
1 Einleitung und Problemstellung

Stickstoff ist in der agrarischen Produktion wie auch in naturnahen Ökosystemen weltweit der meist wachstumsbegrenzende Nährstoff. Nebenprodukte von Stickstoffumsatzvorgängen können nachhaltig die Umweltqualität mindern. Dieses Problem kann nur gelöst werden, wenn ein ressourcenschonender Einsatz von Stickstoffdüngern praktiziert wird, der zum richtigen Zeitpunkt genau die Menge an Nährstoff bereitstellt, die die aufwachsende Kultur benötigt. Eine Optimierung der N-Düngung im Hinblick auf den Ertrag und das Ökosystem ist nur möglich, wenn die Verfügbarkeit des Bodenstickstoffes ermittelt werden kann. Neben dem mineralischen Stickstoff muss auch die zu erwartende Stickstoffmineralisation in die Düngerbedarfsprognosen einbezogen werden. Der größte Unsicherheitsfaktor liegt hier in der möglichst präzisen Vorhersage der Stickstoffmenge, die im Zuge von Mineralisationsprozessen aus dem Boden nachgeliefert werden kann.

Nach wie vor stellt sich eine exakte Quantifizierung der Stickstoffumsetzungen als Hauptproblem dar. Auf der einen Seite erschweren die im Boden gleichzeitig ablaufenden Prozesse wie Denitrifikation, Immobilisation, Mineralisation und Auswaschung erheblich die Voraussagen. Auf der anderen Seite werden die im Boden stattfindenden Mineralisations- und Immobilisationsprozesse durch Mikroorganismen gesteuert und somit im wesentlichen durch dieselben Faktoren modifiziert, die auch die mikrobielle Biomasse und deren Aktivität beeinflussen. Zu den wichtigsten Einflussgrößen auf den tatsächlichen Umfang der N-Mineralisation zählen das Makroklima bzw. die Witterungsbedingungen, Bodeneigenschaften, Düngungsmaßnahmen, Bodenbearbeitung, Fruchtfolge sowie Kulturarten und deren unterschiedlicher N-Bedarf mit ihrem unterschiedlichen N-Aufnahmeverhalten.

In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Untersuchungen über die N-Nachlieferung von Böden durchgeführt, aber die Unkenntnis über die N-Umsetzungsprozesse während der Vegetationsperiode erschwert eine Prognose über die Größenordnung der N-Mineralisation. Welchen Einfluss Pflanzen selbst auf die N-Umsetzungsprozesse haben ist in diesem Zusammenhang nur wenig untersucht worden, und soll Ziel dieser Arbeit sein.

2 Literaturübersicht

2.1 Vorkommen von Stickstoff im Boden

2.1.1 Organisch gebundener N

Stickstoff liegt bis zu 90-95% in organischen Bindungsformen vor, davon zu 5-10% als Aminosucker, zu 20-40% als Aminosäuren nach Hydrolyse mit 6 N HCl und zu 1-7% als Nucleinsäurebasen-N (SCHEFFER et al. 2002). Der Rest ist im Wesentlichen unbekannt, wahrscheinlich eingebunden in Huminstoffe mit hohem Polymerisationsgrad. Zur organischen Substanz werden Huminstoffe, Vegetationsrückstände, Biomasse und abgestorbene Mikroorganismen gezählt (BLUME 1992). Der in organischem Material gebundene N stellt einen großen N-Vorrat dar, der von großer Bedeutung sein kann, wenn der Stickstoff mobilisiert und für Pflanze und Bodenmikroorganismen verfügbar gemacht werden kann. 1-3% des organischen Boden-N werden jährlich mineralisiert, das bedeutet 8 bis 120 kg N ha⁻¹ (BUNDY und MEISINGER 1994).

Bezüglich der Mineralisierbarkeit wird die organische Substanz in eine vollständig, bzw. schnell mineralisierbare und eine weitgehend stabile, nur schwer umsetzbare Fraktion eingeteilt. Bei dem vollständig mineralisierbaren N-Anteil von etwa 20-45% handelt es sich vor allem um Aminosäure-N und Aminosucker-N (BARBER 1995, MENGEL 1991). Der Anteil dieser Fraktion am Gesamtgehalt organischer Substanz ist entscheidend für die N-Nachlieferung im Boden (HAIDER und GROBLINGHOFF 1990).

2.1.2 Anorganisch gebundener N

Anorganisch gebunden liegt N in der Bodenlösung als NO₃⁻ und NH₄⁺ vor (MENGEL 1991). Aus diesem leicht löslichen, austauschbaren N-Pool decken die Pflanzen ihren N-Bedarf. Weiterhin handelt es sich dabei um mikrobiell direkt verwertbare N-Bindungsformen, die, vor allem NO₃⁻, aufgrund ihrer Löslichkeit verlagerungsgefährdet sind.

Neben diesem pflanzenverfügbaren, austauschbaren N_{min} liegen im Boden weitere beachtliche Mengen an anorganisch gebundenem Stickstoff in Form von nicht austauschbarem fixiertem NH₄-N vor. Die NH₄⁺-Fixierung erfolgt vor allem in

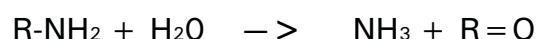
Vermiculit- und Illitreichen Tonböden. Die Größenordnung des nicht austauschbaren $\text{NH}_4\text{-N}$ beziffern SCHERER und MENGEL (1979) in der bearbeiteten Ackerkrume (0-30 cm) auf 300-1200 kg N/ha.

2.2 N-Umsetzungsprozesse

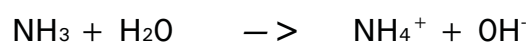
2.2.1 Mineralisation

Der im Boden organisch gebundene Stickstoff wird bei der Mineralisation durch verschiedene Mikroorganismen zu mineralischer Form umgewandelt. Die jährliche Mineralisationsrate liegt bei 1 bis 5% des organischen Stickstoffs. Für Mineralböden entspricht das einer Menge von 40 bis 120 kg N/ha (AMBERGER 1996). Die Mehrzahl der Mikroorganismen und auch Pilze sind befähigt, organische Substanz abzubauen. Die Mikroorganismen benötigen die organische Substanz für die Atmungsenergie und den Stickstoff, Kohlenstoff und andere Nährelemente für die Zellsynthese. Die N-Mineralisation wird in die Teilprozesse der Ammonifikation und der anschließenden Nitrifikation unterteilt.

Der erste Schritt ist die N-Mineralisierung oder **Ammonifikation**. Diese Hydrolyse wird katalytisch durch Enzyme zahlreicher heterotropher Mikroorganismen (Bakterien, Pilze, Protozoen) gesteuert.



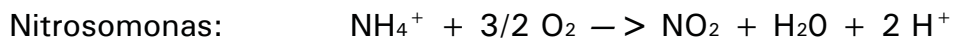
Das dabei an den Boden abgegebene NH_3 reagiert mit dem Bodenwasser:



Die Ammonifikation kann aerob und anaerob stattfinden (BECK 1983). Die ammonifizierenden Mikroorganismen sind im Wesentlichen vom Vorhandensein organischer N-Verbindungen und von der Bodenfeuchte abhängig. Weiterhin sind Ammonifikanten relativ unempfindlich gegenüber niedrigen pH-Werten im Boden. Ihr Temperaturoptimum liegt bei ca. 35°C (BECK 1983).

Unmittelbar nach der Ammonifikation erfolgt die **Nitrifikation**, durch die Ammonium, durch die aerob lebenden spezifischen Nitrifikanten, zu Nitrit und anschließend zu Nitrat oxidiert wird. Die erste Reaktion wird vorwiegend durch die chemoautotrophen, obligat aeroben Bakterien der Gattung *Nitrosomonas*

vollzogen. Die zweite Reaktion erfolgt durch Bakterien der Gattung Nitrobacter. Da diese Reaktion schneller abläuft als die erste, findet man Nitrit im Boden meist nur in Spuren.



Optimale Bedingungen für die Nitrifikation sind die Anwesenheit von Sauerstoff, eine neutrale bis schwach saure Bodenreaktion (pH 5,5 -8,0), ein mittlerer Wassergehalt und Temperaturen zwischen 20°C und 35°C. Unter diesen Bedingungen erfolgt die Nitrifikation rasch und nahezu vollständig, so dass im Boden die Konzentration von Ammonium (NH_4^+) auch bei hoher Ammonifikationsrate gering bleibt. Unter 5°C werden nur sehr geringe Nitrat-Mengen gebildet. Maximale Nitrifikationsraten werden bei pH 6-8 erreicht, wobei die Oxidation von NH_4^+ zu NO_2^- durch die Bildung von Protonen pH-senkend wirkt. Bei pH-Werten unterhalb 4,1 ist die mikrobielle Aktivität stark vermindert, so dass praktisch keine Nitrifikation mehr stattfindet (MENGEL 1991). Unter solchen Bedingungen und bei Sauerstoffmangel kann es zu einer Anreicherung von Ammonium im Boden und in der Bodenlösung kommen.

2.2.2 Immobilisation

Die N-Immobilisation ist die Umwandlung mineralischer N-Verbindungen in organische Bindungsformen (STEVENSON 1986). Hierbei handelt es sich um leicht mobilisierbaren und somit auch um potentiell pflanzenverfügbaren N (BECK 1985). Dieser Prozess läuft entgegengesetzt zur Mineralisation. Ammonium und NO_3^- können den Pflanzen entweder kurzfristig durch Einbau in bakterielle Substanz oder aber langfristig durch Einbau in Huminstoffe als N-Quelle entzogen werden. Die Reaktionsgleichungen der bakteriellen N-Aufnahme entsprechen denen der pflanzlichen N-Aufnahme. Der Prozess wird auch N-Immobilisierung genannt. Unter N-Immobilisierung wird zusätzlich die langfristige Festlegung von N-Dünger-Ernterückständen in dauerhafte Humusbestandteile verstanden.

2.2.3 Denitrifikation

Unter Denitrifikation versteht man die Fähigkeit von Mikroorganismen, selektiv