung)	
Winterraps	0–40 (bei Saat)	160 – N_{\min}

Korrekturen für erhöhten OS-Gehalt des Bodens und niedriges Ertragspotenzial des Standortes:

OS-Gehalt des Bodens 5–20 %	0 bis -30	-20 bis -40
geringes bis mittleres Ertragspotenzial des Standortes	0	-20 bis -40

Für eine eventuelle N-Nachwirkung von Zwischenkulturen, Gründüngung oder Hofdünger sind keine Korrekturen vorzunehmen; diese N-Nachwirkung wird bei der Bestimmung des N_{\min} -Gehaltes des Bodens grösstenteils erfasst.

Die Angaben bezüglich Aufteilung der N-Gaben und Höchstmenge pro Einzelgabe in Tabelle 26 sind zu beachten. Die erste N-Gabe erfolgt in der Regel zur Saat oder Pflanzung; sie kann jedoch bei hoher N-Nachlieferung durch die Vorkultur und/oder bei generell hohem N-Mineralisierungspotenzial des Standorts auch weggelassen werden. Die zweite Gabe wird rasch nach Empfang der Ergebnisse der N_{\min} -Analyse verabreicht (Termin für die Probennahme: vgl. Tabelle 18).

¹ Eine Aufteilung in zwei Teilgaben ist zu empfehlen, insbesondere auf Böden mit einer pflanzennutzbaren Gründigkeit von weniger als 70 cm sowie in Gebieten mit höheren Niederschlägen (mehr als 260 mm in der Periode April bis Juni). Je nach Witterung und Wachstumsverhältnissen sind die Teilgaben im Abstand von zwei bis vier Wochen auszubringen.

Die N_{\min} -Messung berücksichtigt die spezifischen Eigenschaften der Parzelle und die klimatischen Verhältnisse direkt, da die Auswirkungen der verschiedenen Faktoren, die bei der Methode der korrigierten Normen einbezogen werden, bei dieser Messung bereits enthalten sind. Zwar vereinfacht diese Methode die Berechnung der optimalen N-Menge, sie vernachlässigt aber die Auswirkungen dieser Faktoren nach dem Zeitpunkt der Messung. Um diesem Aspekt Rechnung zu tragen, werden wie bei der Methode der korrigierten Normen Korrekturfaktoren angewendet. Die Zahl dieser Faktoren ist allerdings begrenzt und es werden nur negative Korrekturen einbezogen (Tabellen 19 und 20). Für Raps konnten die Ergebnisse durch die Einführung eines neuen Korrekturfaktors verbessert werden, der den Zustand von Raps zum Zeitpunkt der N_{\min} -Probennahme berücksichtigt (siehe Kapitel 3.1.3).

Die N_{\min} -Bestimmung berücksichtigt den in verschiedenen Bodenschichten enthaltenen N in Form von Nitrat- ($N-NO_3$) oder Ammonium-Stickstoff ($N-NH_4$). Für eine sichere Anwendung der N_{\min} -Methode ist einigen Punkten besondere Beachtung zu schenken. So müssen Zeitpunkt und Tiefe der Probennahme beachtet werden (Tabelle 18). Angesichts der möglichen Variationen der Bodeneigenschaften müssen mindestens zehn bis zwölf Einstiche pro Parzelle vorgenommen werden, damit die Stichprobe repräsentativ ist. Der Anteil der Steine in den Proben muss objektiv abgeschätzt werden. Die Proben müssen dem Labor unverzüglich und gut vor Erwärmung geschützt in einer Kühltasche oder gefroren übergeben werden. Die Ergebnisse werden in kg $N-NO_3$ und kg $N-NH_4/ha$ ausgedrückt. Von der Verwendung von Schnelltests zur Bestimmung von N_{\min} des Bodens wird abgeraten, auch wenn sie bestätigt sind, weil diese Tests zu ungenau sind.

3.1.3 Andere Steuerungsinstrumente für die Stickstoffdüngung

3.1.3.1 Methode der prognostizierten Bilanz

Die Methode der prognostizierten Bilanz strebt ein Gleichgewicht zwischen dem N-Bedarf der Kultur und dem durch Düngung und Boden zur Verfügung gestellten N an (CO-MIFER 2013). Dazu sind eine präzise Beurteilung des N-Bedarfs der Kultur für einen bestimmten Ertrag sowie eine Schätzung der N-Menge, die der Kultur vom Boden während des Wachstums zur Verfügung gestellt wird, erforderlich. Der mineralische N des Bodens (N_{\min}) kann geschätzt oder gemessen werden, je nach methodischem Ansatz und verfügbaren Mitteln. Diese Methode bietet eine interessante Möglichkeit, da sie es ermöglicht, die vielfältigen, in der Praxis auftretenden Situationen zu berücksichtigen, und selbst während der Vegetationsperiode für aufgeteilte Düngergaben angewendet werden kann (Schvartz *et al.* 2005). Die Methode wird jedoch selten eingesetzt, weil sie einen Kompromiss zwischen einer einfachen Anwendung (Nutzung von Tabellen mit Referenzwerten oder N_{\min} -Methode) und einer komplexen Anwendung (Nutzung eines Simulationsmodells) darstellt (Burns 2006). Zwei Probleme erschweren das Aufstellen einer Bilanz: (i) die präzise Quantifizierung des N, der durch den Boden geliefert wird, und (ii) die Einschätzung des N-Bedarfs aus-

gehend von einem *a priori* festgesetzten Ertragsziel, das sich während der Vegetationsperiode verändern kann. Ein dynamisches Modell, das Anpassungen im Verlaufe der Vegetationsperiode zulässt, wäre deshalb präziser und besser geeignet.

Gegenwärtig lässt sich diese Methode unter den schweizerischen Bedingungen nur für Zuckerrüben nutzen. Mit einem Online-Tool kann eine prognostizierte Bilanz mit Empfehlungen und relativ detaillierten individuellen Daten erstellt werden. Das Tool lässt sich über die Website der Schweizerischen Fachstelle für Zuckerrübenbau aufrufen: http://www.liz-online.de/fileadmin/user_upload/funktions-html/npro/npro.htm.

3.1.3.2 Simulationsmodelle

Dynamische Simulationsmodelle prüfen die Auswirkungen der Witterung, des Bodens, der Anbaumethoden und der Interaktionen zwischen diesen drei Variablen auf die Produktion der Kulturen und auf die Umwelt. Diese Modelle können automatisch den Einfluss der Wechselwirkungen zwischen Pflanze und Boden auf N-Angebot und N-Bedarf während des Wachstums berücksichtigen. Die Empfehlungen können auch auf die Boden- und Klimabedingungen der Parzelle abgestimmt werden, da diese Modelle Daten zur Bodenart, zur Anbaumethode und zu den klimatischen Bedingungen berücksichtigen. Solche Simulationsmodelle haben ein grosses Potenzial. Wegen der Unsicherheiten bezüglich der betrachteten Parameter und der Gleichungssysteme sind diese dynamischen Modelle jedoch oft ungenau (Naud *et al.* 2008). Die Entwicklung mehrerer Modelle in Europa zeigt das wachsende Interesse an dynamischen Simulationsmodellen. Zu diesen vielversprechenden dynamischen Modellen gehört auch die französische Software AzoFert® (Machet *et al.* 2003), die auf einer vollständigen Bilanzierung von N_{\min} beruht und die Entwicklung des N-Angebots und des Pflanzenwachstums einbezieht. Das Software-Konzept sieht eine Anpassung an die unterschiedlichen Situationen des Anwenders betreffend Boden, klimatische Verhältnisse und Anbausystem vor. Die Prüfung der Leistung dieser Software unter schweizerischen Bedingungen mit einer im Norden Frankreichs verwendeten Version von AzoFert® hat gezeigt, dass sie eine ausreichend genaue Vorhersage der optimalen N-Menge liefert, die der Prognose nach der Methode der korrigierten Normen oder nach der N_{\min} -Methode mindestens ebenbürtig ist. In einem anderen schweizerischen Kontext, namentlich in Bezug auf klimatische, bodenkundliche und anbautechnische Bedingungen, vermag das Werkzeug sein Potenzial wenig überraschend nicht auszuschöpfen (Maltas *et al.* 2015).

3.1.3.3 Instrumente zur Entscheidungshilfe

Trotz aller Bemühungen, das N-Angebot des Bodens so präzise wie möglich zu schätzen, bleibt der mit einer gewissen Unsicherheit verbundene Vorhersagecharakter einer Bilanz oder einer prognostizierten Norm bestehen. Mit ergänzenden Instrumenten können Variationen aufgrund klimatischer und anderer Faktoren während der Vegetationsperiode berücksichtigt werden. Gemäss Schvartz *et al.* (2005) zeigen Feldversuche, dass mit Hilfe von Me-

thoden wie JUBIL®, Hydro N-Tester, Héliotest und doppelte Saaddichte die Zuverlässigkeit der prognostizierten N-Bilanz in Frankreich verbessert werden kann. Diese ergänzenden Instrumente sind jedoch auf spezifische Kulturen zugeschnitten und können nicht einfach für eine Anwendung bei allen Ackerkulturen verallgemeinert werden.

Düngungsfenster (markierte Fläche von etwa einer Are) mit reduzierter N-Düngung (–40 kg N/ha) oder keiner N-Düngung können als Entscheidungs- und Kontrollinstrument gute Dienste leisten. Dabei ist für jede Einzelgabe ein neues Fenster anzulegen. Der Vergleich zwischen den Beständen inner- und ausserhalb des Düngefensers gibt insbesondere im Getreidebau Hinweise zur Optimierung der folgenden N-Gabe. Ein etwas modifiziertes Konzept wird für Sonnenblumen angewendet. Bei *Héliotest* (Terres Inovia) wird ein zur Saat gedüngter Streifen mit der übrigen, ungedüngten Parzellenfläche visuell verglichen. Vom 6- bis 14-Blattstadium werden die unterschiedlich gedüngten Pflanzen beobachtet (Farbe, Pflanzhöhe, Bestandesdichte). Aufgrund des Stadiums, bei dem Unterschiede auftreten, wird die nötige zusätzliche N-Gabe geschätzt. Je früher die visuellen Unterschiede auftreten, desto grösser dürfte der N-Mangel sein. Aufgrund des Nachlieferungsvermögens des Bodens und des Bedarfs der Kultur (bei der Reife werden 4,5 kg N pro Tonne produzierter Körner von den Pflanzen aufgenommen) kann nach der Methode der korrigierten Normen die erforderliche N-Menge berechnet werden, und zwar in Abhängigkeit vom Stadium, bei dem die visuellen Unterschiede aufgetreten sind, und von der Ertragsersparnis (Pellet und Grosjean 2007).

Doppelte Saaddichte: Diese Methode, die im Getreidebau eingesetzt wird, basiert auf dem Auftreten eines Mangels in einer Kontrollparzelle mit doppelter Saaddichte. Dabei wird zum Zeitpunkt der Saat eine kleine Fläche festgelegt, auf der mit doppelter Dichte gesät wird. Es lässt sich annehmen, dass bei der doppelten Dichte mehr N entzogen wird als bei normaler Dichte. Der im Boden zur Verfügung stehende N wird also schneller erschöpft sein. Dies führt dazu, dass auf der Kontrollfläche N-Mangel (Gelbfärbung der Blätter) früher auftritt als bei der Fläche mit einfacher Saaddichte. Ab diesem Zeitpunkt wird die erste N-Gabe verabreicht. Bei gleich hoher N-Gabe in der Normal-Saat und der doppelt gesäten Kontrollparzelle nimmt man an, dass auf letzterer der N-Mangel erneut früher eintritt. Dadurch kann der Zeitpunkt für die zweite N-Gabe festgelegt werden (Limaux *et al.* 1999).

Pflanzensaftanalyse: Diese Methode misst mit Hilfe von Schnelltests (Nitrachek, Jubil® oder andere) den Nitratgehalt des Pflanzensaftes. Im Getreidebau wird dazu zu be-

stimmten Zeitpunkten Pflanzensaft an der Halmbasis entnommen. Dank einer sortenspezifischen Eichung können diese Resultate wertvolle Hinweise zur Bemessung der N-Gaben geben (Pellet 2000a & b).

Chlorophyllmessungen: Bei der Chlorophyllmessung mit einem Schnelltest (N-Tester; Yara, 2008) wird die Farbin-tensität der Blätter gemessen, um den Ernährungszustand der Pflanzen zu bestimmen. Dazu ist eine sortenspezifische Eichung erforderlich. Die Farbe der Blätter wird aber auch durch andere Faktoren als die N-Versorgung (z. B. S-Versorgung) beeinflusst. Dies erschwert eine zuverlässige Interpretation der Messwerte.

Farmstar: Farmstar ist ein weiteres, noch aktuelleres Instrument, das von Astrium (Airbus Defence & Space) und vom pflanzenbaulichen Institut ARVALIS (Frankreich) entwickelt wurde und auf Satellitenbildern beruht. Es schätzt den Chlorophyllgehalt der Pflanzendecke, der mit dem Blattflächenindex (LAI) korreliert ist, indem Messungen mit Sensoren durchgeführt werden, die sich an Bord von Satelliten befinden. Die gesammelten Daten mit räumlicher Zuordnung sind sehr präzise und werden für Modelle verwendet, die zwei landwirtschaftliche Parameter berechnen: (i) die Biomasse und (ii) den N-Status der Pflanzendecke. Für die Festlegung der N-Düngung erfolgt die Diagnose zu Beginn des Schossens (April). Die Empfehlung wird in Form einer Karte zu jeder Parzelle geliefert, auf der die Variabilität der empfohlenen Düngermenge innerhalb der Parzelle sichtbar ist, sowie eine durchschnittliche Düngermenge für die gesamte Parzelle für Landwirtschaftsbetriebe, welche die Ausbringung nicht variieren können.

Réglette Azote Colza (Terres Inovia): Mit dieser Methode lässt sich die N-Düngermenge für Raps im Frühling berechnen, wobei der im Herbst bereits aufgenommene N mit Hilfe einer Wägung der oberirdischen Pflanzenteile am Ende des Winters berücksichtigt wird. Diese Methode ermöglicht eine deutliche Reduktion der N-Düngung von Rapskulturen, die sich vor dem Winter bereits stark entwickelt haben, ohne den Ertrag zu gefährden. Das Werkzeug steht im Internet gratis zur Verfügung (regletteazotecolza.fr). Für eine allgemeine Anwendung ist eine Abstimmung auf die Gegebenheiten des Bodens und die klimatischen Verhältnisse der Schweiz erforderlich (Micheneau *et al.* 2016).

3.2 Phosphor-, Kalium- und Magnesiumdüngung

Im Gegensatz zur N-Düngung beruht die Düngung von Ackerkulturen mit P, K und Mg auf zwei wichtigen Kriterien: (i) der Nährstoffentzug durch die Kultur und (ii) dem Ergebnis der Bodenuntersuchung.

Entzug

$$\frac{\text{Referenzertrag} \times \text{Konzentration in der Pflanze}}{(\text{Düngungsnorm} \times \text{Korrektur Boden}) - \text{Rückstände Vorjahr}} \times \text{Korrektur Kultur} = \text{Düngungsnorm}$$

Abbildung 8 | Vorgehen zur Berechnung der Düngungsnorm für P, K und Mg.

Ausserdem werden das Nährstoffaneignungsvermögen der Kulturen und die Ernterückstände des Vorjahres berücksichtigt (Abbildung 8).

3.2.1 Bestimmung der Düngungsnorm

Die Grundlage für die Abschätzung der Düngung mit P, K und Mg ist der Bedarf der Kultur, das heisst der Entzug von P, K und Mg (Tabelle 9). Dieser Entzug wird durch ein Ertragsziel (Referenzertrag) und die Nährstoffkonzentration der geernteten Pflanzenprodukte (Anhang 1) bestimmt. Um genetische Verbesserungen der Kulturen und die Entwicklung der Anbautechniken zu berücksichtigen, ist es sinnvoll, die Referenzerträge bei jeder Ausgabe dieses Dokuments zu aktualisieren. Auch die Nährstoffkonzentration der verschiedenen Produkte der Ackerkulturen muss regelmässig mit Hilfe von Düngungsversuchen bei optimalen Bedingungen, und nicht anhand von Ergebnissen der Praxis, regelmässig geprüft werden.

Das Nährstoffaneignungsvermögen unterscheidet sich je nach Pflanzenart. Selbst wenn die Menge eines im Boden verfügbaren Nährstoffs theoretisch ausreicht, den Bedarf der Pflanze zu decken, sind bestimmte Kulturen nicht in der Lage, die für ihr Wachstum notwendigen Mengen zu entnehmen, während andere Kulturen mehr als die ei-

Tabelle 21 | Korrekturfaktoren der Normdüngung für P, K, Mg nach Kultur.

Kultur	P	K	Mg
Wintergetreide	1,0	0,8	1,0
Mais	1,2	1,0	1,0
Kartoffeln	1,2	1,2	1,2
Zucker- und Futterrüben	1,0	0,8	1,0
Körnerleguminosen	1,0	1,2	1,0
Zwischenfrüchte	1,0	0,8	1,2
übrige Kulturen	1,0	1,0	1,0



Feld mit Langzeitversuch zur P- und K-Düngung (Foto: Agroscope).

gentlich erforderliche Menge aufnehmen können. Der aktuelle Ansatz der GRUD legt die Klasse «genügende Bodenversorgung» unabhängig von der Kultur fest. Aus diesem Grund muss ein Korrekturfaktor angewendet werden, um den Bedarf und das Aneignungsvermögen der Kulturen zu berücksichtigen. Die in Tabelle 21 vorgeschlagenen Korrekturfaktoren wurden empirisch auf der Grundlage von Expertenwissen festgelegt.

3.2.2 Korrektur der Düngungsnorm in Abhängigkeit von Bodenanalysen

Mit Bodenanalysen lassen sich die Düngungsnormen für P, K und Mg in Abhängigkeit der Verfügbarkeit des betreffenden Nährstoffs im Boden anpassen. Bei P beispielsweise ist der tatsächlich verfügbare Anteil stets ein etwas theoretischer Begriff, weil es keine allgemeingültige Methode zur Bestimmung des verfügbaren P gibt, bei der gleichzeitig die Vielfältigkeit des Bodens, der klimatischen Bedingungen und der Kulturen präzise erfasst wird (Demaria *et al.* 2005; Frossard *et al.* 2004). Die Mehrzahl der Länder konzentriert sich auf eine begrenzte Anzahl (in der Regel zwei) Extraktionsmittel und auf eine Interpretation der Resultate, die für die häufigsten Bodeneigenschaften gilt. Seit der ersten Veröffentlichung der GRUD wurde die Versorgungsklasse des Bodens aufgrund der Extraktion mit CO₂-gesättigtem Wasser festgelegt (Dirks und Scheffer 1930). Seit 1995 ist die AAE10-Extraktionsmethode (Agroscope 1996) die neue offizielle Standardmethode.

3.2.2.1 Korrektur der P- und K-Normdüngung aufgrund der CO₂-Methode

Die Anpassung der Normdüngung an den Nährstoffvorrat im Boden (Versorgungsklasse) wird für die CO₂-Methode mit Hilfe der Korrekturfaktoren der Tabellen 10 und 11 des Moduls 2/ Bodeneigenschaften und Bodenanalysen vorgenommen. Diese Korrekturfaktoren gelten für die meisten Böden des schweizerischen Mittellands, der Voralpen und des Jura, die einen OS-Gehalt von weniger als 10 % aufweisen. Für Böden mit einem OS-Gehalt über 10 % sind die Daten der Tabelle 9 von Modul 2 zu verwenden. Die Erfahrung hat gezeigt, dass schluffige Böden aus Bündner-Schiefer-Verwitterung sowie saure, sandige Böden im Kanton Tessin eine spezielle Beurteilung für P benötigen. Die entsprechenden Korrekturfaktoren für die P-Düngung sind in Tabelle 10 von Modul 2 enthalten.

3.2.2.2 Korrektur der Mg-Normdüngung aufgrund der CaCl₂-Methode

Die Interpretation der Analyseergebnisse beziehungsweise die Korrektur der Normdüngung ist wie bei P und K vom Tongehalt des Bodens abhängig. Aufgrund der Eigenschaften des Extraktionsmittels (Austauschlösung) steigt die optimale Versorgung des Bodens (Korrekturfaktor 1,0) mit zunehmendem Tongehalt an (Modul 2, Tabelle 12).

3.2.2.3 Korrektur der P-, K- und Mg-Normdüngung aufgrund der AAE10-Methode

Die Anpassung der Düngungsnorm für P, K und Mg erfolgt mit Hilfe der Korrekturfaktoren der Tabellen 16 bis 18 von Modul 2 aufgrund des P-, K- beziehungsweise Mg-Gehalts

Tabelle 22 | Kriterien zur Beurteilung des Risikos eines Schwefelmangels und zur Abschätzung des Schwefelbedarfs der Kulturen.

Kriterium	Ausprägung des Kriteriums	Punkte
OS-Gehalt des Bodens (%)	< 2	1
	2–5	3
	> 5	5
Tongehalt des Bodens (%)	< 10	1
	10–30	3
	> 30	5
Skelettgehalt des Bodens (Volumen-%)	> 30	1
	10–30	3
	< 10	5
pflanzennutzbare Gründigkeit des Bodens (cm)	10–30	1
	31–70	5
	> 70	7
Niederschläge von Oktober (Vorjahr) bis März (mm)	> 540	1
	370–540	3
	< 370	5
Hofdüngereinsatz	nie	1
	weniger als ein Mal in drei Jahren	3
	mindestens ein Mal in drei Jahren	5
Abweichung der effektiven gedüngten von der vorgesehenen Stickstoffdüngermenge ¹	Erhöhung > 40 kg N/ha	1
	empfohlene Menge +/- 40 kg N/ha	3
	Reduktion > 40 kg N/ha	5

Die Punkte für jedes einzelne Beurteilungskriterium sind zu addieren und die Summe mit den Angaben in Tabelle 23 zu vergleichen.

¹ N-Düngermenge abgeleitet mit Hilfe der Schätzmethode oder der N_{\min} -Methode.

sowie des Tongehalts des Bodens. Für Böden mit einem OS-Gehalt von über 10 % sind die Angaben in Tabelle 9 von Modul 2 zu beachten.

3.3 Schwefel

Der S-Bedarf der Kulturen wird heute hauptsächlich durch Ernterückstände, Hof- und Recyclingdünger sowie Mineraldünger gedeckt. In den Jahrzehnten vor 1980 kam es zusätzlich zu einem wesentlichen S-Eintrag über die Luft als Folge der Verbrennung von Kohle und Erdölprodukten. Die Einträge bewegten sich in einer Grössenordnung von 30 bis 50 kg S/ha/Jahr. In der Nähe von städtischen Gebieten konnten sie bis zu 100 kg S/ha/Jahr erreichen. Dadurch wurde auch die S-Versorgung anspruchsvoller Kulturen (Tabelle 23) gesichert. Der Ersatz der Kohle durch Erdöl und vor allem der Beginn der Entschwefelung der Erdölprodukte in den 1980er-Jahren führten zu einer starken Reduktion des S-Eintrages durch den Regen. Als Folge davon ist S-Mangel heute bei bedürftigen Kulturen nicht selten zu beobachten.

3.3.1 Vorgehen zur Abschätzung des Risikos von Schwefelmangel

Der weitaus grösste Teil des S-Vorrates im Boden (> 95 % von S_{tot}) liegt in organischer Form vor (organische Substanz, organische Dünger). Die Pflanze nimmt S in Form

von Sulfat (SO_4^{2-}) auf. Durch die Berücksichtigung der Standorteigenschaften (Boden, Pflanze und Klima) lässt sich abschätzen, ob das Potenzial einer gegebenen Parzelle ausreicht, um den S-Bedarf der angebauten Pflanzen abzudecken. Als Grundlage dienen dabei (i) der OS-, Ton- und Skelettgehalt, (ii) die Gründigkeit des Bodens, (iii) die Niederschläge von Oktober bis März sowie (iv) die Häufigkeit des Hofdünger- und N-Düngereinsatzes. Durch einen Vergleich des Risikos eines S-Mangels (Tabelle 22) mit dem S-Entzug der Kulturen (Tabelle 23; Pellet *et al.* 2003a & b) lässt sich die Notwendigkeit einer S-Düngung abschätzen.

3.3.2 Form und Zeitpunkt der Schwefeldüngung

Da sich das von den Pflanzen aufnehmbare Sulfat im Boden sehr ähnlich wie Nitrat verhält, ist eine gezielte S-Düngung nach den Regeln der mineralischen N-Düngung durchzuführen. Die Grundversorgung des Bodens erfolgt oft durch Hofdünger (1 t Stallmist oder 1 m³ Rindervollgülle enthält etwa 0,3–0,4 kg S). Eine gezielte kulturspezifische S-Düngung erfolgt am sichersten durch die Verwendung schwefelhaltiger N-Dünger (Modul 4/ Eigenschaften und Anwendung von Düngern, Tabelle 13). Mineralische K-, Mg- oder Mehrnährstoff-Dünger mit ausreichendem S-Anteil sind ebenfalls gut geeignet (Modul 4). Bei bereits sichtbaren Mangelsymptomen kann eventuell eine Blattdüngung mit Magnesiumsulfat (Bittersalz) kurzfristig den S-Bedarf der Pflanzen teilweise decken.

Tabelle 23 | Schwefelentzug einiger Kulturen sowie Bemessung der Schwefeldüngung.

Kultur	S-Entzug (kg/ha)	Bemessung der S-Düngung nach Angebotspunkten (Tabelle 22) (kg S/ha)		
		< 15 Punkte	15–23 Punkte	> 23 Punkte
starkbedürftige Kulturen				
Raps	80	60	35	0
mittelbedürftige Kulturen		< 14 Punkte	14–20 Punkte	> 20 Punkte
Zucker- und Futterrüben	35	25	15	0
Luzerne	30	20	15	0
Mais	28	20	15	0
wenigbedürftige Kulturen		< 13 Punkte	13–18 Punkte	> 18 Punkte
Weizen	23	20	10	0
Gerste	20	10	0	0
Kartoffeln	20	10	0	0
übrige Kulturen	< 20	0	0	0

Tabelle 24 | Bemessung der B- und Mn-Düngung aufgrund von Bodenuntersuchungsergebnissen, der Bodeneigenschaften und der Bedürftigkeit der Kulturen.

Nährstoff	Versorgungs-kategorie	Bezeichnung	Gehalt des Bodens (mg/kg)	OS-Gehalt des Bodens > 10 %					
				OS-Gehalt des Bodens < 10 %		saure und schwach saure Böden		neutrale und alkalische Böden	
				wenig bedürftige Kulturen	bedürftige Kulturen ¹	wenig bedürftige Kulturen	bedürftige Kulturen ¹	wenig bedürftige Kulturen	bedürftige Kulturen ¹
B	A	arm	< 0,6	1,5–2,0 kg B/ha ²	2,5–3,0 kg B/ha ²	1,5–2,0 kg B/ha ²	2,5–3,0 kg B/ha ²	1,5–2,0 kg B/ha ²	2,5–3,0 kg B/ha ²
	B	mässig	0,6–1,5	–	1,5–2,0 kg B/ha ²	–	2,0–2,5 kg B/ha ²	–	2,0–2,5 kg B/ha ²
	C D E	genügend reich sehr reich	1,6–2,0 2,1–5,0 > 5,0	–					
			austausch-bar	leicht reduzierbar					
Mn	A	arm	< 2	–	20–40 kg Mn/ha ³	30–50 kg Mn/ha ³	40–60 kg Mn/ha ³	10–15 kg Mn/ha ³	
	B	mässig	> 2	< 50	20–40 kg Mn/ha ³		20–40 kg Mn/ha ³	10–15 kg Mn/ha ³	
	C	genügend	> 2	> 50	–				

¹ B: Rüben, Raps, Sonnenblumen. Mn: Getreide, Leguminosen, Rüben.

² Bodendüngung: B kann als Borax gestreut, als Borsäure gespritzt (auf den Boden!) oder in Form von ausreichend borhaltigen Mehrnährstoffdüngern ausgebracht werden.

³ Eine Bodendüngung ist unter diesen Bodenverhältnissen meistens wirkungslos. Vorzuziehen ist die Blattdüngung (in 600 bis 1000 l Wasser pro ha). Oft ist eine mehrmalige Anwendung dieser Mengen notwendig. Anstelle von Mn-Sulfat (MnSO₄) können auch andere für die Blattdüngung geeignete Mn-Dünger eingesetzt werden (Anwendungsvorschriften beachten).

3.4 Bor, Mangan und andere Spurenelemente

Eine regelmässige Düngung mit Spurenelementen ist unter schweizerischen Verhältnissen in der Regel nicht notwendig. Die meisten Böden enthalten aufgrund der Zusammensetzung des Muttergesteins ausreichende Mengen an Spurenelementen, um optimale Erträge von einwandfreier Qualität zu erzielen. Unter speziellen Bedin-

gungen ist eine Düngung mit Bor (B) oder Mangan (Mn) notwendig. Insbesondere in alkalischen Böden ist eine B-Düngung von borbedürftigen Kulturen (Rüben, Raps, Sonnenblumen) in der Grössenordnung von 1,5 bis 2 kg B/ha empfehlenswert. Die Mn-Verfügbarkeit ist in alkalischen, humusreichen Böden stark eingeschränkt. Unsachgemässe Kalkgaben können auch zu ernsthaften Schwierigkeiten bezüglich der B- und Mn-Versorgung der Pflanzen führen.

In bestimmten Fällen ist es unumgänglich, dass der B- und Mn-Gehalt des Bodens bestimmt wird. Für die Interpretation der Ergebnisse dieser Analysen und die Bemessung der B- und Mn-Düngung kann Tabelle 24 gebraucht werden. Die Untersuchung des Bodens auf weitere Spurenelemente ist nur ausnahmsweise nach Rücksprache mit einem Beratungsdienst oder Agroscope angezeigt.

4. Ernterückstände

Die Düngungsnormen enthalten stets den Nährstoffbedarf der üblicherweise geernteten Haupt- und der anfallenden Nebenprodukte (Tabelle 9). Wenn die Nebenprodukte (Stroh, Stauden, Stängel, Kraut usw.) bei der Ernte auf dem Feld verbleiben, sind die enthaltenen Nährstoffmengen von der Düngungsnorm der nachfolgenden Kultur abzuziehen. Wie bei den Hofdüngern müssen die gesamten in den Ernterückständen enthaltenen P-, K- und Mg-Mengen (Tabelle 9) im Düngungsplan berücksichtigt werden. Bei der Verwendung der Methode der korrigierten Normen sind die in den Ernterückständen enthaltenen N-Mengen, die der Folgekultur zur Verfügung stehen, gemäss den in Tabelle 13 angegebenen Werten zu berücksichtigen. Bei teilweiser Abfuhr der Nebenprodukte kann der auf dem Feld verbleibende Anteil geschätzt werden.

5. Düngung in der Praxis

Bei der Planung der Düngung auf einem landwirtschaftlichen Betrieb müssen die betriebsspezifischen Eigenheiten berücksichtigt werden. Ein Düngungsplan muss auf die Anforderungen des Betriebstyps (Ackerbaubetrieb, Futterbaubetrieb mit Hofdüngern, gemischter Acker-/Futterbaubetrieb), der Eigenschaften der Böden, der Standortfaktoren der Parzellen (Exposition, Neigung), das Anbausystem (wie konventionell oder biologisch), das Klima usw. abgestimmt werden. Die Kenntnis der realisierbaren Erträge, des Versorgungszustands der Böden sowie der Mengen und Eigenschaften der organischen und mineralischen Dünger ist Voraussetzung für die Erstellung eines Düngungsplans.

5.1 Düngungsplan

Die vielseitigen Anforderungen und Randbedingungen für eine zweckmässige, gezielte, pflanzengerechte und umweltschonende Düngung lassen sich am besten auf der Grundlage eines alljährlich sorgfältig erstellten Düngungsplanes realisieren. Entsprechende Formulare und Informatikprogramme sind bei den landwirtschaftlichen Beratungsdiensten und bei den meisten Laboren für Bodenanalysen erhältlich.

Vorgehen für das Aufstellen des Düngungsplans

1. Festlegen des Bedarfs der anzubauenden Kulturen in Abhängigkeit des Ertrags (Tabelle 9, 10 und 11).
2. Korrektur der Düngung für P, K und Mg (Tabelle 9) gemäss den Ergebnissen der Bodenuntersuchung (Mo-

dul 2/ Bodeneigenschaften und Bodenanalysen, Tabellen 10 bis 18) und Abzug der Nährstoffe aus Ernterückständen der Vorkultur (Tabelle 13).

3. Anpassung der N-Düngungsnorm durch Anwendung der Korrekturfaktoren gemäss der Methode der korrigierten Normen (Tabellen 12 bis 17) oder aufgrund einer Bodenanalyse gemäss der N_{\min} -Methode (Tabellen 18 bis 20).
4. Schätzung des Nährstoffgehalts der Hofdünger (Modul 4/ Eigenschaften und Anwendung von Düngern, Tabelle 6) und der erforderlichen Gaben für jede Kultur.
5. Berechnung der Differenz zwischen dem Bedarf der zu düngenden Kultur und der Nährstoffzufuhr durch Hofdünger.
6. Wahl betriebsfremder Dünger (betriebsfremde Hofdünger, Recyclingdünger, Mineraldünger) und Berechnung der notwendigen Menge zur Deckung der Differenz unter Berücksichtigung ökologischer, bodenkundlicher, pflanzenbaulicher, arbeitstechnischer, wirtschaftlicher und gesetzlicher Aspekte.

Wenn für die Erstellung des Düngungsplans ein Informatikprogramm verwendet wird, ist es wichtig, vorher zu prüfen, ob dieses nach dem oben beschriebenen Ablauf vorgeht. In Tabelle 25 ist ein Beispiel eines Düngungsplans aufgeführt.

5.2 Wahl der Dünger

Die Wahl betriebsfremder Dünger stützt sich in erster Linie auf ihre Eigenschaften hinsichtlich der Ansprüche von Boden und Pflanze, wobei gleichzeitig die technischen Gegebenheiten berücksichtigt werden müssen. Die wichtigsten Kriterien für die Düngerwahl sind die spezifischen Eigenschaften und Ansprüche der verschiedenen Kulturpflanzen, die Eigenschaften des Bodens hinsichtlich der Speicherung der Nährstoffe in verfügbarer Form (pH, organische Substanz, Struktur, Versorgungszustand des Bodens usw.), die erwünschte Wirkungsgeschwindigkeit der Dünger sowie der Gehalt an erwünschten Nebenbestandteilen (Kalk, S, Spurenelemente) und unerwünschten Inhaltsstoffen (Schadstoffe). Die wirtschaftlichen Aspekte sollten nur bei Produkten mit ähnlichen Eigenschaften, die dieselben Anforderungen an die Düngung erfüllen, eine Rolle spielen. Angaben zu Eigenschaften und Wirkungen verschiedener Nährstoffformen und Dünger finden sich in den Tabellen 9 bis 12 des Moduls 4/ Eigenschaften und Anwendung von Düngern.

5.2.1 Getreide

Bei Getreide lässt sich mit flüssigem Dünger, der N sowohl in Form von Nitrat als auch in Form von Harnstoff enthält, eine regelmässige N-Versorgung der Pflanze erreichen. Die Entwicklung dieser Anwendungsmethode wurde durch verschiedene Faktoren gebremst. Sie setzt entsprechende technische Einrichtungen voraus (Speicherung und Ausbringung von Flüssigdünger), und es besteht – je nach Stadium der Kultur und Witterungsbedingungen zum

Tabelle 25 | Beispiel eines Düngungsplans.

Düngungsbeschränkung	keine						
Nutzung	Bezeichnung	Fläche	Ertrag				
Parzelle	Hinter-dem-Wald	1,17 ha					
Vorkultur	Winterweizen, Stroh eingearbeitet	1,17 ha	60 dt/ha				
Zwischenkultur	nicht winterharte Gründüngung, Leguminose	1,17 ha	35 dt/ha				
Hauptkultur	Körnermais trocken	1,17 ha	100 dt/ha				
Bodenanalyse	Ergebnis	Einheit	Methode	Interpretation	Korrekturfaktor		
Jahr	2016						
Ton	20	[%]		mittel, toniger Schluff			
Schluff	70	[%]					
Sand	10	[%]					
pH	6,4	[H ₂ O]		neutral			
OS	4,5	[%]		mittel–hoch			
P	22,7	[mg/kg]	AA-EDTA	mässig	1,2 (Tab. 16, Modul 2)		
K	137	[mg/kg]	AA-EDTA	genügend	1,0 (Tab. 17, Modul 2)		
Mg	112,8	[mg/kg]	AA-EDTA	mässig	1,2 (Tab. 18, Modul 2)		
Bedarf [kg/ha] (+)				N	P	K	Mg
Düngungsnorm Zwischenkultur/Gründünger	(Tabelle 9)			0	0	0	0
Düngungsnorm Hauptkultur	(Tabelle 9)			110	38	195	25
Korrektur Ertrag Hauptkultur	(Tabelle 11)			0	0	0	0
Mineralisierungspotenzial	(Tabelle 12)	mittel bis hoch		–20	0	0	0
Vorkultur	(Tabelle 13)	Gründüngung		–10	0	0	0
Winter- und Frühjahrsniederschläge	(Tabelle 15)	hoch (März–Mai)		30	0	0	0
Hacken	(Tabelle 16)			0	0	0	0
Bedingungen im Frühling	(Tabelle 17)	warmer Frühling		–20	0	0	0
Korrekturfaktor	(gemäss Bodenanalyse)				1,2	1,0	1,2
(1) Summe korrigierter Bedarf				90	46	195	30
Beiträge aus dem Vorjahr [kg/ha] (–)				N	P	K	Mg
Bilanz des Vorjahres	(Werte > 0: Düngerüberschuss)			–	–15	–10	7
N-Nachwirkung	(Tabelle 14)			0	–	–	–
Ernterückstände der Vorkultur	(Tabelle 9)			0	6	62	5
freie Korrektur				0	0	0	0
(2) Summe der Beiträge aus dem Vorjahr				0	–9	52	12
(3) Korrigierter Gesamtbedarf = (1) – (2)				90	55	143	18
Beiträge durch Handelsdünger [kg/ha] (–)		Gabe/ha	N	P	K	Mg	
Ammoniumnitrat 27 %		3,30 dt/ha	89	0	0	0	
Kali-Magnesia (25 % K / 6 % Mg)		5,70 dt/ha	0	0	143	34	
Triplesuperphosphat (20 % P)		2,75 dt/ha	0	55	0	0	
(4) Summe der Düngergaben				89	55	143	34
Zu deckender Saldo = (3) – (4) (Werte > 0: Düngerdefizit)				1	0	0	–16
Bemerkungen							

Zeitpunkt der Ausbringung – das Risiko von Verätzungen sowie – je nach pH-Wert des Bodens – das Risiko von Verflüchtigung. Gegenwärtig wird mit Nachdruck an der Entwicklung von N-Düngern mit verzögerter Freisetzung gearbeitet. Solche Dünger könnten dazu beitragen, dass sich die heute empfohlene Aufteilung von Ammoniumnitrat-Düngern auf mehrere Gaben erübrigen würde (Tabelle 26).

5.2.2 Kartoffeln

Die Kartoffel ist eine säureliebende Pflanze und reagiert daher positiv auf sauer wirkende Düngemittel. Durch die Verwendung von sauer wirkenden Düngern wie zum Beispiel Ammoniumsulfat und/oder K-Sulfat auf gefährdeten Standorten kann der pH des Bodens oftmals etwas günstiger eingestellt werden (Fritsch 2003).

N-Dünger in flüssiger Form oder auf der Basis von Harnstoff ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) sind anfälliger gegenüber der Ammoniakverflüchtigung (NH_3) als Ammoniumnitrat-Dünger (NH_4NO_3). Die unterschiedliche Wirksamkeit dieser drei N-Verbindungen beruht hauptsächlich auf ihrer Anwendungsart. Durch das Einarbeiten des Düngers in den Boden beim Anhäufeln (Dammformung) können Verluste durch Verflüchtigung begrenzt oder sogar vermieden werden. In diesem Fall weisen die drei Formen eine vergleichbare Wirksamkeit auf. Wenn der Dünger dagegen ohne Einarbeitung in den Boden mehrere Tage vor oder nach dem Anhäufeln ausgebracht wird, bietet Ammoniumnitrat den Vorteil, dass insbesondere auch bei fehlenden Niederschlägen kaum Verflüchtigungsverluste auftreten.

Wenn die gesamte Düngermenge bei der Pflanzung oder beim Anhäufeln ausgebracht wird, ist die Verwendung von Harnstoff oder Ammoniumsulfat $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ vorzuziehen, weil diese Formen den N langsamer freisetzen als Ammoniumnitrat.

Bei den K-Düngern haben K-Chlorid und K-Sulfat einen ähnlichen Einfluss auf den Ertrag. K-Chlorid-Dünger reduzieren die bräunliche Verfärbung beim Frittieren und senken auch leicht den Stärkegehalt. Im Gegensatz dazu kann mit einer K-Sulfat-Düngung der Stärkegehalt von Kartoffeln erhöht werden.

Bei den P-Düngern sind leicht lösliche, von der Pflanze gut aufnehmbare P-Formen vorzuziehen (Cohan 2014; Ryckmans 2009).

5.2.3 Mais

Aufgrund ihrer spezifischen und weit in den Herbst reichenden Wachstumszeit kann die Maispflanze organische Dünger, die ihre Nährstoffe langsam freisetzen, gut verwerten. Ebenso kann der aus dem Bodenvorrat mineralisierte N gut genutzt werden.

Unter den organischen Düngern tierischer Herkunft wie Gülle, Stallmist und Jauche kommt der Gülle die grösste Bedeutung zu. Wird Gülle vor der Saat ausgebracht, so



Unterschiedliche Düngungen auf einem Weizenfeld (Foto: Agroscope).

sollte dies möglichst nahe zum Saatzeitpunkt des Mais mit einer anschliessenden Einarbeitung erfolgen, um gasförmigen N-Verlusten vorzubeugen. Auch eine Ausbringung nach der Saat oder in den wachsenden Bestand ist sinnvoll, wenn sich eine sofortige Einarbeitung zwischen den Reihen anschliesst und so gut wie möglich verhindert wird, dass die Blätter mit Gülle benetzt werden, um Ammoniakverluste gering zu halten.

Aber auch Mineraldünger können problemlos – entsprechend dem Bedarf der Kultur und dem Vorrat des Bodens – eingesetzt werden. Bei der Platzierung eines Düngers mit leicht verfügbarem P und N in der Nähe des Samens kann die Jugendentwicklung vor allem in kalten Böden begünstigt werden.

5.3 Zeitpunkt und Aufteilung der Düngergaben

5.3.1 Getreide

Die N-Menge wird gewöhnlich in zwei bis drei Gaben aufgeteilt (Tabelle 26), die in spezifischen Stadien der Pflanzenentwicklung ausgebracht werden (Abbildung 1). Ihre Verwertung hängt von verschiedenen Faktoren ab, namentlich von den Niederschlägen, der Bodenart und der Entwicklung der Kultur. Verschiedene Studien zeigen, dass der Ausnutzungskoeffizient des N im Dünger im Verlaufe der Entwicklung der Kultur zunimmt, von 40–50 % im Stadium der Bestockung auf etwa 80 % beim Erscheinen des Fahnenblattes (Arvalis 2014).

In aktuellen Versuchen wurde gezeigt, dass die N-Menge und ihre Aufteilung einen wichtigen Einfluss auf den Kornertrag und die Proteinsynthese haben (Levy und Brabant 2016). Bei gleicher N-Menge führt eine späte Gabe zum Zeitpunkt der Blüte konsequent zu einem niedrigeren Ertrag als eine frühere Gabe. Eine dritte Gabe erhöht oft den Proteingehalt, was bei der Klasse Top wichtig ist. Bei gleicher N-Gesamtmenge (140 kg N/ha) erhöht eine hohe Gabe zum Zeitpunkt des Erscheinens des Fahnenblattes (80 kg N/ha anstelle von 40 kg N/ha) den Proteingehalt (um 0,4 Prozentpunkte) ohne den Ertrag zu beeinflussen

Tabelle 26 | Optimaler Zeitpunkt und Höchstmenge einzelner Stickstoffgaben für verschiedene Kulturen in Abhängigkeit von Niederschlags- und Bodenverhältnissen.

Kultur bzw. Gruppe von Kulturen	Trockenere Gebiete ¹ oder tiefgründigere Böden ²		Feuchtere Gebiete ³ oder flachgründigere Böden ⁴	
	Zeitpunkt bzw. Entwicklungsstadium der Kultur	maximale N-Gabe (kg N/ha)	Zeitpunkt bzw. Entwicklungsstadium der Kultur	maximale N-Gabe (kg N/ha)
Getreide, Hirse und Mais				
Wintergetreide	Herbst (vor/nach der Saat)	0	Herbst (vor/nach der Saat)	0
	Ende Winter bis Vegetationsbeginn	60	Vegetationsbeginn	60
	Beginn des Schossens bis ein Knoten	80	ein Knoten	70
	Erscheinen des letzten Blatts	80	Erscheinen des Fahnenblattes bis Ährenschieben	80
	keine dritte Gabe für Biskuitweizen		keine dritte Gabe für Biskuitweizen	
Sommergetreide	Saat	40	Saat	30
	Bestockung bis Beginn des Schossens	80	drei Blätter bis Beginn der Bestockung	50
	zwei Knoten bis Öffnen der Blattscheide	40	ein Knoten	40
			Erscheinen des letzten Blatts bis Beginn des Ährenschiebens	40
Hirse	Saat	40	Saat	40
	Bestockung	40	Bestockung	40
Körnermais und Silomais	Saat	80	Saat	40
	sechs bis acht Blätter	80	vier bis sechs Blätter	40
			sechs bis acht Blätter	80
Grünmais	Saat	60	Saat	40
	vier bis sechs Blätter	30	vier bis sechs Blätter	40
Knollen und Wurzelfrüchte				
Kartoffeln Speisezwecke und techn. Verarbeitung	Pflanzung	80	Pflanzung	40
	Auflaufen bis Staudengrösse 10 cm	80	Stauden 10–15 cm	80
			kurz vor dem Schliessen der Stauden in der Reihe	40
Frühkartoffeln	Pflanzung	60	Pflanzung	40
	Auflaufen bis Staudengrösse 10 cm	60	Stauden 5–10 cm	80
Pflanzkartoffeln	Pflanzung	50	Pflanzung	40
	Auflaufen bis Staudengrösse 10 cm	50	Stauden 5–10 cm	60
Zucker- und Futter- rüben	Saat	80	Saat	40
	vier bis sechs Blätter	80	vier bis sechs Blätter	60
			sechs bis acht Blätter	60
Öl- und Faserpflanzen				
Winterraps	Saat	0	Saat	0
	Ende Winter bis Vegetationsbeginn	80	Vegetationsbeginn	80
	Beginn der Streckung	80	Streckung (Pflanzenhöhe 30–40 cm)	80
Sommerraps	Saat	50	Saat	30
	Rosettenbildung bis Beginn der Streckung	80	Rosettenstadium	60
			Streckung (Pflanzenhöhe 30–40 cm)	40
Sonnenblumen	Saat	80	Saat	60
Ölhanf	Saat	40	Saat	40
	Pflanzenhöhe 15–20 cm	40	Pflanzenhöhe 15–20 cm	30
Faserhanf	Saat	50	Saat	40
	Pflanzenhöhe 15–20 cm	70	Pflanzenhöhe 15–20 cm	80

¹ Niederschlagssumme von Januar bis Juni unter 450 mm.

² Speichervermögen an leicht verfügbarem Wasser über 70 mm.

³ Niederschlagssumme von Januar bis Juni über 450 mm.

⁴ Speichervermögen an leicht verfügbarem Wasser unter 70 mm.

Tabelle 26 (Fortsetzung)

Kultur bzw. Gruppe von Kulturen	Trockenere Gebiete ¹ oder tiefgründigere Böden ²		Feuchtere Gebiete ³ oder flachgründigere Böden ⁴	
	Zeitpunkt bzw. Entwicklungsstadium der Kultur	maximale N-Gabe (kg N/ha)	Zeitpunkt bzw. Entwicklungsstadium der Kultur	maximale N-Gabe (kg N/ha)
Öl- und Faserpflanzen				
Öllein	Saat	50	Saat	20
	Pflanzenhöhe 15–20 cm	30	Pflanzenhöhe 15–20 cm	40
Faserlein	Saat	30	Saat	20
	Pflanzenhöhe 15–20 cm	30	Pflanzenhöhe 15–20 cm	40
Chinaschilf	Vegetationsbeginn	40	Vegetationsbeginn	40
Kenaf	Saat	50	Saat	30
	Pflanzenhöhe 15–20 cm	50	Pflanzenhöhe 15–20 cm	60
Übrige Kulturen				
Gründüngung	Saat	40	Saat	40
Tabak Burley	Pflanzung	100	Pflanzung	80
	vier bis sechs Blätter	80	vier bis sechs Blätter	100
Tabak Virginia	Pflanzung	30	Pflanzung	30

¹ Niederschlagssumme von Januar bis Juni unter 450 mm.

² Speichervermögen an leicht verfügbarem Wasser über 70 mm.

³ Niederschlagssumme von Januar bis Juni über 450 mm.

⁴ Speichervermögen an leicht verfügbarem Wasser unter 70 mm.

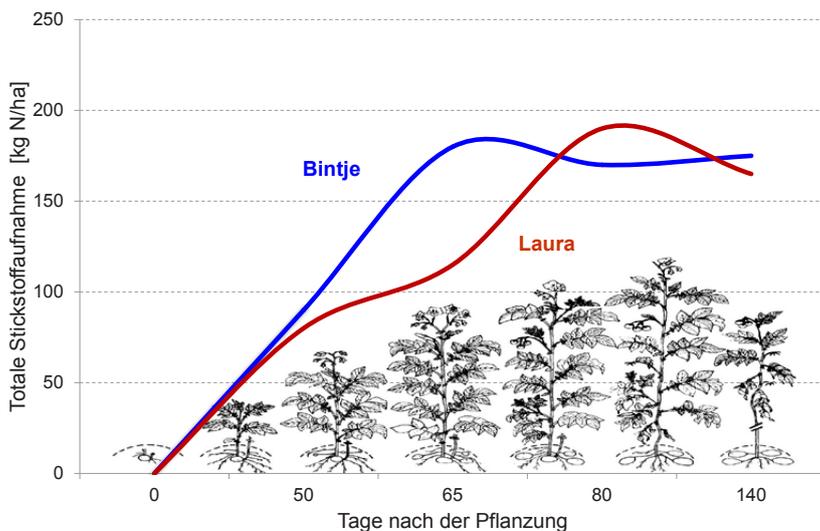


Abbildung 9 | Stickstoff-Aufnahmekurven der Sorten Bintje und Laura bei einer Düngung mit 120 kg N/ha (Sinaj et al. 2014).

(Levy und Brabant 2016). Mit der Wahl der Sorte kann der Proteingehalt von Weizen jedoch am einfachsten beeinflusst werden.

5.3.2 Kartoffeln

Mit einer Aufteilung der N-Menge auf mehrere Gaben, die an den Bedarf der Kultur angepasst werden, lassen sich die Verluste durch Auswaschung begrenzen (Tabelle 26, Abbildung 2). Die letzte Gabe darf allerdings nicht zu spät erfolgen, weil dadurch die Entwicklung des Krauts zu stark gefördert wird, ohne dass dies der Entwicklung der Knollen zugutekommt. Idealerweise findet die letzte Gabe vor der Knollenbildung statt, d. h. wenn die Pflanzen etwa 20 cm hoch sind (BBCH-Code 105). Bei den verschiedenen Sorten ist der Verlauf der N-Aufnahme unterschiedlich. Beispielsweise nimmt die Sorte Laura zu Beginn der Vegetations-

periode weniger N auf als die Sorte Bintje (Abbildung 9), da sie mehr Zeit benötigt, um ihr Wurzelsystem zu entwickeln und die Knollenbildung auszulösen (Sinaj et al. 2014). Dies legt nahe, die Gaben so aufzuteilen, dass der für die Entwicklung erforderliche N der jeweiligen Sorte zum richtigen Zeitpunkt zur Verfügung steht.

Auch die K-Düngung kann in mehrere Gaben aufgeteilt werden, insbesondere bei leichten Böden, bei denen die Gefahr der Auswaschung besteht. In der Praxis wird die Hälfte des K zwischen Januar und März (in Form organischer oder mineralischer Dünger) ausgebracht, die andere Hälfte bei der Pflanzung. Eine ergänzende Gabe kann nach dem Anhäufeln oder sogar bei der Knollenbildung erfolgen.

Um zu verhindern, dass sich der P des Düngers an die feste Phase des Bodens bindet und um die Verfügbarkeit des P für die Pflanze zu erhöhen, ist die Ausbringung der P-Dünger bei der Pflanzung vorzuziehen. Es kann eine zweite Gabe in Form einer Blattdüngung bei Beginn der Knollenbildung ausgebracht werden. Bei einer einzigen, kombinierten P-K-Düngung wird eine Ausbringung möglichst früh in der Vegetationsphase empfohlen, um die Schwäche des noch nicht voll entwickelten Wurzelsystems auszugleichen.

5.3.3 Mais

Der Nährstoffbedarf ist bei Mais bis ca. zum 6-Blattstadium gering (Abbildung 4). In sich langsam erwärmenden Böden kann aber mit einer Unterfussdüngung die Jugendentwicklung beschleunigt werden. Wenig mobile Nährstoffe (P, K) werden idealerweise vor der Saat ausgebracht, während N aufgrund der Auswaschungsgefahr besser in Teilmengen ausgebracht wird (Tabelle 26), dies insbesondere in niederschlagsreichen Regionen oder in Einzugsgebieten von Gewässern. In diesen Fällen sollte die Kopfgabe möglichst erst zur Hauptbedarfsphase ausgebracht werden (Abbildung 4). Aufgrund der Parallelität der N-Mineralisation im Boden und des Bedarfs sind N-Gaben bis zum 8-Blattstadium am wirksamsten, damit der hohe Bedarf bis zum Zeitpunkt der Blüte abgedeckt werden kann.

5.4 Ausbringungstechnik

5.4.1 Kartoffeln

Eine Aufteilung der N-Düngung (Tabelle 26) wird von den Kartoffelproduzenten immer seltener angewendet. Stattdessen wird die gesamte N-Düngermenge oft mit einer einzigen Gabe zur Pflanzung ausgebracht. Diese Praxis geht oft mit dem immer weiter verbreiteten *All-in-one*-Verfahren einher, bei dem die Pflanzung, die Dammformung sowie die Düngung in einem Arbeitsgang erfolgen. Während früher die N-Düngung auf den Erddämmen vor einem Anhäufeln erfolgte, ist es heute üblicher, den N-Dünger vor dem Setzen oder direkt in die Reihe zu geben (Martin 2014). Im Hinblick auf die Optimierung der N-Verfügbarkeit für die Pflanze ist dies nicht ideal, weil ein beträchtlicher Teil des ausgebrachten N durch Auswaschung verlorengehen kann, bevor die Pflanze ihr Wurzelsystem ausreichend entwickelt hat (Sinaj *et al.* 2014).

In den USA und den Ländern des Mittelmeerraumes wird seit vielen Jahren die Fertigation angewendet. Bei diesem Verfahren wird der Dünger durch das Bewässerungssystem ausgebracht. Die Fertigation bietet zwei wichtige Vorteile: (i) Sie ist einfach durchzuführen (wenn das Bewässerungssystem installiert ist) und (ii) ihre Anwendung ist «dynamisch», das heisst die Methode ermöglicht es, der Pflanze das Wasser und die Nährstoffe dann zu liefern, wenn sie diese benötigt. Mit der Technik der Tröpfchenbewässerung lassen sich N-Verluste durch Auswaschung im Vergleich zu Sprinkleranlagen reduzieren (Darwish *et al.* 2003). Bei der Anwendung der Fertigation lässt sich aber keine Ertragssteigerung gegenüber einer klassischen Düngung beobachten (Battilani *et al.* 2008; Mohammad *et al.* 1999).

5.4.2 Mais

Die Dünger werden vor der Saat ganzflächig verteilt und in den Boden eingearbeitet oder aber zur Saat als Unterfussdüngung (P, N) ausgebracht. Nachfolgende N-Gaben sind aufzuteilen und maximale Mengen je nach Boden und Witterung nicht zu überschreiten (Tabelle 26). Obwohl für Ausbringungen in späteren Stadien eine Breitverteilung

möglich ist, sollte darauf geachtet werden, dass keine Blattverbrennungen verursacht werden. Die Reihendüngung, gekoppelt mit Einarbeitung, hat den Vorteil, dass die Nährstoffe in der Nähe der Wurzeln abgelegt werden. Bei der Düngung zur Reihe oder auch beim Vorhandensein von Nährstoffdepots bilden sich die Wurzeln vorwiegend in der unmittelbaren Umgebung der Nährstoffe aus. Dies im Gegensatz zu einer breitflächigen Nährstoffverfügbarkeit, die zu einem weit verzweigten Wurzelwerk führt.

Hofdünger sollten wenn immer möglich direkt in den Boden injiziert oder aber unmittelbar nach der Ausbringung eingearbeitet werden, um N-Verluste zu minimieren.

5.5 Möglichkeiten zur Optimierung oder Reduktion der Stickstoffdüngung

Auch bei der Bemessung der N-Düngung mit Hilfe der weiter oben vorgeschlagenen Methoden (siehe Kapitel 3.1) kann auf Stufe Betrieb durch weitere Massnahmen die N-Ausnutzung verbessert werden oder die N-Düngung intensiviert werden: Für diese Fälle lassen sich folgende Empfehlungen formulieren:

- Im Rahmen einer ausgewogenen Düngung auf Stufe Betrieb die begrenzte N-Menge nach wirtschaftlichen Kriterien auf die Kulturen verteilen
- Güllegaben ausreichend verdünnen (mindestens 1:2, idealerweise 1:3), um Verluste durch Verflüchtigung zu begrenzen (Modul 7/ Düngung und Umwelt)
- Das Risiko von N-Verlusten durch Verflüchtigung durch die Wahl von Düngern mit einem höheren Nitratanteil vermindern
- Die Ausbringung von Einzelgaben von mehr als 60 kg N/ha sollte vermieden werden
- Die Bodenreserven sind konsequent zu berücksichtigen (N_{\min} -Methode oder Methode der korrigierten Normen)
- Die N-Düngung sollte auf Stufe Betrieb geplant werden, um diejenigen Kulturen bevorzugt zu düngen, die am meisten N benötigen und/oder diesen am besten in Ertrag umsetzen
- Bei Getreide die dritte N-Gabe reduzieren oder sogar darauf verzichten oder bei Futterweizen die zweite Gabe verschieben, insbesondere bei extensiven Kulturen
- Mittelfristige Wetterprognosen berücksichtigen, um zu vermeiden, dass der N in zu grossen Mengen vor einem besonders regenreichen Zeitraum oder zu spät in Bezug auf eine angekündigte Trockenperiode ausgebracht wird
- Die N-Gabe zur Saat oder Pflanzung von Zuckerrüben, Mais und Kartoffeln kann reduziert oder ganz weglassen werden
- Bei Zwischenkulturen ganz auf N-Gaben verzichten und bei schwacher Mineralisierung Mischungen mit Leguminosen verwenden

5.6 Möglichkeiten zur Vereinfachung der Düngung mit P, K und Mg

Die Fruchtfolgedüngung erlaubt eine Vereinfachung der P-, K- und Mg-Düngung bei eindeutig festgelegten Frucht-

folgen. Dazu wird der Nettobedarf der Fruchtfolge insgesamt bestimmt, dieser durch die Anzahl Kulturen geteilt und die dabei errechnete durchschnittliche Menge jährlich ausgebracht. Dieses Vorgehen erfordert die Ausarbeitung eines mehrjährigen Düngungsplans und eignet sich nur für Parzellen mit stabiler Fruchtfolge und mit ausreichender oder reicher Nährstoffversorgung (Versorgungsklasse C oder D). Wenn Parzellen zur Nährstoffversorgungsklasse «arm» gehören und die Fruchtfolge (i) eine Kultur mit einem hohen Nährstoffbedarf oder (ii) eine zu Nährstoff-Luxuskonsum neigende Kultur enthält, dann ist von der Fruchtfolgedüngung abzusehen.

Bei der Berechnung des Düngungsplanes können sich für einzelne Parzellen nur geringe Düngermengen für P, K und Mg ergeben, die aus technischen Gründen schwierig auszubringen sind. In diesem Fall kann ein Verzicht nach den Kriterien von Tabelle 27 erwogen werden.

Verzicht: Verzicht auf die Ausbringung von Mineraldüngern, da der Bedarf der Folgekultur durch den Bodenvorrat, Ernterückstände der Vorkultur und/oder vorgesehene Hofdünger beziehungsweise vorweggenommene Ernterückstände der Folgekultur (z. B. Sonnenblumen) gedeckt wird. In bestimmten Fällen kann auf die Ausbringung von Mineraldüngern verzichtet werden, wenn diese nur einen kleinen Teil der korrigierten Düngungsnorm umfasst.

Verzichtsgrenzen: Ein Verzicht ist denkbar (i) bei weniger als 100 kg P-, K- oder P-K-Dünger pro Hektare und (ii) bei weniger als 50 kg Mg-Dünger pro Hektare.

6. Literatur

- Agroscope, 1996. Schweizerische Referenzmethoden der Forschungsanstalten Agroscope, Band 1: Bodenuntersuchung zur Düngberatung, Ausgabe 2015. Agroscope, Zürich.
- Agu C. M., 2006. Effect of nitrogen and phosphorus combination on late blight disease and potato yield. *Tropical Science* 44 (4), 163–165.
- Allison M. F., Fowler J. H. & Allen E. J., 2001a. Factors affecting the magnesium nutrition of potatoes (*Solanum tuberosum*). *Journal of Agricultural Science* 137, 397–409.
- Allison M. F., Fowler J. H. & Allen E. J., 2001b. Responses of potato (*Solanum tuberosum*) to potassium fertilizers. *Journal of Agricultural Science* 136, 407–426.
- Arvalis, 2014. Optimiser l'alimentation de la plante en fractionnant l'azote. In: Interventions de printemps: un tournant décisif pour réussir ses cultures. ARVALIS-CETIOM infos, janvier 2014, 3–4.
- Arnon I., 1975. Mineral nutrition of Maize. International Potash Institute, Bern. 452 S.
- Aubertot J. N., Pinochet X. & Doré T., 2003. The effects of sowing date and nitrogen availability during vegetative stages on *Leptosphaeria maculans* development on winter oilseed rape. *Crop Protection* 23 (7), 635–645.
- Battilani A., Plauborg F., Hansen S., Dolezal F., Mazurczyk W., Bizik J. & Coutinho J., 2008. Nitrogen uptake and nitrogen use efficiency of fertigated potatoes. *Acta Horticulturae* 792, 61–67.
- Bedoussac L., Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E. S., Prieur L. & Justes E., 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 911–935.

Nicht ausgebrachte Dünger: Der Verzicht auf die Ausbringung kleinerer Mineraldüngermengen bedingt, dass die Nährstoffmengen im Düngungsplan des Folgejahres berücksichtigt werden.

Tabelle 27 | Möglichkeiten zum Verzicht auf die P-, K- und Mg-Düngung in Abhängigkeit des Gehaltes und der Gründigkeit des Bodens.

Versorgungsklasse (Bodenuntersuchung)	Pflanzennutzbare Gründigkeit des Bodens ¹	Möglichkeit zum Verzicht von P-/K-Düngung	Möglichkeit zum Verzicht von Mg-Düngung
arm	mässig tiefgründig	Nein	Nein
	tiefgründig	Nein	Nein
mässig	mässig tiefgründig	Nein	Nein
	tiefgründig	Ja	Ja
genügend	mässig tiefgründig	Ja	Nein
	tiefgründig	Ja	Ja
Vorrat	mässig tiefgründig	Ja	Ja
	tiefgründig	Ja	Ja

¹ Mässig tiefgründig: weniger als 70 cm pflanzennutzbare Gründigkeit; tiefgründig: mehr als 70 cm pflanzennutzbare Gründigkeit.

- Brabant C. & Levy Häner L., 2016. Einfluss der Stickstoffdüngung und ihrer Aufteilung auf die Backqualität von Weizen. *Agrarforschung Schweiz* 7 (2), 88–97.
- Büchi L., Gebhard C.-A., Liebisch F., Sinaj S., Ramseier H. & Charles R., 2015. Accumulation of biologically fixed nitrogen by legumes cultivated as cover crops in Switzerland. *Plant and Soil* 393 (1), 163–175.
- Büchi L., Mouly P., Amossé C., Bally C., Wendling M. & Charles R., 2016. Zerstörungsfreie Methode zur Schätzung der Biomasse von Zwischenkulturen. *Agrarforschung Schweiz* 7 (3), 136–143.
- Buchner A. & Sturm H., 1985. Gezielter Düngen. DLG-Verlag, Frankfurt am Main. 381 S.
- Burns I. G., 2006. Assessing N fertilizer requirements and the reliability of different recommendation systems. *Acta horticulturae* 700, 35–48.
- Buschbell T. & Hoffmann G. M., 1992. The effects of different nitrogen regimes on the epidemiologic development of pathogens on winter-wheat and their control. *Journal of Plant Diseases and Protection* 99, 381–403.
- Cao W. & Tibbitts T. W., 1998. response of potatoes to nitrogen concentrations differ with nitrogen forms. *Journal of Plant Nutrition* 21 (4), 615–623.
- Champolivier L. & Reau R., 2005. Améliorer la richesse en huile des oléagineux pour répondre aux besoins du marché. *Oléoscope* 82, 10–13.
- Charles R., Cholley E. & Mascher-Frutschi F., 2011. Krankheiten beim Winterweizen: Einfluss des Anbausystems und Auswirkungen auf den Ertrag. *Agrarforschung Schweiz* 2 (6), 264–271.

- Charles R. & Vullioud P., 2001. Pois protéagineux et azote dans la rotation. *Revue suisse d'Agriculture* 33 (6), 265–270.
- Charles R., Collaud J.-F., Levy L. & Sinaj S., 2012. Sorten, Saatedichte und Stickstoffdüngung bei Wintergerste. *Agrarforschung Schweiz* 3 (2), 88–95.
- Cohan J. P., 2014. Engrais, bien choisir la forme à apporter. In: *Innovations et performances pour la pomme de terre*. ARVALIS infos, juin 2014, 14–15.
- Colin J. & Goffart J. P., 1998. La gale commune de la pomme de terre en Belgique: Ses causes, ses conséquences, ses remèdes. Centre de Recherche Agronomique, Gembloux; Station de Phytotechnie, Louvain-la-Neuve; Université Catholique du Louvain, Clinique des Plantes (CORDER). 35 S.
- Colomb B., 1992. Le magnésium: bases disponibles pour l'élaboration d'un système de recommandation de fumure. In: *Le magnésium en agriculture*. Editions C.H.E.M.C., INRA, Paris. S. 187–209.
- COMIFER, 2013. Calcul de la fertilisation azotée – Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales – Cultures annuelles et prairies. Editions COMIFER, Puteaux. 159 S. Zugang: http://www.comifer.asso.fr/images/publications/brochures/BROCHURE_AZOTE_20130705web.pdf [10. 5. 2017].
- Courvoisier N., Levy Häner L., Schwaerzel R., Bertossa M., Thévoz E., Hiltbrunner J., Anders M., Stoll P., Weissflog T., Scheuner S., Dugon J. & Grünig K., 2015. Liste der empfohlenen Getreidesorten für die Ernte 2016. *Agrarforschung Schweiz* 6 (6), 1–8.
- Darwish T., Atallah T., Hajhasan S. & Chranek A., 2003. Management of nitrogen by fertigation of potato in Lebanon. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 67 (1), 1–11.
- Datnoff L. E., Elmer W. H. & Huber D. M., 2009. Mineral nutrition and plant disease. 2nd edition. APS Press, St. Paul. 278 S.
- Debaeke P. & Estragnat A., 2003. A simple model to interpret the effects of sunflower crop management on the occurrence and severity of a major fungal disease: *Phomopsis stem canker*. *Field crop research* 83, 139–155.
- Debaeke P. & Perez, A. 2003. Influence of sunflower (*Helianthus annuus* L.) crop management on Phoma black stem (*Phoma macdonaldii* Boerema). *Crop Protection* 22, 741–752.
- Demaria P., Flisch R., Frossard E. & Sinaj S., 2005. Exchangeability of phosphate extracted by four chemical methods. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 89–93.
- Dirks B. & Scheffer H., 1930. Der Kohlensäure-Bikarbonatauszug und der Wasserausgang als Grundlage zur Ermittlung der Phosphorsäurebedürftigkeit der Böden. *Landwirtschaftliche Jahrbücher* 71; 73–99.
- Dupuis B., Reust W., Hebeisen T. & Ballmer T., 2009. Stickstoffdüngung bei neuen Kartoffelsorten: Ertrag und Qualität. *Agrarforschung Schweiz* 16 (11+12), 484–489.
- Flisch R., Sinaj S., Charles R. & Richner W., 2009. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau (GRUDAF). *Agrarforschung* 16 (2), 1–100.
- Fritsch F., 2003. Anwendung von Düngemitteln in landwirtschaftlichen Kulturen: Kartoffeln. In: *Praxishandbuch Dünger und Düngung*, AGRIMEDIA GmbH, Bergen/Dumme. S. 311.
- Frossard E., Julien P., Neyroud J.-A. & Sinaj S., 2004. Phosphor in Böden. Standortbestimmung Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 368, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. S. 180.
- Gash A. F. J., 2012. Wheat nitrogen fertilisation effects on the performance of the cereal aphid *Metopolophium dirhodum*. *Agronomy* 2 (1), 1–13.
- Hack H., 1993. Echelle BBCH des stades phénologiques de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.). *JKI Open Journal System* 7.
- Holzschläger A., Fossati D., Hiltbrunner J. & Fuhrer J., 2015. Spatial and temporal trends in agro-climatic limitations to production potentials for grain maize and winter wheat in Switzerland. *Regional Environmental Change* 15 (1), 109–122.
- Hebeisen T., Ballmer T., Wüthrich R. & Dupuis B., 2012. Reaktion neu zugelassener Kartoffelsorten auf unterschiedliche Stickstoffversorgung. *Agrarforschung Schweiz* 3 (2): 82–87.
- Iwama K., 2008. Physiology of the Potato: New Insights into Root System and Repercussions for Crop Management. *Potato research* 51 (3–4), 333–353.
- Jordan V. W. L., Stinchcombe G. R. & Hutcheon J. A., 1989. Fungicide and nitrogen applications in relation to the improvement of disease control and yield in winter barley. *Plant Pathology* 38, 26–34.
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J. P., Souchère V., Tournebize J., Savini I. & Réchauchère O., 2013. Les cultures intermédiaires pour une production agricole durable. Editions Quae, Versailles. 112 S.
- Justes E., Mary B. & Nicolardot B., 2009. Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. *Plant and Soil* 325, 171–185.
- Karam F., Roupheal Y., Lahoud R., Breidi J. & Colla G., 2009. Influence of genotypes and potassium application rates on yield and potassium use efficiency of potato. *Journal of agronomy* 8 (1), 27–32.
- Kolbe H. & Stephan-Beckmann S., 1997. Development, growth and chemical composition of the potato crop (*Solanum tuberosum* L.). II. Tuber and whole plant. *Potato Research* 40 (2), 135–153.
- Krnjaja V., Mandic V., Levic J., Stankovic S., Petrovic T., Vasic T. & Obradovic A., 2015. Influence of N-fertilisation on Fusarium head blight and mycotoxin levels in winter wheat. *Crop Protection* 67, 251–256.
- Lagarde F. & Champolivier L., 2006. Le raisonnement et les avancées techniques permettent de réduire la fertilisation azotée : le cas de Farmstar-colza®. *OCL* 13, 384–387.
- Lemmens M., Haim K., Lew H. & Ruckebauer P., 2004. The Effect of Nitrogen Fertilization on *Fusarium* Head Blight Development and Deoxynivalenol Contamination in Wheat. *Journal of Phytopathology* 152 (1), 1–8.
- Levy L., Schwaerzel R., Kleijer G. & Crozet N., 2009. Influence de la fumure azotée sur la qualité des blés biscuitiers. *Revue suisse d'Agriculture* 41 (5), 277–282.
- Levy L., Schwaerzel R. & Kleijer G., 2007. Influence de la fumure azotée sur la qualité des céréales panifiables. *Revue suisse d'Agriculture* 39, 255–260.
- Levy L. & Schwaerzel R., 2009. Fumure azotée et performances agronomiques de variétés de blé et de triticale. *Revue suisse d'Agriculture* 41 (3), 161–165.
- Levy Häner L., Stamp P., Kreuzer M., Bouguennec A. & Pellet D., 2013. Experimental Determination of Genetic and Environmental Influences on the Viscosity of Triticale. *Cereal Research Communications* 41 (4), 613–625.
- Levy Häner L. & Brabant C. 2016. Die Kunst, den Stickstoffdünger für einen optimalen Ertrag und Proteingehalt von Weizen aufzuteilen. *Agrarforschung Schweiz* 7 (2), 80–87.
- Limaux F., Recous S., Meynard J.M. & Guckert A., 1999. Relationship between rate of crop growth at date fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat. *Plant and Soil* 214, 49–59.
- Lucas M. E., Hoad S. P., Russell G. & Bingham I. J., 2000. Management of cereal root systems. Home-Grown Cereals Authority, London. HGCA Research review No. 43.
- Machet J. M., Recous S., Jeuffroy M. H., Mary B., Nicolardot B. & Parnaudeau V., 2003. A dynamic version of the predictive balance sheet method for fertilizer N advice. In: *Controlling nitrogen flows and losses*, 12th Nitrogen Workshop, 21.–24. September 2003, Exeter.
- Maltas A., Oberholzer H., Charles R., Bovet V. & Sinaj S., 2012a. Langfristige Wirkung von organischen Düngern auf die Bodenigenschaften. *Agrarforschung Schweiz* 3 (3), 148–155.
- Maltas A., Charles R., Bovet V. & Sinaj S., 2012b. Ertrag und Stickstoffdüngung im Pflanzenbau: Langfristige Wirkung organischer Dünger. *Agrarforschung Schweiz* 3 (3), 156–163.
- Maltas A., Charles R., Jeangros B. & Sinaj S., 2013. Effect of organic fertilizers and reduced-tillage on soil properties, crop nit-

- rogen response and crop yield: Results of a 12-year experiment in Changins, Switzerland. *Soil & Tillage Research* 126, 11–18.
- Maltas A., Charles R., Pellet D., Dupuis B., Levy L., Baux A., Jeangros B. & Sinaj S., 2015. Evaluation zweier Methoden für eine optimale Stickstoffdüngung im Ackerbau. *Agrarforschung Schweiz* 6 (3), 84–93.
- Martin M., 2014. Implantation : attention à la structure du sol. In: *Innovations et performances pour la pomme de terre, ARVALIS infos*, Juin 2014, 10–12.
- Mascagni H. J. Jr., Harrison S. A., Russin J. S., Desta H. M., Colyer P. D., Habetz R. J., Hallmark W. B., Moore S. H., Rabb J. L., Hutchinson R. L. & Boquet D. J., 1997. Nitrogen and fungicide effects on winter wheat produced in the Louisiana Gulf Coast region. *Journal of Plant Nutrition* 20 (10), 1375–1390.
- Mestries E., Desanlis M., Seassau C., Moinard J., Debaeke P. & Dechamp-Guillaume G., 2011. Impact de la conduite de culture sur les maladies du tournesol. *Innovations agronomiques* 14, 91–108.
- Micheneau A., Champolivier L., Courtois N., Sinaj S., & Baux A., 2016. Réglette azote colza®: Anpassung eines Tools für die Stickstoffdüngung von Raps an die Schweiz. *Agrarforschung Schweiz* 7 (9), 378–383.
- Mohammad M. J., Zuraïqi S., Quasameh W. & Papadopoulos I., 1999. Yield response and nitrogen utilization efficiency by drip-irrigated potato. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 54 (3), 243–249.
- Naud C., Makowski D. & Jeuffroy M. H., 2008. Is it useful to combine measurements taken during the growing season with a dynamic model to predict the nitrogen status of winter wheat? *European Journal of Agronomy* 28, 291–300.
- Neeteson J. J., 1990. Development of nitrogen fertilizer recommendations for arable crops in the Netherlands in relation to nitrate leaching. *Fertilizer research* 26 (1–3), 291–298.
- Neumann S., Paveley N.D., Beed F.D. & Sylvester-Bradley R. 2004. Nitrogen per unit leaf area affects the upper asymptote of *Puccinia striiformis f.sp. tritici* epidemics in winter wheat. *Plant Pathology* 53 (6), 725–732.
- Olesen J. E., Mortesen J. V., Jorgensen L. N. & Andersen M. N., 2000. Irrigation strategy, nitrogen application and fungicide control in winter wheat on a sandy soil. I. Yield yield components and nitrogen uptake. *Journal of Agricultural Science* 134 (1), 1–11.
- Olesen J. E., Jorgensen L. N., Petersen J. & Mortensen J. V., 2003. Effects of rate and timing of nitrogen fertilizer on disease control by fungicides in winter wheat. 1. Grain yield and foliar disease control. *Journal of Agricultural Science* 140 (1), 1–13.
- Pavlista A. D., 2005. Early-Season Applications of Sulfur Fertilizers Increase Potato Yield and Reduce Tuber Defects. *Agronomy Journal* 97, 599–603.
- Pellet D., 2000a. Dosage du nitrate dans les tiges pour affiner le pilotage de la fumure azotée du blé d'automne. I. La méthode Jubil est-elle adaptée aux variétés cultivées en Suisse? *Revue suisse d'Agriculture* 32 (3), 103–108.
- Pellet D., 2000b. Dosage du nitrate dans les tiges pour affiner le pilotage de la fumure azotée du blé d'automne. II. La méthode Jubil comme complément à celle des normes corrigées. *Revue suisse d'Agriculture* 32 (4), 165–171.
- Pellet D., Mercier E., Lavanchy J., Pfeiffer H., Keiser A. & Bezençon N., 2003a. Optimisation de la fumure soufrée par estimation du risque de carence. I. Colza d'automne. *Revue suisse d'Agriculture* 35 (4), 161–167.
- Pellet D., Mercier E. & Balestra U., 2003b. Optimisation de la fumure soufrée par estimation du risque de carence. II. Blé d'automne. *Revue suisse d'Agriculture* 35 (4), 181–186.
- Pellet D. & Grosjean Y., 2007. Fumure azotée du tournesol: intérêt de la méthode Héliotest pour la Suisse. *Revue suisse d'Agriculture* 39 (1), 5–9.
- Reust W., Hebeisen T. & Ballmer T., 2006. Fumure azotée et nouvelles variétés de pommes de terre cultivées en Suisse. *Revue suisse d'Agriculture* 38 (6), 309–313.
- Richner W., Flisch R., Sinaj S. & Charles R., 2010. Ableitung der Stickstoffdüngungsnormen von Ackerkulturen. *Agrarforschung Schweiz* 1 (11–12), 410–415.
- Ryckmans D., 2009. Quelques rappels sur la fumure phospho-potassique. In: *Fiwap info*, février 2009, 8.
- Sattelmacher B., Kuene R., Malagampa P. & Moreno U., 1990. Evaluation of tuber bearing *Solanum* species belonging to different ploidy levels for its yielding potential at low soil fertility. *Plant and Soil* 129, 227–233.
- SBV, 2014. Kapitel 2: Pflanzenbau. In: *Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung 2013*, Agrarstat, Schweizer Bauernverband, Brugg.
- Schwartz C., Decroux J. & Muller J. C., 2005. Guide de la fertilisation raisonnée: grandes cultures et prairies. Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée. Editions France Agricole, Paris. 414 S.
- Schwaerzel R., Torche J.-M., Ballmer T., Musa T. & Dupuis B., 2016. Schweizerische Sortenliste für Kartoffeln 2017. *Agrarforschung Schweiz* 7, 11–12.
- SCPA, 1995. Les courbes d'absorption d'éléments minéraux. Ministère de l'agriculture, France.
- Sinaj S., Maltas A., Dupuis B. & Pellet D., 2014. Response of two potato cultivars to nitrogen fertilization in Switzerland. In: 19th Triennial Conference of the European Association for Potato Research, 2014. Editions EAPR, Brüssel.
- Smiley R. W. & Cook R. J., 1973. Relationship between take-all of wheat and rhizosphere pH in soils fertilized with ammonium vs. nitrate-nitrogen. *Phytopathology* 63, 882–890.
- Söchting H. P. & Verreet J.-A., 2004. Effects of different cultivation systems (soil management, nitrogen fertilization) on the epidemics of fungal diseases in oilseed rape (*Brassica napus* L. var. *napus*). *Journal of Plant Diseases and Protection* 111 (1), 1–29.
- Sonderegger O. & Scheuner S., 2014. Bekenntnis zur Qualitätsstrategie – Getreidebranche einigt sich auf Proteinbezahlung. *SwissGranum*, Bern.
- Swiss granum, 2015. Produktionsflächen / Surfaces de production. Zugang: https://www.swissgranum.ch/files/2015-12-18_anbauflaechen.pdf [6. 2. 2017].
- Swisspatat, 2015. Statistische Angaben 2014 über Kartoffelbau und Kartoffelverarbeitung. *Swisspatat*, Bern.
- Tindall T. A., Westermann D. T., Stark J. C., Ojala J. C. & Kleinkopf G. E., 1993. Phosphorus Nutrition of Potatoes. *Current Information Series No. 903*, University of Idaho, USA.
- Trehan S. P. & Sharma R. C., 2002. Potassium uptake efficiency of young plants of three potato cultivars as related to root and shoot parameters. *Communication in Soil Science and Plant Analysis* 33 (11–12), 1813–1823.
- UNIFA, 2015. Les outils de raisonnement de l'apport de soufre. Zugang: <http://fertilisation-edu.fr/le-raisonnement-de-la-fertilisation/azote-et-soufre/les-outils-de-raisonnement.html> [6. 2. 2017].
- Vullioud P., 2005. Rotation des cultures en terres assolées. *Revue suisse d'Agriculture* 37 (4), 1–4.
- Wendling M., Büchi L., Amossé C., Sinaj S., Walter A. & Charles R., 2016. Influence of root and leaf traits on the uptake of nutrients in cover crops. *Plant Soil* 409 (1), 419–434.
- Westermann D. T. & Kleinkopf G. E., 1985. Nitrogen requirements of potatoes. *Agronomy Journal* 77, 616–621.
- Yara, 2008. N-Tester®, le pilotage de l'azote tout simplement. Zugang: <http://www.yara.fr/fertilisation/outils-et-services/n-tester/> [6. 2. 2017].

7. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Einfluss der Stickstoffdüngung auf die Eigenschaften von Weizen, welche die Qualität beeinflussen.	8/4
Tabelle 2 Einfluss der N-, P- und K-Düngung auf die Qualität von Kartoffelknollen.	8/6
Tabelle 3 Einfluss der N- und S-Düngung auf den Ölgehalt und den Glukosinolatgehalt bei Raps.	8/8
Tabelle 4 Begünstigung verschiedener Maiskrankheiten bei Mangel oder Überschuss von N, K, Mg und S.	8/11
Tabelle 5 Einfluss der N-, P- und K-Düngung auf Qualitätseigenschaften von Zuckerrüben.	8/12
Tabelle 6 Aufnahme von Nährstoffen durch ausgewählte Gründünger.	8/14
Tabelle 7 Schätzung des für die Nachfolgekultur freigesetzten bzw. blockierten N durch die Gründüngung in Abhängigkeit der Art und ihres Wachstums.	8/14
Tabelle 8 Zusammenfassung der Auswirkungen, Vorteile und Grenzen der verschiedenen Arten von Gründüngern.	8/15
Tabelle 9 Referenzertrag, Nährstoffentzug und Düngungsnormen bezüglich N, P, K und Mg für die Ackerkulturen.	8/17
Tabelle 10 Korrektur der N-Düngung in Abhängigkeit der Kartoffelsorte.	8/21
Tabelle 11 Korrektur der N-Düngung bei einem Zielertrag, der vom Durchschnittsertrag (Referenzertrag) abweicht.	8/23
Tabelle 12 Korrektur der N-Düngung in Abhängigkeit des Mineralisierungspotenzials der OS.	8/23
Tabelle 13 Korrektur der N-Düngung in Abhängigkeit der Vorkultur.	8/24
Tabelle 14 Korrektur der N-Normdüngung infolge Nachwirkung organischer Dünger.	8/25
Tabelle 15 Korrektur der N-Normdüngung in Abhängigkeit der Winter- und Frühjahrs-Niederschläge.	8/25
Tabelle 16 Zusätzliche N-Nachlieferung des Bodens durch mehrmaliges Hacken nach dem Auflaufen der Kultur in Abhängigkeit des Gehaltes an organischer Substanz des Bodens.	8/25
Tabelle 17 Korrektur der N-Normdüngung in Abhängigkeit der Witterungsbedingungen (Feuchtigkeit und Temperatur) im Frühling und des Bodenzustands.	8/25
Tabelle 18 Zeitpunkt und Probennahmetiefe für die N_{\min} -Bestimmung.	8/25
Tabelle 19 N-Düngung im Getreidebau aufgrund des N_{\min} -Gehaltes des Bodens.	8/26
Tabelle 20 N-Düngung von Hackfrüchten aufgrund des N_{\min} -Gehaltes des Bodens.	8/26
Tabelle 21 Korrekturfaktoren der Normdüngung für P, K, Mg nach Kultur.	8/29
Tabelle 22 Kriterien zur Beurteilung des Risikos eines Schwefelmangels und zur Abschätzung des Schwefelbedarfs der Kulturen.	8/30
Tabelle 23 Schwefelentzug einiger Kulturen sowie Bemessung der Schwefeldüngung.	8/31
Tabelle 24 Bemessung der B- und Mn-Düngung aufgrund von Bodenuntersuchungsergebnissen, der Bodeneigenschaften und der Bedürftigkeit der Kulturen.	8/31
Tabelle 25 Beispiel eines Düngungsplans.	8/33
Tabelle 26 Optimaler Zeitpunkt und Höchstmenge einzelner Stickstoffgaben für verschiedene Kulturen in Abhängigkeit von Niederschlags- und Bodenverhältnissen.	8/35
Tabelle 27 Möglichkeiten zum Verzicht auf die P-, K- und Mg-Düngung in Abhängigkeit des Gehaltes und der Gründigkeit des Bodens.	8/38
<hr/>	
Anhang Nährstoffgehalte pflanzlicher Produkte.	8/43

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Aufnahme von Nährstoffen (N, P, K und S) durch die Weizenkultur (ganze Pflanze) auf der Grundlage eines Ertrags von 60 dt/ha und in Abhängigkeit des physiologischen Entwicklungsstadiums der Pflanze.	8/4
Abbildung 2 Aufnahme von Nährstoffen (N, P, K, S, Mg) durch die Kartoffelpflanze (Sorte José – Ertrag 45 t/ha) in Abhängigkeit des physiologischen Entwicklungsstadiums der Pflanze.	8/6
Abbildung 3 Aufnahme von Nährstoffen (N, P, K, Mg) durch die Rapskultur in Abhängigkeit des physiologischen Entwicklungsstadiums der Pflanze.	8/8
Abbildung 4 Summe der bis zu einem bestimmten Entwicklungsstadium von Mais aufgenommenen Nährstoffmenge.	8/11
Abbildung 5 Stickstoff-Management durch Gründüngung als Zwischenkultur von Ende Juli bis Ende März.	8/14
Abbildung 6 Stickstoffkreislauf auf Parzellenebene.	8/16
Abbildung 7 Schematische Darstellung der Methode der korrigierten Normen (Schätzmethode).	8/24
Abbildung 8 Vorgehen zur Berechnung der Düngungsnorm für P, K und Mg.	8/28
Abbildung 9 Stickstoff-Aufnahmekurven der Sorten Bintje und Laura bei einer Düngung mit 120 kg N/ha.	8/36

9. Anhang

Nährstoffgehalte pflanzlicher Produkte.															
Kultur	Ertrag des Ernteprodukts dt/ha	Produkt	TS-Gehalt %	Nährstoffgehalt (kg/t Frischsubstanz)											
				N			P (P ₂ O ₅)			K (K ₂ O)			Mg		
				Min.	Max.	Wert	Min.	Max.	Wert	Min.	Max.	Wert	Min.	Max.	Wert
Winterweizen (Brot- und Biskuitweizen)	60	Körner	85	15,0	25,0	20,2	3,3 (7,5)	4,4 (10,0)	3,6 (8,2)	2,9 (3,5)	4,6 (5,5)	3,6 (4,3)	0,8	1,2	1,2
	70	Stroh	85	3,0	7,0	3,1	0,4 (1,0)	1,3 (3,0)	0,8 (1,9)	5,8 (7,0)	12,5 (15,0)	8,9 (10,7)	0,6	1,0	0,7
Winterweizen (Futterweizen)	75	Körner	85	15,0	25,0	17,3	3,3 (7,5)	4,4 (10,0)	3,6 (8,2)	2,9 (3,5)	4,6 (5,5)	3,6 (4,3)	0,8	1,2	1,2
	75	Stroh	85	2,8	7,0	2,8	0,4 (1,0)	1,3 (3,0)	0,8 (1,9)	5,8 (7,0)	12,5 (15,0)	8,9 (10,7)	0,6	1,0	0,7
Sommerweizen	50	Körner	85	18,0	26,0	20,2	3,1 (7,0)	4,3 (9,8)	3,6 (8,2)	2,5 (3,0)	4,2 (5,0)	3,6 (4,3)	1,0	1,4	1,2
	60	Stroh	85	3,0	7,0	3,1	0,5 (1,2)	1,0 (2,2)	0,8 (1,9)	6,6 (8,0)	11,6 (14,0)	8,9 (10,7)	0,3	0,7	0,7
Wintergerste	60	Körner	85	13,0	17,0	14,8	3,5 (8,0)	4,4 (10,0)	3,7 (8,4)	2,7 (4,5)	6,2 (7,5)	4,5 (5,4)	0,8	1,2	1,1
	60	Stroh	85	3,0	6,0	4,3	0,8 (1,8)	1,2 (2,8)	1,0 (2,2)	10,0 (12,0)	19,9 (24,0)	13,3 (16,0)	0,2	0,6	0,6
Sommergerste	55	Körner	85	10,0	16,0	14,8	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,7 (8,4)	4,2 (5,0)	5,8 (7,0)	4,5 (5,4)	0,9	1,3	1,1
	55	Stroh	85	3,0	7,0	4,3	0,8 (1,8)	1,2 (2,6)	1,0 (2,2)	13,3 (16,0)	19,9 (24,0)	13,3 (16,0)	0,2	0,6	0,6
Winterhafer	55	Körner	85	13,0	19,0	16,0	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,9	1,3	1,0
	70	Stroh	85	3,0	7,0	5,0	0,9 (2,3)	1,7 (3,1)	1,2 (2,7)	14,9 (18,0)	19,9 (24,0)	17,4 (21,0)	0,6	1,2	0,9
Sommerhafer	55	Körner	85	13,0	19,0	16,5	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,9	1,3	1,0
	70	Stroh	85	3,0	7,0	4,1	1,0 (2,3)	1,4 (3,1)	1,2 (2,7)	14,9 (18,0)	19,9 (24,0)	17,4 (21,0)	0,6	1,2	0,9
Winterroggen	55	Körner	85	13,0	18,0	13,0	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,9	1,3	1,1
	70	Stroh	85	3,0	7,0	3,0	0,9 (2,0)	1,3 (3,0)	0,9 (2,0)	8,3 (10,0)	11,6 (14,0)	10,0 (12,0)	0,8	1,2	1,0
Winterroggen (Hybridsorten)	65	Körner	85	13,0	18,0	13,0	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,9	1,3	1,1
	75	Stroh	85	3,0	7,0	3,0	0,9 (2,0)	1,3 (3,0)	0,9 (2,0)	8,3 (10,0)	11,6 (14,0)	10,0 (12,0)	0,8	1,2	1,0
Dinkel	45	Körner	85	14,0	18,0	16,0	3,1 (7,0)	3,9 (9,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,9	1,3	1,1
	70	Stroh	85	3,0	7,0	5,0	0,9 (2,0)	1,3 (3,0)	1,1 (2,5)	8,3 (10,0)	11,6 (14,0)	10,0 (12,0)	0,8	1,2	1,0
Wintertriticale	60	Körner	85	15,0	20,0	16,0	3,1 (7,0)	4,8 (11,0)	3,1 (7,2)	4,1 (4,9)	5,8 (7,0)	4,1 (4,9)	0,8	1,2	0,9
	75	Stroh	85	3,3	10,0	3,3	0,6 (1,4)	1,5 (3,5)	0,6 (1,4)	8,3 (10,0)	14,9 (18,0)	14,9 (18,0)	0,6	0,9	0,6
Sommertriticale	55	Körner	85	15,0	20,0	16,0	3,1 (7,0)	4,8 (11,0)	3,1 (7,2)	4,1 (4,9)	5,8 (7,0)	4,1 (4,9)	0,8	1,2	0,9
	70	Stroh	85	3,3	10,0	3,3	0,6 (1,4)	1,5 (3,5)	0,6 (1,4)	8,3 (10,0)	14,9 (18,0)	14,9 (18,0)	0,6	0,9	0,6

Kultur	Ertrag des Ernteprodukts dt/ha	Pro- dukt	TS- Gehalt %	Nährstoffgehalt (kg/t Frischsubstanz)											
				N			P (P ₂ O ₅)			K (K ₂ O)			Mg		
				Min.	Max.	Wert	Min.	Max.	Wert	Min.	Max.	Wert	Min.	Max.	Wert
Emmer, Einkorn	25	Körner	85	17,0	27,0	22,0	2,6 (6,0)	4,4 (10,0)	3,5 (8,0)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,8	2,0	1,4
	45	Stroh	85	3,0	5,0	4,0	0,9 (2,0)	1,7 (4,0)	1,3 (3,0)	5,8 (7,0)	9,1 (11,0)	7,5 (9,0)	0,4	0,8	0,6
Hirse	35	Körner	85	15,2	18,4	16,6	2,4 (5,5)	3,2 (7,3)	2,8 (6,4)	1,8 (2,2)	2,7 (3,3)	2,4 (2,9)	0,9	1,4	1,2
	45	Stroh	85	9,3	11,6	10,7	1,3 (3,0)	3,3 (7,6)	2,4 (5,5)	12,6 (15,2)	25,3 (30,5)	18,8 (22,7)	1,8	2,7	2,4
Körnermais	100	Körner	85	11,0	15,0	13,0	1,7 (4,0)	3,5 (8,0)	2,6 (5,9)	3,3 (4,0)	4,6 (5,6)	3,3 (4,0)	0,6	1,4	0,9
	110	Stroh	85	4,0	8,0	7,3	1,0 (2,4)	1,9 (4,4)	1,1 (2,4)	11,6 (14,0)	24,9 (30,0)	14,5 (17,4)	0,7	1,9	1,3
Silomais ¹	185	Ganz- pflanze	100	10,0	15,0	11,8	1,7 (4,0)	3,1 (7,0)	2,1 (4,8)	8,3 (10,0)	17,4 (21,0)	10,8 (13,0)	0,9	1,5	1,3
Grünschnitt- mais ¹	60	Ganz- pflanze	100	14,0	24,0	19,0	2,4 (5,5)	3,3 (7,5)	2,8 (6,5)	18,3 (22,0)	26,6 (32,0)	22,4 (27,0)	0,8	1,2	1,0
Kartoffeln (Speisekartof- feln und Kartoffeln für die technische Verarbeitung)	450	Knollen	22	2,2	3,8	3,0	0,4 (1,0)	0,9 (2,0)	0,6 (1,3)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,5 (5,4)	0,2	0,2	0,2
	200	Kraut	14	0,9	1,9	1,4	0,1 (0,3)	0,3 (0,7)	0,2 (0,5)	3,3 (4,0)	7,5 (9,0)	5,4 (6,5)	0,2	0,5	0,4
Kartoffeln (Frühkartof- feln)	300	Knollen	18	1,7	2,9	2,3	0,4 (1,0)	0,9 (2,0)	0,7 (1,5)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,2	0,2	0,2
	200	Kraut	8	2,5	4,1	3,3	0,2 (0,5)	0,4 (0,9)	0,3 (0,7)	3,3 (4,0)	8,3 (10,0)	5,8 (7,0)	0,3	0,8	0,6
Kartoffeln (Pflanzkartof- feln)	250	Knollen	18	1,7	2,9	2,3	0,4 (1,0)	0,9 (2,0)	0,7 (1,5)	3,3 (4,0)	5,0 (6,0)	4,2 (5,0)	0,2	0,2	0,2
	200	Kraut	8	2,5	4,1	3,3	0,2 (0,5)	0,4 (0,9)	0,3 (0,7)	3,3 (4,0)	8,3 (10,0)	5,8 (7,0)	0,3	0,8	0,6
Zuckerrüben	900	Rüben	22	1,2	2,5	1,2	0,3 (0,6)	0,4 (1,0)	0,3 (0,7)	1,7 (2,0)	3,3 (4,0)	1,7 (2,0)	0,2	0,4	0,3
	475	Kraut/ Köpfe	15	2,0	4,0	3,3	0,3 (0,6)	0,9 (2,0)	0,3 (0,7)	4,2 (5,0)	5,8 (7,0)	5,2 (6,3)	0,4	1,0	0,9
Futterrüben	175	Rüben ¹	100	9,0	13,0	11,0	1,7 (4,0)	2,6 (6,0)	2,2 (5,0)	12,5 (15,0)	17,4 (21,0)	14,9 (18,0)	1,1	1,5	1,3
	400	Kraut/ Köpfe	15	2,0	4,5	3,5	0,3 (0,6)	0,4 (1,0)	0,3 (0,8)	5,0 (6,0)	6,6 (8,0)	5,8 (7,0)	0,5	1,3	0,9
Winterraps	35	Haupt- prod.	90	26,0	34,0	26,1	5,7 (13,0)	8,3 (19,0)	6,4 (14,6)	6,6 (8,0)	9,1 (11,0)	7,1 (8,5)	2,0	3,2	2,4
	90	Neben- prod.	85	5,0	10,0	7,0	0,9 (2,0)	1,7 (4,0)	0,9 (2,0)	10,3 (12,4)	14,9 (18,0)	10,3 (12,4)	0,6	2,0	0,6
Sommer- raps	25	Haupt- prod.	90	26,0	34,0	26,1	5,7 (13,0)	8,3 (19,0)	6,4 (14,6)	6,6 (8,0)	9,1 (11,0)	7,1 (8,5)	2,0	3,2	2,6
	45	Neben- prod.	85	5,0	10,0	7,0	0,9 (2,0)	1,7 (4,0)	0,9 (2,0)	10,3 (12,4)	14,9 (18,0)	10,3 (12,4)	1,0	2,0	1,5
Sonnen- blumen	30	Körner	85	28,0	35,0	31,5	3,9 (9,0)	5,7 (13,0)	4,8 (11,0)	6,0 (7,2)	8,0 (9,6)	7,0 (8,4)	2,3	3,7	3,0
	60	Stroh	60	8,0	10,0	9,0	1,1 (2,5)	1,2 (2,8)	1,2 (2,7)	45,7 (55,0)	56,4 (68,0)	51,0 (61,5)	6,5	8,5	7,5
Ölhanf	13	Körner	90	40,0	52,0	46,0	8,7 (20,0)	13,1 (30,0)	10,9 (25,0)	5,8 (7,0)	12,5 (15,0)	9,1 (11,0)	4,1	6,7	5,4
	60	Stroh	85	7,0	11,0	9,0	1,3 (3,0)	2,2 (5,0)	1,7 (4,0)	8,3 (10,0)	14,9 (18,0)	11,6 (14,0)	1,0	2,0	1,5

¹ Erträge und Gehalt bezogen auf die Trockensubstanz (TS).

Kultur	Ertrag des Ernteprodukts dt/ha	Produkt	TS-Gehalt %	Nährstoffgehalt (kg/t Frischsubstanz)											
				N			P (P ₂ O ₅)			K (K ₂ O)			Mg		
				Min.	Max.	Wert	Min.	Max.	Wert	Min.	Max.	Wert	Min.	Max.	Wert
Faserhanf	100	Stängel	85	2,0	4,0	3,0	0,9 (2,0)	1,7 (4,0)	1,3 (3,0)	5,8 (7,0)	9,1 (11,0)	7,5 (9,0)	0,3	0,7	0,5
	40	Körner/ Blätter	90	23,0	32,0	27,5	5,2 (12,0)	7,8 (18,0)	6,5 (15,0)	16,6 (20,0)	29,1 (35,0)	22,8 (27,5)	3,0	7,0	5,0
Öllein	20	Körner	90	45,0	64,0	54,5	3,9 (9,0)	6,5 (15,0)	5,2 (12,0)	5,8 (7,0)	10,0 (12,0)	7,9 (9,5)	0,3	0,7	0,5
	25	Stroh	85	4,0	8,0	6,0	1,7 (4,0)	2,6 (6,0)	2,2 (5,0)	10,8 (13,0)	19,1 (23,0)	14,9 (18,0)	0,5	1,2	0,9
Faserlein (Flachs)	45	Körner	85	8,0	12,0	10,0	2,6 (6,0)	3,5 (8,0)	3,1 (7,0)	12,5 (15,0)	20,8 (25,0)	16,6 (20,0)	1,0	3,0	2,0
	15	Stroh	90	45,0	64,0	54,5	3,9 (9,0)	6,5 (15,0)	5,2 (12,0)	5,8 (7,0)	10,0 (12,0)	7,9 (9,5)	0,3	0,7	0,5
Chinaschilf ¹	200	Ganz- pflanze	100	1,8	2,4	2,1	0,3 (0,8)	0,5 (1,1)	0,4 (1,0)	3,7 (4,5)	5,6 (6,7)	4,6 (5,6)	0,2	0,3	0,3
Kenaf ¹	50	Ganz- pflanze	100	15,0	25,0	20,0	3,9 (9,0)	6,5 (15,0)	5,2 (12,0)	10,0 (12,0)	16,6 (20,0)	13,3 (16,0)	1,0	3,0	2,0
Eiweisserbsen	40	Körner	85	30,0	40,0	35,0	3,5 (8,0)	5,2 (12,0)	4,4 (10,0)	8,3 (10,0)	11,6 (14,0)	10,0 (12,0)	0,9	1,5	1,2
	50	Stroh	85	16,0	24,0	20,0	2,2 (5,0)	4,4 (10,0)	3,3 (7,5)	10,8 (13,0)	15,8 (19,0)	13,3 (16,0)	1,8	2,6	2,2
Ackerbohnen	40	Körner	85	30,0	50,0	40,0	4,8 (11,0)	7,4 (17,0)	6,1 (14,0)	8,3 (10,0)	14,9 (18,0)	11,6 (14,0)	2,0	3,0	2,5
	45	Stroh	85	20,0	40,0	30,0	1,3 (3,0)	1,7 (4,0)	1,5 (3,5)	12,5 (15,0)	20,8 (25,0)	16,6 (20,0)	2,8	3,8	3,3
Sojabohne	30	Körner	85	45,0	75,0	60,0	4,4 (10,0)	7,8 (18,0)	5,1 (11,7)	12,5 (15,0)	19,1 (23,0)	16,0 (19,3)	2,0	3,0	2,0
	30	Stroh	85	25,0	45,0	35,0	4,4 (10,0)	6,5 (15,0)	5,1 (11,7)	16,6 (20,0)	33,2 (40,0)	17,8 (21,4)	2,9	8,0	2,9
Süsslupine	30	Körner	88	45,0	65,0	55,0	3,5 (8,0)	5,2 (12,0)	4,4 (10,0)	9,1 (11,0)	13,3 (16,0)	11,2 (13,5)	1,6	2,4	2,0
	30	Stroh	85	25,0	45,0	35,0	1,3 (3,0)	2,2 (5,0)	1,7 (4,0)	12,5 (15,0)	20,8 (25,0)	16,6 (20,0)	3,0	5,0	4,0
Gründung ¹ (Leguminosen)	35	Ganz- pflanze	100	34,1	49,4	43,6	3,0 (6,9)	5,8 (13,3)	4,5 (10,3)	22,8 (27,5)	41,2 (49,6)	29,1 (35,1)	1,9	3,4	2,7
Gründung ¹ (Nicht- Leguminosen)	35	Ganz- pflanze	100	10,6	38,6	24,2	2,7 (6,2)	10,2 (23,4)	3,9 (8,9)	16,1 (19,4)	64,8 (78,1)	40,9 (49,3)	1,1	6,1	2,2
Zwischen- futter ¹	25	Ganz- pflanze	100	24,0	32,0	28,0	3,5 (8,0)	4,8 (11,0)	4,1 (9,5)	20,8 (25,0)	37,4 (45,0)	29,1 (35,0)	2,0	3,0	2,5
Tabak Burley ¹	25	Blätter	100	25,0	35,0	30,0	2,8 (6,5)	3,5 (8,0)	3,2 (7,3)	33,2 (40,0)	49,8 (60,0)	41,5 (50,0)	2,3	3,3	2,8
	30	Stängel	100	20,0	26,0	23,0	2,8 (6,5)	3,5 (8,0)	3,2 (7,3)	29,1 (35,0)	45,7 (55,0)	37,4 (45,0)	1,5	2,5	2,0
Tabak Virginie ¹	25	Blätter	100	20,0	30,0	25,0	2,2 (5,0)	2,6 (6,0)	2,4 (5,5)	33,2 (40,0)	45,7 (55,0)	39,4 (47,5)	1,5	2,5	2,0
	25	Stängel	100	8,0	12,0	10,0	3,3 (7,5)	4,1 (9,5)	3,7 (8,5)	33,2 (40,0)	49,8 (60,0)	41,5 (50,0)	3,0	5,0	4,0
Reis	60	Körner		9,0	13,0	11,0	2,6 (4,0)	3,5 (8,0)	3,0 (6,0)	3,3 (4,0)	5,8 (7,0)	4,6 (5,5)	0,6	1,2	0,9
	60	Stroh		6,0	7,0	6,5	0,9 (2,0)	1,7 (4,0)	1,3 (3,0)	10,8 (13,0)	23,2 (28,0)	17,0 (20,5)	1,2	2,4	1,8

¹ Erträge und Gehalt bezogen auf die Trockensubstanz (TS).

