

Stickstoff im System Boden-Pflanze

9.1 N im Boden

9.1.1 Der Stickstoffzyklus im Boden

Der N-Zyklus im Boden ist ein integraler Bestandteil des globalen N-Kreislaufes. Durch eine große Anzahl von biologischen und chemischen Prozessen wird das einzelne Stickstoffatom in unterschiedliche Bindungsformen überführt, die zum Teil mit anderen Kompartimenten der „Umwelt“ im Austausch stehen.

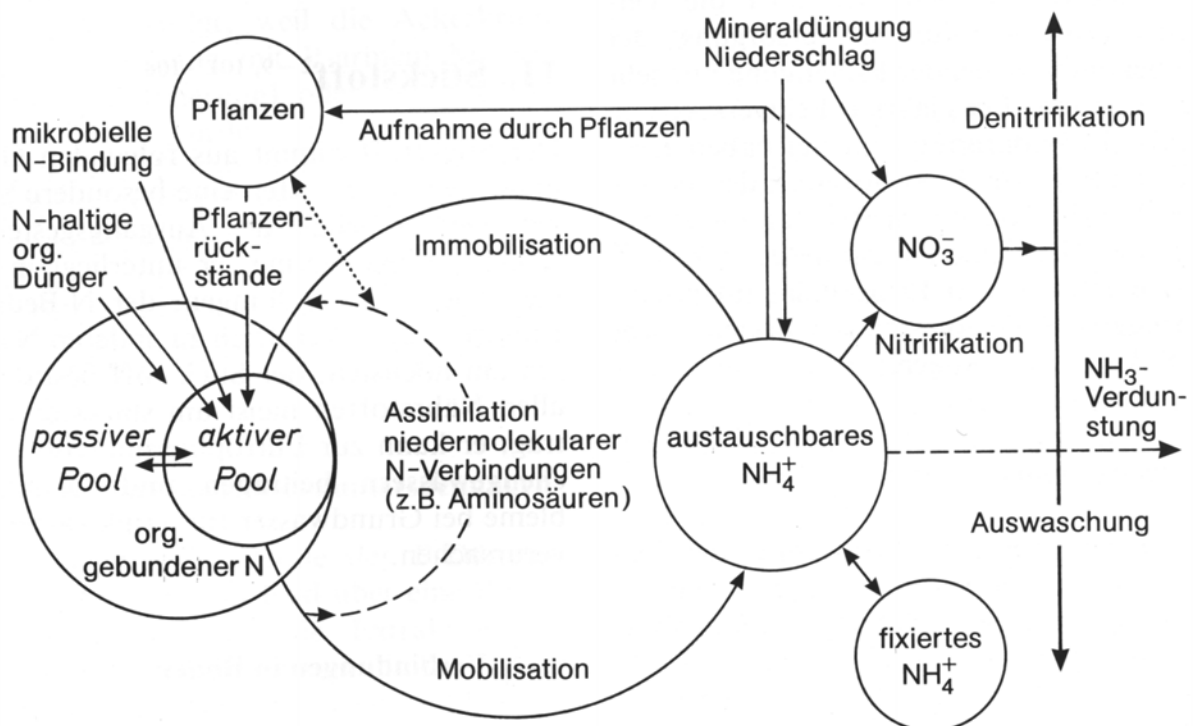


Abbildung 9.1: N-Zyklus im Boden

Die Zufuhr von Boden-N erfolgt durch biologische Fixierung von Luftstickstoff, die nur von Bakterien durchgeführt werden kann, durch mineralische und organische Düngung sowie durch Deposition von Ammonium (NH_4^+) und Nitrat (NO_3^-) aus der Atmosphäre. Verluste entstehen durch die N-Abfuhr mit dem Erntegut, durch Auswaschung und durch gasförmige Verluste.

Als Ausgangspunkt der internen N-Umsetzungen im Boden kann die Überführung des organischen Stickstoffs im Boden in anorganische Formen angesehen werden, ein Prozess der als Mineralisation bezeichnet wird. Der erste Schritt dieses Prozesses, die Bildung von NH_4^+ aus dem Abbau des organischen N durch Mikroorganismen wird manchmal als

Ammonifikation bezeichnet. Die ebenfalls durch Bakterien durchgeführte Oxidation des Ammoniums zum NO_3^- heißt Nitrifikation.

Die in diesen Prozessen gebildeten anorganischen N-Formen, insbesondere das Ammonium, können wiederum von Bodenmikroorganismen aufgenommen werden und werden dann ein Bestandteil von deren Biomasse. Nach dem Absterben der Organismen wird deren Biomasse-N wieder zu einem Bestandteil des organischen Bodenstickstoffs. Dieser als Immobilisation bezeichnete Prozess ist von großer Bedeutung, da durch ihn ein großer Anteil von zugeführtem mineralischen Düngerstickstoff der Aufnahme durch die Pflanzenwurzel entzogen wird.

Der N-Kreislauf im Boden wird durch den Prozess der Denitrifikation geschlossen, in dem das Nitrat durch Mikroorganismen zu N_2 reduziert wird, das in die Atmosphäre zurückkehrt.

9.1.2 N-Vorratsformen im Boden

Auf folgende Weise kommt man vom Humusgehalt eines Ackerboden A_p -Horizontes zum Gesamt-N- (N_t) -Vorrat:

1 ha Ackerkrume, trocken, wiegt bei 25 cm Pflugtiefe 3750 t

2% Humus entsprechen 75 t Humus

2% Humus \approx 1 % C 38 t C

Das C/N-Verhältnis beträgt im Schnitt 12 : 1 3.2 t N

Diese 3200 kg N setzen sich (diese Zahlen gelten z.B. für alle etwas schwereren Böden) wie folgt zusammen:

					%
anorganische N-Formen (ca. 10 % des N_t)	{	NO_3 -Stickstoff	0-200	kg N/ha	
		NH_4 -Stickstoff (austauschbar)	0-50	kg N/ha	
		$\emptyset \Sigma$	60	kg N/ha	2
		NH_4 -Stickstoff (fixiert)	250	kg N/ha	8
organische N-Formen (ca. 90 % des N_t)	{	Amid-Stickstoff	700	kg N/ha	22
		Aminosäure-Stickstoff	1300	kg N/ha	41
		Aminozucker-Stickstoff	140	kg N/ha	4
		Heterozyklisch geb. Stickstoff,	750	kg N/ha	23
		davon Purine, Pyrimidingruppe	550	kg N/ha	

Die organischen N-Bindungsformen sind in der Reihe ihrer mikrobiellen Metabolisierbarkeit angeordnet. Für den im Jahresablauf stattfindenden Mineralisierungs- bzw. N-Assimilations-Prozess kommen in erster Linie die Amid- und Amino-N-Fractionen in Betracht, die NH_4 - und

NO₃-N liefern und auch umgekehrt wieder die ersten organischen Resynthese-Fractionen darstellen.

Unter **Amid-N** verstehen wir den organischen Stickstoff, der nach einer mehrstündigen Hydrolyse des Bodens mit 6N HCl in NH₄⁺ überführt wird. Diese chemische Hydrolyse ist eine konventionelle Methode, die ein Ergebnis bringt, dass der in biologischen Systemen ablaufenden enzymatischen Hydrolyse angenähert ist. Man kann also davon ausgehen, dass aus Amidstickstoff im Boden durch einfache enzymatische Hydrolyse aus organischer Bindung NH₄⁺ freigesetzt wird.

Aminosäure-N ist der Stickstoff, der nach der Hydrolyse in Form von Aminosäuren vorliegt.

Im Boden kommen fast alle proteinogenen Aminosäuren und auch verschiedene Nichteiweißaminosäuren vor. Der überwiegende Anteil dieses N liegt als Eiweiß oder als Peptid vor, z.B. lebende und abgestorbene Bakterienleiber, Eiweiße in Pilzen, in lebenden und abgestorbenen Wurzeln, in Pflanzenrückständen.

Aminozucker kommen im Boden vor als Bestandteile der bakteriellen Zellwand und als Bausteine von Chitin (Gerüstsubstanz der Arthropoden, in der Zellwand vieler Pilze).

Die am schwersten mineralisierbare N-Bindungsform, ist der **heterozyklisch in den Huminstoffen** eingebaute Stickstoff, der im Boden mehr als 20 % des Gesamt-N ausmacht.

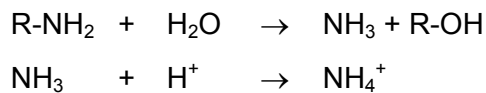
Der heterozyklisch gebundene Stickstoff leitet sich direkt oder indirekt von Aminosäuren und Amiden ab. Es gibt in der Natur verschiedene Makromoleküle mit spezifischen Aufgaben, in denen heterozyklisch gebundener Stickstoff eingebaut ist, z.B. Nukleinsäuren, Chlorophyll, Vitamin B₁₂, Gallenfarbstoffe.

Im allgemeinen kommt es im Laufe der Mineralisierungsprozesse der biogenen Substanz bei gleichzeitiger Synthese stabiler Zwischenprodukte im Humus zu einer relativen N-Anreicherung. Das heißt: Die Speicherprodukte sind N-reicher als die Ausgangssubstanzen oder anders herum: Der C-Anteil der Ausgangssubstanzen wird rascher (unter Freisetzung von CO₂) mineralisiert als der N-Anteil - infolge des Abfangens von N durch die entstehenden Syntheseprodukte. Das liegt einerseits an der Tätigkeit der Mikroorganismen, die einen erheblichen Anteil der organischen Ausgangssubstanz in Bakterienkörper-Substanz mit einem kleinen C/N-Verhältnis (< 10) umwandeln. Andererseits ist die geringe N-Mineralisationsrate dadurch bedingt, dass die organischen N-Verbindungen entweder durch andere abbauresistentere organische Stoffe oder durch Adsorption an Tonmineralen stabilisiert werden.

9.1.3 N-Mineralisierung und Immobilisierung

Als N-Mineralisierung (=Ammonifizierung) bezeichnet man die mikrobielle Umwandlung von

organisch gebundenem Stickstoff in NH_4^+ . Sie verläuft nach dem Reaktionsschema:



Dieser Prozess ist exotherm, es sind zahlreiche heterotrophe Mikroorganismen beteiligt, vor allem aerobe und anaerobe Eiweisszehrer.

Heterotrophe Mikroorganismen assimilieren anorganische N-Verbindungen zum Aufbau ihrer Körpersubstanz, es bildet sich mikrobielle Biomasse, ihr C/N-Verhältnis liegt bei 4 - 15. Unter Immobilisierung versteht man die Umwandlung anorganischer N-Verbindungen in organische Verbindungen. Wird mehr Stickstoff in der Körpersubstanz der Bakterien festgelegt als bei der Mineralisierung zugeführter OS frei wird dann wird Stickstoff immobilisiert.

Faustregel: Bei C/N-Verhältnis < 25 Stickstoffmineralisierung beim Abbau
bei C/N-Verhältnis > 25 vorübergehend Stickstoffimmobilisierung

9.1.4 Nitrifikation

Die Nitrifikation ist die mikrobielle Umwandlung von Ammonium zu Nitrit und Nitrat, sie erfolgt in zwei Stufen:



Diese exothermen Reaktionen erfolgen hauptsächlich durch die aerob lebenden Bakteriengattungen Nitrosomonas (Ammonium \rightarrow Nitrit) und Nitrobacter (Nitrit \rightarrow Nitrat).

Bedingungen für die Nitrifikation:

Anwesenheit von Sauerstoff

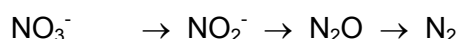
Temperaturoptimum 25 - 35 °C, findet aber auch bei 0 - 2 °C noch statt!

pH-Optimum bei pH 6 - 8

Durch Nitrifikationshemmstoffe kann die Entwicklung der Nitrifikanten verzögert werden (z.B. „N-Serve“, Didin).

9.1.5 Denitrifikation

Eine Verlustquelle für Stickstoff aus dem Boden ist die Denitrifikation; die biologische Denitrifikation findet statt durch anaerobe Atmung von Bakterien bei O_2 -Mangel:



Energiegewinn /mol Glucose:

O_2 -Atmung: 686 kcal

NO_3 -Atmung zu N_2 : 570 kcal

NO_3 -Atmung zu N_2O : 545 kcal

Bedingungen für Denitrifikation:

O₂-Mangel (z.B. Wassersättigung, anaerobe Bereiche in Aggregaten)

verfügbare C-Verbindungen (Substrat für Atmung)

Temperatur: Minimum 4 °C, Optimum 20 - 37 °C

Anwesenheit von Nitrat

höhere Denitrifikation in der Rhizosphäre, wegen O₂-Verbrauch durch Wurzeln und Anlieferung von NO₃ mit dem Massenfluss, Wurzelauausscheidungen.

Größenordnung der N-Verluste durch Denitrifikation:

Acker 10 - 30 kg N/ha, ca. 7 % des zugeführten Dünger-N, dabei ca. 0.2 % als N₂O.

ökologische Bedeutung:

N₂O schädigt Ozonschicht

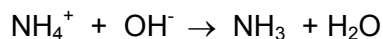
Möglichkeit zur Entfernung von Nitrat aus Grund-/Abwasser

9.1.6 Ammoniumfixierung

Ammonium ist am negativen Ionenaustauschkomplex des Bodens austauschbar gebunden, es wird daher kaum ausgewaschen. Der Ionenradius ist ähnlich wie der von K⁺-Ionen.

Ammonium kann wie Kalium in den Zwischenschichten bestimmter Tonminerale mit hoher Schichtladung (Illite, Vermiculite, Smectite) fixiert werden, z. B. in Illiten bis 900 mg N/kg, die Verfügbarkeit dieses fixierten Ammoniuns ist variabel. Ammonium kommt auch als „natives NH₄“ im Inneren von Silicaten vor.

9.1.7 Ammoniakverflüchtigung



Gasförmige Ammoniakverluste können vor allem auftreten, wenn der Boden eine alkalische Reaktion aufweist und wenn mit Ammoniak, NH₄-Salzen oder organischen N-Düngern (NH₄ in Gülle) gedüngt wird.

Faktoren bei Ammoniakverlusten:

pH: bei hohem pH bei Ammonium- oder Harnstoffdüngung hohe Verluste

Temperatur, Wind: bei steigender Temperatur und Wind höhere Verluste

Textur: höhere Verluste auf leichten Böden da geringe KAK, erleichterte Diffusion

Bodenfeuchte: bei steigendem Wassergehalt höhere Verluste

Form und Ausbringung der N-Dünger

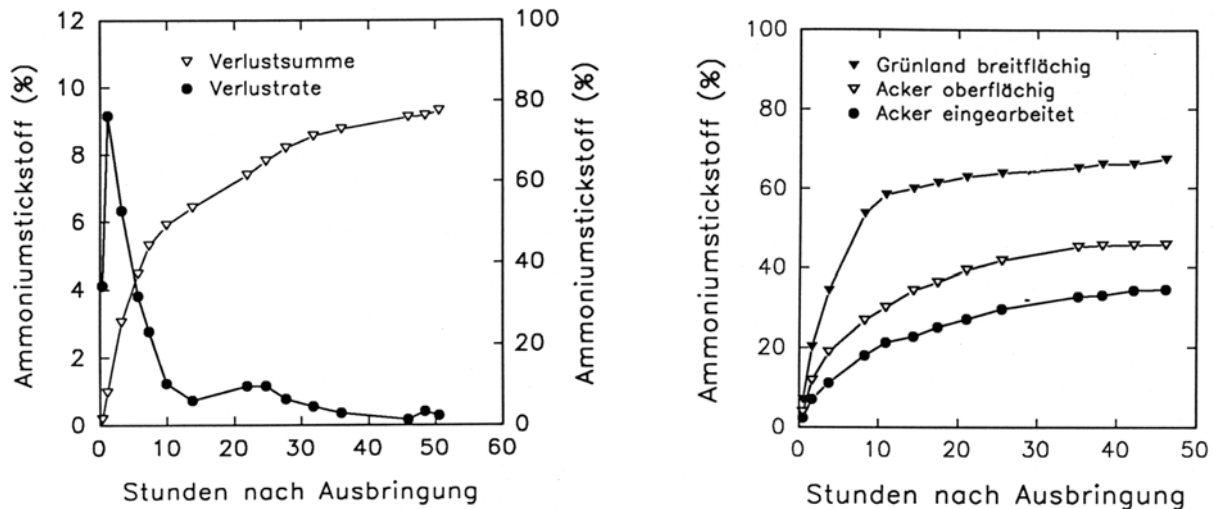
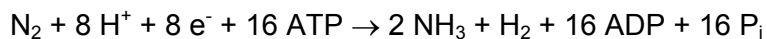


Abbildung 9.2: Gasförmige Ammoniakverluste nach Gülleausbringung im Zeitverlauf.

9.1.8 Biologische Stickstofffixierung (BNF)

Unter biologischer N-Fixierung versteht man die Überführung des inerten Moleküls N_2 zum NH_3 . Dieser Prozess kann nur von Prokaryonten durchgeführt werden, d.h. von Bakterien und Blaualgen (Cyanobakterien). Die summarische Reaktionsformel für diesen Prozess ist:



Der Prozess ist stark endergonisch, der Energiebedarf zur Fixierung eines Moles N beträgt 960 kJ. Der biochemische Ablauf der N_2 -Reduktion ist bei allen N-fixierenden Organismen recht einheitlich und wird durch das Enzym Nitrogenase katalysiert. Die Nitrogenase ist ein Fe/Mo-haltiges Protein und ist sehr sauerstoffempfindlich.

Es können 3 verschiedene Strategien der N-Fixierung unterschieden werden:

die symbiontische, die assoziative und die N-Fixierung durch frei im Boden lebende Mikroorganismen (Abb. 9.3). Die **symbiontische Fixierung** ist der effizienteste Prozess, da die mit N-fixierenden Bakterien infizierten Pflanzen Kohlenhydrate für die N-Bindung bereitstellen und zugleich für den Schutz der Nitrogenase vor Sauerstoff sorgen können. Landwirtschaftlich wichtig ist hier vor allem die Symbiose der Bakterien aus der Gattung *Rhizobia* mit Leguminosen. Etwa 90% des durch die *Rhizobien* fixierten Stickstoffs wird an die Pflanze transferiert.

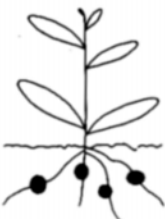
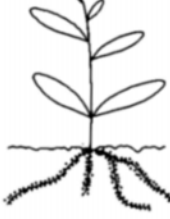
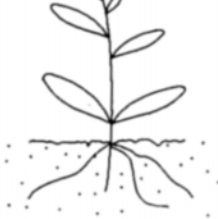
<p>System of N₂ fixation</p> <p>(N₂ → NH₃)</p> <p>and microorganisms involved</p>	 <p><u>Symbiosis</u> (e.g., <i>Rhizobium</i>, <i>Actinomyces</i>)</p>	 <p><u>Associations</u> (e.g., <i>Azospirillum</i>, <i>Azotobacter</i>)</p>	 <p><u>Free living</u> (e.g., <i>Azotobacter</i>, <i>Klebsi- ella</i>, <i>Rhodospirillum</i>)</p>	
<p>Energy source (organic carbon)</p>	<p>Sucrose and its metabolites (from the host plant)</p>	<p>Root exudates from the host plant</p>	<p>Heterotroph: Plant residues</p>	<p>Autotroph: Photo- synthesis</p>
<p>Estimates of amounts fixed (kg N ha⁻¹yr⁻¹)</p>	<p>Legumes: 50–400 Nodulated non- legumes: 20–300</p>	<p>10–200</p>	<p>1–2</p>	<p>10–80</p>

Abbildung 9.3: Formen der biologischen N-Bindung (Marschner, 1995).

Ausmaß der natürlichen N-Fixierung (kg/ha und Jahr, nach Tisdale und Nelson):

Luzerne	180	Wicke	82
Ladinoklee	160	Erbse	65
Weißklee	90	Bohne	35

BNF ist weltweit gesehen der größte Eintragsfaktor für Stickstoff in den Boden, weitere Quellen sind:

industrielle Stickstofffixierung → Düngemittel

Zufuhr über Niederschläge: N aus Stickoxidemissionen von Kfz-Verkehr, Heizung, Industrie,

N-Reduktion durch Blitz: Reaktion von NO_x mit H_2O zu HNO_3 , und HNO_2

saurer Regen, N-Eintrag ca. 5-30 kg, standortabhängig.

9.1.9 N-Auswaschung

erfolgt fast ausschließlich als Nitrat, als Ammonium nur manchmal auf leicht durchlässigen Sandböden (geringe KAK, rasche Wasserbewegung). Nitrat als Anion wird im Boden kaum gebunden, daher ist eine Vorratsdüngung mit Stickstoff nicht möglich.

Die wesentlichen Faktoren für die Nitratauswaschung sind:

NO_3^- -Konzentration in der Bodenlösung

Wasserbewegung im Bodenprofil

Entzug durch Pflanzen

9.2 Aufnahme, Transport und Funktion des Stickstoffs in der Pflanze

9.2.1 Aufnahme von Stickstoff in die Pflanze

Stickstoff wird von der Pflanze überwiegend in mineralischer Form (NO_3^- , NH_4^+) aufgenommen. Für die N-Ernährung der Pflanze spielt der in geringen Anteilen aufgenommene organische Stickstoff (Aminosäure, Amide) sowie Harnstoff keine wesentliche Rolle. Die meisten Pflanzen bevorzugen in der **Aufnahme** den in Bodenlösungen dominant vorkommenden NO_3^- -N. Ausnahmen bilden solche Pflanzen, die an überstaute Bodenbedingungen (starke Denitrifikation) und an NH_4^+ -N Ernährung angepasst sind (Sumpfpflanzen, Reis). NH_4^+ -N ist aber in höheren Konzentrationen für die Pflanze toxisch. In der Regel wird NH_4^+ -N daher nach der Aufnahme rasch, zumeist schon in der Wurzel assimiliert, das heißt in Aminosäuren bzw. Amide eingebaut. Die Speicher-, Transport- und Entgiftungsform von Stickstoff ist in den verschiedenen Pflanzenarten unterschiedlich, wie an der Zusammensetzung vom Stickstoff im Xylemsaft und den bevorzugten Aminosäuren der Pflanzenarten zur N-Speicherung sichtbar ist (Abb. 9.4 und 9.5).

NO_3^- kann in den Vakuolen problemlos gespeichert werden und stellt ein wichtiges **Osmotikum** für die Pflanzen dar. Infolge einer erhöhten N-Konzentration sind schädliche Auswirkungen viel eher bei NH_4^+ als NO_3^- Angebot sichtbar. NO_3^- ist ausschließlich xylemmobil, die **rückverlagerbaren N-Formen** sind Amide und Aminosäuren. Amide entstehen, wenn die Carboxylgruppe einer Aminosäure mit einer NH_3 -Gruppe kondensiert. Sie stellen also insofern eine günstigere N-Transportform dar als Aminosäuren, da pro C-Atom mehr reduzierter Stickstoff transportiert werden kann.

NO_3^- -N muss also vor dem Einbau in organische Substanz reduziert werden. Die **Nitratreduktion** erfolgt in zwei Schritten, die in verschiedenen Kompartimenten der Zelle stattfinden (Abb. 9.6).

Nitratreduktion

Das katalysierende Enzym, die Nitratreduktase, ist im Cytoplasma lokalisiert. Unter Verbrauch von Reduktionsäquivalenten aus der Photosynthese bzw. der Glycolyse wird NO_3^- zu NO_2^- in Gegenwart von K^+ und der Bildung von reduzierten Coenzymen und Wasser reduziert. Die Nitratreduktase wird rasch von Proteasen abgebaut. Aufgrund der **kurzen Halbwertszeit** von wenigen Stunden muss das Enzym ständig neu synthetisiert werden. Die K^+ Ionen sind in erster Linie für den Aufbau des Enzymproteins erforderlich.

Nitritreduktion

Die Nitritreduktase ist im Chloroplasten lokalisiert. Als Reduktionsmittel werden aus dem Photosystem I stammendes Ferredoxin und Mn^{2+} Ionen benötigt. Aus der Reaktion gehen Wasser und OH^- Ionen hervor, die zu einer **pH-Erhöhung** des Mediums führen.

Obwohl die Nitratreduktase aufgrund ihres raschen Abbaus ständig neu synthetisiert werden muss, ist bei unzureichender Nitratreduktionsrate dennoch nicht das Enzym selbst, sondern die Menge an Reduktionsäquivalenten limitierend. In Getreidearten Weizen und Gerste konnte keine Beziehung gefunden werden zwischen der Nitratreduktaseaktivität von Sorten und dem Proteingehalt im Korn (Weizen) bzw. dem Ertrag (Gerste). Die Menge an Reduktionsäquivalenten in Form von reduzierten Coenzymen ist bei Belichtung deutlich höher (Abb. 9.7 a,b).

Insbesondere die Nitritreduktion ist direkt auf Elektronen und reduziertes Ferredoxin aus der Photosynthese angewiesen. Eine Endprodukthemmung, das heißt das Endprodukt der Nitratreduktase, das Nitrit, reduziert bereits in sehr geringen Konzentrationen die Nitratreduktaseaktivität. Daher sind Anreicherungen von Nitrit in Pflanzen eigentlich nur als Folge der Anwendung bestimmter Herbizide zu beobachten.

In den Blattspreiten ist die Nitratkonzentration wesentlich niedriger, was auf die höhere Photosyntheseaktivität im Vergleich zu den Blattstielen zurückzuführen ist. Daher sind hohe Nitratgehalte vor allem unter Niedriglichtbedingungen zu erwarten (Herbstgemüse). Dies ist vor allem in Chenopodiaceen ausgeprägt, da diese Arten Nitrat sehr stark als Osmotikum einsetzen. Bei niedriger Lichtintensität kann Zucker in diesen Pflanzen vollständig durch NO_3^- in der osmotischen Funktion ersetzt werden.

Nitratreiche Nahrung gilt für den Menschen und andere Säugetiere deshalb als bedenklich, da durch mikrobielle Umsetzung aus NO_3 NO_2 entstehen kann (Darmflora von Wiederkäuern, Stehen lassen und Aufwärmen von Gemüse). Gesundheitliche Risiken des Nitrits bestehen zum einen in der Bildung von Methämoglobin, und zum zweiten in der Bildung von cancerogenen Nitrosaminen. Bislang konnte noch in keiner Studie ein signifikanter Zusammenhang zwischen Nitratgehalten in pflanzlicher Nahrung und dem Krebsrisiko gezeigt werden, dennoch ist es angebracht die Nitratgehalte in Gemüse und anderen Lebensmitteln auf ein Minimum zu reduzieren.

Ort der Nitratreduktion

Die **Nitratreduktion** findet wie bereits gesagt nicht nur in **grünen Pflanzenorganen** statt, sondern auch in den **Wurzeln**. Der Anteil des in den Wurzeln reduzierten Nitrats hängt vom Nitratangebot, Umweltfaktoren (Temperatur in Wurzel und Spross), der Pflanzenart und dem Entwicklungsstadium ab.

Bäume und Sträucher enthalten in ihren Blättern in der Regel sehr wenig Nitrat, hier findet die Reduktion fast ausschließlich in der Wurzel statt. Auch mit dem **Blattalter** verändert sich die Aktivität. In älteren Geweben findet kaum mehr eine Nitratreduktion statt (Abb. 9.8).

Über das Xylem angeliefertes Nitrat kann hier nur in Vakuolen gespeichert werden, auch ein Abtransport ist aufgrund der geringen Phloemmobilität nur begrenzt möglich. Daher ist auch die Reduktion in den Wurzel - obwohl energetisch schlechter - häufig sinnvoll für die Pflanze.

Weitere Faktoren der Nitratreduktaseaktivität

NO₃⁻ - Angebot: Die Nitratreduktase gilt als induktives Enzym, das heißt erst beim Auftreten von Substrat, also Nitrat, kommt es zur Bildung des Enzyms. Neben einer hohen Syntheserate ist ein rascher Turn-over ein weiteres Charakteristikum des Enzyms.

Reduzierte Stickstoffverbindungen: Die Nitratreduktase wird durch reduzierte N-Verbindungen gehemmt (Endprodukthemmung), da Pflanzen im Gegensatz zum Mensch oder Tier nicht in der Lage sind, reduzierten Stickstoff auszuscheiden oder zu oxidieren. Reduzierte N-Verbindungen sind aber häufig phytotoxisch, daher muss die Menge Stickstoff die reduziert wird von der Pflanze kontrolliert werden.

Molybdänangebot: Molybdän ist ein Bestandteil der Nitratreduktase und Mo-Gehalte sind sehr eng mit der Nitrogenaseaktivität korreliert.

Auswirkungen hat der Ort der Nitratreduktion auch auf den erforderlichen **Ladungsausgleich**. Erfolgt die Nitratreduktion in der Wurzel werden H⁺ aus der Rhizosphäre aufgenommen (Alkalisierung der Rhizosphäre). Für den in den meisten landwirtschaftlichen Kulturen mengenmäßig wichtigeren Fall der Reduktion im Spross, erfolgt die Neutralisierung über die Synthese organischer Säuren, wie bereits im Kapitel der Nährstoffaufnahme besprochen. Der Gehalt an organischen Säuren steht daher in engem Zusammenhang mit der Nitrataufnahme und Reduktionsleistung der Pflanze (Tab. 9.1).

Ammonium hat gegenüber dem Nitrat den Nachteil, dass es bereits in der Wurzel in organische Moleküle überführt werden muss, da es im Gleichgewicht steht mit der Ammoniak-Konzentration, die bereits bei niedrigen Konzentrationen toxisch wirkt. Primärer Akzeptor in dieser Ammoniak-Entgiftung ist die Glutaminsäure. Im so genannten **GOGAT-System** wird mit verschiedenen Enzymen (Glutaminsynthetase, Glutamatsynthase) unter Verbrauch von α -Ketoglutarat und ATP Glutaminsäure gebildet.

Diese **Assimilation von NH₃** ist also ein **energieverbrauchender** Prozess mit **Bedarf an C-Gerüsten**. Ein Abfall im Kohlehydratgehalt der Wurzel kann zur Hemmung des Wurzelwachstums führen.

Unterschiedliche Probleme bestehen bei Nitrat und Ammonium im Zusammenhang mit der **pH-Regulation** bzw. der pH-Veränderung im Außenmedium. Die Assimilation von NH₃ ist mit der Bildung von Protonen verbunden, die zur Ansäuerung des Außenmediums führen. NO₃⁻ -

N-Ernährung führt eher zu einem Anstieg im Boden pH. Die Vor- und Nachteile der beiden Stickstoffformen fallen aber erst bei hohem Stickstoffangebot ins Gewicht (Abb. 9.9).

Die Frage **welche N-Form die bessere Ernährung** der Pflanze gewährleistet, ist wahrscheinlich artspezifisch zu beantworten. Sumpfreis gilt als eine Art, die positiv auf das N-Angebot in Form von Ammonium reagiert. Für einige andere Arten ist eine vorteilhafte NO_3^- -N-Ernährung festgestellt worden. Entscheidend für die Aussagekraft der Untersuchungen ist hier das Medium in dem gearbeitet wurde. Hohe Ammoniumkonzentrationen können aufgrund der Sorption im Boden meist nur in Nährlösungen erzeugt werden. Hier sind dann aber Toxizitätseffekte der im Vergleich zum Boden hohen NH_4^+ - Konzentrationen nicht auszuschließen. Gerade in Nährlösungskulturen bei denen sich aufgrund der schlechten Pufferung starke Konzentrations- und pH-Veränderungen ergeben ist bei einem kombinierten Angebot von NH_4^+ und NO_3^- häufig der höchste Biomasseertrag festzustellen.

9.2.2 Aufbau von N-Verbindungen in der Pflanze

Da NH_3 die zwischen Biomembranen bestehenden H^+ Gradienten abbaut und damit in zahlreiche, wichtige Stoffwechselvorgänge eingreift, muss es rasch assimiliert werden. Die primären N-Verbindungen, die über die **reduktive Aminierung** entstehen sind die Aminosäure Glutamat und das Säureamid Glutamin. Andere Aminosäuren entstehen über die **Transaminierung**. Je nach Herkunft der C-Gerüste werden unterschiedliche Aminosäurefamilien unterschieden (Serinfamilie, Pyruvatfamilie, Aspartatfamilie, Glutamatfamilie, Shikimisäurefamilie). **Essentielle Aminosäuren**, also Aminosäuren, die von monogastrischen Lebewesen nicht hergestellt werden können, sind: Valin, Leuzin, Isoleuzin, Lysin, Methionin, Threonin, Tryptophan, Histidin. Die Aminosäuren sind Bausteine der Protein-Biosynthese.

9.2.3 N-Ernährung und Pflanzenqualität

1. Amide, Amine

Amide spielen als Entgiftungs- und Transportform eine entscheidende Rolle im N-Metabolismus. Eine Erhöhung der N-Düngung hat daher (insbesondere bei NH_4^+ -Angebot) stets einen Anstieg des Amidgehaltes zur Folge. Ebenfalls zu gesteigerten Amidgehalten führen alle Vorgänge, die die Protein-Biosynthese hemmen.

Amine sind Decarboxylierungsprodukte von Aminosäuren. Sie kommen in weitaus geringeren Konzentrationen vor als Amide und zwar als Bestandteil der Biomembranen.

Steigende N-Düngung in Zuckerrüben führt zu steigenden Gehalten an Amino-N (überwiegend als Glutamin) und Betain. Dies verringert die Zuckerausbeute und führt somit zu einer Verminderung des bereinigten Zuckerertrages.

2. Nitratgehalt

Nitrat wird in den Vakuolen gespeichert und stellt ein wichtiges anorganisches Osmotikum dar. Es hat daher hohe Bedeutung für den Zellturgor. Hohe Nitratgehalte korrelieren daher meist positiv mit Wachstumsraten. Die gesundheitlichen Bedenken im Zusammenhang mit den Nitratgehalten sind bereits erwähnt worden.

3. Kohlehydratgehalte

Wegen der Konkurrenz um das gemeinsame Substrat ist eine erhöhte N-Düngung meist mit geringeren Kohlehydratgehalten verknüpft. Da aber die Massenerträge meist stärker stimuliert werden als die Gehalte reduziert werden, beobachten wir in der Regel bei gesteigerten N-Düngungen höhere Flächenerträge trotz abnehmender Gehalte (Tab. 9.2).

Bei N-Überdüngung kommt es häufig zu geschmacklichen Beeinträchtigungen und der Ausbildung von schwächeren Zellwänden und Festigungselementen (Lager von Getreide) und zu einer erhöhten Empfindlichkeit gegenüber Schadorganismen.

4. Vitamingehalte

Durch eine Stickstoffdüngung kommt es zu einer verstärkten Protein-Biosynthese. Im Gegensatz zu Speichergeweben sind in vegetativen Organen ein Großteil der Proteine Funktionsproteine, d.h. also Enzyme. So sind beispielsweise in Blättern bei guter N-Versorgung mehr als 80 % der Proteine an der Photosynthese beteiligt. Da für monogastrische Lebewesen viele Co-Enzyme Vitamincharakter haben, kommt es indirekt als Folge einer Stickstoffdüngung zu einem Anstieg der Vitamingehalte. Ein gutes Beispiel hierfür stellt der Einfluss der Stickstoffdüngung auf das Vitamin A und die Vitamine der B-Gruppen dar. **Carotin:** Pro-Vitamin A ist Bestandteil des Chromoproteinkomplexes der Photosynthese und an der Entgiftung der im Rahmen der Photosynthese entstehenden Sauerstoffradikale beteiligt. Eine Zunahme des Chlorophyllgehaltes als Folge einer Stickstoffdüngung ist daher notwendigerweise auch mit einer Zunahme des Carotingehaltes verbunden.

Eine ähnliche Kausalität lässt sich für die Vitamine der B Gruppe aufzeigen.

Vitamin B: Die Tab. 9.3 zeigt die Beeinflussbarkeit der Enzyme der B-Gruppe durch die Höhe der N-Düngung.

Vitamin B₁ (Thiamin) ist ein Co-Enzym bei der Carboxylierung von Ketosäuren. Vitamin B₂ (Riboflavin) ist Bestandteil des FAD-Nucleotids.

5. Proteingehalt

Nach dem bereits bei den Vitamingehalten dargelegten Zusammenhängen ist es einleuchtend, dass über die Stickstoffdüngung in starkem Maße auch die Proteingehalte beeinflusst werden können. Gängigerweise werden Proteingehalte über den N-Gehalt ermittelt.

Gesamt-N entspricht Rohprotein-N + $\text{NO}_3\text{-N}$, und Rohprotein-N setzt sich zusammen aus löslichen N (Aminosäuren, Amide, Peptide, Nucleotide, Phosphatide, sek. Pflanzenstoffe, anorganischer N) und Reinprotein-N (Proteine, Proteide).

Besonders in vegetativen Pflanzenteilen ist der Rohproteingehalt unter Umständen wenig geeignet, den tatsächlichen Proteingehalt der Pflanzen zu charakterisieren, da hier niedermolekulare Stickstoffverbindungen oder NO_3^- einen erheblichen Anteil am Gesamt-N haben.

In Blättern ist der Anteil des Eiweiß-N am Gesamt-N stark abhängig vom Blattalter und vom N-Versorgungsgrad (Roh- und Reinproteingehalt junger Blätter im allgemeinen höher als der älterer Blätter (Tab. 9.4). Eine Stickstoffsteigerung beeinflusst die N-Gehalte älterer Pflanzenteile stärker. Die Erhöhung des Proteingehaltes in vegetativen grünen Pflanzenteilen beruht vor allem auf einer erhöhten Zahl von Chloroplasten (dunkelgrüne Färbung der Blätter und der Enzyme der Photosynthese).

Prinzipiell gelten die in Zusammenhang mit vegetativen Pflanzenteilen diskutierten Zusammenhänge auch für Speichergewebe. Allerdings kommt es hier zunächst einmal zu einer Verlagerung des Stickstoffs in die vegetativen Pflanzenteile. Vermehrtes Blattwachstum und vermehrter Assimilattransport in die Ertragsorgane führt über eine Verdünnung zur Abnahme des Proteingehaltes.

Eine sichere Maßnahme zur Erhöhung des Proteingehaltes in Speicherorganen stellt eine N-Spätgabe (vor, oder zum Zeitpunkt der Blüte) dar, weil N direkt aus den Wurzeln in die Speicherorgane verlagert wird.

9.2.4 N-Ernährung und Pflanzengesundheit

In der Regel führt ein steigendes N-Angebot insbesondere dann, wenn das Optimum für den Ertrag bereits überschritten ist, zu einem erhöhten Schadorganismenbefall (Tab. 9.5). Dies trifft sowohl für pilzliche, bakterielle und tierische Schädlinge zu.

Erhöhter Schadorganismenbefall beruht vor allem darauf, dass bei erhöhtem N-Angebot:

1. das Eindringen der Schadorganismen in die Zelle erleichtert wird, da die Stabilität des Gewebes durch einen geringeren Gehalt an Strukturelementen (s.o. Einfluss der N-Düngung auf Kohlenhydrate) verringert ist,
2. der Gehalt an phenolischen Substanzen (Phytoalexine) abnimmt,
3. die Konzentration an niedermolekularen N-Verbindungen (Aminosäuren, Amiden) in der Zelle erhöht - und damit eine bessere Nahrungsgrundlage für Schadorganismen gegeben ist,
4. durch einen dichteren Pflanzenbestand das Mikroklima für die Schadorganismen verbessert und die Ausbreitung erleichtert wird.

Die Betrachtung der N-Ernährung allein kann jedoch zu Fehlschlüssen führen, da die Pflanzengesundheit nicht allein durch die N-Ernährung, sondern auch durch die Ernährung mit anderen Nährstoffen beeinflusst wird (Abb. 9.10). Hieraus lässt sich ableiten, dass insbesondere eine einseitige Erhöhung des N-Angebotes zu erhöhter Empfindlichkeit der Pflanzen gegenüber Schadorganismen führt, ein harmonisch gesteigertes Nährstoffangebot dagegen nur von geringerem Einfluss ist.

9.2.5 Artenzusammensetzung bei Grünland

Durch einseitige N-Düngung erfolgt eine starke Förderung der Gräser auf Kosten von Leguminosen und Kräutern, die durch die Konkurrenz um Licht unterdrückt werden. Hierdurch wird zwar einerseits die Trittfestigkeit der Grasnarbe sowie die Trockensubstanzproduktion erhöht, dies geht jedoch auf Kosten des Eiweißgehaltes, und eines geringeren P- und Calcium-Gehaltes (Tab. 9.6). Weiterhin nimmt die Schmackhaftigkeit des Futters ab.

9.3 N-Düngung

9.3.1 Methoden zur Gestaltung der Düngungsempfehlung

9.3.1.1 Düngefenster

In den meisten Betrieben stützen sich die Landwirte bei der N-Düngung nur auf ihre langjährigen Erfahrungen auf einzelnen Standorten und auf eine gute Beobachtung der Kulturen hinsichtlich Pflanzenzahl, Triebzahl, Blattgröße, Blattfarbe, Halmstärke u.a. (Führen von Beständen). Daneben werden vielfach die Ergebnisse aus Düngungsversuchen zur Orientierung herangezogen.

Erhebungsuntersuchungen lassen erkennen, dass eine N-Düngung, die ausschließlich auf Erfahrungswerten aufbaut, zu erheblichen Fehlern, in der Regel zu übermäßiger Düngung, führen kann. Dadurch wird neben den Produktionskosten auch die Nitratauswaschung erhöht. Die Düngung ist daher häufig nicht "ordnungsgemäß".

Eine besonders praxisnahe Form der Düngerbedarfsermittlung ist das "Düngefenster", das sich besonders bei der Kopfdüngung zu Getreide bewährt hat. Hierbei werden bei jedem Düngungstermin auf einem kleinen Teilstück durch schnelleres Fahren 20-30 kg N/ha weniger ausgebracht als auf dem Gesamtschlag. Wird auf diesem Teilstück Stickstoffmangel durch Aufhellung des Blattgrüns sichtbar, muss der übrige Schlag gedüngt werden. Dadurch wird Stickstoffmangel sowie übermäßige N-Düngung, insbesondere zu den Kopfdüngungsterminen, vermieden.

9.3.1.2 Schätzverfahren mit Hilfstabellen für bspw. Zuckerrüben

Eine Verbesserung der Genauigkeit der N-Düngung gegenüber den Erfahrungen aus der Praxis kann erreicht werden, wenn die Größenordnung der nachstehend aufgeführten Faktoren des Stickstoffhaushaltes des Bodens im einzelnen abgeschätzt wird, und zwar auf der Basis von Mittelwerten genauer Untersuchungen:

Winterwitterung und Frühjahrswitterung (Temperatur, Niederschläge) bei unterschiedlichen Böden, organische Düngung (N-Gehalt, Zeitpunkt der Ausbringung), Vorfrucht, Bodenbearbeitung und Verunkrautung, Ertragsniveau und Bestandesdichte.

Dem N-Bedarf des Bestandes wird das geschätzte N-Angebot des Bodens gegenübergestellt. Hierdurch ergibt sich ein Fehlbetrag, der durch die N-Düngung gedeckt, bzw. ein Überangebot, das durch Aussetzen der Düngung ausgeglichen werden muss.

Nachstehend wird eine Hilfstabelle zur Ermittlung der N-Düngung für Zuckerrüben (Tab. 9.7) als Beispiel aufgeführt.

Durch die Bewertung der einzelnen Punkte ergeben sich Zu- oder Abschläge. Zuschläge an N-Dünger, wenn ein geringes N-Angebot des Bodens zu erwarten ist, also bei

- niedrigem Mineralisierungspotential (humusarme Böden, Getreidebau, Strohdüngung, wenig Ernterückstände, keine org. Düngung),
- hohen Auswaschungsverlusten (durchlässige Böden, milde, niederschlagsreiche Winter). Abzüge an N-Dünger bei hohem N-Angebot des Bodens, also bei
- hohem Mineralisierungspotential (humusreiche Böden, Grünlandumbruch, stickstoffreiche organische Düngung bzw. Ernterückstände),
- niedrigen Auswaschungsverlusten (speicherfähige Böden, niederschlagsarme Winter).

Auch das Ertragsniveau, von dem der N-Bedarf abhängt, ist in die Überlegungen einzubeziehen.

9.3.1.3 Elektro-Ultrafiltration (EUF)

Bei der EUF-Methode handelt es sich um eine durch Strom und Unterdruck beschleunigte Wasserextraktion des Bodens. Hierbei wandern Nährstoffe und organische Verbindungen durch ultrafeine Filter zur Anode bzw. Kathode. **Beim Stickstoff werden mit dieser Methode Nitrat (EUF-NO₃), Ammonium und leicht mineralisierbare organische Stickstoffverbindungen (EUF-N_{org}) erfasst.**

Zur Ermittlung des N-Düngerbedarfs werden die gemessenen Werte, ausgedrückt in kg/ha vom Stickstoffbedarf der Kultur abgezogen. Da die Bodenproben für die EUF-Analyse schon im Juni/Juli des Vorjahres gezogen werden, muss der errechnete N-Düngerbedarf durch Schätzwerte für die Anrechnung der Vorfrucht, Zwischenfrucht sowie der organischen N-Düngung korrigiert werden. Hinweise für solche Korrekturen enthält Tab. 9.7. Die EUF-Methode wird zur Zeit bei verschiedenen Feldkulturen und im Weinbau vorzugsweise in

Süddeutschland angewendet. Ein Beispiel für eine "EUF-Düngeempfehlung" enthält die Tab. 9.8.

9.3.1.4 CaCl₂-Methode

Wegen des hohen labortechnischen Aufwandes der EUF-Analyse wird in neuerer Zeit die kostengünstigere Extraktion des Bodens mit CaCl₂-Lösung (Houba, 1991) erprobt. Die Untersuchungsergebnisse deuten darauf hin, dass hierbei im Boden ähnliche Mengen an mineralischem und organischem Stickstoff festgestellt werden wie mit der EUF-Methode.

9.3.1.5 N_{min}-Methode

Die N_{min}-Methode **erfasst den mineralischen Stickstoff im Boden** in kg/ha $\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N} = \text{N}_{\text{min}}\text{-Vorrat}$.

Es wird der N_{min}-Vorrat in der gesamten von der Wurzel nutzbaren Bodenschicht, also auch im Unterboden, gemessen (in tiefgründigen Böden und bei tiefwurzelnenden Pflanzen bis 90 cm Bodentiefe, aufgeteilt in 3 Schichten zu je 30 cm). Da dieser Mineralstickstoff von den Pflanzen wie Düngerstickstoff genutzt wird, kann er bei der Düngung voll angerechnet werden. Das Prinzip dieser Methode und ihre Anwendung bei Winterweizen wird in Tab. 9.9 erläutert. Zusätzlich zur Düngung zum Vegetationsbeginn im Frühjahr sind in Abhängigkeit von Ertragsniveau und angestrebter Qualität N-Spätgaben zu verabreichen, so dass bei Winterweizen mit einem Ertragsniveau von 80 – 90 dt/ha eine Gesamtversorgung von mindestens 200 kg N/ha (N_{min}-Vorrat + N-Düngung aus mehreren Gaben) erreicht wird. Über den Zeitpunkt und die Höhe der erforderlichen "Spätgaben" gibt die vor Vegetationsbeginn durchgeführte N_{min}-Untersuchung keine genauen Informationen. Hierfür kann neben den Betriebserfahrungen (z. B. zum Ährenschieben 1 kg N/ha pro dt erwarteten Kornertrag) ggf. der Nitrat-Pflanzentest als Entscheidungshilfe dienen. Hinweise für die Verteilung der N-Düngung zu den verschiedenen Entwicklungsstadien sind Abb. 9.11 zu entnehmen. Aus ihm geht hervor, dass der "Sollwert" im Frühjahr vom angewandten Verteilungssystem abhängt. Die Höhe der gesamten N-Versorgung (N_{min}+ N-Düngung = ca. 200 kg N/ha) ändert sich hierdurch jedoch nicht.

Die Kenndaten der N_{min}-Methode für weitere Kulturen enthält Tab. 9.10. Sie wurden überwiegend auf tiefgründigen und schnell durchwurzelnbaren Lössböden von Ackerbaubetrieben im Raum Südhannover in Düngungsversuchen ermittelt; für Getreide, Zuckerrüben und Kartoffeln auch auf Sandböden in Nordhannover.

Da die N_{min}-Sollwerte in Düngungsversuchen in Praxisbetrieben ermittelt wurden, ist die standorttypische N-Nachlieferung bei der Düngungsempfehlung berücksichtigt.

Abweichungen von den genannten Kenndaten können sich ergeben bei

- vom Durchschnitt stark abweichendem Ertragsniveau (die genannten Sollwerte gelten z.B. bei Winterweizen für 80 dt/ha, bei Zuckerrüben für 500 dt/ha),
- gegenüber dem Durchschnitt stark erhöhter N-Nachlieferung (z. B. Grünlandumbruch, Ernterückstände aus dem Gemüsebau, üppige Zwischenfrüchte, insbesondere Leguminosen),
- flachgründigen Böden (stärkere Unterteilung sinnvoll),
- tiefgründigen, aber nur langsam durchwurzelbaren Böden (Tonböden, Marschen),
- Auflagen, z. B. in Wasserschutzzonen,
- anderem Klima, in anderen Anbaugebieten.

Dementsprechend werden z. B. in Bayern, Hessen und Ostwestfalen teilweise geringere Bodentiefen berücksichtigt und andere Sollwerte empfohlen. Die Erfassung des N_{\min} -Gehaltes im Boden erlaubt es darüber hinaus, Auswaschungsverluste, die im Frühjahr infolge hoher Niederschläge eintreten können, zu berechnen und durch die Düngung auszugleichen.

In vielen Fällen erfordert die Auswaschungsgefahr (leichte Böden, flachwurzelnde Kulturen) oder eine besonders hohe N-Nachlieferung (Gemüseanbau, Grünlandumbruch) die Aufteilung der N-Düngung in mehrere Gaben.

Unter diesen Bedingungen kann die N_{\min} -Analyse vor jedem Düngungstermin angewandt werden. Die Kenndaten für die einzelnen Düngungsperioden verändern sich entsprechend der Durchwurzelungstiefe und dem N-Bedarf des folgenden Wachstumsabschnittes.

9.3.1.6 Simulationsprogramme

In den letzten Jahren mehren sich die Anstrengungen, die aufwendige Bodenuntersuchung durch Rechen- bzw. Simulationsmodelle zu ersetzen. Sie haben zum Ziel, die zum Düngungstermin im Boden enthaltene Menge an Mineralstickstoff zu errechnen. Dabei werden die Prozesse der N-Mineralisierung und der N-Verlagerung im Boden sowie der Entzug durch Pflanzen über die Winterperiode simuliert. Grundlagen für die Berechnung sind Witterungsdaten (Niederschlag, Temperatur), Bodendaten (Humusgehalt) und Bewirtschaftungsdaten (Vorfrucht, Erntetermin, Ertrag, Ernterückstände und mineralische N-Düngung). Die daraus abgeleitete Düngung folgt den Empfehlungen der N_{\min} -Methode.

9.3.1.7 Pflanzenanalyse auf Stickstoff bzw. Nitrat- N-Sensorik

Die Pflanzenanalyse informiert über den Ernährungszustand der Pflanzen. Sie kann daher zur Klärung von Ernährungsstörungen und zur Ermittlung eines Düngerbedarfs eingesetzt werden (Tab. 9.11). In der Regel wird der Stickstoff- oder Nitratgehalt in ganzen Pflanzen

oder in bestimmten Pflanzenteilen ermittelt. Die Beziehung zwischen der N-Konzentration und dem Wachstum der Pflanze ist in Abb. 9.12 dargestellt. Aus ihr sind auch einzelne Versorgungsbereiche ersichtlich.

Die Pflanzenanalyse findet in der Praxis vielfältig Anwendung. Bei Dauerkulturen: Im Obstbau dient die Blattanalyse zur Kontrolle der N-Versorgung. In Kombination mit anderen Angaben wie Bodenart, Herbizidstreifenanteil, org. Düngung einschließlich Blattdüngung, Fruchtbehang und Sorte wird die Blattanalyse zur Ermittlung des Düngerbedarfs für das Folgejahr benutzt. Hierbei wird die Konzentration an Gesamt-N in Blättern aus der Mitte einjähriger Triebe im Juli/August bestimmt.

Zur Klärung von Ernährungsstörungen durch Mangel oder Überschuss an Stickstoff kann die Pflanzenanalyse bei nahezu allen Kulturpflanzen genutzt werden.

Beispiele für den Optimalbereich einzelner Pflanzenarten enthält Tab. 9.12.

In neuerer Zeit kommen vermehrt auch **berührungslose Sensoriken zur Erfassung des Stickstoff-/Biomassestatus** bzw. der Stickstoffmenge im Aufwuchs zum Einsatz (z.B. N-Sensor). Mit diesen Systemen lässt sich die erfasste Information direkt in eine Düngungsmaßnahme umsetzen. Von besonderer Bedeutung sind diese Verfahren in der teilflächenspezifischen Bewirtschaftung. Damit lässt sich eine standortangepasste N-Düngung durchführen.

Die Verfahren, die zum Einsatz kommen, beruhen auf passiver Erfassung der Reflexion (N-Sensor) oder auf aktiver Anregung und Messung der Chlorophyllfluoreszenz (laserbasierte Chlorophyllfluoreszenz). Bei Getreide können diese Systeme zur Zeit ab etwa EC30 eingesetzt werden. Bisherige Untersuchungen zeigen auf, dass auch der Stickstoffstatus anderer Kulturen erfasst werden kann.

9.3.2 N-Düngerformen

9.3.2.1 Mineralische Stickstoffdünger

Zur Deckung des Defizits, das zwischen dem N-Bedarf der Pflanzen und dem N-Angebot des Bodens in der Regel besteht, werden mineralische und organische N-Dünger eingesetzt. Unabhängig von der Bindungsform des Stickstoffs im Düngemittel werden die Pflanzen überwiegend mit Nitrat ernährt, da der Düngerstickstoff in Kulturböden als Folge der Nitrifikation mehr oder weniger schnell zu Nitrat umgewandelt wird.

Eine Ausnahme hiervon sind Ammoniumdünger mit Zusatz von Dicyandiamid oder Dimethylpyrazolphosphat (DMPP), wodurch die Nitrifizierung erheblich verzögert wird.

Hinsichtlich der Stickstoffwirkung der Mineraldünger bestehen auf den meisten Böden keine wesentlichen Unterschiede.

Als Kriterien für die Auswahl eines Mineraldüngers kommen in Betracht:

- Kosten,
- Wirkungsgeschwindigkeit,
- sonstige Nebenwirkungen (z. B. herbizide und fungizide Wirkung bei Kalkstickstoff),
- Auswirkung auf Bodenreaktion und Kalkbilanz,
- Gehalt an anderen Pflanzennährstoffen (Na, SO₄, Ca),
- Nitratauswaschung

Die Tab. 9.13 gibt einen Überblick über das Verhalten der wichtigsten Stickstoffdünger im Boden, die Geschwindigkeit der N-Aufnahme durch die Pflanzen und die Auswirkung auf die Bodenreaktion bzw. die Kalkbilanz.

Neben den eigentlichen Düngerpreisen (DM/kg N) sind in die Überlegungen einzubeziehen:

- Kosten des Transportes, der Lagerung, der Ausbringung (z.B. flüssig/ fest, Einnährstoff/Mehrnährstoffdünger, gesackt/lose),
- Gleichmäßigkeit der Ausbringung (Streubarkeit),
- Nebenwirkungen (Unkrautbekämpfung, Kalkbilanz, Nitratauswaschung u.a.).

Hohe Wirkungsgeschwindigkeit

Vorteil: Eine hohe Wirkungsgeschwindigkeit bewirkt die sofortige Korrektur eines N-Mangels (Kopfdüngung).

Nachteil: Bei hoher Wirkungsgeschwindigkeit sind häufige kleinere Gaben erforderlich, besonders wenn erhöhte Auswaschungsgefahr besteht (z. B. in durchlässigen und flachgründigen Böden) und bei salzempfindlichen Kulturen.

Eine hohe Wirkungsgeschwindigkeit wird erreicht durch den Einsatz von

- Nitratdünger,
- Blattdüngung.

Eine besonders schnelle Stickstoffwirkung kann durch eine Blattdüngung mit Harnstoff oder Ammonnitrat-Harnstofflösung erzielt werden. Bedeutungsvoll sind hierbei die Konzentration der Lösung und der Anwendungszeitpunkt. Bei Harnstoff werden die folgenden N-Konzentrationen empfohlen:

Obst-, Gemüsebau: 0.5 – 1 % (1 - 2 kg N/ha),

Getreide /Raps: 8.0 – 16 % (15 - 20 kg N/ha).

Sehr oft werden die Blattdünger in Kombination mit Pflanzenschutzmitteln eingesetzt. Außerdem werden N-haltige Spezialdünger verwendet.

Niedrige Wirkungsgeschwindigkeit

Vorteil: Wenige größere Düngergaben möglich, geringere Gefahr der Auswaschung bzw. Denitrifikation.

Nachteil: Bei ungünstigen Bedingungen (Kälte, Trockenheit) zeitweilig N-Mangel, Freisetzung von Nitrat nach Abschluss der Vegetationsperiode (Auswaschungsgefahr). Eine niedrige Wirkungsgeschwindigkeit (Reihenfolge ansteigend) wird erreicht durch den Einsatz von

- Ammoniumdünger,
- Harnstoff,
- Kalkstickstoff
- Ammonium mit Nitrifikationshemmstoff
- Depotdünger (Langzeitdünger).

Die Beimischung von Dicyandiamid oder DMPP zu Ammonium oder auch Harnstoff verzögert die Nitrifikation in Abhängigkeit von der Witterung um einige Wochen. Auch durch Beimischung von Nitrifikationsinhibitoren zu Gülle kann die Nitratbildung und damit die Nitrat Auswaschung herabgesetzt werden.

Bei Spezialkulturen, wie Topfpflanzen, Gemüse, Gemüsejungpflanzen, Gehölzen oder Rasen, sind Depotdünger (d.h. Stickstoffdünger mit besonders langsamer und nachhaltiger Wirkung) nützlich. Solche Depotdünger sind

- Kondensationsprodukte des Harnstoffs – Formaldehydharnstoff, 38% N,
- Crotonyliden-diharnstoff, 28 % N, – Isobutylidendiharnstoff, 28 % N,
- umhüllte Dünger – Salze, umhüllt mit Kunststoff (meist Mehrnährstoffdünger),
- Harnstoff, umhüllt mit Schwefel,
- Ionenaustauscher (Mehrnährstoffdünger),
- organische Stickstoffdünger, wie Hornmehl.

Die hohen Preise der Depotdünger schließen ihre Verwendung in der Landwirtschaft im allgemeinen aus.

Bedingt durch Auswaschungsverluste ist die Stickstoffwirkung organischer Dünger mit Ausnahme von Stroh um so geringer, je früher im Herbst die Ausbringung bzw. Einarbeitung erfolgt.

Eine hohe N-Wirkung, geringe Nährstoffverluste und eine geringe Umweltbelastung durch Auswaschung von Nitrat bzw. Ammoniakverflüchtigung werden insbesondere bei Gülle nur dann erreicht, wenn sie wie Mineraldünger gezielt unmittelbar vor dem Bedarf des Pflanzenbestandes ausgebracht und sofort eingearbeitet wird.

Auswirkungen auf die Bodenreaktion

Ein Einfluss der Stickstoffdünger auf die Bodenreaktion erfolgt einerseits, wenn im Dünger, wie bei Kalkstickstoff, Kalk enthalten ist. Andererseits wird der pH-Wert in der Wurzelzone (Rhizosphäre) durch Nitrataufnahme erhöht bzw. durch Ammoniumaufnahme gesenkt. Deshalb wirken, wie aus Tab. 9.14 zu entnehmen, Nitratdünger physiologisch alkalisch und Ammoniumdünger physiologisch sauer.

9.3.2.2 Organische Düngung

Die organische Düngung

- dient der Versorgung der Böden mit Humus und damit der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit,
- war bis Mitte des vorigen Jahrhunderts die ausschließliche Form der N-Düngung und wird heute noch bei ökologischen Landbaumethoden überwiegend praktiziert,
- muss zur N-Versorgung der Pflanzen sachgerecht dosiert, d. h. gezielt eingesetzt werden. Erhöhter Anfall von Gülle in Veredlungsbetrieben und große Mengen stickstoffreicher Ernterückstände im Gemüsebau sowie der notwendige Schutz der Umwelt vor Nitratauswaschung zwingen hierzu,
- kann in ihrer N-Wirkung durch Analyse des Stickstoffgehaltes und durch Bodenanalysen in den letzten Jahren genauer bewertet werden.

Die Tabelle 9.15 enthält eine Aufstellung über wichtige organische Dünger, ihre durchschnittlichen N-Gehalte und Anhaltspunkte über die Stickstoffwirkung im Jahr der Ausbringung.

Organische Dünger gehören überwiegend zu den nachhaltig wirkenden Düngemitteln. Die Stickstoffwirkung erstreckt sich mit stark abnehmenden Raten auch auf die dem Anwendungsjahr folgenden Jahre. Die Wirkung wird begünstigt durch

- hohen Gehalt an mineralischem N (z. B. Jauche, Gülle),
- leichte Zersetzbarkeit und hohen N-Gehalt (enges C:N-Verhältnis) der organischen Substanz (z. B. Gründüngung, Rübenblatt, Ernterückstände von Gemüse),
- günstige Bedingungen für die Mineralisierung (z. B. Zerkleinern, flaches Einarbeiten, gleichmäßige Verteilung, durchlüftete, warme Böden),
- große Speicherfähigkeit des Bodens für Wasser und damit für Nitrat (z. B. tiefgründige Lössböden),
- zeitgerechte Ausbringung (z. B. Gülle wegen der Nitratverluste durch Auswaschung auf durchlässigen Böden oder in Gebieten mit hohen Niederschlägen nicht im Herbst ausbringen).

Tabellen und Abbildungen zu Kapitel 9: Stickstoff im System Boden - Pflanze

Abbildung 9.4 Relative amounts of nitrogen compounds in the xylem sap of various species (Salisbury and Ross 1992).

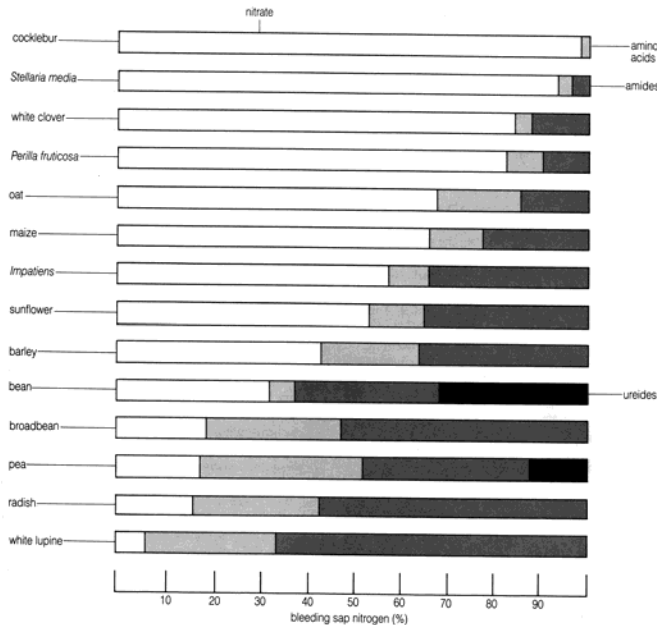
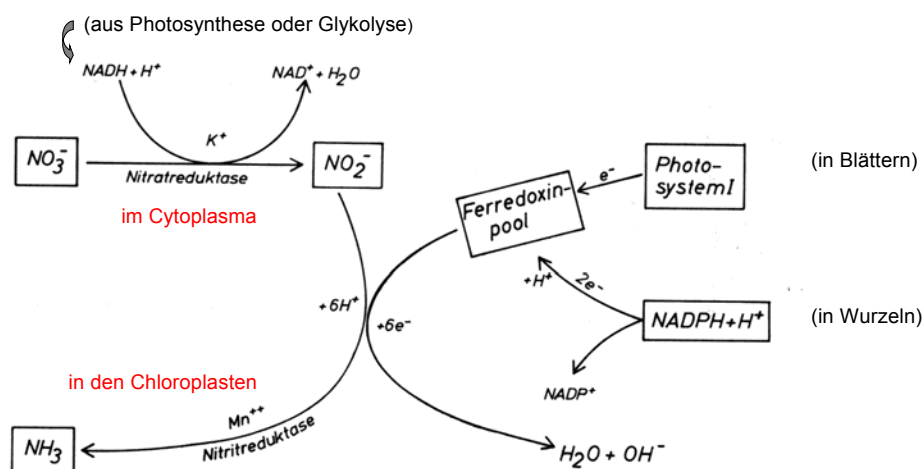


Abbildung 9.5 Die Speicher-, Transport- und Entgiftungsform von Stickstoff in verschiedenen Pflanzenarten:

Familie	N-Form
<i>Gramineae</i>	Glutamin, Asparagin
<i>Ranunculaceae</i>	Glutamin
<i>Fagaceae</i>	Asparagin
<i>Rosaceae</i>	Arginin, Glutamin
<i>Papilionaceae</i>	Prolin, Allantoin
<i>Betulaceae</i>	Citrullin
<i>Chenopodiaceae</i>	Betain

Abbildung 9.6 Reduktion von Nitrat zu Ammoniak (Amberger 1996).



NADH (Nicotinamadenindinucleotid)
NADP (Nicotinamadenindinucleotichosphat)

Nitratreduktase (Mo-Fe-Flavoprotein)

Abbildung 9.7 Light dependence of nitrate reductase (Marschner 1995).

a Time course of nitrate content in spinach leaves.

Time of day	Concentration of nitrate N (mg kg ⁻¹ fresh wt)	
	Leaf blade	Petioles
8:30	228.2	830.2
light 9:30	166.6	725.1
light 13:30	100.8	546.0
light 17:30	91.0	504.0
18:30	106.4	578.2

b Accumulation of soluble reduced ¹⁵N in maize during a 24 h period of ¹⁵NO₃-supply to the roots.

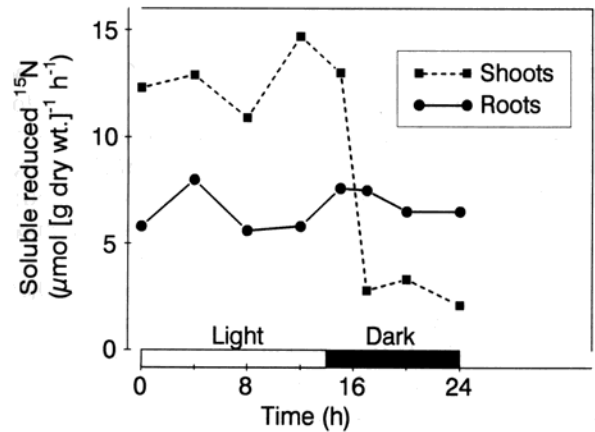


Abbildung 9.8 Time course of nitrate reductase activity and leaf area development during the ontogeny of a soybean leaf (Marschner 1995).

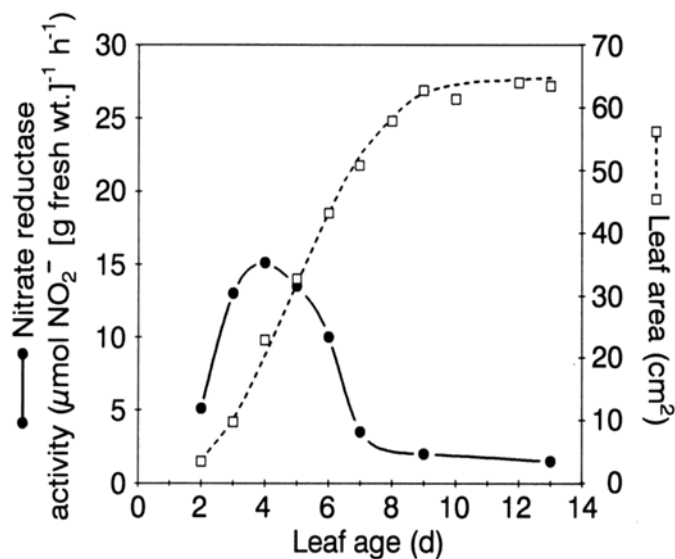


Abbildung 9.9 Effect of form and concentration of nitrogen supply on dry weight of 30-day-old maize plants (Marschner 1995).

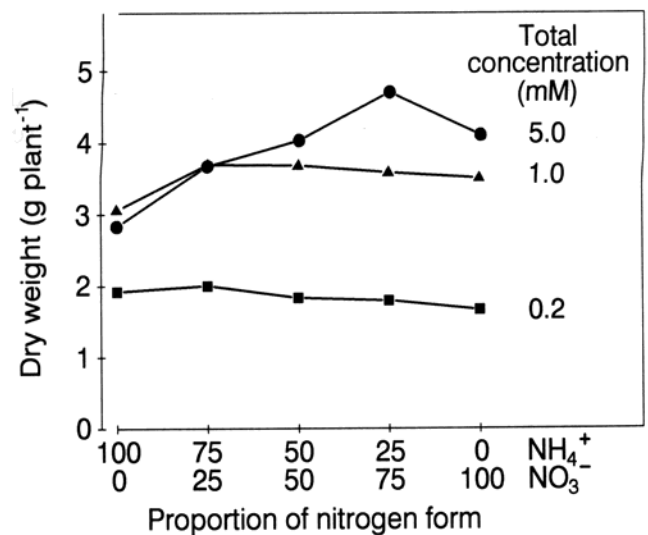


Tabelle 9.1 Der Einfluss von Höhe und Form des N-Angebotes auf die stoffliche Zusammensetzung von Spinat (eigene Untersuchungen im Rahmen des Praktikums).

N - Angebot mmol / l	Ertrag g TS/Pflanze	NO ₃ ⁻ -N g/100 g TS	Gesamt-N g/100 g TS	Oxalsäure g/100 g TS	Σ Kation mmol _c / l
NH₄⁺-N					
0.25	3.56	0.54	2.094	3.51	241
0.5	5.14	0.77	3.609	2.37	224
1.0	4.69	0.70	4.462	1.27	184
5.0	4.69	0.74	5.190	0.80	163
NO₃⁻-N					
0.25	5.30	0.65	1.732	4.01	313
0.5	8.41	1.00	2.566	4.98	331
1.0	9.9	1.04	3.115	6.82	365
5.0	12.2	1.31	3.813	9.13	362

Tabelle 9.2 Einfluss steigender N-Gaben auf den Zuckergehalt und -ertrag von Zuckerrüben.

N-Gabe kg N ha ⁻¹	Zuckergehalt %	Zuckerertrag 100 kg ha ⁻¹
0	18.5	65.6
80	18.3	74.1
120	18.0	77.9
160	17.8	80.0

Tabelle 9.3 Beziehung zwischen Höhe der N-Düngung und dem Gehalt an B-Vitaminen in Spinatblättern (Pfützner et al., 1952, Landw. Forsch. 4, 105-118).

N-Gabe g	TS-Ertrag g	N-Gehalt %	Thiamin	Riboflavin mg pro 100 g TS	NAD
0	0.9	1.5	0.29	0.48	2.8
0.2	5.6	2.5	0.50	0.61	2.9
0.5	9.5	3.8	0.61	0.78	3.3
0.8	9.8	5.1	0.69	0.88	3.5
1.1	8.9	5.5	0.76	0.92	4.0

Tabelle 9.4 Einfluss von N-Angebot auf N-Fractionen in Blättern von Tabak.

	bei 0.5 g N-Düngung			bei 1.5 g N Düngung	
	Gesamt-N (%)	lösl. N (%)	Eiweiß-N (%)	Eiweiß-N (%)	Steigerung (%)
8. Blatt (jung)	3.8	0.6	3.2	4.9	53
5. Blatt	2.7	0.4	2.3	3.8	65
2. Blatt	1.0	0.3	0.7	2.2	214
1. Blatt (alt)	0.8	0.3	0.5	1.1	120

Tabelle 9.5 Einfluss des N-Angebotes auf den Ertrag von Winterweizen in Abhängigkeit von Pflanzenschutzmaßnahmen – Demonstrationsversuch (Schwarenaben 1988).

N-Angebot (kg N/ha)		Sorte	Kornertrag (dt/ha)	
			chemischer Pflanzenschutz ohne	mit
15	N _{min}	Kanzler	36.8	40.3
		Sorbas	60.9	64.5
85		Kanzler	45.1	79.1
		Sorbas	68.5	86.2
210		Kanzler	44.3	105.2
		Sorbas	74.5	98.1
285		Kanzler	33.4	105.9
		Sorbas	62.8	96.1

Abbildung 9.10 Einfluss der faktoriellen Kombination von N, P, K auf die durchschnittliche Mehltau-Infektion bei Gerste (Graham, 1983)

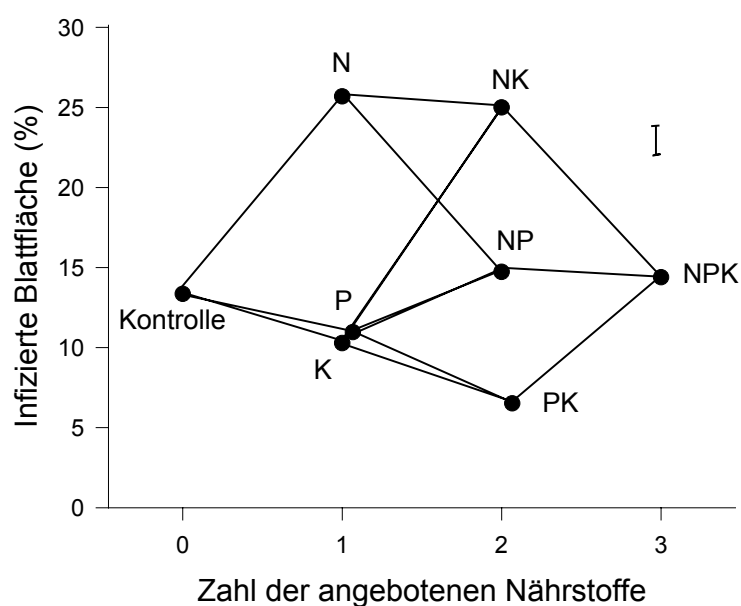


Tabelle 9.6 Einfluss der Düngung auf den Ertrag und die Qualität von Grünland

Düngung	Heuertrag (dz/ha)	verdauliches Eiweiß (%)	Mineralstoffgehalt (%)		Kleeanteil (%)
			Ca	P	
-	50	5.5	1.0	0.24	49
PK	78	6.3	1.1	0.27	59
NPK	85	5.6	0.9	0.26	26

Tabelle 9.7 Ermittlung der N-Düngung bei Zuckerrüben (AID 1017, 1991).

Stickstoffquellen		geschätzte N-Menge in kg/ha bei W-Weizen	
		trocken	nass
N aus dem Boden (Mineralisierung und Bakterien)	humusarmer, flachgründiger Boden	80	60
	humusreicher, tiefgründiger Boden	140	110
N-Reserve aus Vorfrüchten	Vorfrucht:	Gemüse	40
		Kartoffeln	25
		WW mit Spät-N	25
	Zwischenfrucht:	Leguminosen	30
		sonstige	20
	Strohdüngung Getreide		20
	(N-Ausgleich, 50 kg N/ha)		
	Strohdüngung Mais		40
N aus org. Düngung	Stallmist (200 – 300 dt/ha)		30-50
	Hühnerkot (100-200 dt/ha)		120
	Gülle/Schweinemist (30-50 m ³)		70

Tabelle 9.8 Beispiel für die N-Düngeempfehlung (EUF) zu Zuckerrüben nach Bodengesundheitsdienst GmbH (BGD) (AID 1017, 1991).

N-Bedarf des Zuckerrübenbestandes		270 kg N/ha
Abzüglich:		
EUF-Wert des Bodens (umgerechnet in kg N/ha)	120 kg N/ha	
Nährstoffe aus Vorfrucht (Getreide), geschätzt	10 kg N/ha	
Rindergülle, 40 m ³ , vor 30. November, geschätzt	30 kg N/ha	
Summe der Abzüge	160 kg N/ha	→ - 160 kg N/ha
Netto-Nährstoffbedarf aus Düngung		= 110 kg N/ha

Tabelle 9.9 Prinzip der N_{\min} -Methode und Beispiel für die Anwendung bei Winterweizen (AID 1017, 1991).

Prinzip der N_{\min} -Methode	Beispiel: Düngung von Winterweizen zu Vegetationsbeginn auf tiefgründigen Lössböden in Südniedersachsen
„Sollwert im Frühjahr“	120 kg N/ha
= für Höchstertrag notwendige N-Menge	
= Summe aus N_{\min} -Vorrat + N-Düngung (in Düngungsversuchen ermittelt)	
abzüglich N_{\min} -Vorrat (im Februar gemessen)	– 70 kg N/ha
0-90 cm Bodentiefe	
ergibt erforderliche	50 kg N/ha
Frühjahrs-N-Düngung	

Abbildung 9.11. Anwendung der N_{\min} -Methode.

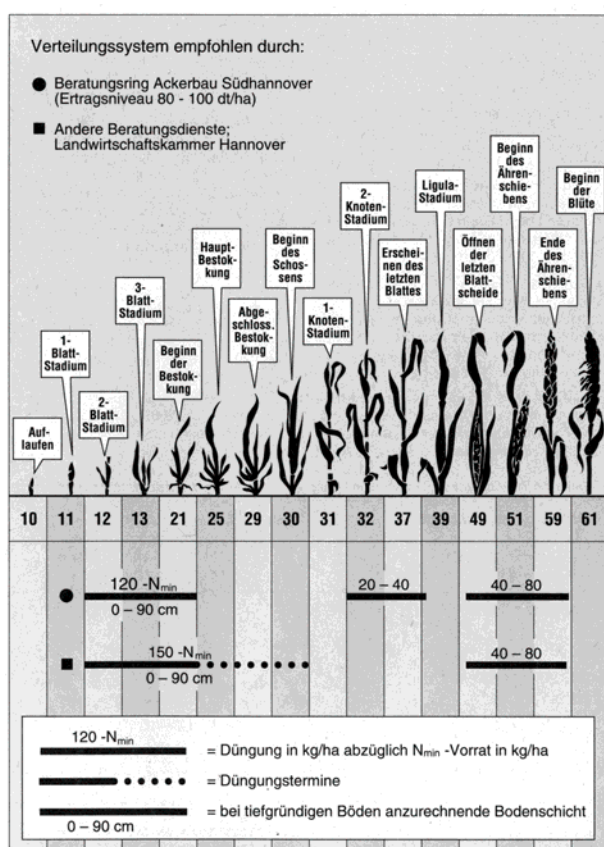


Tabelle 9.10 Kenndaten der N_{min}-Methode bei verschiedenen Pflanzenarten (Beispiel Südhannover) (AID 1017, 1991).

Kennzahlen Pflanzenarten	Bodenanalyse		Sollwert (N _{min} -Vorrat + N-Düngung, kg/ha)		Anmerkungen
	Zeitpunkt	Boden- schicht cm	Frühjahrs- düngung	Gesamt- versorgung einschl. Spätgaben	
W- und S-Weizen	Febr./März	90	120	200	Gaben von mehr als 80 kg teilen
Wintergerste	Febr./März	90	100	160	
Winterroggen	Febr./März	90	100	140	
Hafer	²	60	100	(130)	
Mais	April/Mai	90		200	normale N-Nachlieferung
Mais	April/Mai	90		160	hohe N-Nachlieferung
Zuckerrübe	März/Mai	90	200	200	normale N-Nachlieferung
Zuckerrübe	März/Mai	90	160	160	hohe N-Nachlieferung (org. Düngung)
Kartoffel, Sand	²	60	160		hoher Stärkegehalt
Kartoffel, Löß	²	60	250		hoher Knollenertrag
Raps	Jan./Febr.	90		300	vom Sollwert N-Menge im Aufwuchs abziehen
Kopfkohl, Industrie	¹	90		350*	* 100 kg N/ha in 0-30 cm
Herbstkohl, Lager	¹	90		250*	
Kohl, früh und mittel- früh	¹	60		250*	
Rosenkohl	¹	90		250*	
Blumenkohl/Brokkoli	¹	60		300* ³	** bei Starkregen 30-40 kg mehr, ggf. 2. Analyse
Rote Bete, Industrie	²	60		250	
Frühjahrsspinat	²	60		220 ³	
Sellerie	¹	60		220	
Lauch	¹	60		220	
Bohnen	²	60		140*	
Eissalat	¹	30		140 ³	
Kopfsalat	¹	30		140** ³	
Erbsen	²	30		80	
Spargel, 1. Jahr		90		80	
Spargel, ab 2. Jahr		90		100	
Zwiebeln	¹	60		160	
Erdbeeren	April	60		80	

¹ Pflanztermin

² Saattermin

³ Die angegebenen Sollwerte gelten für die jeweils erste Kultur eines Jahres.

Beim Anbau als zweite oder dritte Kultur müssen sie wegen stickstoffreicher Ernterückstände der Vorkultur erniedrigt werden. Im Durchschnitt sind etwa 70 % der N-Menge der Ernterückstände vom Sollwert abzuziehen.

Tabelle 9.11 Ausreichende Nährelementgehalte von Wintergetreidepflanzen, Mais und Winterraps (Bergmann 1993).

Getreideart	Winterweizen		Mais	Winterraps
Entwicklungsstadium	EC 30/31	EC 32/37	40-60 cm	30-50 cm
% i. Tr.				
N	3.00-5.00	2.30-3.80	3.50-5.00	4.00-5.50
P	0.30-0.60	0.25-0.50	0.35-0.60	0.35-0.70
K	3.50-5.50	3.30-4.50	3.00-4.50	2.80-5.00
Ca	0.40-1.00	0.35-1.00	0.30-1.00	1.00-2.00
Mg	0.12-0.25	0.10-0.23	0.25-0.60	0.25-0.40
ppm i. Tr.				
Bor (B)	6-12	5-10	7-15	30-60
Kupfer (Cu)	7-15	5-10	7-15	5-12
Mangan (Mn)	35-100	30-100	40-100	30-100
Zink (Zn)	25-70	20-70	30-70	25-70
Schwefel (S) ¹	>0.40			0.50-0.80

¹ nach Schnug

Abbildung 9.12. Zusammenhang zwischen N-Konzentration in der Pflanze und Ertrag (Aid 1017, 1991)

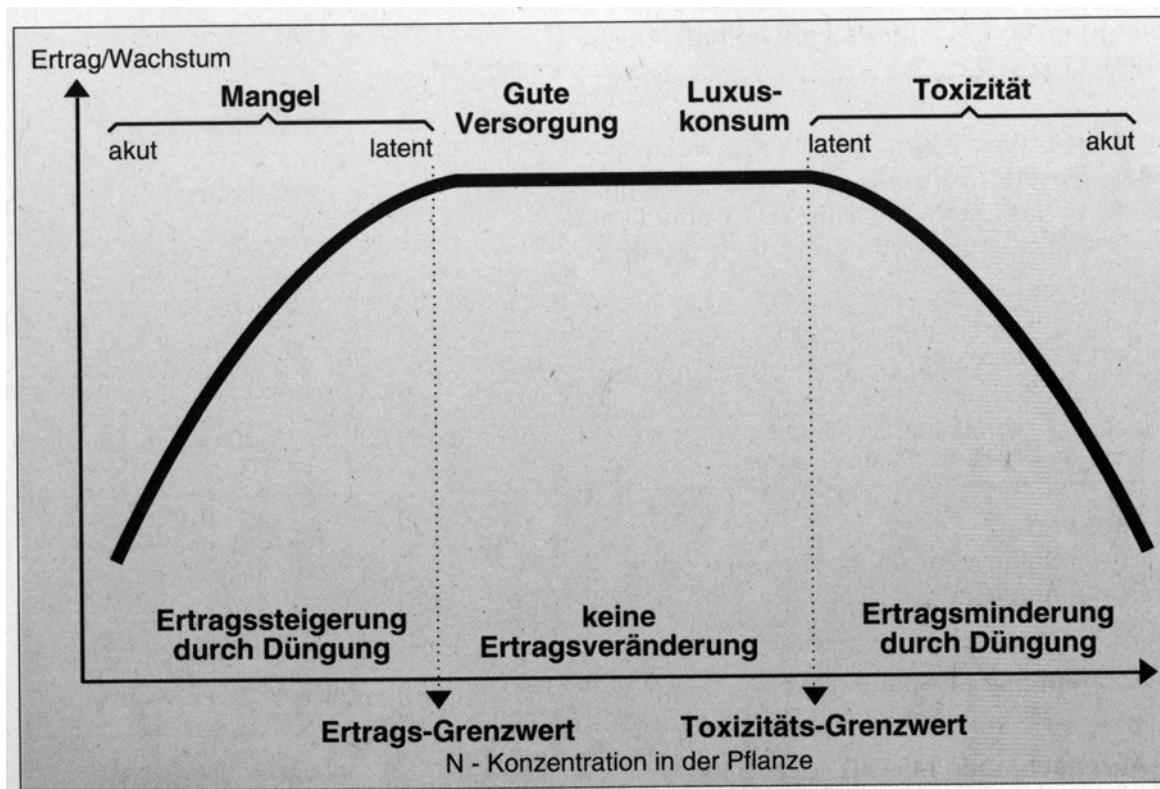


Tabelle 9.12 Grenzwerte der Pflanzenanalyse zur Charakterisierung der N-Versorgung (AID 1017, 1991).

Pflanzenart	Pflanzenteil	Zeitpunkt der Probenahme	N-Gehalt in % der TS bei opt. Versorgung
Tomaten	4.-5. Blatt	Blüte	4.0-5.0
Gurken	ges. Pflanze	4-Blatt-Stadium	4.6-4.9
Weißkohl	8.-10. Blatt	Rosettenstadium	5.2-6.0
Kopfsalat	Blatt	38 Tage alt	4.2-4.5
Rosen	oberstes Blatt, Trieb mit sich gerade färbender Blüte		3.0-5.0
Chrysanthemen	6. Blatt v. d. Triebspitze		4.0-6.0

Tabelle 9.13 Eigenschaften wichtiger Stickstoffdünger (AID 1017, 1991).

Düngemitteltyp	N %	Verhalten im Boden, Aufnahme durch die Pflanze (Wirkungsgeschwindigkeit)	Auswirkung einer Düngung mit 100 kg N auf	
			Bodenreaktion	Kalkbilanz (± kg CaO)
Kalksalpeter	16	keine Sorption (Fixierung), schnelle Verlagerung, rasche Aufnahme, sofortige Wirkung	alkalisch	+ 100
Schwefelsaures Ammoniak	21	Sorption (Fixierung), langsame Verlagerung, mäßig schnelle Wirkung	stark versauernd	- 300
Ammoniakgas	82	nach Nitrifizierung entsprechend Nitrat	versauernd	- 100
Ammoniakwasser	10	nach Nitrifizierung entsprechend Nitrat	versauernd	- 100
Schwefelsaures Ammoniak mit Dicyandiamid	25	Nitrifizierung stark verzögert, sonst wie schwefelsaures Ammoniak	stark versauernd	- 300
Kalkammonsalpeter	27	wie Nitrat- und Ammoniumdünger	neutral	- 50
Ammonsulfat-salpeter	26	überwiegend wie Ammoniumdünger	stark versauernd	- 200
Harnstoff	46	Umwandlung zu Ammonium und Nitrat (temperaturabhängig), mäßig schnelle Wirkung	versauernd	- 100
Ammonnitrat-Harnstofflösung	28	nach Nitrifizierung entsprechend Nitrat	versauernd	- 100
Kalkstickstoff	20,5	langsamere Umwandlung zu Ammonium und Nitrat (temperaturabhängig), langsame Wirkung	alkalisch	+ 200
Stickstoffmagnesia (Carbonat)	22	schnelle und nachhaltige Wirkung	neutral	

Tabelle 9.14 Organische Dünger und ihre N-Wirkung (AID 1017, 1991).

Organische Dünger	Mittlere N-Gehalte		Mittlere Stickstoffwirkung für Folgekultur		Bemerkungen
	kg N/m ³	kg N/100 dt FS*	% von ges N.	kg Mineral-N pro m ³ bzw. 100 dt FS*	
Getreidestroh		50		sehr gering	geringer N-Gehalt, vorübergehende Stickstoffimmobilisierung
Zuckerrübenblatt		30	30	10	N-Wirkung von Zersetzungsbedingungen abhängig
Gründüngung					
Nichtleguminosen		30	60	20	bei Leguminosen zusätzlicher N-Gewinn durch N ₂ -Bindung
Leguminosen		50	60	30	
Rindermist		60	30	6	N-Wirkung von Einstreu, Aufbereitung u. Einarbeitung abhängig
Klärschlamm eingedickt 5 % TS		20	30	6	hygienische Bedenken Schadstoffe (Schwermetalle) beachten Anwendung durch Verordnungen eingeschränkt
gepresst 20 % TS		30	6	2	
Müllschlamm-Kompost		10-50	10	1-5	
Jauche (Harn)	4		100	4	Stickstoffwirkung um so größer, je geringer Verluste durch Auswaschung oder Ammoniakverflüchtigung
Rindergülle 7,5 % TS	4		60	2,5	
Schweinegülle 7,5 % TS	6		60	3,5	
Hühnergülle 15,0 % TS	10		60	6	
Hühnertrockenkot 80 % TS		380	60		
					Anwendung durch Verordnungen eingeschränkt

*FS = Frischsubstanz