

Durch Gülle gelangt –  
ebenso wie durch  
Kunstdünger – viel  
Stickstoff in den Boden  
und von dort in  
Gewässer sowie in  
die Atmosphäre.

# DIE ÜBERDÜNGTE ERDE

TEXT: KLAUS JACOB

Kein Tier, keine Pflanze und kein Einzeller kommt ohne Stickstoff aus, doch der Mensch bringt immer mehr davon in Umlauf – mit diversen Folgen für Gesundheit und Umwelt. Sönke Zaehle, Direktor am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena, untersucht den Stickstoffkreislauf und seine Rückkopplung mit dem Klima. Die Ergebnisse sind auch umweltpolitisch relevant.

Wenn die Bedeutung chemischer Elemente für das Leben ausgezeichnet würde, wäre Kohlenstoff der große Abräumer. Denn in der organischen Chemie spielt er die Hauptrolle. Stickstoff steht dagegen im Schatten. Doch diese Geringschätzung ist alles andere als gerechtfertigt. Denn ohne ihn ist kein Leben denkbar. Kein Protein, das nicht Stickstoff enthält. Jede Pflanze, jedes Tier braucht davon, um gedeihen zu können. Keine biochemische Reaktion ist ohne Stickstoff denkbar. Und wenn Menschen Fleisch oder Gemüse essen, nehmen sie – auch – Stickstoff zu sich. In seiner biologisch nutzbaren Form zirkulierte in vorindustrieller Zeit eine kaum wachsende Menge durch die Luft, den Boden, die Gewässer und die Lebewesen. In dem nahezu geschlossenen Kreislauf gab es allenfalls lokale Veränderungen. Dann hat der Mensch massiv eingegriffen, etwa

durch die Düngung von Feldern. Wie der Kreislauf durch diesen Eingriff durcheinandergerät und wie sich dies auf das Klima auswirkt, erforscht Sönke Zaehle, Direktor am Max-Planck-Institut für Biogeochemie.

Aber der Reihe nach: Obwohl Stickstoff mit 78 Prozent den Hauptbestandteil der Luft stellt, ist er als Baustoff der Biomoleküle von Natur aus rar. Denn in seiner sehr stabilen elementaren Form, wie er in der Atmosphäre zum größten Teil vorkommt, ist er für die meisten Pflanzen und Tiere nicht nutzbar. Allerdings haben Blitze die Power, ihn in eine biologisch verfügbare Form zu verwandeln – Geowissenschaftler sprechen von reaktivem Stickstoff. So hat jedes Gewitter auch einen düngenden Effekt. Doch auch manche Organismen haben im Laufe der Evolution einen Weg gefunden, an den raren Grundstoff zu gelangen: Knöllchenbakterien, die in Symbiose mit Leguminosen wie Klee, Wicke oder Sojabohne leben und an deren Wurzeln andocken, versorgen diese Pflanzen mit Stickstoffverbindungen. Als es noch keinen Kunstdünger gab, hat man daher häufig Dreifelderwirtschaft betrieben und für eine Saison Leguminosen angebaut, um den Bo-

den mit Stickstoff anzureichern. Die Erfindung des Kunstdüngers hat die Karten dann neu gemischt. Vor gut einem Jahrhundert haben die deutschen Chemiker Fritz Haber und Carl Bosch ein Verfahren entwickelt, um aus elementarem Stickstoff und Wasserstoff Ammoniak zu erzeugen, ein Vorprodukt von Kunstdünger wie Ammoniumnitrat – aber auch von Sprengstoff. Nicht nur deshalb ist das Haber-Bosch-Verfahren Fluch und Segen zugleich. Auch in anderer Hinsicht ist seine Wirkung ambivalent. Einerseits hat es zu einer landwirtschaftlichen Revolution geführt, die es erst ermöglichte, die rasch wachsende Weltbevölkerung zu ernähren. Auf der anderen Seite hat es den Stickstoffkreislauf erheblich verändert – mit weitreichenden Folgen für Ökosysteme und Gesundheit.

Wie bei fossilen Brennstoffen ist die Menge das Problem. Die Produktion von Kunstdünger ist seit dem Zweiten Weltkrieg geradezu explodiert. Um eine Vorstellung der Dimensionen zu bekommen: Das Haber-Bosch-Verfahren verschlingt rund 1,4 Prozent des Weltenergiebedarfs, weil dafür elementarer Wasserstoff, Hitze und hoher Druck erforderlich sind. Und

73



durch die synthetischen Dünger gelangen nach Sönke Zaehle Berechnungen Jahr für Jahr rund 90 bis 100 Millionen Tonnen reaktiver Stickstoff zusätzlich in den globalen Kreislauf. Und das ist noch nicht alles: Auch bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe in Kohle- und Gaskraftwerken, aber nicht zuletzt in Dieselmotoren entstehen Stickoxide, aus denen sich gesundheitsschädlicher Feinstaub bildet. Hinzu kommen Waldbrände, die einen Teil des Stickstoffs aus der Biomasse ebenfalls in Form von Stickoxiden freisetzen.

liche Nutzfläche, freisetzen. Dabei berücksichtigen die Forschenden, welche Rolle die steigende  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre, die auch das Pflanzenwachstum ankurbelt, und die Phosphordüngung spielen. Sie untersuchen auch, wie sich die Stoffkreisläufe mit dem Klimawandel ändern. Zusätzlich füttern die Forschenden das Modell mit Daten anderer Forschungsgruppen zu den menschengemachten Stickstoffemissionen etwa aus Verkehr und Industrie. So erhalten sie einen genauen Überblick, wo wie viel reaktiver

Stickstoff in welchen Mengen ansammelt. Bei den beiden Einbahnbeobachtungen soll es aber nicht bleiben. „In einem großen EU-Projekt arbeiten wir zusammen mit internationalen Kollegen daran, den gesamten Stickstoffkreislauf zu modellieren“, sagt Sönke Zaehle. Besonders knifflig sind dabei die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Teilen des Erdsystems, also den Ozeanen und anderen Gewässern, den Landökosystemen sowie der Atmosphäre, aber auch die sehr unterschiedlichen Lebensdauern der global relevanten Stickstoffverbindungen – die von Sekundenbruchteilen bis zu Jahrhunderten reichen können.

## Folgen für Ökologie und Gesundheit

So vielfältig die atmosphärische Chemie von Stickstoff ist, so divers sind die schädlichen Wirkungen, die jede seiner Verbindungen nacheinander entfalten kann. Sie verändern Ökosysteme, lassen etwa Gewässer umkippen, schädigen das Trinkwasser und die Atemwege, beeinflussen das Klima und zerstören die Ozonschicht. Es verhält sich also mit dem vom Menschen ins Spiel gebrachten Stickstoff wie mit Goethes Zauberlehrling, der dachte, mit einem selbstständigen Besen eine pfiffige Idee zu haben, das außer Kontrolle geratene Gerät dann aber nicht mehr stoppen konnte.

Da ist zunächst die Wirkung auf die Gesundheit: Eine Studie der Organisation Environmental Health Analytics (LLC) in Washington hat ergeben, dass Jahr für Jahr etwa 100 000 Menschen vorzeitig durch Stickoxide sterben, wobei solche Analysen infolge einer Vielzahl von Einflussfaktoren einigen Unsicherheiten unterliegen. Wegen der Gesundheitsschäden gibt es für die Belastung der Luft mit Stickoxiden und Feinstaub Grenzwerte. Wenn die überschritten wurden, mussten Dieselfahrzeuge in manchen deutschen Städten bereits stehen bleiben.

Aber warum schadet reaktiver Stickstoff der Umwelt, wenn er doch als Dünger



Bringt die Zyklen in Form: Sönke Zaehle und sein Team untersuchen die Rückkopplungen zwischen den Kreisläufen von Stickstoff, Kohlenstoff und Phosphor sowie dem Klima.

Zu ermitteln, wie viel Stickstoff sich im Umlauf befindet, wo er sich anreichert und in welchen Mengen er zwischen Bio-, Geo- und Atmosphäre hin und her fließt, erfordert einen erheblichen Aufwand. Den ganzen Kreislauf in einem Modell zu beschreiben und am Computer zu simulieren, ist so kompliziert, dass Sönke Zaehles Team das Problem aufgeteilt hat: in den Weg aus den Ökosystemen in die Atmosphäre einerseits und den umgekehrten Weg andererseits. Um zu ermitteln, welche Mengen der verschiedenen Stickstoffverbindungen aus den diversen Quellen in die Luft gelangen, teilen die Forschenden die Erde in Gitterzellen von etwa 50 Kilometer Kantlänge auf. Für jedes dieser Felder errechnet ihr Modell, wie viel Stickstoff die dortigen Ökosysteme, also Wald, Grasland oder landwirtschaft-

Stickstoff in die Atmosphäre entweicht. Dabei kommen sie zu demselben Ergebnis wie Studien anderer Gruppen, die aus der weltweiten Verteilung von Ammoniak, Stickoxiden und Lachgas auf die Emissionen der Substanzen schließen: „Der Mensch hat den Input des Stickstoffkreislaufs seit Beginn der industriellen Revolution mehr als verdoppelt.“ Das ist ein massiver Eingriff, zumal es über viele Jahrtausende offenbar nur geringe global bedeutende Änderungen gab.

Auch den Eintrag von Stickstoff aus der Luft in Gewässer, Böden und Ökosysteme berechnen die Forschenden aus Jena mit Modellen, welche auch das lokale Klima berücksichtigen. Dafür verwenden sie Daten, wie sich Stickstoffverbindungen weltweit in der Atmosphäre verteilen. Die Ergebnisse zeigen ihnen, wo sich der



## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

Natürlicherweise wandeln hauptsächlich Gewitter und Knöllchenbakterien elementaren Stickstoff in eine Form um, in der Pflanzen dieses lebenswichtige Element aufnehmen können.

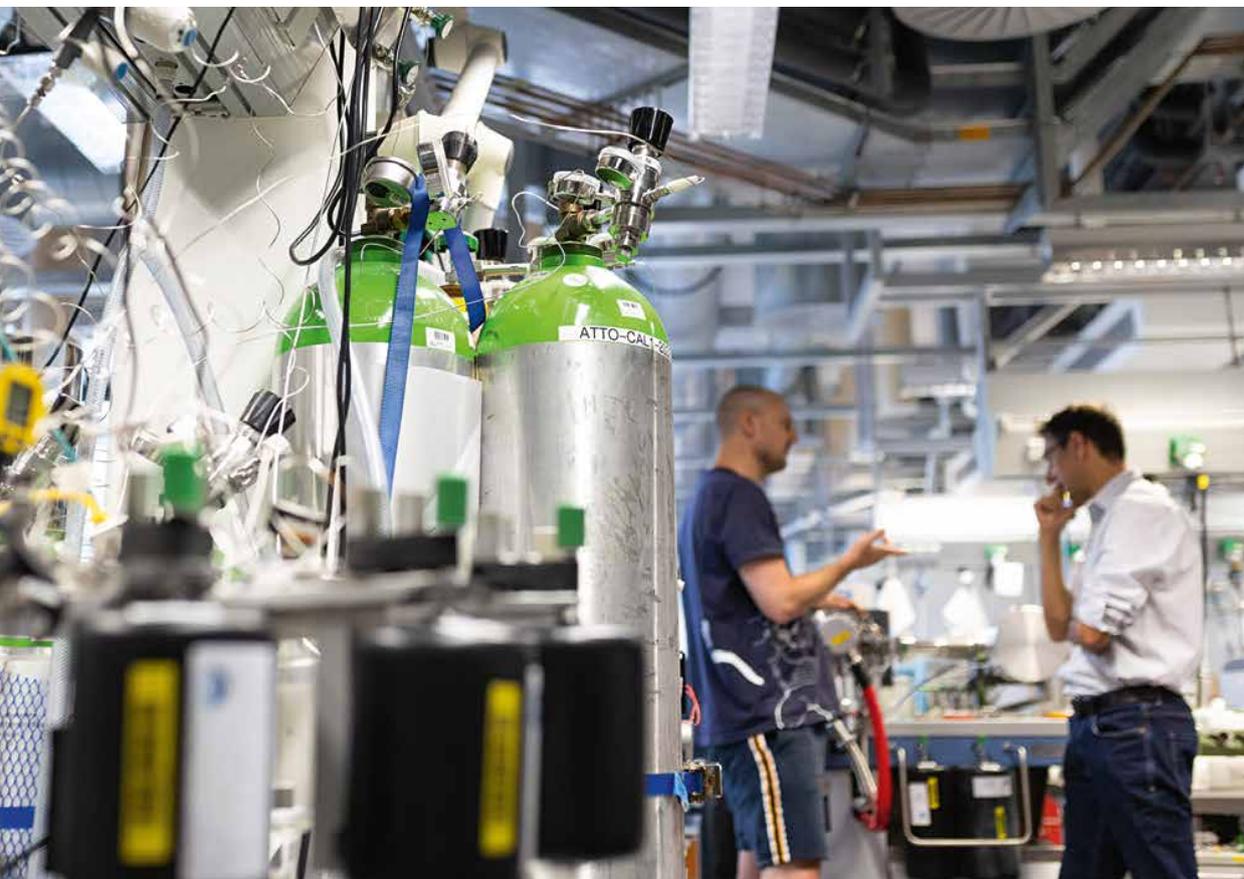
Vor allem durch Düngung und die Verbrennung fossiler Brennstoffe hat der Mensch die Stickstoffmenge verdoppelt, die sich im Kreislauf zwischen Atmosphäre, Gewässern, Boden und Landökosystemen befindet.

Stickstoffverbindungen stimulieren das Pflanzenwachstum, ihr Überschuss reduziert jedoch die Artenvielfalt, schadet der Gesundheit sowie der Ozonschicht und wirkt sich auf das Klima aus.

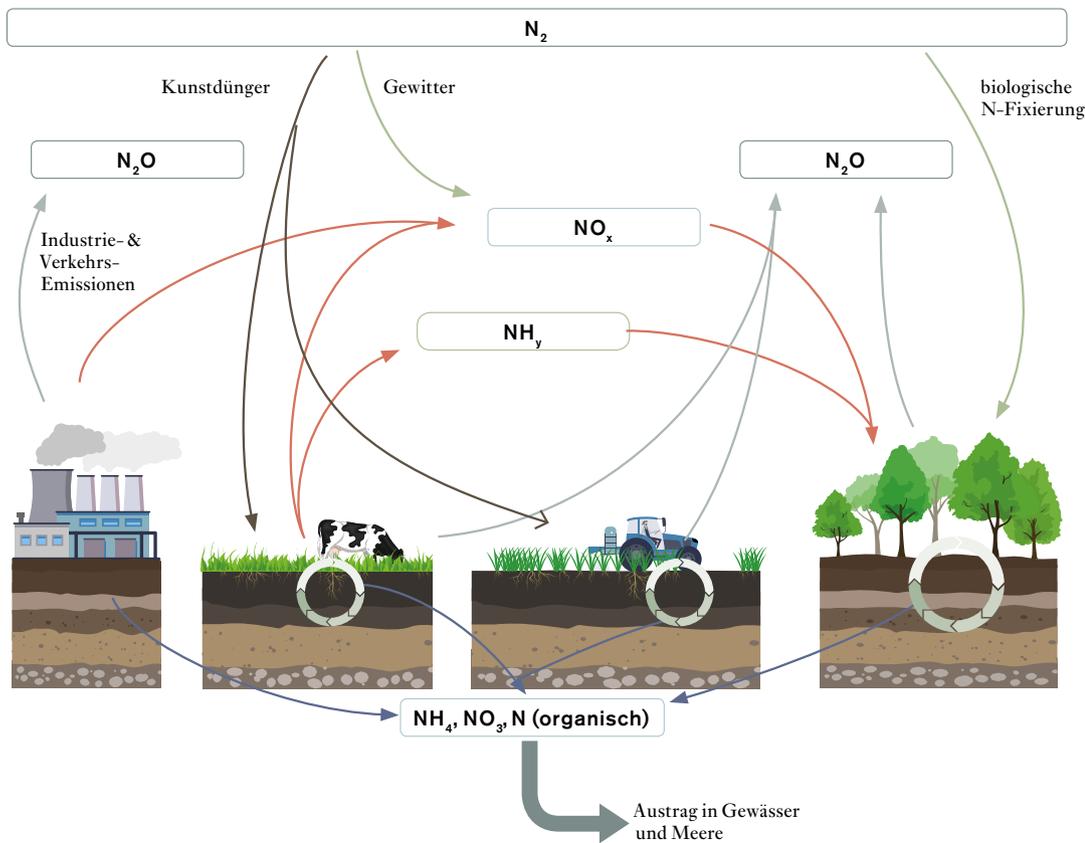
gute Dienste leistet? Die Antwort ist immer wieder Thema für Medien und Politik. Die Pflanzen können einen Teil der großen Düngermengen nicht aufnehmen, auch weil der Regen ihn auswäscht, ehe das Wachstum Fahrt aufnimmt. So gelangt Stickstoff vor allem in Form von Nitrat in Flüsse und Grundwasser und schließlich ins Meer. Nitrat kann im Körper jedoch in das verwandte Nitrit umgewandelt werden, das der Gesundheit schadet. Auch für Trinkwasser gelten deshalb Grenzwerte. Einige Trinkwasserbrunnen mussten in Deutschland wegen einer zu hohen Belastung bereits stillgelegt werden. Das Problem ist vor allem in Norddeutschland akut, wo es große Mastbetriebe mit einer starken Gülleproduktion gibt.

Die Überdüngung schadet zudem den natürlichen Ökosystemen. Denn nicht alle Pflanzen mögen viel Dünger. Die Vegetation, die auf kargen

Böden gedeiht, leidet unter der ungewollten Gabe. Dabei ist hier die Artenvielfalt besonders groß, vielleicht weil sich die Spezialisten etwas einfallen lassen mussten, um mit Stickstoffmangel leben zu können. Sogar fleischfressende Pflanzen wie die Venusfliegenfalle sind entstanden, die ihren Stickstoffbedarf durch das Fangen von Insekten decken. Diese Vielfalt droht infolge der Düngerschwemme zu verschwinden. In überdüngten Regionen dominieren wenige, stickstoffliebende Arten wie Brennnessel oder Löwenzahn. Wenn aber Pflanzenarten verschwinden, dann verschwinden auch zahlreiche Tiere, die auf die Hungerkünstler angewiesen sind. Genauso schädlich ist die Überversorgung mit Nährstoffen für Flüsse und Seen. Denn diese Eutrophierung führt zu einer Überproduktion an Biomasse, in deren Folge die Ökosysteme schlimmstenfalls umkippen.



Treibhausgasen auf der Spur: Heiko Moossen (links) und Sönke Zaehle erforschen die Zu- und Abnahme von Lachgas, aber auch Kohlendioxid und Methan in der Atmosphäre und analysieren zu diesem Zweck mit Massenspektrometern deren Isotopenverhältnis. Dabei dienen ihnen die reinen Substanzen aus Gasflaschen als Referenz.



Elementarer Stickstoff  $N_2$  wird durch Gewitter, biologische Fixierung durch Bakterien oder die Umwandlung in Kunstdünger in eine reaktive Form wie Stickoxide  $NO_x$  gebracht, die Pflanzen verwerten können. Im Stickstoffkreislauf mischen zudem die Stickoxide  $NO_x$  und  $N_2O$  aus Industrie und Verkehr sowie die Emissionen von  $NO_x$ ,  $N_2O$  und  $NH_3$  aus der Landwirtschaft mit.

Auch auf das Klima wirkt sich die Überversorgung mit Stickstoff aus. Im Stickstoffkreislauf entsteht unweigerlich Lachgas, ein starkes Treibhausgas. Denn Bodenorganismen setzen Nitrat unter Sauerstoffabschluss zu elementarem Stickstoff und Lachgas um. Deshalb gelangt nach jedem Regen, wenn Wasser dem Erdreich die Sauerstoffzufuhr abschneidet, besonders viel Lachgas in die Atmosphäre. Sein Treibhauseffekt ist fast 300-mal so hoch wie der von Kohlendioxid. Und Lachgas bleibt im Schnitt rund 110 Jahre in der Atmosphäre, zehnmal länger als Methan. Die Lachgaskonzentration in der Atmosphäre hat seit 1750 um 33 Prozent zugenommen, wie Zaehles Team berechnet hat. Analysen verschiedener Forschergruppen, darunter auch der Gruppe von Sönke Zaehle, stimmen darin überein, dass der größte Teil davon aus der Landwirtschaft stammt – in Deutschland sind es nahezu 80 Prozent.

Doch nicht nur als Lachgas beeinflusst Stickstoff das Klima, auch andere Stickstoffverbindungen mischen da

mit, weil sie das Pflanzenwachstum ankurbeln. Das entzieht der Atmosphäre Kohlendioxid, was einen kühlenden Effekt hat. Zudem bilden Stickoxide in Bodennähe Aerosole, die zum Feinstaub zählen. Die schirmen das Sonnenlicht ab und wirken somit ebenfalls kühlend. All diese teils gegenläufigen Effekte erfasst Zaehles Team derzeit in Modellen, um so die Gesamtwirkung von Stickstoff auf das Klima abzuschätzen. Die Berechnungen werden dadurch erschwert, dass Stickoxide sehr inhomogen verteilt sind: Über Ballungsräumen erreichen sie hohe Werte, über großen Waldgebieten dagegen niedrige. „Erste Analysen deuten darauf hin, dass sich die Effekte von reaktivem Stickstoff, die den Klimawandel verstärken oder ihm entgegenwirken, mehr oder weniger kompensieren“, sagt Zaehle.

Ein weiterer Schaden, den Lachgas neben seiner Treibhauswirkung in der Atmosphäre anrichtet, wird dagegen nicht durch einen gegenläufigen Effekt anderer Stickstoffverbindungen

begrenzt: Das Gas nagt auch an der Ozonschicht in der Stratosphäre, die uns vor schädlicher UV-Strahlung schützt. Es gelangt in diese großen Höhen, weil es in der unteren Atmosphäre ausgesprochen reaktionsträge ist. In der Stratosphäre spaltet die kurzwellige Strahlung der Sonne die Lachgasmoleküle, und die Abbauprodukte attackieren das Ozon.

## Tiersektor als größte Lachgasquelle

Bei all den schädlichen Wirkungen von reaktivem Stickstoff liegt es auf der Hand, dass die Nationen gegensteuern müssen. Doch bisher ist zu wenig geschehen – vor allem in puncto Überdüngung. Denn Dünger ist billig, genauso wie die Entsorgung von Gülle auf Feldern. Zudem stehen Landwirte unter Druck, billig zu produzieren, und die Politik greift selten beherzt ein, weil sie den Bauern nicht mit hohen Auflagen die Arbeitsgrundlage entziehen will. Zwar ging

die Menge an freigesetztem reaktivem Stickstoff in Europa, vor allem dank EU-Vorgaben, in den letzten vierzig Jahren zurück. Doch in Asien, Afrika, Südamerika und sogar in den USA wächst sie. Nicht zuletzt weil in Ländern wie China der Fleischkonsum steigt. Daher wird immer mehr Kunstdünger für die Futtermittelproduktion eingesetzt, und es wird immer mehr Gülle entsorgt. „Der Tiersektor ist die größte Lachgasquelle“, sagt Zaehle. Auch die Aquakultur, die inzwischen rund die Hälfte der weltweit konsumierten Fische produziert, dreht am Stickstoffkreislauf. Sie ist nicht nur der am schnellsten wachsende Sektor der Lebensmittelproduktion, sondern auch der am stärksten wachsende Lachgasemittent. Gegensteuern könnte man hier etwa durch Aquaponik, ein Verfahren, das die Exkremente aus der Fischzucht als Nährstoff für Pflanzen nutzt.

## EU-Klage gegen die Bundesregierung

Selbst rückläufige Zahlen in Europa sind kein Grund, sich zurückzulehnen. Beispiel Deutschland: Nach Angaben des Statistischen Bundesamts ging der Einsatz von Stickstoffdünger zwischen 2000/2001 und 2020/2021 von 1,85 Millionen Tonnen auf 1,27 Millionen Tonnen zurück. Das reicht aber nicht aus. Wie es beim Sachverständigenrat für Umweltfragen SRU heißt, war 2009 nahezu die Hälfte der natürlichen und naturnahen terrestrischen Ökosysteme in Deutschland überdüngt. Und immer noch überschreiten die Nitratkonzentrationen im Grundwasser an etwa 17 Prozent der Messstellen den Grenzwert von 50 Milligramm pro Liter, den die Nitratrichtlinie der EU vorgibt. Die EU-Kommission klagte deshalb 2016, und der Europäische Gerichtshof gab ihr zwei Jahre später recht. 2021 hat die Bundesregierung daraufhin die Düngeverordnung verschärft. So dürfen Landwirte in nitratbelasteten Gebieten um 20 Prozent weniger Dünger ausbringen und müssen längere Sperrfristen im Herbst und im Winter einhalten. Doch noch immer

gilt als Obergrenze für die Menge an Stickstoffdünger: 80 Kilogramm pro Hektar und Jahr.

„Das ist für viele Standorte deutlich zu viel“, sagt Sönke Zaehle. Um eine Vorstellung von der Menge zu geben, nennt er eine andere Zahl: Ein natürliches Ökosystem, etwa ein Wald, setzt durchschnittlich etwa 120 Kilogramm Stickstoff pro Hektar und Jahr um. Im Vergleich dazu sind 80 Kilo zusätzlich viel. Trotzdem schimpfte der Präsident des Deutschen Bauernverbands, Joachim Rukwied, über die „fachlich mangelhafte Verordnung, die bedarfsgerechte Düngung in nitratsensiblen Gebieten verbietet“. Das ständige Draufsatteln bei gesetzlichen Auflagen, meinte er, ignoriere die Belastbarkeit der Höfe. Die Probleme bei der Umsetzung sieht auch Sönke Zaehle. Dennoch gehen ihm und seinen Kollegen die jetzigen Bemühungen nicht weit genug. Er begrüßt daher eine Resolution der UN-Umweltorganisation, den Überschuss an Stickstoff bis zum Jahr 2030 um die Hälfte zu reduzieren.

Helfen könnte dabei mehr ökologischer Landbau, da hier kein Kunstdünger sowie Gülle nur streng geregelt ausgebracht werden dürfen. So wird der Stickstoff in dem geschlossenen Kreislauf effizienter genutzt, kann aber zu geringeren Erträgen als im

konventionellen Landbau führen. Auch viele konventionell arbeitende Landwirte versuchen inzwischen, Überdüngung zu vermeiden, indem sie den Stickstoffgehalt des Bodens messen und die Menge des Düngers entsprechend anpassen. Und wir können alle dazu beitragen, dass weniger Stickstoff in Umlauf kommt. Denn Überdüngung in der Landwirtschaft ist auch eine Folge unserer Ernährung. Sie ließe sich auch verringern, indem wir weniger Lebensmittel wegwerfen, Bioprodukte verwenden oder weniger Fleisch essen. Dann müsste weniger Kunstdünger eingesetzt werden, und es gäbe weniger Gülle.

77



Stickstoffrecycling: In der Aquaponik werden Pflanzen mit den Exkrementen von Fischen gedüngt, sodass die großen Stickstoffmengen, die in einer Fischzucht anfallen, nicht zur Überdüngung von Gewässern beitragen.



FOTO: SHUTTERSTOCK/TANAKORN SAR