



Stickstoff

Grundlagen des Stickstoffeinsatzes
in der Landwirtschaft



Bestellungen der Broschüre
richten Sie bitte an:



Bundesarbeitskreis Düngung (BAD)
Dr. Hagen Trott
Karlstraße 21
60329 Frankfurt/Main
Telefon (069) 2556-1265/-1598
Telefax (069) 2556-1298
service.iva@vci.de
www.duengung.net

Grundlagen des Stickstoffeinsatzes in der Landwirtschaft

Pflanzen sind in der Lage, einfache mineralische Stickstoffverbindungen aufzunehmen und in komplexe Eiweißmoleküle umzuwandeln. Dies ist die Voraussetzung für das Leben von Menschen und Tieren auf unserem Planeten. Nachdem es der Menschheit gelungen war, Seuchen und Krankheiten früherer Jahrhunderte zu bekämpfen, wurde der Mangel an Nahrung ein für das Bevölkerungswachstum begrenzender Faktor. Ohne die rechtzeitige Entdeckung eines Verfahrens zur Bindung von atmosphärischem Stickstoff wäre es zu ausgedehnten Hungersnöten gekommen.

Diese Broschüre beschreibt die Technologie und die wissenschaftlichen Grundlagen der heutigen europäischen Düngemittelindustrie. Auf dieser Basis kann die Versorgung mit einem der wichtigsten Pflanzennährstoffe gesichert werden, so dass die Bevölkerung Europas sich eines reichhaltigen Nahrungsangebots erfreuen kann.



Das chemische Element Stickstoff wurde zu Beginn der siebziger Jahre des 18. Jahrhunderts von einer Reihe von Physikern und Chemikern unabhängig voneinander wissenschaftlich beschrieben, so von dem Schotten Daniel Rutherford, den Engländern Henry Cavendish und Joseph Priestley, Carl Wilhelm Scheele aus Schweden und dem Franzosen Antoine Lavoisier.

Im Normalzustand ist es ein farb- und geruchloses, geschmackfreies Gas, das sich bei $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ verflüssigt. Sein chemisches Symbol N geht zurück auf den wissenschaftlichen Namen dieses Elements Nitrogenium, aus dem Griechisch-Lateinischen für „das Salpeterbildende“. Stickstoff ist im Elementarzustand chemisch inert und damit lebensfeindlich – eine Flamme erlischt in ihm, ein Tier erstickt – daher sein deutscher Name.

Heute haben stickstoffhaltige Verbindungen ein breites Anwendungsspektrum. Zwar geht der größte Teil des synthetisch gebundenen Stickstoffs in die Mineraldüngerproduktion, doch ebenso wird Stickstoff bei der Metallproduktion, beim Schweißen, bei der Brandbekämpfung, der Verarbeitung und Konservierung von Nahrungsmitteln, der Herstellung elektronischer Bauteile, in Kühlsystemen und vielem anderen mehr eingesetzt.

N = Chemisches Zeichen des Stickstoffs
Ⓐ = Alchimistensymbol für Stickstoff

GRUNDLAGEN DES STICKSTOFFEINSATZES IN DER LANDWIRTSCHAFT

1. Einleitung	5
Stickstoff in der Natur	6
Stickstoff in Pflanzen	8
Stickstoffverbindungen in der Nahrung für Mensch und Tier	10
Der landwirtschaftliche Stickstoffkreislauf	12
Stickstoff und die Ernährung der Weltbevölkerung	16
2. Stickstoffquellen in der Landwirtschaft	18
Traditionelle Nährstoffquellen	18
Die Übergangsphase	20
Das Technische Zeitalter	21
Organische Düngerquellen	25
3. Mineralische Stickstoffdünger	29
Tendenzen in Produktion und Verbrauch	29
Stickstoffdüngertypen	32
Düngemittelrechtliche Vorschriften	38
4. Stickstoff, Umwelt und Gesundheit	39
Nitratauswaschung	39
Gasförmige Verluste	41
Verminderung von Nährstoffverlusten und Umweltbelastung	44
Nitrat und die menschliche Gesundheit	47
5. Stickstoffdüngung	50
Düngestrategien für verschiedene Kulturpflanzen	50
Hilfsmittel zur Optimierung von Zeitpunkt und Menge	56
6. Stickstoff und Nahrungsqualität	60
Qualitätsnahrung mit hohem Nährwert	60
Viehfutter	62
Schlusswort	63
Quellen, Belegstellen und weiterführende Literatur	64



Inhalt und Gestaltung der vorliegenden
BAD-Broschüre basieren auf der englisch-
sprachigen Vorlage

**„Understanding Nitrogen
and its use in Agriculture“**

Herausgegeben von Karl-Friedrich Kummer
(BASF AG), Chris Dawson und Mitarbeitern.
Koordiniert von Christian Pallière (EFMA).
Veröffentlicht durch EFMA (European Fertilizer
Manufacturers Association, Brüssel).

Übersetzung und inhaltliche
Überarbeitung durch:

Bundesarbeitskreis Düngung (BAD)
Karlstraße 21
60329 Frankfurt/Main
Telefon (069) 2556-1265/-1598
Telefax (069) 2556-1298
service.iva@vci.de
www.duengung.net

1 Einleitung

Stickstoff (N) ist eines der in der Natur am häufigsten vorkommenden Elemente; es bildet jedoch nur selten natürliche Minerale. Stickstoffhaltige Verbindungen im Boden sind daher nicht das Ergebnis von Verwitterungsprozessen der Erdkruste. Stickstoff ist enger als jedes andere chemische Element mit Leben assoziiert. Wo in der Natur Leben vorkommt, da ist auch Stickstoff. Stickstoff ist essentieller Bestandteil zahlreicher Zellinhaltsstoffe. Der gesamte in Menschen und Tieren enthaltene Stickstoff stammt ursprünglich aus Pflanzen oder Mikroben, da nur diese in der Lage sind, mineralischen Stickstoff in organische Verbindungen zu überführen. Pflanzen nehmen aus der Bodenlösung einfache mineralische Stickstoffverbindungen auf, vorwiegend Nitrat (NO_3^-), aber auch Ammonium (NH_4^+), und wandeln sie zu komplexeren organischen Verbindungen um.

Stickstoff ist essentieller Bestandteil der Aminosäuren, aus denen pflanzliches, tierisches und menschliches Eiweiß aufgebaut ist. Zudem ist er ein wichtiger Baustein des Chlorophylls.

In Pflanzen wird mit Hilfe des Chlorophylls unter Ausnutzung der Energie des Sonnenlichts die grundlegende Photosynthese von Kohlenwasserstoffen aus Kohlendioxid und Wasser durchgeführt. Dies ist der einzige Weg, Tiere und Menschen mit Energie in essbarer Form zu versorgen.



Abb. 1: Die Photosynthese von Kohlenhydraten aus Kohlendioxid und Wasser durch Chlorophyll.

Stickstoff ist außerdem ein lebensnotwendiger Bestandteil der Energie übertragenden Verbindungen ATP und ADP, und ist unverzichtbar für die Bildung von Peptiden, Enzymen, Hormonen und Vitaminen. Damit ist er unentbehrlich für zahlreiche Stoffwechselprozesse. Darüber hinaus ist Stickstoff ein Baustein der Nukleinsäuren RNS und DNS, aus denen das genetische Material aller lebenden Organismen besteht. Stickstoff ist das vierthäufigste der in lebendem Gewebe vorkommenden chemischen Elemente.

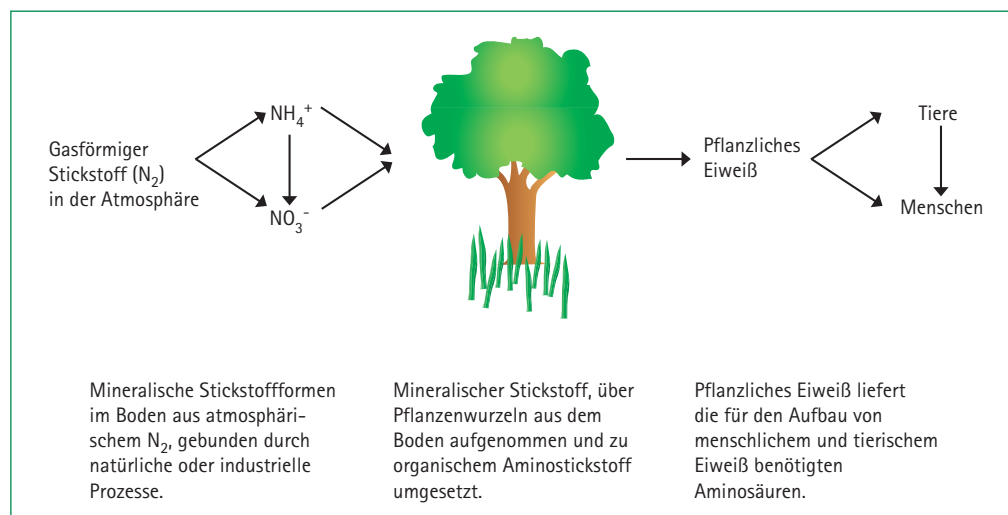


Abb. 2: Der Weg von Stickstoff aus der Luft bis zum Stickstoff im menschlichen Eiweiß: Der gesamte Stickstoff in Menschen und höheren Tieren stammt ursprünglich aus Pflanzen. Die Fähigkeit von Pflanzen, mineralischen Stickstoff zu Eiweiß umzuwandeln, ist ebenso Grundlage menschlichen Lebens wie ihre Fähigkeit der Energiegewinnung aus Sonnenlicht.

Stickstoff in der Natur

Auf der Erde gibt es zwei natürliche Stickstoff-„Pools“ mit nur geringem Austausch untereinander: (a) der gasförmige molekulare Stickstoff (N_2) in der Atmosphäre, der etwa 99 % des Gesamtvorkommens umfasst und (b) die etwa 1 % des gesamten Stickstoffs, die chemisch an andere Elemente gebunden sind. Dabei handelt es sich vorwiegend um Verbindungen mit Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) oder Sauerstoff (O). Sie sind Teil der Biosphäre, der Hydrosphäre bzw. der Lithosphäre.



Abb. 3: Bei atmosphärischen Entladungen wird Luftstickstoff zu Nitrit und Nitrat oxidiert.

Etwas mehr als 78 Vol.-% der Erdatmosphäre bestehen aus Stickstoff. Das entspricht etwa 86000 t Stickstoff in der Luft über jedem Hektar Land. Pflanzen können diesen gasförmigen Stickstoff jedoch nicht direkt nutzen. Aufgrund der starken Bindungskräfte zwischen den beiden Atomen eines N_2 -Moleküls ist dieser Stickstoff nahezu inert und kann nur mit hohem Energieeinsatz in die aktive, reaktionsfähige Form aufgespalten werden. Dennoch ist Stickstoff aus der Luft die ursprüngliche Quelle allen in gebundener Form in den verschiedensten Verbindungen vorliegenden Stickstoffs. Diese stickstoffhaltigen Verbindungen finden sich in einer nur relativ dünnen Biosphären-Schicht nahe der Erdoberfläche und in den Ozeanen.

Inerter Stickstoff aus der Atmosphäre gelangt auf natürlichem Wege durch zwei Prozesse in den aktiven „Pool“:

- spontan durch Blitzschlag oder durch photochemische Reaktionen, die zusammen rund 10 % des auf natürlichem Wege gebundenen Stickstoffs liefern

und

- biologisch durch frei im Boden lebende Mikroorganismen oder durch spezifische stickstoffbindende Bakterien, die in Symbiose z. B. mit Leguminosen zusammenleben.

Im Laufe ihrer Entwicklung sind einige Pflanzenarten Symbiosen mit Mikroorganismen eingegangen, die in Knöllchen an ihren Wurzeln leben. Diese Mikroorganismen besitzen Enzymsysteme, die atmosphärischen Stickstoff binden können, den sie dann ihrer Wirtspflanze zur Verfügung stellen. Im Gegenzug versorgt die Pflanze die Mikroorganismen mit Assimilaten – meist Kohlenhydraten – aus ihrer Photosynthese, welche auch die zum Aufbrechen der stabilen N_2 -Bindung benötigte Energie liefern. Abhängig von ihrem Stickstoffbedarf kann die Wirtspflanze diesen Assimilatstrom in gewissem Umfang regulieren.

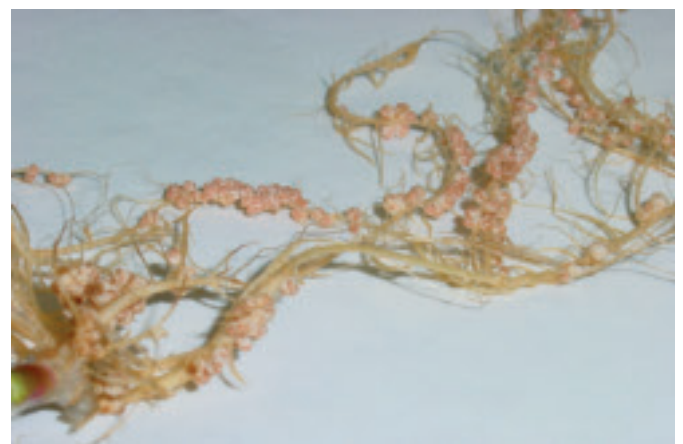


Abb. 4: In den Knöllchen an den Wurzeln von Leguminosen leben symbiotisch stickstoffbindende Bakterien.

Diese Umleitung eines Teils der von den Leguminosen gebildeten Kohlenhydrate zu den Knöllchenbakterien beschränkt den Pflanzenertrag und ist der Grund, warum Leguminosen (z. B. Erbsen oder Bohnen) geringere Erträge erbringen als aufgrund ihrer Photosyntheseleistung zu erwarten wäre.

Unter optimalen Bedingungen kann ein reiner Kleebestand pro Hektar mehr als 200 kg Stickstoff (kg N/ha) im Jahr aus der Luft binden. Wenn Leguminosen absterben und im Boden verwesen, wird der größte Teil des enthaltenen Stickstoffs verfügbar und kann von anderen Pflanzen, auch Nicht-Leguminosen, aus dem Boden aufgenommen werden.

Frei im Boden lebende stickstoffbindende Organismen konkurrieren mit anderen Bodenorganismen um abbaubare organische Substanz, mit der sie ihren Energiebedarf decken müssen. Im Durchschnitt binden sie jährlich nur etwa 2 kg N/ha.

Die im Boden und im Meer vorhandene organische Masse ist der Hauptspeicher an aktivem Stickstoff, der sich über geologische Zeiträume aufgebaut hat. Dieser Stickstoff ist beweglich und kreist innerhalb und zwischen den verschiedenen Bereichen der Umwelt (Abbildung 5). Diese Kreisläufe finden auf Zellebene wie in globalem Maßstab statt und umfassen Reaktionszeiten von Sekundenbruchteilen bis zu Tausenden von Jahren.

Der Stickstoffkreislauf zwischen Lebewesen und ihrer Umwelt bezieht den endlosen natürlichen Kreislauf vom Werden und Vergehen ein und stellt einen der wichtigsten Prozesse und Nährstoffkreisläufe in terrestrischen und aquatischen Ökosystemen dar.

Ein in der Hitze eines Blitzes gebildetes Stickoxidmolekül geht in den Mineralstickstoff-Pool des Bodens ein, wird von Pflanzen aufgenommen, zu Eiweiß umgewandelt, welches von Tieren gefressen wird und mit deren Ausscheidungen oder nach deren Tod wieder in den Boden gelangt. Nachdem es wieder in den mineralischen Stickstoffvorrat des Bodens zurückgekehrt ist, kann es erneut von Pflanzen oder von Bodenflora und -fauna genutzt werden. Andererseits könnte es auch von Mikroorganismen (die Nitrat als Sauerstoffquelle nutzen) wieder zu N_2 umgewandelt werden und zurück in die Atmosphäre gelangen.

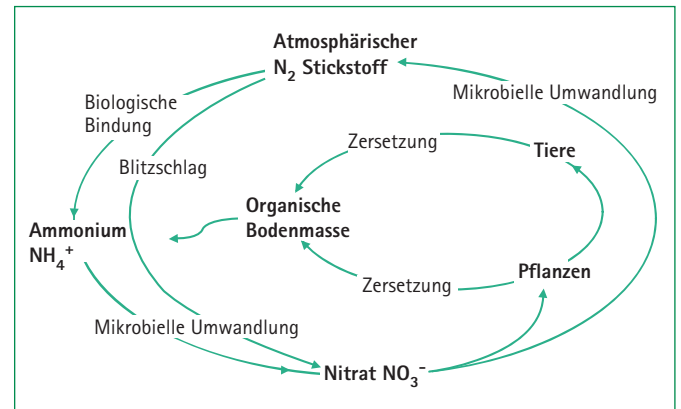


Abb. 5: Vereinfachter Stickstoffkreislauf in der Natur.

Menschliche Tätigkeiten, wie das Verbrennen fossiler Energiequellen, die Produktion und der Einsatz von Mineraldünger und der Anbau von stickstoffbindenden Kulturpflanzen, haben den natürlichen Stickstoffkreislauf einschneidend verändert. Die Menge an Stickstoff, die zwischen lebenden Organismen, Boden, Wasser und Atmosphäre zirkuliert, hat, entsprechend dem Anstieg der Weltbevölkerung, beträchtlich zugenommen.

Die technologische Stickstoffbindung beträgt heute ca. 165 Mio. t Stickstoff, während die biologische Bindung auf der Landoberfläche etwa 100 bis 140 Mio. t pro Jahr umfasst; d. h. rund 40 bis 50 % der Stickstoffbindung zu Lande erfolgt durch natürliche Vorgänge. Die marine Bindung wird auf 40 bis 200 Mio. t N pro Jahr geschätzt.

Stickstoff in Pflanzen

Pflanzen benötigen große Mengen an Stickstoff. Der durchschnittliche Gehalt in der pflanzlichen Trockenmasse liegt bei 3 bis 4 % N. Trotz seines reichlichen Vorkommens, ist atmosphärischer Stickstoff für die Pflanzen nicht direkt verfügbar. Die meisten Pflanzen nehmen Stickstoff nur in Form anorganischer Ionen aus dem Boden auf: als Ammonium oder als Nitrat. Versuche ergaben, dass Pflanzen am besten wachsen, wenn sie mit einer kulturspezifischen Mischung von Ammonium und Nitrat ernährt werden. Dennoch wird Stickstoff normalerweise überwiegend als Nitrat aufgenommen, da aufgrund der raschen mikrobiellen Umwandlung von Ammonium zu Nitrat im Boden und der besseren Beweglichkeit von Nitrat den Wurzeln mehr Nitrat als Ammonium angeboten wird. Auf feuchten oder sauren Standorten kann das anders sein. So nimmt zum Beispiel Nassreis auf gefluteten Feldern Stickstoff überwiegend in Form von Ammonium auf.

Stickstoff wird über die Wurzeln in den Stoffwechsel aufgenommen und in die oberirdischen Pflanzenteile transportiert, normalerweise in Form von Aminostickstoff ($-NH_2$). Dort wird der größte Teil des Aminostickstoffs zu Aminosäuren und weiter zu Proteinen umgewandelt. So bestimmen die Intensität des Stickstoffstoffwechsels und das Ausmaß der Proteinsynthese, wieviel Stickstoff in verschiedene Pflanzenteile gelangt. Im Allgemeinen ist der Stickstoffgehalt in den jüngeren Pflanzenteilen mit intensivem Wachstum am höchsten. Bei unzureichendem Stickstoffangebot aus dem Boden wird in älteren Blättern Stickstoff zur Versorgung der jungen Pflanzenorgane mobilisiert. Dazu wird Protein in älteren Blättern wieder zu Aminosäuren abgebaut (Proteolyse) und in dieser Form in die Sprossspitzen und jungen Blätter verlagert. Diese Proteolyse in den älteren Blättern führt zu einem Rückgang des Chlorophyllgehalts und damit zum Vergilben, welches oft ein Symptom für Stickstoffmangel ist.

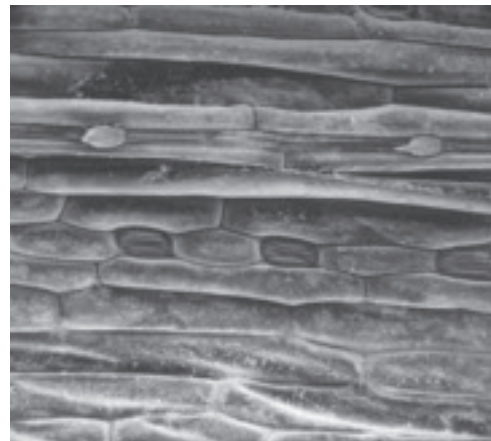


Abb. 6: Eine große Zahl verschiedener Aminostickstoff-enthaltender Moleküle sind wichtige Bausteine von funktionellen und strukturellen Zellbestandteilen.



Abb. 7: Versuchsparzelle mit Stickstoffmangel zwischen zwei gut versorgten Vergleichspartzellen.

Etwa 80 bis 85 % des Gesamtstickstoffs grüner Pflanzen entfällt auf Proteine. Viele Kulturpflanzen, z. B. Erbsen, Bohnen und Soja, werden vorrangig zur Erzeugung pflanzlichen Eiweißes für die Ernährung von Mensch und Vieh angebaut.

Weitere stickstoffhaltige Verbindungen in Pflanzen sind die Nukleinsäuren, RNS und DNS, die gut 10 % sowie freie Aminosäuren und andere Aminoverbindungen, die 5 % des Gesamtstickstoffs ausmachen. In Pflanzen findet sich Stickstoff also vorwiegend in funktionellen Verbindungen, wie z. B. Enzymen, und weniger in strukturellen Verbindungen, wie Fasern. Die meisten Pflanzen speichern in Samen die für den Keimling benötigte Energie als Kohlenhydrate (Stärke und Fett). Leguminosen, wie Erbsen, Linsen und Bohnen dagegen, reichern in ihren Samen Proteine an. Wildlebende Leguminosen haben ihre ökologische Nische auf stickstoffarmen Böden, weil sie nicht auf die Stickstoffvorräte des Bodens angewiesen sind. Um zu verhindern, dass an solchen Standorten schon der Sämling unter Stickstoffmangel leidet, dient die Proteinreserve des Samenkorns der Jungpflanze als Stickstoffquelle, bis das eigene System zur symbiotischen Bindung von Luftstickstoff entwickelt ist.

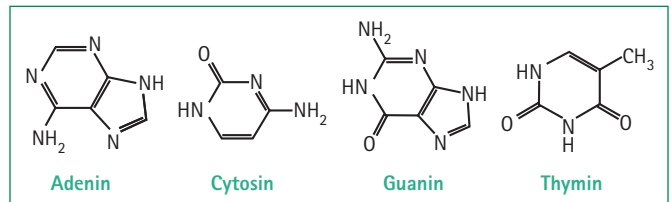


Abb. 8: Die vier N-reichen Bausteine der Nukleinsäure DNS.

Stickstoffverbindungen in der Nahrung für Mensch und Tier

Menschen und Tiere benötigen nicht Eiweiß als solches, sondern haben einen spezifischen Bedarf an bestimmten Aminosäuren. Sie sind die Bausteine für die körpereigenen Proteine. Da ihr Organismus nicht in der Lage ist, die Aminogruppe selbst zu bilden, sind sie darauf angewiesen, dass Nahrungsproteine die Aminosäuren liefern, die für die Biosynthese von Körperproteinen benötigt werden. Einfache Aminosäuren können durch die Transaminierung aus anderen gebildet werden. Haben sie jedoch verzweigte Kohlenstoffketten, einen aromatischen Rest oder eine dritte funktionelle Gruppe im Molekül (Schwefel), können der menschliche und tierische Organismus sie nicht selbst bilden. Solche Aminosäuren nennt man daher unentbehrliche oder essentielle Aminosäuren.

Auch wenn die anderen Aminosäuren in großer Menge vorliegen, kann ohne die essentiellen Aminosäuren kein menschliches oder tierisches Eiweiß gebildet werden. Sie müssen zur gleichen Zeit in der richtigen Menge zur Verfügung stehen. Obwohl bisher mehr als 200 Aminosäuren aus biologischem Material isoliert werden konnten, werden gewöhnlich nur 20 in Proteine eingebaut. 9 von diesen 20 Aminosäuren sind essentiell.

Aminosäure	Kinder		Erwachsene
	2-5 Jahre mg/kg/Tag	10-12 Jahre mg/kg/Tag	≥18 Jahre mg/kg/Tag
Histidin	?	?	8-10
Isoleucin	31	28	10
Leucin	73	44	14
Lysin	64	44	12
Methionin u. Cystein*	27	22	13
Phenylalanin u. Tyrosin	69	22	14
Threonin	37	28	7
Tryptophan	13	3	4
Valin	38	25	10
Gesamt (ohne Histidin)	352	216	84

* Schwefelhaltige Aminosäuren

Tab. 1: FAO/WHO/UNU (1985) Geschätzter Bedarf an essentiellen Aminosäuren für Kinder im Vorschulalter, Schulkinder und Erwachsene.

Menschen und Tiere nehmen die für Erhaltung, Wachstum und Fortpflanzung benötigten stickstoffhaltigen Verbindungen mit dem Nahrungsprotein pflanzlicher oder tierischer Herkunft auf. Die tägliche Zufuhr von Nahrungsprotein ist während des ganzen Lebens notwendig. Heranwachsende Kinder sowie Jung- und Hochleistungstiere benötigen relativ große Mengen davon. Mit Ende des Wachstums nimmt die benötigte Proteinmenge ab. Der tägliche Eiweißbedarf eines durchschnittlichen Erwachsenen beträgt etwa 0,8 g Protein pro kg Körpergewicht. Das entspricht etwa 10 g Stickstoff pro Tag bei einem Körpergewicht von 75 kg.



Abb. 9: Proteine sind ein wichtiger Bestandteil unserer Nahrung.

Chemisch gesehen sind Proteine sehr komplexe hochmolekulare Verbindungen, die im Durchschnitt 16 % N in der Trockensubstanz enthalten. Sie nehmen an allen Vorgängen des Zellstoffwechsels teil. Die Zellwände tierischer und menschlicher Zellen bestehen nahezu vollständig aus Proteinen und Lipiden. Bei Tieren und Menschen werden Muskeln, Haut, Haare, Nägel bzw. Klauen, Federn und Wolle hauptsächlich aus Proteinen gebildet. Insgesamt besteht der menschliche Körper zu etwa 2,6 % aus Stickstoff. Bei einem Körpergewicht von 75 kg enthält ein Mensch fast 2 kg N.

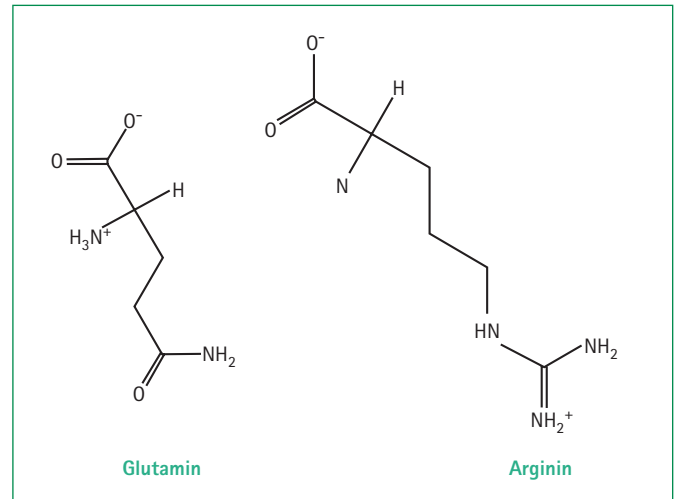


Abb. 10: Zwei von den insgesamt 20 Aminosäuren, die in Proteinen vorkommen.

Der landwirtschaftliche Stickstoffkreislauf

Die Aktivitäten des Menschen haben dazu beigetragen, die zwischen den Lebewesen, dem Boden, dem Wasser und der Atmosphäre zirkulierende Stickstoffmenge zu erhöhen. Innerhalb dieses Kreislaufs stellen Böden den höchst konzentrierten und aktivsten Stickstoff-Pool in der Lithosphäre dar. Weltweit schwankt der Stickstoffgehalt von Kulturböden zwischen 0,02 und 0,4 %. In Europa beträgt die Bandbreite gewöhnlich 0,04 bis 0,2 % N, was einem Vorrat von 1 800 bis 9 000 kg N/ha in einer 30 cm tiefen Pflugzone entspricht. Dieser Stickstoff ist überwiegend in der organischen Bodensubstanz gebunden und, im Gegensatz zu Stickstoff in der Bodenlösung, für die Pflanzen nicht rasch verfügbar. Böden mit niedrigem Stickstoffgehalt gelten als unfruchtbar und sind nur schlecht landwirtschaftlich nutzbar. Liegt der Stickstoffgehalt des Bodens oberhalb des Normalbereichs, so besteht ein erhöhtes Risiko, dass die Pflanzen einen Teil des zusätzlich verfügbaren Stickstoffs nicht aufnehmen können.

Die Landwirtschaft stellt einen Teil des gesamten Stickstoffkreislaufs dar. Um den steigenden Nahrungsbedarf abzudecken, hat der Mensch mit der Entwicklung moderner Produktionsmethoden in den natürlichen Kreislauf eingegriffen.

Der vorhandene Bodenstickstoff sowie zugeführter Düngerstickstoff werden mittels der gleichen komplexen biologischen Prozesse von einer chemischen Bindungsform in die andere umgewandelt. Dies geschieht unabhängig davon, ob der Stickstoff mineralischen oder organischen Ursprungs ist. Der steigende Düngemiteleinsatz hat nicht zu neuen Pfaden oder Abläufen innerhalb des Stickstoffkreislaufs geführt. Jedoch wurden die Stickstoffmengen in einigen Segmenten und die Umsetzungsrate zwischen diesen erhöht. Zum Teil betrifft dies auch Stickstoffflüsse in Bereichen, in denen er nicht mehr für die Landwirtschaft verfügbar ist. Sie werden daher als „Verlust“ eingestuft (siehe Seite 39 bis 46).

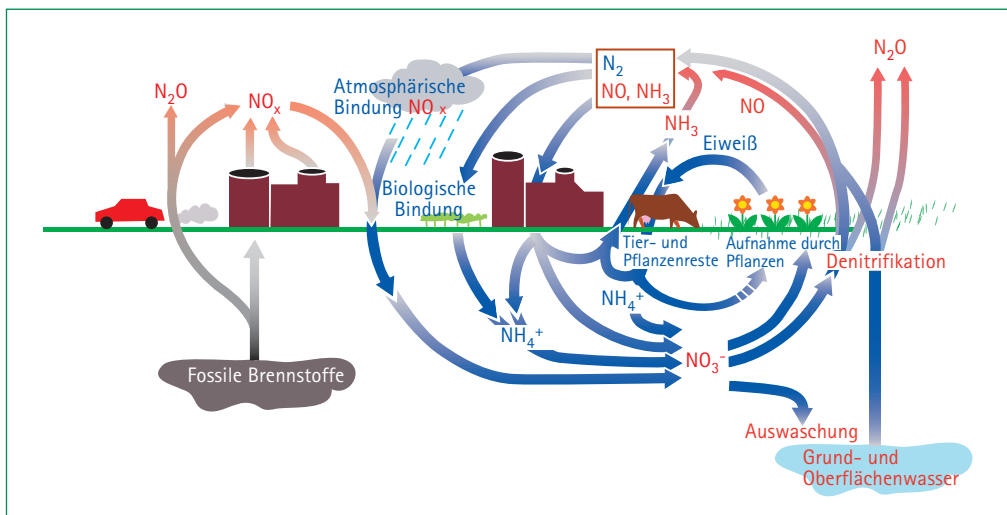


Abb. 11: Der globale Stickstoffkreislauf.

Die landwirtschaftlich bedingte Zunahme der zirkulierenden Stickstoffmengen geht auf einen erhöhten Umsatz organischer Substanz im Boden infolge veränderter Anbausysteme und auf den Einsatz externer Stickstoffquellen zurück. Vielerorts brachen Siedler natürliches Grasland um, und alte Dauergrünlandflächen in Europa wurden umgepflügt. Die Ackerfläche zur Erzeugung von Feldfrüchten ist in den meisten Regionen der Erde in den letzten 150 Jahren deutlich gewachsen. In neuerer Zeit ist durch den verstärkten Anbau stickstoffbindender Leguminosen wie durch die industrielle Stickstoffbindung bei der Erzeugung von Mineraldüngern mehr Stickstoff in den landwirtschaftlichen Kreislauf eingebracht worden (siehe Seite 18 bis 28).

Die überwiegenden Stickstoffformen im Boden sind der in den organischen Verbindungen der Humusfraktion eingebaute Stickstoff sowie die beiden mineralischen N-Formen Ammonium (NH_4^+) und Nitrat (NO_3^-). Pflanzen nehmen jedoch überwiegend Nitrat auf. Während Ammonium-N an Tonpartikel gebunden wird, bleiben die Nitratanionen im Bodenwasser gelöst und sind damit frei beweglich. Infolgedessen gelangt Nitrat direkt zu den Pflanzenwurzeln. Ammonium muss dagegen von den Wurzeln durch Austauschvorgänge an den Sorptionsträgern des Bodens erschlossen werden.

Mineralisation

Der Stickstoff in organischer Bindung ist weitgehend unbeweglich und nicht pflanzenverfügbar. Schätzungsweise werden in Böden der gemäßigten Klimazone jährlich 1 bis 3 % des Stickstoffs durch Mikroorganismen mineralisiert. Dies bedeutet, dass theoretisch innerhalb von 30 bis 70 Jahren der gesamte Bodenstickstoff einmal umgesetzt worden ist. Die Umwandlung von organischem Stickstoff zu Ammoniumionen wird als „Mineralisation“ bezeichnet.

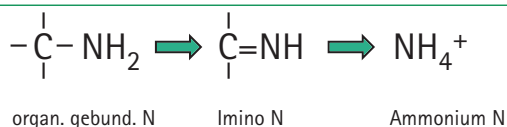


Abb. 12: Mineralisation

Nitrifikation

Ammonium kann von den Pflanzen direkt aufgenommen und verwertet werden. Der größte Teil jedoch wird von Bodenbakterien in zwei Schritten zu Nitrat umgewandelt. Diese als „Nitrifikation“ bezeichnete mikrobielle Oxidation kann von bestimmten Wirkstoffen, den sogenannten Nitrifikationshemmern, durch zeitweilige Hemmung der Aktivität der Bodenbakterien – Gattung *Nitrosomonas* – beeinflusst werden (siehe Seite 37, stabilisierte Dünger).

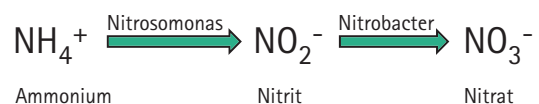


Abb. 13: Nitrifikation

Denitrifikation

Beim „Denitrifikationsprozess“ wird Nitrat unter anaeroben Bedingungen zu elementarem Stickstoffgas (N_2) reduziert. Dabei entsteht als Zwischenprodukt auch Lachgas (N_2O), welches gleichfalls an die Atmosphäre abgegeben wird. Das Ausmaß der Denitrifikation hängt von den Boden- und Klimabedingungen ab (siehe Seite 42, Lachgasemissionen).



Abb. 14: Denitrifikation

Biologische Umwandlungsprozesse im Boden

Mineralisation:

Eine Vielzahl der im Boden lebender Mikroorganismen zersetzt die organische Substanz, um die zum Leben notwendige Energie zu gewinnen. Dabei werden auch Pflanzennährstoffe freigesetzt, z. B. Phosphat, Kalium oder Stickstoff. Organisch gebundener Stickstoff wird erst zu Imino-N und dann weiter zu Ammonium-N umgewandelt. Frische organische Masse, wie etwa Ernterückstände, werden innerhalb weniger Sommermonate nahezu vollständig umgesetzt (mineralisiert).

Bei Stallmist oder Kompost geht man davon aus, dass jährlich nur 10 bis 20 % zersetzt werden. Der Bodenumus besteht aus sehr stabilen Verbindungen, die nur innerhalb sehr langer Zeiträume aufgebaut bzw. mineralisiert werden.

Immobilisation:

Mikroorganismen, die sich von organischer Bodensubstanz ernähren, nehmen während des Wachstums und der Vermehrung Bausteine wie Aminosäuren und/oder mineralisierte Nährstoffe in ihre eigene Körpersubstanz auf. Dadurch fixiert die Mikrobenpopulation den mineralischen Ammonium- und Nitrat-Stickstoff aus der Bodenlösung und macht ihn so zeitweise für die Pflanzen unverfügbar. Dies geschieht besonders dann, wenn stickstoffarme leicht zersetzbare organische Masse, z. B. Stroh, bei feucht-warmer Witterung reichlich zur Verfügung steht. Unter solchen Bedingungen können bis zu 100 kg Stickstoff pro Hektar zeitweilig festgelegt werden.

Nitrifikation:

Einige spezialisierte Bakterien können die im Ammonium-N chemisch gebundene Energie nutzen, indem sie es in zwei Schritten zu Nitrat oxidieren. Während Bakterien der Gattung *Nitrosomonas* Ammonium zu Nitrit umwandeln, sind *Nitrobacter*-Arten für die Oxidation von Nitrit zu Nitrat verantwortlich. Unter aeroben Bedingungen wird nahezu das gesamte im Boden verfügbare Ammonium in Nitrat umgewandelt.

Denitrifikation:

In überfluteten oder staunassen Böden wird der Mangel an Luftsauerstoff zum limitierenden Faktor. Unter solchen Bedingungen besitzen einige Mikroben die Fähigkeit, den im Nitrat enthaltenen Sauerstoff für ihren Stoffwechsel zu nutzen, indem sie ihn zu NO, N₂O oder N₂ reduzieren. Diese gasförmigen Verluste in die Atmosphäre können 20 bis 30 kg N/ha im Jahr ausmachen.

Die Intensität all dieser mikrobiellen Aktivität ist abhängig von Umweltfaktoren, wie Wasser- und Sauerstoffgehalt, pH-Wert und Temperatur des Bodens. Am aktivsten sind die Mikroben in feuchtwarmen Böden bis ca. 35 °C. Bei Temperaturen unter 5 °C und in trockenen Böden stellen sie ihre Tätigkeit ein.

Die Mineralisation erhöht die Menge an pflanzenverfügbarem Stickstoff im Boden, wie Ammonium und Nitrat. Andererseits verbrauchen Mikroben jedoch auch mineralischen Stickstoff, vorwiegend Ammonium-N aber auch Nitrat-N, indem sie ihn in organische Substanzen einbauen. In diesem Zusammenhang gilt als allgemeine Regel: Wenn das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff (C:N) im Boden größer ist als 20:1, so wird die Immobilisation begünstigt und mineralischer Stickstoff wird zu organischem

umgewandelt. Liegt das Verhältnis unter 15:1, so überwiegt die Mineralisation. Entsprechend können das dabei entstehende Ammonium und sein Oxidationsprodukt Nitrat von den Pflanzen aufgenommen werden. Da Humus, die langzeitige Speicherform der organischen Masse des Bodens, ein annähernd konstantes C:N-Verhältnis von etwa 10:1 hat, haben die Ackerböden in den meisten Regionen Europas C:N-Verhältnisse zwischen 8:1 und 15:1. Durch Mineraldünger zugeführtes Ammonium und Nitrat unterliegen im Boden den gleichen mikrobiellen Prozessen.

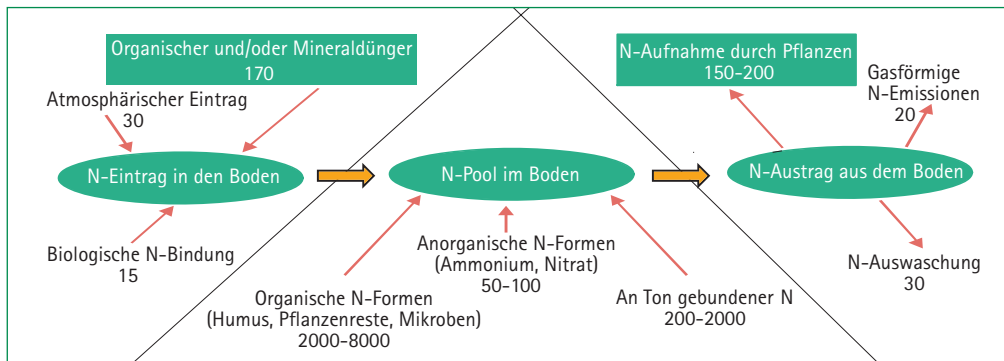


Abb. 15: Geschätzte Stickstoffmengen (kg N/ha) in den verschiedenen Pools und Reaktionspfade des Stickstoffkreislaufs in landwirtschaftlich genutzten Böden.

Der Gehalt an organischer Substanz und das C:N-Verhältnis der organischen Masse im Boden sind spezifisch für den Standort und seine Nutzung. Sie hängen ab von natürlichen Faktoren, wie Klima, Wasserführung und Bodentyp. Wichtig sind auch die Art der Vegetation bzw. die Art der Nutzung (Wald, Weide, Acker- oder Grünland) und die Nutzungsintensität (Art und Häufigkeit der Bodenbearbeitung, Art der angebauten Kulturpflanzen und Fruchtfolge, Zu-/Abfuhr von Pflanzennährstoffen und organischer Masse). Bleiben alle diese Faktoren unverändert, so stellt sich innerhalb von Jahrzehnten ein Gehalt an organischer Masse mit einem C:N-Verhältnis ein, wie er für diese Verhältnisse typisch ist.

Die Ergebnisse des „Ewigen Weizenanbau-Versuchs“ in Rothamsted, England, zeigen, dass der Gehalt an Gesamtstickstoff nach 137-jähriger Düngung anstieg: Im Vergleich zur ungedüngten Variante erhöhte sich der Stickstoffgehalt in der oberen Bodenschicht (0 bis 23 cm) bei einer jährlichen Stickstoffgabe mit 144 kg N/ha von 2 900 auf 3 600 kg N/ha. Der Gehalt an organischer Masse (C) und der damit verbundene Gehalt an organischem Stickstoff stabilisierten sich auf diesem Tonboden nach rund 30 bis 40 Jahren sowohl auf den gedüngten wie auf den ungedüngten Parzellen. Er blieb seither weitgehend unverändert. Der Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt war bei den ungedüngten Parzellen niedriger, aber das C:N-Verhältnis blieb bei allen Behandlungen auf diesem Standort gleich.



Abb. 16: Das Bodenprofil zeigt oben die mit organischer Substanz angereicherte Pflugzone; im anschließenden Übergangshorizont ist teilweise organische Masse nach unten verlagert worden (etwa durch Regenwürmer); darunter befindet sich der mineralische Unterboden.

Stickstoff und die Ernährung der Weltbevölkerung

Industriell hergestellte Mineraldünger sind heute eine notwendige Voraussetzung für das Überleben der Weltbevölkerung. Sie bilden die Grundlage für die Erzeugung von fast 50 % der weltweit verbrauchten Nahrungsmittel. 1996 verzehrte die Weltbevölkerung (5,75 Milliarden Menschen) mit ihrer Nahrung rund 25 Mio. t N (Abbildung 17). Die weltweit verfügbare Proteinmenge reicht aus, um den absoluten Bedarf der Menschheit zu decken. Dies bedeutet jedoch nicht, dass alle Menschen auf der Welt auch wirklich ausreichend versorgt sind.

Die Probleme, die sich aus der Erhöhung der Stickstoffmenge für die natürliche Umwelt ergeben, sind der Preis, den die Menschheit für die Nahrungssicherheit zu zahlen hat. Mit der Weiterentwicklung unserer wissenschaftlichen und technischen Kenntnisse wird die Effizienz bei der Produktion und dem Einsatz von Mineraldüngerstickstoff weiter steigen, um sowohl die nachhaltige Nahrungsmittelversorgung der Weltbevölkerung als auch den notwendigen Schutz der globalen Umwelt sicher zu stellen.

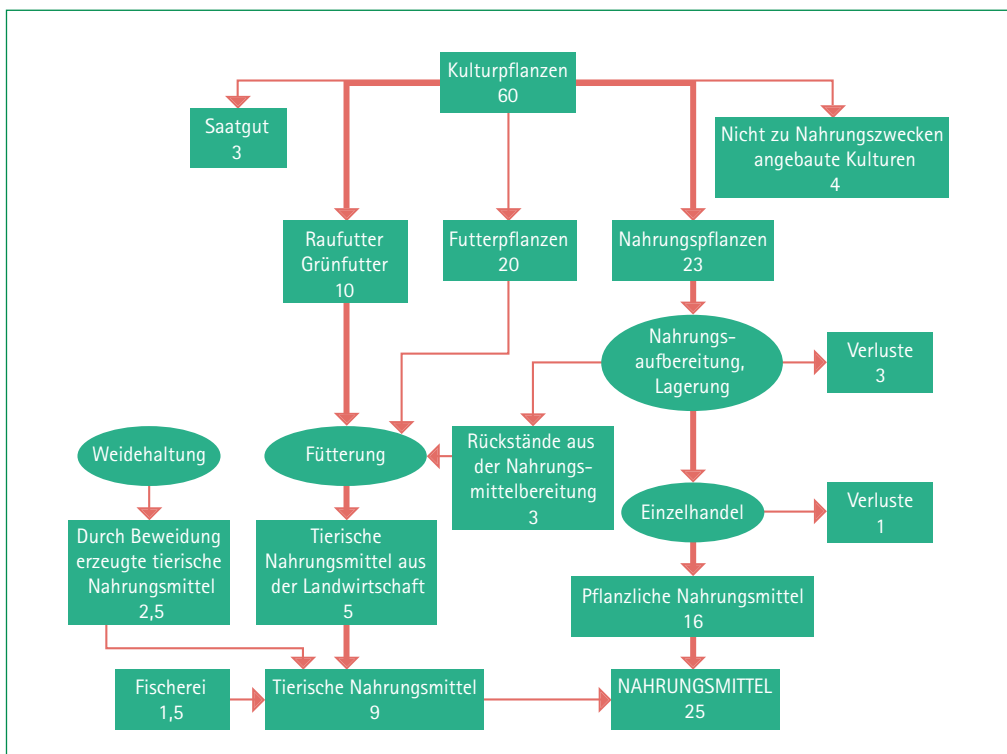


Abb. 17: Weltweite Verteilung von Stickstoff [Mio. t N pro Jahr] in Nahrungs- und Futtermitteln Mitte der 90er Jahre (Smil, 1999).

„Langfristige Perspektiven zum Einsatz anorganischer Dünger in der globalen Landwirtschaft“

„Ich habe eine detaillierte Aufstellung der Stickstoffströme in der globalen Landwirtschaft erstellt. Sie zeigt, dass Mitte der 90er Jahre weltweit etwa 85 % des für die menschliche Ernährung verfügbaren Proteinstickstoffs (21 von 24,5 Mio. t N) auf Ackerflächen produziert wurden – entweder direkt aus pflanzlichen Nahrungsmitteln oder indirekt über tierische Nahrungsmittel. Der Rest stammte von Weideflächen oder aus dem Meer (Abbildung 17) (Smil, 1999). Da etwa die Hälfte des Stickstoffs aus geernteten Kulturen stammt (nach meinen Berechnungen dürften es zwischen 44 % und 51 % sein), haben etwa 40 % (37 % bis 43 %) der Welterzeugung an Nahrungsprotein in der Mitte der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts ihren Ursprung in der Haber-Bosch Ammoniaksynthese.“

„Länder mit niedrigem Einkommen verbrauchen gegenwärtig etwa zwei Drittel aller Stickstoffdünger. In diesen Ländern haben die mineralischen N-Dünger einen Anteil von rund 55 % der Gesamtstickstoffversorgung der Felder. Da nicht weniger als 92 % ihres Nahrungsproteins aus Pflanzen stammen, tragen anorganische Dünger zumindest zur Hälfte allen Stickstoffs in der Nahrung bei. Umgerechnet entspräche dies der Ernährung von nicht weniger als 2,2 Milliarden Menschen oder ungefähr 40 % der Weltbevölkerung im Jahre 1996. Für diese oft unzureichend ernährten Menschen hängt in diesen Ländern die Versorgung mit Nahrung und das Überleben vom Haber-Bosch-Verfahren ab.“

„Auch ein anderer Ansatz verdeutlicht unsere Abhängigkeit von der Ammoniak-Synthese. Dabei wird die Zahl an Menschen miteinander verglichen, die bei unterschiedlichen Ernährungsgewohnheiten versorgt werden können. Im Jahr 1900 konnte die nahezu ohne Dünger arbeitende Landwirtschaft mit einer Kombination von extensivem Ackerbau und biologischem Landbau auf einer Gesamtfläche von 850 Mio. ha 1,625 Milliarden Menschen ernähren. Bei gleicher Arbeitsweise, hochgerechnet auf die heutige Ackerfläche von 1,5 Milliarden ha, könnten rund 2,9 Milliarden Menschen ernährt werden. Bei Einbeziehung der aus Weidehaltung und Fischfang hinzukommenden Nahrung 3,2 Milliarden. Dies bedeutet jedoch, dass ohne Stickstoffdünger nicht mehr als 53 % der heutigen Bevölkerung ernährt werden könnten – und das auf dem allgemein unzureichenden Versorgungsniveau von 1900. Wollte man die Menschen mit dem heutigen Versorgungsniveau ernähren, aber die dazu benötigte Nahrung auf dem landwirtschaftlichen Ertragsniveau von 1900 erzeugen, so reichte dies nur für rund 2,4 Milliarden Menschen oder knapp 40 % der heutigen Gesamtbevölkerung.“

Auszüge aus dem Vortrag von Prof. Vaclav Smil, University of Manitoba, Kanada

1999 Travis P. Hignett Lecture, IFDC, AL, USA.
IFDC Reference: LS-2, Oktober 1999

2 Stickstoffquellen in der Landwirtschaft

Traditionelle Nährstoffquellen

Vor etwa 10 000 Jahren begannen unsere Vorfahren als Jäger und Sammler ihre Nahrungsversorgung zu ergänzen, indem sie jene Pflanzen anbauten, von denen sie bisher nur die essbaren Teile eingesammelt hatten. Sie müssen bald gemerkt haben, dass nicht alle Standorte gleichermaßen ertragreich waren. Neben den sichtbaren Merkmalen wie Bodenstruktur und Bodenfeuchte beeinflussen noch weitere, weniger auffällige Parameter die Fruchtbarkeit eines Bodens. So lässt sich etwa der Nährstoffgehalt eines Bodens anhand der Fülle der natürlichen Vegetation abschätzen. Die ersten Landwirte werden daher rasch gelernt haben, sich ihre Ackerflächen sorgfältig auszusuchen.

Es hat wahrscheinlich sehr viel länger gedauert bis sie erkannten, dass selbst auf fruchtbarsten Böden die Erträge nach Jahren ständigen Ackerbaus allmählich sanken. Dies wurde erst nach vielen Jahren, teils erst nach Generationen, sichtbar. Der Grund hierfür liegt in dem ständigen Entzug von Pflanzennährstoffen mit den geernteten Früchten. So wird berichtet, dass im fruchtbaren Mesopotamischen Becken die Weizenerträge im Verlauf einer 300-jährigen Anbauperiode von 20 dt/ha auf 8 dt/ha sanken.

Der Ackerbau entwickelte sich daher in zwei Formen:

- Wanderfeldbau, wobei die Felder nach einigen Anbaujahren aufgegeben und neues jungfräuliches Land in Kultur genommen wurde,

oder

- Ackerbau in Flusstälern, wo mit der jährlichen Überflutung und der Ablagerung nährstoffreichen Schlamms die mit den Ernten entzogenen Nährstoffe ersetzt wurden.

In den verschiedenen Regionen entwickelten die Menschen Systeme, die an die lokalen Bedingungen bestmöglich angepasst waren. Die Landwirtschaft in großen Teilen Europas begann im Mittelalter mit der von den Römern ererbten zweigliedrigen Fruchtfolge: ein Jahr Winterweizen, Gerste oder Roggen, gefolgt von einem Jahr Brache. Diese Wirtschaftsweise halbierte nicht nur den Anspruch an pflanzenverfügbare Nährstoffe im Boden, vielmehr konnten während des Brachejahres noch zusätzlich Nährstoffe durch Zersetzung organischer und mineralischer Bodenpartikel freigesetzt werden.

Seit der Zeit der Griechen und Römer war bekannt, dass eine Zugabe von Kalk, Mist oder anderem organischen Material den Pflanzenertrag erhöht. Daher verteilte man den Mist aus den Ställen auf die Äcker und errichtete den Pferch zur nächtlichen Unterbringung der Herde vorzugsweise auf einer Brachfläche. Im Wald gesammelter Streu und Heu von abgelegenen Wiesen führten zusätzliche Nährstoffe in die Feldwirtschaft. Doch dies stellte nur einen horizontalen Nährstofftransport dar, bei welchem andere natürliche Ökosysteme zugunsten jener Felder verarmten, auf denen die Menschen ihr Brotgetreide anbauen wollten.

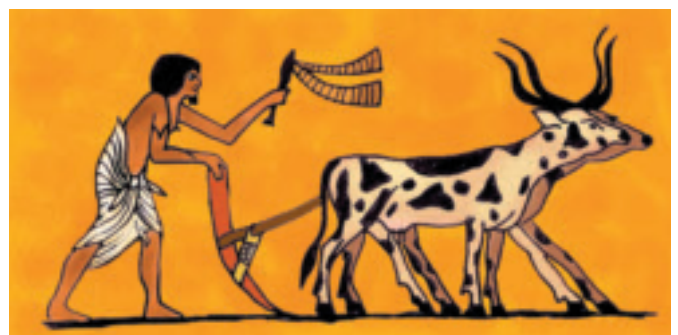


Abb. 18: Im Niltal, in dem jährliche Überschwemmungen die Bodenfruchtbarkeit erneuerten, entwickelte sich frühzeitig eine spezialisierte Form des Ackerbaus.

Mit dem stetigen Anwachsen der Bevölkerung war es nicht länger möglich, ständig die Hälfte des Ackerlandes brachliegen zu lassen. Im 8. Jahrhundert begann die Einführung der Dreifelderwirtschaft. Hierbei wurde ein Jahr mit einer Sommerkultur zwischen das traditionelle Wintergetreide und die Brache eingeschoben. Dafür wurden anspruchlosere Arten (Hafer, Buchweizen) oder stickstoffbindende Leguminosen ausgewählt (Erbsen oder Ackerbohnen im Norden, Linsen oder Kichererbsen im Süden Europas). Obgleich diese Leguminosen geringe Mengen an Stickstoff für die nachfolgende Kultur im Boden zurückließen, konnte der Nährstoffgehalt des Bodens nicht wirklich verbessert werden. Doch die Gesamternte stieg, da zwei Drittel statt der Hälfte des gerodeten Landes genutzt wurden. Durch die Dreifelderwirtschaft beschleunigte sich auch die Nährstoffverarmung der Böden.

Im Laufe der Jahrhunderte wuchs der Nahrungsbedarf mit der ständig steigenden Bevölkerung. Durch weiteres Roden von Wald und das Trockenlegen von Sümpfen verringerte sich einerseits die Naturfläche, von der das Ackerland mit zusätzlichen Nährstoffen hätte versorgt werden können. Andererseits vergrößerte es die Fläche, die mit diesen Nährstoffen zu versorgen war. Durch verbesserte Bodenbearbeitung konnte dies teilweise ausgeglichen werden. Mit eisernen Pflugscharen, Radpflügen und effektiverer Nutzung der Zugpferde (Kummet) konnte der Boden tiefer bearbeitet werden, so dass den Pflanzenwurzeln mehr Nährstoffe aus einem größeren Bodenvolumen zur Verfügung standen. Zudem wurden alle anderen verfügbaren Nährstoffquellen genutzt: Schlamm aus Teichen und Flüssen oder Heideplaggen. Dennoch konnten so nur durchschnittliche Weizenerträge von 8 dt/ha erzielt werden. Ein zusätzliches Problem war, dass die zur Düngung verwendeten Stoffe nur wenige Nährstoffe enthielten. Es mussten also große Mengen bewegt werden, um die Fruchtbarkeit wirklich zu verbessern. Das aber war mit Hilfe der damaligen Transportmittel kaum zu bewerkstelligen.

Abbildung nur in der Printversion

Abb. 19: In der mittelalterlichen Landwirtschaft hing der Erhalt der Bodenfruchtbarkeit vom Eintrag nährstoffhaltiger Stoffe aus anderen Naturräumen ab.

Im 18. Jahrhundert wurde der Stickstoffeintrag durch den Anbau von Futterleguminosen und Klee gras auf dem Brachland gesteigert. Dadurch blieb nicht nur mehr Stickstoff in den Ernterückständen auf dem Feld, das zusätzliche Futter führte auch zu mehr und stickstoffreicherem Stallmist. Die verbesserte Stickstoffversorgung bewirkte allerdings auch, dass andere Nährstoffe, speziell Phosphat und Kalium, zum ertragsbegrenzenden Faktor wurden. Der Phosphatmangel schränkte so das Wachstum der stickstoffbindenden Leguminosen Klee und Luzerne ein.

Die Übergangsphase

Bis zum Beginn des 19. Jahrhunderts hatten die Landwirte drei Verfahren entwickelt, um Nährstoffe auf die Äcker zu leiten und damit die Fruchtbarkeit ihrer Felder zu erhalten:

- Möglichst viele der von den Pflanzen dem Ackerboden entzogenen Nährstoffe als Stallmist und Knochenmehl zurückzuführen;
- Dem Stallmist durch Waldstreu und Wiesenheu zusätzlich Nährstoffe zuzufügen – was jedoch zur Verarmung natürlicher Ökosysteme führte;
- Durch Einbeziehung von Leguminosen in die Fruchtfolge Stickstoff aus der Luft zu binden.

Alle Maßnahmen zusammen hätten wohl genügt, um die Erträge zu stabilisieren. Sie reichten jedoch bei weitem nicht aus, die Erträge so weit zu steigern, dass der stetig steigende Nahrungsbedarf der wachsenden Bevölkerung gedeckt werden konnte. Der Großteil der in Europa für Landwirtschaft geeigneten Flächen war bereits gerodet, so dass eine Ausdehnung der Ackerfläche kaum noch möglich war. Der erforderliche Anstieg der Erträge war nur zu erreichen, wenn höhere Nährstoffgehalte im Boden es den Pflanzen ermöglichten, in der zeitlich begrenzten Vegetationsperiode mehr Nährstoffe aufzunehmen.

In den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts wurden die dafür notwendigen zusätzlichen Nährstoffe außerhalb der Landwirtschaft als Mineraldünger verfügbar. In den Großstädten hatte die Gasbeleuchtung Einzug gehalten, für die Leuchtgas aus Kohle hergestellt wurde. Kokereigas enthält 0,7 bis 1,5 % Ammoniak, das als Ammoniumsulfat (21 % N) ausgefällt wurde. Während die Versorgung mit dieser Stickstoffquelle durch die Gasproduktion limitiert war, stand noch ein weiteres Produkt ohne eine derartige Einschränkung zur Verfügung. Der Abbau von Natriumnitrat (Salpeter) begann in der Atacamawüste, die zu Chile, Peru und Bolivien gehörte, um Rohstoff für die Produktion von Schießpulver zu gewinnen.

Dieses Salz wurde mit Hilfe von heißem Wasser aus einer stickstoffreichen (1 bis 5 % N) Bodenschicht ausgewaschen, gereinigt und getrocknet. Es war jedoch aufwendig, in

einer Wüste dieses Energie und Wasser verbrauchende Verfahren zu betreiben. Das Produkt blieb deshalb teuer, bis nach dem so genannten Salpeterkrieg von 1879 bis 1884 sämtliche Minen an Chile fielen und die Produktion mit ausländischem Kapital rationalisiert wurde. Wurden 1830 nur 850 t Chilesalpeter (15 bis 16 % N) exportiert, so waren es um 1890 mehr als eine Million Tonnen (160 000 t N). Der Höhepunkt war um 1930 erreicht mit etwa 3 Mio. t pro Jahr.

Der Bedarf an Dünger wurde noch durch ein weiteres Naturprodukt gedeckt. Der so genannte „Guano“ bestand aus dem Kot von Seevögeln, der sich unter extrem trockenen Bedingungen auf kleinen Inseln vor der Küste Perus angesammelt hatte. Die Erfahrung peruanischer Indianer nutzend, hatte man dieses Material in Europa erfolgreich als Düngemittel erprobt. Ab etwa 1840 wurde Guano (14 % N, 14 % P_2O_5) in solchen Mengen nach Europa verschifft, dass die Lagerstätten um 1875 weitgehend erschöpft waren – trotz ihrer ursprünglichen Mächtigkeit von bis zu 60 m. Guano wurde zur Standardfracht der von der Pazifikküste Südamerikas heimkehrenden Schiffe. In nur 35 Jahren brachten sie 16 Mio. t Guano nach Europa, das entsprach einer Menge von etwa 64 000 t N jährlich.

Abbildung nur in der Printversion

Abb. 20: Segelschiffe, ähnlich der hier abgebildeten Pamir, transportierten Millionen Tonnen Guano und Chilesalpeter um Kap Hoorn, um damit die Äcker Europas zu düngen.



Abb. 21: Düngerlager

Das Technische Zeitalter

Nach der schnellen Erschöpfung der Guano-Vorkommen war die europäische Landwirtschaft allein von zwei zusätzlichen Stickstoffquellen abhängig: von dem als Nebenprodukt anfallenden Ammoniumsulfat und von Chilesalpeter. Es ist daher verständlich, dass der englische Chemiker William Crookes 1898 in einem viel beachteten Vortrag alle Chemiker dazu aufrief, nach einer Möglichkeit zu suchen, den unbegrenzt vorhandenen Luftstickstoff chemisch zu binden. Ohne eine neue Quelle für Stickstoffdünger, so meinte er, müsse es in zwei bis drei Jahrzehnten unausweichlich zu einer Hungerkatastrophe kommen.

Im Jahr 1895 gelang es Adolf Frank und Nikodemus Caro in einer Versuchsanlage nachzuweisen, dass Calciumcarbid bei 1 000 bis 1 100 °C mit dem Stickstoff der Luft zu Calciumcyanamid, später Kalkstickstoff genannt, reagiert. Durch Zugabe von Calciumchlorid konnte die Reaktionstemperatur auf 700 °C gesenkt werden. 1905 nahmen zwei Kalkstickstoffwerke mit einer Kapazität von je 800 t N die Produktion auf. Während das Werk in Piano d'Orta in Italien in den Folgejahren stark erweitert wurde, stellte das Kalkstickstoffwerk in Westeregeln bei Magdeburg aufgrund technischer Probleme die Produktion 1909 wieder ein. Mehr Erfolg war den 1907 und 1908 in Knapsack bei Köln bzw. Trostberg in Oberbayern gebauten Werken beschieden. Zunächst auf eine Jahresleistung von 1 700 bzw. 3 400 t N ausgelegt, wurden diese Werke in der Folgezeit aufgrund der steigenden Nachfrage ständig erweitert.

Die für die Kalkstickstoffherstellung notwendige billige elektrische Energie lieferten Wasserkraft- bzw. Braunkohlekraftwerke.

Der natürliche Vorgang, bei dem durch die Hitze eines Blitzschlags elementarer Luftstickstoff (N_2) zu Stickoxid (NO) oxidiert wird, war bereits seit dem 18. Jahrhundert bekannt. Im Jahr 1903 entwickelten die norwegischen Techniker Kristian Birkeland und Samuel Eyde ein Verfahren, bei dem sie mittels starker Elektromagnete einen scheibenförmigen Lichtbogen quer zu einem Luftstrom erzeugten. Nachdem die Luft die 3 500 °C heiße Flamme durchquert hatte, enthielt sie 1,5 bis 2,0 % Stickoxid, welches in Wasser zu Salpetersäure (HNO_3) reagierte. Diese wurde dann mit Calciumkarbonat neutralisiert. Trotz eines Energiebedarfs von 50 bis 70 kWh pro kg Stickstoff, war das Verfahren bei Einsatz von Elektrizität aus Wasserkraft wirtschaftlich.

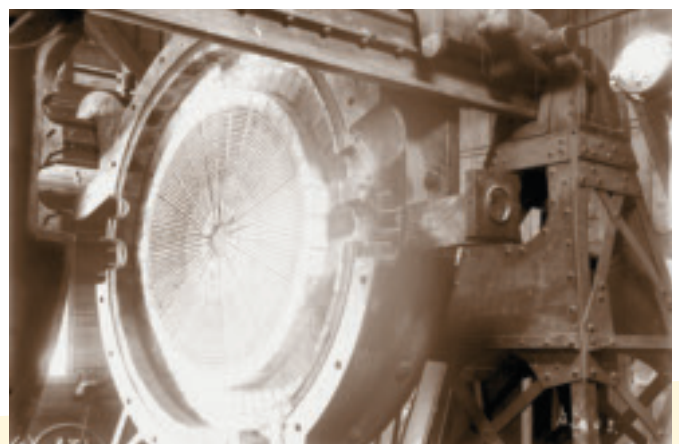


Abb. 22: Nitratproduktion nach dem Birkeland-Eyde-Verfahren um 1912 im Hydro Werk in Rjukan, Norwegen, und einer der elektromagnetischen Reaktoren in geöffnetem Zustand.

Im Jahre 1913 produzierten in Norwegen drei Fabriken zusammen 70 000 t „Norge-Salpeter“, in welchem rund 12 000 t N gebunden waren – das entsprach etwa 3 % der chilenischen Nitratproduktion im selben Jahr.

Die Verbreitung des Birkeland-Eyde- wie auch des Frank-Caro-Verfahrens blieb durch deren Abhängigkeit von billiger Elektrizität und fehlende Möglichkeiten der Effizienzerhöhung begrenzt. Daher suchten Chemiker in vielen Ländern weiter nach Alternativen. Einer von ihnen war Fritz Haber, Professor für Chemie an der Universität Karlsruhe. Ausgehend von der Aufspaltung von Ammoniak bei hohen Temperaturen in seine Komponenten Wasserstoff und Stickstoff, gelang es ihm 1904 diesen Prozess umzukehren und Ammoniak aus diesen zwei Elementen synthetisch herzustellen. Die Ausbeute war jedoch so gering, dass er zunächst die Versuche einstellte. Erst 1908, mit besserem Verständnis der thermodynamischen Grundlagen, nahm er diese Arbeit wieder auf und variierte Temperatur und Druck in dem Reaktionsbehälter. Unter Verwendung eines Osmium-Katalysators bei einem Druck von 175 bis 200 Atmosphären und einer Temperatur von 550 bis 600 °C wurden ca. 6 % des Gasgemischs zu Ammoniak umgewandelt. Nach starker Abkühlung wurde das verflüssigte Ammoniak entfernt, während das nicht umgewandelte Wasserstoff-Stickstoffgemisch dem Reaktor wieder zugeführt wurde und erneut reagieren konnte. Dieses Verfahren wurde 1908 patentiert.

Zur Weiterentwicklung des Verfahrens nahm Haber Kontakt zur Badischen Anilin- und Sodafabrik (BASF) in Ludwigshafen am Rhein auf. BASF betraute Carl Bosch, einen jungen Chemiker mit Erfahrung auf dem Gebiet der Metallurgie, mit diesem Projekt. Seine Aufgabe bestand darin, die von Haber im Labormaßstab verwendete Apparatur zu einer Technikanlage und letztlich zu einer Produktionsanlage weiterzuentwickeln. Gleichzeitig begann Alwin Mittasch Tausende verschiedener Katalysatoren zu testen, mit dem Ziel die Umsatzrate zu verbessern.



Abb. 23: Fritz Haber

Als Bosch versuchte, einen größeren Kontaktofen zu bauen, zerbarst nach wenigen Betriebsstunden selbst das stärkste Rohr, das die deutsche Stahlindustrie für ihn bauen konnte. Er entdeckte, dass Wasserstoffmoleküle in den Stahl eingedrungen waren und dessen Struktur zerstört hatten, so dass er brüchig geworden war.



Abb. 24: Die Laborapparatur, mit der Haber 1908 erstmals Ammoniak erzeugte.

Bosch schien vor einem unlösbaren Problem zu stehen, bis ihm die Idee kam, ein doppelwandiges Reaktionsrohr zu verwenden. Dieses bestand aus einem Weicheisenrohr im Inneren, dem der Wasserstoff nichts anhaben konnte, und einem äußeren Stahlmantel mit kleinen Löchern, durch die eindringender Wasserstoff leicht entweichen konnte. Die erste Versuchsanlage erzeugte 1913 rund 0,4 t Ammoniak am Tag, und noch im selben Jahr wurde in Oppau bei Ludwigshafen/Rh. die erste Produktionsanlage mit einer Jahreskapazität von 7 200 t N in Betrieb genommen. Diese Kapazität wurde dann laufend erhöht.

Eine zweite Produktionsanlage mit einer Kapazität von 36 000 t N pro Jahr nahm 1917 in Leuna bei Halle/S. den Betrieb auf, wo Braunkohle zur Energieerzeugung zur Verfügung stand. Noch während des Baus beschloss man, die Kapazität auf jährlich 130 000 t N zu erhöhen. Da die Anlage aus mehreren parallel laufenden Produktionssträngen bestand, war eine solche Erweiterung leicht möglich. Erst ab 1960 gelang es, die benötigten Anlagenteile in der Größe herzustellen, wie sie für den Bau einer großen Fabrik mit nur einem Produktionsstrang erforderlich waren. In den 70er Jahren waren dann Anlagen mit Tageskapazitäten von 1 000 bis 1 500 t NH₃ die Norm, während heute bereits solche mit mehr als 3 000 t NH₃ gebaut werden.

Jahr	t NH ₃ pro Tag
1913	3–4
1915	85
1955	200
1970	1 200
1990	2 000
2005	3 300

Tab. 2: Typische Kapazität eines Ammoniakreaktors

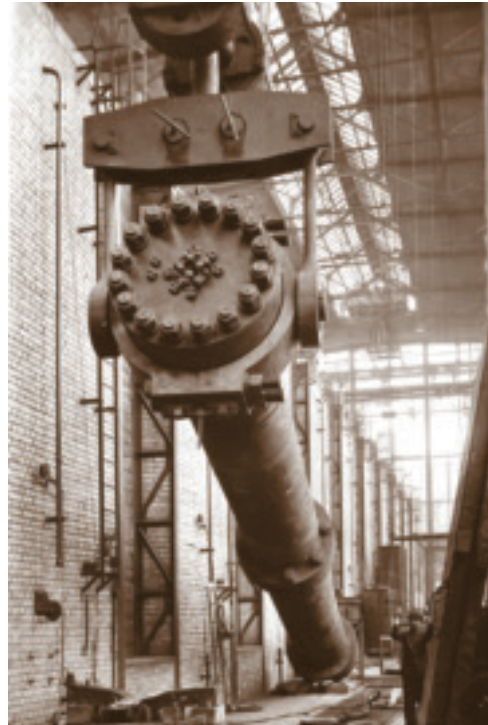


Abb. 25: Einbau eines Ammoniakreaktors im BASF-Werk Oppau, 1920.

Weiterentwicklung des Haber-Bosch-Prozesses

Technischer Fortschritt:

- Wechsel vom absätzigen zum kontinuierlichen Verfahren
- Prozesssteuerung
- Wechsel von mehreren parallelen Produktionssträngen zu einem einzelnen
- Verbesserte Katalysatoren (Zusammensetzung, Form, Menge)
- Verbesserte Energieausnutzung (Nutzung von Abwärme, Optimierung von Temperatur und Druck)

Rohstoff:

- Kohle
- Gas (Erdgas, Raffineriegas)
- Erdöl

Jahr	MJ/kg NH ₃
1913	ca. 100
1935	85
1955	50-55
1963	45
1970	35
2004	27

Tab. 3: Energieverbrauch in der Ammoniakproduktion (Haber-Bosch-Verfahren), (Appl, 1997; Jenssen, 2003).

Im Laufe der Jahre wurden die technische Ausstattung, die Energieausnutzung und der verwendete Katalysator entscheidend verbessert. Stickstoff wurde stets aus der Luft entnommen, jedoch wechselte mit der Zeit die Quelle für den benötigten Wasserstoff. Bei Einführung des Verfahrens wurde Kohle als Ausgangsstoff für die Erzeugung von Wasser-gas benutzt, indem man glühende Kohlen mit Wasserdampf reagieren ließ. Heute jedoch sind Kohlenwasserstoffe die bevorzugten Rohstoffe, wie z. B. Erdöl und Erdgas.

Die benötigte Energiemenge ist von ca. 100 MJ/kg NH₃ im Jahre 1913 auf heute 27 MJ/kg NH₃ gesunken, was nahezu dem theoretischen Minimalbedarf von 25 MJ/kg NH₃ entspricht.

Das zunehmende technische und chemische Wissen ermöglichte diese fortlaufende Steigerung der Effizienz des Verfahrens. Heute werden 99 % des industriell gebundenen Stickstoffs unter Verwendung des Haber-Bosch-Prozesses erzeugt. Beiden Erfindern dieses Verfahrens wurde der Nobelpreis verliehen: Haber 1918 und Bosch 1931.

Erdgas	71,1 %
Erdöl, LPG*, Raffineriegas	5,6 %
Schweröl, Altöl	3,7 %
Koks, Kohle, Kokereigas	19,0 %
Sonstige	0,6 %

* Liquified Petrol Gas

Tab. 4: Aufteilung der weltweiten Ammoniak-Produktion nach Rohstoffen.

Dünger-jahr	Chile-salpeter	Guano	Ammoniumsulfat aus Kokereien	Kalkstickstoff	Lichtbogen-nitrat	Ammoniak-synthese	Gesamt
1850	5	-	-	0	0	0	5
1860	10	70	-	0	0	0	80
1870	30	70	-	0	0	0	100
1880	50	30	-	0	0	0	80
1890	130	20	-	0	0	0	150
1900	220	20	120	0	0	0	360
1910	360	10	230	10	-	-	610
1920	410	10	290	70	20	150	950
1930	510	10	425	255	20	930	2150
1940	200	10	450	290	-	2150	3100
1950	270	-	500	310	-	3700	4780
1960	200	-	950	300	-	9540	10990
1970	120	-	950	300	-	30230	31600
1980	90	-	970	250	-	59290	60600
1990	120	-	550	110	-	76320	77100
2000	120	-	370	80	-	85130	85700

Tab. 5: Nach Produktionsverfahren aufgeteilte weltweite Stickstofferzeugung (in 1000 t N) (Weiterer als Nebenprodukt anfallender Stickstoff, der ursprünglich mit dem Haber-Bosch-Verfahren erzeugt wurde, ist unter „Synthetisches Ammoniak“ mit erfasst) (Smil, 2001).

Organische Düngerquellen

Stallmist und Gülle aus der Tierhaltung sind die wichtigsten organischen Dünger, doch von wechselndem Düngewert. Ein wesentlicher Teil dieser Nährstoffe zirkuliert innerhalb der Landwirtschaft. Die stärkste Wirkung auf das Pflanzenwachstum haben sie im Jahr ihrer Anwendung, aber über mehrere Anbauperioden ist ihr Effekt messbar. In einem landwirtschaftlichen Betrieb wird zuerst die verfügbare Menge an Stallmist und Gülle den Feldern zugeordnet, bevor der Einsatz anderer Dünger erwogen wird. Nur wenn der Nährstoffbedarf der Pflanzen nicht mit den anfallenden organischen Düngern gedeckt werden kann, werden zum Ausgleich der Nährstoffbilanz zusätzlich Mineraldünger eingesetzt.

Zusätzlich zu den wirtschaftseigenen Düngern und Ernterückständen werden heute auch organische Abfallstoffe in der Landwirtschaft als Nährstoffquellen eingesetzt. Diese umfassen eine Vielzahl so genannter Bioabfälle einschließlich kommunaler Abfälle (z. B. Klärschlamm, Bioabfall und Grünkompost) sowie Rückstände aus der Industrie (z. B. Rückstände aus der Nahrungsmittelverarbeitung, Fleischnochenmehl, Klärschlamm aus Papierfabriken). Zusammenfassend kann man diese Herkünfte als „Abfalldünger“ bezeichnen. Damit wird auch ihre nicht-landwirtschaftliche Herkunft gekennzeichnet.



Abb. 26: Ausbringen von Stallmist.

	Stickstoff [in 1000 t N/Jahr]
Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft	
- Rinder + Schwein ¹	1101
- Geflügel ¹	ca. 100
Klärschlamm ¹	30
Kompost ²	ca. 17

¹Faustzahlen für die Landwirtschaft (KTBL, 2005)
²geschätzt

Tab. 6: Stickstoffmenge in Wirtschafts- und Abfalldüngern, die im Jahr 2003 in Deutschland in der Landwirtschaft eingesetzt wurden.

Wegen ihres relativ niedrigen Nährstoffgehalts werden Klärschlamm und andere „Abfalldünger“ vor allem zur Erhöhung des Gehalts an organischer Substanz und zur Verbesserung der Bodenstruktur eingesetzt. Bio-Kompost ist ein organischer Hilfsstoff, der aufgrund seines hohen Gehalts an stabiler organischer Substanz zur Bodenverbesserung beitragen kann, wenngleich er nur eine geringe Düngewirkung besitzt.

Diese externen organischen Produkte werden von der Landwirtschaft nicht wirklich benötigt. Der Gehalt eines Bodens an organischer Substanz lässt sich bei guter landwirtschaftlicher Praxis auch ohne solche „Abfalldünger“ aufrechterhalten. Sie leisten nur einen relativ geringen Beitrag zur Erhaltung der organischen Substanz des Bodens, können aber Nachteile mit sich bringen, wie etwa durch Verunreinigung mit Schadstoffen. Zudem liegt der Energieverbrauch, der zu ihrer Verteilung und Einarbeitung notwendig ist, relativ hoch im Vergleich zu ihrem landwirtschaftlichen Nutzen.

Die präzise Anwendung von organischen Abfallstoffen, z. B. die gleichmäßige Verteilung auf dem Acker und Einhaltung der geplanten Aufwandmenge, ist nicht einfach. Zudem lässt sich die Freisetzung der Nährstoffe nur schlecht abschätzen, vorhersagen und kontrollieren. Alles dies ist jedoch im Rahmen der guten fachlichen Praxis der Düngung gefordert.

Gülle, Mist und Jauche werden nahezu vollständig auf landwirtschaftlich genutzten Flächen ausgebracht. Im Jahr 2004 belief sich in Deutschland der geschätzte Gesamtanfall (Rind, Schwein, Geflügel) auf rund 200 Mio. t (KTBL, 2005), über 70 % davon in Form von Gülle.

Mehr als 90 % der Stickstoffzufuhr aus organischem Material, das auf der Nutzfläche ausgebracht wird, entfällt auf Wirtschaftsdünger. Der Rest sind Klärschlamm, Kompost und Industrieabfälle.



Abb. 27: Stallmist enthält die Nährstoffe aus den unverdaulichen Teilen des Viehfutters und aus Stroh, jedoch gehen 20 bis 30 % des darin enthaltenen Stickstoffs während Umsetzung und Lagerung verloren.

Wirtschaftseigene Dünger aus der Viehhaltung

Der Viehbestand in Deutschland liegt zwischen 14 und 15 Mio. Großvieheinheiten (GV), der größte Teil davon sind Rinder. Die pro Jahr anfallenden tierischen Exkremente enthalten zusammen etwa 1,2 bis 1,4 Mio. t Stickstoff.

Unter dem Begriff „Dünger aus der Tierhaltung“ werden sehr unterschiedliche Nährstoffquellen zusammengefasst, die verschiedene physikalische Eigenschaften und Nährstoffgehalte aufweisen. Zudem hängen die Nährstoffgehalte dieser Dünger von Tierart und Haltungsform ab und schwanken von Region zu Region.

	Großvieheinheiten (GV) [in 1000 GV]
Gesamt	14 524
Davon:	
Rinder	10 404
Schweine	2 919
Schafe	227
Geflügel	488

Tab. 8: Viehbestand in Deutschland in 2001.

Der im Stallmist gebundene Stickstoff muss im Allgemeinen erst durch biochemische Prozesse (Mineralisation und Nitrifikation) umgewandelt werden, bevor er für die Ernährung der Pflanzen zur Verfügung steht (siehe Seite 14). Der organische Stickstoff, der erst später im Jahr und nach der Phase der aktiven Nährstoffaufnahme der Pflanzen mineralisiert wird, unterliegt der Gefahr, über Winter aus dem Boden ausgewaschen und zu einer Belastung des Grundwassers zu werden (siehe Seite 39 bis 40).

Da der größte Teil des mineralischen Stickstoffs in der Gülle als NH_4^+ vorliegt, besteht die Gefahr, dass er gasförmig als Ammoniak verloren geht (siehe Seite 42). Dies ist einer der Gründe, warum sich Stickstoff aus organischen Düngern nicht so effizient anwenden lässt wie Mineraldüngerstickstoff. Der tatsächlich von den Pflanzen aufgenommene Anteil des Stickstoffs aus Kot und Harn ist vergleichsweise gering.

Art	Trockensubstanz %	Mengeneinheit	*Stickstoffgehalt je Mengeneinheit
Rindermist	25	kg/dt	0,71
Schweinemist	25	kg/dt	0,67
Hühnermist	48	kg/dt	2,69
Hühnertrockenkot	50	kg/dt	2,86
Pferdemist	25	kg/dt	0,41
Schafmist	25	kg/dt	1,56
Getreidestroh	86	kg/dt	0,50
Rindergülle	10	kg/m ³	5,28
Schweinegülle	10	kg/m ³	6,21
Geflügelgülle	10	kg/m ³	5,62
Rinderjauche	2	kg/m ³	3,60
Schweinejauche	2	kg/m ³	4,50

* Bei Gülle und Jauche 10 %, bei Stallmist 25 % Lagerungsverlust berücksichtigt. Übrige organische Düngestoffe nach Lagerung.

Tab. 7: Mittlere Stickstoffgehalte in der Frischmasse von Wirtschaftsdüngern (Quelle: TLL Jena).

Klärschlamm und Bioabfälle

Im Jahr 2003 fielen im Bundesdurchschnitt bei der Abwasserbehandlung 2,2 Mio. t Klärschlamm als Trockensubstanz an. Davon wurden rund 30 % auf landwirtschaftlichen Flächen entsorgt, der Rest überwiegend verbrannt und in der Rekultivierung eingesetzt. Die Deponierung war von untergeordneter Bedeutung (3 %). Seit dem 1. Juni 2005 dürfen in Deutschland Klärschlämme ohne thermische Behandlung nicht mehr auf Deponien abgelagert werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der direkte Einsatz von Klärschlamm in der Landwirtschaft zurückgehen wird. Ausschlaggebend hierfür sind Aspekte des vorsorgenden Bodenschutzes.

Neben Klärschlamm werden auch kompostierte Bioabfälle in der Landwirtschaft entsorgt. In Deutschland fallen 7 bis 8 Mio. t Bioabfälle (aus der Biotonne, biologisch abbaubare Garten- und Parkabfälle, Marktabfälle) an, die in Kompostierungs- und Vergärungsanlagen behandelt werden. Das Kompostaufkommen lag im Jahre 2002 bei rund 4,6 Mio. t Frischmasse (ca. 3 Mio. t Trockenmasse). Etwa 40 % davon gelangten auf landwirtschaftliche Flächen.

Die Ausbringung von Klärschlamm und Bioabfällen auf Böden kann auch unerwünschte Wirkungen auf die Umwelt haben. Diese ergeben sich teils aus einer unsachgemäßen Anwendung (z. B. zu hohe Aufwandsmengen, falscher Anwendungszeitpunkt), teils aus dem Gehalt an Schadstoffen, wie Schwermetallen (Cu, Zn, Cd und Pb), organischen Schadstoffen (z. B. Dioxine, Furane) oder Krankheitserregern (z. B. Salmonellen, Kolibakterien).

Ein großer Teil der organischen Substanz im Klärschlamm trägt nicht zur Strukturverbesserung bei, sondern wird im Boden innerhalb weniger Wochen mineralisiert. Daher sollte Klärschlamm erst kurz vor der Saat ausgebracht werden, damit die Kulturpflanzen den freiwerdenden Stickstoff verwerten können. Dies ist jedoch oft schwierig, da er vor der Saat erst noch in den Boden eingearbeitet werden muss, um den direkten Kontakt mit den Pflanzen zu vermeiden.

Organischer Abfalldünger darf aus Hygienegründen zu einigen Nahrungspflanzen, wie z. B. Gemüse und auf Grünland nicht ausgebracht werden.



Abb. 28: Ausbringen von Gülle auf Grünland.

3 Mineralische Stickstoffdünger

Tendenzen in Produktion und Verbrauch

Um den Bedarf an Nahrungsmitteln für eine wachsende Weltbevölkerung decken zu können, ist ein steigender Einsatz an Stickstoffdüngemitteln erforderlich. Dieser lag im Jahre 2004 bei 86,0 Mio. t Stickstoff – das ist etwa fünfmal so viel wie 40 Jahre zuvor.

Nach jahrzehntelangem Aufwärtstrend war der weltweite Verbrauch an Stickstoffdüngern in den 90er Jahren zeitweise rückläufig (Abbildung 29). Dieser Nachfragerückgang hing mit dem Übergang Osteuropas zur Marktwirtschaft und den damit veränderten Bedingungen für die dortige Landwirtschaft zusammen. Demgegenüber ist der Verbrauchsanstieg in Asien, Südamerika und zum Teil auch in Afrika nach wie vor ungebrochen. In Zukunft wird der weltweite Bedarf an Stickstoffdüngemitteln weiter zunehmen.

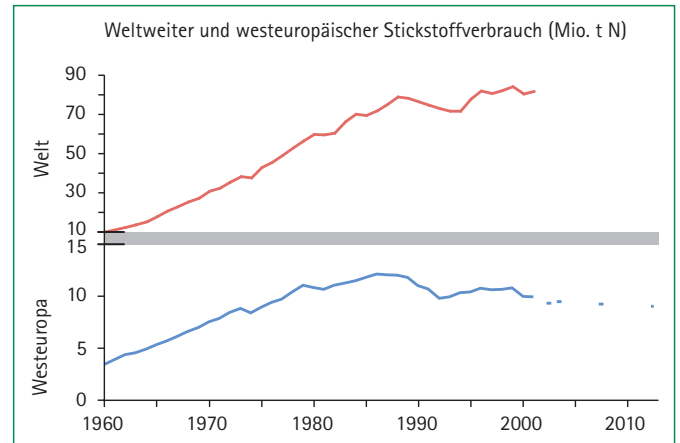


Abb. 29: Weltweiter und westeuropäischer (EU-15 + Schweiz und Norwegen) Verbrauch an mineralischem Stickstoff, Mio. t N.



Abb. 30: Eine günstige Erdgasversorgung und leistungsfähige Verkehrsverbindungen sind wichtige Standortvoraussetzungen bei der Produktion von Stickstoffdüngemitteln.

In Westeuropa ist die Entwicklung des Stickstoffverbrauchs typisch für eine industrialisierte Region. Er stieg von 1950 bis in die frühen 80er Jahre mit der Ausweitung der landwirtschaftlichen Erzeugung deutlich an und erreichte sein Maximum 1986. Die erste und zweite Ölkrise 1973 und 1982 führten zu leichten Einbrüchen bei der Nachfrage.

Seit Mitte der 80er Jahre begann der Verbrauch von Stickstoffdüngern in Westeuropa zurückzugehen. Diese Entwicklung setzte sich in den frühen 90er Jahren fort als Folge der Reform der gemeinsamen europäischen Agrarpolitik und der zunehmenden Umweltdiskussionen. Ein wichtiger Faktor war die Einführung der Flächenstilllegung im Rahmen der EU-Agrarpolitik.

Laut EFMA (European Fertilizer Manufacturers Association) wird der Stickstoffverbrauch in Westeuropa im Zeitraum 2004/2005 bis 2014/2015 (Düngejahre) um weitere 6,4 % zurückgehen.

In Deutschland hat sich der Verbrauch an Stickstoffdüngern in den letzten Jahren stabilisiert. Im Düngejahr 2004/2005 lag er bei 1,8 Mio. t Stickstoff. Die europäische Agrarreform Anfang der 90er Jahre sowie der politische Umbruch in der ehemaligen DDR hatten einen negativen Einfluss auf die Nachfrage.

Produktion

In Europa (einschl. Russland, Belarus, Ukraine) werden jährlich 20 bis 21 Mio. t Stickstoff produziert. Das entspricht etwa 23 % der Weltproduktion. Damit ist der Kontinent die Nummer 2, nach Asien mit 50 % und vor den USA mit 14 % der Weltproduktion. Alleine in Westeuropa wurden im Jahre 2003 7,5 Mio. t N erzeugt, davon kamen 1,2 Mio. t N aus Deutschland.

Die Stickstoffproduktion hängt stark von der Energieversorgung ab. Erdgas ist der wichtigste Rohstoff zur Erzeugung von Ammoniak, aus dem wiederum 97 % aller Stickstoffdünger hergestellt werden. Weltweit findet daher ein Ausbau der Produktionskapazitäten in den Regionen statt, in denen ausreichend preiswertes Erdgas zur Verfügung steht (Golfregion, Schwarzes Meer, Karibik, Zentralasien). Zu den Wachstumsregionen gehören aber auch solche, die aufgrund der hohen Bevölkerungszahl einen hohen Bedarf an Nahrungsmitteln und damit auch an Düngemitteln haben (China, Indien, Südamerika).

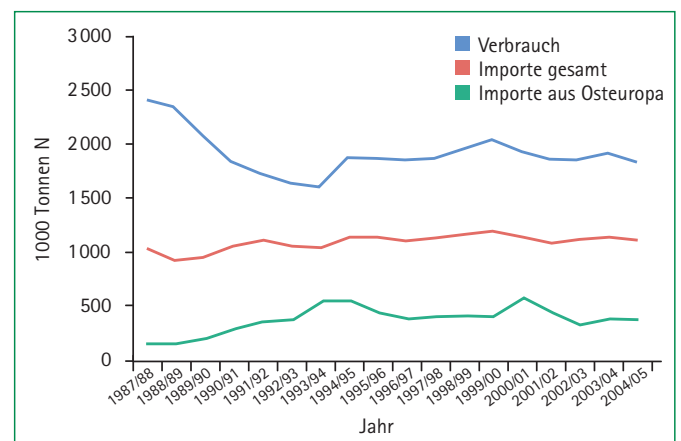


Abb. 31: Stickstoffverbrauch Deutschlands sowie Gesamtimporte und Importe aus Osteuropa (einschl. frühere Sowjetunion).



Abb. 32: Die Stickstoffdüngung in der Landwirtschaft konzentriert sich auf wenige Wochen im Frühjahr und im Spätsommer/Herbst. Um den Bedarf in diesem Zeitraum decken zu können, müssen große Düngermengen eingelagert werden.

In Europa findet dagegen ein harter Wettbewerb statt. Dieser hat dazu geführt, dass in Westeuropa seit 1980 Produktionskapazitäten abgebaut wurden, alleine in Deutschland waren es seitdem etwa 70 %. Von den ehemals 29 deutschen Produktionsstätten existieren nur noch 9. Der Abbau von Überkapazitäten erfolgte nicht nur wegen des zurückgegangenen Stickstoffverbrauchs, sondern auch in Anpassung an die zunehmenden Importe aus Osteuropa und Staaten der ehemaligen Sowjetunion. Dort wurden mit Zugang zu preiswertem, staatlich subventioniertem Erdgas in den 70er und 80er Jahren große Produktionskapazitäten für Stickstoffdünger geschaffen, denen insbesondere nach den wirtschaftlichen Veränderungen der 90er Jahre eine geringe inländische Nachfrage gegenübersteht. Von den 13 bis 14 Mio. t Stickstoff, die in diesen Ländern derzeit hergestellt werden, gehen etwa zwei Drittel in den Export.

Die Zunahme der Ostimporte hat dazu geführt, dass in Westeuropa insgesamt, wie in Deutschland die Handelsbilanz für Stickstoffdünger negativ geworden ist, d. h. es werden mehr Dünger importiert als exportiert. Im Düngjahr 2003/2004 standen in Deutschland einem Exportvolumen von 0,43 Mio. t eine Importmenge von 1,09 Mio. t gegenüber. 0,43 Mio. t davon kamen aus Osteuropa.

Die deutschen Düngemittelwerke gehören zu den modernsten der Welt; das gilt insbesondere im Hinblick auf Qualitätsmanagement, Umweltschutz und Arbeitssicherheit. Freiwillige Selbstverpflichtungen und Qualitätskontrollen gehen dabei zum Teil weit über die gesetzlichen Anforderungen hinaus.

Eine international führende Stellung nimmt die deutsche Düngemittelindustrie im Bereich der Anwendungs- und Umweltforschung sowie in der Entwicklung neuer und innovativer Düngemittel ein. Durch wissenschaftlich begründete Empfehlungen für Handel und Landwirtschaft unterstützt sie den umweltschonenden und nachhaltigen Einsatz von Mineraldüngern.

Stickstoffdüngertypen

Landwirten in Deutschland stand stets die gesamte Palette der unterschiedlichen Stickstoffdüngerarten zur Verfügung. Die heutige Produktvielfalt ist das Ergebnis von Forschung und praktischer Erfahrung, die beim Einsatz verschiedener Stickstoffquellen zu den unterschiedlichen Kulturen und Böden des europäischen Klimaraums gemacht wurde. In Deutschland wird eine breite, relativ ausgewogene Stickstoffdüngerpalette verwendet.

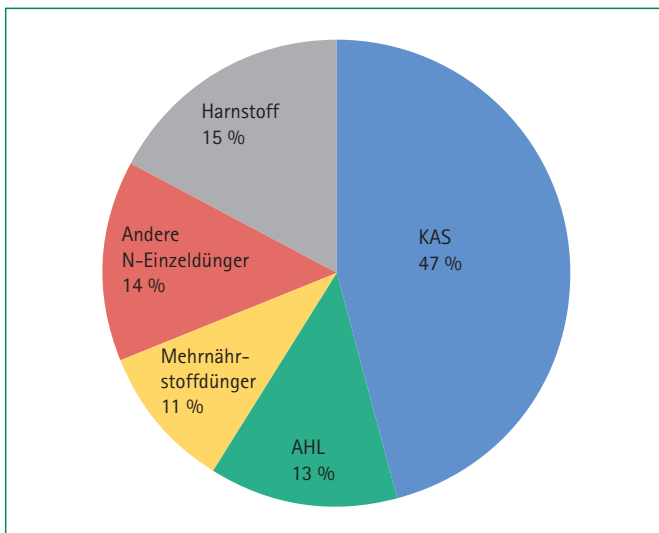


Abb. 33: Gegenwärtiger Anteil verschiedener Düngersorten am Verbrauch von mineralischem Stickstoff in Deutschland (Wirtschaftsjahr 2004/2005).

Der weltweite Anstieg des Stickstoffverbrauchs seit etwa 1970 aber ist vor allem auf den gestiegenen Harnstoffverbrauch zurückzuführen. In Entwicklungsländern kann die höhere Stickstoffkonzentration im Harnstoff zu reduzierten Kosten für Transport, Lagerung und Ausbringung pro Nährstoffeinheit führen. Allerdings ist der im Vergleich zu anderen Stickstoffdüngern scheinbar höhere Stickstoffgehalt bei Berechnung auf Volumensbasis wegen der relativ geringen Dichte des Harnstoffs weit weniger groß (Tabelle 9).

Produkt	Dichte (kg / l)	N-Gehalt (kg N / kg)	Transportvolumen (m ³ / t N)
Harnstoff, geprillt	0,73	0,46	2,9
Harnstoff, granuliert	0,77	0,46	3,1
KAS, geprillt	1,05	0,27	3,5
KAS, granuliert	1,05	0,27	3,5

Tab. 9: Vergleich der Dichte und des Stickstoffgehalts von KAS und Harnstoff.

Stickstoff kann entweder allein als Einzeldünger oder zusammen mit Phosphat und/oder Kali als sogenannter Mehrnährstoffdünger angewendet werden. In Deutschland werden etwa 89 % des Stickstoffs über Einzeldünger ausgebracht und 11 % über Mehrnährstoffdünger, die Stickstoff in unterschiedlicher Konzentration enthalten (Abbildung 33).

Die wichtigsten in Deutschland eingesetzten Stickstoffeinzeldünger

- **Kalkammonsalpeter**

(KAS) ist ein Gemisch aus Ammoniumnitrat und mindestens 20 % Calcium- oder Calcium/Magnesiumkarbonat; sein Stickstoffgehalt beträgt in der Regel 27 % N; mit einem Anteil von 47 % ist es der bedeutendste Stickstoffeinzeldünger in Deutschland. Der Stickstoff liegt zur Hälfte als sofort pflanzenverfügbares Nitrat, zur Hälfte als Ammonium vor. Dünger auf Basis von Ammoniumnitrat sind für die meisten europäischen Kulturen und Standorte bestens geeignet.

- **Harnstoff**

ist der feste Einzeldünger mit dem höchsten Stickstoffgehalt (46 Gew.-% N). Speziell bei niedrigen Temperaturen wird dieser Stickstoff etwas später pflanzenverfügbar.

- **Flüssige Stickstoffdünger**

stellen 13 % des in Deutschland verbrauchten Stickstoffs. Am gebräuchlichsten ist eine Lösung von Harnstoff und Ammoniumnitrat zu gleichen Teilen in Wasser, wodurch eine klare, flüssige Düngerlösung mit 28 bis 32 % N entsteht (Ammoniumnitrat-Harnstofflösung = AHL). AHL bietet als Flüssigkeit den Vorteil eines geringen manuellen Aufwandes, erfordert jedoch spezielle Lagermöglichkeit und Ausbringungstechnik.

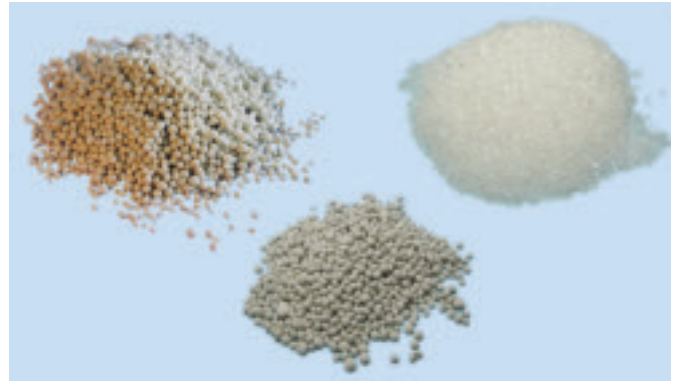


Abb. 34: Art und Beschaffenheit der Düngerkörner ist abhängig vom Produktionsprozess: Granulierter Kalkammonsalpeter, gebrilltes NPK und kristallines Ammoniumsulfat erfordern eine unterschiedliche Einstellung des Düngerstreuers.



Abb. 35: Mineraldünger müssen rieselfähig sein, um leichte Handhabung und ein gleichmäßiges Streubild zu gewährleisten.

Schwefelhaltige Stickstoffeinzeldünger:

- **Ammoniumnitrat mit Schwefel**
ist eine Kombination aus Ammoniumnitrat und Calciumsulfat mit einem typischen Gehalt von 24 % N (12 % als Nitrat, 12 % als Ammonium) und zusätzlich 6 % Schwefel.
- **Ammoniumsulfat**
hat einen relativ niedrigen Stickstoffgehalt (21 % N, ausschließlich als Ammonium). Zusätzlich enthält es jedoch als weiteren essentiellen Pflanzennährstoff Schwefel (24 % S),
- **Ammoniumsulfatsalpeter**
ist eine Kombination aus Ammoniumsulfat und Ammoniumnitrat mit einem typischen Gehalt von 26 % N (7,5 % als Nitrat und 18,5 % als Ammonium) und zusätzlich 13 % S.
- **Ammoniumsulfat-Harnstoff**
ist eine granuliert Düngekomination mit einem Mindestgehalt von 30 % Stickstoff und 5 % Schwefel.
- **Harnstoff mit Schwefel**
ist eine Kombination aus Harnstoff und elementarem Schwefel mit einem Mindestgehalt von 30 % Stickstoff und 5 % Schwefel. Die Mischung von Carbamid und elementarem Schwefel ermöglicht Mischungen mit hohem N- und S-Gehalt (z. B. 42 % N, 9 % S).

Andere Stickstoffeinzeldünger:

- **Calciumnitrat**
(Kalksalpeter mit 14 % N als Nitrat und 19 % wasserlöslichem Calcium) ist wegen seiner schnellen Wirkung speziell für rasch wachsendes Gemüse und Obstbäume geeignet.
- **Natriumnitrat und Chilesalpeter**
werden in geringem Umfang bei Spezialkulturen eingesetzt.
- **Stickstoffmagnesia:**
Stickstoff-Magnesiumdünger enthält mind. 19 % N und 5 % MgO. Wird Magnesiumsulfat bei der Herstellung verwendet, ist zusätzlich Schwefel enthalten.
- **Kalkstickstoff**
(18 bis 21 % N, 50 bis 60 % CaO), ist ein langsam wirkender Stickstoffdünger. Nach dem Ausstreuen entfaltet er kurzfristig eine Wirkung gegen keimende Unkräuter und bodenbürtige Pflanzenkrankheiten. Sein Haupteinsatzgebiet liegt im Gemüsebau zur Förderung der Bodenhygiene sowie im Grünland zur Bekämpfung von Weideparasiten.

	N-Gehalt (Gew.-%)
Stickstoffeinzeldünger	
Harnstoff	46
Kalkammonsalpeter	27
AHL	28-32
Ammoniumsulfat	21
Ammoniumsulfatsalpeter	26
Ammoniumsulfat-Harnstoff	33-38
Andere N-S-Dünger	22-24
Sonstige Stickstoffeinzeldünger	15-22
Mehrnährstoffdünger	
NPK	5-24
NP (ohne DAP/MAP)	20-26
DAP/MAP	16-18 /11

Tab. 10: Stickstoffgehalt wichtiger Stickstoffdünger
(Düngerjahr 2004/2005)

Mehrnährstoffdünger

Dünger, die mehr als einen der Hauptnährstoffe Stickstoff (N), Phosphat (P_2O_5) und Kali (K_2O) enthalten, werden als Mehrnährstoffdünger bezeichnet. In Deutschland werden 10 % des Stickstoffs in Form solcher Dünger angewendet. Man unterscheidet hierbei zwei unterschiedliche Arten:

- **Mischdünger (Bulk Blends)**

werden durch mechanisches Mischen von zwei oder mehr granulierten Ausgangsdüngern hergestellt. In Mischdüngern guter Qualität sind die gemischten Teilchen hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften, wie z. B. der Größe, genau aufeinander abgestimmt. Passen die Bestandteile nicht exakt zusammen, so können sie sich während Umschlag, Transport und Ausbringung entmischen (Segregation), was zu ungleichmäßiger Verteilung der Nährstoffe auf dem Feld führt.

- **Volldünger**

mit zumindest zwei der Nährstoffe N, P_2O_5 und K_2O werden durch chemische Reaktionen der Rohstoffe in der flüssigen Maische erzeugt. Sie haben den Vorteil, dass in jedem Düngerkorn alle eingesetzten Nährstoffe im angegebenen Verhältnis enthalten sind.

Die meisten in Deutschland verwendeten Mehrnährstoffdünger sind chemisch homogene Volldünger. Ihre Düngerkörner haben ein ausgeglichenes Korngrößenspektrum und sind einheitlich zusammengesetzt, dementsprechend besteht keine Segregationsgefahr.



Abb. 37: Zusätzlich zu den Qualitätskontrollen bei den Produzenten wird die Qualität von Mineraldüngern durch staatliche Kontrollbehörden überprüft.

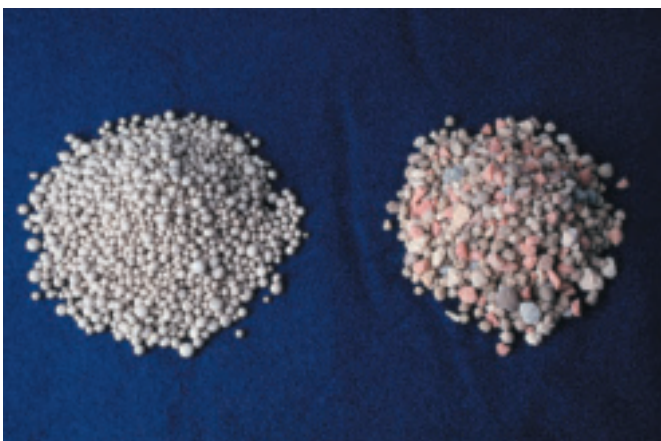


Abb. 36: Ein chemisch hergestellter homogener Volldünger (links) im Vergleich zu einem Mischdünger mit nicht angepassten Komponenten.

Spezialdünger

Unter bestimmten Witterungs- und Bodenbedingungen können Festlegung, Denitrifikation oder gasförmige Verluste die Wirksamkeit von Düngern einschränken. Die Düngemittelindustrie hat daher spezielle Düngemittel entwickelt, die davon weniger betroffen sind.



Abb. 38: Die Blattdüngung kann nicht den gesamten Stickstoffbedarf einer Kultur abdecken. In Zeiten des Spitzenbedarfs kann sie die Bodendüngung jedoch wirkungsvoll ergänzen.

Blattdünger

Von der wachsenden Pflanze kann Stickstoff auch über die Blätter aufgenommen werden. Die Blattdüngung wird häufig angewandt, um Festlegung oder Auswaschung des auf den Boden gedüngten Stickstoffs zu umgehen. Jedoch ist die Stickstoffmenge begrenzt, die über das Blatt appliziert werden kann. In der Praxis kann sie daher nur eine hochwirksame Ergänzung der Bodendüngung darstellen.

Langzeitdünger und umhüllte Dünger

Langzeitdünger und umhüllte Dünger geben die Nährstoffe erst verzögert und über einen längeren Zeitraum in einer für die Pflanzen verfügbaren Form an die Bodenlösung ab. Im Idealfall stimmt die Freisetzung mit dem Bedarf der Pflanzen überein. Bei Langzeitdüngern beruht die Verzögerung auf einer anfangs wasserunlöslichen Stickstoffkomponente. Bei einem umhüllten Dünger wird die kontrollierte Freisetzung erzielt, indem ein ursprünglich wasserlöslicher Dünger mit einer wenig durchlässigen Hüllsubstanz überzogen wird. Unter diese zwei Hauptgruppen fallen, je nach Produktionsweise:

• Langzeitdünger

Sie enthalten als Stickstoffform Harnstoffaldehyde (Harnstoffformaldehyd, Isobutyldendiharnstoff (IBDH), Crotonylidendiharnstoff (CDH)). Langzeitdünger werden vorrangig auf Grünflächen, in Baumschulen und im Gartenbau angewendet.

• Umhüllte Dünger:

Umhüllte Dünger geben die Nährstoffe über einen vorgegebenen Zeitraum (3, 6, 9 oder 12 Monate) langsam und gleichmäßig ab. Sie werden z. B. verwendet in Baumschulen bei Pflanzlochdüngung oder in Pflanzsubstraten.

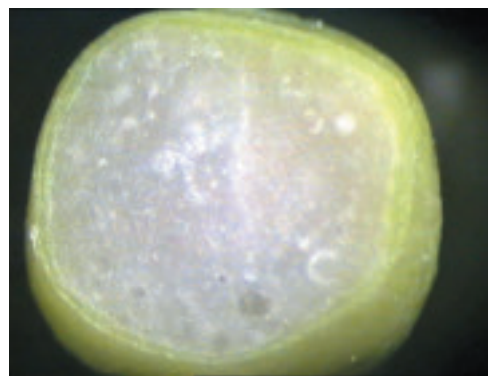


Abb. 39: Durch Umhüllung des Düngerkorns mit einer dünnen Polymerschicht kann die Freisetzung der Nährstoffe hinausgezögert werden.

Stabilisierte Dünger: Dünger mit Zusatz von Nitrifikationsinhibitoren

Nitrifikationsinhibitoren sind chemische Verbindungen, welche die bakterielle Oxidation (Nitrifikation) von Ammoniumstickstoff verzögern, indem sie die Enzymaktivität der Nitrosomonas-Bakterien im Boden hemmen. Auf diese Weise bleibt der gedüngte Stickstoff im Boden länger in der weniger beweglichen Ammoniumform erhalten und wird nicht so schnell in Nitrat umgewandelt. Dies verringert vorübergehend den Nitratgehalt im Boden und damit die Gefahr von Auswaschungsverlusten und N_2O -Bildung nach starken Niederschlägen. In Deutschland wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Nitrifikationshemmer zugelassen.

Die Preise für viele Spezialdünger sind deutlich höher als die für Standarddünger. Daher werden sie überwiegend zu hochwertigen Kulturen, bei speziellen Anbausystemen und im nicht-landwirtschaftlichen Sektor (Gartenbau, Baumschulen, Gewächshäuser u. a.) eingesetzt. 1995 wurden weltweit geschätzte 560 000 t dieser synthetischen langsam wirkenden Düngemittel verbraucht.

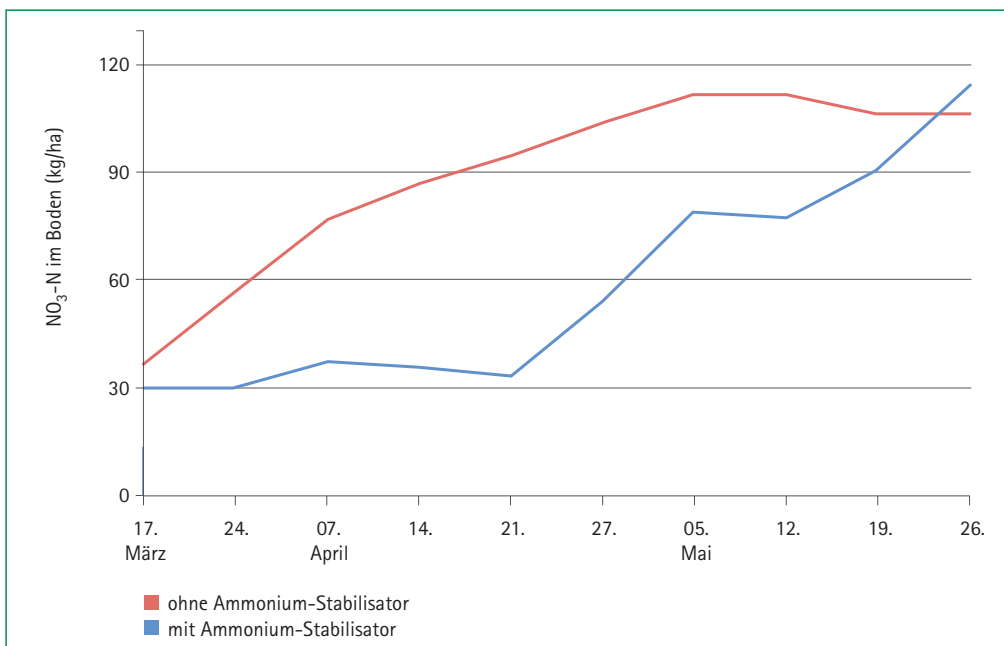


Abb. 40: Nitrifikationsinhibitoren verzögern die Nitratanlieferung und verringern vorübergehend die Nitratgehalte im Boden (Feldversuch mit 120 kg N/ha, Limburgerhof).

Düngemittelrechtliche Vorschriften

Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts gab es in Deutschland, wie auch in anderen europäischen Ländern, Vorschriften, die den Handel mit Düngemitteln regelten und den Verbraucher vor verfälschten Produkten schützen sollten. Die „Verordnung über künstliche Düngemittel“ vom August 1918 war die erste einheitliche Regelung für ganz Deutschland. Anlass dafür war die Hungersituation des Ersten Weltkrieges.

Im Laufe der weiteren Entwicklung nahmen die Anforderungen von Gesellschaft und Politik an die Herstellung und Anwendung von Düngemitteln im Hinblick auf Umwelt- und Gesundheitsschutz zu. Die Ziele, die anfangs ausschließlich auf die Ernährungssicherung ausgerichtet waren, wurden um Aspekte des Umwelt- und Verbraucherschutzes erweitert. Heute existieren in allen europäischen Ländern düngemittelrechtliche Vorschriften, die sich nicht nur – wie einst – auf die Regelung des Handels, sondern auch auf die Anwendung von Düngemitteln beziehen.

Die für Deutschland gültigen Vorschriften finden sich im Düngemittelgesetz, der Düngemittelverordnung und in der Verordnung über die Probenahmeverfahren und Analysemethoden. Das Düngemittelgesetz von 1977 wurde seit seinem Inkrafttreten mehrfach geändert, u. a. um damit Vorschriften über die Düngemittelanwendung in das deutsche Recht aufzunehmen. Auf dieser gesetzlichen Grundlage wurde 1996 die Düngeverordnung erlassen, in der die Düngung nach guter fachlicher Praxis geregelt wird.

Um Handelshemmnissen entgegenzuwirken, die aufgrund unterschiedlicher nationaler Bestimmungen entstehen, hat die Europäische Gemeinschaft in den 70er Jahren damit begonnen, ein einheitliches Düngemittelrecht zu schaffen. Anfangs noch als Richtlinie konzipiert, wird das Inverkehrbringen von Düngemitteln in der EU heute durch die EU-Verordnung (EG) 2003/2003 geregelt. Düngemittel, die dieser Vorschrift entsprechen, können als „EG-Düngemittel“ gekennzeichnet werden und sind damit in der gesamten EU frei verkehrsfähig.

Düngemittel, die nicht als EG-Düngemittel gekennzeichnet sind, dürfen in Deutschland nur dann in Verkehr gebracht werden, wenn

sie die Vorgaben der nationalen Düngemittelverordnung erfüllen. Diese und die EU-Verordnung definieren Düngemitteltypen, denen ein verkehrsfähiges Düngemittel entsprechen muss. Die Abgrenzung der Düngemitteltypen erfolgt u. a. anhand der Zusammensetzung, der Art der Herstellung sowie definierter Nährstoffgehalte, -formen und -löslichkeiten. Verkehrsfähige Düngemittel müssen nach festgelegten Kriterien gekennzeichnet werden. Von ihrer Anwendung dürfen keine schädlichen Auswirkungen auf Gesundheit und Umwelt ausgehen.

Die Einhaltung der düngemittelrechtlichen Vorschriften wird durch die Kontrollbehörden der Bundesländer überwacht. Aufgrund der besonderen Eigenschaften von ammonium-nitrathaltigen Düngemitteln kommen hier zusätzlich die Vorschriften der Gefahrstoffverordnung zur Anwendung; deren Überwachung obliegt der Gewerbeaufsicht.

Die Analyse von Düngemitteln zum Zwecke der Kennzeichnung und Kontrolle muss nach standardisierten Verfahren und Methoden erfolgen. Diese sind für EG-Düngemittel in der EU-Verordnung (EG) 2003/2003 festgelegt. Für Düngemittel, die der nationalen Düngemittelverordnung unterliegen, gilt die Probenahme- und Analyseverordnung.

NPK
20 + 7 + 10 (+ 2 + 4)

EG-DÜNGEMITTEL	
NPK (Mg, S) Dünger 20 + 7 + 10 (+ 2 + 4)	
20 % N	Gesamtstickstoff 7,1 % N Nitratstickstoff 12,9 % N Ammoniumstickstoff
7 % P₂O₅	neutral-ammoncitratlösliches und wasserlösliches Phosphat 4,9 % P ₂ O ₅ wasserlösliches Phosphat
10 % K₂O	wasserlösliches Kaliumoxid
2 % MgO	Gesamt-Magnesiumoxid
4 % S	wasserlöslicher Schwefel
Gewicht: _____ kg netto	
Hersteller: Muster GmbH & Co. KG · Musterstraße 12 · 34567 Mustersen	
Gefahrstoffverordnung: Düngemittel mit Ammoniumnitrat, Gruppe C	

Abb. 41: Wichtige Produkteigenschaften von Mineraldüngern gehen aus der Kennzeichnung hervor.

4 Stickstoff, Umwelt und Gesundheit

Die Verwendung von Mineraldüngern hat ermöglicht, die weltweite Nahrungsmittelproduktion während der letzten 50 Jahre zu verdoppeln. Dadurch hat sich aber auch die Stickstoffmenge im gesamten Kreislauf deutlich erhöht. Dies hat zum Teil zu erhöhtem Stickstofftransport in die Atmosphäre und in die Hydrosphäre geführt, woraus sich Auswirkungen auf die Umwelt ergeben können.

Nitratauswaschung

Der mineralische Bodenstickstoff liegt überwiegend als Nitrat (NO_3^-) und zu einem geringen Teil als Ammonium (NH_4^+) vor. Da Nitrat praktisch nicht von Bodenteilchen festgehalten wird, ist es leicht beweglich und läuft Gefahr, ausgewaschen zu werden. Während der Vegetationszeit der Kulturpflanzen ist das Risiko der Nitratauswaschung ins Grundwasser jedoch gering, da die wachsenden Pflanzen den größten Teil des im Boden verfügbaren Nitrats aufnehmen. Zudem ist in dieser Zeit die Wasserbewegung

wegen Evapotranspiration von Boden und Pflanzen fast ausschließlich nach oben zur Bodenoberfläche gerichtet, so dass keine Stickstoffverlagerung stattfinden kann. In der vegetationsfreien Zeit vom Spätherbst bis zum zeitigen Frühjahr jedoch, übersteigt die Niederschlagsmenge häufig die Evapotranspiration durch Boden und Pflanzen.

Die Nitratauswaschung beginnt in Deutschland normalerweise erst zu Winteranfang, wenn der Boden wieder wassergesättigt ist. Aller nicht von den Pflanzen aufgenommener Düngerstickstoff kann im Bodenprofil nach unten verlagert werden wie auch der Stickstoff, der außerhalb der Vegetationsperiode aus der organischen Masse des Bodens, aus Ernterückständen oder Mist durch Mineralisation freigesetzt wird.

Der Grad der Stickstoffausnutzung und die Menge der auf dem Feld verbleibenden Ernterückstände sind kulturartenspezifisch. Die Dauer von Perioden ohne eine Pflanzendecke auf dem Feld ist abhängig von der Fruchtfolge.

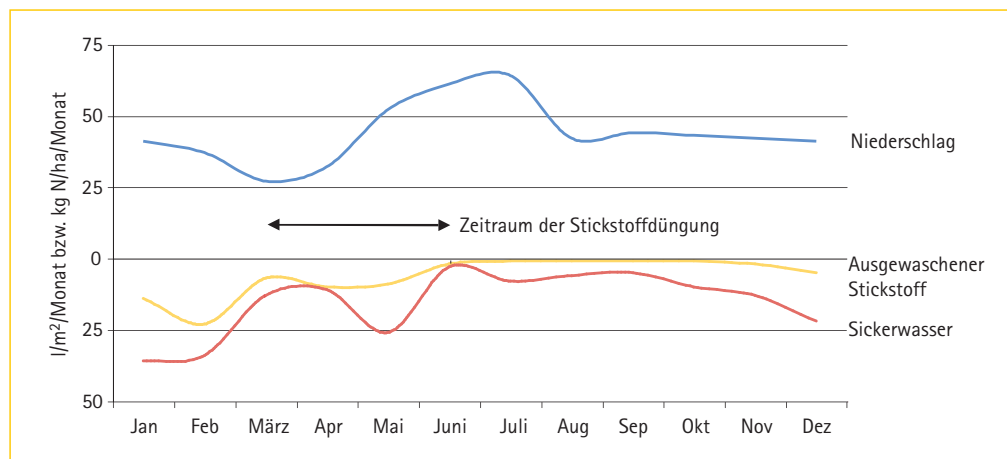


Abb. 42: Abhängigkeit zwischen Niederschlagshöhe, Dränwassermenge (Sickerwasser) und Menge des aus dem Boden ausgewaschenen Stickstoffs (Limburgerhof, Rheinland-Pfalz).

In Abbildung 43 werden die Nitratauswaschung und der Stickstoffentzug (d. h. der Stickstoff im Ernteprodukt) mit und ohne Stickstoffdüngung in verschiedenen Nutzungssystemen und unter Schwarzbrache dargestellt.

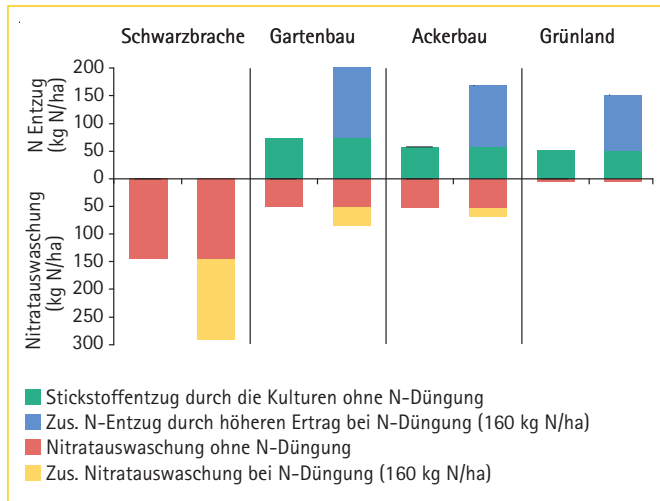


Abb. 43: Bei verschiedenen Nutzungssystemen entzogener und ausgewaschener Stickstoff.

Die Abbildung zeigt, dass das Anbausystem einen größeren Einfluss auf die Nitratauswaschung hat als die Stickstoffdüngung selbst. Unter Brache, wo kein Wasser und keine Nährstoffe durch einen Pflanzenbestand entzogen werden, ist die Auswaschung am größten – selbst in den ungedüngten Parzellen. In einer landwirtschaftlichen oder gartenbaulichen Fruchtfolge erhöht eine Düngung die Auswaschungsverluste.

Vom gedüngten Stickstoff (160 kg/ha N) wird der größte Teil mit den Ernteprodukten dem Boden wieder entzogen. Durch Ackerbau wird die Auswaschung daher nur leicht erhöht.

In gartenbaulichen Fruchtfolgen ist dieser Anstieg allerdings etwas größer. Dies ist auf die besonderen Bedingungen beim Anbau von Kurzzeitkulturen mit geringerer Durchwurzelung zurückzuführen (siehe Seite 53). Bei Dauergrünland unter Schnittnutzung ist die Nitratauswaschung selbst nach hohen Stickstoffgaben sehr gering.

Auf Ackerflächen kommt es darauf an, die Freisetzung von organisch gebundenem Stickstoff durch Mineralisation im Herbst zu vermeiden, z. B. durch spätes Pflügen oder Pflugverzicht. Eine lange Vegetationsbedeckung ist ein wirksamer Schutz vor Auswaschung und kann durch eine sorgfältige Planung der Fruchtfolge und durch den Anbau von Zwischenfrüchten erzielt werden. Von Pflanzen aufgenommener Stickstoff ist vor Auswaschung geschützt.



Abb. 44: Gründüngungspflanzen, wie hier Ackersenf, können die Nitratauswaschung über Winter deutlich verringern.

Mineraldüngung und Nitratauswaschung

Neben anderen Faktoren können Höhe und Zeitpunkt der Düngung die Nitratauswaschung beeinflussen. Die Auswaschung im Spätherbst und Winter erfolgt unabhängig von Art und Menge des während der Anbauperiode ausgebrachten Düngers, sofern die Düngergabe richtig bemessen und der Stickstoff über Frühjahr und Sommer von den Pflanzen verwertet wurde. Abbildung 45 zeigt, dass sich die Auswaschungsgefahr nur dann signifikant erhöht, wenn die gedüngte Stickstoffmenge den Bedarf der Kultur übersteigt. Bis hin zum Optimalertrag ist das Auswaschungsrisiko gleichbleibend niedrig, da nahezu der gesamte ausgebrachte Stickstoff von den Pflanzen verbraucht wird. Sobald jedoch zusätzlicher Stickstoff nicht mehr in Ertrag umgesetzt wird, steigt das Risiko der Nitratauswaschung deutlich an.

Faktoren mit Einfluss auf die Nitratauswaschung:

- Bodenart (Wasserhaltekapazität, Tongehalt)
- Wasserbilanz (Niederschlag/Bewässerung - Evapotranspiration)
- Durchwurzelungstiefe der Kultur
- Stickstoffbilanz (N-Zufuhr - N-Ausfuhr)
- Zeitlicher Verlauf und Menge von aus organischen Düngern (Mist, Klärschlamm, Pflanzenrückstände) mineralisiertem Stickstoff
- Pflanzendecke: Fruchtfolge, Untersaaten, Zwischenfruchtbau, Gründüngung (z. B. Senf, Phacelia)
- Kulturart (Anbauperiode, Erntezeitpunkt, Art/Menge der Rückstände)

Gasförmige Verluste

Emissionen von Stickstoffverbindungen in die Atmosphäre sind Teil des natürlichen Stickstoffkreislaufs. Aus Umweltsicht sind Ammoniak (NH_3) und Lachgas (N_2O) innerhalb des Stickstoffkreislaufs die bedeutsamsten Gase. Wenn Ammoniak auf den Boden gelangt, trägt es letztlich zu dessen Versauerung und zur möglichen Eutrophierung natürlicher Ökosysteme bei, während N_2O ein starkes Treibhausgas ist.

Ammoniakverflüchtigung

In Deutschland ist die Landwirtschaft mit einem Anteil von über 90 % an den Ammoniakemissionen beteiligt. 82 % der landwirtschaftlichen Emissionen stammen aus der Tierhaltung (Döhler et al., 2002). Die Verflüchtigung des Ammoniaks beginnt unmittelbar nach der Ausscheidung von Kot oder Urin durch das Vieh und setzt sich während der Lagerung und Ausbringung dieser organischen Dünger fort.

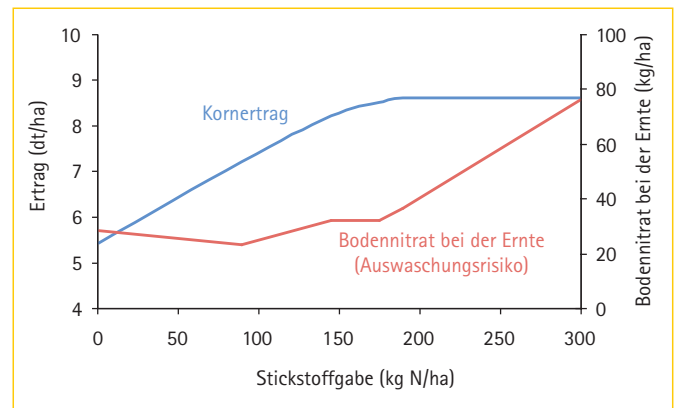


Abb. 45: Beziehung zwischen Stickstoffzufuhr, Ernteertrag und potenzieller Stickstoffauswaschung (Baumgärtel et al., 1989).

Mineraldünger tragen ca. 10 % zu der gesamten Ammoniakemission bei, wobei es Unterschiede zwischen den verschiedenen Düngertypen gibt. Harnstoff und einige Mineraldünger auf Ammoniumbasis besitzen unter bestimmten Bedingungen ein relativ hohes Potenzial zur Ammoniakemission. Die möglichen Ammoniakverluste schwanken stark, je nach Boden, Klima und Art der Bewirtschaftung.

NH₃-Freisetzung wird verstärkt durch:

- hohen Boden-pH,
- niedrige H⁺-Pufferkapazität
- hohe Temperatur/Einstrahlung
- hohe Windgeschwindigkeit

NH₃-Freisetzung wird vermindert durch:

- hohe Sickerkapazität,
- hohen Tongehalt
- steigenden Gehalt an org. C (>1,5 %)
- ausreichende Bodenfeuchte
- Niederschlag/Beregnung nach Düngung
- Einarbeitung in den Boden



Abb. 46: N₂O-Messvorrichtung in einem Feldversuch.

Lachgasemissionen

Alle Ökosysteme emittieren Lachgas (N₂O). Tatsächlich werden mehr als 50 % der weltweiten N₂O-Emission als „natürlich“ (aus Böden unter natürlicher Vegetation, dem Meer usw.) eingestuft. Etwa 30 % entstammen der Landwirtschaft. Darin ist allerdings auch die natürliche N₂O-Emission landwirtschaftlich genutzter Böden – immerhin 11 % der Landfläche der Erde – mitgerechnet, welche auch angefallen wäre, wenn die Böden ungenutzt geblieben wären. Nach Aussage des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2001) trägt N₂O, für sich genommen, 6 % zum Potenzial der Globalen Erwärmung bei.

Innerhalb der durch den Menschen verursachten N₂O-Emissionen ist die Tierhaltung für den größten Teil (54 %) verantwortlich, während der Anteil der Mineraldüngung auf 17 % geschätzt wird. Für die N₂O-Emissionen aus der Landwirtschaft sind zwei Prozesse im Boden verantwortlich: die Denitrifikation und, in geringerem Umfang, die Nitrifikation (siehe Seite 13). Die unterschiedlichen Wechselwirkungen von Boden, Witterung und landwirtschaftlicher Bewirtschaftung beeinflussen Nitrifikation und Denitrifikation und damit den Anteil an der emittierten N₂O-Menge (Tabelle 11, Seite 43).

Gasförmige Verluste von Weideland – ein besonderes Problem

Während auf Grünland mit Schnittnutzung nur geringe Stickstoffverluste auftreten, ist dies bei Weidenutzung anders. Auf Weideflächen treten die höchsten punktuellen Stickstoffkonzentrationen an Stellen auf, an denen Kot bzw. Urin abgesetzt wurden. Dort wurden bei Rindern lokal Stickstoffmengen gemessen, die einem Wert von 1 000 kg N/ha entsprechen. Dies liegt weit oberhalb des Bedarfs der Pflanzen und kann zu bedeutenden Stickstoffverlusten führen. Im Durchschnitt gehen 3,5 % des Stickstoff aus Urin als N_2O verloren, weitere 20 % als NH_3 (Ledgard, 2001).

Da es sich hierbei um unvermeidbare Verluste handelt, weisen Betriebe mit einem hohen Anteil an beweidetem Grünland zwangsläufig einen höheren Überschuss in ihrer Stickstoffbilanz auf.



Abb. 47: Die Ammoniakemission von beweidetem Grünland wurde eingehend untersucht.

Parameter	Wirkung auf die N_2O -Emission
Bodendurchlüftung	• zeitweilige Durchlüftung → höchste N_2O-Prod. • schlechte Durchlüftung → hohe Denitrifikation, aber meist N_2
Wassergehalt des Bodens	• ansteigender Wassergehalt → steigende Denitrifikation, aber unter sehr feuchten Bedingungen meist N_2 • abwechselnd trocken/feucht → höchste N_2O-Produktion
N-Verfügbarkeit	• zunehmendes $NO_3:NH_4$-Verhältnis → zunehmende N_2O-Emission
Bodentextur	• von Sand zu Ton → zunehmende N_2O-Emission
Bodenbearbeitung	• pflügen → niedrigere N_2O-Emission • keine/minimale Bearbeitung → höhere N_2O-Emission
Bodenverdichtung	• zunehmende Verdichtung → zunehmende N_2O-Produktion
Boden-pH	• wo Denitrifikation die Hauptquelle für N_2O ist senkt steigender pH die N_2O-Produktion • wo Nitrifikation die Hauptquelle für N_2O ist erhöht steigender pH die N_2O-Produktion
Organische Masse	• erhöhter Gehalt an organ. C → erhöhte N_2O-Emission
Pflanzenbestand	• Pflanzen, spez. deren Rückstände u. Wurzeln nach der Ernte, erhöhen N_2O-Emission
Temperatur	• erhöhte Temperatur → erhöhte N_2O-Emission
Jahreszeit	• nasser Sommer → höhere N_2O-Produktion • Frühjahrstauwetter → hohe N_2O-Produktion • Winter → niedrigste N_2O-Produktion

Tab. 11: Faktoren, die die N_2O -Emission beeinflussen.

Verminderung von Nährstoffverlusten und Umweltbelastung

Stickstoffbilanz

In einer Stickstoffbilanz wird der Stickstoffeintrag (z. B. aus Düngern, biologischer Stickstoffbindung, Futtermitteln) dem Stickstoffaustrag (z. B. mit dem Erntegut, Milch, Fleisch u. a.) gegenübergestellt. Da sich Witterung und angebaute Kulturen von Jahr zu Jahr ändern, sollte die Stickstoffbilanz nur als Durchschnittswert einer Fruchtfolge bzw. bei Grünland als vier- bis fünfjähriger Mittelwert interpretiert werden. Auch bei optimaler N-Düngung muss ein gewisser Stickstoffüberschuss akzeptiert werden. Denn Landwirtschaft wird in einem offenen System betrieben, in dem – selbst unter Einhaltung guter landwirtschaftlicher Praxis – gewisse Verluste unvermeidbar sind. Die Höhe dieser Verluste hängt ab von den natürlichen Bedingungen (Sandboden > Tonboden, niederschlagsreich > niederschlagsarm) und von der Art der Bewirtschaftung. Für Ackerbaubetriebe sind sie niedriger als für gemüseerzeugende oder viehhaltende Betriebe.

Angesichts der Schwierigkeit, eine ausreichende Anzahl von Messergebnissen über Stickstoffemissionen in Luft und Wasser zu erhalten, können Stickstoffbilanzen als ein brauchbarer Indikator zur Abschätzung von N-Verlusten aus der Landwirtschaft herangezogen werden.

Stickstoffbilanzen sind ein geeignetes Instrument:

- zur Abschätzung der Stickstoffverluste der Landwirtschaft auf nationaler, regionaler oder betrieblicher Ebene;
- zur Erfassung von Entwicklungen über einen Zeitraum.

Stickstoffbilanzen geben keine Information über:

- die Höhe der optimalen Stickstoffdüngergabe;
- den Anteil verschiedener Stickstoffformen (Nitrat, Ammoniak, Lachgas) an den Verlusten.

Gute landwirtschaftliche Praxis zur Verminderung der Stickstoffverluste

- Zeitpunkt und Höhe der Düngergaben in Übereinstimmung mit dem Bedarf der Kulturpflanzen zur Vermeidung unnötiger und unzeitiger Stickstoffzufuhr:
 - Düngungszeitpunkt und Aufteilung entsprechend Pflanzenbedarf und Entwicklungsstadium,
 - keine Düngergabe außerhalb der Vegetationszeit und vor Brache,
 - optimale Höhe der Gaben entsprechend einem Düngesplan,
 - Anpassung des Düngesplans während des Wachstums, z. B. auf Basis von Pflanzenanalysen,
 - ausgewogene Düngung der Pflanzen mit allen Nährstoffen, die die Stickstoffwirkung unterstützen.
- Pflanzenbedeckung während des gesamten Jahres (Zwischenfruchtbau, Gründüngung), um Schwarzbrache zu vermeiden.
- Effizienter Einsatz von organischen Düngern:
 - Ausbringung im Frühjahr, wenn die Pflanzen Stickstoff aus wirtschaftseigenen Düngern am besten verwerten können,
 - ausgefeilte Anwendungstechnik und rasche Einarbeitung zur Minimierung der Verluste.
- Flache Stroheinarbeitung zur Festlegung von mineralischem Stickstoff vor dem Winter.
- Tiefe Bodenbearbeitung erst im Frühjahr, um nicht durch Herbst- und Winterarbeiten eine vorzeitige Stickstoffmineralisation auszulösen.



Abb. 48: Landschaft mit unterschiedlicher landwirtschaftlicher Flächennutzung.

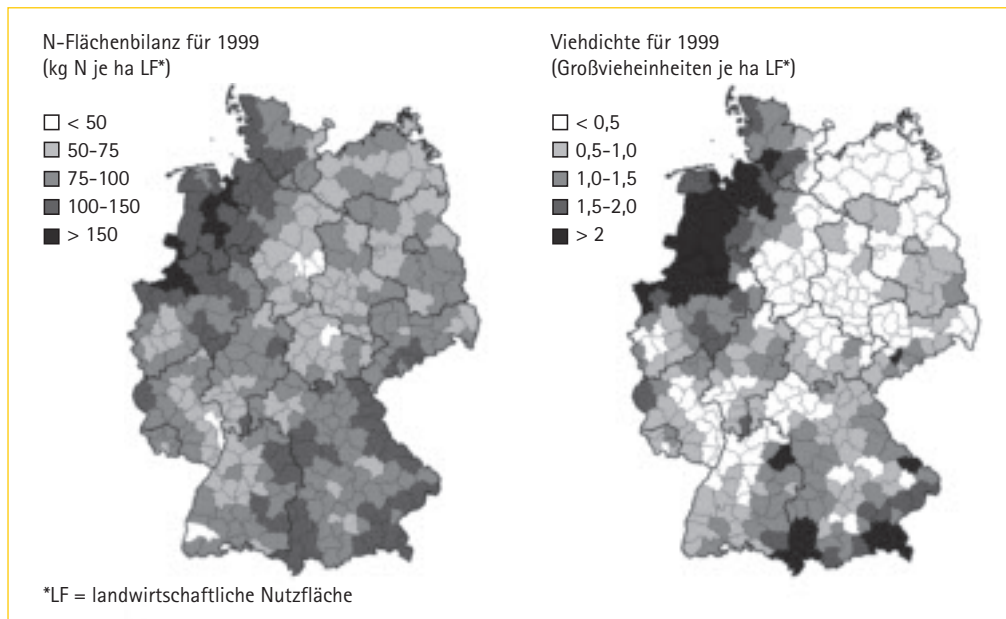


Abb. 49: Regionale Differenzierung der Viehdichte und Flächenbilanz in Deutschland – Bezugsjahr 1999 (Gömann H. et al., 2004)

Die Stickstoff-Gesamtbilanz der Landwirtschaft in Deutschland weist im längerfristigen Durchschnitt (1991–2002) einen Überschuss von 112 kg N/ha landwirtschaftliche Nutzfläche (LF) aus; der Flächenbilanzüberschuss liegt bei 83 kg N/ha LF. Ein signifikanter Trend ist für diesen Zeitraum nicht erkennbar (Bach und Frede, 2005). Die Höhe der Stickstoffüberschüsse steht in engem Zusammenhang mit der Intensität der Viehhaltung. Regionen mit hoher Viehdichte weisen i. d. R. hohe Stickstoffüberschüsse auf.

Die enge Beziehung zwischen Stickstoffbilanz-Überschuss und der Art landwirtschaftlicher Produktion wird auch aus Abbildung 50 deutlich. Der Nährstoffüberschuss ist bei der Tierproduktion deutlich höher als im Ackerbau, vor allem weil die in den Wirtschaftsdüngern enthaltenen Nährstoffe selten so gezielt und so effektiv im Pflanzenbau eingesetzt werden können wie die Nährstoffe aus Mineraldünger (siehe Seite 41 bis 44).

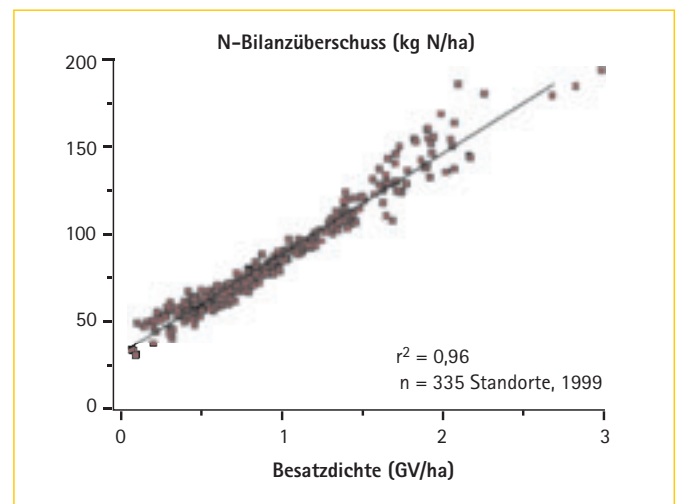


Abb. 50: Beziehung zwischen dem Stickstoffbilanzüberschuss (kg N/ha) und der Viehbesatzdichte (GV/ha), (Werte von 335 Standorten in Deutschland, 1999).

Ökobilanz zur Bewertung des Einflusses der Düngung auf die Umwelt

Die Stickstoffbilanz liefert wertvolle allgemeine Informationen. Sie gibt aber weder Hinweise auf die Art der Verluste noch auf deren mögliche Auswirkungen auf die Umwelt. Zudem gehen von der Landwirtschaft allgemein, und besonders von der Düngung, einige Umweltwirkungen aus, die sich nicht auf die landwirtschaftlichen Flächen beschränken. Die Methode des Life Cycle Assessment (LCA) wurde speziell entwickelt, um alle Umweltbeeinträchtigungen, die sich aus einem Produktionssystem ergeben, systematisch zu analysieren und zu bewerten. Abbildung 51 zeigt die Ergebnisse einer LCA-Studie, in der die Umweltbeeinträchtigung im europäischen Weizenanbau durch unterschiedliche Düngungshöhen untersucht wurde. Diese Studie ergab, dass eine suboptimale Düngung (96 kg N/ha) den geringsten Effekt – ausgedrückt als Umweltindex – aufwies. Bei einer Düngung in Höhe des wirtschaftlichen Optimums (192 kg N/ha) war der Umweltindex jedoch nur geringfügig größer.

Verglichen mit der wirtschaftlich optimalen Düngung trug die reduzierte Stickstoffgabe dabei weniger zur globalen Erwärmung und Eutrophierung bei, aber aufgrund der geringeren Flächenerträge war ihre Auswirkung auf den Landverbrauch stärker. In Bezug auf die Versauerung von Böden und Gewässern zeigten sich kaum Unterschiede. Ohne Stickstoffdüngung war die Belastung für die Umwelt am größten, vor allem aufgrund des größeren Bedarfs an Fläche für die Erzeugung der gleichen Menge an Weizen.

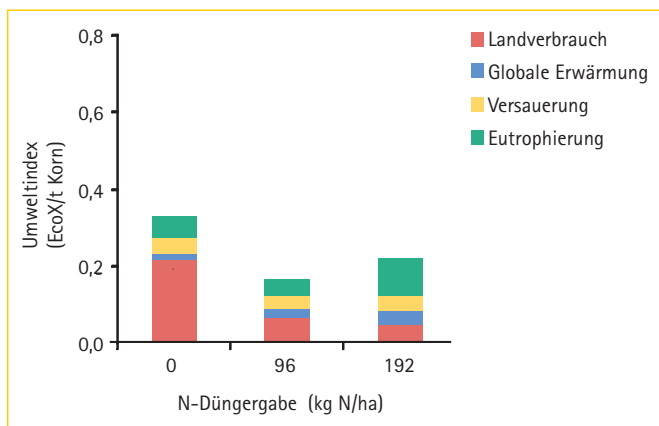


Abb. 51: Die als Umweltindex zusammengefasste Umweltbelastung (EcoX/t Korn) bei Weizen in Abhängigkeit von der Stickstoffdüngung. Je niedriger der Index, desto umweltverträglicher die Produktion (Brentrup, 2003).

Nitrat und die menschliche Gesundheit

Allgemein wird in der Öffentlichkeit die Meinung vertreten, dass die Aufnahme von Nitrat mit der Nahrung ein Gesundheitsrisiko darstellt. Daher sollte der Nitratgehalt der landwirtschaftlich erzeugten Produkte und des Trinkwassers so gering wie möglich sein. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO, 1970, abgeändert 1993) hat für Trinkwasser einen Richtwert von 50 mg NO_3^- pro Liter empfohlen und einen Grenzwert von 100 mg NO_3^- pro Liter. Der niedrigere WHO-Richtwert wurde dann in der EU-Trinkwasserverordnung (1980), der EU-Nitratrichtlinie (1991) und der Wasserrahmenrichtlinie (2000) als obere Grenze eingesetzt.

Aufgenommenes Nitrat wird rasch mit dem Urin ausgeschieden, reichert sich gewöhnlich nicht im Organismus an und verursacht keine Probleme im menschlichen Stoffwechsel. Aus Nitrat (NO_3^-) kann aber im Körper durch Bakterien Nitrit (NO_2^-) gebildet werden, welches wegen seiner Beteiligung an der Bildung von Nitrosaminen und Methämoglobin kritisch bewertet wurde.

Mittlerweile besteht weitgehende Übereinstimmung, dass die gesundheitlichen Bedenken gegenüber dem Nitrat, welche 1970 die WHO zu ihren Empfehlungen bewogen hatten, größtenteils unbegründet sind. Ein Beispiel ist die Methämoglobinämie bei Säuglingen und Kleinkindern, die das sog. „Blue Baby Syndrom“ auslöst. Die in der Vergangenheit aufgetretenen Fälle der Methämoglobinämie bei Kleinkindern standen häufig in Verbindung mit der Nutzung von Brunnenwasser, das mit Erregern aus dem Fäkal-/Darmbereich verunreinigt war. Ursprünglich führte man die Erkrankungen auf die ebenfalls hohen Nitratwerte des Brunnenwassers zurück. Heute geht man davon aus, dass hauptsächlich Magendarminfektionen/-entzündungen, z. B. ausgelöst durch bakteriell verunreinigtes Trinkwasser, für die Methämoglobinvergiftungen verantwortlich sind, und nicht das mit der Nahrung aufgenommene Nitrat.

Methämoglobinämie bei Kleinkindern wurde erstmals in den 40er Jahren des vorigen Jahrhunderts beschrieben. Man fand heraus, dass Nitrit mit dem Hämoglobin des Blutes reagierte und dessen Funktion als Sauerstoffträger blockierte. Aufgrund des Sauerstoffmangels liefen die Babys „blau“ an. Bei gesunden Erwachsenen sorgt ein spezifisches Enzym dafür, dass die Methämoglobinkonzentration im Blut unter 1 bis 2 % bleibt. Dieses Enzymsystem ist jedoch bei Kleinkindern unter 6 bis 12 Monaten nicht voll ausgebildet. Eine erhöhte Nitrataufnahme (über Trinkwasser mit hohem Nitratgehalt) wurde zunächst als Ursache des „Blue Baby Syndroms“ vermutet. Im Laufe der letzten 20 Jahre hat sich jedoch ein wesentlich komplexeres Bild ergeben.

Bei Entzündungen im Magendarmtrakt kommt es, als Reaktion des Immunsystems, zu einer vermehrten Bildung von Stickoxid (NO), das dann im Stickstoffstoffwechsel zu Nitrit (NO_2^-) umgewandelt wird. Man geht heute davon aus, dass hauptsächlich diese Immunreaktion für die Methämoglobinämie bei Säuglingen und Kleinkindern verantwortlich ist (Avery, 1999).



Abb. 52: Die Erzeugung unbedenklicher und gesunder Nahrungsmittel ist ein zentrales Ziel der Düngerindustrie.

Diese Hypothese wird durch eine Reihe Beobachtungen erhärtet, z. B.:

- Magendarminfektionen bei Erwachsenen sind mit der endogenen Bildung großer Mengen NO und mit erhöhten Nitratgehalten im Plasma verbunden.
- Säuglinge, die an Durchfall und Methämoglobinämie litten, ohne nitratbelastetes Wasser aufgenommen zu haben, schieden bis zu zehnmal soviel Nitrat aus wie sie mit der Nahrung aufgenommen hatten.
- Eine epidemiologische Studie zeigt, dass die Anzahl von Methämoglobinämie-Fällen in städtischen Gebieten (mit niedriger Nitratkonzentration im Trinkwasser) saisonal schwankt, wobei die meisten mit Zeiten häufiger Magendarminfektionen zusammenfallen.

„Blue Baby Syndrom“

Kleinkinder im Alter von weniger als einem Jahr können an Methämoglobinämie sterben. Der Amerikaner H. H. Comly, der 1945 über dieses Problem berichtete, bezeichnete es jedoch als „Brunnenwasser-Methämoglobinämie“. Alle Fälle, die in einem 1991 erschienenen Buch über die Nitratfrage angeführt werden, sind durch Wasser aus Brunnen verursacht worden, die zu 98 % als „privat gebohrt“ bezeichnet sind. Möglicherweise wurden diese Brunnen von Amateuren zu dicht an den sanitären Einrichtungen des Hauses errichtet. Dies könnte die Erklärung dafür sein, weshalb in einer Reihe von Fällen das Wasser sowohl mit Bakterien als auch mit Nitrat belastet war.

Addiscott, T. M. und Benjamin, N. (2000): Are you taking your nitrate? Food Science and Technology Today, 14.

Auch für die Annahme, das Auftreten von Magenkrebs stehe in einem Zusammenhang mit dem Nitratgehalt in Lebensmitteln, hat es keine Belege gegeben. Tatsächlich lassen neuere Forschungsergebnisse den Schluss zu, dass aufgenommenes Nitrat den Magendarmtrakt vor Krankheitserregern in der Nahrung schützt. Untersuchungen des US National Research Council (1995) zeigen, dass Gemüse das Krebsrisiko senkt, obwohl es die größte Nitratquelle unter den Lebensmitteln ist.

Das Scientific Committee for Food der Europäischen Kommission bestätigt in seiner „Opinion on Nitrate and Nitrite“ vom 22. September 1995: „Langzeitversuche an Tieren haben nicht darauf hingewiesen, dass Nitrat oder Nitrit per se krebserregend sind. Sie ergaben auch keinen quantitativen Beweis für die endogene Bildung krebserregender N-Nitrosoverbindungen nach Exposition mit realistischen Mengen an Nitrat und nitrosaminierbaren N-haltigen Vorstufen“. Das Komitee befand zudem: „Ausgedehnte epidemiologische Untersuchungen zu Nitrat haben alles in allem keinen Zusammenhang mit dem Krebsrisiko beim Menschen ergeben“ (EC, 1995).

Abschließend kann festgestellt werden, dass weitere Beschränkungen für den Nitratgehalt im Trinkwasser oder in landwirtschaftlichen Erzeugnissen, wie etwa Gemüse, nur schwerlich zu rechtfertigen sind. Andererseits können angemessene Maßnahmen zur Einschränkung der Nitratreinträge ins Grund- und Oberflächenwasser aus ökologischer Sicht durchaus berechtigt sein. Allerdings sollten die Kosten, die dem europäischen Steuerzahler und Verbraucher aus der gegenwärtigen gesundheitsorientierten Gesetzgebung zur Einschränkung des Nitratgehalts im Trinkwasser erwachsen, unter Berücksichtigung der seit den 70er Jahren gemachten wissenschaftlichen Erkenntnisse neu überdacht werden.

„Während der letzten 20 Jahre wurde Nitrat in Lebensmitteln mit der Bildung von Methämoglobin und karzinogenen Nitrosaminen bei Menschen in Verbindung gebracht. Dies veranlasste Beschränkungen in den Nitrat- und Nitritgehalten von Lebensmitteln und dem Trinkwasser. Es gibt jedoch keinerlei epidemiologische Beweise dafür, dass für Bevölkerungsgruppen mit hohem Gemüseverzehr bzw. hoher Nitrataufnahme ein erhöhtes Risiko besteht, an Magen- oder Darmkrebs zu erkranken. Eine Neubewertung unserer gegenwärtig äußerst negativen Einschätzung von Nitrat in der Nahrung ergibt sich aus neueren Untersuchungen über Metabolismus und enterosalivaren Kreislauf von Nitrat in Säugetieren. Nach diesen Untersuchungen wird Nitrat in der Mundhöhle zu Nitrit umgewandelt, welches dann den ‚Betriebsstoff‘ für einen wichtigen Abwehrmechanismus gegen Infektionskrankheiten bildet. Außerdem gibt es heute Beweise dafür, dass die Umwandlung von Nitrat in Stickstoffoxide die Bildung karzinogener Nitrosamine verhindert.“

Duncan, C. et al. (1997): Comp. Biochem. Physiol. A Physiol. 118 (4) 939-948

Düngestrategien für verschiedene Kulturpflanzen

Düngergaben werden so bemessen, dass der für den jeweiligen Standort erzielbare Optimalertrag mit einer Qualität erreicht werden kann, die dem Verwendungszweck der Ernteprodukte entspricht. Aus wirtschaftlichen Gründen gilt dabei zwingend die Devise: „So viel wie nötig und so wenig wie möglich“.

In Abhängigkeit vom jeweiligen Nährelement kann dieses Ziel mit unterschiedlichen Düngestrategien erreicht werden. Phosphat, Magnesium und Kalium sind im Boden nicht sehr beweglich. Daher treten auch keine nennenswerten Auswaschungsverluste auf. Nährstoffentzüge durch das Erntegut müssen allerdings durch die Düngung wieder ersetzt werden. Wenn die Bodenanalyse einen unzureichenden Vorrat an dem betreffenden Nährelement anzeigt, muss die Düngergabe erhöht werden, damit nach einigen Jahren ein ausreichendes Niveau im Boden erreicht wird.

Bei einem sehr beweglichen Nährelement wie Stickstoff ist eine solche Düngerstrategie nicht möglich, da mineralischer Stickstoff nicht in gleicher Weise im Boden bevorratet wird. Zudem kann man nicht davon ausgehen, dass er zum gleichen Zeitpunkt verfügbar ist, zu dem die Pflanzen ihn benötigen. Um den Bedarf der Kulturpflanzen zu decken, wird die Stickstoffdüngung über die Vegetationsperiode in mehrere Teilgaben aufgeteilt. Dadurch kann Stickstoffmangel – auch während der Bedarfsspitzen – verhindert und gleichzeitig eine Überdüngung vermieden werden.

Zudem ermöglicht es die Stickstoffdüngung,

- die Entwicklung der Kultur und damit die Ertragsbildung zu steuern, z. B. durch Förderung oder indirekte Hemmung einzelner Ertragskomponenten,
- die Qualität des Ernteguts zu beeinflussen, indem Stickstoff gezielt zu bestimmten Entwicklungsstadien ausgebracht wird.

Solche Düngestrategien werden verbreitet angewendet, z. B. zur gezielten Ertrags- und Qualitätsbeeinflussung bei Getreide. Einige Strategien der Stickstoffdüngung werden im Folgenden für verschiedene landwirtschaftliche Kulturen erläutert. Ausführliche Darstellungen finden sich in der einschlägigen Fachliteratur (z. B. aid-Broschüre 1017/2002 „Gute fachliche Praxis der Stickstoffdüngung“)

Stickstoffdüngung von Getreide

Sobald im Frühjahr das Wachstum einsetzt und die Getreidepflanzen zahlreiche Nebentriebe bilden (Bestockungsphase), beginnen die Pflanzen, große Mengen an Stickstoff aufzunehmen. Dies dauert bis zum Stadium der Milchreife (Korninhalt ähnelt im Aussehen der Milch) an. Eine angemessene Wasserversorgung vorausgesetzt, benötigt Getreide in diesem Zeitraum pro Tag 4 bis 5 kg N/ha. Eine Getreidepflanze nimmt etwa 40 % ihres Gesamtbedarfs an Stickstoff bis zum Ende der Bestockung auf, weitere 20 % bis zum Ährenschieben und die restlichen 40 % bis zum Einsetzen der physiologischen Reife. Die in die Körner eingelagerte Stickstoffmenge und damit der mit der Ernte entzogene Stickstoff kann stark schwanken, je nach Ertraghöhe und Eiweißgehalt (Tabelle 12).

Ertrag dt/ha	Rohproteingehalt (% i. d. TS)			
	12 %	13 %	14 %	15 %
60	115	125	135	145
70	135	145	155	165
80	155	165	180	190
90	175	185	200	215
100	195	210	225	240

Tab. 12: Stickstoffentzug (kg N/ha) bei Weizen mit dem Korn in Abhängigkeit des Rohproteingehalts und der Ertragshöhe.

Der Kornertrag einer Getreidepflanze wird durch drei Faktoren bestimmt:

- Anzahl ährentragender Halme,
- Kornzahl pro Ähre und
- durchschnittliches Einzelkorngewicht.

Während der Entwicklung des Getreidebestandes beeinflussen sich diese drei Komponenten wechselseitig – sowohl positiv als auch negativ. So führt z. B. eine große Zahl ährentragender Halme zu einer relativ geringen Kornzahl pro Ähre und einem niedrigeren Einzelkorngewicht. Durch entsprechende Bemessung der Stickstoffgaben und Wahl des Düngungszeitpunkts kann die Entwicklung dieser drei Ertragskomponenten in gewissem Umfang gesteuert werden.

Anzahl ährentragender Halme

Getreidepflanzen sind durch die Bildung von Nebentrieben in der Lage, die Zahl der ährentragenden Halme pro Pflanze selbst zu regulieren. Das Ausmaß der Bestockung hängt unter anderem von der Nährstoffversorgung ab. Bedeutend ist vor allem, wieviel Stickstoff den einzelnen Pflanzen zur Verfügung steht. Damit bietet sich dem Landwirt eine Möglichkeit, die Zahl der Ähren pro Flächeneinheit zu optimieren. Ist die Stickstoffmenge pro Pflanze unzureichend, z. B. aufgrund einer zu niedrigen Düngergabe oder zu dichter Saat, so bildet jede Pflanze nur wenige ährentragende Halme aus. Umgekehrt führt eine reichliche Stickstoffversorgung zu starker Bestockung. Bei zu hoher Stickstoffgabe wird der Bestand jedoch zu dicht und es kommt zu starker Konkurrenz zwischen den einzelnen Halmen, die daraufhin nur weniger und kleinere Körner pro Ähre ausbilden. Als Folge davon wird der Flächenertrag reduziert. Zudem steigt bei vielen schwach ausgebildeten Halmen die Gefahr von Lagerbildung nach Unwettern und Pilzbefall.

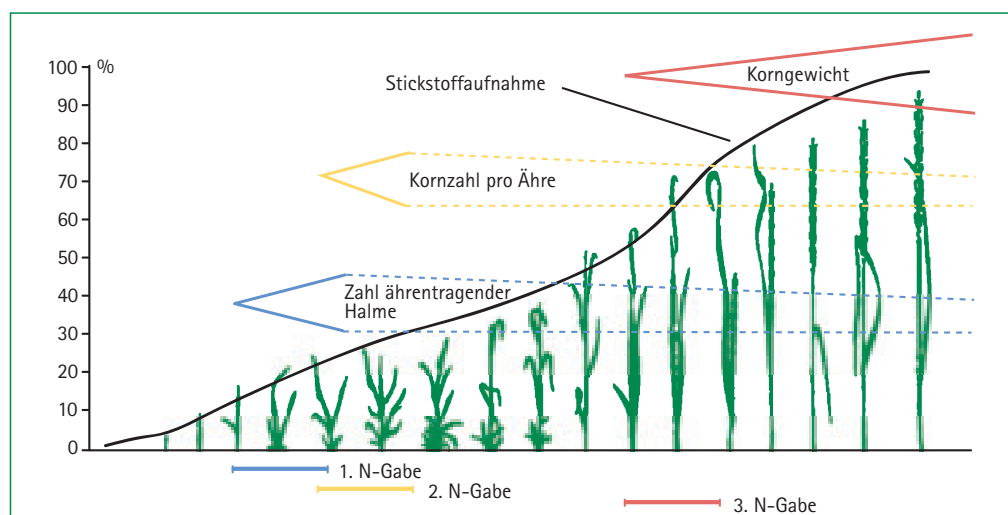


Abb. 53: Einfluss des Zeitpunktes der Stickstoffdüngung auf die Entwicklung der N-Aufnahme und einzelne Ertragskomponenten bei Winterweizen. Die Anzahl der ursprünglich reichlich angelegten ährentragenden Halme und der Körner pro Ähre wird später je nach Wachstumsbedingungen reduziert.

Die Höhe der ersten Stickstoffgabe im zeitigen Frühjahr hängt daher entscheidend von der Zahl der Pflanzen je Flächeneinheit ab. Nach einem strengen Winter mit starken Auswinterungsverlusten sind die Bestände von Wintergetreide im Frühjahr meist dünn und geschwächt. Mit einer kräftigen Stickstoffgabe zu Vegetationsbeginn kann der Landwirt die Bestockung fördern, so dass der Verlust an Pflanzen durch eine erhöhte Anzahl ährentragender Halme ausgeglichen wird.

Nach einem milden Winter sind die Bestände hingegen oft dicht und gut entwickelt, da nahezu alle aufgelaufenen Pflanzen die kalte Jahreszeit überlebt haben. In diesem Fall wird der Landwirt das weitere Wachstum mit einer nur knapp bemessenen Stickstoffgabe unterstützen, um eine zu große Bestockung zu vermeiden, die zu einer zu hohen Bestandsdichte führen würde.

Kornzahl pro Ähre

Die Körner in der Ähre werden unmittelbar nach der Bestockung angelegt (Abbildung 53). Zunächst wird die größtmögliche Anzahl von Kornanlagen ausgebildet, die jedoch je nach Versorgung der Pflanze mit Nährstoffen, Wasser und Licht reduziert werden. Eine scharfe Konkurrenz zwischen einzelnen Pflanzen um diese Wachstumsfaktoren bewirkt eine starke Reduktion der Kornanlagen, während bei schwacher Konkurrenz nur wenige der angelegten Körner absterben.

Mit Hilfe der zweiten Stickstoffgabe, die üblicherweise zur Zeit des Schossens erfolgt, will der Landwirt diesen Reduktionsvorgang so beeinflussen, dass ein optimales Verhältnis zwischen der Zahl der ährentragenden Halme und der Kornzahl pro Ähre erreicht wird. Sind mehr Körner pro Ähre vorhanden, als während der Abreife gefüllt werden können, führt dies zu kleinen Körnern von minderer Qualität.

Korngewicht

Die dritte Ertragskomponente, das Gewicht der einzelnen Körner, ist weitgehend genetisch vorgegeben, wird jedoch zusätzlich durch Witterung und Ernährungszustand beeinflusst. Zudem besteht eine negative Beziehung zur Zahl der pro Ähre angelegten Körner: je höher diese ist, um so geringer wird das Gewicht des einzelnen Korns ausfallen.

Die Kornfüllung wird von der Assimulationsleistung des Getreides vom Ährenschieben bis zur Reife bestimmt. Eine Stickstoffspätdüngung im Stadium „Ährenschieben“ kann die Kornfüllung durch Vergrößerung der Blattfläche und Erhöhung des Chlorophyllgehalts verbessern.

Düngung zur Qualitätsverbesserung

Eine Stickstoffspätdüngung unterstützt nicht nur die Kornfüllung, sondern erhöht auch direkt den Eiweißgehalt der Körner. Ein hoher Proteingehalt des Korns ist bei Futtergetreide erwünscht, da darüber der Eiweißbedarf des Viehs zu einem möglichst hohen Anteil gedeckt werden kann. Bei Getreide zur Broterzeugung ist ein hoher Eiweißgehalt im Weizenkorn die Voraussetzung für eine gute Backqualität. Mit einer Stickstoffspätdüngung lässt sich das genetisch festgelegte Potenzial ausschöpfen und eine hohe Backqualität erreichen.

Zu Braugerste ist eine Stickstoffspätdüngung nicht sinnvoll, da von Brauereien und Brennereien Korn mit niedrigem Stickstoffgehalt (< 11,5 % Rohprotein) und hohem Stärkegehalt gefordert wird.

Stickstoffdüngung von Kartoffeln

Der Knollenertrag einer Kartoffelpflanze ergibt sich aus der Anzahl der Triebe pro Pflanze, der Anzahl der Knollen je Trieb und dem Knollengewicht. Nur in Bezug auf das Knollengewicht wirkt sich eine Stickstoffdüngung stark aus. Sie bestimmt Dauer und Intensität der Stärkespeicherung. Die ersten beiden Faktoren werden nur gering beeinflusst.

Eine zu hohe Stickstoffversorgung mindert die Knollenanlage im Frühjahr, während eine Unterversorgung mit Stickstoff zum vorzeitigen Absterben des assimilierenden Kartoffelkrauts führt. Aus diesen Gründen, und weil das Wurzelsystem dieser Kultur relativ flach und eingeschränkt ist, erfolgt die Stickstoffdüngung zu Kartoffeln normalerweise in zwei Teilgaben: die erste zum Legen und die zweite unmittelbar nach Anlage der Knollen.

Die Höhe der Stickstoffdüngung zu Kartoffeln hängt zu einem guten Teil vom Verwendungszweck des Ernteguts ab. Werden Kartoffeln als Rohstoff für die Industrie, z. B. für die Produktion von Stärke oder Alkohol, angebaut, ist das Hinauszögern der Ernte durch eine hohe Stickstoffdüngung vorteilhaft. Dadurch wird die Dauer der Assimilateinlagerung in die Knollen verlängert. Eine begrenzte Stickstoffversorgung würde in diesem Fall zu einer Ertragsminderung führen.

Speisekartoffeln, die zuviel Stickstoff aufgenommen haben, besitzen nur eine begrenzte Lagerfähigkeit und neigen zu qualitätsmindernden Knollendefekten (Hohlstellen, Risse).

Frühkartoffeln benötigen jedoch erhöhte Stickstoffgaben, um das Wachstum wegen ihrer frühen Ernte zu beschleunigen. Eine Einlagerung von Frühkartoffeln erfolgt in der Regel nicht.

Bei Pflanzkartoffeln wiederum sollte nur eine mäßige Stickstoffdüngung erfolgen, um die unerwünschte Bildung großer Knollen und verzögertes Abreifen (verursacht durch fortgesetzte Stickstoffanlieferung) zu verhindern. Pflanzkartoffeln werden meist früh geerntet, um das Risiko einer Pilz- oder Virusinfektion zu verringern.

Nach der Ernte von Frühkartoffeln sollte auf demselben Feld eine ungedüngte Zwischenfrucht angebaut werden, damit der im Boden verbliebene mineralisierte Stickstoff aufgenommen wird. Wenn der Aufwuchs nicht verfüttert wird, kann er vor Aussaat der nächsten Kultur als Gründünger untergepflügt werden. Die Kartoffelernte bewirkt in jedem Fall eine intensive Durchlüftung des Bodens. Dies verstärkt die Mineralisation von organischer Masse und damit die Freisetzung von Stickstoff, so dass stets der Anbau einer stickstoffkonservierenden Zwischenfrucht immer in Erwägung gezogen werden sollte.

Gemüsebau

Alle landwirtschaftlichen Feldkulturen, wie Getreide, Raps und Kartoffeln, stellen bei Erreichen des Reifestadiums ihr Wachstum ein. Zu diesem Zeitpunkt sollte sich in der durchwurzelten Bodenzone möglichst keine nennenswerte Menge an pflanzenverfügbarem Stickstoff mehr finden. Wenn das Wachstum während der Vegetationsperiode nicht durch Dürre, Pilz- oder Schädlingsbefall beeinträchtigt worden ist, haben die Pflanzen bei richtig bemessener Düngergabe den Boden bis zur Ernte weitgehend an Stickstoff entleert. Bei Gemüsearten mit kurzen Wachstumszeiten herrschen völlig andere Bedingungen.



Abb 54: Ertrag und Qualität werden maßgeblich durch die Stickstoffdüngung beeinflusst.

Getreide-, Raps-, Rüben- und Maisbestände durchwurzeln den Boden bis in eine Tiefe von 1,5 m und mehr. Das Wurzelsystem von Winterweizen unter einem Quadratmeter erreicht eine Gesamtlänge von über 30 km. Die Wurzeln vieler schnellwachsender Gemüsearten jedoch dringen nur etwa 10 bis 30 cm tief in den Boden ein, und die Gesamtwurzellänge, etwa bei Spinat, erreicht nur rund 2 km/m².

Ein derart kleines Wurzelsystem kann die Nährstoffe im Boden schlechter ausnutzen. Die von Gemüse zu erbringende Assimilationsleistung ist jedoch ebenfalls hoch, muss Gemüse doch seine Marktreife in sehr kurzer Zeit erreichen (Salat in 4 Wochen, Kohlrabi bis zu 8 Wochen). Daher benötigen diese Kulturen in dem geringen von ihnen durchwurzelten Bodenvolumen eine anhaltend hohe Nährstoffkonzentration. Spinat z. B. kann pro Tag mehr als 10 kg N/ha aufnehmen. Die Stickstoffdüngung erfolgt daher üblicherweise aufgeteilt in eine Basisdüngung vor der Saat oder Pflanzung, und ein oder zwei anschließenden Kopfdüngungen.

Viele Gemüsearten, so etwa Salat und Spinat, werden noch während des vollen Wachstums vor Eintreten der physiologischen Reife geerntet. Anders als bei landwirtschaftlichen Kulturen muss der Boden zum Erntetermin daher noch immer gut mit Stickstoff versorgt sein, um Ware mit marktfähiger Qualität sicherzustellen.

Um die Auswaschung des im Boden verbliebenen Stickstoffs zu verhindern, muss möglichst schnell die nächste Kultur oder eine Zwischenfrucht angebaut werden. Um die Düngermenge richtig einschätzen zu können, lassen Gemüsebauern regelmäßig, oft mehrmals pro Jahr, ihre Felder auf verfügbaren Stickstoff untersuchen. Nur so kann die Stickstoffdüngung für die nachfolgende Kultur genau gesteuert werden.

Beerenobst

Junge Erdbeeren z. B. werden im Spätsommer ausgepflanzt und erhalten 40 bis 60 kg N/ha, um das Wachstum vor Winteranbruch zu unterstützen. Im Frühjahr lassen gewerbmäßige Erdbeeranbauer ihre Felder auf pflanzenverfügbaren Stickstoff untersuchen. Es ist äußerst wichtig, den Pflanzen im Frühjahr ausreichend, aber nicht zuviel Stickstoff anzubieten. Eine Stickstoffübersorgung fördert nicht nur das Blattwachstum auf Kosten der Anzahl angelegter Blüten, sondern führt auch zu weichen Früchten, die anfällig für Pilzbefall sind.

Dauerkulturen

Bei ausgewachsenen und in Produktion befindlichen Dauerkulturen, wie z. B. Obstbäumen und Rebstöcken, zirkuliert ein beträchtlicher Teil der von ihnen benötigten Nährstoffe in einem engen Kreislauf. Nährstoffe aus sich zersetzendem Laub und Schnittgut werden von dem dichten Wurzelwerk wieder aufgenommen. Die Höhe der jährlich benötigten Stickstoffdüngung kann, je nach Sorte und Ertragshöhe, stark schwanken.

Baumobst

Ganz allgemein werden zum Beispiel für eine Apfelplantage jährlich 60 bis 80 kg N/ha empfohlen, wovon etwa die Hälfte nach der Ernte ausgebracht wird. So vermeidet man jeden negativen Einfluss auf das Abreifen der Früchte und übermäßiges vegetatives Wachstum. Dennoch wird die Photosynthese angeregt, so dass der sich von der Fruchtbildung erholende Baum ausreichend Reserven einlagern kann.

Dies unterstützt die Anlage zahlreicher und größerer Blütenknospen für das nächste Frühjahr. Im Frühjahr selbst muss die Stickstoffdüngung vorsichtig dosiert werden, da ein zu hohes Stickstoffangebot zu verstärktem Triebwachstum an Stelle des Fruchtansatzes führt und die Alternanz fördert.

Reben

Die Anbausysteme im Weinbau unterscheiden sich in den einzelnen europäischen Regionen beträchtlich und damit auch die jeweilige Düngungspraxis. Allgemein werden zwischen 20 und 60 kg N/ha gedüngt, in den nördlichen Ländern oft mehr als im Süden und zu weißen Rebsorten mehr als zu roten. Der Düngungszeitpunkt hängt von der jährlichen Niederschlagsverteilung ab. Im mediterranen Klima muss die Düngung zeitig in der Saison erfolgen, damit die letzten Regenfälle die Nährstoffe noch in den Boden einbringen und damit pflanzenverfügbar machen; im Norden wird meist später zur Blüte gedüngt, um eine Nitratauswaschung zu vermeiden. Eine ausreichende Stickstoffversorgung ist nicht nur Voraussetzung für das Wachstum der Reben. Sie ist auch für die Gärung wichtig, da den Hefepilzen im gekelterten Traubenmost genügend Stickstoff zur Verfügung stehen muss. Eine Überversorgung der Rebpflanze mit Stickstoff bewirkt übermäßiges vegetatives Wachstum. Dies führt zu unproduktivem Wasserverbrauch und erhöhter Anfälligkeit gegen Pilzkrankheiten.

Grünland

Im Gegensatz zu Ackerkulturen, welche jedes Jahr neu angebaut werden müssen, erneuert sich die Grasnarbe des Grünlands fortlaufend. In alten Grasnarben findet sich auf der Bodenoberfläche eine aus abgestorbenem Pflanzenmaterial bestehende „Filzschicht“. Solche Grasflächen weisen auch im Oberboden einen erhöhten Gehalt an organischer Substanz auf. Daher ist die in der oberen Bodenschicht gespeicherte Stickstoffmenge ebenfalls größer als in Ackerböden. Infolge mikrobieller Zersetzung und Umwandlung toten organischen Materials werden ständig Nährstoffe freigesetzt und erneut verfügbar gemacht. Andererseits wird dieser aus dem Boden freigesetzte Stickstoff, wie auch der Düngerstickstoff, sofort wieder vom dichten Wurzelnetz und von Mikroorganismen aufgenommen.

Obwohl die Zuwachsraten der vegetativen Masse starken saisonalen Schwankungen unterliegt, bleibt die Narbe das ganze Jahr an allen frostfreien Tagen physiologisch aktiv. Die obersten 15 bis 20 cm des Bodens sind so dicht durchwurzelt, dass selbst zur Zeit geringerer Assimilation während des kalten und lichtarmen Winters Stickstoff aufgenommen wird.

Stickstoffdüngung von Grünland hat zum Ziel, dessen natürlichen Wachstumsrhythmus zu unterstützen und den Anteil wüchsiger Gräser mit hohem Futterwert zu erhalten und zu erhöhen. Um das Ertragspotenzial optimal nutzen zu können, sollte der Grünlandbestand im Frühjahr zu Vegetationsbeginn ausreichend mit Stickstoff versorgt sein. Der Düngetermin wird allgemein mit der korrigierten Temperatursumme von 200 °C beschrieben. Dabei werden die einzelnen Tagesmittelpertemperaturen im Januar mit 0,5, im Februar mit 0,75 und ab März mit 1 multipliziert und dann addiert. Die erste Stickstoffdüngung sollte ausgebracht werden, wenn die korrigierte Temperatursumme 200 °C erreicht hat. Da der erste Aufwuchs der Grasnarbe den höchsten Ertrag bringt, muss auch die erste Düngergabe höher liegen als die folgenden. Nach jedem Schnitt werden dann bis Ende August weitere Gaben ausgebracht. Danach sind sie unter unseren Klimabedingungen meist nicht mehr gerechtfertigt.

Bei der Beweidung des Grünlands bleiben mit dem Kot und Harn der Tiere beträchtliche Nährstoffmengen auf der Fläche zurück. Diese auf einzelne Flecke beschränkte „Düngung“ führt zu erhöhten Stickstoffverlusten. Nur ein vergleichsweise geringer Teil des im Kot und Harn vorhandenen Stickstoffs kann von den Pflanzen genutzt werden.

Die Intensität der Grünlandnutzung und damit die erforderliche Höhe der Stickstoffdüngung variiert stark und reicht von der ungedüngten Standweide bis zur intensiv genutzten Mähweide, die jährlich mehr als 200 kg N/ha erhält – je nach Fruchtbarkeit des Standorts und Futterbedarf des Betriebes.

Hilfsmittel zur Optimierung von Zeitpunkt und Menge

Die Bemessung der korrekten Düngergabe zu einer Kultur richtet sich maßgeblich nach der zu erwartenden Stickstoffaufnahme durch die Pflanze und dem bereits im Boden vorhandenen Stickstoff. Die zu erwartende Aufnahme kann über den angestrebten Ertrag und den Stickstoffgehalt in der Pflanze abgeschätzt werden. Das Nährstoffangebot aus dem Boden setzt sich zusammen aus dem Gehalt des Bodens an verfügbarem anorganischem Stickstoff ($N_{\min}$) im zeitigen Frühjahr, und der Freisetzung von organisch gebundenem Stickstoff im weiteren Verlauf der Anbauperiode.

Der im zeitigen Frühjahr im Boden verfügbare Stickstoff kann entweder gemessen (Bodenanalyse) oder, gestützt auf Testflächen der Officialberatung, vom Landwirt abgeschätzt werden. Die mit der ersten Gabe auszubringende Stickstoffmenge errechnet sich dann durch Subtraktion des ermittelten $N_{\min}$ -Wertes im Boden von einem Sollwert, der in zahlreichen Feldversuchen als zu diesem Zeitpunkt für die jeweilige Kultur angemessene Versorgung ermittelt wurde.

Im Laufe der weiteren Vegetationsperiode unterliegt der im Boden vorhandene Stickstoff Umwandlungsprozessen, die stark witterungsabhängig (Temperatur, Niederschläge) sind. Dies führt dazu, dass der pflanzenverfügbare Stickstoff im Boden während der Kultur innerhalb eines Jahres, aber auch von Jahr zu Jahr schwanken kann. Um solche Veränderungen der Nährstoffversorgung der Pflanzen während der Vegetationsperiode zu ermitteln, wurden in der Vergangenheit unterschiedliche Methoden der Pflanzenanalyse entwickelt.

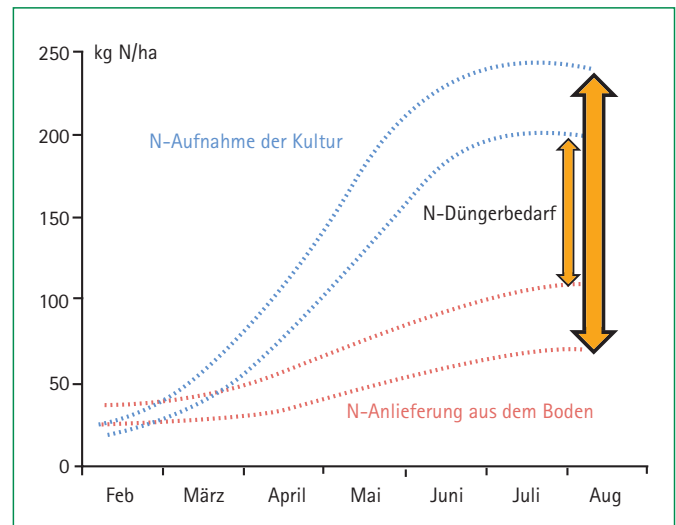


Abb. 55: Die von einer Kultur aufgenommene Stickstoffmenge hängt von den Wachstumsbedingungen auf dem jeweiligen Feld ab und variiert dementsprechend von Jahr zu Jahr (zwischen den blauen Linien). Die Mineralisation von Stickstoff aus der organischen Substanz im Boden unterliegt ebenfalls jährlichen Schwankungen (zwischen den roten Linien). Daher ist die „richtige“ Stickstoffdüngung – für die gleiche Kultur auf dem gleichen Feld – jedes Jahr unterschiedlich (gelbe Pfeile) und muss eventuell im Laufe des Jahres korrigiert werden.

Praxis von Stickstoffdüngungsversuchen:

Ein Feld wird zunächst in mehrere kleine Parzellen unterteilt. Auf den verschiedenen Parzellen werden steigende Stickstoffmengen ausgebracht. Diese unterschiedlichen Stickstoffmengen führen dann zu unterschiedlichen Erträgen. Der Zusammenhang zwischen Düngung und Ertrag kann in so genannten Ertragskurven dargestellt werden. Je nach Fruchtbarkeit des Standortes wird dabei auch ohne Düngung bereits ein mehr oder weniger hoher Ertrag erzielt. Der Ertrag nimmt mit jeder zusätzlichen Stickstoffeinheit zunächst zu und flacht dann ab, bis die jeweiligen Wachstumsbedingungen oder das genetische Potenzial der Pflanzen keinen weiteren Ertragsanstieg mehr erlauben (Maximalertrag). Bei weiter steigender Düngung kann der Ertrag sogar wieder abnehmen.

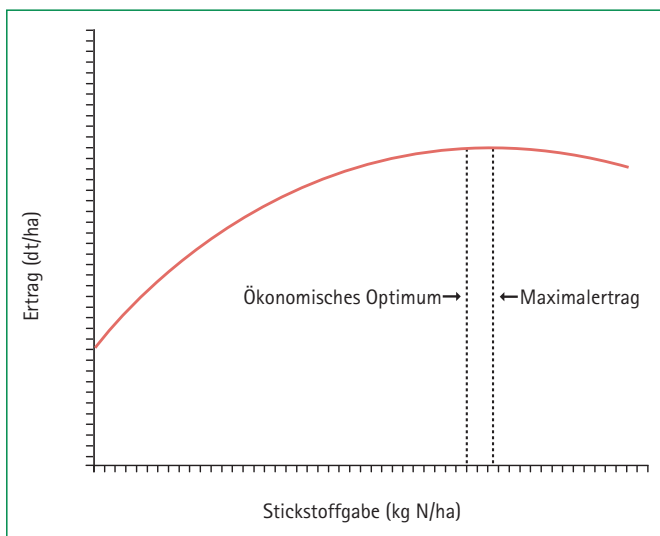


Abb. 56: Ertragsfunktion, ökonomisches Optimum und Maximalertrag.

Das ökonomische Optimum ist erreicht, wenn die Kosten für die letzte ausgebrachte Stickstoffeinheit noch vom Wert des damit erzeugten Mehrertrags gedeckt werden.

Gestützt auf die Pflanzenanalyse ist es möglich, die Stickstoffversorgung während der Kultur zu korrigieren, da die Düngung in mehreren Teilgaben, angepasst an den jeweiligen Versorgungszustand der Pflanzen, erfolgt.

In den vergangenen 20 Jahren haben sich Wissenschaft und Landwirte speziell mit Methoden der Pflanzenanalyse beschäftigt, die direkt auf dem Feld durchgeführt werden können. Um von der landwirtschaftlichen Praxis akzeptiert zu werden, muss ein solcher Feldtest schnell, kostengünstig und leicht durchführbar sein.

Es wurden verschiedene Verfahren für den praktischen Feldeinsatz entwickelt. Eine einfache Vorgehensweise besteht darin, bei der Düngung eine ungedüngte Parzelle (Düngefenster) auszusparen. Da sich auf dieser Parzelle eine nachlassende N-Anlieferung aus dem Boden zuerst zeigt, erhält man einen Indikator für den richtigen Zeitpunkt der Stickstoffkopfdüngung. Allerdings gibt das Düngefenster keine Information über die Höhe der erforderlichen Düngergabe.

Methoden, die eine Bestimmung der optimalen Stickstoffgabe zulassen, basieren entweder auf chemischen oder optischen Messverfahren. Der Nitrattest von Pflanzensaft ist eine chemische Methode, bei der der Nitratgehalt im Presssaft der Blattstiele bestimmt wird.

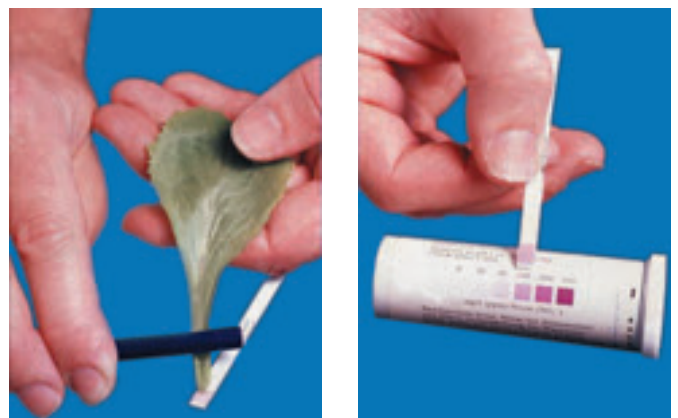


Abb. 57: Die Nitratkonzentration im Zellsaft wachsender Pflanzenteile ist eine brauchbare Anzeige für den Stickstoffernährungsstatus.

Eine weitere Methode ist die optische Messung der Stickstoffversorgung des Pflanzenbestands auf einem Feld durch Bestimmung des Chlorophyllgehalts. Kleine tragbare Geräte, wie das „GPN“ oder der „N-Tester“, messen die Chlorophyllkonzentration im Bestand direkt und ohne Beschädigung der Pflanzen. Da die Chlorophyllkonzentration in direkter Beziehung zur Stickstoffkonzentration steht, sind diese Messungen eine einfache und schnelle Möglichkeit, Auskunft über die aktuelle Stickstoffversorgung der Kultur zu erhalten.

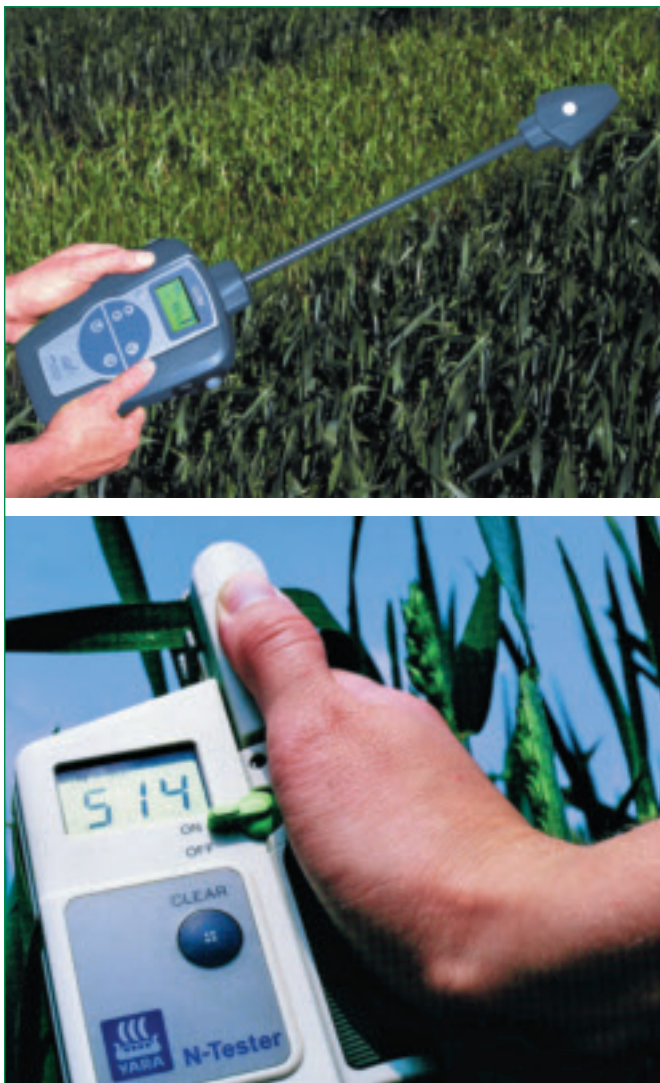


Abb. 58: Chlorophyllmessgeräte GPN (oben) und N-Tester® (unten) im Einsatz.

Um eine möglichst große Genauigkeit der Messung zu erreichen, wurden die Chlorophyllmeter in umfangreichen Feldversuchen für die jeweilige Kultur und das jeweilige Wachstumsstadium geeicht.

Alle Methoden benötigen repräsentative Pflanzenproben, aufgrund derer sie dann eine für den Durchschnitt des Feldes geltende Empfehlung liefern; sie sind damit besonders für kleinere Felder geeignet.

Jedoch auch innerhalb eines Feldes können Bodeneigenschaften und Nährstoffversorgung, und damit auch das Pflanzenwachstum, stark schwanken. Dies bedeutet, dass auch die Höhe der optimalen Stickstoffgabe für verschiedene Teile eines Feldes unterschiedlich sein kann. Besonders bei großen und heterogenen Schlägen kann eine einheitliche Düngergabe zu partieller Über- bzw. Unterversorgung des Schlages mit Stickstoff führen.

Seit Anfang der 90er Jahre des vergangenen Jahrhunderts werden technische Einrichtungen zur Variation der Düngermenge während des Streuens entwickelt, um so die Effizienz der Düngung zu erhöhen und wirtschaftliche wie ökologische Vorteile zu erzielen. Variable Ausbringungstechnik oder – allgemeiner gesprochen – Präzisionslandwirtschaft zielt darauf ab, den Unterschieden im Bestand gerecht zu werden, indem man den Stickstoff variabel dosiert und an den Bedarf der jeweiligen Stelle des Schlages angepasst ausbringt.

Gegenwärtig basiert die wirksamste Strategie zur variablen Stickstoffdüngung auf der Messung der Variabilität von Aufwuchs (Biomasse) bzw. des Stickstoffstatus (Chlorophyllgehalt) des Pflanzenbestandes innerhalb des Feldes. Bei der Präzisionslandwirtschaft ist die jeweilige Stickstoffversorgung der Pflanzen auf verschiedenen Teilen des Feldes der entscheidende Faktor bei der Festlegung der variablen Applikationsrate.

Die für die Zukunft aussichtsreichsten Systeme zur Messung von Unterschieden bei der Bestandsentwicklung innerhalb des Feldes beruhen auf der Erfassung des Pflanzenbestands mittels berührungsloser Messung. Es hat sich gezeigt, dass spektrale Indizes, die aus dem Reflexionsspektrum abgeleitet werden, indirekt die Stickstoffversorgung der Kultur wiedergeben. Durch spektrale Analyse des Pflanzenbestandes während der Wachstumsperiode ist es möglich, Flächen mit unterschiedlicher Biomasseentwicklung und Stickstoffaufnahme zu erkennen. Mit diesen Informationen lässt sich eine in der Fläche variable Stickstoffdüngung errechnen, um jeden Teil des Feldes optimal zu versorgen. Diese variable Stickstoffdüngung kann in einer „Applikationskarte“ dargestellt werden. Wie bei herkömmlichen Pflanzenanalysemethoden müssen die Reflektionsdaten agronomisch geeicht werden, um aus diesen Messwerten eine Düngungsempfehlung erstellen zu können.

Sensoren zur berührungslosen Messung können von Satelliten oder Flugzeugen (Fernerkundung) oder direkt von Traktoren aus betrieben werden. Flugzeug- und satelliten-gestützte Einheiten sind in der Lage, innerhalb kürzester Zeit große Gebiete abzudecken. Diese optischen Systeme sind jedoch abhängig von den Witterungsbedingungen, obgleich bei Verwendung von Synthetic Aperture Radar auch durch Wolken hindurch brauchbare Ergebnisse möglich erscheinen. Am Traktor montierte Sensoren ergeben ein eigenständiges System, dessen Funktion unabhängig von der Bewölkung ist. Sie ermöglichen Echtzeitmessung und Stickstoffausbringung in einem Arbeitsgang. Einsatzfähige Geräte sind mittlerweile erhältlich.

Aufgrund von Versuchsergebnissen und praktischer Erfahrung ergeben sich eine Reihe von möglichen wirtschaftlichen und ökologischen Vorteilen, darunter:

- verbesserte Stickstoffwirkung
- gleichmäßigerer Bestand
- gleichmäßigere Abreife
- gleichmäßigere Qualität
- einfachere Ernte
- höhere Erträge

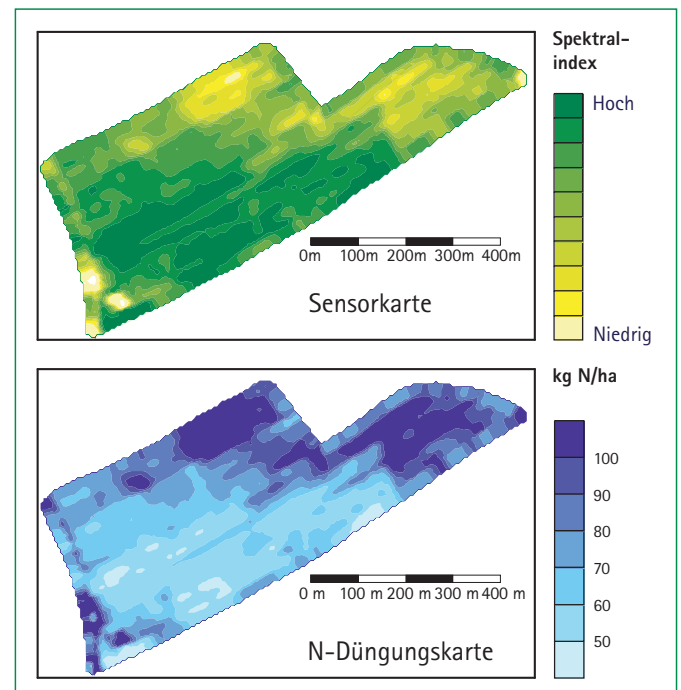


Abb. 59: Stickstoffdüngungskarte, ausgehend von den eingescannten Daten eines am Traktor montierten N-Sensors® (Wintergerste, 25. Mai 1999).

6 Stickstoff und Nahrungsqualität

Pflanzen sind die Grundlage aller Nahrungsmittel für den Menschen, entweder direkt verzehrt oder indirekt vom Tier zu Fleisch, Milch und Eiern umgewandelt. Pflanzennährstoffe und damit auch Dünger haben einen direkten Einfluss auf die Qualität der Nahrungsmittel.

Die Qualität der Ernteprodukte für die Nahrungsmittelproduktion wird nach verschiedenen Kriterien bewertet:

- Geschmack
- Nährwert
- Gesundheitliche Unbedenklichkeit
- Eignung zur Weiterverarbeitung
- Psychologische, kulturelle oder ideologische Kriterien

Diese Kriterien werden durch die Höhe der Düngung mit einem Nährstoff und das Verhältnis der Nährstoffe zueinander positiv oder negativ beeinflusst.

Qualitätsnahrung mit hohem Nährwert

Die Verbraucher achten heute mehr auf die Qualität ihrer Nahrungsmittel. Es besteht kein Zweifel, dass eine ausgewogene Düngung mit allen essentiellen Pflanzennährstoffen wesentlich dazu beiträgt, die Qualität unserer Nahrungsmittel zu sichern. Eine angemessene Versorgung mit verfügbarem Stickstoff, zusammen mit den übrigen Makro- und Mikronährstoffen, garantiert einen hohen Gehalt an Eiweiß und den anderen ernährungsphysiologisch wichtigen Bestandteilen unserer Lebensmittel, wie z. B. den Vitamingehalt.

Getreide

In Europa ist Getreide die wichtigste Kultur im Ackerbau. Große Mengen werden als Futtergetreide in der Tierproduktion benötigt. Zudem dient es als Rohstoff zur Herstellung von Brot, Kuchen, Gebäck, Nudeln und Frühstückscerealien sowie zur Bier- und Branntweinproduktion.

Getreideprodukte nehmen auf dem Speiseplan der Deutschen einen wichtigen Platz ein. So wird in Deutschland ein großer Teil des durchschnittlichen Pro-Kopf-Verbrauchs an Eiweiß über Brot und andere Getreideprodukte gedeckt.

Eine sorgfältig geplante Stickstoffdüngung zu geeigneten Weizensorten sichert die zuverlässige Versorgung der Bäckereien mit einer sich ständig erweiternden Palette verschiedener Mehlsorten. Zwar sind Eiweißgehalt und -qualität vor allem genetisch bedingt, doch hilft die richtige Düngung, das genetische Potenzial der Pflanzen voll auszuschöpfen. Ist Weizen z. B. nicht ausreichend mit Stickstoff und Schwefel versorgt, so verschlechtert sich die Qualität des „Klebers“, der die Backqualität bestimmenden Proteinfraktion.

Um sich gesund zu ernähren, kaufen viele Verbraucher Vollkornbrot, in dem die Bestandteile des gesamten Korns enthalten sind. Für diese Art von Brot wird Korn mit einem hohen Eiweißgehalt von 14 % benötigt, damit der Teig aufgeht.

In Formen gebackenes Brot erfordert Mehl mit einem Eiweißgehalt von rund 12,5 %, um Löcher im Brotlaib zu vermeiden. Für die Erzeugung von Baguettes sollte der Eiweißgehalt bei ca. 11,5 % und für Pitabrot etwas niedriger liegen.

Die vielen in Europa gebackenen Kuchen und Gebäckstücke benötigen alle ihren speziellen Mehltyp, zu dessen Erzeugung die Stickstoffdüngung genau auf den Verwendungszweck angepasst sein muss.

Für die Herstellung von Nudeln wird Durumweizen angebaut, ein eiweißreicher Hartweizen. Sein Proteingehalt lässt sich ebenfalls durch gezielte Stickstoffgaben beeinflussen. Der größte Teil des benötigten Durumweizens kommt aus südeuropäischen Ländern.

Die Qualität des Ernteguts kann durch Stickstoffmangel beeinträchtigt werden. So wurde z. B. in Dänemark, infolge der rigiden staatlichen Beschränkungen des Stickstoffeinsatzes, die Backqualität des dänischen Weizens so stark vermindert, dass die kontinuierliche Versorgung aus einheimischen Produkten nicht mehr gegeben ist. Von einem ehemaligen Exporteur von Qualitätsweizen wurde Dänemark so zu einem Importmarkt.

Der Anbau von Braugerste zur Produktion von Malz für Brauereien und Brennereien erfordert eine völlig andere Bestandsführung: hier soll zwar ebenfalls ein hoher Ertrag erzielt werden, jedoch bei niedrigem Stickstoffgehalt des Korns. Wie bei Weizen, werden auch hierfür spezielle Sorten angebaut. Zusätzlich ist jedoch die Erfahrung des Betriebsleiters bei der Produktion stickstoffarmer Getreides unentbehrlich, damit qualitativ hochwertiges Malz und klares Bier erzeugt werden können.

Andere Feldfrüchte

Um qualitativ hochwertige Erzeugnisse zu produzieren, muss die Stickstoffdüngung hinsichtlich der Menge und des Anwendungszeitpunkts genau gesteuert werden. Die heute angebotene große Vielfalt an Frühkartoffeln ist weitgehend das Ergebnis neuartiger Anbautechniken und angepasstem Stickstoffmanagement. Kartoffeln, die über Winter eingelagert werden sollen, dürfen zu Ende der Wachstumsperiode nur wenig verfügbaren Stickstoff im Boden vorfinden. Sonst sind sie nur schlecht lagerfähig, weisen einen schlechten Geschmack auf und zeigen eine Neigung zur Schwarzfleckigkeit während des Kochens, insbesondere wenn Kalimangel hinzukommt.

Eine effektive Zuckererzeugung aus Zuckerrüben bedarf gleichfalls einer äußerst sorgfältigen Bemessung der Stickstoffdüngung. Ist der Stickstoffgehalt im geernteten Rübenkörper zu hoch, wird dadurch die Kristallisation des Rohzuckers behindert und so die Zuckerausbeute gesenkt.

Gemüse und Salat

Der Markt für Frischgemüse ist sehr qualitätsbewusst. Der Anbau dieser Kulturen erfordert höchste Präzision, auch bei der Planung des Düngereinsatzes. Für diese Kulturen mit kurzer Wachstumsdauer werden sehr fruchtbare Böden benötigt. Einige Kulturen, z. B. Zwiebeln, vertragen zur Aussaat nur kleine, genau bemessene Düngergaben, um guten Feldaufgang und gleichmäßige Bestandsentwicklung zu sichern. Andere, z. B. lange wachsende Kohllarten, erhalten mehrere Düngergaben, um eine fortlaufende und gleichmäßige Stickstoffanlieferung zu erreichen. Damit kann bei den meisten Kohllarten eine gute Erntequalität erreicht werden. Ohne eine gezielte und auf den speziellen Bedarf der Kultur angepasste Stickstoffdüngung und die entsprechende Erfahrung der Landwirte könnten nur wenige der wohlschmeckenden und nahrhaften Gemüsearten, die heute für deutsche Verbraucher selbstverständlich geworden sind, in der gewünschten Qualität produziert werden. Bei einer Stickstoffunterversorgung neigt Gemüse zu erhöhtem Fasergehalt, ist weniger saftig, sieht bleich und „unterernährt“ aus.

Der Verzehr nitratreicher Nahrungsmittel ist im Bewusstsein der Verbraucher immer noch ein Gesundheitsrisiko, obwohl die Wissenschaft heute die gegenteilige Meinung vertritt (siehe Seite 47). Die EU-Richtlinie 194/97 sowie nationale Vorschriften legen Höchstwerte für den Nitratgehalt in frischem Gemüse und fertiger Babynahrung fest. Dementsprechend sind Kulturen, die zur Erntezeit einen hohen Nitratgehalt aufweisen, nicht vermarktungsfähig.

Reben und Wein

Die für Anbau der Reben und Vergärung der Trauben benötigte Stickstoffmenge ist nicht sehr groß, aber von entscheidender Bedeutung für die Erzeugung von Qualitätsweinen. Der Stickstoffbedarf des Weinstocks während der Saison wird im Wesentlichen aus in den Wurzeln angelegten Reserven gedeckt, mit denen dann das Laub gebildet wird. Für die Synthese der Zucker, die dann in die Beeren verlagert werden, benötigen die Blätter ausreichende Stickstoffmengen.

Wie bereits ausgeführt, ist Stickstoff eine entscheidende Komponente bei der Bildung von Aminosäuren. Gegen Ende der Reife werden große Mengen freier Aminosäuren in die Beeren transportiert. Zur Zeit der Ernte ist die Hälfte des in der Pflanze vorhandenen Stickstoffs in den Beeren eingelagert.

Eine Reihe von deutschen Weißweinen, die in den 1990er Jahren erzeugt wurden, zeigten eine verkürzte Lagerfähigkeit, bekannt als „vorzeitiges Altern“. Dies konnte im Nachhinein auf eine unzureichende Stickstoffversorgung der wachsenden Reben zurückgeführt werden. Bereits nach zweijähriger Lagerung hatte sich der Geschmack dieser Weine so verändert, dass sie viel älter erschienen und bald nicht mehr genießbar waren.

Wichtig für die Gärung ist ein hoher Gehalt an natürlichen Zuckern. Darüber hinaus muss den Hefepilzen im Most ausreichend Stickstoff zur Verfügung stehen. Bei Stickstoffmangel kann die Mostgärung sogar zum Erliegen kommen. Solche Moste benötigen einen Zusatz als „Futter“ für die Hefen, welcher üblicherweise Ammonium-Stickstoff enthält.

Der Stickstoffbedarf der Hefen ist nicht hoch. Eine ausreichende Stickstoffversorgung ist aber entscheidend für den guten Ablauf der Gärung, so dass wohlschmeckende und anspruchsvolle Weine erzeugt werden können.

Viehfutter

Im Idealfall wird auf dem viehhaltenden Betrieb das für die Fütterung des Viehs benötigte Grundfutter und Futtergetreide selbst erzeugt.

Grünlandfutter kann den Energie- und Eiweißbedarf von Rindern und Schafen zu einem großen Teil decken. Die Qualität von Frischgras sowie von Heu oder Grassilage wird durch eine sachgerechte Stickstoffdüngung deutlich verbessert.

Auch bei Futtergetreide, Mais und einigen Brassica-Arten, die der Ernährung der Tiere dienen, wirkt sich eine sachgerechte Düngung positiv auf deren Nährwert aus.

Die Erzeugung von Viehfutter in guter Qualität ist für den Landwirt von größter wirtschaftlicher Bedeutung. Die Erhöhung des Eiweißgehalts einer Qualitätssilage von 12 % auf 15 % erspart ihm je Hektar den Zukauf einer halben Tonne eiweißreichen Kraftfutters. Diese Verbesserung wird schon erreicht, wenn die Kultur zusätzlich 40 bis 50 kg/ha Stickstoff aufnimmt.

Auf viehhaltenden Betrieben werden mineralische Stickstoffdünger als Ergänzung hofeigener Wirtschaftsdünger eingesetzt, um so viel Energie und Eiweiß zur Versorgung des Viehs wie möglich über das Grundfutter zu erzeugen. Fleisch und andere tierische Erzeugnisse von Betrieben, die auf zugekauftes Futter verzichten, erfreuen sich bei den Verbrauchern wachsender Beliebtheit, da die bessere Rückverfolgbarkeit der Futtermittel als Qualitätsmerkmal bewertet wird.

Die Landwirtschaft steht vor großen Herausforderungen:

1. Global muss sie die Ernährung einer stetig wachsenden Weltbevölkerung mit hochwertigen Lebensmitteln sicherstellen. Dabei sollen negative Auswirkungen auf die Umwelt vermieden werden.
2. Innerhalb Europas bedingt die Liberalisierung des Agrarmarktes erhöhte Anforderungen an die Wettbewerbsfähigkeit der dort wirtschaftenden landwirtschaftlichen Betriebe.
3. Der deutsche Verbraucher erwartet, Nahrungsmittel höchster Qualität günstig einkaufen zu können.

Vor diesem Hintergrund ist der Einsatz von Stickstoffdüngern von zentraler Bedeutung:

Die bedarfsgerechte Ernährung der landwirtschaftlichen Kulturpflanzen mit Stickstoff ist Voraussetzung für die Erzeugung hoher Erträge von guter Qualität zu tragbaren Kosten und für den Erhalt einer wettbewerbsfähigen Landwirtschaft. Aber auch unter Umweltgesichtspunkten ist, wie Ökobilanzen zeigen, der Einsatz von Stickstoffdüngern positiv zu bewerten, da sie eine ausreichende Agrarproduktion auf einer begrenzten Fläche ermöglichen. Dabei haben Mineraldünger im Vergleich zu Wirtschaftsdüngern und organischen Reststoffen, wie Kompost und Klärschlamm, einen entscheidenden Vorteil: der Stickstoff ist sofort pflanzenverfügbar und kann gezielt, und damit verlustarm, den Pflanzen zugeführt werden. Mineralische Stickstoffdünger sind daher ein wichtiger Baustein einer nachhaltigen Landwirtschaft.

Quellen, Belegstellen und weiterführende Literatur

Appl, M. (1997): Ammonia, Methanol, Hydrogen, Carbon Monoxide – Modern Production Technologies. Hrsg.: ‚Nitrogen‘, British Sulphur Publishing, London, UK.

Avery, A. A. (1999): Infantile methaemoglobinemia: re-examining the role of drinking-water nitrates. *Environmental Health Perspectives* 107, S. 7.

Bach, M. und Frede, H.-G. (2005): Methodische Aspekte und Aussagemöglichkeiten von Stickstoff-Bilanzen.

Baumgärtel, G.; Engels, Th. und Kuhlmann, H. (1989): Wie kann man die ordnungsgemäße N-Düngung überprüfen? *DLG-Mitteilungen* 9, 472-474.

Brentrup, F. (2003): Life Cycle Assessment to Evaluate the Environmental Impact of Arable Crop Production. Cuvillier Verlag, Göttingen, ISBN 3-89873-662-8.

Döhler, H.; Dämmgen, U.; Eurich-Menden, B.; Osterburg, B.; Lüttich, M.; Berg, W.; Bergschmidt, A.; Brunsch, R. (2002): Anpassung der deutschen Methodik zur rechnerischen Emissionsermittlung an internationale Richtlinien sowie Erfassung und Prognose der Ammoniak-Emissionen der deutschen Landwirtschaft und Szenarien zu deren Minderung bis zum Jahre 2010. Abschlussbericht im Auftrag von BMVEL und UBA. UBA-Texte 05/02.

EC (1995): Opinion on Nitrate and Nitrite. EC Scientific Committee for Food, Annex 4 to Document III/5611/95: CS/CNTM/NO3/20-FINAL, October 1995, Brüssel.

Gömann, H.; Kreins, P.; Möller, Ch. (2004): Impact of nitrogen reduction measures on nitrogen surplus, income and production of German agriculture. In: *Water Science and Technology* 49/3 (2004), p. 81-90

IPCC (2001): Third Assessment Report – Climate Change 2001. IPCC Secretariat, c/o World Meteorological Organization, CH-1211 Genf 2, Schweiz. <http://www.ipcc.ch/>

Jenssen, T. K. und Kongshaug, G. (2003): Energy consumption and greenhouse gas emissions in fertiliser production. *Proceedings* 509, International Fertiliser Society, York, UK. ISBN 0-85310-145-0.

KTBL (2005): Faustzahlen für die Landwirtschaft. Darmstadt.

Ledgard, St. F. (2001): Nitrogen cycling in low input legume-based agriculture, with emphasis on legume/grass pastures. *Plant and Soil* 228, 43-59.

Smil, V. (1999): Nitrogen in crop production: an account of global flows. *Global Biogeochemical Cycles*, 13, 647-662.

Smil, V. (2001): *Enriching the Earth*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.