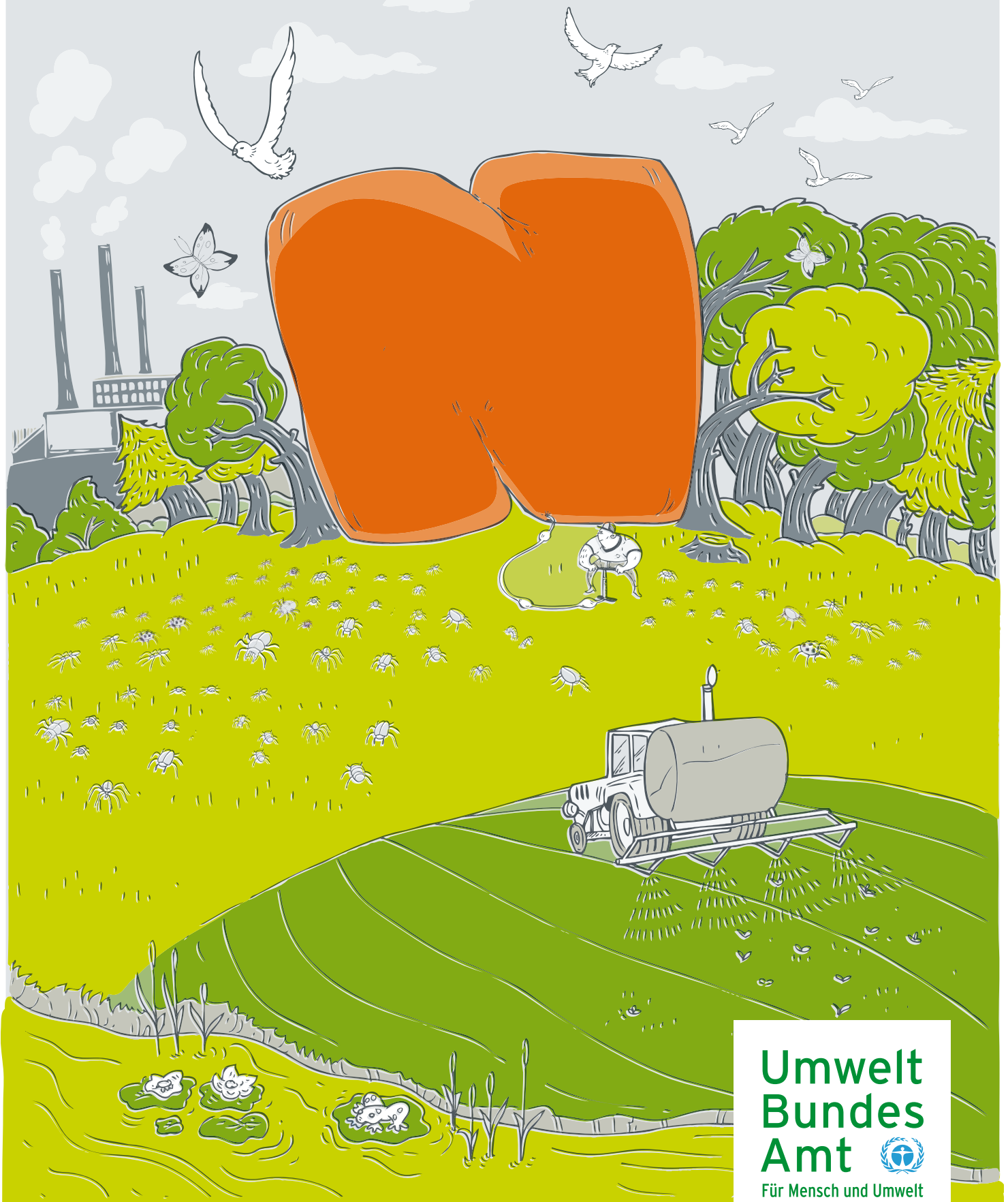


STICKSTOFF – ZUVIEL DES GUTEN?

Überlastung des Stickstoffkreislaufs zum Nutzen
von Umwelt und Mensch wirksam reduzieren



**Umwelt
Bundes
Amt** 
Für Mensch und Umwelt

INHALT

[illegible]

1 STICKSTOFF – NÜTZLICH, SCHÄDLICH, WICHTIG

Seite 3

2 STICKSTOFF-FORMEN UND -VORRÄTE

Seite 4

3 KEIN LEBEN OHNE STICKSTOFF

Seite 7

[illegible]

4 VOM MANGEL ZUM ÜBERSCHUSS

Seite 9

5 STICKSTOFF ALS SCHADSTOFF

Seite 13

6 PROBLEM ERKANNT - UND WIE WEITER?

Seite 30

[illegible]

7 WELTWEITE AKTIVITÄTEN ZUR LÖSUNG DES STICKSTOFF- PROBLEMS

Seite 36

[illegible]

LITERATUR

Seite 38

GLOSSAR

Seite 40

IMPRESSUM

Seite 42

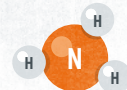
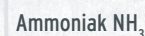
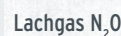
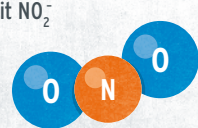
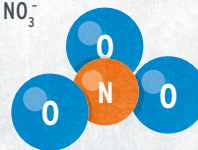
2 STICKSTOFF- FORMEN UND -VORRÄTE

[illegible]

Der Gesamtvorrat unseres Planeten an Stickstoff bleibt immer gleich. Was sich ändern kann, sind die chemischen Formen, in denen das Element auftritt. Diese sind entscheidend für die Verteilung des Stickstoffs zwischen den Umweltmedien und für die Wirkungen auf Mensch und Umwelt.

Um zu verstehen, warum ein Teil des irdischen Stickstoffvorrates uns Sorgen bereitet, muss man sich mit den Formen, in denen Stickstoff (N) auftritt, vertraut machen. Etwa 50 % des Stickstoffvorrats unseres Planeten befindet sich in Form gasförmiger Stickstoffverbindungen in der Atmosphäre, die zu etwa 78 % aus Stickstoff besteht [3]. Der allergrößte Teil (mehr als 99 %) davon ist elementarer Stickstoff (N_2). Elementarer Stickstoff besteht aus zwei sehr stabil miteinander verbundenen Stickstoffatomen. Daher ist N_2 kaum reaktiv und kann von den meisten Lebewesen nicht genutzt werden. Ganz anders verhält sich der so genannte „reaktive Stickstoff“. Dieser ist in der Lage, vielfältige Bindungen mit organischen und anorganischen Stoffen einzugehen und sich von einer Form in eine andere umzuwandeln. Alle Lebewesen brauchen reaktiven Stickstoff als Baustein für Eiweiße und die Erbsubstanz DNS. Zudem beeinflusst er physikalische und chemische Prozesse in Böden, Gewässern und Atmosphäre, die ihrerseits Wirkungen auf alle Lebewesen, einschließlich uns Menschen, haben.

BOX 1: REAKTIVER STICKSTOFF



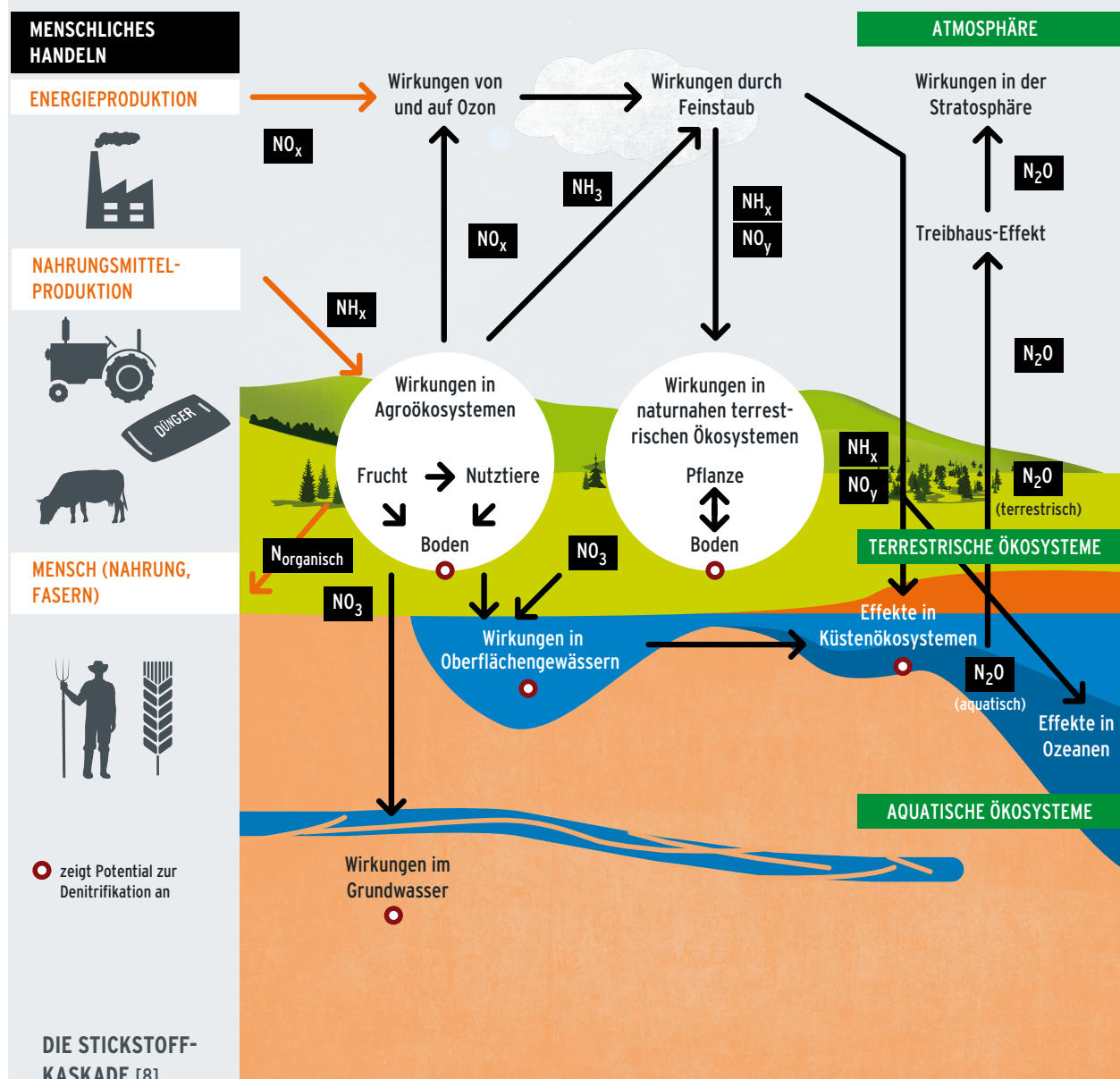
Zum reaktiven Stickstoff zählen u. a. folgende Verbindungen:

- Nitrat (NO_3^-), Nitrit (NO_2^-) und Lachgas (N_2O) (oxidierte anorganische Stickstoffverbindungen)
- Ammoniak (NH_3) und Ammonium (NH_4^+) (reduzierte anorganische Stickstoffverbindungen)
- Organisch gebundener Stickstoff (N_{org}), der sich vor allem in Eiweißen (Aminosäuren) lebender und abgestorbener Organismen findet [4].

Nur wenige natürliche Prozesse wandeln elementaren Stickstoff aus der Atmosphäre in „reaktive“ Formen um. So wird z. B. elementarer Stickstoff durch Blitzschläge zu Stickstoffoxiden (NO_x) oxidiert. Einige Bakterien können Stickstoff binden und so für Pflanzen verfügbar machen. Am bekanntesten sind die Knöllchenbakterien, die in Gemeinschaft mit Schmetterlingsblütlern (z. B. Hülsenfrüchte wie Erbse, Lupine, Klee) leben und an deren Wurzeln teilweise sichtbare Verdickungen („Knöllchen“) bilden.

Der Mensch hat durch seine Aktivitäten die Rate der Umwandlung elementaren Stickstoffs in reaktive Verbindungen stark erhöht. Diese Umwandlung geschieht zum einen - unter hohem Energieaufwand - bei der Herstellung von Düngemitteln. Zum anderen wird bei der energetischen Nutzung fossiler und nachwachsender Rohstoffe reaktiver Stickstoff in die Atmosphäre emittiert. Bei diesen Verbrennungsprozessen gelangt nicht nur der in den Brennstoffen gespeicherte Stickstoff in die Atmosphäre, sondern es wird vor allem elementarer Stickstoff aus der Luft in Stickstoffoxide umgewandelt.

BOX 2: WANDELBARER REAKTIVER STICKSTOFF



Einmal aus der elementaren Form in reaktiven Stickstoff überführt, kann ein Stickstoffatom nacheinander in unterschiedlichen Bindungsformen (NO_x , NH_y , N_{org}) an unterschiedlichen Orten und in unterschiedlichen Umweltbestandteilen (Luft, Boden, Wasser, Vegetation, Fauna einschließlich Menschen) seine Wirkungen entfalten. Man spricht in diesem Zusammenhang von der Stickstoffkaskade.



3

[illegible]

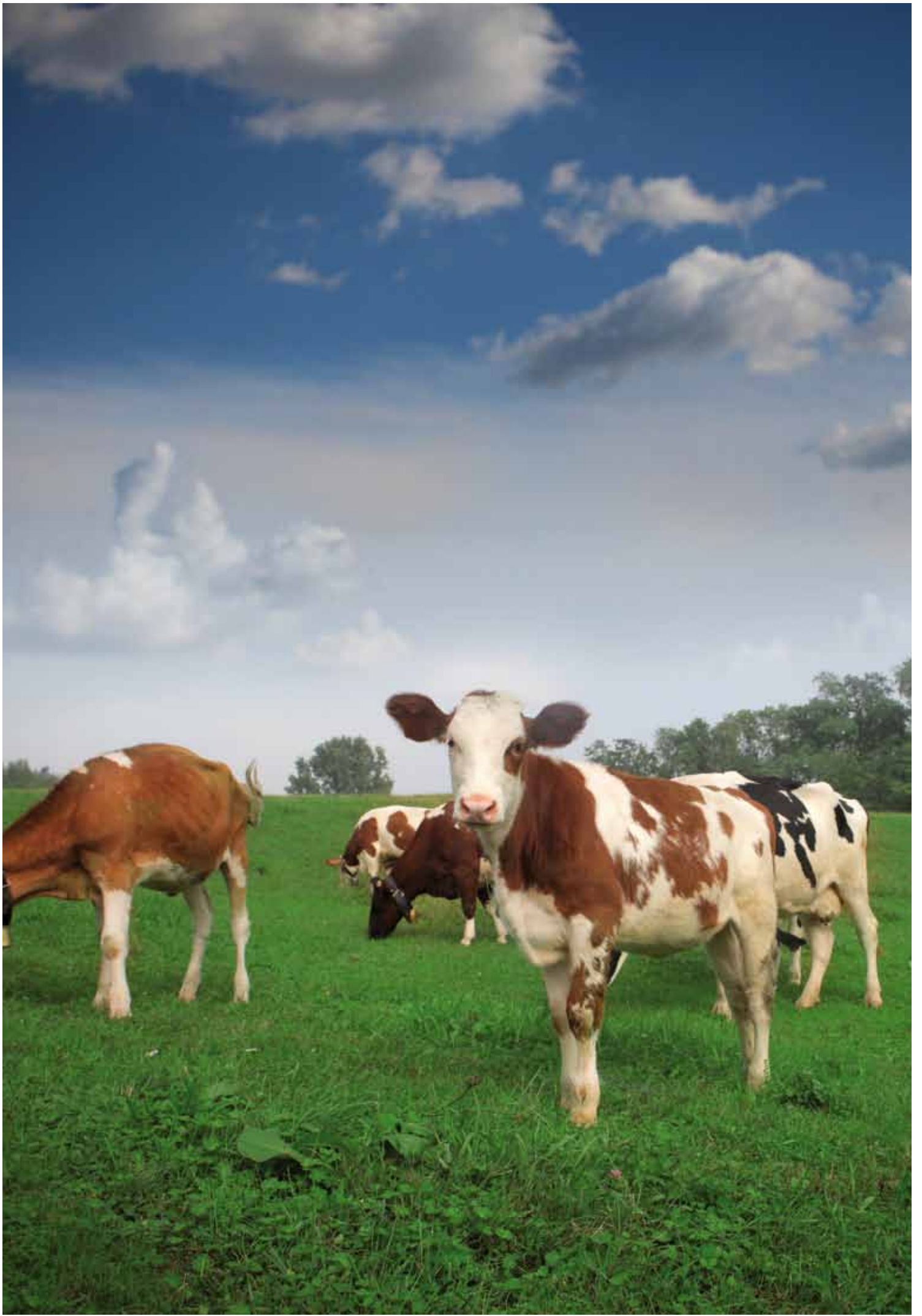
Stickstoff ist für Pflanzen, Tiere und Menschen ein essentieller Baustein des Lebens. Noch bis vor wenigen Jahrzehnten wurde die Verfügbarkeit von Stickstoff für Pflanzen vor allem durch natürliche Prozesse bestimmt. Das Pflanzenwachstum als entscheidende Grundlage der natürlichen Nahrungsketten wurde durch Stickstoff begrenzt.

Pflanzen sind in der Lage, mit Hilfe des Sonnenlichts aus Wasser und dem Kohlenstoffdioxid (CO_2) der Atmosphäre Biomasse zu produzieren. Sie bilden die Nahrungsgrundlage der Lebewesen, die diese Fähigkeit nicht besitzen. Dazu zählen der holzzersetzende Pilz, ebenso wie Insekten, Wirbeltiere und nicht zuletzt der Mensch. Zu ihrem Gedeihen und zur Biomasseproduktion benötigen Pflanzen eine Reihe von Nährstoffen. Dabei spielt Stickstoff, als wichtiger Bestandteil organischer Moleküle (Aminosäuren, Proteine und DNS), eine Schlüsselrolle. Nachdem Pflanzen den elementaren Stickstoff der Atmosphäre nicht direkt nutzen können, sind sie auf eine ausreichende Versorgung mit reaktiven Stickstoffverbindungen angewiesen, die sie aus dem Boden aufnehmen. Natürlichlicherweise gelangt Stickstoff vor allem durch die Tätigkeit einiger Bakterienstämme in den Boden (vgl. Kapitel 2). Diese Bakterien haben die Fähigkeit, den elementaren Stickstoff in reaktive, pflanzenverfügbare Formen zu überführen. Eine weitere wichtige Quelle pflanzenverfügbaren Stickstoffs ist die Zersetzung abgestorbener Organismen. Bei diesem biologischen Abbauvorgang, der so genannten Mineralisierung, wird der organische Stickstoff abgestorbener Organismen in anorganische Formen umgewandelt, die dann wieder für Pflanzen verfügbar sind. Ein großer Teil des reaktiven Stickstoffs zirkuliert also zwischen dem Boden und den Organismen. Die vorübergehende

Bindung des Stickstoffs in lebender und abgestorbener organischer Substanz verhindert die Auswaschung in tiefere Bodenschichten, die von Pflanzenwurzeln nicht mehr erreicht werden können. Die effiziente Wiederverwertung von Stickstoffverbindungen im natürlichen Kreislauf schafft günstige Lebensbedingungen für die Pflanzen. Durch einige Bodenprozesse (Denitrifikation) kann reaktiver Stickstoff in elementaren, gasförmigen Stickstoff umgewandelt werden und letztlich wieder in die Atmosphäre gelangen.

Der Beginn dieses natürlichen Stickstoffkreislaufs geht auf die frühesten Lebensformen auf der Erde zurück, die für die erste Entstehung organischer Stickstoffverbindungen sorgten. Im Laufe der Erdgeschichte haben die beschriebenen Prozesse zu einer sehr langsamen Anreicherung der Böden und Gewässer mit reaktivem Stickstoff geführt und eine allmähliche Zunahme der pflanzlichen Biomasseproduktion erlaubt.

In weiten Teilen der Erde begrenzte die Verfügbarkeit von Stickstoff im Boden bis vor wenigen Jahrzehnten die natürliche Biomasseproduktion und die landwirtschaftlichen Erträge. Das heißt, dass von allen für das Pflanzenwachstum notwendigen Elementen, gemessen am Bedarf, Stickstoff am wenigsten zur Verfügung stand.



4

Die globale Freisetzung reaktiver Stickstoffverbindungen in die Umwelt auf Grund menschlicher Aktivitäten hat sich seit Mitte des 19. Jahrhunderts etwa verzehnfacht und steigt weiter an.

Insgesamt hat sich die weltweite Freisetzung reaktiven Stickstoffs seit Mitte des 19. Jahrhunderts verzehnfacht [8], wobei der wesentliche Anstieg seit 1960 erfolgt. Es ist davon auszugehen, dass jährlich etwa 150 Millionen Tonnen (Stand 2000) reaktiven Stickstoffs durch menschliche Aktivität in die Umwelt gelangen [2].

Schub erfuhr die Freisetzung reaktiver Stickstoffverbindungen durch die Entwicklung des Haber-Bosch-Verfahrens um 1910. Dieses Verfahren macht es möglich, Ammoniak unter hohem Energieaufwand aus elementarem Luftstickstoff herzustellen und ist die Grundlage für die Produktion großer Mengen synthetischer Stickstoffdünger. Durch die industrielle Einführung des Haber-Bosch-Verfahrens und seine schnelle Verbreitung zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde ein wichtiger Grundstein für die industrielle Agrarproduktion gelegt, die insbesondere seit Ende der 1960er Jahre die Landwirtschaft in Europa, Nordamerika und zunehmend auch in anderen Teilen der Erde prägt. Mit Hilfe des Haber-Bosch-Prozesses werden jährlich über 80 Millionen Tonnen Luftstickstoff für die Düngemittelproduktion in reaktiven Stickstoff umgewandelt [2]. Zudem trägt der weltweit ständig zunehmende Anbau von Hülsenfrüchten beträchtlich zur Anreicherung reaktiven Stickstoffs in der Umwelt bei [9]. Im Hinblick auf ihren Anteil an der durch den Menschen verursachten Gesamtfixierung atmosphärischen Stickstoffs rangiert die industrielle Düngemittelproduktion mit ca. 53 % an erster Stelle, gefolgt von der landwirtschaftlichen Fixierung durch den Anbau von Hülsenfrüchten (ca. 27 %) sowie der Verbrennung fossiler und nachwachsender Rohstoffe (ca. 20 %) [2].

ABBILDUNG 1:

ENTWICKLUNG DER GLOBALEN FREISETZUNGEN REAKTIVEN STICKSTOFFS von 1900 bis 2005 [8]

- WELTBEVÖLKERUNG
- NO_x-EMISSIONEN (Tg N)
- MINERALDÜNGEREINSATZ (Tg N)
- GESAMTER ANTHROPOGENER Nr (Tg N)
- BIOLOGISCHE N FIXIERUNG
IN DER LANDWIRTSCHAFT (Tg N)

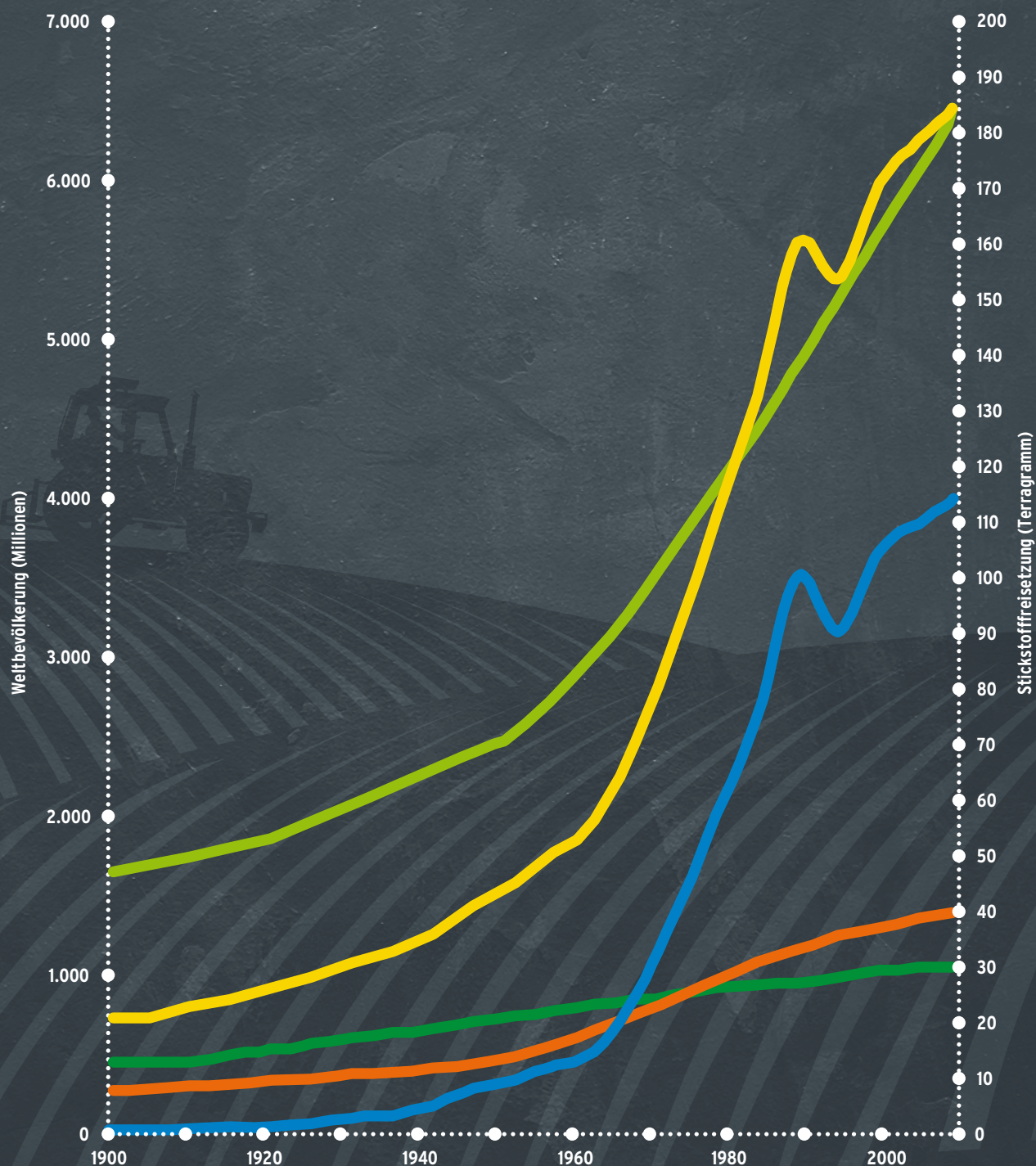




Foto: FLIsom / Fotolia.de

In der Landwirtschaft wird den Kulturen Stickstoff vor allem durch synthetischen Mineraldünger und durch Gülle zugeführt. Der Einsatz von Stickstoffdüngemitteln hat die landwirtschaftliche Produktivität enorm gesteigert. Allerdings wird nur ein Teil des eingesetzten Stickstoffs tatsächlich von den Pflanzen aufgenommen und durch die Ernte abgeführt. Ein großer Teil des eingesetzten Stickstoffs, der so genannte Stickstoffüberschuss, entweicht ungenutzt in die Atmosphäre, wird in Gewässer ausgewaschen oder verbleibt im Boden. Gegenwärtig produziert die Landwirtschaft durch die intensive Zufuhr industrieller Düngemittel und die Konzentration der Viehhaltung in einzelnen Gebieten sehr hohe Stickstoffüberschüsse, die zu weitreichenden Umweltproblemen führen.

Auf nicht landwirtschaftlich genutzte Flächen gelangt reaktiver Stickstoff vor allem über den Luftpfad. So kommt es auch dort zu einer Anreicherung von Stickstoffverbindungen in den Böden und der Vegetation. Das Element, das natürlicherweise das Pflanzenwachstum und alle darauf aufbauenden Prozesse begrenzte, ist nun häufig im Überschuss vorhanden.

Etwa 30 bis 50 % der landwirtschaftlichen Erträge sind mittlerweile auf die Nutzung mineralischer Dünger zurückzuführen [5] und fast die Hälfte der Weltbevölkerung wird heute durch die Hilfe künstlich erzeugter

Stickstoffdünger ernährt [6]. Die Verfügbarkeit von Stickstoffdüngemitteln variiert jedoch regional sehr stark. Auf dem afrikanischen Kontinent steht für die Ernährung von mehr als 14 % der Weltbevölkerung nur etwas mehr als 3 % der globalen Mineraldüngermenge zur Verfügung. Während die Landwirtschaft der Industrieländer z. T. sehr hohe Stickstoffüberschüsse erzeugt, führt der Pflanzenbau auf ohnehin schon armen Böden in vielen afrikanischen Ländern zu einem anhaltenden Stickstoff-Verlust. Um die auch heute noch nicht gewährleistete ausreichende Ernährung der Weltbevölkerung zu sichern, steht die Weltgemeinschaft vor großen Herausforderungen, diese Verteilungsprobleme anzugehen und gleichzeitig nachhaltige, umweltverträgliche Produktionsmethoden zu entwickeln [7].



Foto: Manfred Steinbach / fotolia.de



5 STICKSTOFF ALS SCHADSTOFF

[illegible]

Der im Übermaß freigesetzte reaktive Stickstoff führt zu erheblichen Problemen. Er bringt Funktionen von Ökosystemen und ihre Dienstleistungen für den Menschen aus dem Gleichgewicht, bedroht die biologische Vielfalt in Gewässern und auf dem Land, beschleunigt den Klimawandel und beeinträchtigt die menschliche Gesundheit.

Die ungebremste Stickstofffreisetzung zählt neben dem Klimawandel und dem Verlust biologischer Vielfalt zu den weltweiten Umweltproblemen, bei denen die Menschheit schon heute die Belastbarkeit der Erde deutlich überschritten hat [2]. Deshalb ist es notwendig, die Umwandlung elementaren Stickstoffs in reaktiven Stickstoff drastisch zu senken. Die folgenden Abschnitte beschreiben, welche Probleme der reaktive Stickstoff in Deutschland und den europäischen Nachbarländern verursacht. Viele der Wirkungen sind eng miteinander verknüpft.

5.1 PATIENT WALD - NOCH IMMER NICHT GENESEN

Die Deutschen haben eine hohe Wertschätzung für Wald und Natur. 80 Prozent von ihnen befürworten auch die Nutzung des Waldes [10] solange nicht mehr Holz entnommen wird als nachwächst. Der Wald reinigt die Luft und filtert Niederschlagswasser; er schützt den Boden vor Erosion, dient der Erholung der Menschen und ist Quelle für ihre Kreativität und Fantasie. Die Berichte

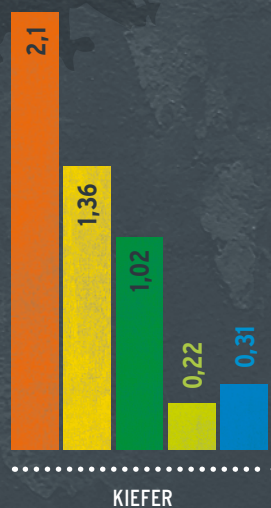
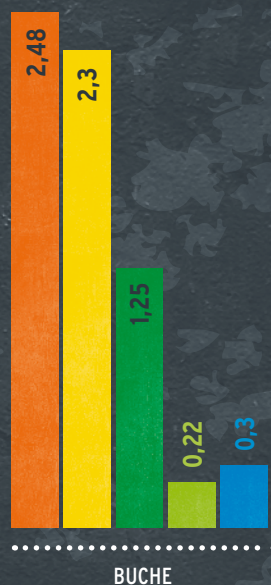
über den Waldzustand sind aber seit vielen Jahren alarmierend. Sind unsere Wälder unter diesen Umständen überhaupt in der Lage, die vielfältigen Erwartungen zu erfüllen? Hilft Stickstoff dem Wald oder schadet er eher?

Beim Spaziergehen oder Wandern im Wald kann man es feststellen: die meisten Bäume tragen nicht ihr volles Blätter- oder Nadelkleid. Experten bewerten jährlich an mehr als zehntausend Probestämmen auf etwa 420 Probestellen des bundesweiten forstlichen Beobachtungsnetzes den Zustand der Baumkronen. Die in den Waldzustandsberichten des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz zusammengefassten Ergebnisse belegen seit Jahrzehnten für mehr als zwei Drittel der Waldbäume in Deutschland mehr oder weniger deutliche Kronenverlichtungen und -vergilbungen. Diese Schadsymptome sind auf das Zusammenspiel vieler Belastungsfaktoren zurückzuführen. Die seit Jahrzehnten überhöhten Einträge reaktiver Stickstoffverbindungen aus der Atmosphäre spielen dabei eine entscheidende Rolle.

ABBILDUNG 2:

DURCHSCHNITTliche NÄHRSTOFFVERHÄLTNISSE IM BAUM

Mittlere Elementgehalte in der oberirdischen Biomasse der vier Hauptbaumarten in Deutschland [g/kg]



Quelle: Jacobsen C, Pademacher P, Meessenburg H, Meives K J (2002):
Elementgehalte in Baumkompartimenten – Literaturstudie und Datensammlung.
Göttingen: Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt

Für alle Lebewesen ist eine ausgewogene Ernährung die Grundvoraussetzung für Gesundheit und Vitalität – dies gilt auch für Bäume. Wie viel Stickstoff der Waldgesundheit zuträglich ist, hängt sehr stark davon ab, in welchem Verhältnis gleichzeitig andere lebensnotwendige Elemente zur Verfügung stehen. Wälder werden nicht gezielt gedüngt. Sie beziehen ihre Nährstoffe zum Teil aus natürlichen Nachlieferungsprozessen, wie der Gesteinsverwitterung und der Zersetzung von Pflanzenresten (Streu) durch Bodentiere und Mikroorganismen. Ein großer Anteil des Stickstoffs gelangt aber auch aus der Atmosphäre über Niederschläge, abgelagerten Feinstaub oder als gasförmiges Ammoniak in die Waldbestände.

Foto: Wermelinger



Foto: W. Breit



Die unbeabsichtigte Stickstoffdüngung aus der Luft kann durchaus zu einer Steigerung des Baumwachstums führen. Mehr Wachstum ist aber nicht gleichzusetzen mit mehr Gesundheit. Das Überangebot an Stickstoff im Vergleich zu anderen wichtigen Nährelementen, wie beispielsweise basische Kationen, spiegelt sich in der Zusammensetzung des Holzes und der Blätter wider: es werden weniger feste, die Pflanzen stützende Substanzen produziert. Dadurch verringert sich die Dichte und Stabilität des Holzes, so dass die Kronen bei Sturm leichter abbrechen (Windbruch). Mit Stickstoff überversorgte Bäume produzieren weichere Nadeln und Blätter. Diese sind anfälliger gegenüber Austrocknung und Frost, sie schmecken Schadinsekten besser und können Infektionen durch Bakterien und Pilze weniger entgegensetzen.

BOX 3: EUTROPHIERUNG UND VERSAUERUNG DURCH LUFTSCHADSTOFFE

Der Eintrag luftgetragener Schwefel- und Stickstoffverbindungen führt zu sauren und stickstoffreichen Böden. Dies verursacht akute und chronische Schäden an Flora und Fauna. Die nicht standorttypische Ausbreitung stickstoffliebender Gräser und Sträucher verstärkt in ohnehin niederschlagsarmen Gebieten den Versorgungsstress für Bäume durch Wassermangel. Pflanzen, die auf Magerstandorte angewiesen sind, werden verdrängt.



Foto: G. Hofmann

Kiefernbestand in Nordostdeutschland ohne erkennbare Merkmale einer Stickstoffbelastung.



Foto: G. Hofmann

Dichter Unterwuchs von Holunder und anderen Pflanzen als Folge erhöhter Stickstoffeinträge.

Zusätzlich sind viele Waldböden durch Versauerung in der Vergangenheit vorgeschädigt. Der im Boden vorhandene Vorrat und das Nachlieferungsvermögen an basischen Kationen sind geschwächt. Stark versauerte Böden setzen Aluminium in das Bodenwasser frei, das für Baumwurzeln und Bodenlebewesen toxisch ist. Auf mehr als 80 % der Fläche natürlicher und halb-natürlicher Ökosysteme, inklusive der Wälder, liegen die atmosphärischen Säureeinträge noch immer über den kritischen Belastungsschwellen. Stickstoffverbindungen, insbesondere Ammoniak und Ammonium aus der Landwirtschaft, haben heute dem Schwefel als einstigem Hauptverursacher der Versauerung den Rang abgelassen. Um die negativen Wirkungen der Versauerung zu neutralisieren, werden die Waldböden z. T. gekalkt, was enorme Kosten verursacht. Seit 1984 wurden rund 3 Millionen Hektar gekalkt, fast ein Drittel der Waldfläche [11].

Eine ökologische Folge der Versauerung ist das Verschwinden von Regenwurmart, die eine intensive Vermischung von Humuspartikeln an der Oberfläche mit den tiefer liegenden Mineralbodenschichten der Waldböden bewirken. Dadurch verarmen die Mineralböden allmählich. Die Bäume konzentrieren ihr Wurzelwerk in den humusreichen oberen Schichten, in denen ständig eine Nährstoffnachlieferung durch die Streu und Stoffeinträge aus der Luft erfolgt. Solche flach ausgebildeten Wurzelteller vermindern die Standfestigkeit der Bäume, so dass sie bei Sturm leichter im Ganzen umbrechen (Windwurf).



Foto: Ehrmann

Der erwartete Klimawandel wird in den einzelnen Regionen Deutschlands unterschiedliche Veränderungen bewirken. Niederschlagsmengen können zu- oder abnehmen, Früh- oder Spätfröste, Stürme und andere Extremereignisse häufiger als bisher auftreten. Die erwartete Erwärmung begünstigt das Einwandern wärmeliebender Schadorganismen. Es ist abzusehen, dass diese Veränderungen in stickstoffbelasteten Ökosystemen stärkere Schäden hervorrufen, als in nicht vorbelasteten Gebieten. So ist z. B. von einer Verschärfung der Konkurrenz um Niederschlagswasser zwischen Bäumen und dichten Grasdecken auszugehen, die durch Stickstoffeinträge gefördert werden. Welche Wirkungen sich im Einzelnen in Waldökosystemen zeigen, hängt von vielen miteinander verbundenen Faktoren, darunter dem Speichervermögen für Stickstoff ab. Dieses Speichervermögen ist aber nicht unbegrenzt. Bei gleichbleibend hohen Einträgen bewirkt es nur eine Verzögerung der Wirkungen bei gleichzeitigem Aufbau eines zunehmenden Schadpotenzials.

5.2 VERARMENDE PFLANZEN- UND TIERWELT

Ein üppiges Grün in Wald und Feld erfreut in der Regel das menschliche Auge und wird häufig als guter Umweltzustand gedeutet. Aus der Sicht der Erhaltung der biologischen Vielfalt ist es aber in vielen Fällen kein gutes Zeichen.

Die für Wälder beschriebenen schädlichen Wirkungen einer einseitig hohen Stickstoffversorgung gelten prinzipiell für alle Pflanzen. Nur eine Auswahl von ihnen kann hohe Stickstoffmengen gut verwerten. Diese Pflanzenarten verdrängen dann unter stark stickstoffbeeinflussten Bedingungen im Konkurrenzkampf um Nährstoffe, Wasser und Licht die stickstoffempfindlichen Arten. Das führt zu einer schleichenden Vereinheitlichung der Vegetation - mit anderen Worten - zu einem Verlust an biologischer Vielfalt. In den gegen Stickstoffeinträge empfindlichen, selten gewordenen Naturräumen, wie Trockenrasen, Heiden, Moorheiden und Torfmooren zeigt ein zunehmendes Überwachsen mit stickstoffliebenden Grasarten oder Brennnesseln, Himbeeren und anderen Stickstoff-Zeigerpflanzen Veränderungen an, die zur völligen Vernichtung der standorttypischen Vegetation und darauf aufbauender tierischer Nahrungsketten (z. B. Insekten, Kleinsäuger, Vögel) führen können. Die atmosphärischen Stickstoffeinträge müssen deshalb soweit gesenkt werden, dass die biologische Vielfalt eine Überlebenschance hat.

Das Bundesamt für Naturschutz führt mittlerweile die Gefährdung von 404 Arten der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands auf Stoffeinträge und damit verbundene Standortveränderungen zurück [12]. Bestimmte Moose und Flechten gehören zu den gegenüber Stickstoff besonders empfindlichen Pflanzenarten. Auch eine große Zahl von Biotoptypen gilt als gefährdet und findet sich inzwischen in Roten Listen; die hohen Nährstoffeinträge stellen auch hier eine der wichtigsten Ursachen dar.

BOX 4:

Untersuchungen an Gräsern haben gezeigt, dass die Beschattung von langsamer wachsenden Arten, die durch das schnellere Wachstum stickstoffliebender Arten entsteht, besonders stark zu deren Zurückdrängung beiträgt. Dieser Effekt war stärker als die alleinige Konkurrenz um Nährstoffe.

Auf Wiesen und Weiden fördert Stickstoff - vom Landwirt erwünscht - besonders das Wachstum der Nutzgräser. Viele Pflanzen sind jedoch unter stickstoffreichen Bedingungen nicht konkurrenzfähig und die noch Mitte des 20. Jahrhunderts weit verbreiteten zahlreichen Wiesenblumen sind wegen der intensiven Bewirtschaftung inzwischen weitgehend verschwunden. Durch den Wegfall dieses artenreichen Grünlandes, mit einem breiten Spektrum an Blumen, wird Bestäuberinsekten die natürliche Lebensgrundlage entzogen. Der weltweit

beklagte starke Rückgang der Bestäubungsleistung hat auch finanzielle Folgen: Die Umweltschutzorganisation WWF gibt den Wert der natürlichen Bestäubung weltweit mit 112 - 200 Milliarden US-Dollar an [13]. In einigen Teilen der Erde, z. B. Nordamerika, zahlen Farmer heute große Summen, um die für ihre Produktion erforderliche Bestäubung durch Imker mit ihren Zuchtienen realisieren zu lassen - eine Leistung, die eine intakte Natur gratis liefert.

BOX 5: DURCH NÄHRSTOFFEINTRÄGE GEFÄHRDETE BIOTOPTYPEN



Durch Boden- und Gewässereutrophierung sind 22,4 Prozent der Land- und Feuchtbiotypen gefährdet [12]. Zu den durch Eutrophierung besonders bedrohten Biotypen gehören Heiden, Kalkmagerrasen und Hochmoore.

v. l. n. r.:
Besenheide
Wachholderheide
Hochmoor
Kalkmagerrasen

Alle Fotos: Bundesamt für Naturschutz

BOX 6: SCHLEICHENDE VERÄNDERUNGEN



Foto: G. Schütze

Foto: G. Schütze

Foto: G. Schütze

Foto: G. Hofmann

Pflanzen, die eine hohe Stickstoffsättigung anzeigen: Hirschholunder, Ruprechtskraut, Himbeeren, Landbreitgras, Brennnessel



Foto: seraph / photocase.com

Für den ungeübten Betrachter sind die durch Stickstoff hervorgerufenen Veränderungen der Vegetation meist nicht wahrnehmbar. Da sie sich langsam vollziehen, fehlt häufig der Vergleich mit dem unbeeinträchtigten Zustand. Die heute oft üppige Boden- und Strauchvegetation der Wälder weist viele stickstoffliebende Pflanzenarten auf (Landreitgras, Hainrispengras, Ruprechtskraut, Brennnessel, Taubnessel, Waldziest, Schöllkraut, Wiesenkerbel, Himbeere und Brombeere, Holunder). Sie zeigen an, dass der Boden einen hohen Grad der Stickstoffsättigung erreicht hat, und bei weiterer Belastung mit großer Wahrscheinlichkeit oder bereits heute schon Stickstoffverbindungen in das Sickerwasser oder in die Atmosphäre abgibt.

Viele Tiere sind Nahrungsspezialisten. So brauchen z. B. die Raupen selten gewordener Schmetterlingsarten wie Bläulinge und Widderchen bestimmte Nahrungspflanzen, die sich nur in nährstoffarmen Wiesen behaupten können. Werden diese durch stickstoffliebende Gräser und Kräuter verdrängt, sterben die entsprechenden Schmetterlingsarten am Standort aus. Entsteht durch Stickstoffeinträge eine üppige Gras- oder Krautflur anstelle der bis dahin vorhandenen vielfältigeren, aber kargen Vegetation, verändert sich auch das Mikroklima in Bodennähe. Es wird kühler und feuchter. Wärmeliebende Kleintiere wandern aus und andere, an die neuen Bedingungen angepasste Arten, erobern den Lebensraum.

Insgesamt ist noch wenig über die Wirkungen von Stickstoffeinträgen auf Bodenlebewesen bekannt. Für höhere Pflanzen sind die engen Wechselbeziehungen zu Bodenpilzen häufig lebenswichtig. Die Wurzeln vieler Landpflanzen leben in Symbiose mit Pilzen, die sie bei der Stoff- und Wasseraufnahme unterstützen. Die Symbiose von Pilz und Pflanzenwurzel wird als Mykorrhiza bezeichnet. Studien mit landwirtschaftlich genutzten Böden zeigen, dass eine erhöhte Stickstoffzufuhr Pilze der Mykorrhizen zurückdrängt. Andere Untersuchungen lassen die Schlussfolgerung zu, dass auch in natürlichen und halb-natürlichen Ökosystemtypen eine Reduzierung der Vielfalt von Pilzarten, darunter Mykorrhiza-Pilze, durch Stickstoffzufuhr erfolgt [14]. Pilze haben eine Schlüsselfunktion bei der Zersetzung zellulosereicher Pflanzenreste, z. B. Holz. Sie tragen besonders in Waldböden dazu bei, Nährstoffe wieder für neues Wachstum verfügbar zu machen. Wie bereits beschrieben, leiden auch Regenwurmarten unter der versauernden Wirkung von Stickstoffeinträgen bis hin zur vollständigen Verdrängung tiefgrabender Arten.

Ökosysteme erfüllen bestimmte ökologische Funktionen und erbringen Dienstleistungen für den Menschen, die nicht ohne Weiteres ersetzbar sind. Dazu gehören unter anderem die Zersetzung natürlicher Abfälle (abgestorbener Lebewesen, Dung, Laub- und Nadelstreu), die Gewährleistung von Nährstoffkreisläufen, die Reinigung des durch den Boden sickern den Niederschlagswassers, die Wasserspeicherung in der Landschaft und der Schutz vor Bodenerosion, die Milderung von Extremen der Lufttemperatur und -feuchtigkeit, die Lebensraumfunktion für Pflanzen und Tiere und die Erholungswirkung intakter Landschaften. Ökosystembestandteile, wie Bäume, Moose, Flechten, Pilze, Regenwürmer, Insekten und viele andere Lebewesen tragen zur Erfüllung dieser Funktionen und Dienstleistungen gleichermaßen bei. Mit dem Verlust an biologischer Vielfalt geht deshalb auch immer die Gefahr einher, dass Ökosysteme diese Dienstleistungen nicht mehr oder nur noch eingeschränkt erfüllen können. Ein eingeschränktes Artenspektrum verringert auch

die Anpassungsfähigkeit der Lebensgemeinschaften gegenüber Stressfaktoren, zum Beispiel dem sich bereits vollziehenden Klimawandel.

BOX 7: DER KONKURRENZ NICHT GEWACHSEN

Düngeversuche verdeutlichen den Einfluss von Stickstoff-Einträgen auf die Vielfalt der Pflanzenarten in Ökosystemen. Die Abbildungen zeigen die Veränderung der Vegetation eines Kalkmagerrasens durch Stickstoffzufuhr von 100 Kilogramm pro Hektar und Jahr im Zeitraum 1984 bis 1986. Die krautreiche Vegetation ist typisch für Kalkmagerrasen und an die stickstoffarmen Bedingungen angepasst. Sie wurde durch Gras, hier insbesondere die Fiederzwenke (*Brachypodium pinnatum*), verdrängt. Das zeigt den Übergang von einem sehr armen in einen mäßig stickstoffreichen Zustand an. Der Artenreichtum ging um 45 % zurück [15].



*Kalkmagerrasen ohne
N-Düngung ...*



*... und nach 2 Jahren
N-Düngung*

In einem Düngeversuch auf Waldboden in Schweden überwucherte Gras die ursprünglich vorhandene standorttypische Decke aus Heidelbeersträuchern. Die Bilder zeigen die Veränderungen nach Zufuhr von 50 Kilogramm pro Hektar und Jahr in einem Zeitraum von vier Jahren [16].



*Waldboden ohne
N-Düngung ...*



*... und nach 4 Jahren
N-Düngung*

Zwar wurden in den Versuchen sehr hohe Stickstoffmengen eingesetzt. Es gibt jedoch experimentelle Belege, dass bereits geringfügig erhöhte Stickstoffeinträge in Gebieten mit geringer Belastung in Nordschweden über längere Zeiträume zu Vegetationsveränderungen führen, und dass eine Rückkehr in den Ausgangszustand nach Minderung des Eintrags ein sehr langsamer Prozess ist.

Fotos: R. Bobbink

Fotos: A. Nordin



5.3 NITRAT IM GRUND- UND TRINKWASSER

Wasser ist unser wichtigstes Lebensmittel. Trinkwasser soll stets in möglichst hoher Qualität zur Verfügung stehen und bezahlbar sein. Um das zu gewährleisten, ist es sinnvoll, unsere wichtigste Trinkwasserquelle, das Grundwasser, vor Verunreinigung zu bewahren. Vorbeugender Grundwasserschutz ist deutlich kostengünstiger als aufwändige Trinkwassergewinnung und -aufbereitung.

Wird die Speicherkapazität eines Ökosystems für Stickstoff allmählich aufgefüllt, spricht man von zunehmender Stickstoffsättigung. Ist die Aufnahmefähigkeit durch langfristig zu hohe Einträge erschöpft, wird ein großer Teil des in den Boden eingetragenen Stickstoffs als Nitrat (NO_3^-) in tiefer liegende Bodenschichten ausgewaschen, wo es nicht mehr durch Pflanzen aufgenommen und dadurch nicht mehr im Kreislauf des Ökosystems gehalten werden kann. Im Untergrund kann das Nitrat nur sehr begrenzt abgebaut werden. Je nach Wasserrückhaltever-

mögen des Bodens kommt es dann früher oder später zum Nitratreintrag ins Grundwasser. Nitrat ist aus Sicht des Gesundheitsschutzes auch im Trinkwasser problematisch. Im schwach saurem Magensaft wird es zu Nitrit (NO_2^-) umgewandelt und kann dort mit bestimmten Eiweißabbauprodukten (Aminen) zu Nitrosaminen reagieren, von denen viele als krebserzeugend gelten. Allerdings ist Trinkwasser im Vergleich mit anderen Lebensmitteln mit Abstand die geringere Nitratquelle. Am Nitrit selbst können Säuglinge innerlich ersticken („Blausucht“ oder „Methämoglobinämie“): gelangt Nitrit ins Blut, so stört es dort den Sauerstofftransport durch Zerstörung des roten Blutfarbstoffs. Intensive Aufklärung über dieses Risiko und verlässliche Beherrschung der Nitratkonzentrationen im Trinkwasser haben dazu geführt, dass entsprechende Erkrankungen und Todesfälle schon seit Jahrzehnten in Deutschland nicht mehr vorkommen. Nach wie vor gilt: Trinkwasser mit bis zu 50 mg/l Nitrat ist uneingeschränkt auch zur Zubereitung von Säuglingsnahrung geeignet.

BOX 8: GEFÜLLTE STICKSTOFFSPEICHER KÖNNEN ZEITBOMBEN SEIN

Plötzlich eintretende Störungen, beispielsweise Schneebruch, Windwurf oder massiver Befall mit Insekten in Wäldern können zum Zusammenbruch der Stickstoffspeicherung führen. Dies lässt sich an einem 125 Jahre alten Fichtenbestand („Forellenbach“) im Nationalpark Bayerischer Wald zeigen:

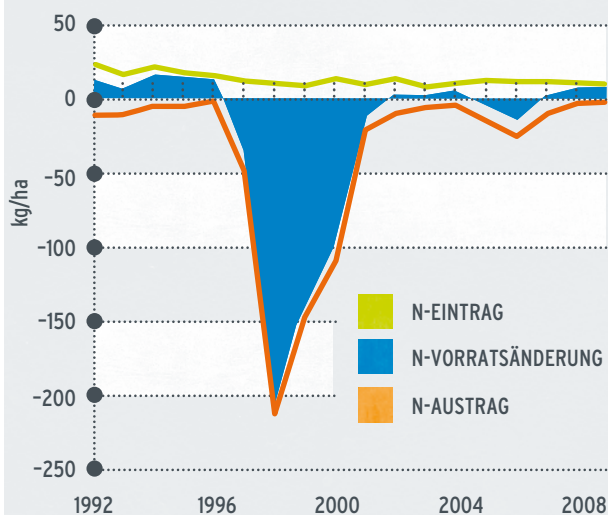
Bis zum Jahr 1996 wurde der größte Teil des eingetragenen Stickstoffs im Boden gespeichert und vor der Auswaschung bewahrt. Dieser Fichtenbestand starb von 1996 bis 1997 nach Befall mit dem Buchdrucker (*Ips typographus* L.), einem Fichtenborkenkäfer, vollständig ab. Damit war die Aufnahme von Stickstoffverbindungen durch die Baumwurzeln vollständig beendet. Mehr noch: der in grünen Nadeln und Feinwurzeln gespeicherte Stickstoff wurde in Folge der stattfindenden Zersetzung und Mineralisierung in kurzer Zeit als Nitrat dem Boden zusätzlich zugeführt. Die Nitratkonzentrationen im Bodensickerwasser stiegen bis auf 200 mg/l an. Das

ist das Vierfache des Höchstwertes nach Trinkwasserverordnung. In Folge dieser abrupten Störung der Stoffkreisläufe wurden innerhalb von fünf Jahren über 500 kg Stickstoff pro Hektar als Nitrat ins Grundwasser ausgetragen, allein im Jahr 1998 über 200 kg. Auch im Wasser des Forellenbaches ließen sich vorübergehend erhöhte Nitratkonzentrationen nachweisen. Im Jahr 2010 sind die Stickstoffausträge aus dem Boden wieder auf dem Niveau wie vor dem Absterben des Bestandes, die Nitratkonzentrationen liegen meist weit unter 5 mg/l.

In gleicher Weise führte der Wirbelsturm Lothar zu erhöhten Nitratkonzentrationen in vielen Trinkwasserquellen Baden-Württembergs. Nach Extremwetterereignissen, die durch den Klimawandel noch häufiger werden könnten, ist also mit plötzlichen Nitratreinträgen ins Grundwasser auch unter Wald zu rechnen, wenn die Stickstoffspeicher des Bodens weiterhin stark angefüllt werden.

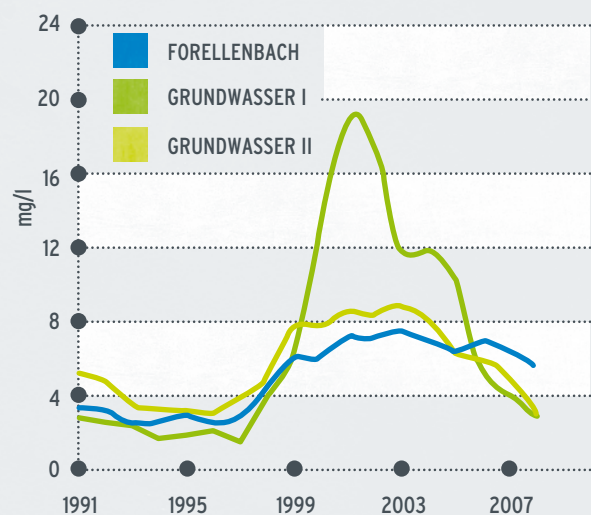
ENTWICKLUNG DES STICKSTOFFVORRATS

für die Fichtendauerbeobachtungsfläche



ENTWICKLUNG DER NITRATKONZENTRATION

in Gewässern



Quelle: Beudert B, Breit W: Untersuchungen zum Stickstoffeintrag und zum wassergebundenen Stickstoffhaushalt des Forellenbachgebiets, 2010.

Foto: akai / photocase.com

Nitrateinträge ins Grundwasser stammen häufig aus landwirtschaftlichen Quellen. Dabei handelt es sich sowohl um Nährstoffüberschüsse aus der Düngung die nicht von Pflanzen aufgenommen werden als auch um mobilen Stickstoff aus der Mineralisierung organischer Substanz (analog zu den in Box 8 beschriebenen Prozessen). Überall dort, wo in leichten Böden bei hoher Versickerung im Laufe des Winterhalbjahres das lösliche Nitrat aus der Wurzelzone ausgewaschen wird, sickert es ins Grundwasser, statt im nächsten Frühjahr wieder von den Pflanzen aufgenommen zu werden. Sehr große Nitratmengen werden außerdem frei, wenn Dauergrünland umgebrochen wird und dann in kürzester Zeit die über Jahre angesammelten Humusmengen mineralisiert werden.

Grundwasser in Deutschland ist häufig mit Nitrat belastet. Die jüngsten Werte aus repräsentativen Messungen des Jahres 2008 zeigen, dass an fast 15 % aller Messstellen der Schwellenwert der Trinkwasserverordnung von 50 mg NO₃/l überschritten wurde. 36 % der Messstellen wiesen deutlich bis stark erhöhte Nitratgehalte auf. Viele Wasserwerke mussten schon Grundwasservorkommen wegen zu hoher Nitratbelastung aufgeben und tiefer liegende Vorkommen erschließen. Dieser Ausweichstrategie sind allerdings natürliche Grenzen gesetzt. Außerdem wird die Trinkwasserversorgung so verteuert.

BOX 9

Nach der aktuellen Bestandsaufnahme über den Zustand des Grundwassers in Deutschland, die im Zuge der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie durchgeführt wurde, sind 26,5 % aller Grundwasserkörper allein aufgrund von Nitratbelastungen in einem schlechten chemischen Zustand. Nach der Richtlinie sind die Mitgliedstaaten gehalten, in den nächsten Jahren geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um den guten Zustand dieser Grundwasserkörper wieder herzustellen, d.h. den Nitratgehalt auf unter 50 mg/l zu senken.

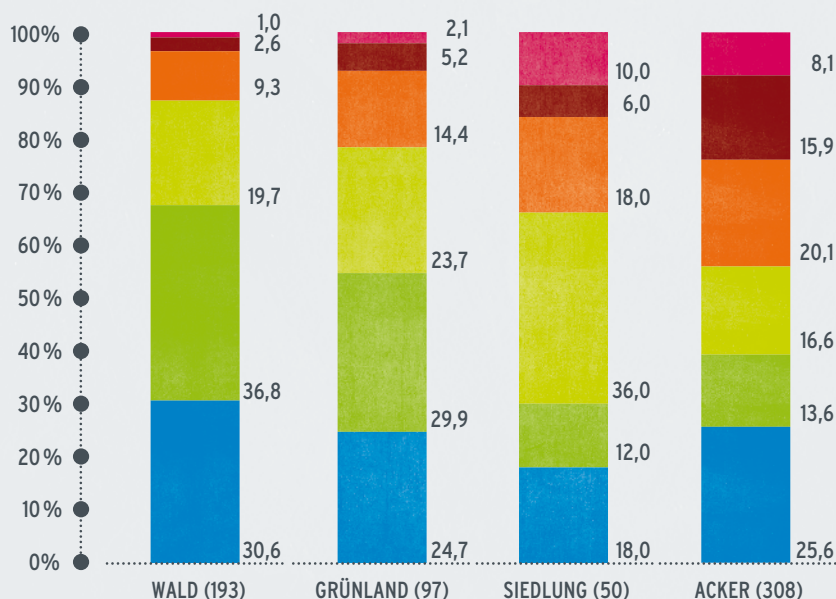


Quelle: Berichtsportal WasserBlick/BIG; Stand 22.03.2010

BOX 10: DIE ART DER LANDNUTZUNG BESTIMMT DIE NITRATAUSWASCHUNG

NITRATBELASTUNGEN AN MESSSTELLEN

unter Wald, Grünland, Siedlung und Acker



Klare Hinweise auf die Quellen für Nitrat im Grundwasser ergeben sich, wenn man untersucht, welche Landnutzungen zu niedrigen bzw. hohen Nitratbelastungen führen. Der Vergleich von Messstellen, deren Einzugsgebiet vorwiegend durch Wälder geprägt ist, mit Messstellen im Einzugsbereich von Ackerland, zeigt unter Ackerland deutlich höhere Nitratbelastungen des Grundwassers. Auch Messstellen unter Grünland haben höhere Nitratgehalte als solche unter Wald. Aber auch unter Wald weist das Grundwasser an rund 30 % der Messstellen unnatürlich hohe Werte (> 10 mg/l) auf, die auf durch menschliche Tätigkeit verursachte Belastungen zurückzuführen sind.

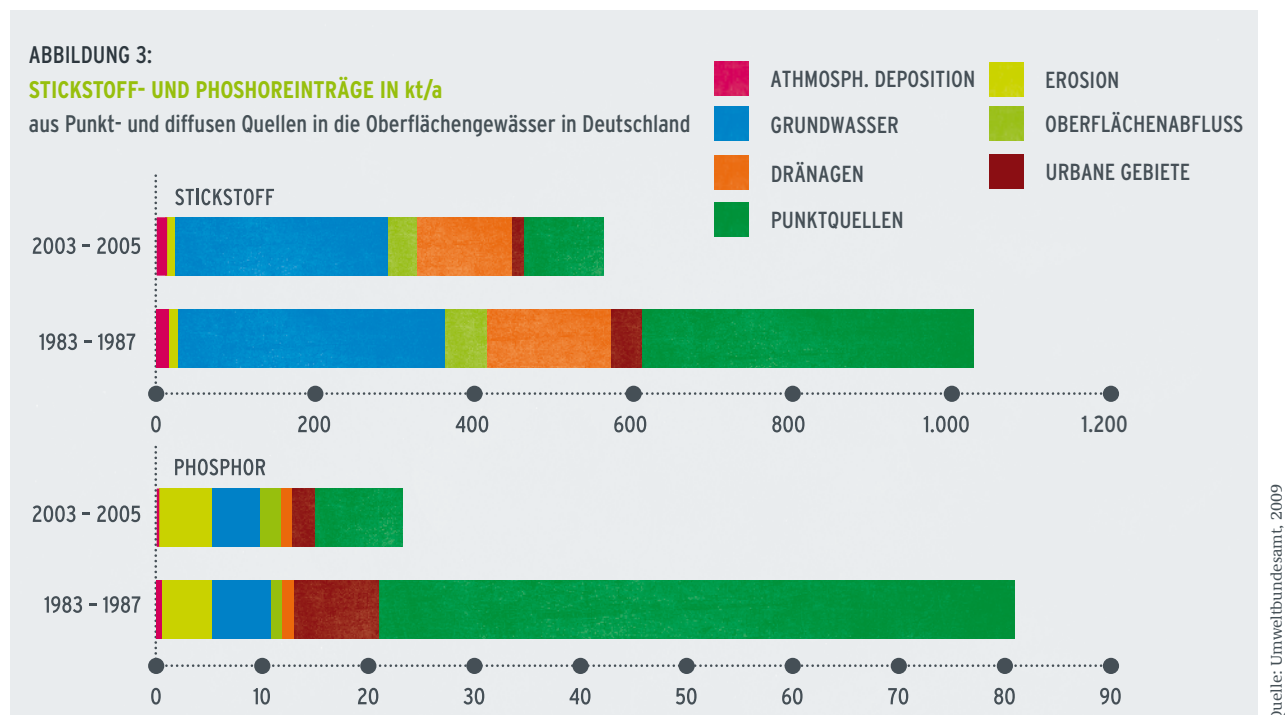
Quelle: Umweltbundesamt

5.4 BEDROHTE GEWÄSSER-LEBEWELTEN, GESTÖRTE URLAUBSFREUDEN

Egal ob Teich, Meeresstrand, Gebirgsbach, Fluss oder See - viele Menschen zieht es in ihrer Freizeit ans Wasser. Die meisten suchen sich für ihre Freizeitvergnügen möglichst saubere, naturbelassene Gewässer aus. Manchmal werden die Freuden jedoch getrübt durch Algen, allergische Reaktionen nach dem Bade oder üble Gerüche. Ursachen für solche Störungen sind meistens zu hohe Nährstoffeinträge in die Gewässer.

Seit Mitte der 1990er Jahre werden die größten Stickstoffmengen über den Grundwasserpfad in die Oberflächengewässer eingetragen. Bis dahin dominierten die

Stickstoffeinträge über kommunale Kläranlagen und industrielle Einleitungen. Während diese zwischen 1985 und 2005 um 75 % reduziert wurden, konnten die Einträge über das Grundwasser lediglich um ca. 20 % vermindert werden. Für die Nitratbelastung des Grundwassers sind häufig diffuse Einträge durch die landwirtschaftliche Nutzung verantwortlich (siehe Kapitel 5.3). Gemeinsam mit Phosphor führen die Stickstoffeinträge in Form von Nitrat in Oberflächengewässern zur Nährstoffübersättigung, der Eutrophierung. Von den Nährstoffeinträgen in die Oberflächengewässer stammten von 2003 bis 2005 im Mittel über 70 % der gesamten Stickstoff- und über 50 % der gesamten Phosphateinträge aus der Landwirtschaft.



BOX 11: EUTROPHIERUNG: WARUM ALGEN „BLÜHEN“ UND WIE DIES SCHADET

Foto: A. Hoffmann



Eutroph heißt „gut genährt“. Ausgelöst wird Eutrophierung durch menschliche Aktivität, die zu einer Anreicherung von Nährstoffen wie Phosphor und Stickstoff in Gewässern führt. Im Wasser schwebende Algen und Cyanobakterien (zusammen das „Phytoplankton“) können dann übermäßig wachsen und entziehen anderen Pflanzenarten, vielen Kleinlebewesen und anderen Tieren die Lebensgrundlage – entweder weil massive Ansammlungen von Phytoplankton das Sonnenlicht für Wasserpflanzen abschirmen oder weil durch den biologischen Abbau der Pflanzenmasse der Sauerstoffgehalt im Wasser erheblich sinkt. In extremen Fällen bilden sich durch Eutrophierung sauerstofffreie, unbelebte Tiefenzonen in flachen Meeren und Seen (z. B. in Teilen der Ostsee und in vielen durch Fischbesatz und Fütterung überdüngten Kleinseen). Sie sind für Badende nicht nur unästhetisch. Viele Cyanobakterienarten bilden auch Gifte, die beim Verschlucken zu Übelkeit und Leberschädigung führen können.

Die Wirkung von Stickstoffeinträgen auf die Gewässer hängt vom Vorhandensein anderer Nährstoffe ab. In Gewässern ist neben der Stickstoff- häufig die Phosphorkonzentration wachstumslimitierend. Daher sind Oberflächengewässer gegenüber Stickstoffverbindungen unterschiedlich empfindlich. Von der flächendeckenden Zunahme der Stickstoffbelastung sind vor allem natürlicherweise ganzjährig oder temporär stickstofflimitierte Binnenseen des norddeutschen Tieflandes betroffen (z. B. Stechlinsee). Die naturraumtypischen Lebensgemeinschaften dieser an niedrige Stickstoffkonzentrationen angepassten seltenen Ökosysteme sind bei anhaltend hohen Stickstoffeinträgen stark gefährdet. Sie werden durch andere, weit verbreitete Lebensgemeinschaften ersetzt. Für das Pflanzenwachstum in den meisten Flüssen, Seen und den Küstengewässern ist hingegen das Element Phosphor der wachstumsbegrenzende Nährstoff. Das liegt daran, dass das Verhältnis Stickstoff zu Phosphor in biologischen Systemen (16 Mol N zu 1 Mol P) in Gewässern heute zu Gunsten des Stickstoffs verschoben ist, d. h. wesentlich höher liegt. Ursache sind die überproportional hohen Stickstoffeinträge in die Umwelt. Daher übernimmt der Phosphor im Wasser die limitierende Rolle, die der Stickstoff, u. a. wegen der Verluste an löslichem Nitrat, in den Böden meistens einnimmt. Stickstoffeinträge allein bewirken daher in solchen Gewässern noch keine eutrophierenden Veränderungen. Um den guten ökologischen Zustand dieser Gewässer wiederherzustellen, ist es deshalb entscheidend, neben den Stickstoffeinträgen auch die Phosphoreinträge zu reduzieren. Eine parallele Reduktion der Stickstoff- und Phosphoreinträge ist wichtig, da z. B. Stickstoffmangelbedingungen bei gleichzeitig gesteigerter Phosphorverfügbarkeit unter Umständen das massenhafte Wachstum von Cyanobakterien fördern können, die in der Lage sind, Stickstoff aus der Luft zu binden und für ihr Wachstum zu verwenden.

Studien zeigen, dass einige Gewässerorganismen, wie die früher massenhaft vorkommende Flussperlmuschel und die Bachmuschel, bei erhöhten Stickstoffkonzentrationen im Gewässer nicht mehr vorkommen. Diese Arten gelten heute als vom Aussterben bedroht bzw. stark gefährdet. Reproduktionsfähige Bestände der Bachmuschel finden sich nur in Fließgewässern mit guter bis sehr guter Wasserqualität [17]. Ein direkter ökotoxikologischer Zusammenhang zwischen der Nitratbelastung und einer gehemmten Reproduktivität konnte aber bisher nicht festgestellt werden. Auch durch die Nährstoffbelastung indirekt ausgelöste Ursachen (Sauerstoffarmut, Verschlickung) tragen zu einer Dezimierung der Bachmuschelbestände bei.

Nitrit und Ammoniumverbindungen können unter bestimmten Bedingungen in Gewässern auch direkte toxische Wirkungen auf Gewässerorganismen entfalten.



BOX 12: GÜTEKLASSIFIKATIONSSYSTEM DER LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER

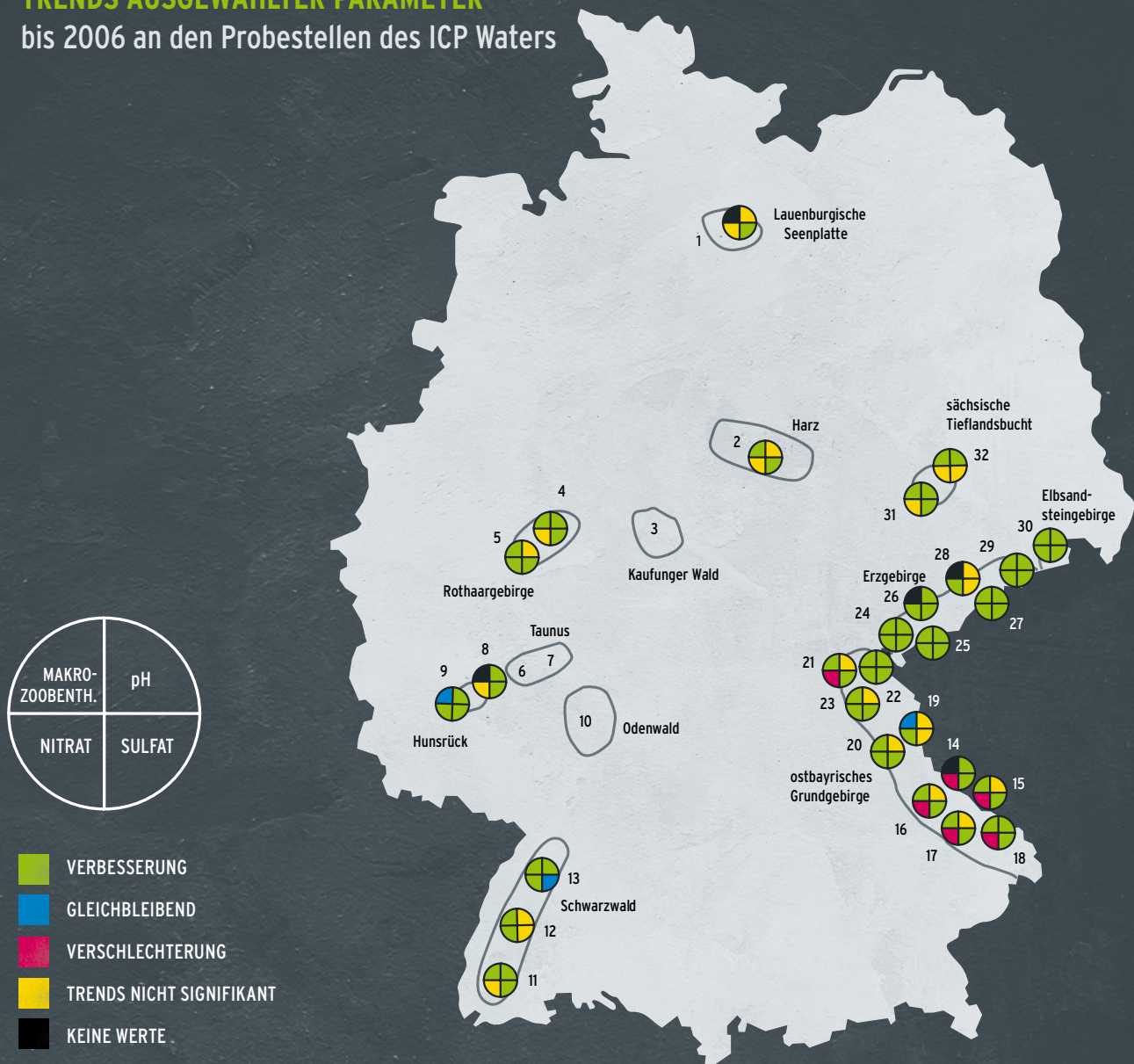
Aufgrund der Nährstoffproblematik hat die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) Nitrat (wegen des Schutzes der Meere vor Überdüngung), Ammonium (wegen der toxischen Wirkungen) und Phosphor (wegen des Schutzes der Flüsse und Seen vor Überdüngung) in ihr Güteklassifikationssystem aufgenommen. Ziel ist die Güteklasse II. An den Messstellen des LAWA-Messstellennetzes (Fließgewässer) wird die Güteklasse II und besser 2008 an 17 % der 144 Messstellen für Nitrat, an 85 % der 144 Messstellen für Ammonium sowie an 28 % der 136 Messstellen für Phosphor erreicht.

Die unter anderem durch Stickstoffeinträge verursachte Versauerung von Binnengewässern tritt in Deutschland vor allem in den Oberläufen von Mittelgebirgsbächen in den geologisch säuresensiblen Gebieten Deutschlands auf. Diese Gewässer besitzen aufgrund des kalkarmen Gesteins im Einzugsgebiet natürlicherweise nur eine sehr begrenzte Säurepufferkapazität. Dort können Fische und andere Lebewesen der Fließgewässer wegen der Versauerung aussterben. In Nordeuropa war in den letzten Jahrzehnten die Säurebelastung in vielen Flüssen und Seen so hoch, dass es kaum noch Fische gab. Durch die Minderung der Einträge versauernd wirkender Schwefelverbindungen und die langfristige und teure Kalkung der Gewässer und ihrer Einzugsgebiete erholen sich die Bestände langsam wieder.

Auch die Ergebnisse des seit 1986 durchgeführten Versauerungsmonitorings im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention (Kooperativprogramm Wasser, ICP Waters) belegen einen Rückgang der Versauerung in vielen Oberflächengewässern Deutschlands in den letzten Jahren [18]. Auch hier zeigt der überwiegende Teil der Messstellen einen Rückgang der Belastung durch Schwefelverbindungen und Nitrat.

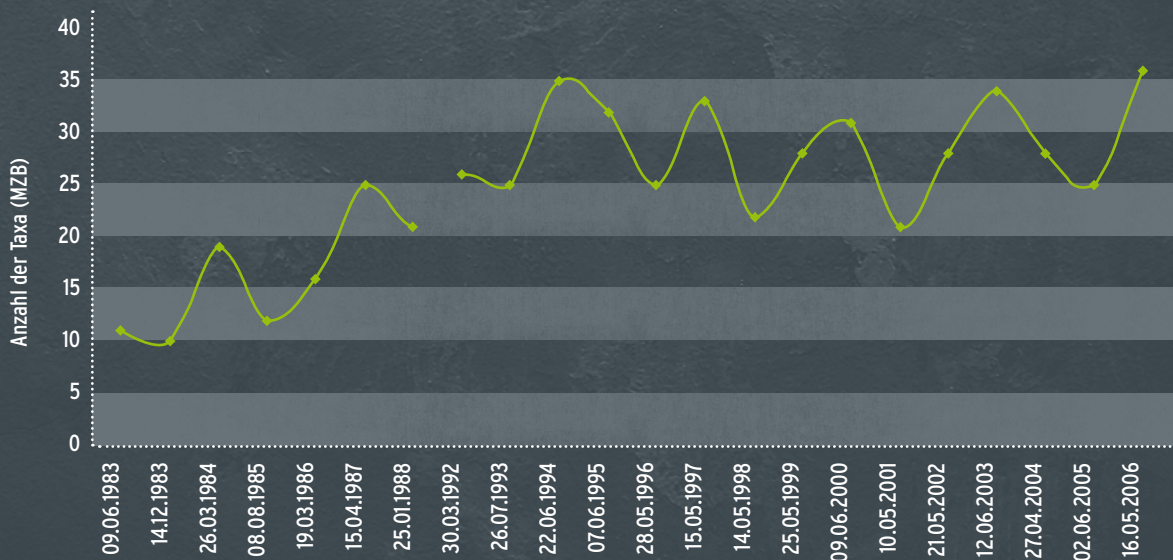
ABBILDUNG 4:

TRENDS AUSGEWÄHLTER PARAMETER bis 2006 an den Probestellen des ICP Waters



ENTWICKLUNG DER ARTENZAHLEN DER KLEINLEBEWESEN

des Gewässergrundes am Hinteren Schachtenbach über den Untersuchungszeitraum



Der Rückgang der Versauerung zeigt sich auch in der Entwicklung der Lebensgemeinschaft des Makrozoobenthos, d. h. der am Gewässergrund lebenden Wirbellosen wie Muscheln, Schnecken, Krebse und Insektenlarven. Langfristig weisen fast alle Bäche eine Verbesserung hinsichtlich der Zusammensetzung dieser Lebensgemeinschaft auf, die aber in einigen Fällen noch nicht sehr deutlich ausgeprägt ist.

In Abbildung 4 ist exemplarisch die Entwicklung der Artenzahl der Kleinlebewesen des Gewässergrundes für den Hinteren Schlachtenbach (Bayerischer Wald) in den letzten Jahrzehnten dargestellt. Nach einer Zunahme der Anzahl an Arten, v. a. der säureempfindlichen Stein- und Eintagsfliegenlarven, stagniert der Artenbestand ab Mitte der 1990er Jahre ohne den natürlichen Ausgangszustand vor der Versauerung wieder zu erreichen. Bei den Kieselalgen nahm ebenfalls die Anzahl der säureempfindlichen Arten zu, was auf die rückläufige Säurebelastung des Gewässers zurückzuführen ist.

In die Meere gelangt der Stickstoff hauptsächlich über die Flüsse, aber auch über die Atmosphäre. 2004 wurden insgesamt 1,3 Millionen Tonnen Stickstoff in die Nordsee eingetragen, davon 64 % über den Wasserweg und 36 % über die Atmosphäre. In die Ostsee gelangten über den Zeitraum 2001–2006 gemittelt jährlich 641.000 Tonnen Stickstoff über den Wasserpfad (Flüsse und Küste) und zwischen 196.000 Tonnen bis 224.000 Tonnen Stickstoff über die Atmosphäre. In den Meeren ist Stickstoff der wachstumsbegrenzende und damit der entscheidende Faktor für Nährstoffwirkungen. Durch den Nährstoffüberschuss verursachte Massenentwicklungen mancher Algen können dazu führen, dass der im Wasser gelöste Sauerstoff knapp wird. Ursächlich für den hohen Sauerstoffverbrauch sind Mikroben, die die abgestorbenen Algen zersetzen. Der Sauerstoffmangel führt dann dazu, dass kaum noch Organismen in den bodennahen Schichten überleben können. In einigen Regionen der Erde spricht man inzwischen von Todeszonen („dead zones“), weil jegliches Leben aus diesen Bereichen verschwunden ist. In der Ostsee kommen einige dieser sauerstofffreien Gebiete natürlicherweise vor. Die Zunahme ihrer Ausdehnung ist jedoch eine Folge der Eutrophierung. Steigende Temperaturen als Folge des Klimawandels tragen zur Verschärfung des Problems bei, da sie die Durchmischung des Wassers und den Transport von Sauerstoff in tiefere Wasserschichten verschlechtern.

Einige Folgen der Meereseutrophierung sind auch an den Küsten unübersehbar: In den frühen 1980er Jahren gab es alarmierende Meldungen über Algenpest und Fischsterben vor der Nord- und Ostseeküste. Und auch in jüngerer Zeit tauchten in den Sommermonaten immer wieder große Algenteppiche an den Meeresküsten auf, die das Badevergnügen und andere sportliche



Foto: RIBE / fotolia.de

Aktivitäten erheblich einschränken und auch Gesundheitsgefährdungen hervorrufen können. Bestimmte Algen sondern giftige Gase ab. Eines davon ist der nach faulen Eiern riechende Schwefelwasserstoff, ein akutes Zellgift, das über die Atmung in den Körper gelangt. 2009 wütete der „grüne Tod“ an den Küsten der Bretagne. Aus riesigen Algenteppichen entströmten giftige Gase. Ein Reiter entkam nur knapp dem Tod, sein Pferd starb an einer Überdosis Schwefelwasserstoff. An den Ostseestränden türmen sich alle Jahre wieder riesige Algenberge an den Stränden auf. Sie versperren nicht nur die Sicht, sondern riechen auch unangenehm. Ihre Beseitigung ist aufwendig und teuer.

Selbst wenn es gelingt, wie z. B. im Ostseeaktionsplan angestrebt, die Nährstoffeinträge in die Meere in den nächsten Jahren weiter zu reduzieren, stellt die zeitverzögerte Reaktion des Ökosystems Meer ein Problem dar. Es dürfte zwischen 10 und 30 Jahre dauern, bis sich der Eutrophierungsstatus nach erfolgter Reduktion der Nährstoffeinträge deutlich verbessert.

5.5 STICKSTOFF HEIZT UNS EIN

Wenn vom Klimawandel die Rede ist, dreht sich die Aufmerksamkeit vor allem um den immer noch zunehmenden globalen Ausstoß von Kohlenstoffdioxid (CO_2). Weniger Beachtung findet, dass auch andere Treibhausgase, darunter die Stickstoffverbindung Lachgas, zur globalen Erwärmung beitragen.

Die gezielte Stickstoffdüngung sowie die diffusen Einträge von Stickstoff in Böden und Gewässer erhöhen die Freisetzung von Lachgas in die Atmosphäre. Lachgas (Distickstoffoxid, N_2O) ist als Treibhausgas 298-mal wirksamer als CO_2 [19].

BOX 13:

Lachgas fördert den Klimawandel

Lachgas entsteht als Zwischenprodukt z. B. beim Abbau organischer Substanz und bei anderen Stoffumsetzungen (Nitrifizierung, Denitrifikation) in Böden und Gewässern. In die Atmosphäre emittiertes Lachgas verbleibt dort etwa 100 Jahre [19]. Bei seinem Aufstieg durch die unteren Atmosphärenschichten ist es relativ reaktionsträge. Erst in der Stratosphäre reagiert es unter der ungefilterten Einwirkung der Sonneneinstrahlung mit atomarem Sauerstoff und wird so abgebaut. Die Lachgaskonzentration in der Atmosphäre ist seit der vorindustriellen Zeit um fast 20 % gestiegen. In Deutschland beträgt der Anteil des Lachgases an der Gesamtemission von Treibhausgasen etwa 6 % (umgerechnet in CO_2 -Äquivalente).

Der größte Teil der deutschen N_2O Emissionen entsteht mit etwa 70 % in der Landwirtschaft und hier vor allem bei der Anwendung stickstoffhaltiger Dünger. Der zunehmende Anbau von düngemittel-intensiven Kulturen, wie Raps oder Mais zur Produktion von Bio-Diesel oder -Ethanol, hat daher, neben dem erwünschten Effekt fossile Brennstoffe einzusparen, auch unerwünschte Nebenwirkungen: Im Zuge der intensiven Düngung besteht das Risiko von steigenden Lachgas-Emissionen. Die Minderung von Treibhausgas-Emissionen aus fossilen Brennstoffen darf nicht durch höhere Freisetzungen bei der Erzeugung von Biomasse kompensiert werden. Deshalb müssen Biokraftstoffe nach der Biokraftstoff-Nach-

haltigkeits-Verordnung zurzeit ein Treibhausgas-Minderungspotential von wenigstens 35 % aufweisen. Bei der Berechnung dieses Potentials sind auch zusätzliche Lachgas-Emissionen aus dem Anbau der Biomasse zu berücksichtigen. Die Biogasgewinnung aus Gärresten oder Gülle ist zu bevorzugen, denn sie erfordert keine zusätzliche Düngung und spart deshalb in besonderem Maße Treibhausgas-Emissionen.

Der Eintrag von reaktivem Stickstoff in Waldökosysteme vermindert deren Fähigkeit klimawirksames Methan (CH_4) zu binden und trägt so zum Klimawandel bei. Bestimmte Bakterien in Waldböden nutzen Methan als Kohlenstoff- und Energiequelle; dadurch reduzieren sie die Methankonzentration in der Atmosphäre. Die gesteigerte Verfügbarkeit reaktiver Stickstoffverbindungen in Waldböden, beispielsweise durch NH_3 -Einträge aus der Luft, kann die Methanaufnahme der Bakterien um bis zu 40 % senken [20, 21]. Das Treibhausgaspotential von Methan ist 21-mal größer als das von CO_2 .

5.6 SCHLECHTE LUFT MACHT PFLANZEN KRANK

Der förderlichen Wirkung für das Pflanzenwachstum stehen unerwünschte Wirkungen durch Stickstoff entgegen. Sowohl in der Luft enthaltene Stickstoffverbindungen selbst als auch durch Stickstoff geförderte Sekundärschadstoffe können Pflanzen schädigen.

Ammoniak und Stickstoffdioxid verätzen bei hohen Konzentrationen in der Umgebungsluft Nadeln und Blätter. Das kann zu Änderungen der Wachstumsraten und Ernteverlusten führen. Solche Schäden treten bei Ammoniak allerdings nur im Umkreis von einigen hundert Metern oder Wind abwärts von Anlagen auf, die diesen Stoff in die Atmosphäre abgeben (insbesondere Tierhaltungsanlagen). Natürliche Vegetationsgesellschaften von Flechten und Moosen, beispielsweise in nährstoffarmen Mooren, weisen dagegen schon bei geringsten atmosphärischen Konzentrationen von Ammoniak starke Veränderungen in ihrer Artenzusammensetzung auf [22].

Stickstoffoxide sind neben flüchtigen organischen Substanzen (VOC) Vorläufersubstanzen für die Ozonbildung in den unteren Atmosphärenschichten. Dieses bodennahe Ozon ist in Deutschland und weiten Teilen Europas ein erheblicher Stressfaktor für Pflanzen. Es schädigt Blattoberflächen, beschleunigt den Alterungsprozess und verringert die Produktivität der Pflanzen. Entscheidend für die Ozonwirkung und die Ausbildung von Blattschäden ist der Ozonfluss über die Spaltöffnungen der Nadeln und Blätter in die Pflanze. Er wird nicht allein von der Ozonkonzentration in der Umgebungsluft bestimmt, sondern ist auch abhängig von klimatischen Faktoren wie Boden- und Luftfeuchte, Temperatur und Tageslicht sowie dem Entwicklungsstadium der Pflanzen.

BOX 14: MECHANISMEN DER OZONBILDUNG

Unter Einfluss intensiver Sonneneinstrahlung zerfällt Stickstoffdioxid (NO_2) zu Stickstoffmonoxid (NO) und atomarem Sauerstoff (O). Dieser verbindet sich mit elementarem Sauerstoff (O_2) zu Ozon (O_3). NO kann mit den VOC erneut zu NO_2 reagieren, so dass sich die Bildung von Ozon verstärkt.

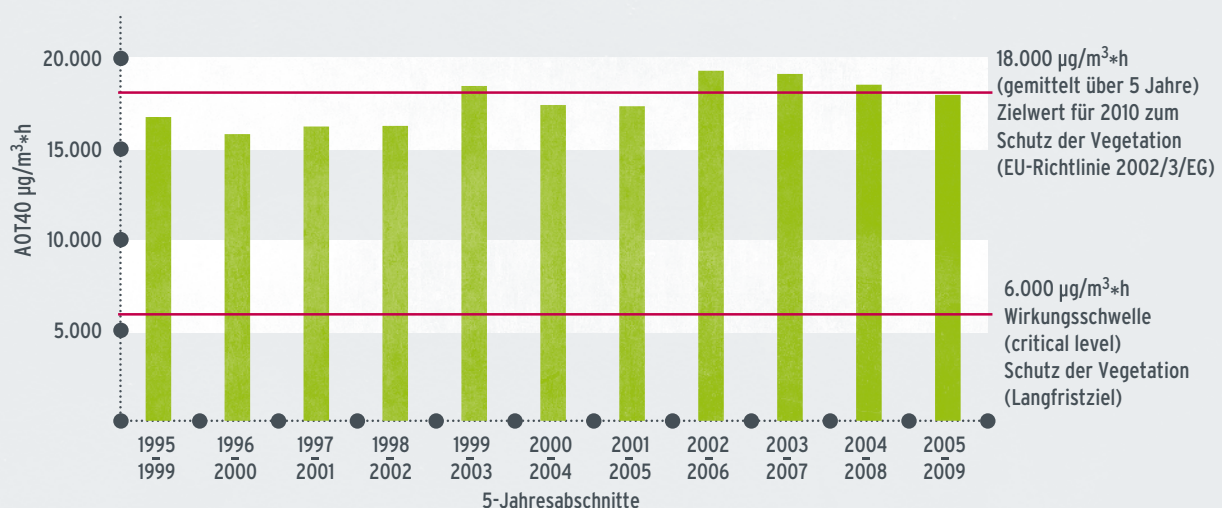
In verkehrsreichen Bereichen ist die NO -Konzentration gegenüber der NO_2 -Konzentration stark erhöht, was zum Abbau von Ozon in den Innenstädten führt. Erst beim Weitertransport der Luftmassen wandelt sich das NO zunehmend zu NO_2 um, so dass die höchsten Ozonkonzentrationen häufig in verkehrsfernen oder ländlichen Gebieten auftreten.

Der Anteil von NO_2 nimmt in den letzten Jahren an vielen verkehrsnahen Messstellen zu, was dem erhöhten Direktausstoß von NO_2 durch Dieselfahrzeuge mit Oxidationskatalysator zugeschrieben wird.

Die Abbildung zeigt den Trend der 5-Jahres-Mittelwerte der Ozonkonzentration angegeben als Expositionsindex AOT40 (accumulated exposure over a threshold of 40 ppb). Zur Berechnung des AOT40-Wertes werden Ozonkonzentrationen die 40 ppb überschreiten über die gesamte Vegetationsperiode aufsummiert. Dieser Ansatz beruht auf der Beobachtung, dass Schädigungen an Pflanzen auftreten, sobald die Ozonkonzentrationen 40 ppb längere Zeit überschreiten.

OZON AOT40- 5-JAHRESMITTELWERTE (SCHUTZ DER VEGETATION)

in $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ - gleitende 5-Jahresmittelwerte über alle ländlichen Hintergrundstationen



Quelle: Umweltbundesamt 2010: Auswertung anhand der Daten der Messwerte der Länder und des Umweltbundesamtes

BOX 15: AKUTE, CHRONISCHE UND LATENTE WIRKUNGEN DES OZON AUF PFLANZEN

Ozon führt einerseits zu direkten Blattschäden. Solche akuten Wirkungen treten meist nach kurzen Belastungszeiten mit hohen Aufnahmeraten von Ozon durch die Pflanze auf. Sie zeigen sich besonders in äußerlich sichtbaren Symptomen wie punktförmigen oder flächenhaften Gewebezestörungen (Nekrosen) oder Verfärbungen (Chlorosen). Für den Landwirt bedeuten solche Schäden, dass die Pflanzen unansehnlich werden und wegen der Qualitätsminderung schlechter oder nur zu geringeren Preisen absetzbar sind. Länger anhaltende Einwirkungen von vergleichsweise niedrigen Ozonkonzentrationen können zu chronischen Wirkungen wie Veränderungen des Wuchses oder häufiger noch Vergilbungen einzelner Blatt- oder Nadelbereiche oder ganzer Organe führen. Es können auch latente Wirkungen eintreten, die nicht zu direkt sichtbaren Veränderungen der Pflanze führen. So können die Photosynthese und andere Stoffwechselprozesse gestört sein oder Veränderungen an pflanzlichen Gewebestrukturen und ihren Funktionsweisen auftreten. Ertragseinbußen bei verschiedenen Feldfrüchten von 10-30 % sind aus der Mittelmeerregion bekannt in geringerem Maße aber auch aus den kontinental geprägten

Regionen Mitteleuropas [23]. Häufig treten diese Wirkungen erst bei der zusätzlichen Einwirkung anderer Stressfaktoren auf (Trockenheit, Frost).



Feldsalat (links) und Kopfsalat mit durch Ozon geschädigten Blättern (jeweils oben)

Fotos: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig

Zu den gegenüber Ozon empfindlichen Pflanzenarten in Mitteleuropa gehören Waldbäume wie Buche, Lärche, Kiefer, landwirtschaftlich genutzte Pflanzen wie Weizen, Mais, Kartoffel, Weißklee, verschiedene Gemüsearten sowie eine große Zahl von Wildkräutern. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die erhöhte Empfindlichkeit einiger Wildpflanzen gegenüber Ozon zu Verschiebungen in der Artenzusammensetzung der Vegetation unter Ozonstress und damit zu Wirkungen auf die biologische Vielfalt führt. Genaue Erkenntnisse hierzu liegen noch nicht vor, jedoch enthalten besonders Berg-Grasland, Trockenrasen, Gehölzsäume, Heiden und Feuchtgebiete einen hohen Anteil an ozonempfindlichen Pflanzenarten und sind deshalb in ihrer Artenzusammensetzung durch Ozon potenziell gefährdet [24]. Vermindertes Pflanzenwachstum kann dazu führen, dass Ökosysteme weniger Kohlenstoff aus der Luft aufnehmen und speichern, so dass Ozon in der bodennahen Luft potenziell auch zum Klimawandel beiträgt.

5.7 SCHADSTOFFE IN DER ATEMLUFT

Saubere Luft ist Grundlage eines gesunden Lebens in Stadt und Land. Besonders in den Innenstädten trägt das erhöhte Verkehrsaufkommen zur Belastung der Luftqualität bei. Füllte noch vor Jahren der Sommersmog die Nachrichten, gibt es heute breite Diskussionen um die Minderung von Feinstaub und Stickstoffdioxid in Innenstädten, insbesondere im Zusammenhang mit der Einführung von Umweltzonen. Doch welche Rolle spielen Stickstoffverbindungen, wenn es um die Reinheit der Luft geht?

Ab 2010 darf der gesetzlich vorgeschriebene Grenzwert von $40 \mu\text{g}$ Stickstoffdioxid (NO_2) pro Kubikmeter (m^3) Luft im Jahresmittel nicht mehr überschritten werden (so genannter Langzeit-Grenzwert). Die Konzentrationen von NO_2 sind an stark befahrenen Straßen in Ballungs-

räumen und Städten am höchsten und übersteigen den Grenzwert teilweise erheblich.

Erhöhte Stickstoffdioxid-Konzentrationen der Luft belasten die menschliche Gesundheit direkt durch Reizung der Schleimhäute im Allgemeinen und der Atemwegsschleimhäute im Besonderen. Sie begünstigen die Entstehung von Atemwegserkrankungen bzw. verstärken die Symptomatik bestehender Atemwegserkrankungen. Indirekt schädigt Stickstoffdioxid (gemeinsam mit anderen Stickstoffverbindungen sowie Schwefelverbindungen und Kohlenwasserstoffen) die menschliche Gesundheit durch Bildung so genannter Sekundärpartikel. Diese sind ein wesentlicher Bestandteil des Feinstaubs (Partikelgröße $<10 \mu\text{m}$ im Durchmesser). Das Einatmen von feinen und ultrafeinen ($<0,1 \mu\text{m}$) Partikeln führt zu entzündlichen Veränderungen im Atemtrakt und beeinträchtigt direkt und indirekt das Herz-Kreislauf-System.

Darüber hinaus schädigen Stickstoffoxide die menschliche Gesundheit durch verstärkte Bildung bodennahen Ozons (zur Ozon-Bildung vgl. Kapitel 5.6). Ozon selbst kann ebenfalls zu Reizungen der Schleimhäute und Atemwege und zur Beeinträchtigung der Lungenfunktion führen. Ein Bericht der WHO zeigt auf, dass in Europa jährlich etwa 21.000 Personen aufgrund akuter Ozon-Belastungen (täglicher Durchschnittswert über acht Stunden $>70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Luft) vorzeitig sterben [25]. Einige Hinweise deuten darüber hinaus auch auf ein erhöhtes gesundheitliches Risiko bei langfristiger Einwirkung geringerer Ozon-Konzentrationen hin. Neben Veränderungen der Atemluft sind Stickstoffverbindungen über komplexe chemische Reaktionsmechanismen auch am Abbau der stratosphärischen Ozonschicht beteiligt. Das erhöht die ultraviolette Strahlung, die die Erdoberfläche erreicht, und damit das Risiko von Hautkrebs-Erkrankungen.

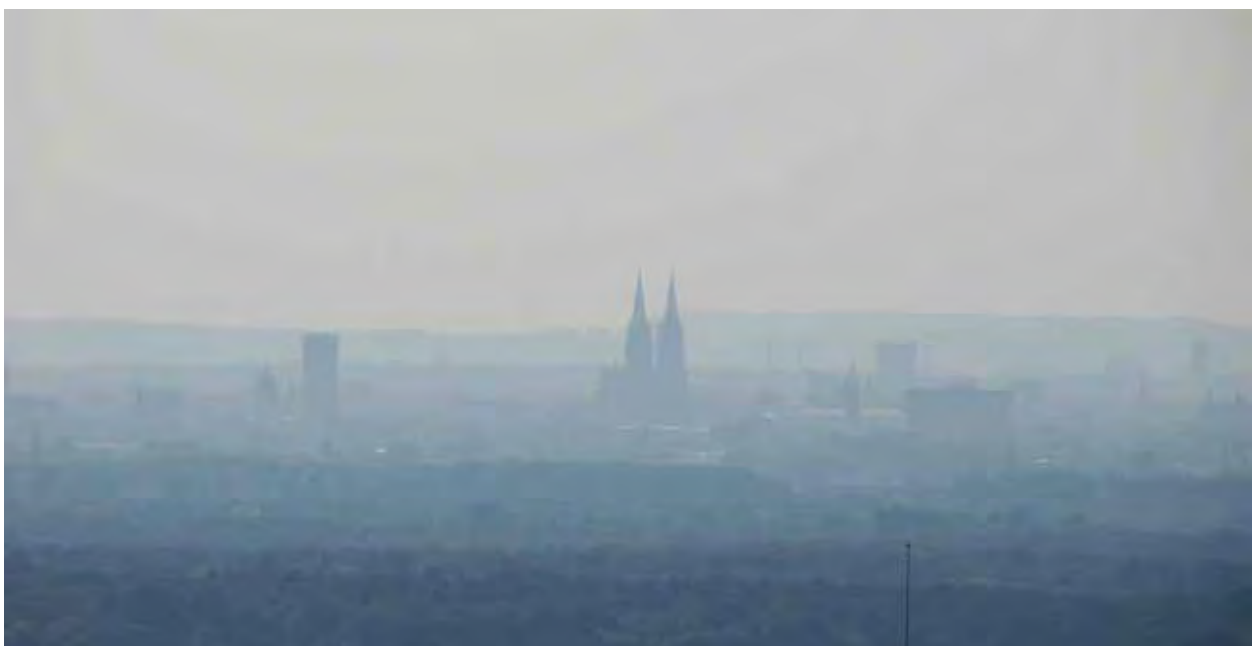


Foto: Thomas-Max-Müller / pixelio.de

ABBILDUNG 5: DEUTSCHLAND BETEILIGT SICH IM KOOPERATIVPROGRAMM ZU MATERIALIEN (ICP MATERIALS) DER GENFER LUFTREINHALTEKONVENTION AN UNTERSUCHUNGEN ZUR WIRKUNG VON LUFTSCHADSTOFFEN AUF MATERIALIEN.



Expositionsstand von Materialproben



Karussell mit Natursteinproben

Fotos: Fachbereich Denkmalschutz / Materialkunde des Deutschen Bergbaumuseums Bochum

5.8 MATERIALSCHÄDEN

Jedes Jahr führt die durch Luftschadstoffe verstärkte Verwitterung und Korrosion von Bausubstanz und Bau- denkmälern zu beträchtlichen Reparatur- oder Restaurierungsaufwendungen. Stickstoffverbindungen, insbesondere Salpetersäure (HNO_3) sowie Partikel, die zu einem unterschiedlich großen Teil aus Stickstoffverbindungen bestehen, haben daran einen großen Anteil.

Nicht nur die direkte Wirkung der Luftschadstoffe ist für Schäden verantwortlich. Bauwerke aus Kunst- oder Naturstein weisen an ihrer Oberfläche natürlicherweise eine mikrobiologische Besiedlung auf. Diese beziehen den für ihren Stoffwechsel notwendigen Stickstoff aus der Luft. Die Verstärkung der Besiedlung führt zu ungünstigen Veränderungen im Feuchtehaushalt der Baustoffe, z. T. zu höheren Ablagerungsraten anderer Schadstoffe (Fängerwirkung der Mikrobenschicht) und in gewissen Umfang zu einer Verwitterung durch die Stoffwechselprodukte (z. B. Säuren, die Kalk lösen). Auch die durch Stickstoffoxidemissionen erhöhten Ozonkonzentrationen in der Luft tragen zu Materialschäden bei. Wie bei Pflanzen wirkt Ozon auch auf organische Materialien (polymere Kunststoffe, Gummi, Beschichtungen) oxidierend; bei Metallen führt es zu beschleunigter Materialalterung und -verwitterung.

Die Verwitterungs- bzw. Korrosionsraten sind materialspezifisch unterschiedlich und von zahlreichen Umweltparametern wie Feuchtigkeit, Temperatur und den Konzentrationen verschiedener Schadstoffe abhängig. Das erhöhte Risiko für Materialschäden durch Luftschadstoffe (z. B. reaktive Stickstoffverbindungen) lässt sich aus dem Vergleich der Korrosionsraten in gering belasteten Regionen und stark belasteten Regionen (urbane und industriellen Gebiete) ableiten. Durch Maßnahmen zur Luftreinhaltung, insbesondere die Minderung der Be-

lastung mit Schwefelverbindungen in den vergangenen Jahrzehnten, sind entsprechende Materialschäden in Deutschland bereits deutlich zurückgegangen. Bei Stickstoffverbindungen wurden solch deutliche Erfolge bisher noch nicht erreicht. Im Jahr 2000 waren die aktuellen Korrosionsraten noch immer 1,5- bis 5-mal größer als die Hintergrundkorrosionsraten, wobei die betroffenen Flächen große Teile von Deutschland umfassten. Eine grundlegende Änderung der Situation ist seit dem Jahr 2000 noch nicht eingetreten.

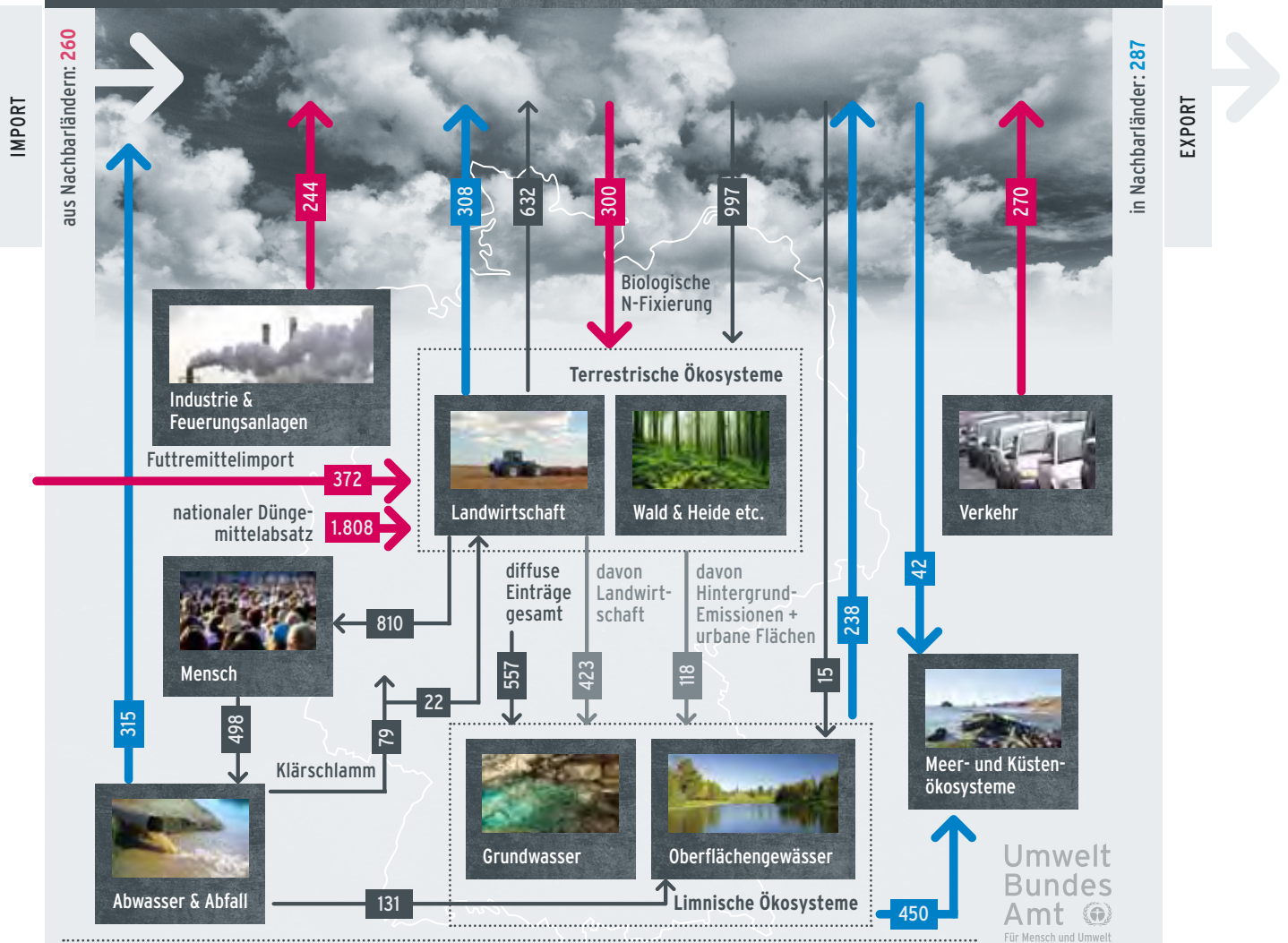
5.9 WIE IST DIE STICKSTOFFBELASTUNG IN MEINER NACHBARSCHAFT?

Gewässerökosysteme, Grundwasser, Böden und Atemluft weisen lokal unterschiedliche Belastungen der schädigenden Stickstoffverbindungen oder ihrer Folgeprodukte auf. Im Internet lassen sich lokale Belastungswerte von Nitrat (NO_3^-), Stickstoffdioxid (NO_2), Ozon (O_3), Ammoniak (NH_3) und Feinstaub recherchieren.

- Die Ammoniakemissionen großer Tierhaltungsbetriebe lassen sich deutschlandweit im vom UBA betriebenen „Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister“ (www.prtr.bund.de) anzeigen.
- Der Eintrag von Stickstoffverbindungen aus der Luft in Ökosysteme lässt sich landnutzungsspezifisch und in einem Raster von $1 \times 1 \text{ km}^2$ deutschlandweit auf dem Geodatenserver des UBA nachschlagen (<http://gis.uba.de/website/depo1/viewer.htm>)
- Über die Belastung des Trinkwassers mit Stickstoffverbindungen (z. B. Nitrat) informieren die lokalen Wasserversorger, die entsprechende Analytikerggebnisse regelmäßig aktualisieren und veröffentlichen.
- Das UBA veröffentlicht aktuelle Ozondaten sowie NO_2 - und Feinstaub-Konzentrationen für ganz Deutschland in Kartenform und als Tabellen (<http://www.env-it.de/umweltbundesamt/luftdaten/index.html>).

[illegible]

STICKSTOFF – ZUVIEL DES GUTEN?



alle Zahlen in Gg Rein-N → Import in den Kreislauf → Export aus dem Kreislauf → Fluss im Kreislauf

Etwa 3,2 Millionen Tonnen Rein-Stickstoff gelangen als reaktive Stickstoffverbindungen in Deutschland jährlich in den Stickstoffkreislauf. Den größten Anteil daran haben mit 1,8 Millionen Tonnen die mineralischen Düngemittel. Rechnet man diese Menge Rein-Stickstoff in den Düngestoff Ammoniumnitrat (NH_4NO_3) um, so füllt diese Menge mehr als 128.000 Bahnwaggons. Ein solcher Zug hätte eine Länge von mehr als 2.300 km, was der Entfernung von Leipzig bis Madrid entspricht.

Aus anderen Ländern oder Regionen kommt Stickstoff über Futtermitteltransporte (etwa 370.000 Tonnen), aber auch über atmosphärische Einträge (etwa 260.000 Tonnen) nach Deutschland. Die biologische Stickstofffixierung durch die Landwirtschaft und in Ökosystemen beträgt etwa 300.000 Tonnen pro Jahr. Verbrennungsprozesse in Industrie, Energiewirtschaft, Haushalten und Verkehr setzen rund 520.000 Tonnen Stickstoff frei. In der Abbildung sind diese Einträge durch rote Pfeile kenntlich gemacht. Zahlenangaben, wie viel reaktiver Stickstoff den Kreislauf verlässt, sind schwieriger abzuleiten. Bisher konnte die Entfernung von rund 2 Millionen Tonnen relativ sicher mit Zahlen belegt werden. Dazu gehören der grenzüberschreitende atmosphärische Transport in Nachbarländer (etwa 700.000 Tonnen Stickstoff), der Austrag über Fließgewässer in die Meere (etwa 450.000 Tonnen) und die Umwandlung von reaktivem Stickstoff in molekularen Stickstoff (N_2) (etwa 850.000 Tonnen). Diese Umwandlung zu

N_2 (Denitrifikation) setzt sich zusammen aus der Freisetzung aus Fließgewässern mit etwa 250.000 Tonnen, aus der gezielten Abwasserbehandlung durch Denitrifikation mit etwa 300.000 Tonnen und aus mikrobiologischen Prozessen in landwirtschaftlichen Systemen mit geschätzten 300.000 Tonnen (blaue Pfeile in der Abbildung).

Unsicherheit besteht derzeit noch über den Verbleib der Differenz zwischen den bekannten Ein- und Austrägen. Ein Teil davon könnte durch weitere, bisher nicht ausreichend untersuchte Umsetzungsprozesse in den Ökosystemen als elementarer Stickstoff den Kreislauf reaktiver Stickstoffverbindungen wieder verlassen. Reaktiver Stickstoff reichert sich aber auch in der Umwelt an, z. B. als Nitrat im Grundwasser, als Humus in Böden und in der Biomasse von Wäldern. Das bedeutet eine von Jahr zu Jahr zunehmende Gefahr schädlicher Wirkungen, denn die akkumulierten Stickstoffmengen können unter bestimmten Umständen wieder freigesetzt werden.

Die Abbildung zeigt auch die Vielfalt der Stoffflüsse zwischen den Teilsystemen des Stickstoffkreislaufs. Die Freisetzung gasförmiger Stickstoffverbindungen (NH_3 , NO_x , N_2O) aus Verbrennungsprozessen und der Landwirtschaft in die Atmosphäre ist mit etwa 1,2 Millionen Tonnen pro Jahr (das sind etwa 63 % aller deutschen Stickstoffemissionen) der bedeutendste Fluss des Stickstoff-Kreislaufs in Deutschland.

Viele stickstoffbezogene Umweltziele werden in Deutschland noch nicht erreicht. Um die negativen Umweltwirkungen gesamthaft zu mindern und gleichzeitig die Vorteile reaktiven Stickstoffs in der Nahrungsmittelproduktion effizient zu nutzen, bedarf es einer integrierten Betrachtungsweise. Das Umweltbundesamt entwickelte deshalb eine integrierte Strategie zur Minderung von Stickstoffemissionen.

In den letzten zwei Jahrzehnten gelang eine Minderung der Freisetzung von Stickstoffoxiden aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe um etwas mehr als 50 %. Die jährlichen Ammoniak-Emissionen stagnieren jedoch seit 1991 mit leichten Schwankungen bei etwa 600.000 Tonnen NH_3 auf unverändert hohem Niveau. Sie stammen zum größten Teil aus der Landwirtschaft. Auch die Emission von Lachgas weist seit zehn Jahren keinen abwärtsgerichteten Trend mehr auf. Die Lachgasemissionen aus der Landwirtschaft konnten sogar bereits seit 1991 nicht mehr reduziert werden. Die Stickstoffeinträge in Oberflächengewässer lagen in Deutschland im Mittel des Zeitraumes 2003-2005 bei 565.000 Tonnen jährlich. Sie verminderten sich gegenüber 1985 um 45 %. Die Einträge in Nord- und Ostsee nahmen im gleichen Zeitraum um 48 % beziehungsweise 50 % ab. Die international vereinbarte Zielstellung einer Halbierung der Stickstoffeinträge in die Meere ist somit für die deutschen Einzugsgebiete von Nord- und Ostsee, wenn auch mit Verzögerung, erreicht.

Um eine Verbesserung des Umweltzustands zu erreichen, setzt sich die Politik Umweltqualitätsziele. Eine Reihe von stickstoffbezogenen Umweltzielen wurde jedoch bisher verfehlt, da die Emission reaktiven Stickstoffs in die Umwelt noch nicht ausreichend reduziert wurde. So ist z. B. die Artenvielfalt in Deutschland nach wie vor durch Stickstoffeinträge ernsthaft bedroht. Die Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt [27] konstatiert, dass mehr als die Hälfte der Gefäßpflanzen durch die hohen atmosphärischen Stickstoffeinträge in ihrem Bestand gefährdet sind. Die gegenwärtigen Stickstoffemissionen müssen also weiter reduziert werden, um

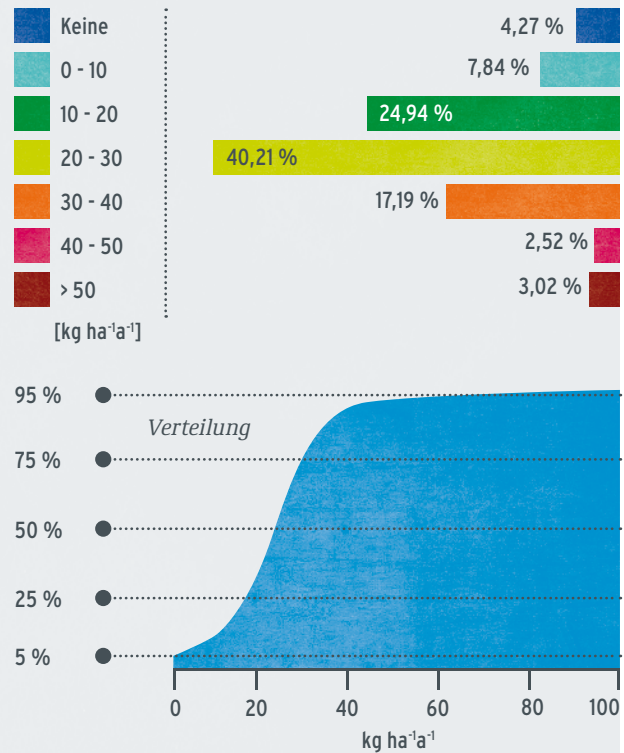
- den Verlust an biologischer Vielfalt sowohl an Land als auch in Binnengewässern und Meeren einzudämmen,
- geltende Richt- und Grenzwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit einzuhalten,
- die in internationalen Vereinbarungen (z. B. Genfer Luftreinhaltekonvention) und rechtsgültigen EU-Richtlinien (z. B. Nitratrichtlinie) festgelegten Emissionsminderungsziele und Qualitätskriterien zu erreichen und
- die im Klimarahmenabkommen und dem Kyoto Protokoll getroffenen Verpflichtungen zu erfüllen und den Anstieg der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre zu mindern, um eine gefährliche Störung des Klimasystems der Erde zu verhindern.

Landökosysteme, die nicht landwirtschaftlich bewirtschaftet werden, erhalten vom Menschen verursachte Stickstoffeinträge nahezu ausschließlich aus der Atmosphäre. Um ein Maß für die atmosphärische Deposition zu bestimmen, bei der langfristig (noch) keine schädlichen Wirkungen auf die Ökosysteme, aber auch das Grundwasser zu befürchten sind, wurden kritische Belastungsgrenzwerte (engl. Critical Loads) abgeleitet. Die Überschreitung der kritischen Belastungsgrenzwerte (Critical Loads-Überschreitung) für Stickstoffverbindungen durch die tatsächliche Deposition wird heute sowohl national als auch international als ein Indikator für die Gefährdung der biologischen Vielfalt verwendet. In Deutschland ist die Critical Loads-Überschreitung für Stickstoff Bestandteil des Kernindikatorensystems (KIS) des Bundes und der Länder. Auch die Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt greift die Einhaltung der Critical Loads als Ziel auf. Die Europäische Umweltagentur (EEA) nutzt den Indikator der Critical Loads-Überschreitung im Rahmen einer Initiative zur Bereitstellung von Indikatoren für die Erreichung des Zieles des UN Übereinkommens zur biologischen Vielfalt (CBD), den Verlust der Artenvielfalt bis zum Jahr 2010 zu stoppen.

Vor diesem Hintergrund hat das Umweltbundesamt im Jahr 2009 eine „Integrierte Strategie zur Minderung von Stickstoffemissionen“ erarbeitet [28]. Der Strategie liegt die umfangreiche Bilanzierung der Stickstoffflüsse zu Grunde (siehe Kapitel 6.1). Sie hat die Stickstoffflüsse sowohl von den Quellen in die Umwelt als auch zwischen den einzelnen Umweltbestandteilen (Luft, Boden, Wasser, Mensch) mit ihren Wirkungen weitgehend vollständig erfasst. Vor dem Hintergrund der Wandelbarkeit reaktiven Stickstoffs soll so eine Verschiebung von Problemen zwischen den Umweltmedien vermindert werden. Die Strategie zeigt darüber hinaus für die verschiedenen Emittentensektoren (Landwirtschaft, Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr u. a.) konkrete Maßnahmen zur Minderung von Stickstoffemissionen auf. Eine umfassende Bewertung der Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit, Stickstoffemissionen zu reduzieren und hinsichtlich der dafür entstehenden Kosten ist eine Voraussetzung, um mit den vorhandenen finanziellen Mitteln für Umweltmaßnahmen einen möglichst großen Vorteil für die Umwelt zu erreichen.

Der größte Handlungsbedarf und das größte Emissionsminderungspotential liegen in der Landwirtschaft. Vor allem bisher unverbindliche Managementmaßnahmen in diesem Sektor haben ein hohes Reduktionspotential und eine hohe Kostenwirksamkeit. Maßnahmen und Instrumente im Bereich der Landwirtschaft zeigen zudem die größten Synergieeffekte: Die Steigerung der Stickstoffeffizienz bei Düngung und Fütterung

ÜBERSCHREITUNG DES CRITICAL LOADS für eutrophierenden Stickstoff, 2004



Quelle: UBA-Texte 39/2008: Nationale Umsetzung UNECE-Luftreinhaltekonvention (Wirkungen) - Teil 2. FKZ: 20463252

führt zu einem reduzierten Eintrag reaktiver Stickstoffverbindungen in den Stickstoffkreislauf und kommt gleichzeitig den Landwirten zugute. Diese Maßnahmen sind als besonders effektiv zu werten, da sie neben der Reduzierung der Nitratauswaschung auch eine Senkung der Ammoniak- und Lachgas-Freisetzungen bewirken und somit gleichermaßen zum Erreichen von Zielen des Gewässer- und Klimaschutzes sowie der Luftreinhaltung beitragen. In den Bereichen Verkehr und Industrie wurden viele Maßnahmen, die sowohl

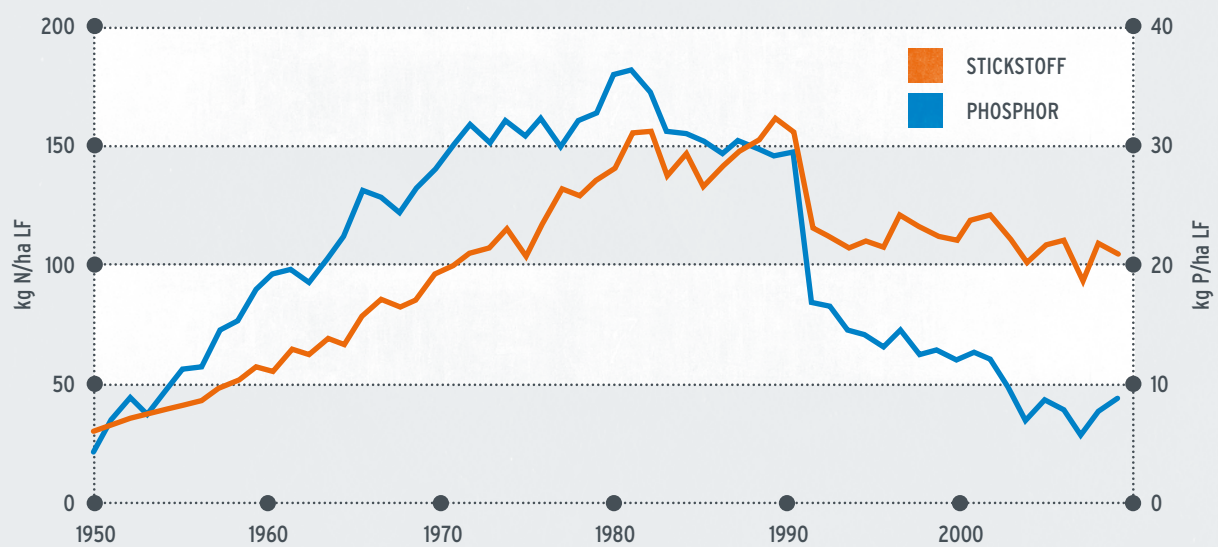
ein hohes Emissionsminderungspotential als auch eine hohe Kosteneffizienz aufweisen, bereits umgesetzt bzw. verbindlich vereinbart, wodurch sich die Emissionen aus diesen Bereichen in der Vergangenheit bereits merklich reduzierten. Gleichwohl gibt es auch hier noch Handlungsbedarf. Ein großes Potential liegt z. B. in Instrumenten die zu einer Einsparung und besseren Nutzung von Energie führen; diese Energieeinsparung dient dem Klimaschutz und führt zu einer vermindernden Freisetzung von Stickstoffoxiden.



Foto: emjay smith / fotolia.de

Die Intensivierung der Landwirtschaft brachte einige problematische Entwicklungen mit sich, die zu bedeutenden Umweltbelastungen, z. B. der Gewässer, geführt haben. Maßnahmen, den hohen Stickstoffüberschuss in der Landwirtschaft zu mindern, haben bisher nur teilweise Wirkung gezeigt. Die drastische Reduktion der Viehbestände in den neuen Bundesländern nach der Wiedervereinigung und die zaghafte Verbesserung des Düngemanagements seit Mitte der 1980er Jahre haben einen weiteren Anstieg der Stickstoffüberschüsse verhindert und sogar zu einem leichten Rückgang geführt. Dennoch wurde der Überschuss bisher nur unwesentlich gemindert. Seit 2007 enthält die Düngeverordnung

Obergrenzen für tolerierbare Stickstoffüberschüsse angegeben in Kilogramm pro Hektar (kg/ha). Ein Manko dabei: Die Landwirte müssen nur die Stickstoffflüsse auf ihren Ackerflächen erfassen. Ammoniakverluste, die ebenfalls Ökosysteme schädigen, bleiben unberücksichtigt. Die Abbildung zeigt dagegen die Entwicklung der Gesamtbilanz, die auch „Hoftorbilanz“ genannt wird, und die diese Verluste miteinschließt. In der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung wurde das Ziel formuliert die landwirtschaftlichen Stickstoffüberschüsse auf 80 kg Stickstoff pro ha zu reduzieren. Um dieses Ziel zu erreichen muss die Stickstoffeffizienz der Landwirtschaft in Zukunft erhöht werden.



Quelle: Umweltbundesamt, Universität Gießen, 2009

BOX 19:

MASSNAHMENVORSCHLÄGE FÜR DIE LANDWIRTSCHAFT

In der Landwirtschaft können Stickstoffemissionen in Gewässer und in die Luft besonders kosteneffizient vermindert werden. Im Bereich der Tierhaltung könnte eine stärker an den Eiweißbedarf der Tiere angepasste, stickstoffreduzierte Fütterung den Eintrag reaktiven Stickstoffs in landwirtschaftliche Systeme reduzieren. Zusätzlich bewirken technische Maßnahmen der Abluftreinigung in Ställen und bei der Güllelagerung eine deutliche Minderung der Emissionen in die Luft.

Bei der Düngung von Äckern und Weiden mit Wirtschaftsdüngern können moderne Ausbringtechniken und eine weitere Verringerung der Zeit bis zur Einarbeitung von Gülle oder Mist in die Ackerkrume Ammoniakemissionen deutlich vermindern. Beim Einsatz von Mineraldüngern lassen sich die Stickstoffemissionen durch den Ersatz von Harnstoffdüngern durch andere, emissionsärmere Mineraldünger deutlich vermindern.

Darüber hinaus kann beim Pflanzenbau durch stärkere Anpassung der Düngermengen an den tatsächlichen, standortgerechten Düngerbedarf der Pflanzen die unerwünschte Freisetzung von Stickstoff vermindert werden. Für die Berechnung der tatsächlich einzusetzenden Düngemittelmenge anhand des Bedarfs der Kultur und des bereits im Boden vorhandenen Stickstoffs sollten die Landwirte die Stickstoff-Nachlieferung aus den Düngegaben der Vorjahre berücksichtigen. Auch die stärkere Berücksichtigung von extremen Witterungsereignissen wie Frost oder Hitze spielt bei der Düngung eine wichtige Rolle. Die Verbesserung der Effizienz, mit der Stickstoff im Pflanzenbau genutzt wird, kann vor allem durch intensive Düngeberatung erreicht werden.

Eine auf diese Weise gesteigerte Effizienz, mit der Stickstoff eingesetzt wird, trägt dann gleichermaßen zu finanziellen Einsparungen bei jedem einzelnen Landwirt bei und reduziert Stickstoffüberschüsse, Ammoniakemissionen und Nitratauswaschungen ins Grundwasser.



Foto: Manolito / fotolia.de

6.3 DEN EIGENEN STICKSTOFFBEITRAG MINDERN

Wir alle beeinflussen durch unser Verhalten und unseren Lebensstil den Eintrag von reaktivem Stickstoff in die Umwelt. Deshalb kann auch jede und jeder Einzelne einen Beitrag leisten, um die entstehenden Probleme zu mildern. In vielfältiger Hinsicht profitiert davon nicht nur die Umwelt, sondern auch der Handelnde selbst.

Klimaschonendes Handeln reduziert fast immer auch die Emission reaktiver Stickstoffverbindungen. Die Einsparung von Energie und eine bessere Energieausnutzung führen also zu einer geringeren Freisetzung von reaktivem Stickstoff in der Umwelt. Besonders beim Heizen und dem Betrieb von Haushaltsgeräten kann jede und jeder Einzelne viel Energie einsparen [29]. Die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Quellen (Wind, Wasser, Sonne) trägt dazu bei Stickstoffoxid-Emissionen zu vermeiden, die zusammen mit CO₂ bei der Verbrennung entstehen. Dies gilt auch für den Straßenverkehr: je weniger Treibstoff pro gefahrenem Kilometer verbraucht wird, desto weniger reaktiver Stickstoff wird freigesetzt. Neuere Kfz mit einem EURO 5-Abgasstandard weisen deutlich geringere Stickstoffemissionen auf.

Eine Verringerung des Verzehrs von tierischem Eiweiß, also Fleisch, Eiern und Milchprodukten vermindert die Freisetzung reaktiver Stickstoffverbindungen. Pro Kilogramm Ware, müssen für die Produktion tierischer Nahrungsmittel wesentlich mehr Nährstoffe und Energie aufgewendet werden, als für die Erzeugung pflanzlicher Nahrungsmittel. Weniger Fleischkonsum vermindert au-

Berdem die Aufnahme von gesättigten Fettsäuren oder Cholesterol und damit das Herzinfarktrisiko.



Foto: Mikel_Wohlschlegel / fotolia.de

Der Kauf von landwirtschaftlichen Produkten aus biologischer Produktion hat nicht nur den Vorteil, dass diese praktisch keine chemischen Rückstände enthalten. Die Herstellung von Bio-Produkten geschieht ohne Einsatz von Mineraldünger und ist daher in vielen Fällen mit geringeren Stickstoffeinträgen in die Umwelt verbunden als die Produktion herkömmlicher Lebensmittel. Frische Produkte aus der Region bieten zudem den Vorteil, dass sie nicht weit transportiert werden müssen und keiner energieaufwendigen Verarbeitung unterliegen.

Beim Anbau von Obst und Gemüse im eigenen Garten lassen sich Stickstoffeinträge dadurch minimieren, dass mineralische und organische stickstoffhaltige Düngemittel nur äußerst sparsam und gezielt eingesetzt werden.

[illegible]

von reaktiven Stickstoffverbindungen in allen Umweltmedien zur Verfügung. Dieses Hintergrundwissen ist erforderlich, um politische Maßnahmen und Instrumente begründet ableiten und weiterentwickeln zu können. NinE bündelt dieses Wissen in einer europäischen Stickstoffbewertung, dem „European Nitrogen Assessment (ENA)“, und wird diese im Jahr 2011 veröffentlichen.

Auch im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention (siehe Box 20) werden diese wissenschaftlichen Erkenntnisse für die Entwicklung neuer Strategien verwendet. Die Arbeitsgruppe „Reaktiver Stickstoff“ („Task Force on Reactive Nitrogen“) ist seit 2008 beauftragt integrierte Lösungsansätze zur Verminderung von Emissionen reaktiver Stickstoffverbindungen zu erarbeiten.

Internationale Abkommen, die den Erhalt einzelner Schutzgüter zum Ziel haben, befassen sich ebenfalls intensiv mit der Stickstoffproblematik. Vor allem im Bereich der Luftreinhaltung (siehe Box 20) und im Meeresschutz sind internationale Vereinbarungen für Fortschritte beim Umweltzustand zwingend erforderlich: So

vereinbarten internationale Abkommen zum Schutz der Nord- und Ostsee (OSPAR und HELCOM) bereits in den 1980er Jahren eine Halbierung der Stickstofffrachten über die Flüsse in die Küstengewässer beider Meere, um Algenpest und Sauerstoffarmut zu reduzieren. Die Reduktion der Stickstofffrachten wurde in Deutschland erst in jüngster Zeit erreicht.

Im Rahmen des UN-Abkommens über die Biologische Vielfalt (CBD) spielt die Verminderung der Stickstoffbelastung von Ökosystemen als entscheidende Voraussetzung für den Schutz der Biodiversität eine wichtige Rolle. Das Abkommen hat die Entwicklung des Stickstoffeintrags als Indikator festgelegt, um Erfolge bei der Reduzierung der gegenwärtigen Rate des Artenverlusts bewerten zu können (siehe auch Box 17).

Im Klimarahmenabkommen und seinem Protokoll von Kyoto wurden die Minderungen von bestimmten Treibhausgasemissionen, darunter auch Lachgas, verpflichtend festgeschrieben. Derzeit wird über die Verschärfung der Verpflichtungen verhandelt.

BOX 20: GENFER LUFTREINHALTEKONVENTION



Bereits zu Beginn der 1970er Jahre verdichteten sich wissenschaftliche Beweise für einen Zusammenhang zwischen grenzüberschreitenden Luftverunreinigungen und großflächigen Umweltschäden: Saurer Regen führte zum Fischsterben in skandinavischen Seen und zum „Waldsterben“ in Europa. Vor diesem Hintergrund wurde die UNECE Konvention über weiträumige, grenzüberschreitende Luftverunreinigungen über die „Grenzen des eisernen Vorhangs hinweg“ 1979 ins Leben gerufen. Sie hat das Ziel, Luftverschmutzung und ihre Wirkungen so weit wie möglich zu unterbinden.

Heute arbeiten unter dem Dach der Konvention verschiedene wissenschaftlich und politisch ausgerichtete Arbeitsprogramme institutionell sehr eng zusammen. Insgesamt acht spezifische Protokolle legen Handlungsziele und Maßnahmen für die beteiligten Staaten zur Reduktion von Luftschadstoff-Emissionen fest. Das so genannte Multikomponenten-Protokoll dient u. a. der Be-

kämpfung von Eutrophierung und Versauerung und trägt mit Hilfe von festgelegten nationalen Emissionsobergrenzen zur Reduktion der Emissionen von Stickstoffoxiden und Ammoniak bei. Eine Grundlage für die Ableitung der nationalen Emissionshöchstmengen sind beispielsweise flächenweite Beobachtungen und Bewertungen der negativen Wirkungen reaktiver Stickstoffverbindungen (Critical Loads-Überschreitungen). Das bedeutet, dass stärkere Emissionsminderungen dann erforderlich sind, wenn das Risiko für negative Umweltwirkungen durch Stickstoff besonders hoch ist. Die Konvention hat sich stets weiterentwickelt und neue wissenschaftliche Erkenntnisse berücksichtigt. Die jüngste Arbeitsgruppe „Reaktiver Stickstoff“ (Task Force on Reactive Nitrogen) entwickelt seit 2008 integrierte Lösungsansätze zur Emissionsminderung von reaktivem Stickstoff, um Synergieeffekte einer solchen Emissionsminderung auch in anderen Umweltschutzbereichen verstärkt zu nutzen.

8 LITERATUR

[illegible]

- [1] <http://www.uniterro.de/rutherford/ele007.htm>; zuletzt aufgerufen am 28.07.2010
- [2] Rockström J, Steffen W, Noone K, Persson Å, Chapin F S, Lambin E F, Lenton T M, Scheffer M, Folke C, Schellnhuber H J, Nykvist B, De Wit C A, Hughes T, Van Der Leeuw S, Rodhe H, Sörlin S, Snyder P K, Costanza R, Svedin U, Falkenmark M, Karlberg L, Corell R W, Fabry V J, Hansen J, Walker B, Liverman D, Richardson K, Crutzen P, Foley J A (2009): Planetary Boundaries: Exploring the safe operating space for humanity, Ecology and Society 14 (2): <http://www.stockholmresilience.org/planetary-boundaries>
- [3] Wiberg N (1985): Hollemann-Wiberg. Lehrbuch der anorganischen Chemie. 91.-100., verbesserte und stark erweiterte Auflage. Walter de Gruyter, Berlin, New York
- [4] Neumüller O-A (1987): Römpps Chemie-Lexikon / Otto-Albrecht Neumüller. Bd. 5. neubearb. u. erw. Aufl. Frankh'sche Verlagshandlung, Stuttgart
- [5] Stewart W M, Dobb D W, Johnston A E, Smyth T J (2005): The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. Agron. J. 97, 1 – 6
- [6] Erisman J W, Sutton M A, Galloway J, Klimont Z, Winiwater W (2008): How a century of ammonia synthesis changed the world. Nat. Geosci. 1: 636 – 639
- [7] Food and Agricultural Organisation of the United Nations (2007): International Conference on organic agriculture and food security, Rome, 3 – 5 May 2007, Report OFS/2007/REP, http://www.fao.org/organicag/ofsdocs_en.htm, zuletzt aufgerufen am 28.07.2010
- [8] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, Seitzinger S P, Howarth R W, Cowling E B, Cosby B J (2003): The Nitrogen Cascade. BioScience 53 (4): 341 – 356
- [9] <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>, zuletzt aufgerufen am 28.07.2010
- [10] UFZ (2009): Nachhaltigkeit statt Romantik, Laborgespräch VIII: http://www.nachhaltige-waldwirtschaft.de/fileadmin/Dokumente/Aktuelles/Laborgespraeche/09_Laborgespraeche_08.pdf, zuletzt aufgerufen am 28.07.2010
- [11] BMELV 2009 (Hrsg.): Waldbericht der Bundesregierung, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Bonn
- [12] BfN (2004): Daten zur Natur 2004, Bundesamt für Naturschutz, Bonn
- [13] WWF (2010): Leitfaden Nutzen der Biodiversität. http://assets.wwf.ch/downloads/factsheet_2_der_nutzen_der_biodiversitaet_2.pdf, zuletzt aufgerufen am 28.07.2010
- [14] Birkhofer K, Wolters V (2009): Modellierung und Kartierung räumlich differenzierter Wirkungen von Stickstoffeinträgen in Ökosysteme im Rahmen der UNECE-Luftreinhaltekonvention. Der Einfluss anthropogener Stickstoffeinträge auf die Diversität und Funktion von Bodenorganismen. Forschungsbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes. Förderkennzeichen (UFO-PLAN) 205 85 239.
- [15] Bobbink R (1991): Effects of Nutrient enrichment in Dutch chalk grassland. Journal of applied Ecology, 28, 28 – 41
- [16] Nordin A, Strengbom J, Witzell J, Näsholm T, Ericson L (2005): Nitrogen deposition and the biodiversity of boreal forests: Implications for the nitrogen critical load, Ambio 34, 20 – 24
- [17] Zettler M L, Jueg U (2001): Die Bachmuschel (Unio crassus) in Mecklenburg Vorpommern. Naturschutzarbeit in Mecklenburg-Vorpommern 44, H. 2, 2001, S. 9 – 16
- [18] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2007): Monitoringprogramm für versauerte Gewässer durch Luftschadstoffe in der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen der ECE - Bericht der Jahre 2005 – 2006, im Auftrag des Umweltbundesamtes

- [19] IPCC Hrsg. (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. www.ipcc.ch
- [20] Butterbach-Bahl K, Kiese R (2005): Stickstoffdynamik und biologische Prozesse in Ökosystemen. Forschungsvorhaben (FKZ) 202 63 224, im Auftrag des Umweltbundesamtes
- [21] Steudler P A (1989): Influence of nitrogen-fertilization on methane uptake in temperate forest soils, *Nature* 341: 314 – 316
- [22] Cape J N, v d Erden, L J, Sheppard, L J, Leith, I D, Sutton, M A (2009): Evidence for changing the critical level for ammonia. *Env Poll* 157, 1033 – 1037
- [23] Hayes F, Mills G, Harmens H, Norris D (2007): Evidence of widespread Ozone Damage to Vegetation in Europe (1990-2006). International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops, Centre for Ecology and Hydrology, Bangor, United Kingdom
- [24] Mills G, Hayes F, Jones M L M, Cinderby S (2007): Identifying ozone-sensitive communities of (semi-) natural vegetation suitable for mapping exceedance of critical levels. *Environmental Pollution* 46 (3): 736 – 743
- [25] Amann M, Derwent D, Forsberg B, Hänninen O, Hurley F, Krzyzanowski M, de Leeuw F, Liu S J, Mandin C, Schneider J, Schwarze P, Simpson D (2008): Health risks of Ozone from long-range transboundary air pollution, World Health Organisation, WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark
- [26] Umweltbundesamt (2009a): Hintergrundpapier zu einer multimedialen Stickstoffemissionsminderungsstrategie <http://www.umweltbundesamt.de/luft/downloads/emissionen/hg-stickstoffemissionsminderungsstrategie.pdf>, zuletzt aufgerufen am 28.07.2010
- [27] Weitere Informationen zur Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt unter: www.biologischesvielfalt.de/
- [28] Umweltbundesamt (2009b): Integrierte Strategie zur Minderung von Stickstoffemissionen (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3813.pdf>, zuletzt aufgerufen am 28.07.2010)
- [29] Umweltbundesamt (2010): Energiesparen im Haushalt – Gut fürs Klima, gut fürs Portemonnaie (www.umweltbundesamt.de/energie/sparen.htm, zuletzt aufgerufen am 28.07.2010)
- [30] Jacobsen C, Rademacher P, Meesenburg H, Meiwes K J (2002): Elementgehalte in Baumkompartimenten – Literaturstudie und Datensammlung. Göttingen: Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt

9 GLOSSAR

[illegible]

AOT 40	Summe der Differenz zwischen Konzentrationen über $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (= 40 ppb) und $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ unter Verwendung der 1-Stunden-Mittelwerte zwischen 8 und 20 Uhr (Accumulated Exposure Over a Threshold of 40 ppb)	NO	gasförmiges Stickstoffmonoxid
BfN	Bundesamt für Naturschutz	NO₂	gasförmiges Stickstoffdioxid
CBD	UN Übereinkommens zur biologischen Vielfalt (Convention on Biological Diversity)	NO₂-	gelöstes Nitrit
CH₄	Methan	NO₃-	Nitrat
CLRTAP	Genfer Luftreinhaltekonvention (Konvention über die Verminderung grenzüberschreitender Luftverunreinigungen)	N_{org}	organisch gebundener Stickstoff
CO₂	Kohlenstoffdioxid	NO_x	Stickstoffoxid
DNS	Desoxyribonukleinsäure Erbsubstanz	O	atomarer Sauerstoff
EEA	Europäische Umweltagentur	O₂	elementarer Luftsauerstoff
ENA	European Nitrogen Assessment	O₃	Ozon
ha	Hektar (100m*100m)	OSPAR	Kommission für das Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordost-Atlantiks
HELCOM	Helsinki-Übereinkommen: Übereinkommen über den Schutz der Meeresumwelt des Ostseegebiets	P	Phosphor
HNO₃	Salpetersäure	ppb	Teile pro Milliarde (parts per billion)
ICP	Wirkungsbezogenes „International Cooperative Programme“ der Genfer Luftreinhaltekonvention	UBA	Umweltbundesamt
INI	Internationale Stickstoff Initiative	UHZ	Umwelthandlungsziel
kg	Kilogramm	UNECE	Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen
KIS	Kernindikatorensystem des Umweltbundesamtes	UQZ	Umweltqualitätsziel
km	Kilometer	VOC	flüchtige organischen Substanzen
l	Liter	WHO	Weltgesundheitsorganisation
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser	WWF	World Wide Fund For Nature (internationalen Naturschutzorganisationen)
m³	Kubikmeter		
mg	Milligramm (1000 Milligramm = 1 Gramm)		
µg	Mikrogramm (1 Million Mikrogramm = 1 Gramm)		
µm	Mikrometer (1 Million Mikrometer = 1 Meter)		
N	Stickstoff		
N₂	elementarer Stickstoff		
N₂O	Lachgas		
NH₃	Ammoniak		
NH₄⁺	Ammonium		
NH₄NO₃	Ammoniumnitrat		
NH_y	reduzierte Stickstoffverbindungen		
NinE	Nitrogen in Europe: Projekt der European Science Foundation		

[illegible]

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1, 06844 Dessau-Roßlau
Telefon: 0340 / 2103-0
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de
www.fuer-mensch-und-umwelt.de

Gudrun Schütze, Markus Geupel

Studio GOOD, Berlin
www.studio-good.de

10.000 Exemplare
Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Diese Publikation ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit
des Umweltbundesamtes.
Die Broschüre ist kostenlos zu beziehen bei:
Umweltbundesamt c/o GVP
Postfach 30 03 61 | 53183 Bonn
Service-Telefon: 0340 21 03 - 66 88
Service-Fax: 0340 21 04 - 66 88
E-Mail: uba@broschuerenversand.de

Die Broschüre steht auch im Internet als PDF-Dokument zum Download bereit:
www.umweltbundesamt.de



KONTAKT:

Umweltbundesamt

Wörlitzer Platz 1

06844 Dessau-Roßlau

Telefon: (0340) 21 03 - 0

E-Mail: info@umweltbundesamt.de

Internet: www.umweltbundesamt.de