

Der Standort bestimmt den Stickstoffhaushalt

Einsatz und Effizienz verschiedener N-Mineraldünger

Der Inlandabsatz synthetisch hergestellter Stickstoffdünger in Deutschland liegt in einem Bereich zwischen 1,6 und 1,8 Millionen Tonnen pro Jahr. Wie stark die verschiedenen Düngerformen zu Verlusten in die Atmosphäre und in das Grundwasser neigen, soll in diesem Artikel nachvollzogen werden; ebenso die unterschiedlichen Bedingungen, welche diese Prozesse beeinflussen.



Sowohl gasförmigen Stickstoffverlusten als auch der Auswaschung von Nitrat aus dem Boden kann durch geeignete Bewirtschaftungsmaßnahmen entgegengewirkt werden. Foto: landpixel

Von den verwendeten Düngerformen hatte der in Deutschland traditionell eingesetzte Kalkammonsalpeter im Jahre 2014/2015 mit zirka 35 Prozent den größten Anteil, gefolgt von Harnstoff und Ammonnitrat-Harnstoff-Lösung mit Anteilen von zirka 25 Prozent und knapp 10 Prozent. Andere Einnährstoffdünger wie Ammoniumsulfat, Ammonsulfatsalpeter, Calciumnitrat oder Kalkstickstoff hatten einen Anteil am Inlandabsatz von insgesamt 21, Mehrnährstoffdünger (NP, NK, NPK) von 9 Prozent.

Unabhängig von der eingesetzten Form, kann die Ausnutzung des Düngerstickstoffs durch die Pflanze je nach Versuch sehr stark variieren. So bewegt sich die N-Ausnutzung je nach Versuch in einem sehr weiten Bereich zwischen 25 und 85 Prozent. Ein Vergleich verschiedener N-Düngerformen ergibt häufig, dass die Ausnutzung von Ammoniumnitratdüngern besser

ist als die Ausnutzung von Harnstoff, Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösungen oder Ammoniumsulfatdüngern.

Verbesserungen der Ausbringungstechnik wie die Einarbeitung von Harnstoff oder Düngerezusätze wie Urease- oder Nitrifikationshemmstoffe wirken sich jedoch modifizierend auf die relative Vorzüglichkeit verschiedener N-Formen aus. Da zielgerichtete Maßnahmen zur Erhöhung der N-Effizienz bestimmter N-Düngerformen die Kenntnis der Umsetzung dieser N-Dünger im Boden erfordern, sollen diese im Folgenden kurz umrissen werden.

Pflanzenverfügbarkeit und N-Verluste

Auf den meisten landwirtschaftlich genutzten Böden sind Harnstoff- oder Ammoniumdünger nach ihrer Ausbringung einer schnellen Umsetzung unterworfen. So wird Harnstoff

durch das Enzym Urease zu Ammoniumcarbonat hydrolysiert, welches in $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ und verschiedene anorganische Carbonat-Spezies zerfällt. Die Hydrolyse von breitflächig ausgebrachtem Harnstoff kann innerhalb weniger Tage abgeschlossen sein. Der mit der Hydrolyse verbundene vorübergehende Anstieg des Boden-pH-Werts und das $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -Verhältnis hängen vom Ausgangs-pH-Wert im Boden und dessen H^+ -Pufferkapazität ab. In verschiedenen Arbeiten konnte nach einer Harnstoffdüngung ein pH-Anstieg im Boden von etwa 6 bis 7 auf rund 8 bis 9 ermittelt werden. Ähnliche Erhöhungen des pH-Werts wie nach Harnstoffdüngung wurden auch nach der Ausbringung Diammoniumphosphat ermittelt.

Ammonium-Dünger wirken bodenversauernd

Das aus Ammonium (NH_4^+) enthaltenden beziehungsweise Ammonium bildenden Düngern entstandene NH_4^+ unterliegt einer schnellen mikrobiellen Umsetzung und wird über Nitrit zu Nitrat (NO_3^-) oxidiert, wobei zwei Protonen freigesetzt werden, das heißt eine Bodenversauerung stattfindet. Dies trifft auch auf die Düngung mit Harnstoff zu, sobald dieser bis zum NO_3^- umgesetzt ist.

Normalerweise findet die Nitrifikation in allen landwirtschaftlich genutzten Böden statt, in denen eine ausreichende Belüftung sowie günstige pH- und Temperaturbedingungen gewährleistet sind. Die höchsten Nitrifikationsraten wurden zwischen 20 und 40 °C und bei pH-Werten zwischen 6 und 8 ermittelt.

Bei N-Effizienz der Düngerformen auch Umweltwirkungen beachten

Die skizzierte Umsetzung der verschiedenen N-Formen im Boden hat vielfältige Auswirkungen auf die Fruchtbarkeit des Bodens sowie den Schutz von Wasser und Luft, so in Zusammenhang mit der Versauerung des Bodens als Folge von Nitrifikation und Nitratauswaschung und der durch pH-Wert-Veränderungen beeinflussten Mineral-

stoffverfügbarkeit (insbesondere Phosphat und Mikronährstoffe).

Sowohl aus Sicht der Landwirtschaft als auch des Umweltschutzes ist eine Abschätzung der Bedeutung von verschiedenen N-Verlustpfaden, insbesondere der Emission von Ammoniak, der Emission von N_2 und Stickoxiden sowie der Nitratauswaschung von besonderem Interesse, wenn die Effizienz von verschiedenen N-Düngerformen verglichen werden soll. Im Zusammenhang mit der Pflanzenverfügbarkeit des Düngerstickstoffs interessiert schließlich auch, welche Bedeutung der biologischen N-Immobilisierung und der Ammonium-Fixierung bei der Verwendung von verschiedenen N-Formen zukommen kann.

Emission von Ammoniak vor allem aus der Tierhaltung

Die Emission von Ammoniak (NH_3) wird in Deutschland zu über 90 Prozent von der Landwirtschaft verursacht, wobei der Mineraldüngung im Vergleich zur Tierproduktion ein Anteil von höchstens 15 Prozent der Emissionen zukommt. Abgesehen von dem durch die Emissionen bedingten ökonomischen Verlust für den Landwirt, trägt die Re-Deposition von Ammonium zur Bodenversauerung, zu einem Ungleichgewicht des Nährstoffangebots und zu einer Verschiebung der Artenzusammensetzung in naturnahen Ökosystemen bei.

Ammoniak-Emissionen im Feld können grundsätzlich bei der Ausbringung von allen Düngern entstehen, die Ammoniak enthalten beziehungsweise bei deren Umsetzung Ammoniak entsteht, also neben „organischen“ Düngern wie Rinder- und Schweinegülle sowie Gärückständen auch aus Mineraldüngern wie Harnstoff, Ammonnitrat-Harnstoff-Lösung, Ammoniumsulfat oder Ammoniumnitrat. In der Literatur berichtete Ammoniakverluste (Prozent der ausgebrachten N-Menge) in Abhängigkeit von der Düngerform variieren von 5 bis 60 Prozent bei Gülle, 3 bis 36 Prozent bei Harnstoff, 9 bis 16 Prozent bei Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung, 1 bis 43 Pro-

zent bei Ammoniumsulfat und 0 bis 7 Prozent bei Ammoniumnitrat. Insgesamt weist unter den synthetischen Düngern Harnstoff also das höchste Verlustpotenzial auf.

Maßnahmen zur Minderung von NH₃-Emissionen

Die Verluste sind am höchsten, wenn Harnstoff breitflächig ohne Einarbeitung ausgebracht wird. Dagegen treten bei Blattapplikation von Harnstoff nur geringe Verluste auf, was wahrscheinlich darauf beruht, dass die Pflanzen den größten Teil des applizierten Harnstoffs direkt und ohne vorherige Hydrolyse aufnehmen. Erhöhte Ammoniakverluste nach Applikation von Ammoniumsulfat treten vor allem auf kalkhaltigen Böden auf, während auf weitgehend kalkfreien Standorten nur geringe NH₃-Verluste zu erwarten sind.

Zur Verminderung der NH₃-Emissionen stehen dem Landwirt eine Reihe von sehr wirksamen Maßnahmen zur Verfügung, insbesondere

- die bedarfsgerechte N-Düngung, d.h. Abbau hoher N-Bilanzüberschüsse;
- der Verzicht auf Düngerformen mit hoher Verlustgefährdung unter spezifischen Anbau- beziehungsweise Umweltbedingungen, z.B. Harnstoff auf Dauergrünland oder Ammoniumsulfat auf Kalkböden;
- Einarbeitung von Harnstoff in den Boden;
- Einwaschung von Harnstoff in den Boden durch Niederschläge oder Beregnung;
- Verwendung von Ureasehemmstoffen;
- Verwendung spezifischer Harnstoffformulierungen wie Harnstoffphosphate, -KCl oder Harnstoff-CaCl₂.

Emission von Stickstoff und Stickoxiden

Gasförmige Stickstoffverluste erfolgen nicht nur in Form von Ammoniak, sondern auch in Form von molekularem Stickstoff (N₂) und in Form von Stickoxiden (NO, N₂O, NO_x). Die Denitrifikation ist die wichtigste Ursache für N₂-Verluste von landwirtschaftlich genutzten Flächen. Diese Verluste können nach der Ausbringung von Nitratdüngern unter Bedingungen von Wasserüberstau drastisch erhöht sein. Unter „normalen“ ackerbaulichen Bedingungen limitieren jedoch häufig andere Faktoren als die NO₃⁻-Konzentration im Boden - insbesondere der Sauerstoffgehalt und die Verfügbarkeit von Kohlenstoff - die Denitrifikation.

Normalerweise machen N₂-Verluste höchstens 10 Prozent der ausgebrachten N-Menge aus. Sie sind aber auch oft niedriger und dann von untergeordneter ökonomischer Bedeutung für den Landwirt.

Lachgasemissionen vor allem ein Umweltproblem

Sowohl die Denitrifikation als auch die Nitrifikation führen aber auch zur Emission von Stickoxiden wie Lachgas (N₂O). Die dadurch bedingten ökonomischen Verluste für den Landwirt sind zwar in der Regel gering, da N₂O jedoch zur Absorption von Wärmestrahlung und damit zur Erderwärmung beiträgt, ebenso wie zum Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre, haben erhöhte Emissionen von N₂O für die Umwelt die größte Bedeutung. Insgesamt werden der Landwirtschaft etwa zwei Drittel der vom Menschen verursachten Lachgasemissionen zugerechnet.

Das Ausmaß der Bildung und Emission von N₂O wird durch eine Vielzahl von Umweltfaktoren, wie dem O₂-Gehalt, dem C-Gehalt, dem pH-Wert und der Temperatur im Boden beeinflusst, ebenso wie durch Bewirtschaftungsmaßnahmen, insbesondere der Stickstoffdüngung, der organischen Düngung und der Bewässerung. Alle diese Faktoren verursachen eine sehr große Variabilität der N₂O-Emissionen. Im Vergleich zu ungedüngten Kontrollen wurde eine durch die Ausbringung von synthetischen N-Dün-

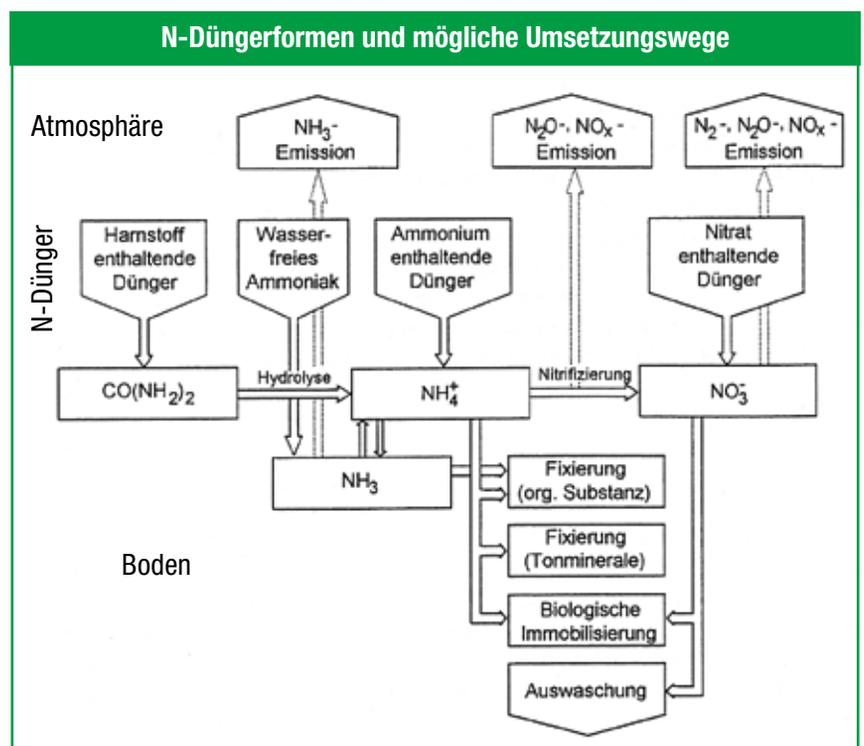
gern bedingte Erhöhung der N₂O-Emissionen um den Faktor 1 bis 15 ermittelt.

Beim Vergleich von Düngerformen wurden zwar häufig vergleichsweise hohe Emission von N₂O nach Düngung mit wasserfreiem Ammoniak ermittelt, im Übrigen führten diesbezüglich Vergleiche aber häufig nicht zu eindeutigen Ergebnissen, was mit der Vielzahl an Umweltfaktoren, die sich auf die N₂O-bildenden Prozesse auswirken, erklärt werden kann.

Unbestritten ist jedoch, dass das Ausmaß der N₂O-Emissionen mit einer Erniedrigung der N-Bilanzüberschüsse und zusätzlich durch eine effektive Hemmung der Nitrifikation (Verwendung von Nitrifikationshemmstoffen zu Harnstoff- oder Ammoniumdüngern) vermindert werden kann. Entsprechende Literaturstudien weisen auf ein Minderungspotenzial von durchschnittlich 35 Prozent hin.

Auswaschung von Nitrat bei N-Bilanzüberschüssen

Die Auswaschung von Stickstoff aus dem durchwurzelten Boden ist in Regionen mit positiver klimatischer Wasserbilanz häufig die wichtigste Ursache für Stickstoffverluste, vor allem auf Böden mit geringem Wasserhaltevermögen und beim Anbau flach wurzelnder Arten. Unabhängig von der Form des Düngers erfolgt die N-Auswaschung fast ausschließlich in Form von Nitrat, da Harnstoff, obwohl im Boden mobil, sehr schnell zu Ammonium um-



gesetzt wird und NH_4^+ an den Kationenaustauschkomplex des Bodens gebunden wird. Die Nitrifikation von Ammonium ist somit ein Schlüsselschritt in einer Folge von Prozessen, die zu N-Verlusten durch Auswaschung führen können.

Die wichtigsten Maßnahmen zur Verminderung der Nitrat- auswaschung sind die möglichst exakte Ermittlung des Düngebedarfs, die Wahl des geeigneten Düngezeitpunktes, die Einbeziehung von Tiefwurzeln in die Fruchtfolge und die möglichst durchgängige Begrünung des Standortes durch Haupt- und Zwischenfrüchte. Daneben kann die Verwendung von Harnstoff- oder Ammoniumdüngern und auch von Wirtschaftsdüngern in Kombination mit einem Nitrifikationshemmstoff (stabilisierte N-Dünger) zur Verminderung der Nitrat- auswaschung beitragen.

Die günstigsten Effekte sind hier bei durchlässigen Böden und hohen Niederschlägen zu erwarten. Voraussetzung für die Wirksamkeit dieser Maßnahme ist aber immer, dass keine Überdüngung erfolgt, weil die Hemmung der Nitrifikation nur vorübergehend ist.

Festlegung von Dünger-N und Boden-Mineralisierung

Die Verfügbarkeit des gedüngten Stickstoffs hängt auch von seiner Einbeziehung in die Mineralisierungs- und Immobilisierungsprozesse im Boden ab. Das Ergebnis dieser Prozesse, die Nettomineralisierung, kann einfach mit Hilfe von Boden- und Pflanzenanalysen abgeschätzt werden. In der Regel findet mit zunehmender Düngungshöhe eine Verminderung der Nettomineralisierung statt.

In Untersuchungen konnte wiederholt gezeigt werden, dass sowohl Nitrat als auch Ammonium geeignete Substrate für die Mikroflora des Bodens sind, wobei Mikroorganismen jedoch bevorzugt Ammonium nutzen, wenn beide N-Formen in gleichen Mengen und nicht limitiert angeboten werden. Entsprechend konnte nach Harnstoffdüngung häufig eine höhere Immobilisierung festgestellt werden als nach Nitratdüngung.

Da Nitrifikationshemmstoffe die Verweildauer von NH_4^+ im Boden erhöhen, hat die Ausbringung von Harnstoff- oder Ammoniumdüngern unter Zusatz von Nitrifikationshemmstoffen sowohl in Inkubations- als auch in Feldversuchen zu einer erhöhten biologischen N-Immobilisierung geführt. Im Vergleich zu breitflächiger Ausbringung konnte die N-Immobilisierung durch eine plazierte Ausbringung von Harnstoff erheblich vermindert werden.

Hinsichtlich verschiedener N-Formen gibt es Hinweise, dass die erhöhte Festlegung von Ammonium-N den Kornertrag dann beeinträchtigen kann, wenn das N-Angebot knapp ist und Bodenmikroorganismen mit den Pflanzen um Stickstoff konkurrieren. Bei einer höheren N-Düngung sind die N-Aufnahme oder der Ertrag jedoch kaum durch eine erhöhte Brutto-Immobilisierung von Harnstoff- oder Ammoniumdüngern beeinträchtigt.

Fixierung von Ammoniak und Ammonium

Zusätzlich zur biologischen Immobilisierung kann die Verfügbarkeit von Stickstoff infolge chemischer Fixierung durch die organische Substanz des Bodens und in die Zwischenschichten von Tonmineralen eingeschränkt werden. Es liegen jedoch keine klaren experimentellen Hinweise vor, dass die chemische Fixierung von $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ an die organische Substanz in Mineralböden die Verfügbarkeit verschiedener N-Formen wesentlich mitbestimmt.

Die Fixierung von Ammonium in Tonmineralen hängt maßgeblich vom Vorhandensein von 2:1 Tonmineralen (Dreischicht-Tonminerale) und dem Kalium-Status des Bodens ab. Die Größenordnung der NH_4^+ -Fixierung bewegt sich zeitnah nach der Düngung auf entsprechenden Böden häufig in einem Bereich zwischen 1 und 25 Prozent der applizierten N-Menge, wobei schnell ein erheblicher Teil der fixierten N-Menge wieder freigesetzt werden kann. Lediglich bei hoher Fixierungskapazität ist von einer dauerhaften Festlegung und auch einer geringeren N-Wirksamkeit von ammoni-

umhaltigen Düngern auszugehen.

Wenn also die Fixierung von NH_4^+ auf manchen Böden durchaus signifikant zu einer niedrigen Ausnutzung des Düngestickstoffs beitragen kann, so sollte dieser Prozess insgesamt doch nicht überbewertet werden, da der größte Teil der landwirtschaftlich genutzten Böden weit weniger NH_4^+ fixiert als dies in vielen Arbeiten mit ausgewählten NH_4^+ -fixierenden Böden ermittelt wurde.

Fazit: Die N-Effizienz standortangepasst verbessern

Eine effizientere Ausnutzung sowohl des aus der Düngung als auch des aus der Mineralisierung aus dem Bodenvorrat stammenden Stickstoffs ist zwingend erforderlich, um hohe Erträge auch unter Bedingungen knapper N-Zufuhr durch Düngung zu erzielen und um durch Düngung verursachte Umweltbeeinträchtigungen möglichst gering zu halten. Die Bedeutung einzelner Stickstoffverlustpfade aus landwirtschaftlich genutzten Böden wurde in den letzten Jahren intensiv untersucht.

Die in diesem Artikel aufgeführten Beispiele zeigen, dass sowohl gasförmigen Stickstoffverlusten als auch der Auswaschung von Nitrat aus dem Boden und unter Umständen auch der Stickstofffestlegung im Boden je nach Düngerform und Standortbedingungen eine unterschiedliche Bedeutung für die N-Effizienz zukommen kann, dass aber auch unter ungünstigen Standortbedingungen oder bei Verwendung von Düngern mit hohem Verlustrisiko durch geeignete Bewirtschaftungsmaßnahmen eine erhebliche Verbesserung der N-Effizienz erzielt werden kann. Die Möglichkeit, Ammoniakverluste durch Einarbeitung von verlustgefährdeten Düngern wie Harnstoff zu vermindern, ist dafür ein gutes Beispiel.

Maßnahmen, die eine Verzögerung der Nitrifikation bewirken, können zu einer Verminderung von N_2O - und N_2 -Emissionen beitragen, genauso wie zu einer Verminderung der Nitrat- auswaschung. Eine effektive Verzögerung der Nitrifikation

kann aber nicht nur N-Verluste aus dem Boden vermindern, sondern auch den Anteil von Ammonium an der Stickstoffernährung der Pflanze erhöhen und damit möglicherweise die Ertragsbildungsprozesse beeinflussen.

Prof. Franz Wiesler,
Dr. Martin Armbruster, LUFA
Speyer