

Stikstof

De sluipende
effecten op natuur
en gezondheid

Jan Willem Erisman
Wim de Vries
e.a.

Stikstof

De sluipende
effecten op natuur
en gezondheid

Redactie:

prof. dr. Jan Willem Erisman

prof. dr. Wim de Vries

prof. dr. Ellen van Donk

prof. dr. Jelle Reumer

prof. dr. Jos van den Broek (infographics)

ir. Astrid Smit (redacteur)

Joy Kerklaan MSc (coördinator)

Pauline van Schayck MSc (coördinator)

Over stichting Biowetenschappen en Maatschappij

Stichting Biowetenschappen en Maatschappij (BWM) is in 1969 op initiatief van prinses Beatrix en prins Claus opgericht om het Nederlandse en Vlaamse publiek te informeren over ontwikkelingen binnen de biowetenschappen (life sciences) en de daaraan verbonden maatschappelijke implicaties te bespreken. BWM verspreidt daartoe, zowel online als gedrukt, populairwetenschappelijke informatie over actuele thema's in de gezondheids- en biowetenschappen, geschreven door vooraanstaande wetenschappers. BWM verschaft inzicht in actuele en toekomstige ontwikkelingen en toepassingen van de biowetenschappen en de betekenis en gevolgen daarvan voor mens, natuur en maatschappij. De thema's worden zorgvuldig geselecteerd op maatschappelijke relevantie.

Vier keer per jaar worden publicaties uitgebracht in de vorm van boeken en cahiers die beschikbaar zijn via de boekhandel en via de webshop van BWM. Alle online informatie is kosteloos beschikbaar via de website.

www.biomaatschappij.nl



© 2021 stichting Biowetenschappen en Maatschappij

Omslag en vormgeving: Nico Richter

© Illustraties: zie de afzonderlijke illustraties

ISBN 978 90 8803 1144

NUR 910

Alle rechten voorbehouden | All rights reserved
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd
en/of openbaar gemaakt door middel van druk,
fotokopie of op welke andere wijze en/of
door welk ander medium ook, zonder voorafgaande
schriftelijke toestemming van de uitgever.

www.uitgeverijlias.nl

INHOUD

Voorwoord 9

– Carola Schouten

Inleiding 11

Een landelijke stikstofcrisis 11

– Jan Willem Erisman & Wim de Vries

1. Steeds meer stikstof 15

1.1 Hoe is het zover gekomen? De geschiedenis van stikstof in
een notendop 15

– Jan Willem Erisman & Wim de Vries

1.2 'Stikken in de stikstof' 20

– Jos van den Broek

1.3 De mens verspreidt veel reactieve stikstof 25

– Jan Willem Erisman

1.4 Een kwestie van meten en rekenen 31

– Roy Wichink Kruit

1.5 Ammoniak van landbouw, stikstofoxiden van verkeer 36

– Margreet van Zanten

Kader Bijdrage vliegverkeer aan stikstofdepositie is gering 38

– Jan Willem Erisman

Kader Het ammoniakgat: de emissies onderschat 41

– Jan Willem Erisman

[Interview](#) Marjolein Demmers, Natuur & Milieu 43

2. Stikstofeffecten 45

- 2.1 Stikstof: een veelkoppig monster 45
– Wim de Vries
- 2.2 De stikstofkringloop 48
– Wim de Vries & Jan Willem Erisman
- 2.3 De gevolgen van te veel stikstof voor het bodemleven 52
– Franciska de Vries, Matty Berg & Albert Tietema
- 2.4 De sluipende effecten van stikstofdepositie op de flora 55
– Roland Bobbink
- 2.5 De gevolgen van stikstofdepositie voor de fauna 61
– Arnold van den Burg & Michiel Wallis de Vries

[Kader](#) Stikstofindicator voor vlinders 63

– Arnold van den Burg & Michiel Wallis de Vries

- 2.6 Ammoniak schadelijker voor natuur, stikstofoxiden voor gezondheid 65
– Wim de Vries & Jan Willem Erisman

[Interview](#) Maxime Verhagen, Bouwend Nederland 67

- 2.7 Kritische depositiewaarden, natuurschade en natuurherstel 69
– Wim de Vries, Roland Bobbink & Han van Dobben
- 2.8 Stikstof in de zoete binnenwateren: winnaars en verliezers 74
– Emiel Brouwer
- 2.9 Fytoplankton: van stikstof naar gifstof 77
– Dedmer van de Waal
- 2.10 Hoe gezonde wateren stikstof verwijderen 79
– Sven Teurlincx & Annelies Veraart
- 2.11 Minder stikstof, wel zo gezond 82
– Onno van Schayck
- 2.12 Stikstofuitstoot beïnvloedt het klimaat 86
– Wim de Vries

[Stikstofweetjes](#) 91

[Interview](#) Natasja Oerlemans, Wereld Natuur Fonds (WWF-NL) 93

3. Stikstofaanpak 95

- 3.1 Stevige reductie stikstofemissie noodzakelijk 95
– Wim de Vries & Jan Willem Erisman

- 3.2 Waar kun je de stikstofuitstoot het best verminderen? 99

– Jan Willem Erisman & Ton Brouwer

- 3.3 Hoe emissies van ammoniak en stikstofoxiden te beperken 102

– Gerard Migchels & Wim de Vries

- 3.4 De directe en indirecte kosten en baten van stikstof 105

– Hans van Grinsven

- 3.5 Heide en bos knappen nog niet op van herstelmaatregelen 110

– Henk Siepel

[Interview](#) Teo Wams, Natuurmonumenten 113

4. Stikstofbeleid 115

- 4.1 Het stikstofbeleid vanaf 1970 115

– Jan Willem Erisman & Wim de Vries

- 4.2 Hoe de overheid voor de muziek uitliep 119

– Ralph Frins

- 4.3 Rechter grijpt in – pas op de plaats voor stikstof 123

– Floor Fleurke

- 4.4 Buurlanden gaan anders om met het stikstofprobleem 126

– Wim de Vries & Hans Kros

- 4.5 Beloning van boeren voor maatschappelijke diensten 129

– Jan Willem Erisman, Anne van Doorn & Wim de Vries

[Kader](#) Wat kunt u doen? 133

– Jan Willem Erisman

- 4.6 De stikstofcrisis ligt nog lang niet achter ons 135

– Jan Willem Erisman & Wim de Vries

[Interview](#) Sjaak van der Tak, LTO Nederland 137

[Nawoord](#) 141

– Jan Willem Erisman & Wim de Vries

[Auteurs](#) 145

[Bronnen](#) 147

[Register](#) 152



Als kind sprak het ‘er zijn’ van de natuur vanzelf. Maar hoe groot was mijn verwondering toen ik ontdekte dat het landje waar ik speelde als natuur werd beheerd. Dat er een strategie bestond voor de natuur opende mij de ogen. Het was het begin van een veel bredere blik op natuur, bodem en water.

Hoe wij als mensen leven, raakt de natuur en andersom: wat om ons heen groeit en bloeit beïnvloedt ieders levenskwaliteit. Die verwevenheid wordt in de samenleving gezien en het besef leeft dat hier iets uit balans is. We zijn eraan gewend geraakt snel te reizen, volop te bouwen, veel energie te gebruiken, en goedkoop voedsel te verwerken, in een tijd waarin we ook de gevolgen ondervinden van klimaatverandering. Met onze levensstijl zetten we onze toch al kwetsbare omgeving extra onder druk. We moeten die druk nu weg zien te nemen door te werken aan een nieuw, duurzaam evenwicht, waarbij natuur, water en bodems de ruimte hebben om te herstellen en tegelijkertijd iedereen goed kan wonen, werken en leven.

Dat evenwicht is enorm complex. Minder stikstof is een onontkoombare voorwaarde. Daar biedt de nieuwe stikstofwet ons een mooie basis voor, maar écht minderen moeten mensen, organisaties

en overheden samen voor elkaar krijgen. Veel mensen uit bijna iedere hoek van de samenleving hebben er volop ideeën over. Rake, verrassende ideeën vaak, die passen bij een bepaalde omgeving. Niet zelden zijn ook boeren, tuinders en vissers zeer gemotiveerd om anders te gaan werken.

De energie om te werken aan een duurzame toekomst is er, maar natuurlijk plaveien we het pad naar die betere toekomst niet met een wettelijke basis en goede intenties alleen. We hebben er ook een heldere blik bij nodig op wat we onze kinderen en kleinkinderen willen nalaten, en veel tijd, ontwikkeltijd. Plus een maatschappelijk klimaat waarin mensen minder snel tegenover elkaar komen te staan.

De wetenschap werpt ons bij dit alles een touw toe. Wie langs het touw van nuchtere feiten en wetenschappelijke kennis gaat, die kan goede vragen stellen en argumenten losweken van de feiten. Die kan verbanden zien en, zoals mij als kind overkwam, met heel nieuwe ogen kijken naar wat tot dan vertrouwd was.

Dit boek wil u daartoe inspireren. Ik hoop op veel goede gesprekken over stikstof en werkbare oplossingen voor mens en natuur.

INLEIDING – Jan Willem Erisman & Wim de Vries

Een landelijke stikstofcrisis

In 2019 noemde premier Rutte het stikstofprobleem de ‘grootste crisis in mijn negen jaar als premier’. De bouw van nieuwe projecten lag stil, het verkeer lag aan banden en boeren werd de wacht aangezegd. Vlak daarna volgde de coronacrisis en verdween stikstof tijdelijk naar de achtergrond. Het is inmiddels meer dan twee jaar geleden dat de Raad van State uitspraak deed over de Programmatische Aanpak Stikstof (PAS). De raad oordeelde dat er geen toestemming mocht worden gegeven voor activiteiten die extra stikstofuitstoot veroorzaken. Het gevolg: een landelijke stikstofcrisis. Nederland zat van het ene op het andere moment op slot.

Als we het over de stikstofcrisis hebben, bedoelen we niet het stikstofgas dat 78 procent van onze lucht uitmaakt. Dat heeft namelijk geen enkel negatief effect op de natuur of de mens: wij ademen het in en weer uit zonder dat er iets gebeurt. We bedoelen dan het schadelijke effect van stikstofverbindingen zoals ammoniak (NH_3) en stikstofoxiden (NO_x) op de natuur, het klimaat en de gezondheid van de mens. De toename van deze stikstofverbindingen leidde tot de stikstofcrisis.

Stikstofverbindingen vormen de basis voor aminozuren, die essentieel zijn voor alle vormen van leven die we kennen. Deze stikstofverbindingen zijn in de natuur maar beperkt beschikbaar. Ze kunnen vrijkomen

bij vulkaanuitbarstingen, bliksemontladingen en de activiteit van stikstofbindende bacteriën. Die laatste is essentieel voor de groei van planten en daarmee voor de hele voedselketen, inclusief insecten, andere plantenetende dieren en uiteindelijk ook mensen. De vindingsrijkheid waarmee de natuur met de beperkte stikstofbeschikbaarheid omgaat, heeft geleid tot de ontwikkeling van vele natuurlijke processen en organismen, en een grote biodiversiteit.

Om op grote schaal voedsel te produceren moet echter extra stikstof worden aangevoerd. Door de uitvinding van ammoniakproductie als basis voor kunstmest door de Duitsers Fritz Haber en Carl Bosch begin twintigste eeuw kon de landbouw meer gaan produceren. Maar het kunstmestgebruik leidde ook tot grote verliezen van stikstof naar het milieu, zoals die van ammoniak naar de lucht.

De stikstofproblematiek is niet alleen ontstaan door onze behoefte aan voedsel, maar ook door ons gebruik van fossiele energie. Bij de verbranding van fossiele brandstoffen ontstaan namelijk stikstofoxiden, net als CO₂ een bijproduct. Industrie, transport, energiecentrales en huishoudens zijn de voornaamste bronnen. De globalisering heeft geleid tot een enorme groei van het verkeer, met een bijbehorende toename van NO_x-uitstoot naar de lucht.

De uitstoot van NH₃ en NO_x naar de lucht heeft grote gevolgen gehad voor de natuur en de menselijke gezondheid. Daarnaast zijn er nog emissies van andere stikstofvormen, zoals lachgas (N₂O) en nitraat (NO₃⁻), met gevolgen voor klimaat, natuur en waterkwaliteit. Dit probleem is al decennia bekend. Boeren, industrie en verkeerssector hebben behoorlijke inspanningen geleverd, die tot forse uitstootreducties hebben geleid. Toch is het stikstofprobleem nog steeds groot: normen worden niet gehaald en er kunnen slechts beperkt vergunningen voor nieuwe projecten worden uitgegeven, met alle economische en sociale gevolgen van dien. De spanning tussen natuur en economie speelt een leidende rol in de aanpak.

Er is in Nederland heel veel geschreven over stikstof. Opvallend is echter dat een diepgaand overzicht van het stikstofprobleem ontbreekt.

Stichting Biowetenschappen en Maatschappij heeft daarom het initiatief genomen om voor een breder publiek de achtergronden van de stikstofproblematiek op een rijtje te zetten en te duiden.

In dit boek gaan we in op de historie en de oorsprong van de stikstofproblematiek, met daarbij aandacht voor de modellen en metingen die ons in staat stellen de uitstoot en depositie van stikstofverbindingen in te schatten. Vervolgens bespreken we de stikstofcyclus en de gevolgen van de stikstofovermaat voor lucht-, bodem- en waterkwaliteit, en daarmee voor natuur, gezondheid en klimaat. Daarnaast staan we stil bij de mogelijke oplossingen van het probleem. Waar en hoe kunnen we de stikstofuitstoot verminderen? Met hoeveel? Welke maatregelen kunnen de eerdergenoemde gevolgen van een teveel aan stikstof voor de natuur beperken? Ten slotte gaan we in op wetgeving en beleid. Waar de PAS-uitspraak en de stikstofcrisis het resultaat waren van haperend beleid uit het verleden, kan nieuw beleid mogelijk een uitweg bieden uit de huidige impasse.

Kortom: hopelijk beantwoordt dit boek al uw vragen over stikstof en de oorzaken, gevolgen en aanpak van de huidige stikstofcrisis.

1. Steeds meer stikstof

1.1 Hoe is het zover gekomen?

De geschiedenis van stikstof in een notendop

– Jan Willem Erisman & Wim de Vries

Tot circa honderd jaar geleden werd de opbrengst van gewassen veelal beperkt door de beperkte beschikbaarheid van stikstof. De uitvinding van kunstmest veranderde dat. Die gaf de landbouwproductie wereldwijd een enorme impuls, maar met negatieve gevolgen voor het milieu.

Tot twaalfduizend jaar geleden leefden wij, mensen, voornamelijk als jagers en verzamelaars en was er voor het voeden van de bevolking voldoende natuurlijke stikstof aanwezig. De stikstof werd aangevuld via de interne kringloop, met name door mest van dieren, externe aanvoer via natuurlijke stikstofbinding, onweer en vulkaanuitbarstingen. Als een gebied onvoldoende voedsel te bieden had of het klimaat veranderde, trokken we door naar andere gebieden. Door een gunstige verhouding tussen herstel en voedselvoorziening was er geen stikstofprobleem. De eerste menselijke nederzettingen ontstonden langs grote rivieren die voldoende nutriënten aanvoerden om voedsel te produceren. Door de bevolkingsgroei was uitbreiding van landbouwgebieden nodig, eerst langs rivieren en later ook elders. De natuurlijke toevoer van stikstof was nog steeds ruim voldoende.



Op grottekeningen is te zien dat wij vroeger jagers en verzamelaars waren. (Bron: C. Guillaume, in *Vingt-six ans au sud de l'Afrique*, 1930).

Raakte die uitgeput, dan konden er nieuwe vruchtbare gronden op steeds grotere afstand van de nederzettingen worden ontgonnen.

Van voldoende naar een tekort

Toen mensen zich vestigden op vaste plaatsen, kwam de nadruk meer te liggen op het vruchtbaar houden van gronden. De Romeinen waren zich al bewust van de noodzaak stikstof aan hun gewassen toe te voegen. Ze teelden iedere vier jaar stikstofbindende gewassen.

In de Middeleeuwen leidden meer rijkdom en macht tot grotere legers en een grotere behoefte aan voedsel voor militairen. Met die voedselvraag groeide ook de landbouwproductie. De extra productie stimuleerde innovaties, zoals de introductie van vruchtwisseling, de teelt van stikstofbindende gewassen en de integratie van dieren in het systeem voor bemesting. Mensen trokken naar stedelijke gebieden, meer land moest worden bewerkt en het voedsel moest van steeds grotere afstand worden aangevoerd naar steden.

Naast voedsel voor het leger was er ook een grote behoefte aan buskruit, waarvoor salpeter (NaNO_3 of KNO_3) nodig was. In Zweden werden zogeheten salpeterbedden aangelegd, waarin uit schapenmest

salpeter werd gewonnen. In Engeland werd het salpeter gehaald uit menselijke urine. De brute petermen verzamelden die bij huizen. Opvallend is dat de stikstofbehoefte in het verleden vooral voortkwam uit oorlogsvoering: eerst voor het voeden van soldaten en later voor de productie van munitie.

De Industriële Revolutie bracht veel veranderingen in de landbouw en in de maatschappij teweeg. Inmiddels was de wetenschap al zo gevorderd dat bekend was welke stoffen planten nodig hadden voor hun voeding. De Duitser Justus von Liebig (1803-1873) introduceerde de wet van het minimum: het element dat het minst aanwezig is, beperkt de plantengroei. Meestal is dat stikstof. Dat inzicht werd de basis voor (kunst)mest en voor de grootschalige import van guano, de vogelpoep die eeuwenlang was afgezet op rotsen langs de kust van Zuid-Amerika. Die guano was overigens ook weer belangrijk voor de productie van



Chilisalpeter werd in Chili gekoppeld aan een stoere kerel. (© Jos van den Broek)

buskruit en dus oorlogsvoering. Daarnaast werd met name vanaf de negentiende eeuw gebruikgemaakt van chilisalpeter, een delfstof die voornamelijk bestaat uit natriumnitraat (NaNO_3) en die vanaf omstreeks 1830 in Chili werd gewonnen. Intussen vervingen stoommachines mankracht, maar de verbranding van kolen leverde stikstofoxiden en zwavelverbindingen op – luchtverontreiniging dus.

Uitvinding van kunstmest: voldoende stikstof

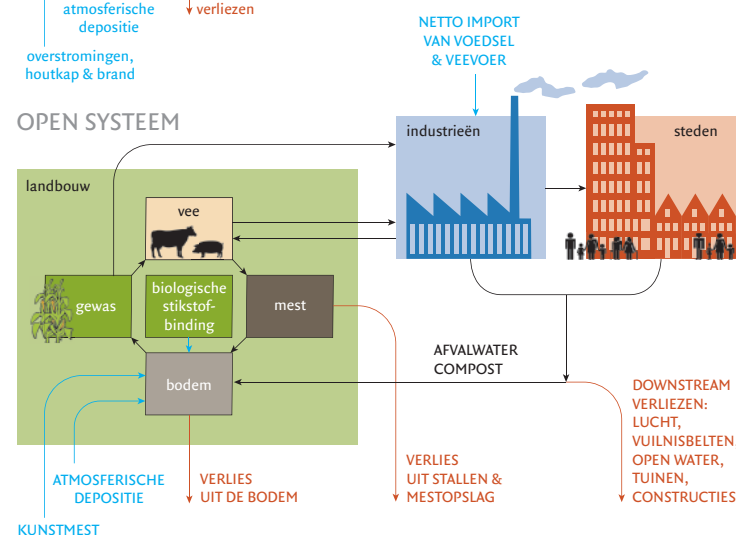
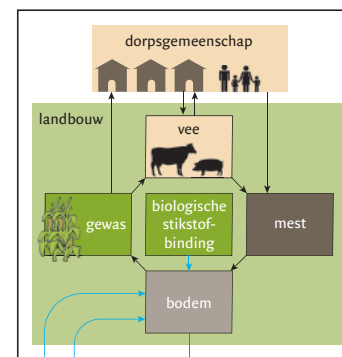
De Brit William Crookes signaleerde in 1898 een toekomstig gebrek aan stikstof: 'De vastlegging van stikstof uit de lucht is een van de grote ontdekkingen, die op het genie van de scheikundigen wacht.' De Duitse chemicus Fritz Haber voelde zich uitgedaagd door dit grote vraagstuk en ging aan de slag. Duitsland als militaire mogendheid versterken was daarbij voor hem een belangrijke motivatie. Hij kreeg het voor elkaar: in 1908 verwierf hij het patent voor de productie van ammoniak door onder hoge druk en met gebruik van een katalysator stikstofgas uit de lucht te binden aan waterstofgas. De uitvinding werd later de basis voor de kunstmestproductie die met name het gebruik van chilisalpeter verving.

Habers landgenoot Carl Bosch slaagde er vervolgens in om het proces binnen korte tijd te industrialiseren. De eerste ammoniakfabriek werd in 1913 geopend in Ludwigshafen. Daardoor kon Duitsland grote hoeveelheden munitie produceren. Beide mannen kregen de Nobelprijs voor hun werk vanwege hun bijdrage aan de vergroting van de landbouwproductie in de wereld – niet hun eerste doel. Pas na de Tweede Wereldoorlog zou ammoniak grootschalig worden toegepast in kunstmest. Dat gaf een enorme impuls aan de landbouwproductie in de Verenigde Staten en Europa.

De introductie van kunstmest heeft het Nederlandse landbouwsysteem volledig veranderd. Het leidde tot de versnelde omzetting van 'woeste gronden' in landbouwgebied, zoals de arme zandgronden in Brabant, Gelderland en Overijssel. Het samenspel tussen veehouderij en akkerbouw waarbij de mest van dieren voor landbouwgewassen werd gebruikt, was niet langer nodig. Boeren specialiseerden zich: ze werden veetelers of akkerbouwers.

Overigens is niet overal in de wereld voldoende stikstof aanwezig om mensen van voldoende voedsel te voorzien. In grote delen van Afrika is er een stikstoftekort, waardoor de opbrengsten beperkt zijn. Mede daardoor heersen er hongersnood en ondervoeding.

GESLOTEN SYSTEEM



Figuur 1. Een gesloten en een open systeem, waarbij een open systeem leidt tot een stikstofoverschot. (Bron: Wim de Vries, WUR)

Intensivering van de landbouw: te veel stikstof

Door een handelsbeleid dat de import van granen belastte maar die van organische reststoffen zoals sojaschroot niet, kon de intensieve veehouderij zich ontwikkelen. Dat gebeurde vooral op de arme zandgronden, die eerder weinig geschikt waren voor landbouw. Zo ontstond er een overschot aan mest en dus aan stikstof. Die overschotten leidden niet alleen tot veel hogere verliezen uit de landbouw zelf, maar ook in de hele voedselproductieketen (figuur 1).

In 1969 sloeg Chris Henkens, ambtenaar op het ministerie van Landbouw, voor het eerst alarm over de milieugevolgen van het mestoverschot. Hij waarschuwde dat er een probleem ontstond door de stikstof- en fosfaatoverschotten. Vanaf 1980 erkende ook de politiek dat er zowel een fosfaat- als een stikstofprobleem was, eerst vanwege waterverontreiniging door beide stoffen en later ook vanwege de luchtverontreiniging en de bijdrage aan bodemverzuring door stikstof. In 4.1 wordt beschreven wat er sindsdien aan beleid is gevoerd en in hoeverre dat succesvol was.

1.2 ‘Stikken in de stikstof’

– Jos van den Broek

Het is slechts weinig elementen van het periodiek systeem gegeven om tot een crisis te leiden. Meestal is er een tekort: eind jaren zeventig leidden tekorten op de wereldmarkt tot een mondiale zilvercrisis. Bij de stikstofcrisis van nu is er juist sprake van een teveel.

De naam ‘stikstof’ roept onprettige associaties op. Inderdaad, als de lucht uitsluitend uit stikstof zou bestaan, zouden we stikken. Omdat het in werkelijkheid 78 procent is, kunnen we rustig blijven doorademen. Maar in overdrachtelijke zin kunnen we wel degelijk stellen dat we stikken in de stikstof.

Aanwaaien

Milieuproblemen door te veel stikstof in bodem en water spelen in de hele wereld, maar in Nederland wel heel sterk. Hier worden bodem

en water belast door een zeer hoge toediening van stikstofverbindingen in de landbouw, vooral via dierlijke mest, maar ook via kunstmest. Andere bronnen zijn het verkeer, huishoudens en de industrie (zie figuur 2).

Menselijke activiteiten waarbij stikstofverbindingen in grote hoeveelheden vrijkomen, schaden ecosystemen op land en in het water. Ze kunnen leiden tot vermindering van de biodiversiteit. Ondanks maatregelen die de emissies van stikstofoxiden en ammoniak al fors hebben teruggebracht, zijn verdergaande emissiereducties noodzakelijk om gevoelige ecosystemen in stand te houden.

Moleculaire K’Nex

Laten we vooropstellen dat stikstof voor al het leven op aarde onontbeerlijk is. Het is een bouwsteen van aminozuren en eiwitten, en voor de erfelijke informatiedragers DNA en RNA. Het speelt ook een grote rol bij de uitwisseling van elektronen en energie in deze moleculen. Zonder stikstof zouden allerlei fysiologische functies niet werken.

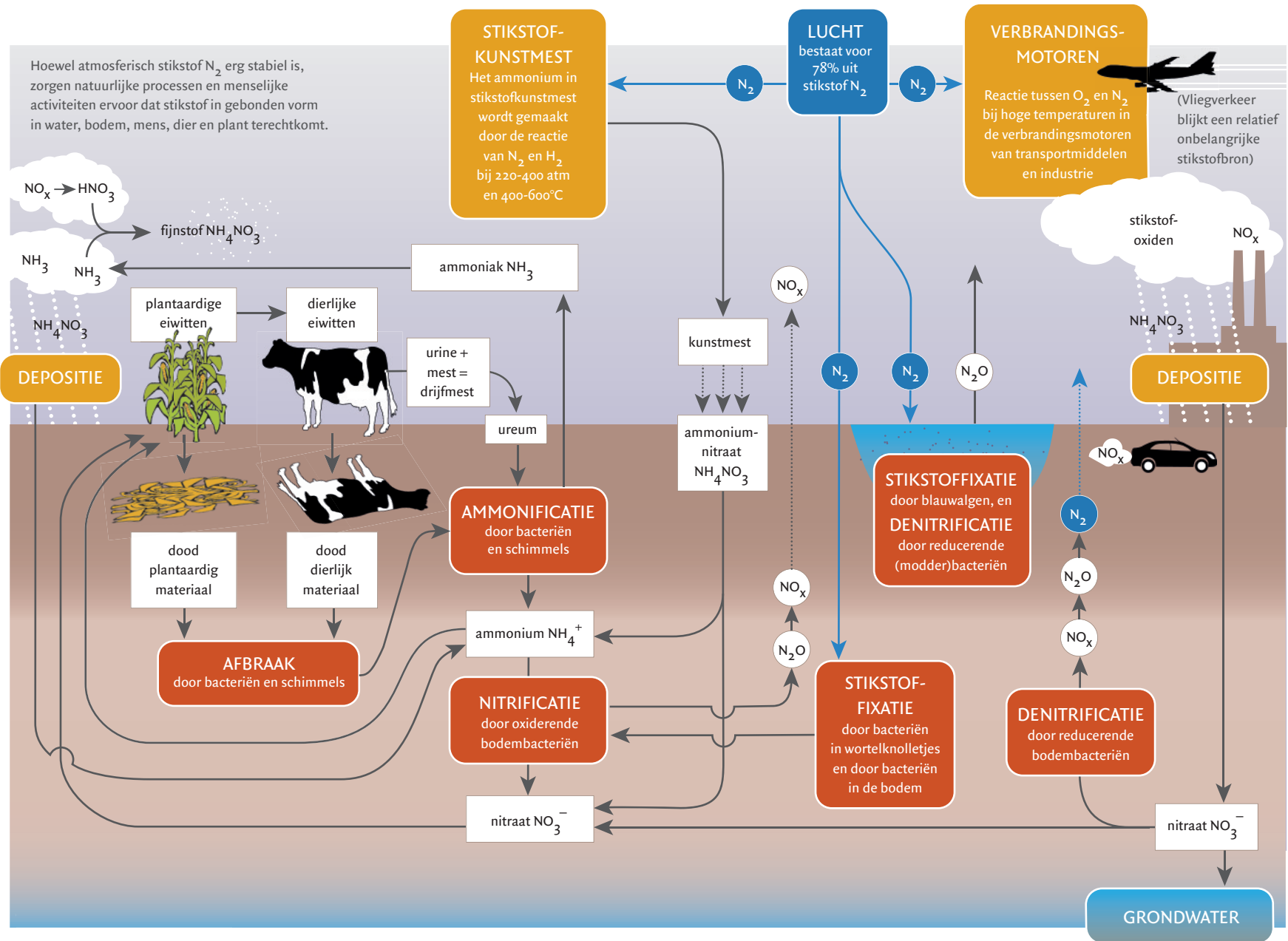
De natuur heeft gezorgd voor een fascinerende moleculaire K’Nex-bouwdoos waarin de elementen waterstof (H), koolstof (C), stikstof (N) en zuurstof (O) de boventoon voeren (zie figuur 3). Deze elementen nemen de eerste, zesde, zevende en achtste plaats in het periodiek systeem in.

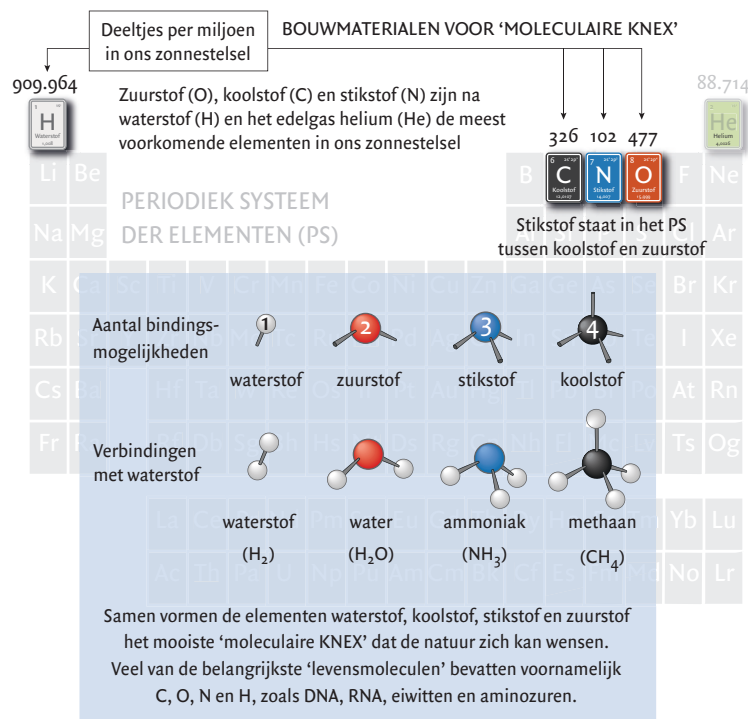
Om te begrijpen waarom juist deze vier elementen ertoe doen, is enige sterrenkundige basiskennis onmisbaar. Letterlijk alles waarvan we zijn gemaakt, was oorspronkelijk sterrenstof. Kort na de oerknal, 13,8 miljard jaar geleden, ontstond uit elementaire deeltjes het oerelement waterstof. Sindsdien worden er sterren geboren doordat materie onder invloed van de zwaartekracht verdicht en samenklontert.

Kernfusie

Wordt in die verdichte klonten de druk hoog genoeg, dan kan waterstof fuseren tot helium (He), het op een na lichtste element. Bij de kernfusie van vier waterstofkernen tot één heliumkern – bestaande uit

> Figuur 2. *De stikstofcyclus en de menselijke invloed erop.* (© Jos van den Broek)





Figuur 3. Moleculaire K'Nex-bouwdoo's waarin de elementen waterstof (H), koolstof (C), stikstof (N) en zuurstof (O) de boventoon voeren. (© Jos van den Broek)

vier kerndeeltjes – komt straling vrij: zonnestraling!

Sterren bestaan dus voor het overgrote deel uit waterstof en helium, de twee lichtste elementen in de natuur. Vandaar ook dat in het heelal deze twee elementen veruit het meest voorkomen.

Ook helium kan weer fuseren: uit drie kernen ontstaat koolstof, met twaalf kerndeeltjes. Dat kan vervolgens met nog een heliumkern fuseren tot zuurstof, met zestien kerndeeltjes. Ook kan, via een ander, ingewikkelder mechanisme, uit koolstof stikstof ontstaan, dat veertien kerndeeltjes bevat. De basiselementen van onze moleculaire K'Nex-bouwdoo's komen zo ruimschoots beschikbaar. Wat de bouwdoo's zo bijzonder maakt, is het aantal atoombindingen dat de elementen H,

O, N en C kunnen aangaan. Ze hebben namelijk respectievelijk één, twee, drie en vier 'handjes' waarmee ze zich aan elkaar kunnen koppelen. Al het leven dat we kennen is uit deze elementen opgebouwd.

Motor en bliksem

Een stikstofatoom heeft drie 'handjes'. Net als waterstof (H₂) en zuurstof (O₂) komt stikstof in de natuur niet in de vorm van losse atomen voor. Ze vormen twee aan twee een zogeheten distikstofmolecuul (N₂), waarin ze elkaar met drie paar 'handen' stevig vasthouden. Daardoor reageert N₂-gas nauwelijks met andere stoffen – het is behoorlijk inert, zoals dat heet. Alleen bij hoge temperaturen, bijvoorbeeld in verbrandingsmotoren, bij bliksem en bij vulkaanuitbarstingen kan N₂ worden geoxideerd tot wat we stikstofoxiden (NO_x) noemen: een groep stoffen bestaande uit (vooral) stikstof- en zuurstofatomen. In de vorm van nitraat (NO₃⁻) belanden ze via regen en sneeuw in bodem en water, waar ze bijdragen aan de stikstofbelasting. Bij de productie van kunstmest (bijvoorbeeld ammoniumnitraat, NH₄NO₃) wordt stikstof gebonden aan waterstof onder zeer hoge druk en bij hoge temperatuur.

Ook sommige bacteriën in de bodem en cyanobacteriën of blauwalgen in het water kunnen stikstof binden. De natuur weet zo al vele miljoenen jaren met dat halsstarrige stikstof om te gaan. Andere bodembacteriën kunnen een overmaat aan nitraat juist omzetten in het inerte stikstofgas, waardoor het evenwicht wordt hersteld. Althans, totdat de mens dat ernstig verstoort.

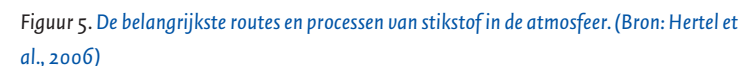
1.3 De mens verspreidt veel reactieve stikstof

– Jan Willem Erisman

Stikstofoxiden en ammoniak zorgen tegenwoordig voor problemen in Nederland wanneer ze neerslaan in de natuur. Hoe verspreiden ze zich en waar komen ze terecht?

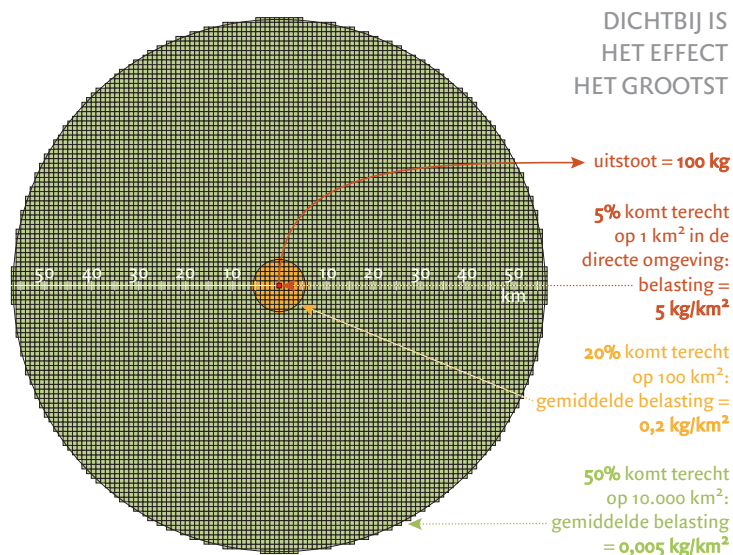
De mens produceert veel stikstofverbindingen, ook wel 'reactieve stikstof' genoemd. Natuurlijk via zijn eigen uitwerpselen, maar vooral door allerlei andere activiteiten. We verbranden fossiele

Ook dieren produceren stikstof. Het zit in de mest van koeien, varkens en kippen. Het gehalte aan stikstof is hoger naarmate de als veevoer gebruikte gewassen sterker zijn bemest. Omdat de Nederlandse veestapel zo groot is – zo'n honderd miljoen kippen, twaalf miljoen varkens en vier miljoen runderen – neemt de landbouw meer dan de helft van de totale stikstofemissie voor zijn rekening. Door de grote inspanningen van de afgelopen decennia is de emissie van landbouw, verkeer en industrie met 60 procent afgenomen, een hele prestatie. Het relatieve aandeel van de verschillende sectoren is de afgelopen dertig jaar echter niet veranderd (zie figuur 4).

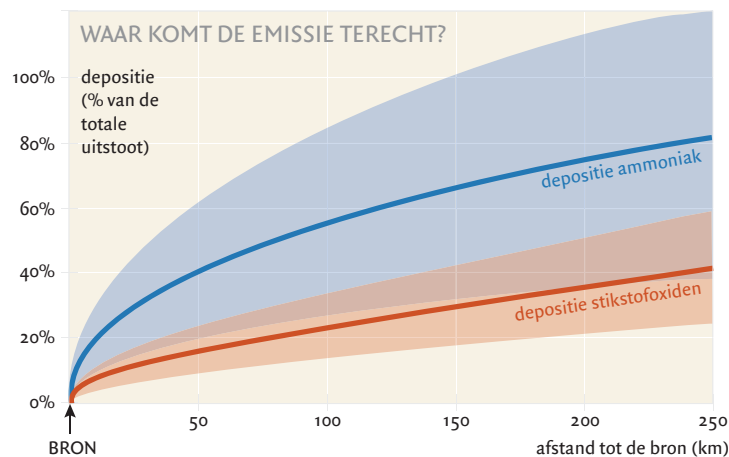


Reactieve stikstof zie of ruik je niet, maar het verspreidt zich op dezelfde manier als rook bij brand: dicht bij het vuur is de concentratie hoog, op kilometers afstand zie je de rook niet meer en is de concentratie laag. Het gedrag van stikstofoxiden en ammoniak in de atmosfeer (zie figuur 5) en de snelheid van de depositie op natuurterreinen verschilt sterk. De atmosferische verspreiding van reactieve stikstof hangt af van het type bron, de weersomstandigheden en omgevingsfactoren zoals het landgebruik. Stikstofbronnen in de lucht, zoals hoge schoorstenen en vliegtuigen, verspreiden de stikstof over grotere afstanden dan stikstofbronnen op de grond, zoals landbouw en autoverkeer. Nederlandse stikstof komt zelfs helemaal in Scandinavië terecht.

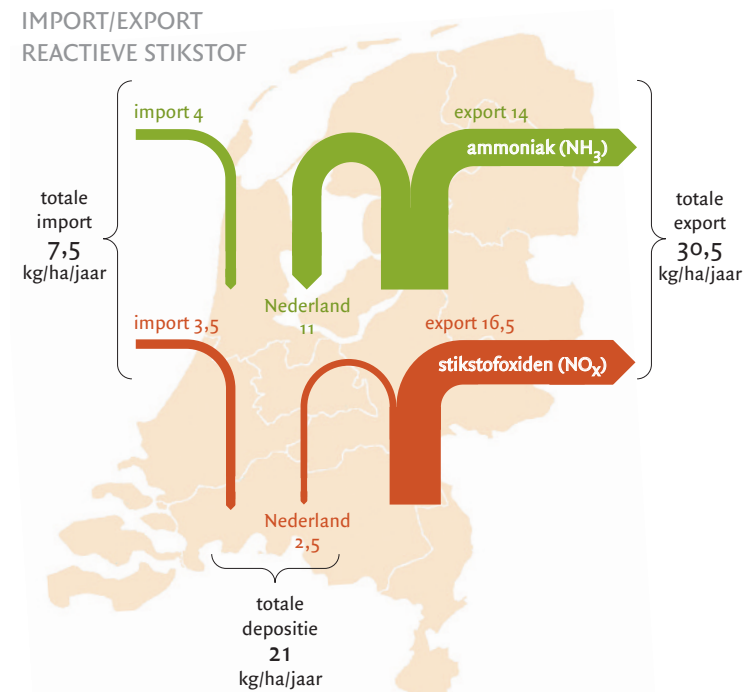
26 | STIKSTOF



Figuur 6. De hoogste depositie vindt plaats nabij de bron, hoewel dat maar een klein deel is van de totale emissie. (Bron data: RIVM)



Figuur 7. De depositie als percentage van de uitstoot en als functie van de afstand. (Bron data: RIVM)



Figuur 8. De balans van NH₃ en NO_x over Nederland, zoals berekend met het OPS-model in kg/ha. (Bron data: RIVM)

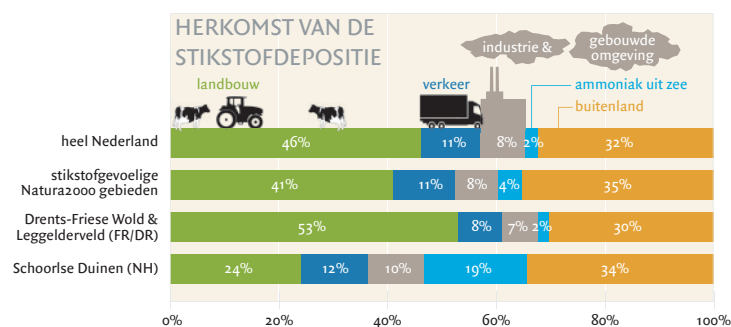
De hoogste depositie vindt plaats nabij de bron, maar dat is maar een klein deel van de totale emissie (zie figuur 6). Het grootste deel van de emissie slaat op grotere afstand neer (zie figuur 7). Aangezien ammoniak veel beter oplost in water dan stikstofoxiden, verdwijnt dit gas sneller uit de atmosfeer. We zeggen dan dat de *depositiesnelheid* van ammoniak hoger is dan die van stikstofoxiden. Op honderd kilometer van de bron is circa 55 procent van de ammoniak neergeslagen tegen circa 20 procent van de stikstofoxiden (zie figuur 7).

Dat illustreert dat de depositie van beide stoffen tot ver buiten de landsgrenzen optreedt, waarbij stikstofoxiden verder reizen dan ammoniak. Omgekeerd geldt dit ook voor de ammoniak en stikstofemissies uit het buitenland. Dit wordt geïllustreerd door de balans over Nederland (figuur 8).

Op eigen bodem

Wetenschappers berekenen met verspreidingsmodellen hoeveel stikstof waar terecht komt (zie ook 1.4). Ze maken daarbij gebruik van de landelijke Emissieregistratie, een databestand waarin de regionale uitstoot van 350 stoffen, waaronder stikstofverbindingen, wordt bijgehouden. Met die modellen berekenen ze de verspreiding en depositie op alle oppervlakken, dus ook de natuur. Berekeningen geven aan dat gemiddeld 45 procent van de Nederlandse ammoniakuitstoot uiteindelijk op binnenlandse bodem terecht komt (figuur 8). Voor stikstof-oxiden is dat maar 15 procent; de overige 85 procent gaat dus de grens over. In de depositie over heel Nederland heeft de landbouw het grootste aandeel: gemiddeld voor heel Nederland 46 procent en voor de stikstofgevoelige natuur 41 procent, volgens het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (figuur 9).

Boerenorganisaties hebben dit overigens in twijfel getrokken en hebben beweerd dat die bijdrage de helft minder is. Ten onrechte: er zaten fouten in hun berekeningen en ze telden wateroppervlakten mee die niet stikstofgevoelig zijn. Het buitenland levert 32 procent van de totale depositie in heel Nederland, maar tegelijkertijd ‘exporteren’ we drie keer zoveel stikstof als we ‘importeren’.



Figuur 9. Bijdrage van de verschillende bronnen aan de depositie van reactieve stikstof op heel Nederland, alle natuurgebieden in Nederland en de natuurgebieden Drents-Friese Wold en Schoorlse Duinen waar de bijdrage van de landbouw hoger, dan wel lager is. (Bron: Website RIVM: <https://www.rivm.nl/stikstof>)

1.4 Een kwestie van meten en rekenen

– Roy Wichink Kruit

Onderzoekers zijn voortdurend op zoek naar de beste manier om de stikstofdepositie in ons land te bepalen. Hoe rekenen zij en wat meten zij? Wat is de modelaanpak en het meetinstrumentarium dat gebruikt wordt voor de beleids-onderbouwing?

Het meten en berekenen van stikstofdepositie op verschillende schalen is complex vanwege de sterke variatie, die afhankelijk is van vele factoren. Doel is dat de cijfers de stikstofwerkelijkheid zo goed en wetenschappelijk verantwoord mogelijk weergeven. Beleidsmakers gebruiken de cijfers immers bij het maken van beleid voor stikstofreductie en er zijn grote belangen mee gemoeid. Deze cijfers worden bepaald door het RIVM in samenwerking met andere instituten. Hier volgt een inkijkje in de totstandkoming van de stikstofdepositiekaart van Nederland en het onderzoek dat hiervoor nodig is.

Stikstofdepositie in beeld

De Nederlandse stikstofdepositie in kaart brengen is minder makkelijk dan het wellicht lijkt. Ze bestaat uit natte en droge depositie. Vooral de droge depositie is niet eenvoudig te meten. Het is praktisch en financieel niet mogelijk om heel Nederland vol te hangen met meetapparatuur. Daarom zijn (inter)nationale modellen ontwikkeld om de depositie te berekenen. In Nederland wordt hiervoor het door RIVM ontwikkelde Operationele Prioritaire Stoffen (OPS)-model gebruikt. Er wordt veel onderzoek gedaan naar de metingen en de procesbeschrijvingen die nodig zijn voor een goede berekening van de stikstofdepositie. De modelberekeningen worden zo goed mogelijk gecombineerd met beschikbare metingen van de stikstofcomponenten uit verschillende meetnetten, om een compleet beeld van de stikstofdepositie te krijgen.

Modelberekeningen

Simpel gezegd wordt de droge stikstofdepositie berekend uit stikstofconcentraties in de lucht en depositiesnelheden. De concentraties

worden berekend uit emissiegegevens en meteorologische gegevens. Depositiesnelheden worden vooral gemeten in intensieve meetcampagnes en vervolgens vertaald naar modelbeschrijvingen om de depositie ook op andere plekken te kunnen berekenen. Voor het berekenen van de depositiesnelheden worden de eigenschappen van het gas of de aerosolen gebruikt en gegevens over het oppervlak, zoals het landgebruik, de hoogte van de vegetatie, of de huidmondjes van planten openstaan en of de vegetatie vochtig is.

De natte depositie wordt berekend door luchtconcentraties te vermenvuldigen met de intensiteit van de neerslag en met specifieke coëfficiënten die de opname van stoffen in regendruppels bepalen. Om te controleren of de modellen op de juiste waarden uitkomen, worden de berekende concentraties en deposities vergeleken met metingen en waar nodig bijgesteld. Het RIVM beheert daartoe een aantal meetnetten. De meetstations van elk netwerk zijn zoveel mogelijk verspreid over het land om een representatief beeld voor heel Nederland te kunnen geven.

Metingen van stikstofoxiden op 73 plekken

De concentraties stikstofoxiden (NO en NO₂) in de lucht worden elk uur op 73 plekken met geavanceerde apparatuur gemeten binnen het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit (LML) en in de regionale meetnetten (DCMR in het Rijnmondgebied en GGD Amsterdam). Die meetpunten zijn in dit aantal meegenomen.

Binnen het LML meten regenvangers op acht locaties hoeveel nitraat er in het regenwater zit. Daarmee wordt de natte depositie van stikstof bepaald. De regenvangers zijn voorzien van een deksel dat alleen opengaat wanneer het regent. Dat voorkomt enerzijds dat de opgevangen neerslag verdampt, anderzijds dat er droge depositie in de opgevangen neerslag terechtkomt. De droge depositie van stikstofoxiden wordt momenteel niet permanent gemeten.

Metingen van ammoniak op driehonderd plekken

Binnen het Meetnet Ammoniak in Natuurgebieden (MAN) worden door het RIVM met meetbuisjes de maandgemiddelde concentraties

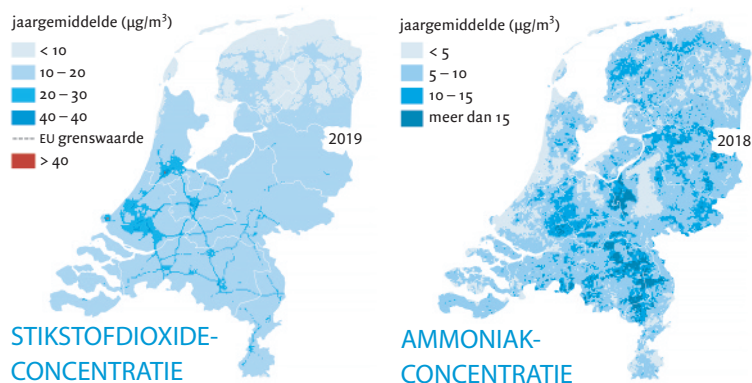
ammoniak op meer dan driehonderd plekken in Nederland gemeten. De meetbuisjes bevinden zich in ruim tachtig Natura 2000-gebieden, natuurgebieden met een Europese beschermde status. Daarnaast registreert geavanceerde apparatuur elk uur de ammoniakconcentratie op zes locaties in het LML. Daarmee worden de meetbuisjes van het MAN geijkt zodat ze een betrouwbaar beeld geven.

De regenvangers binnen het LML meten ook de natte depositie van ammoniak (in de vorm van ammonium, NH₄). De droge depositie van ammoniak wordt maandelijks met relatief eenvoudige apparatuur gemonitord op drie locaties, die zich allemaal in Natura 2000-gebieden bevinden. Dit zal uitgebreid worden naar tien locaties.

Extra meetcampagnes voor de droge depositie

Naast de bovengenoemde continue metingen houdt het RIVM samen met ECN/TNO regelmatig meetcampagnes. Daarin wordt met geavanceerde apparatuur de droge depositie van ammoniak en stikstofoxiden per uur gemeten. Met deze metingen kunnen de modelbeschrijvingen van het droge depositieproces verbeterd worden. Dit soort metingen zijn gevoelig voor verstoringen in de instrumenten, waardoor ze arbeidsintensief zijn en daardoor ook vrij duur. Door de jaren heen is er gemeten boven bos, heide, gras, mais en duinvegetatie.

Het Instituut voor Biodiversiteit en Ecosysteem-Dynamica van de Universiteit van Amsterdam meet sinds begin 2020 de stikstofdepositie bij twee boerderijen. Het doel van dit onderzoek is om emissie en depositiepatronen van ammoniak rondom twee melkveestallen in kaart te brengen, zowel ruimtelijk als door de tijd heen. Hiervoor worden zogeheten biomonitors gebruikt. Daarmee wordt in kaart gebracht welk deel van de uitgestoten ammoniak lokaal neerslaat. De aanname hierbij is dat potten met Engels raaigras zonder bemesting op verschillende afstanden van het bedrijf na een maand in de open lucht te zijn geplaatst, een beeld geven van de depositie van ammoniak.



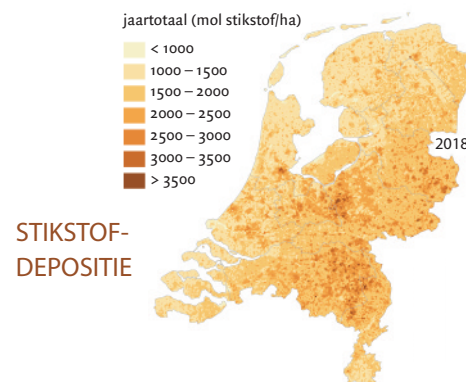
Figuur 10. Landelijk beeld van de stikstofdioxideconcentraties (links) en ammoniakconcentraties (rechts) in Nederland, zoals bepaald met modellen en grondmetingen (Bron data: RIVM, 2020).

Landelijke beelden en satellietmetingen

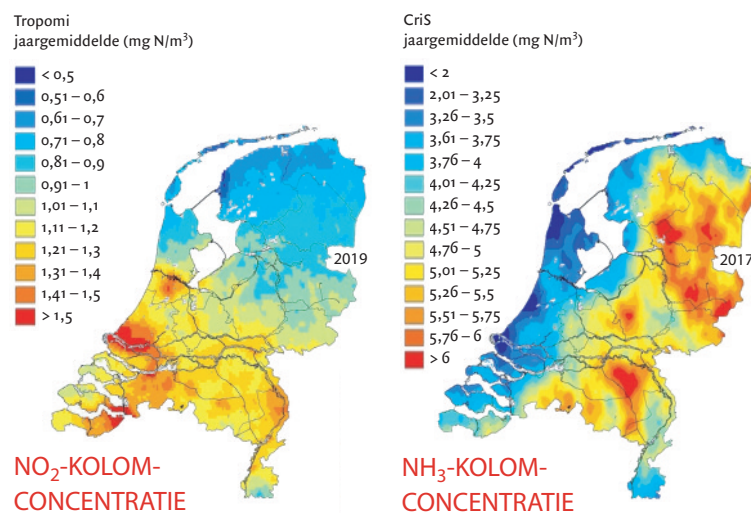
Landelijke beelden van de concentratiekaarten voor stikstofdioxide en ammoniak en de stikstofdepositiekaart zijn weergegeven in respectievelijk figuur 10 en 11.

Deze kaarten zijn tot stand gekomen door de modelberekeningen te combineren met de beschikbare metingen. In de kaarten zijn duidelijk de brongebieden terug te vinden: snelwegen en steden voor stikstofoxiden en landbouwgebieden voor ammoniak. Ook de gebieden met een ruw oppervlak zie je erop terug, zoals steden en bossen. Dat komt doordat een ruwer oppervlak meer luchtwervelingen (turbulentie) veroorzaakt, waardoor er meer stikstof neerslaat.

Sinds enkele jaren meten ook apparaten aan boord van satellieten de concentraties van stikstofoxiden en ammoniak in de kolom lucht boven het aardoppervlak. Het meetinstrument Tropomi doet dat op een schaal van ongeveer 5 bij 5 km (figuur 12), andere instrumenten zoals CrIS en IASI op een schaal van 14 bij 14 km. Deze waarnemingen kunnen worden gebruikt om de modelberekeningen te toetsen en om de satellietwaarnemingen te integreren met modellen. Het voordeel van satellieten is dat je in één keer een beeld van de stikstofconcentraties in heel Nederland krijgt, althans op wolkeloze dagen.



Figuur 11. Landelijk beeld van de stikstofdepositiekaart in Nederland, zoals bepaald met modellen en grondmetingen. (Bron data: RIVM, 2019)



Figuur 12. NO₂- en NH₃-kolomconcentraties, zoals gemeten door Tropomi respectievelijk CrIS. (Bron data Tropomi: KNMI, ESA, bron data CrIS: TNO, Environment and Climate Change Canada)

1.5 Ammoniak van landbouw, stikstofoxiden van verkeer

– Margreet van Zanten

Het overgrote deel van de ammoniakuitstoot is afkomstig van de landbouw. Verkeer vormt de belangrijkste bron van de uitstoot van stikstofoxiden. Met name de zeescheepvaart levert daaraan een grote bijdrage en die stoot de laatste jaren zelfs meer uit dan voorheen.

Veel mensen weten dat stikstofoxiden vooral vrijkomen bij verbrandingsprocessen en dat ammoniak verdampt uit mest. Minder bekend is dat landbouwgronden ook stikstofoxiden uitstoten, en auto's ammoniak. Om de stikstofproblematiek in Nederland te kunnen aanpakken is het belangrijk om te weten waar deze stikstofvormen precies vandaan komen.

Met in de Emissieregistratie verzamelde data over de stikstofuitstoot van diverse activiteiten is het mogelijk om de concentratie van stikstofverbindingen in de lucht te berekenen en de stikstofdepositie te bepalen (zie 1.4). Het basisprincipe is simpel. Als bekend is hoeveel een bepaalde bron per activiteit uitstoot, hoef je alleen maar deze zogeheten emissiefactor te vermenigvuldigen met de hoeveelheid activiteit. De emissiefactoren zijn bijna altijd gebaseerd op metingen.

De Emissieregistratie gebruikt uitgebreide modellen. Het verkeersmodel berekent bijvoorbeeld de emissies voor elke individuele auto en telt die vervolgens voor alle auto's in Nederland op. Het landbouwmodel doet hetzelfde voor de ammoniakuitstoot uit stallen: per staltype en per diersoort wordt de uitstoot per dier bepaald; die wordt vervolgens vermenigvuldigd met het aantal dieren in elk type stal in Nederland. Zo weten we hoeveel ammoniak en stikstofdioxiden de diverse sectoren uitstoten en hoe die uitstoot de afgelopen jaren is veranderd.

Ammoniak: 85 procent uit de landbouw

Het blijkt dat het overgrote deel van de ammoniak, zo'n 85 procent, afkomstig is uit de landbouw. De rest komt van diverse kleine emissie-

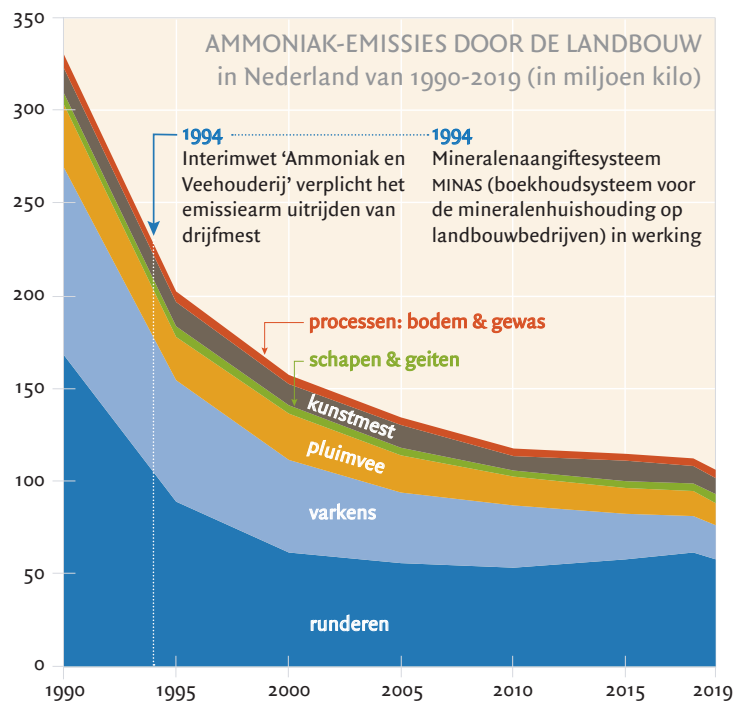
bronnen zoals huisdieren, schoonmaakmiddelen, houtkachels, wegverkeer en industriële processen zoals kunstmestproductie. De emissies uit de landbouw zijn op twee manieren uit te splitsen: naar diersoort of naar de plek in de keten waar de ammoniak vrijkomt – denk aan mestopslag, het uitrijden van mest, dieren op stal en koeien in de wei. Die laatste post is bijna verwaarloosbaar: ruim de helft komt uit stallen en mestopslag, terwijl de rest afkomstig is van uitgereden mest en kunstmestgebruik. Uitgesplitst naar dieren stoot rundvee meer dan de helft van de ammoniak uit, terwijl varkens en pluimvee samen een kwart voor hun rekening nemen. Het kunstmestgebruik zit qua hoeveelheid net onder die van pluimvee. De overige uitstoot komt van andere landbouwdieren (schapen, geiten, nertsen, konijnen) en gewas- en bodemprocessen.

De ammoniakuitstoot is sinds 1990 met circa 65 procent afgenomen, met de sterkste daling tussen 1990 en 2000 (figuur 13). Sinds 2010 verandert er weinig meer. De sterke daling was vooral het gevolg van het injecteren van mest in de grond. Ook het verminderde kunstmestgebruik, de kleinere veestapel en emissiearme stallen speelden een rol.

Stikstofoxiden: 70 procent uit verkeer en vervoer

Verkeer en vervoer is de belangrijkste bron van stikstofoxiden, met circa 70 procent. Daarvan is een groot deel afkomstig van scheepvaart op de Noordzee, gevolgd door het wegverkeer. De industriële sector – fabrieken, raffinaderijen, elektriciteitscentrales – stoot circa 15 procent uit. Daarnaast is de landbouw een bron, doordat NO_x wordt gevormd bij de verwarming van kassen en ook vrijkomt uit de bodem na het uitrijden van mest en kunstmest. Ten slotte leveren cv-ketels in gebouwen een bescheiden bijdrage.

De uitstoot van stikstofoxiden is sinds 1990 met ruim 60 procent gedaald in een vrij continue lijn over de gehele periode (figuur 14). Deze daling is vooral tot stand gekomen door schonere wegverkeer en maatregelen bij de industrie en de elektriciteitssector. De uitstoot door de zeescheepvaart is in dezelfde periode juist gestegen doordat er meer en grotere schepen varen.

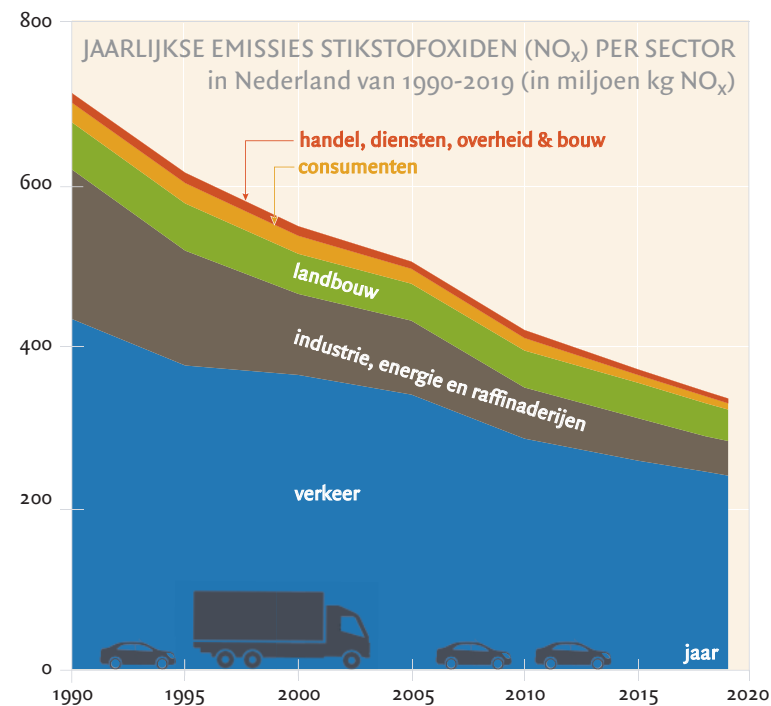


Figuur 13. Het verloop van de ammoniakuitstoot in Nederland tussen 1990 en 2019. (Bron data: RIVM/Emissieregistratie)

Bijdrage vliegverkeer aan stikstofdepositie is gering

– Jan Willem Erisman

De landbouw wijst regelmatig naar het vliegverkeer. Dat is sterk toegenomen en zou dus veel meer moeten bijdragen aan de stikstofneerslag dan de landbouw. Er bestaat bij het publiek ook onduidelijkheid over de bijdrage van de luchtvaartsector. De druk werd zo hoog dat de commissie-Remkes een afzonderlijk advies over de luchtvaartsector uitbracht. Dat verscheen begin 2020.



Figuur 14. Het verloop van de uitstoot van stikstofoxiden in Nederland tussen 1990 en 2017. (Bron data: RIVM/Emissieregistratie)

Voor de bijdrage van het luchtverkeer moet je onderscheid maken tussen de vliegtuigen en activiteiten daaromheen op de luchthaven, inclusief het verkeer van en naar het vliegveld. Binnen de Emissieregistratie wordt het vliegverkeer meegerekend tot een hoogte van negenhonderd meter. Dat is de hoogte waarboven de uitstoot van het vliegverkeer zich verspreidt door de hogere luchtlagen en het lange tijd duurt voor het via de regen weer de grond bereikt. De depositie zou dus helemaal tot in Scandinavië kunnen reiken. De emissies onder de negenhonderd meter leveren wel een bijdrage aan de depositie in Nederland.

De burgerluchtvaart en het goederentransport door de lucht leveren samen 1,4 procent van de NO_x-emissies in Nederland, waardoor de berekende bijdrage aan de totale stikstofdepositie slechts 0,1 procent bedraagt. De commissie-Remkes schat dat de bijdrage van het vliegverkeer boven de negenhonderd meter nog eens 0,5 tot 0,9 procent van de neerslag veroorzaakt. Veel van dat vliegverkeer is binnen Europa (71 procent). In totaal draagt de luchtvaart 0,7 tot 1,1 procent bij aan de stikstofdepositie op de natuur in Nederland. De bijdrage van het luchtverkeer aan de stikstofdepositie is dus beperkt. Wel draagt de sector veel bij aan andere vormen van milieudruk, zoals geluidhinder, lichtvervuiling, ruimtebeslag, fijnstof en broeikasgasemissies.

Verdere daling tot 2030

Ook de landen om ons heen stoten ammoniak en stikstofoxiden uit. Een deel van deze emissies uit het buitenland komt ons land binnen, maar Nederland is netto gezien een stikstofexporteur. Omdat luchtvervuiling een grensoverschrijdend probleem is, heeft Europa afspraken gemaakt over de hoeveelheid die landen mogen uitstoten en hun reductie-inspanning tot 2030: de zogeheten nationale emissieplafonds. Nederland zit onder het eigen plafond voor stikstofoxiden, maar schommelt rond het plafond voor ammoniak.

Naar verwachting zal de uitstoot van stikstof in Nederland verder afnemen. Vooral de hoeveelheid stikstofoxiden zal dalen doordat het wagenpark schoner wordt en doordat er sinds kort strengere uitstoot-eisen worden gesteld aan binnenvaartschepen en mobiele werktuigen, zoals landbouw- en bouwmachines. De hoeveelheid ammoniak zal langzaam afnemen doordat er geleidelijk aan minder vee zal worden gehouden en er meer emissiearme stallen zullen komen. Wat de invloed van het stikstofbeleid zal zijn (zie 5.4), moet de toekomst uitwijzen.

Het ammoniakgat: de emissies onderschat

- Jan Willem Erisman

Al vanaf 1985 was duidelijk dat de effectiviteit van het ammoniak- en stikstofdepositiebeleid alleen geëvalueerd kan worden door een combinatie van metingen en modellen. Dat is een gevolg van de grote spreiding, in zowel ruimte als tijd, van ammoniakconcentraties en -depositie. Het meetnet van het RIVM is in de jaren negentig zodanig ingericht dat het geschikt is voor het toetsen van de modellen aan metingen van de natte en droge depositie en de luchtconcentraties. Die toetsing is ook nodig om vast te stellen of de invoer van het model, namelijk de emissies, betrouwbaar zijn. Helaas is de droge-depositiemeting zeer kostbaar en moeilijk uit te voeren. Door bezuinigingen zijn de droge-depositiemetingen op de enige meetlocatie begin deze eeuw gestopt. Het verspreidingsmodel zelf wordt met onafhankelijke metingen gevalideerd.

Het ammoniakgat

De laatste jaren is er veel discussie geweest over de effectiviteit van het Nederlandse ammoniakbeleid. Regelmatig is het zogeheten 'ammoniakgat' in het nieuws gekomen, voor het eerst in 1994. Het ammoniakgat is het systematische verschil tussen de gemeten en de berekende concentraties over de afgelopen jaren op basis van zo goed mogelijk ingeschatte emissies. De analyse hiervan laat zien dat de berekende concentraties veel sterker afgenomen zijn dan de gemeten concentraties. Het verklaren van afwijkende trends is complex, aangezien onzekerheden in emissies, modellering en metingen gezamenlijk in ogenschouw genomen moeten worden. Als blijkt dat de emissies inderdaad afwijken, kan dat te maken hebben met de schattingsmethode van de emissies zelf. Maar ook het beleid kan minder effectief zijn geweest dan aangenomen. Het laatste zou zorgwekkend zijn voor agrariërs die miljoenen euro's gestoken hebben in emissiearme stallen, mestverwerking en maatregelen

zoals het onderwerken van mest en het afdekken van mest-opslagen.

Verklaringen voor het ammoniakgat

Om het ammoniakgat te kunnen verklaren is er de afgelopen jaren veel onderzoek gedaan. Daaruit is gebleken dat het succesvolle verzuringsbeleid (om de emissies van zwaveldioxide en daarmee zure regen te verminderen) uit het verleden de ammoniakconcentraties juist heeft doen toenemen zonder dat de ammoniakemissies veranderd waren. Dit heeft te maken met het feit dat zwaveldioxide en ammoniak met elkaar reageren, waardoor ammoniak snel uit de lucht wordt genomen. Verder zijn er ook nieuwe bronnen ontdekt die we eerder nog niet kenden, zoals het verteren van plantenresten op het land, algen voor de kust en uitstoot door verkeer.

Sinds 2002 worden berekeningen vergeleken met metingen om de berekende depositie te corrigeren voor het ammoniakgat. Men veronderstelt dat het verschil tussen metingen en model geheel wordt veroorzaakt door een onderschatting van de ammoniakemissie van ongeveer 20 procent. Het recente RIVM-onderzoek naar het ammoniakgat geeft aan dat de emissies en daarmee berekende concentraties nog niet goed genoeg overeenkomen met de metingen. Er zijn ook andere signalen dat de emissies nadere studie behoeven. Zo blijkt uit onderzoek van het Centraal Bureau voor de Statistiek en een daaraan gerelateerde analyse van de Commissie Deskundigen Meststoffenwet (CDM) dat de stalemissies door de sector landbouw mogelijk met zo'n 15 procent worden onderschat. Verder is onlangs geconcludeerd dat de emissies bij bemesting van grasland mogelijk met 10 procent worden óverschat. Dit zijn voorbeelden van substantiële afwijkingen die nadere analyse vergen. Daarnaast is het van belang om emissiefactoren en het tijdsverloop voor alle stalsystemen, aanwendingstechnieken en mestverwerkings-technieken te bepalen.

INTERVIEW – Marjolein Demmers, Natuur & Milieu 'Stilstaan is geen optie'



Waarom is stikstof voor Natuur & Milieu een belangrijk thema?

'Een van de eerste rapporten van Natuur & Milieu ging over stikstof, bijna vijftig jaar geleden. Daarmee hebben we toen al de stikstofproblematiek op de politieke agenda gezet. Onze doelstelling is een duurzame toekomst voor iedereen

binnen de grenzen van wat de aarde kan dragen. Een toekomst zonder negatieve impact op klimaat en natuur. Natuur & Milieu richt zich op de rol die Nederland in deze vraagstukken speelt; rondom biodiversiteit kijken we dan natuurlijk ook naar de verduurzaming van de landbouw. Hierbij baseren we ons zoveel mogelijk op wetenschappelijk onderzoek en werken we met verschillende partijen samen, juist ook met actoren die kunnen bijdragen aan een oplossing. Daar horen zeker ook landbouworganisaties bij zoals LTO, die van invloed zijn in de transitie naar duurzame landbouw.'

Hoe staan we er inmiddels voor?

'Na de PAS-uitspraak en de daaropvolgende polarisatie zijn we terechtgekomen in een impasse. Door het wegvallen van vergunningen kon opeens een he-le-boel niet meer en tegelijkertijd was er natuurlijk een enorme roep vanuit natuurorganisaties om nu echt iets te gaan doen aan de gevolgen van het stikstofoverschot. En nu is er de nieuwe stikstofwet, waarvan eigenlijk zowel het bedrijfsleven als de landbouw en de natuurorganisaties constateren dat deze onvoldoende is. Zo spreekt de wet slechts van een 26 procent afname in stikstofuitstoot in 2030, tegenover de 50 procent die de commissie-Remkes adviseerde. Iedereen voelde al wel aan dat het waarschijnlijk zou leiden tot weer een rechterlijke uitspraak, terwijl er juist behoefte is aan stabiliteit.'

Hoe komen we uit de impasse?

'Toen er vanuit de overheid geen betere oplossing kwam, gingen we in gesprek met andere partijen. Want ondertussen verbeterde niet alleen de natuur niet,

maar was er ook het risico dat zaken als woningbouw en de energietransitie hierop zouden vastlopen. En er was een enorm urgentiegevoel vanuit de samenleving. Onderdeel van onze oplossing moest zijn dat we daarmee de impasse zouden doorbreken en dat de betrokken stakeholders (boeren, bedrijfsleven, natuurorganisaties) er voldoende mee uit te voeten zouden kunnen. We wilden de polarisatie wegnemen. Dat is lastig, maar er moest iets gebeuren: stilstaan is geen optie. Toen zijn we met een aantal organisaties om tafel gegaan om te proberen de impasse te doorbreken. Dit zijn partijen die het nou niet per se meten met elkaar eens zijn (VNO-NCW, Natuurmonumenten, LTO Nederland, Bouwend Nederland en MKB-Nederland). Natuurlijk was dat niet makkelijk en vergde deelname aan deze coalitie van iedere partner moed en een grote doelgerichtheid. Uit deze coalitie is het versnellingsakkoord ontstaan. Dit akkoord bevat concrete stappen om stikstof te reduceren, zoals harde reductiedoelen per gebied, een nationaal registratiesysteem voor stikstof en een gebiedsgerichte aanpak met lokale partijen.'

Waar zijn we in 2030?

'Ik denk dat we op een andere manier zullen omgaan met de milieuvraagstukken waar we voor staan. De stikstofcrisis heeft Nederland tot stilstand gebracht. De grens van wat onze natuur kan dragen is heel duidelijk overschreden. De uitweg uit deze crisis is in ieder geval een juridisch houdbare 40 procent afname van de stikstofuitstoot en een vorm van landbouw in balans met de natuur. Ik hoop dat we in 2030 die omslag gemaakt hebben.'

Merle Scholten & Jelle Reumer

2. Stikstofeffecten

2.1 Stikstof: een veelkoppig monster

– Wim de Vries

De overmaat aan stikstof in Nederland bedreigt niet alleen de biodiversiteit en de natuur, maar ook de kwaliteit van lucht en water en het klimaat. En dus heeft de mens er zelf ook last van.

Effecten op natuur

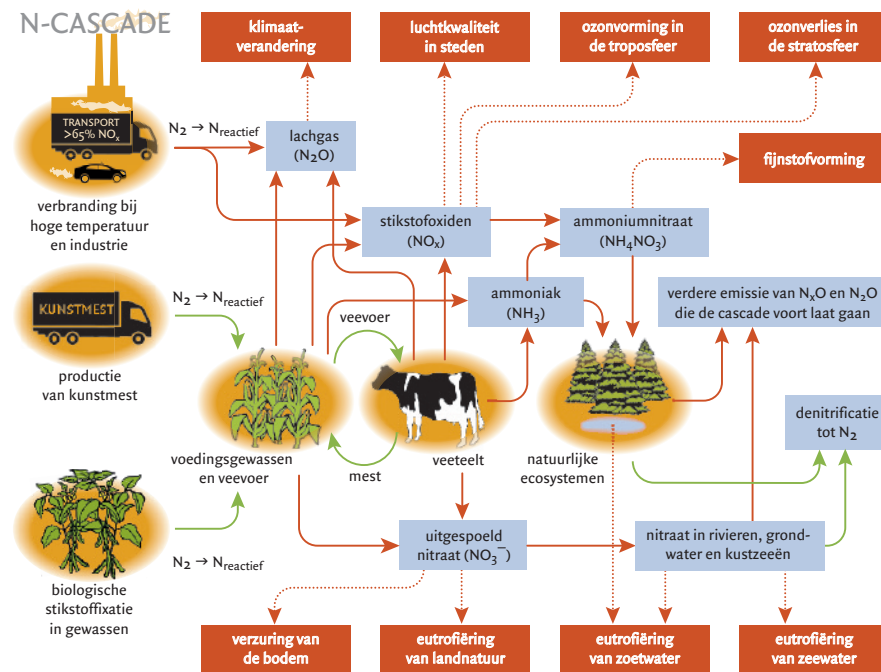
In de jaren tachtig was er veel aandacht voor zure neerslag, ook wel zure regen genoemd. Die bestaat uit zwaveldioxide, stikstofoxiden en ammoniak, in natte vorm (regen, sneeuw, hagel) of droge vorm (gassen, deeltjes). De zwavel- en stikstofgassen worden (in water) omgezet in zwavelzuur en salpeterzuur, terwijl ammoniak het zuur juist buffert en daarbij wordt omgezet naar ammonium. In de grond kan uit ammonium nitraat ontstaan en wordt salpeterzuur geproduceerd. Neerslag van zowel ammoniak als stikstofoxiden op natuurterreinen leidt dus tot bodemverzuring. De verhouding tussen calcium, kalium en magnesium enerzijds en stikstof anderzijds raakt uit balans. Tot een bepaalde waarde is stikstofdepositie gunstig voor de planten en de biodiversiteit, maar daarboven niet meer.

Gelukkig is de uitstoot van zwaveldioxide sinds 1985 met zo'n 90 procent gedaald, dankzij milieumaatregelen als rookgasreiniging en gebruik van brandstoffen met een laag zwavelgehalte. Ook de uitstoot van stikstofverbindingen is meer dan gehalveerd (zie 1.4). Toch is de neerslag op de meeste natuurgebieden nog steeds te hoog. Daarom worden effectgerichte maatregelen uitgevoerd om de schade te beperken, maar de effectiviteit daarvan is beperkt (zie 3.5).

De verhoogde stikstoftoevoer en de verliezen naar lucht, gevolgd door depositie, hebben effecten op het bodemleven (zie 2.3) en grote gevolgen voor de biodiversiteit op land (zie 2.4) (zie figuur 15). Bepaalde plantensoorten die van veel stikstof houden en bestand zijn tegen zure grond, zoals bramen en brandnetels, verdringen plantensoorten die goed gedijen op een stikstofarme en minder zure grond. Daardoor neemt de diversiteit van plantensoorten af. Dat heeft weer negatieve gevolgen voor allerlei dieren, zoals vlinders, andere insecten en vogels. Daarnaast kan bodemverzuring tot bossterfte leiden. Met name de zomereik heeft er veel last van. Verder kunnen hoge stikstofconcentraties een grotere gevoeligheid voor droogte, vorst, vraat en ziekteverwekkers veroorzaken.

Effecten op waterkwaliteit

De verhoogde stikstoftoevoer en de bijbehorende verliezen naar water hebben gevolgen voor de waterkwaliteit en de biodiversiteit van natuur in water (zie 2.7 en 2.8) (zie figuur 15). Als veel stikstof afspoelt naar sloten, rivieren, meren en uiteindelijk de zee, belast dat het ecosysteem in die wateren. Een teveel aan voedingsstoffen, ook wel eutrofiëring genoemd, kan leiden tot algenbloei. Het water wordt dan troebel. Bepaalde waterplanten krijgen minder licht en de plantendiversiteit neemt af. Ook vissoorten die afhankelijk zijn van goed zicht, zoals de snoek, gaan in aantal achteruit, terwijl soorten die geen last hebben van de troebelheid, zoals brasem, juist toenemen. Na de bloei gaan de algen – die ook nog eens giftig kunnen zijn – dood. Hun afbraak kan zoveel zuurstof aan het water onttrekken dat vissen en andere waterorganismen sterven. Ook in zout water leidt eutrofiëring tot algenbloei en plaatselijke zuurstofloosheid. Afhankelijk van de omgeving en het type alg kan schuim op het strand ontstaan. Een teveel



Figuur 15. De N-cascade: de uitstoot van stikstof naar lucht en water leidt tot een cascade van effecten door transport in de lucht en in het water, depositie op natuur en inname door de mens. (Naar Sutton et al., 2013)

aan stikstof veroorzaakt bovendien verzuring in sommige oppervlaktewateren zoals vennen, waardoor de biodiversiteit kan afnemen.

Effecten op luchtkwaliteit en gezondheid

Een overmaat aan stikstofoxiden bedreigt ook onze eigen gezondheid (zie 2.11). Hoge concentraties van NO_2 veroorzaken schade aan de longen en leiden tot ademhalingsproblemen. Belangrijker is dat stikstofoxiden samen met vluchtige organische verbindingen ozon (O_3) vormen, waardoor smog kan optreden. Smog door ozon veroorzaakt luchtwegklachten, irritaties aan de ogen, neus en keel, en duizeligheid (zie ook 2.11). Smog is een groot probleem in veel Chinese steden. In Nederland kan ook smog optreden, maar niet zo ernstig als in China.

Daarnaast dragen ammoniak en stikstofoxiden in Nederland gemiddeld voor circa 38 procent bij aan de vorming van fijnstofdeeltjes. Die deeltjes hebben een schadelijke uitwerking op longen, hart en bloedvaten. Een verhoogde uitspoeling van nitraat naar grond- en oppervlaktewater vormt een risico voor de drinkwatervoorziening. Te hoge gehalten in het drinkwater kunnen leiden tot de omzetting van nitraat in nitriet, wat vooral voor baby's schadelijk kan zijn.

Effecten op klimaat

De overmaat aan stikstof heeft ook gevolgen voor het klimaat (zie 2.12). Ten eerste leidt verhoogd stikstofgebruik in de landbouw tot verhoogde emissies van lachgas (N_2O), een driehonderd keer sterker broeikasgas dan koolstofdioxide. Lachgas ontstaat in het water en in de bodem, bijvoorbeeld bij het gebruik van mest, het omploegen van grasland of door depositie en stikstofbinding.

Daarnaast leidt de uitstoot van stikstofoxiden tot de vorming van ozon op tien tot vijftien kilometer hoogte, de zogenaamde troposferische ozon. Dit broeikasgas vergroot de opwarming en vermindert de groei van bossen, die daardoor weer minder van het broeikasgas koolstofdioxide vastleggen.

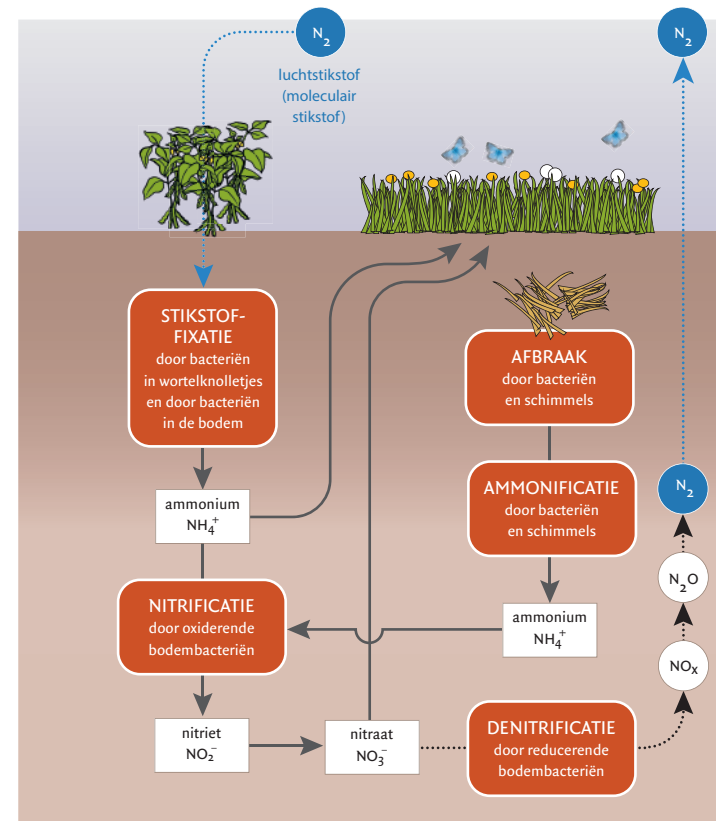
Maar er zijn ook tegenovergestelde effecten. Zo bemesten ammoniak en stikstofoxiden de bodem en zolang de depositie niet te hoog wordt, stimuleert dat de groei van bossen en dus de vastlegging van koolstofdioxide. Bemesting leidt ook tot meer vastlegging van koolstof in de landbouw. Netto is de bijdrage van stikstof aan de totale uitstoot van broeikasgassen klein: slechts 3 procent (zie ook 2.12).

2.2 De stikstofkringloop

– Wim de Vries & Jan Willem Erisman

Van de totale hoeveelheid aanwezige stikstof op aarde bevindt zich meer dan 90 procent in de atmosfeer als stikstofgas. Planten, dieren en mensen kunnen geen stikstofgas uit de lucht opnemen. Flora en fauna zijn dus afhankelijk van de vastlegging van stikstof uit de lucht en de omzetting ervan in een vorm die opneembaar is.

NIET VERSTOORDE STIKSTOFKRINGLOOP

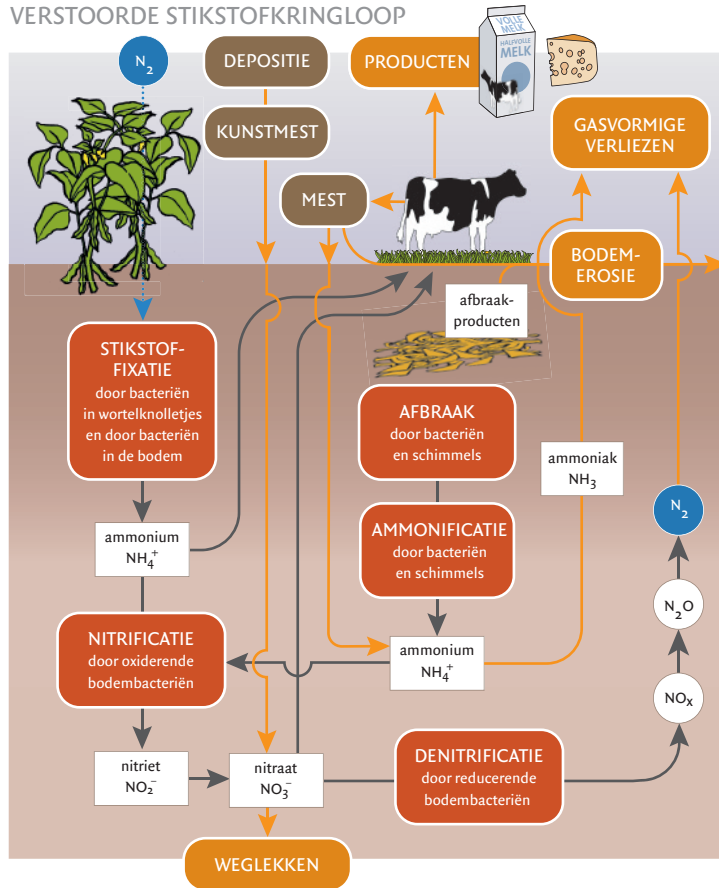


Figuur 16. Vereenvoudigde voorstelling van een niet-verstoorde stikstofkringloop. (© Jos van den Broek)

De stikstofkringloop zonder menselijke verstoring

In de stikstofkringloop (zie figuur 16) wordt stikstof uit de lucht door speciale bacteriën vastgelegd (stikstoffixatie). Door afbraak van organisch materiaal komt het stikstof beschikbaar voor de plant. De organische stikstof wordt via ammonificatie omgezet in ammonium en vervolgens via nitrificatie in nitraat. Deze stikstofverbindingen neemt de plant vervolgens op. Een klein deel van het nitraat zetten bacteriën om in stikstofgas via de zogenaamde denitrificatie. Stikstof-

VERSTOORDE STIKSTOFKRINGLOOP



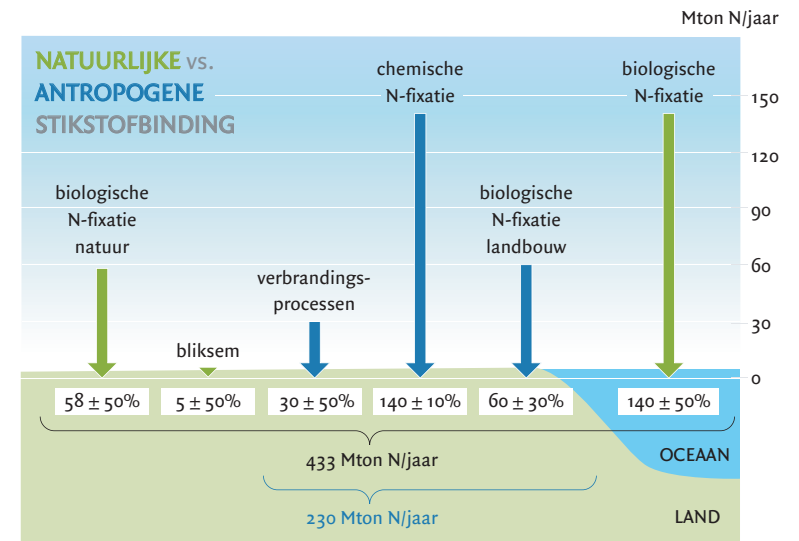
Figuur 17. Illustratie van een verstoorde stikstofkringloop. (© Jos van den Broek)

fixatie kost meer energie dan het hergebruiken van bestaande stikstofverbindingen. Stikstof is in de natuur meestal een beperkend element. Daarom wordt zoveel mogelijk stikstof in de stikstofkringloop behouden en spoelt er in een niet-verstoorde kringloop nauwelijks stikstof uit naar water.

Stikstofvastlegging tot wel meer dan honderd kilo per hectare per jaar is mogelijk met stikstofbindende bacteriën van het geslacht *Rhizo-*

bium, die leven in de wortels van vlinderbloemige planten zoals klaver en peulvruchten, en van de boom *Robinia*. Deze bacterie vormt samen met de plantenwortel een knolletje waarin de stikstofbinding plaatsvindt. Dankzij *Rhizobium* kan de plant stikstof verkrijgen voor de groei, terwijl de bacterie koolstofverbindingen van de plant krijgt.

Organisch materiaal van dode planten en dieren wordt door zeer veel micro-organismen gebruikt als energiebron. Bij dit afbraakproces, ook wel mineralisatie genoemd, komt ammonium vrij, vandaar dat ook wel het woord ammonificatie wordt gebruikt. Andere bacteriën gebruiken ammonium als energiebron en oxideren deze stof tot nitriet (het geslacht *Nitrosomonas*) en nitraat (het geslacht *Nitrobacter*); dit proces wordt nitrificatie genoemd. Zowel ammonium als nitraat zijn als stikstofbron beschikbaar voor de plant, die ze opneemt voor groei en aanmaak van eiwitten en DNA. Nitraat kan echter ook gebruikt worden door bacteriën. Zij zetten het onder zuurstofloze omstandigheden



Figuur 18. De wereldwijde stikstofbinding in Mton per jaar door natuurlijke bronnen (groene pijlen) en antropogene bronnen (blauwe pijlen), berekend voor 2010. (Bron: Fowler et al., 2013)

om in het stikstofgas N_2 . Dat proces heet denitrificatie. Of ze zetten ammonium via nitriet om in stikstofgas.

De stikstofkringloop na menselijke verstoring

Door toediening van kunstmest, dierlijke mest, compost, slib en het inzaaien van vlinderbloemigen komt er meer stikstof in de kringloop terecht dan van nature het geval is. De stikstofkringloop is daardoor ernstig verstoord (zie figuur 17).

Momenteel is de geschatte stikstofbinding op wereldschaal door kunstmestproductie en het inzaaien van vlinderbloemigen op land ruim driemaal hoger dan de natuurlijke stikstofbinding op het land, met name in bossen (zie figuur 18). Door de verhoogde toevoer van stikstof naar landbouwgronden zijn de emissies naar lucht en water sterk toegenomen. Dat geldt ook voor de uit- en afspoeling van nitraat naar grondwater en oppervlaktewater, en voor de omzetting door denitrificatie van nitraat naar stikstofgas (N_2), stikstofoxiden (NO_x) en lachgas (N_2O).

2.3 De gevolgen van te veel stikstof voor het bodemleven

– Franciska de Vries, Matty Berg & Albert Tietema

Stikstofverrijking beïnvloedt het bodemleven: het heeft gevolgen voor het bodemvoedselweb, wat op zijn beurt weer doorwerkt in de plantengroei en de vatbaarheid voor plantenziektes.

Belang van bodemleven

De bodem krioelt van het leven: naar schatting herbergt hij een kwart van alle beschreven soorten wereldwijd. Zo leven er schimmels, bacteriën, aaltjes, mijten, regenwormen, duizendpoten, pissebedden, springstaarten, mieren, kevers en nog veel meer. Deze organismen vervullen een belangrijke rol: ze breken dood organisch materiaal af, zodat de voedingsstoffen die erin opgesloten zitten, weer beschikbaar komen voor plantengroei, of ze hebben een directe relatie met planten. Schimmels die samenwerken met planten –

de zogenoemde mycorrhiza's – en stikstofbindende bacteriën helpen de plant bijvoorbeeld om voedingsstoffen uit de bodem op te nemen en krijgen in ruil daarvoor koolstof terug in de vorm van suikers.

Effecten op bacteriën en schimmels

Bodemorganismen verschillen in de hoeveelheid stikstof (N) die ze nodig hebben ten opzichte van koolstof (C) en fosfor (P). Bacteriën hebben relatief meer stikstof nodig dan schimmels. Daardoor nemen schimmels in een stikstofrijke omgeving meer in aantal af dan bacteriën. In bossen waarin veel stikstof terecht komt, gaan schimmels die samenwerken met wortels sterker achteruit dan schimmels die organisch materiaal afbreken. Ook andere typen schimmels lijden onder stikstofdepositie, terwijl ziekteverwekkende schimmels juist toenemen. Bovendien zijn schimmels hierbij minder goed in staat lignine (houtstof, een component van dood plantenmateriaal) af te breken, waardoor er een dikkere strooisellaag op de bodem ontstaat. Schimmels kunnen al reageren op zeer lage depositieniveaus van rond de tien kilo stikstof per hectare per jaar. Stikstofverrijking vermindert ook de diversiteit, de totale biomassa en de activiteit van bacteriën in de bodem, en stimuleert groepen bacteriën die snel groeien. Ook bacteriën kunnen het organische materiaal van bomen en struiken minder goed afbreken wanneer er veel stikstof in de bodem zit.

Omdat stikstofverrijking ervoor zorgt dat schimmels sterker afnemen dan bacteriën, verandert het functioneren van de bodem en het ecosysteem. Microbiële gemeenschappen waarin bacteriën domineren, verwerken niet-houtig dood plantenmateriaal sneller dan schimmels, waardoor stikstof sneller vrijkomt. Hierdoor vindt er meer nitrificatie plaats, zodat nitraat wordt gevormd en verzuring plaatsvindt. Dat kan weer leiden tot een hogere nitraatuitspoeling en een hogere productie van lachgas (N_2O), een sterk broeikasgas (zie 2.2).

Bovendien kan een veranderde verhouding tussen schimmels en bacteriën het voorkomen van schimmeletende aaltjes, springstaarten en mijten verminderen en dat van bacterie-etende aaltjes stimuleren. Dat heeft ook gevolgen voor de snelheid waarmee voedingsstoffen worden vrijgemaakt. In bodems waarin bacteriën domineren is die hoger. Hier zullen stikstofverliezen door nitraatuitspoeling en lachgasproductie eerder voorkomen dan in bodems waar schimmels domineren.

Effecten op bodemfauna

Er is veel minder onderzoek gedaan naar de effecten van stikstofdepositie op bodemfauna dan naar de effecten op micro-organismen. In het algemeen neemt zowel de biomassa als de diversiteit van bodemfauna af in stikstofrijke milieus. Bodemverzuring speelt hierin een belangrijke rol en verklaart de afname van bepaalde groepen aaltjes, springstaarten en mijten als gevolg van stikstofverrijking. Mogelijk is ook een verhoogde concentratie van ammonium in de bodem giftig voor bepaalde groepen aaltjes en springstaarten. Daarnaast zijn er effecten op bodemfauna door giftige zware metalen, zoals aluminium, bij een zeer sterke verzuring. Verder kan gebrek aan fosfor een rol spelen.

Stikstofverrijking heeft ook indirecte effecten op micro-organismen en bodemfauna. Meerdere studies laten zien dat afgestorven plantenmateriaal – voedsel voor strooieaters – in stikstofrijke ecosystemen een te laag gehalte aan essentiële elementen heeft voor de bodemfauna. Het bevat te weinig calcium, magnesium of aminozuren. Ook heeft stikstofverrijking een sterk effect op de plantensamenstelling en daarmee op de kwaliteit en hoeveelheid afgestorven plantenmateriaal. Dit kan zowel een positief als een negatief effect hebben. Strooiselkwaliteit beïnvloedt op zijn beurt weer de samenstelling van schimmel- en bacteriegemeenschappen en daarmee de bodemfauna die daarvan leeft. Stikstofdepositie verandert dus de interacties in het voedselweb van de bodem.

Effecten op het ecosysteem

Al deze veranderingen in het bodemvoedselweb hebben gevolgen voor de plantengroei en de beschikbaarheid van voedingsstoffen. Planten worden vatbaarder voor ziektes omdat de samenwerking met bijvoorbeeld microben afneemt of omdat ziekteverwekkende schimmels en parasitaire aaltjes meer kans krijgen. Interacties tussen planten en bodemorganismen zijn cruciaal voor een gezond ecosysteem: voor de plantengroei en het opslaan van organisch materiaal in de bodem, en voor de balans tussen stikstof die opgenomen wordt door organismen en die de bodem verlaat naar lucht en water. De effecten van stikstofdepositie onder de grond zijn dus net zo belangrijk als die boven de grond.

2.4 De sluipende effecten van stikstofdepositie op de flora

– Roland Bobbink

Al zo'n zestig jaar komt er te veel reactieve stikstof in de natuur. De ecologische gevolgen zijn complex, met vele interacties, en worden vaak pas na jaren zichtbaar. De belangrijkste effecten worden in dit hoofdstuk op een rij gezet.

Directe toxiciteit

Bij hoge concentraties luchtverontreiniging kunnen gassen en aerosolen directe toxische effecten hebben op planten. Gassen kunnen in de bladeren komen via de huidmondjes of via de beschermende waslaag van de bladeren. Dat kan leiden tot ontregeling van de bladfysiologie. Ook kunnen de gassen de beschermende waslaag van bladeren of naalden aantasten. De concentraties van stikstofdioxide en ammoniak zijn echter in Nederland tegenwoordig niet meer zo hoog, waardoor dit directe effect bij vaatplanten nauwelijks meer voorkomt. Een uitzondering is de directe schade die een aantal korstmossen ondervindt van ammoniak, waardoor de soortenrijkdom van deze groep in bos, heide, stuifzand en zelfs kalkgrasland allang drastisch is verminderd.

Vermesting (stikstofeutrofiëring)

Verhoogde stikstofdepositie in een voorheen onbelaste situatie leidt tot toename van de stikstofbeschikbaarheid in de bodem en zo tot een verhoogde opname door de vegetatie. Op termijn zal deze toegenomen beschikbaarheid leiden tot verschuivingen in de concurrentie tussen plantensoorten. Snelgroeierende plantensoorten verdringen geleidelijk aan de minder concurrentiekrachtige soorten en worden uiteindelijk dominant. Vaak zijn dit grassen, maar ook bramen en gewone vlier zijn hier voorbeelden van. Veelal gaat dit ten koste van laag groeiende, kenmerkende plantensoorten. De vegetatiestructuur wordt zo steeds homogener. Dit alles betekent dat extra stikstof vooral in (matig) voedselarme ecosystemen een sterke afname van de soortendiversiteit teweegbrengt (zie figuur 19). Het teveel aan stikstof veroorzaakt daarnaast ook een achteruitgang van ectomycorrhiza-schim-

mels, die in symbiose leven met de boomwortels. Veel paddenstoelen uit deze groep zijn zeldzamer geworden, sommige zijn vrijwel uit onze bossen verdwenen. Ook de ectomycorrhiza-bezetting van boomwortels vermindert door toegenomen stikstoftoevoer, met nadelige gevolgen voor de vitaliteit van de boom.

De snelheid van de stikstofcyclus neemt door stikstofeutrofiëring ook geleidelijk toe. De biomassaproductie is hoger, met meer strooisel en vaak hogere stikstofconcentraties. Dat versnelt in eerste instantie de afbraak van organisch materiaal en de stikstofmineralisatie. Tegelijkertijd neemt vaak de vastlegging van ammonium en nitraat door micro-organismen af, waardoor de stikstofovermaat sneller beschikbaar komt voor de planten. De veranderde vegetatiesamenstelling kan op zich ook weer tot extra stimulering van deze cyclus leiden, bijvoorbeeld doordat het strooisel van de dominant geworden planten gemakkelijker afbreekt.

Bij een voortdurend hoge stikstofdepositie zal op een gegeven moment de plantengroei niet meer beperkt worden door stikstof maar door een ander element (fosfor, kalium of magnesium). Dan treedt geen extra groei meer op, al wordt nog wel een deel van de extra stikstof opgenomen. Dat laatste leidt tot nog hogere stikstofconcentraties in de vegetatie, met gevolgen voor de hoeveelheid stikstof in het strooisel en voor de stikstofmineralisatie. Daardoor daalt de verhouding tussen koolstof en stikstof in de toplaag van de bodem geleidelijk. Door de aanhoudende accumulatie van stikstof, de toegenomen snelheid van de stikstofcyclus en de verzadiging van het ecosysteem met stikstof wordt het risico op uitspoelen van nitraat naar het (ondiepe) grondwater steeds groter. Vooral in bossen en droge duinen is dit het geval: een dergelijk systeem noemt men 'stikstofverzadigd'. De stikstofovermaat in de planten kan ook grote gevolgen hebben voor plantenetende dieren en daarmee doorwerken in het voedselweb (zie 2.5).

Verzuring

Bodemverzuring is een langetermijnproces, dat ernstig versneld wordt door stikstofdepositie en vele gevolgen heeft (figuur 20). Hierbij

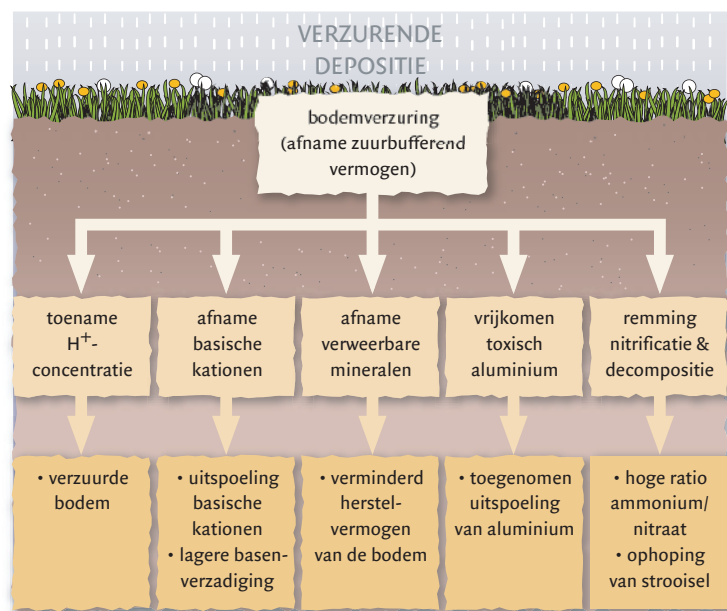


Figuur 19. Beeld van de veranderingen in vegetatiesamenstelling na experimentele toediening van stikstofverbindingen. Rechtsboven: Zuid-Limburgse kalkgraslandvegetatie na vier jaar beregening met stikstof, linksboven de vegetatie behandeld met schoon regenwater (foto's: Roland Bobbink). Rechtsonder: Na zes jaar toediening van stikstof in boreaal bos in Midden-Zweden zijn de blauwe bosbes en begeleidende mossen (linksonder) verdrongen door bochtige smele (foto's: Annika Nordin).

is zuurbuffering essentieel en afhankelijk van het uitgangsmateriaal. Als je aan een kalkrijke bodem heel langzaam zuur toevoegt, buffert de kalk (calciumcarbonaat, CaCO_3) dit zuur. De grond raakt bij dit proces wel de bufferende stof kwijt: die lost langzaam op. Als de kalk bijna helemaal op is, zal de pH opeens snel dalen (en dus de zuurgraad stijgen). Bijna alle Nederlandse zandgronden zijn kalkloos, en dan vindt buffering plaats door uitwisseling van (positief geladen) kationen aan klei en organische stof (het zogeheten bodemadsorptiecomplex). Extra zuur verdringt deze basische kationen – die ook plantenvoedingsstoffen zijn – van het bodemadsorptiecomplex, waardoor ze in oplossing komen en kunnen uitspoelen. Daarnaast vindt er ook zuurbuffering in de bodem plaats doordat silicaatmineralen oplossen (verwerking). Die uitwisseling verloopt zeer langzaam en houdt de ver-

zuring niet bij. Verwerking is op lange termijn wel essentieel voor het herstel van de buffercapaciteit.

Door de overmaat aan stikstof en het uitspoelen van calcium, kalium en magnesium ontstaat een onbalans van nutriënten, waardoor gebreksverschijnselen optreden zoals calcium- en kaliumtekort in bijvoorbeeld eiken (zie 2.6). Bij een hoge zuurgraad – een pH onder de 4,5 – lossen tenslotte metaalverbindingen in de bodem op. Daarbij ontstaat vrij aluminium (Al^{3+}) en soms vrij ijzer (Fe^{3+}). Vooral vrij aluminium is toxisch voor veel planten en dieren. Tevens kan verzuring de nitrificatie – de omzetting van ammonium in nitraat – remmen, waardoor ammonium de dominante vorm van stikstof wordt. Omdat veel organismen de lage beschikbaarheid van calcium, magnesium en kalium en de hoge concentraties vrij aluminium en ammonium niet verdragen, leidt bodemverzuring bijna altijd tot biodiversiteitsverlies.



Figuur 20. Schematisch overzicht van de complexe gevolgen die optreden bij versnelde verzuring van de bodem door verzurende depositie. (Naar Bobbink et al., 2017)

Negatieve effecten van ammonium

Nitraat en ammonium zijn de anorganische stikstofvormen die door planten worden gebruikt. In de natuur komt een grote breedte van verhoudingen tussen nitraat en ammonium voor. Nitraat is de dominante stikstofvorm in goed tot matig gebufferde situaties, terwijl ammonium van nature sterk dominant is onder zure omstandigheden (pH onder de 4,5). In eerstgenoemde situatie is de vegetatie aangewezen op nitraatvoeding. In van oorsprong al zure systemen, zoals hoogvenen, heiden en sommige bossen, was ammonium altijd al de dominante stikstofbron waar de kenmerkende soorten goed mee konden omgaan. Dit alles heeft als gevolg dat de effecten van veel ammonium in genoemde systemen niet of nauwelijks anders zijn dan die van veel nitraat.

De ernstigste gevolgen van verhoogde ammoniumbeschikbaarheid zijn gevonden in voorheen zwak tot matig gebufferde omstandigheden met een pH van 6,5 tot 4,5, zoals die oorspronkelijk aanwezig waren in vennen, heischrale graslanden, soortenrijke heide en bossen op wat leemhoudende bodem (zie figuur 21). Kortom, in die situaties waar de vegetatie aangepast was aan nitraat als dominante stikstofvorm, maar de bodem wel relatief gevoelig was voor bodemverzuring. Overigens worden deze plantensoorten – nu bijna allemaal op de rode lijst – ook nog eens bedreigd door de overige gevolgen van bodemverzuring, namelijk de verhoogde aluminiumconcentraties en de verlaagde hoeveelheden basische kationen. Tevens zijn veel korstmossen en mossen aangetast, met name die soorten die niet aangepast zijn aan hoge opnames en assimilatie van gereduceerde stikstof (vooral ammoniak). Deze soorten krijgen hun stikstof direct uit de lucht of het regenwater.

Gevoeligheid voor droogte en storm

Verhoogde beschikbaarheid van stikstof leidt ook tot een toename van de zogeheten spruit/wortel-verhouding. Dat betekent dat de spruit bij een bepaalde waarde minder wortels heeft, waardoor hij minder water uit de bodem verkrijgt. Ook voor boomsoorten is gevonden dat de hoeveelheid fijne wortels verlaagd was bij hoge stikstoftoevoer en werden er ook minder wortels aangetroffen in de diepere lagen van de bodem, vooral als er ook sprake was van bodemverzuring.



Figuur 21. Boven: het effect van hoge ammoniumconcentratie of verhoogde ammonium-nitraatratio op de groei van valkruid (*Arnica montana*) (foto's: Maaïke de Graaf). Linksonder: het effect op rood schorpioenmos (*Scorpidium scorpioides*) (foto: Maurice Paulissen). Rechtsonder: het effect op blauwe knoop (*Succisa pratensis*) (foto: Edu Dorland).

Een geringere ontwikkeling van het wortelstelsel met een kleinere worteldiepte maakt bomen gevoeliger voor omwaaien bij storm. Zo bleek in Zwitserland na een grote storm dat er meer beuken waren omgewaaid op plekken waar het stikstofgehalte van de bladeren hoger was.

Gevoeligheid voor microbiële infecties en insectenplagen

Verhoogde stikstof kan de gevoeligheid van de vegetatie voor aantasting door ziekteverwekkende organismen sterk beïnvloeden. De vitaliteit van bomen kan verminderen, waardoor ze gevoeliger worden voor aantasting door schimmels, bacteriën, virussen en insecten. De aantasting door planteneterende insecten kan flink toenemen door de vaak zeer sterke verhoging van het stikstofgehalte in de bladeren. Voorbeelden hiervan zijn de (massale) aantasting van struikheide door het heidehaantje en van eiken door wintervlinderrupsen in het voor-

jaar. Mogelijk is het frequenter optreden van insectenplagen (zoals de eikenprocessierups) behalve aan klimaatfactoren mede te wijten aan de zeer hoge stikstofgehalten in de bladeren. Een oorzakelijk verband tussen verhoogde stikstofdepositie en toename van infecties en plagen is echter nog maar voor weinig soorten vastgesteld.

Concluderend: de hoge stikstofdepositie van de afgelopen decennia heeft geleid tot een sterke achteruitgang van de biodiversiteit door de cumulatieve gevolgen van vermessing en verzuring.

2.5 De gevolgen van stikstofdepositie voor de fauna

– Arnold van den Burg & Michiel Wallis de Vries

Stikstofdepositie zorgt ervoor dat de kwaliteit van het leefgebied en van het voedsel voor veel diersoorten afneemt, waardoor soorten uit gebieden verdwijnen. Verschillende mechanismen liggen eraan ten grondslag.

Vermesting

Door hoge stikstofdepositie ontstaat een overmaat aan stikstof in de bodem. Dit wordt wel 'vermessing' genoemd. Als gevolg daarvan is stikstof niet langer een beperkende factor voor de plantengroei en kunnen bepaalde planten harder gaan groeien. Vooral in gebieden die van nature arm zijn aan stikstof en waar de vegetatie gedomineerd wordt door traag groeiende plantensoorten, leidt stikstofdepositie tot een snelle ontwikkeling van enkele soorten grassen, brandnetels en bramen (zie 2.4). Dit heeft twee effecten: veel kenmerkende, traag groeiende soorten worden overwoekerd, maar ook raken open plekken met gras begroeid. Deze veranderingen in de vegetatie werken door op de fauna. Als plantensoorten verdwijnen, kunnen de dieren die deze planten als voedselbron hebben ook niet overleven. Bovendien zijn veel koudbloedige diersoorten, zoals zandbijen en hagedissen, afhankelijk van kale bodem om op te warmen of om eitjes te leggen. Als er te weinig door de zon beschenen bodem of lage vegetatie overblijft, ruimen soorten die hiervan afhankelijk zijn, zoals de kleine heivlinder, het veld. Ook vogelsoorten als de tapuit kunnen uiteindelijk niet overleven waar open heidevegetaties veranderen in dichte

grasvlakten, omdat daar te weinig insecten zijn en omdat ze de overgebleven insecten niet goed meer kunnen bereiken.

Verzuring

Een ander effect van stikstofdepositie is bodemverzuring. Door de verzuring vermindert de beschikbaarheid van plantenvoedingsstoffen, zoals kalium, magnesium en calcium. Hiervan komt dus ook minder in het blad en in het strooisel terecht. Onder de afvalers in de strooisellaag zijn drie soortgroepen die veel calcium nodig hebben voor hun uitwendige skelet: pissebedden, miljoenpoten en huisjesslakken. Deze dieren hebben het moeilijk bij een lage calciumbeschikbaarheid; huisjesslakken kunnen als groep regionaal bijna uitsterven. Zo komen er ook steeds minder kleine dieren die een goede calciumbron zijn voor vogels. Dat leidt bijvoorbeeld bij kool- en pimpelmezen tot eieren met een te dunne schaal en jongen die al in het nest hun pootjes breken. Door verzuring nemen ook de concentraties van aluminium en ammonium toe. Plantensoorten die daar niet tegen kunnen, nemen af en zo ook de diersoorten die van deze planten afhankelijk zijn.

Stikstof als bouwsteen voor eiwitten

De lage concentraties kalium, magnesium, calcium en ook fosfor, in combinatie met een stikstofoverschot, betekenen voor veel diersoorten dat de kwaliteit van hun plantaardig voedsel sterk afneemt. Veel diersoorten zijn direct of indirect afhankelijk van planten om alle soorten aminozuren binnen te krijgen. Aminozuren zijn de bouwstenen van eiwitten. Als er door verzuring een gebrek is aan minerale voedingsstoffen om (snel) eiwitten te maken en er is tegelijkertijd een overschot aan stikstof, dan kan de plant de stikstof niet voor de opbouw van aminozuren en eiwitten gebruiken. De plant verwerkt de overtollige stikstof dan bijvoorbeeld in vraatwerende verbindingen. Zowel de toename van stikstofverbindingen die niet bijdragen aan de voedselkwaliteit als de verlaging van het eiwitgehalte zorgen ervoor dat insecten, zoals vlinderrupsen, nauwelijks kunnen overleven op deze planten. Populaties worden als gevolg daarvan sterk uitgedund en soorten verdwijnen zelfs uit aangetaste gebieden. Voor insectenetters, zoals veel soorten zangvogels, is er daardoor veel minder voedsel te vinden. Een gebrek aan rupsen leidt bij de koolmees en de grote bonte

specht bijvoorbeeld tot een lager broedsucces en jongen met lagere uitvlieggewichten, die dan ook een kleinere kans hebben om volwassen te worden.

Tot slot zijn er aanwijzingen dat een verminderde voedselkwaliteit doorwerkt tot het hoogste niveau in de voedselketen. Zo wordt het leggen en uitkomen van de eieren van sperwers op de Zuidwest-Veluwe meer beperkt door de beschikbaarheid van bepaalde aminozuren dan door de beschikbaarheid van voedsel. In bossen op de meest voedselarme bodems op de hoge zandgronden zijn niet alleen de sperwer maar ook andere roofvogels zoals havik, buizerd, torenvalk en boomvalk sterk achteruitgegaan of regionaal zelfs verdwenen. Aangezien vergelijkbare problemen, zoals geen eileg, ook bij havik en buizerd veel voorkwamen in de periode van hun achteruitgang, is het zeer waarschijnlijk dat ook hier stikstof een rol speelde.

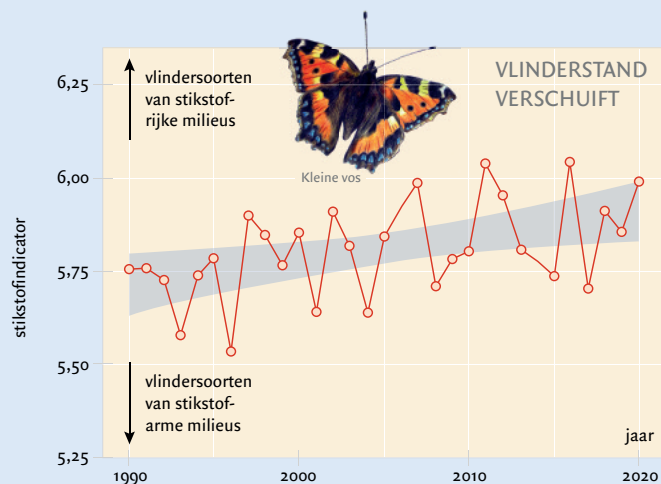
Doordat de effecten van stikstof op fauna indirect zijn, zijn ze lang over het hoofd gezien, maar nu we de werkingsmechanismen leren kennen, is duidelijk dat stikstof ook voor de fauna een grote rol speelt bij het verlies van biodiversiteit (zie kader).

Stikstofindicator voor vlinders

– Arnold van den Burg & Michiel Wallis de Vries

Voor de dagvlinders weten we via het Meetnet Vlinders veel over de veranderingen in de populaties sinds 1990. De meeste soorten hebben hun optimum in stikstofarme milieus, maar er zijn ook soorten van stikstofrijke milieus, zoals de dagpauwoog die als rups van brandnetels leeft. Van 41 soorten is hun optimale stikstofwaarde aan de hand van vegetatieopnamen in hun leefgebied bepaald. Die ligt tussen 1 (stikstofarm) en 8 (stikstofrijk). De verhouding in de talrijkheid van soorten met verschillende stikstofoptima is gebruikt om een stikstofindicator op te stellen. Deze laat sinds 1990 een significante stijging zien (figuur 22), wat aangeeft dat de vlinderfauna steeds meer wordt gekenmerkt door enkele soorten van stikstofrijke milieus ten koste van de meerderheid aan soorten van stikstofarme milieus. Dit geeft aan

dat er voor de vlinders nog steeds sprake is van een stikstofovermaat, ook al is de stikstofdepositie tussen 1990 en 2005 met ongeveer 40 procent gedaald.



Figuur 22. De Stikstofindicator Vlinders laat een significante stijging zien van het aandeel stikstofminnende soorten op het totale aantal vlinders. (Bron: De Vlinderstichting & CBS)

2.6 Ammoniak schadelijker voor natuur, stikstofoxiden voor gezondheid

– Wim de Vries & Jan Willem Erisman

De belangrijkste effecten van stikstof op de natuur zijn bodemverzuring en vermisting. Naast deze algemene effecten van stikstofverrijking bestaan er grote verschillen tussen de effecten van ammoniak en stikstofoxiden.

Bovengrondse effecten van NO_x en NH_3

Ammoniak (NH_3) en stikstofoxiden (NO_x) hebben een verschillend effect op planten, vooral op de bladeren. Bij lage concentraties stimuleren deze gassen de groei van planten, maar boven een bepaald niveau remmen ze de groei juist, doordat de cellen

van bladeren beschadigd raken. Dat effect is groter bij ammoniak dan bij NO_x -verbindingen en hangt ook weer af van de stikstofopname via de wortels.

De schade treedt vooral op bij gevoelige plantensoorten zoals bepaalde vaatplanten, mossen en korstmossen op heischrale graslanden, soortenrijke heiden, bepaalde vennen, blauwgraslanden, trilvenen en veenmosrietlanden. Om deze planten te beschermen moeten de ammoniakconcentraties onder een kritische limiet blijven. Voor stikstofoxiden is de waarde waarbij bovengrondse effecten op planten optreden zo hoog dat die in de praktijk niet wordt waargenomen.

Stikstofoxiden, ammoniak en verzuring

Ook de bijdrage van stikstofoxiden en ammoniak aan bodemverzuring verschilt (zie ook 2.4). Dat heeft met name te maken met de manier waarop deze stikstofverbindingen in de lucht en de bodem worden omgezet. NO_x reageert in de lucht met zuurstof (O_2) en water (H_2O), en vormt salpeterzuur (HNO_3). Het ammoniak (NH_3) in de lucht buffert dit salpeterzuur juist door de vorming van ammoniumnitraat (NH_4NO_3), dat een groot deel van het fijnstof uitmaakt. NO_x verzuurt de atmosfeer en ammoniak óntzuurt die dus weer, zeker in Nederland, waar ammoniak in overmaat aanwezig is.

Wanneer ammoniumnitraat op de bodem terecht komt, splitst het in positief geladen ammonium (NH_4^+) en negatief geladen nitraat (NO_3^-). Beide stoffen kunnen worden opgenomen door planten. De ammoniumopname zorgt voor verzuring, doordat de planten de positieve waterstofionen daarbij weer uitscheiden. Planten houden hun lading namelijk neutraal bij de opname van voedingsstoffen. Nitraatopname zorgt voor het omgekeerde effect: planten nemen juist een waterstofion uit de bodem op, om de negatieve lading van het nitraation te compenseren. Als ammoniak of stikstofoxiden volledig door planten worden opgenomen, verzuurt de bodem hierdoor dus niet.

In de bodem zetten microben ammonium deels of volledig om naar nitraat (nitrificatie). Daarbij wordt tweemaal zoveel zuur geproduceerd als er in de lucht is geneutraliseerd bij de vorming van ammonium uit ammoniak. Wanneer planten dat nitraat volledig opnemen, is er netto weer geen sprake van verzuring door ammoniak. Maar wan-

neer er meer nitraat wordt aangevoerd dan de plant kan opnemen, ontstaat er een overmaat die kan uitspoelen naar het grondwater. Dan treedt wél verzuring op. Bodemverzuring door stikstof ontstaat dus wanneer het uit ammonium gevormde nitraat (via ammoniak) of het via de lucht aangevoerde nitraat (via stikstofoxiden) niet door planten wordt opgenomen, maar uitspoelt naar het grondwater.

Ondergrondse effecten van ammoniak en stikstofoxiden

Wanneer ammoniak en stikstofoxiden uit de atmosfeer in de bodem zijn opgenomen, is hun lot compleet verschillend. Het kost planten meer energie om nitraat op te nemen dan ammonium. Ze geven dan ook de voorkeur aan ammonium, dat ze vrijwel onmiddellijk opnemen. Ook de microben in de bodem nemen ammonium op en zetten dat om in nitraat. Dit nitraat passeert de wortelzone veel makkelijker en kan uitspoelen naar het grondwater, waardoor de bodem verzuurt.

Alleen bij volledige omzetting van ammonium naar nitraat (nitrificatie) verzuurt ammoniak de bodem evenveel als nitraat. Wanneer de nitrificatie echter onvolledig is – er blijft dan ammonium achter – leidt stikstofoxide tot meer verzuring dan ammoniak. Toch brengt ammoniak meer schade toe aan de natuur dan stikstofoxiden. De drie voornaamste oorzaken zijn: ammonium bevordert snelgroeiende stikstofminnende planten meer dan nitraat; ammoniak is bij hoge concentraties toxisch voor planten; en de opname van nutriënten als calcium, kalium en magnesium wordt geremd als planten ammonium opnemen.

Natuur lijdt meer onder ammoniak

Al met al heeft ammoniak dus een groter effect op de natuur dan stikstofoxiden. De toegestane totale deposities van ammoniak en stikstofoxiden zouden daarom verschillend moeten zijn. Helaas zijn er tot op heden nog te weinig onderzoeksgegevens om dat goed te onderbouwen. En de effecten van stikstofoxiden op natuur mogen dan minder zijn, ze zijn er zeker wel. Daarnaast hebben stikstofoxiden meer negatieve effecten op de gezondheid dan ammoniak (zie 2.11) en dragen ze meer bij aan klimaatverandering dan ammoniak (zie 2.12).

INTERVIEW – Maxime Verhagen, Bouwend Nederland

‘Niet alleen de laagste prijs, ook duurzaamheid moet leidend worden’



Wat is de impact van de stikstofcrisis op de bouwsector?

‘Die is fors. Voor het continueren van een boerenbedrijf heb je geen nieuwe vergunningen nodig als je er eenmaal een hebt. Hetzelfde geldt voor het verkeer: zodra je een auto of vrachtwagen hebt mag je blijven doorrijden. Bij de bouw daarentegen is voor ieder project een nieuwe vergunning nodig. Na de PAS-uitspraak werden er geen vergunningen meer verleend voor activiteiten waarbij stikstof wordt uitgestoten. De bouwsector draagt voor slechts 0,6 procent bij aan de totale stikstofuitstoot maar wordt het hardst getroffen. De aanleg van nieuwe infrastructuur is totaal tot stilstand gekomen, maar ook voor de woningbouw werden bijna geen vergunningen meer afgegeven.’

Biedt de huidige stikstofwet voldoende ruimte?

‘De wet levert te weinig op. Binnen de nieuwe wetgeving wordt de aanlegfase van projecten nu vrijgesteld, maar niet de gebruiksfase. Dat knelt vooral voor infrastructuur. Ook is het lastig vergunningen te krijgen voor bouwprojecten in de buurt van Natura 2000-gebieden of waar je het onvoldoende kunt compenseren. Aan de andere kant is in de wet ook een 60 procent reductie van de stikstofuitstoot in de aanlegfase afgesproken. Dit stimuleert de trend naar verdere verduurzaming van het materieel en algehele bouwproces. Zo gaan we steeds meer emissiearm werken. Vooral voor het lichtere materieel zoals generatoren is al aangetoond dat dit mogelijk is en het is ook financieel haalbaar. Naast budget voor innovatief materieel is er ook geld nodig voor emissiereductie door een slimmere logistiek en ook om emissiearme bouwprojecten betaalbaar te houden voor de opdrachtgevers.

Maar er blijft stikstofemissie in de gebruiksfase en je hebt met deze wet het probleem dus nog niet opgelost. Dat is dan ook de reden dat we met andere organisaties het versnellingsakkoord hebben gemaakt. Door een reductie over tien jaar van 40 procent ten opzichte van nu in plaats van 26 procent komt er toch ruimte voor economische activiteiten.’

Kritiek vanuit boeren is dat zij moeten reduceren om de bouw mogelijk te maken. Is dat terecht?

‘Het is echt niet de bouwsector tegen de landbouw. Natuurlijk willen wij graag doorbouwen aan woningen en infrastructuur, woningen zijn ook nodig. Er komen de komende tien jaar anderhalf miljoen mensen bij. Die moeten wel ergens wonen. Als bouwsector zijn wij zeker bereid ons deel bij te dragen qua reductie, maar omdat we maar zo’n kleine bijdrage leveren, blijven we afhankelijk van anderen. Tegelijkertijd hebben alle partijen belang bij een structurele oplossing. Het is juist belangrijk om te kijken wat niet alleen wij, maar ook de landbouw en natuurorganisaties nodig hebben. Dat moeten we vervolgens mogelijk maken. Dat kost wat, maar de kosten van niets doen zijn op de lange termijn vele malen hoger.’

Is dit gelukt in 2030?

‘Alleen als het lukt om samen te werken en als de samenleving ook echt investeert in duurzaamheid. Opdrachtgevers moeten niet meer alleen naar de laagste prijs kijken, maar ook naar duurzaamheid. Dat doet nu pas een kwart. Maar als dat lukt, worden we in 2030 koploper in emissiearm bouwen en zijn tegelijkertijd de kwetsbare natuurgebieden zichtbaar verbeterd en is er ook nog steeds een landbouwsector waar we trots op kunnen zijn.’

Merle Scholten & Jelle Reumer

2.7 Kritische depositiewaarden, natuurschade en natuurherstel

– Wim de Vries, Roland Bobbink & Han van Dobben

Kritische depositiewaarden spelen een grote rol in het stikstofbeleid. Ze bepalen wat waar mogelijk is. Maar hoe komen onderzoekers en beleidsmakers aan deze waarden en wat is de betrouwbaarheid ervan?

Vanaf midden jaren tachtig is er onderzoek gedaan naar de niveaus van stikstofdepositie. Bij welke waarden treden er negatieve effecten op habitats op? Er zijn drie methoden om deze zogeheten kritische depositiewaarden (KDW's) af te leiden: experimenten waarbij stikstof aan vegetatie en bodem wordt toegevoegd, studies waarbij habitats met verschillende stikstofbelasting met elkaar worden vergeleken en modelberekeningen. Elke benadering heeft zijn eigen voor- en nadelen. Daarom worden de methoden veelal gecombineerd om tot een goede inschatting te komen.

Stikstofexperimenten

Een van de belangrijkste bronnen voor het vaststellen van kritische depositiewaarden zijn de resultaten van langdurige experimenten waarbij vegetatie en bodem worden belast met verschillende hoeveelheden en vormen van stikstof. Het grote voordeel van deze benadering is dat de effecten uitsluitend aan stikstoftoediening kunnen worden toegeschreven. De experimenten worden bij voorkeur gedaan in gebieden met lage stikstofdepositie, omdat hoge achtergrondwaarden de uitkomsten kunnen beïnvloeden. Om effecten van achtergronddepositie te vermijden worden ook wel laboratoriumexperimenten uitgevoerd met realistische stikstofdeposities. De omstandigheden in het laboratorium komen echter minder goed overeen met die in het veld en vaak zijn die experimenten te kortdurend. Een belangrijke voorwaarde is dat het experiment langdurig wordt uitgevoerd (minimaal drie jaar en liefst vijf tot tien jaar), omdat effecten vaak pas optreden bij langdurige blootstelling, door accumulatie van stikstof in het systeem. Door dat het toevoegen van stikstof met intervallen plaatsvindt (bijvoorbeeld tien, twintig of veertig kilo stikstof per hectare per jaar) zijn de af-

geleide kritische depositiewaarden altijd gegeven in de vorm van een bandbreedte, zoals tien tot twintig kilo stikstof per hectare per jaar.

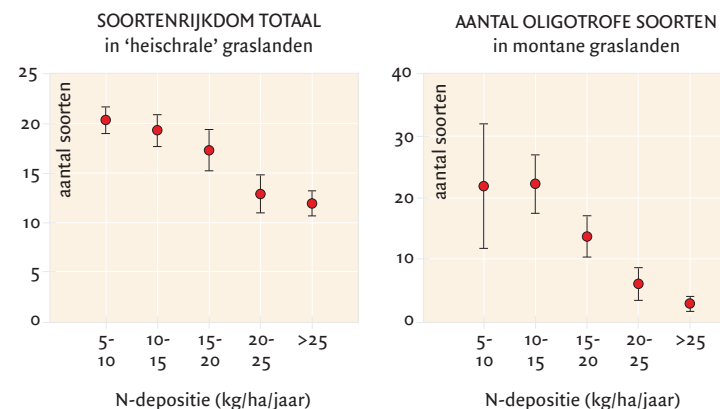
Stikstofgradiëntstudies

Een inschatting van kritische depositiewaarden is ook mogelijk met behulp van gradiëntstudies, waarin gebieden met eenzelfde habitattypen maar een verschillende stikstofdepositie met elkaar worden vergeleken, in de ruimte (figuur 23) of in de tijd. Daarbij wordt een indicator voor kwaliteit, bijvoorbeeld het aantal voorkomende plantensoorten, afgezet tegen een gradiënt in stikstofdepositie. Deze vergelijking is voor verschillende habitats uitgevoerd. De kritische depositiewaarde is dan de depositie waarbij de indicator voor die habitat onder een acceptabele waarde komt.

Het voordeel van deze benadering is dat de effecten gekoppeld zijn aan de ter plekke aangetroffen depositie gedurende langere tijd. Het nadeel is echter dat andere factoren ook een rol spelen, zoals verschillen in klimaat en in grondwaterstand. Bij de interpretatie van die studies wordt hier rekening mee gehouden.

Modelberekeningen

Je kunt een kritische depositiewaarde ook bepalen met behulp van een model. Daarbij is de berekende kritische depositiewaarde gebaseerd op grenswaarden voor de beschikbaarheid van stikstof (N) en de zuurgraad (pH). Het model bevat beschrijvingen van relevante bodemprocessen, waarmee de verwachte stikstofbeschikbaarheid en pH bij elk depositieniveau kunnen worden berekend. Grenswaarden voor de stikstofbeschikbaarheid en de zuurgraad voor de vegetatie worden echter veelal empirisch vastgesteld op basis van een combinatie van vegetatiegegevens en bodemmetingen van vegetatietypen in het veld. Nadeel van het model is dat er geen sprake is van directe empirische relaties tussen stikstofdepositie en schade, het voordeel is dat altijd dezelfde indicatoren gebruikt worden (N en pH). Dat maakt het model breed toepasbaar. Ook levert het model een unieke kritische depositiewaarde (bijvoorbeeld 12 kg N per hectare per jaar) en geen bandbreedte (bijvoorbeeld 10-15 kg N per hectare per jaar) zoals in de empirische schattingen uit stikstofexperimenten.



Figuur 23. Voorbeelden van gradiëntstudies in Europese graslanden. Oligotrofe soorten zijn soorten die leven in een voedselarm milieu, waarin dus weinig mineralen aanwezig zijn. (Bron: Bobbink, 2021, in Wamelink et al., 2021)

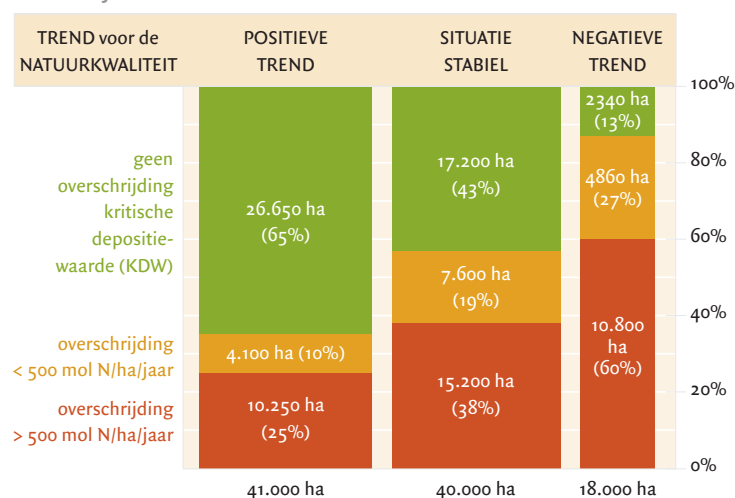
De Nederlandse kritische depositiewaarden

De in Nederland gebruikte kritische depositiewaarden zijn gebaseerd op een combinatie van modelstudies en empirische studies waarin stikstof wordt toegevoegd. In het algemeen blijkt er een goede overeenstemming te zijn tussen de kritische depositiewaarden die uit deze twee types studie voortkomen. Bij de combinatie van beide methoden wordt uitgegaan van de empirische bandbreedtes en gekeken of de gemodelleerde kritische depositiewaarde daarbinnen ligt. Als dat het geval is, wordt de berekende waarde als kritische depositiewaarde genomen. Zo niet, dan wordt de boven- of ondergrens van de empirische bandbreedte genomen. De kritische depositiewaarden voor stikstof variëren veelal tussen de 7 en 25 kg (500-1800 mol) per hectare per jaar. Systemen met een kritische depositiewaarde boven de 34 kg (2400 mol) per hectare per jaar worden als niet-stikstofgevoelig aangemerkt. Ze kunnen veel stikstof verdragen.

Overschrijding van de kritische depositiewaarde als indicator voor natuurkwaliteit

De mate van overschrijding van de kritische depositiewaarde kan fungeren als een indicator voor de staat van de natuur, dan wel voor de

LANDELIJKE TREND INSTANDHOUDING van de NATUURKWALITEIT



Figuur 24. Histogrammen van de overschrijding van de kritische depositiewaarde in stikstofgevoelige habitattypen die de afgelopen zes jaar een landelijke positieve, stabiele of negatieve trend hebben vertoond. De percentages zijn berekend over het totale areaal van de gebieden met een bekende positieve, stabiele of negatieve trend. Ongeveer de helft van het areaal stikstofgevoelige natuur in Natura 2000-gebieden is weergegeven; voor de overige natuur is de trend onbekend. (Bron data: PBL)

trend die de natuurkwaliteit vertoont. Die indicator heeft echter beperkingen, omdat zowel de huidige depositie als de kritische depositie lokaal vrij grote onzekerheden vertonen (tot wel 50 procent). Verder hangt de natuurkwaliteit af van veel meer factoren dan stikstof alleen, zoals de waterbeschikbaarheid en de mate waarin herstelmaatregelen worden uitgevoerd (zie 3.5). Recent heeft het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) aangetoond dat er een relatie is tussen de mate van overschrijding van de kritische depositiewaarden en het risico op verslechtering van de natuurkwaliteit (figuur 24).

Figuur 24 laat zien dat de stikstofgevoelige habitats met een positieve trend doorgaans slechts weinig stikstofdepositie ontvangen: op zo'n 60 procent van het areaal wordt de kritische depositiewaarde niet

overschreden. Er is echter ook stikstofgevoelige natuur met een positieve trend bij een hoge stikstofdepositie, wat kan komen door onzekerheden in de berekende overschrijding en door natuurherstelmaatregelen die in deze gebieden zijn getroffen. Bij de stikstofgevoelige natuur met een negatieve trend is in 90 procent van het areaal een, veelal zeer forse, overschrijding te zien.

Natuurschade en natuurherstel

Kritische depositiewaarden geven geen informatie over de mate waarin een effect optreedt. Die informatie komt echter wel uit de stikstoftoevoeging- en stikstofgradiëntstudies. Om te kunnen bepalen of herstel optreedt bij een reductie van de stikstofdepositie, ook al is die nog boven de kritische depositiewaarde, zijn studies nodig waarin dezelfde habitattypen in hetzelfde gebied over langere tijd met elkaar worden vergeleken.

Een dergelijke studie is uitgevoerd in het oudste graslandexperiment van Nederland, de Ossekampen bij Wageningen. Daar zijn sinds 1958 productie, soortensamenstelling en bodemeigenschappen in een aantal proefvelden gemeten. Uit de resultaten bleek dat de soortendiversiteit met 40 tot 50 procent daalde van 1958 tot 1987. De stikstofdepositie verdriedubbelde grofweg in die tijd, van zo'n 15 naar 45 kg per hectare per jaar (van 1100 naar 3200 mol). Toen de stikstofdepositie tussen 1987 en 2005 daalde tot ongeveer 25 kg per hectare per jaar, herstelde de soortenrijkdom zich gedeeltelijk. Na 2005 stagneerde het herstel weer. Dat komt overeen met de vrijwel gelijkblijvende stikstofdepositie in de afgelopen jaren.

Bij de Ossekampen wordt het grasland jaarlijks gemaaid, waardoor een flinke hoeveelheid stikstof kan worden verwijderd. Daardoor is dit gebied minder representatief voor niet-beheerde habitats. In het algemeen is de stikstofkringloop (zie 2.2) van die graslanden, met uitzondering van de afvoer door maaien, sterk gesloten: er zijn nauwelijks verliezen van stikstof naar lucht en water. Daarom zal de in het systeem opgenomen stikstof niet vanzelf verdwijnen. Bij verlaging van de stikstofdepositie zullen de negatieve effecten nog lang zichtbaar zijn. Terwijl de depositie op de droge bossen in het zuidwesten van de Veluwe in de periode 1990-2005 daalde, nam de voedselkwaliteit

teit voor plantenetende insecten niet toe maar af. Dat resulteerde weer in een afname van de wielewaal – een vogel die veel insecten eet – en van een roofdier als de sperwer, die weer leeft van vogels. Verder zien we dat de natuurkwaliteit nog altijd afneemt, terwijl de stikstofdepositie de afgelopen tien jaar nagenoeg gelijk is gebleven. Dat is duidelijk waar te nemen in oude eikenbossen. Die sterven op grote schaal af. Ook op de droge heide en heischrale graslanden gaan flora en fauna nog steeds achteruit.

2.8 Stikstof in de zoete binnenwateren: winnaars en verliezers

– Emiel Brouwer

Nederlandse binnenwateren, zoals rivieren, beken, sloten, moerassen, vennen en duinplassen, zijn bijna allemaal te voedselrijk. Ze vormen doorgaans het bezinkputje van de stikstofaanvoer uit bodem, water en lucht. Dat heeft ingrijpende gevolgen voor hun ecosystemen.

Sloten

Laten we beginnen met een gemiddelde boerensloot. Die is altijd al aan de voedselrijke kant geweest. In een gezonde sloot wortelen de waterplanten in de bodem, waar ze hun fosfaat en stikstof uit halen. Ze maken zich breed in de waterlaag om licht in te vangen en koolstof op te nemen. Op veel plekken stroomt echter fosfaat- en stikstofrijk water af van het bemeste boerenland. Naarmate de bemesting langer duurt en zwaarder is, spoelt er steeds meer uit, een proces dat tussen 1950 en 1980 in een stroomversnelling is geraakt. Door fosfaat gaan waterplanten harder groeien, hetgeen wordt afgeremd door periodieke stikstoftekorten. Die tekorten ontstaan wanneer een deel van de stikstof door bacteriële omzettingen wordt afgevoerd naar de lucht. Maar als stikstof ook nog eens met het afstromend water van het boerenland meekomt, groeien de planten constant. Ze concurreren dan alleen nog om licht. Kroossoorten winnen die strijd en gaan dus domineren. Op plekken waar de wind wakken in het kroos blaast, ontstaat er een algensoep. De grootste winnaar is de waterplant grote kroosvaren (*Azolla filiculoides*), die Nederland sinds de negentiende eeuw heeft

veroverd. Die drijft op het water, maar voorziet – samenwerkend met bacteriën – in zijn eigen stikstofbehoefte. Sloten kunnen helemaal rood kleuren door dit fraaie plantje, maar de diversiteit aan andere plantensoorten neemt wel sterk af. Bovendien kan de bloei van kroos en kroosvaren het water eronder beroven van zuurstof, waardoor de vissen sterven.

Laagveenplassen en moerassen

Ook wateren die door grondwater gevoed worden, zoals laagveenplassen, moerassen en geïsoleerde oude rivierarmen, worden door fosfaat en stikstof bedreigd. Het teveel aan stikstof uit de landbouw spoelt in de vorm van nitraat uit naar de ondergrond en komt via het grondwater in deze oppervlaktewateren terecht. Bovendien belandt de grote depositie van ammoniak en stikstofoxiden vanuit de lucht deels op de veengronden en leidt tot een overschot aan stikstof in natuurgebieden, dat vervolgens deels uitspoelt als nitraat.

Normaal lost er in de ondergrond ijzer op in het grondwater. Dat ijzer stroomt mee en bindt in het oppervlaktewater het fosfaat. Mede daardoor bevatten door grondwater gevoede ecosystemen zoveel soorten: snelgroeïende planten krijgen er weinig kans. Maar het nitraat in het grondwater verandert het evenwicht. Het verhindert dat ijzer oplost uit de ondergrond, waardoor het ijzer ook het fosfaat niet meer kan binden. Dat komt dan beschikbaar voor snelgroeïende waterplanten en daardoor verliezen deze ecosystemen in rap tempo plantensoorten. Rond landbouwgebieden is dat effect nog sterker dan rond bossen.

Op veel plekken is het nog complexer. Daar komt nitraat in de ondergrond zwavelhoudende lagen tegen en wordt zwavelzuur gevormd, bestaande uit sulfaat- en waterstofionen. Net als nitraat bindt ook sulfaat aan ijzer, waardoor de ijzertekorten verder oplopen. In moerassen leidt de aanvoer van sulfaat en nitraat tot het stilvallen van de methaanproductie; wellicht een voordeeltje in de strijd tegen klimaatverandering maar funest voor onze soortenrijke trilvenen, die alleen blijven drijven als er voldoende methaanbelletjes zijn. In plaats van het geurloze methaan ontstaat nu waterstofsulfide, een stof die voor plant, dier en mens zwaar giftig is en naar rottende eieren stinkt.



De laatste groeiplaatsen van de waterlobelia (*Lobelia dortmanna*) worden zeer zorgvuldig beheerd. (© Shutterstock)

Zwak zure vennen en kalkarme duinplassen

Zwak zure vennen en kalkarme duinplassen – vooral in West-Europa aanwezig en dan met name in Nederland – hebben eveneens een probleem met het teveel aan stikstof. Van nature zijn het voedselarme wateren die zeer gevoelig zijn voor zowel vermessing als verzuring. In vennen kwamen van oorsprong vele honderden soorten sier- en kiezelwieren voor, microscopisch kleine algen met vaak mooie vormen die ook wel desmidiaceeën en diatomeeën worden genoemd. Daarvan zijn nu vooral nog de snelgroeiende, stikstofminnende soorten over. Hetzelfde zien we bij zeer gevoelige waterplanten zoals biesvarens (*Isoetes*) en waterlobelia (*Lobelia dortmanna*). Hun laatste groeiplaatsen worden zeer zorgvuldig beheerd door de recreatie te beperken, de grondwatertoevoer te herstellen, voedselrijk slib te verwijderen en de ruige oevervegetatie weg te halen. Daarnaast wordt watercrassula (*Crassula helmsii*), een waterplant uit Australië die profiteert van klimaatopwarming en stikstofdepositie, geëlimineerd. Ook wordt de ganzenpopulatie, die stikstof en fosfor van de landbouw naar het ven brengt, in toom gehouden. Dan nog worden biesvaren en waterlobelia als gevolg van stikstofdepositie verdrongen door oeverkruid (*Littorella uniflora*), een net iets minder zeldzame soort die zelf ook wordt

bedreigd. Voor fijnproevers als waterlobelia en biesvaren is bij de huidige stikstoflast eigenlijk geen plek meer in onze wateren. Als de stikstofdepositie zo hoog blijft, verdwijnen ook zij van het Nederlandse toneel, net als veel van de prachtige sierwieren.

2.9 Fytoplankton: van stikstof naar gifstof

– Dedmer van de Waal

Net als planten zet fytoplankton, waaronder algen en cyanobacteriën, stoffen als koolstofdioxide, fosfaat en stikstof met behulp van zonlicht om in belangrijke voedingsstoffen: koolhydraten, vetten en eiwitten. Dat maakt fytoplankton tot een belangrijke voedingsbron voor allerlei diertjes in het water. Denk aan watervlooien en roeipootkreeftjes, die worden gegeten door vissen, die op hun beurt weer prooi zijn voor hogere roofdieren zoals zeehonden, roofvogels en niet te vergeten de mens.

Fytoplankton staat aan de basis van de voedselpiramide in zoet en zout water. En dat niet alleen: het produceert net als planten zuurstof. Fytoplankton is zelfs goed voor de helft van alle zuurstof die op aarde wordt geproduceerd. Fytoplankton kan echter ook gevaarlijk zijn, denk aan het schuim dat medeverantwoordelijk was voor het verongelukken van surfers in Scheveningen in 2020, of aan giftige blauwalgen in zoetwatermeren. Hoe meer stikstof, des te meer fytoplankton en dus des te groter het risico.

Stikstof is de beperkende factor

Fytoplankton groeit erg goed op veel fosfaat en stikstof. Beide stoffen komen in het water terecht doordat bijvoorbeeld meststoffen van landbouwgrond afspoelen of via rioolwaterzuiveringsinstallaties. Daarnaast slaat stikstof uit de lucht neer, als stikstofoxiden en ammoniak. Hoe hard fytoplankton groeit, hangt daarnaast af van de aanwezigheid van andere voedingsstoffen. Maar stikstof is vaak de beperkende factor, dus fytoplankton zal beter gaan groeien als er stikstof wordt toegevoegd. In het voorjaar en de zomer verbruikt fytoplankton voor zijn groei veel voedingsstoffen, waaronder stikstof. Daardoor kan 's zomers de stikstofconcentratie in het water dalen, helemaal als er

ook nog veel stikstof uit het water vervluchtigt doordat bacteriën nitraat omzetten in stikstofgas.

Maar als er veel stikstof in het water terecht komt, is die voedingsstof niet langer beperkend en zorgt hij voor vermessing of eutrofiëring en daarmee voor algenbloei. Er ontstaat dan een grote dichtheid van fytoplankton in het water. Deze bloei heeft allerlei effecten op de ecologie in zoet, brak en zout water (zie 2.8). Met meer fytoplankton wordt het water bijvoorbeeld heel troebel, waardoor minder licht beschikbaar is voor onderwaterplanten. Die kunnen daardoor niet meer goed groeien. Daarnaast zakt het fytoplankton naar de bodem, wat zuurstof kost, want dode algen worden afgebroken door bodembacteriën die zuurstof verbruiken. Op die manier neemt de hoeveelheid zuurstof in het water sterk af en kunnen bodemdieren en vissen er niet meer goed leven. Daarnaast zorgt zuurstofgebrek in de bodem voor het vrijkomen van fosfaten, wat de algenbloei weer versterkt. Vissterfte als gevolg van zuurstofgebrek in het water, ook wel hypoxie genoemd, komt in kustwateren waar rivieren uitstromen steeds vaker voor. In de jaren zestig waren van de vijftienhonderd stroomgebieden er negen ge-eutrofeerd, momenteel zijn dat er meer dan vijfhonderd. Klimaatverandering versterkt de hypoxie nog eens extra.

Schuim door fytoplankton

Het overlijden van vijf surfers voor de kust van Scheveningen in 2020 is mogelijk mede veroorzaakt door algenbloei, in combinatie met wind en golfslag. De schuimalgen of bruine slijmalgen (*Phaeocystis globosa*) komen ieder voorjaar in grote hoeveelheden voor in de Nederlandse kustwateren. Meststoffen die worden aangevoerd vanuit de rivieren versterken hun groei. De schuimalgen nemen daaruit stikstof op en zetten die om in eiwitten en verdere groei. Als ze massaal afsterven, komen de eiwitten vrij in het water en kloppen de golven de eiwitten op tot schuim – dit keer mogelijk met een voorheen ongekend tragisch gevolg.

Gifstoffen

Fytoplankton kan niet alleen troebel water, zuurstofloosheid of schuim veroorzaken, het kan ook stoffen maken die giftig zijn voor

mens en dier. In zoetwatermeren zijn dit cyanobacteriën (blauwalgen), in de zoute kustwateren zijn dat vaak dinoflagellaten. Elk individu bevat slechts een beetje gifstof, maar met veel giftig fytoplankton in het water is de kans op gevaarlijke hoeveelheden gifstoffen groot. Daarbij kunnen cyanobacteriën drijven, waardoor ze een dun gevaarlijk laagje op het water veroorzaken, terwijl dinoflagellaten worden gegeten door schelpdieren die daardoor op hun beurt eveneens giftig worden. De gifstoffen van dit fytoplankton bestaan deels ook nog eens uit stikstof. Veel stikstof in het water zorgt dus niet alleen voor meer fytoplankton, maar mogelijk ook voor meer gifstoffen. Dat is slecht nieuws voor ons, omdat het juist gebeurt wanneer we graag zwemen: 's zomers.

2.10 Hoe gezonde wateren stikstof verwijderen

– Sven Teurlincx & Annelies Veraart

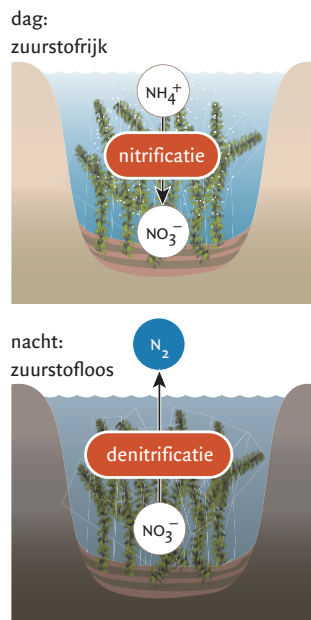
Nederland telt maar liefst driehonderdduizend kilometer aan sloten, veelal in agrarisch gebied. Die sloten kunnen stikstof uit het water verwijderen, mits ze op de juiste manier worden beheerd.

Hoewel hun kwaliteit de afgelopen decennia sterk is verbeterd, zien onze wateren er nog lang niet uit zoals op de oude schoolplaten van Koekkoek. Vijvers, sloten, plassen en meren zijn vaak bedekt met een dikke laag kroos of zien groen van de algen: een aquatisch milieu waarin veel waterplanten, insecten, amfibieën en vissen niet goed gedijen. De oorzaak is een overmaat aan reactieve stikstof zoals nitraat, nitriet of ammonium, samen met een teveel aan fosfaat.

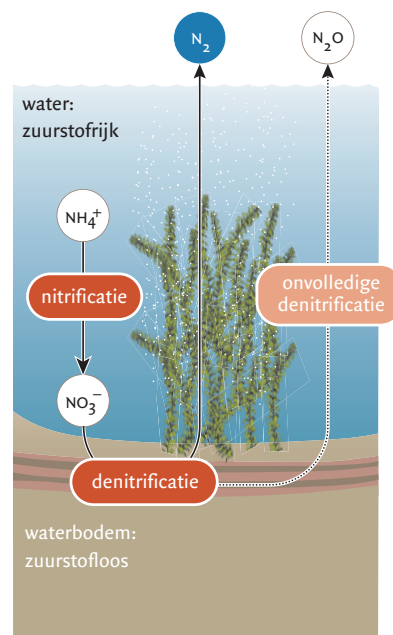
Nitrificatie en denitrificatie

Gelukkig kunnen twee ecologische processen in waterbodems en op waterplanten deze reactieve stikstof weer uit het water verwijderen. Daarbij spelen micro-organismen de hoofdrol, met zuurstof als belangrijkste regisseur. De al eerder besproken processen nitrificatie en denitrificatie (zie 2.2) zorgen voor variatie in concentraties aan ammonium (NH_4) en nitraat (NO_3^-) in het water (figuur 25).

VARIATIE IN TIJD: DAG & NACHT



VARIATIE IN RUIMTE: WATER & BODEM



Figuur 25. Nitrificatie en denitrificatie zorgen voor variaties van de concentraties ammonium (NH_4^+) en nitraat (NO_3^-) in water. (Naar Sven Teurlincx)

Denitrificatie verwijdert driekwart van de stikstof

Denitrificatie neemt maar liefst driekwart van de stikstofverwijdering uit de Nederlandse wateren voor zijn rekening. Maar het proces heeft een nadeel. Als het denitrificatieproces vroegtijdig stopt, produceert het vooral lachgas (N_2O), een broeikasgas dat per molecuul driehonderd keer zo sterk is als CO_2 . Er is dan weliswaar sprake van stikstofverwijdering en dus verbetering van het aquatische ecosysteem, maar het broeikaseffect wordt ermee versterkt.

Van oudsher worden waterplanten uit sloten regelmatig verwijderd om de waterdoorstroming te garanderen: het zogeheten schonen van de sloot. Daarbij wordt ook stikstof verwijderd die door de planten is

opgenomen uit water en bodem. Het staat echter in geen verhouding tot stikstofverwijdering door nitrificatie en denitrificatie. Juist wanneer er waterplanten leven, zijn nitrificatie en denitrificatie optimaal aan elkaar geschakeld, doordat planten en hun wortels een veelheid aan zuurstofrijke en zuurstofarme habitats creëren.

Belemmering van de stikstofverwijdering

Als er veel ammonium of nitraat in het water terecht komt, belemmert dat de stikstofverwijdering, zo blijkt uit onderzoek. Niet alleen stopt dan de omzetting van ammonium naar nitraat, waardoor er meer reactieve stikstof in het water blijft. Ook de omzetting van nitraat naar stikstofgas is onvolledig, waardoor er meer lachgas ontstaat. Voor bescherming en herstel van onze wateren zijn dus twee zaken van belang: voorkómen van stikstofaanvoer naar watersystemen én optimalisatie van natuurlijke stikstofverwijdering.

Om de stikstofaanvoer naar water te verminderen moeten de stikstofbronnen worden aangepakt. Die noodzaak is inmiddels duidelijk. Maar zelfs als dat op korte termijn gebeurt, is het effect op de waterkwaliteit niet direct zichtbaar. Op de bodems van de sloten, plassen en meren bevindt zich namelijk nog de erfenis van de jarenlange overmatige stikstofaanvoer. Naast de aanpak van de bron is het dus zaak om ook te sturen op een maximaal stikstofverwijderend watersysteem in Nederland.

Gladde oevers

Voor het maximaal omzetten van reactieve stikstof naar onschuldig stikstofgas (N_2) moet dus zowel nitrificatie als volledige denitrificatie plaatsvinden. In de sloten die we kennen uit de schoolplaten van Koekkoek was dat geen probleem. Door de flauwe oevers en diverse plantengemeenschappen ontstonden er vanzelf zuurstofarme en zuurstofloze habitats. Veel sloten zijn nu een stuk minder divers: er groeien minder wortelende planten en juist meer kroos en flab (grote slierten algen) doordat waterbeheerders de oevers glad schrapen en planten één à twee keer per jaar volledig verwijderen. In zuurstofarme, met kroos bedekte sloten kan weliswaar denitrificatie plaatsvinden, maar de nitrificatie wordt geremd waardoor ammonium zich in de

sloot kan ophopen. Ook in lege, schoongemaakte sloten is de stikstofverwijdering niet optimaal. Door de afwezigheid van planten en de aanwezigheid van dikke krooslagen is er overdag minder zuurstof in het water en daardoor nauwelijks nitrificatie.

Verhoging van de biodiversiteit

Gelukkig wordt ook in sloten ecologisch waterbeheer steeds meer de norm. Waterbeheerders streven ernaar om de biodiversiteit in de sloot en op de oever te verhogen. Dat doen ze door natuurvriendelijke oftewel geleidelijk aflopende oevers te creëren, natuurlijker te maaien – niet gelijk twee kanten maaien, stroken sparen, niet maaien in voorjaar en zomer – en een diversiteit aan habitats te creëren door bijvoorbeeld diepe en ondiepe zones in de sloot aan te brengen. Ecologisch beheer zal niet alleen de biodiversiteit ten goede komen, maar ook het zelfreinigend vermogen van sloten versterken door nitrificatie en denitrificatie optimaal aan elkaar te koppelen.

Geleidelijk aflopende oevers zorgen voor variatie in soortensamenstelling van waterplanten en zuurstoftoevoer naar de bodem. Door juist ook diepe delen in de sloot aan te brengen zal zuurstofloosheid optreden bij de bodem (zeker 's nachts, als planten geen zuurstof aanmaken). Deze diversiteit aan milieuomstandigheden in de sloot zorgt voor grensvlakken tussen zuurstofarme en zuurstofrijke delen, die hotspots van stikstofomzetting zullen vormen.

Waterbeheer gericht op verbeterde ecologische kwaliteit en biodiversiteit zal, met aandacht voor de microbiële stikstofomzettingen, dus ook de natuurlijke stikstofverwijdering ten goede komen, mits tegelijkertijd de stikstofaanvoer naar sloten wordt beperkt.

2.11 Minder stikstof, wel zo gezond

– Onno van Schayck

Stikstofoxiden en ammoniak schaden niet alleen natuurgebieden, maar ook onze gezondheid. Zo is alleen al in Nederland het astma van achtduizend kinderen aan dit type vervuiling toe te schrijven.

In 2019 verscheen in het vooraanstaande medisch-wetenschappelijke tijdschrift *The Lancet* de meest uitgebreide studie tot nu toe over de effecten van stikstofoxiden op astma bij kinderen. Wereldwijd hebben vier miljoen kinderen astma, zo schrijven de wetenschappers op basis van onderzoek in 194 landen. En dat komt hoogstwaarschijnlijk doordat ze blootgesteld worden aan stikstofoxiden. Vrijwel nergens in Europa is de concentratie stikstofdioxide (NO_2) in de lucht zo hoog als bij ons. Dat verklaart vermoedelijk het astma van meer dan achtduizend Nederlandse kinderen. Ze lijden dus levenslang aan een ziekte die hun dagelijks functioneren sterk belemmert.

Naast stikstofoxiden kan ook ammoniak de luchtwegen schaden. In gasvorm irriteert het de luchtwegen, evenals de ogen. In kristalvorm – als bestanddeel van fijnstof, samen met zwavel en nitraat – verhoogt het de kans op astma en chronische bronchitis. In hoge concentraties draagt stikstofdioxide ook nog bij aan de vorming van ozon (O_3), opnieuw met luchtwegschade tot gevolg.

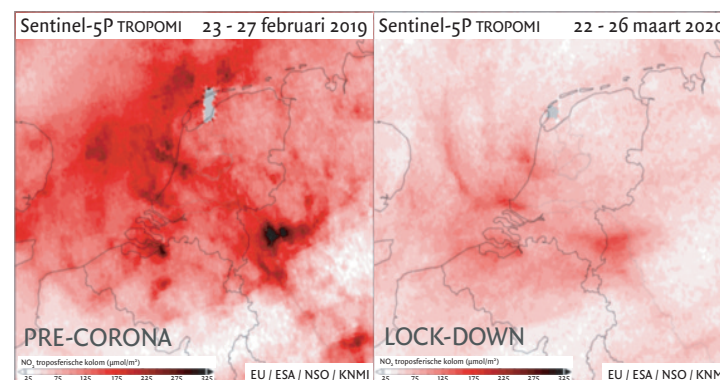
Relatie tussen luchtverontreiniging en gezondheid

Stikstofdioxide en fijnstof leiden bij kinderen niet alleen tot astma. Ook 8 procent van de post-neonatale sterfte (tussen de leeftijd van één en twaalf maanden) is gerelateerd aan deze blootstelling (zie tabel 1). Bij volwassenen zien we dat luchtwegaandoeningen, longkanker en hart- en vaatziekten gerelateerd zijn aan blootstelling aan stikstofdioxide en fijnstof.

Deze relatie tussen luchtverontreiniging en diverse gezondheidseffecten wordt volgens het RIVM ondersteund door epidemiologische en toxicologische studies, waaronder die van de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO). Ook een rapport van de Gezondheidsraad uit 2018 bevestigt deze relatie.

Wanneer de bevolking minder aan stikstofdioxide en fijnstof wordt blootgesteld, verbetert de gezondheid aanmerkelijk, zo blijkt uit verschillende studies. Nadat in de jaren negentig de lucht schoner was geworden, nam de levensverwachting toe en bronchitis af, terwijl de longfunctie van kinderen verbeterde, zo laat Amerikaans onderzoek zien. En Japans onderzoek naar het effect van een maatregel gericht op uitstootvermindering van dieselauto's constateerde een afname in

Gezondheidsindicator	Ziekte last door fijn- stof en NO ₂	Aandeel in de totale ziekte last
Vroegtijdige sterfte bij blootstelling gedurende gehele levensduur		
Levensduurverkorting bij lang- jarige blootstelling	13 maanden per persoon gemiddeld	
Jaarlijkse gezondheidseffecten die daarnaast optreden		
Post-neonatale sterfte (aantal kinderen)	13	8% van de totale postneo- natale sterfte
Bronchitisklachten onder kinderen met luchtwegaandoe- ningen (aantal kinderen)	12.400	15% van kinderen met klachten; 1% van alle kinderen
Aantal nieuwe gevallen van chro- nische bronchitis bij volwassenen	6.900	21% van alle bronchitis patiënten; < 0,1% van alle volwassenen
Aantal vroegtijdige doden door verhoogde dagelijkse niveaus PM ₁₀ , fijnstof en O ₃	2.400	2% van alle jaarlijkse sterfgevallen
Ziekenhuisspoedopnamen voor hart- en vaatklachten	2.600	1% van alle klinische opnamen voor hart- en vaatklachten
Ziekenhuisspoedopnamen voor luchtwegklachten	2.200	2% van alle klinische opnamen voor luchtwegklachten
Werkverzuim (dagen)	4.500.000	6% van het totale verzuim
Aantal dagen met klachten bij kinderen met astma	500.000	6% van het totale aantal astmaklachten onder astmatische kinderen
Dagen met beperkte lichamelijke activiteit (inclusief werkverzuim, ziekenhuisspoedopnames, dagen met klachten)	20.000.000	6% van het totale jaarlijks aantal dagen met beperkte activiteit (ruim 1 dag per jaar per persoon)
Geboortegewicht < 2500 g (aan- tal kinderen)	2.400	21% van alle lage geboorte gewichten (1% van alle geboortes)
Sterfgevallen door longkanker	1.200	11% van alle longkankersterfte



Figuur 26. Satellietbeelden van NO_x-concentraties boven Nederland in februari 2019 (links) en na de corona-uitbraak in maart 2020 (rechts). (Bron: KNMI)

de sterfte aan hart- en vaatziekten, beroertes, longaandoeningen en longkanker. Er zijn dus sterke aanwijzingen dat schonere lucht, met minder stikstofoxiden, een effectief middel is om de volksgezondheid te verbeteren.

De politiek doet er verstandig aan ook die gezondheidsaspecten een duidelijke plaats te geven in het formuleren en verdedigen van het stikstofbeleid. De jaarlijkse kosten van alleen al astma bedragen in Nederland meer dan vierhonderd miljoen euro. Ook die financiële kant zou in de besluit- en beeldvorming moeten meewegen. Bij maatregelen die de stikstofemissies van verkeer, veehouderij en andere vervuilers beteugelen, zijn dus niet alleen natuur en klimaat gebaat, maar ook onze gezondheid. Bovendien besparen we daarmee op de kosten van de zorg. Dat is een krachtige extra reden om het stikstofprobleem voortvarend op te lossen.

Corona

Door de uitbraak van corona in 2020 moesten mensen zoveel mogelijk thuis werken en mochten ze soms zelfs alleen voor de meest urgente zaken naar buiten. Het leidde tot een sterke afname van het wegverkeer. Satellietbeelden lieten veel lagere NO_x-concentraties

< Tabel 1. Omvang van een aantal aan fijnstof (PM_{2,5}) en stikstofdioxide (NO₂) gerelateerde ziektebeelden in Nederland. (Bron: RIVM, 2020)

zien boven Nederland (figuur 26), temeer doordat ook het verkeer in West-Europa sterk was afgenomen en het vliegverkeer en een deel van de industrie stillagen.

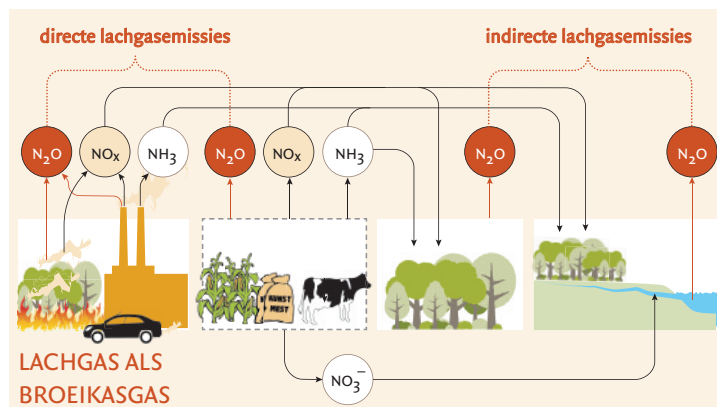
2.12 Stikstofuitstoot beïnvloedt het klimaat

– Wim de Vries

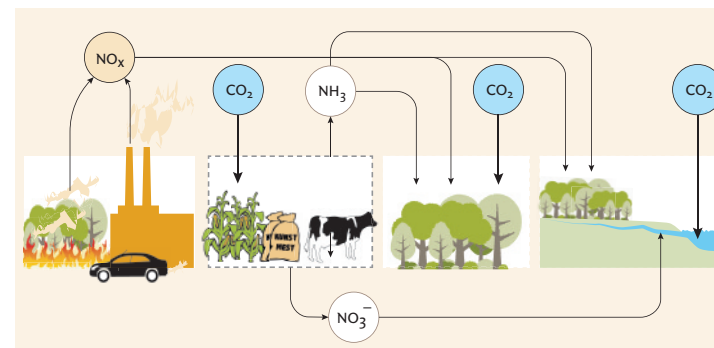
Sinds de jaren vijftig heeft de mens de hoeveelheid reactieve stikstof in bodem, water en lucht snel verhoogd. De emissie van broeikasgassen is daardoor toegenomen. Maar datzelfde geldt voor de opname van CO_2 en de vorming van fijnstof, wat een koelende werking heeft.

Lachgas

De invloed van de mens op de productie van reactieve stikstof heeft gevolgen voor het klimaat. Direct, doordat het leidt tot de productie van lachgas (N_2O), een broeikasgas met per molecuul een ongeveer driehonderd keer sterker effect dan het broeikasgas CO_2 . Maar ook indirect, doordat het leidt tot de vorming van het broeikasgas ozon (O_3) en tot de vorming van fijnstof, dat een koelende werking heeft. De kringlopen van stikstof en koolstof zijn heel nauw met elkaar verbonden.

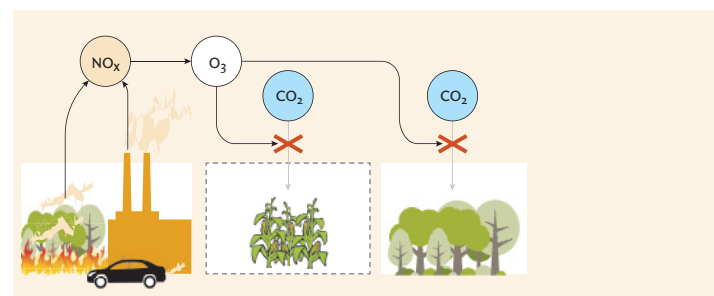


Figuur 27. Oorzaken van directe en indirecte lachgasemissies. (Bron: Wim de Vries, WUR)



Figuur 28. Oorzaken van CO_2 -vastlegging door stikstofgebruik in de landbouw (direct effect) en de uitstoot van NH_3 , NO_x en NO_3^- naar lucht en water (indirect effect). Verhoogde koolstofvastlegging door stikstofuitstoot compenseert op wereldschaal circa 75 procent van de lachgasemissies. (Bron: Wim de Vries, WUR)

Om de groei van gewassen te bevorderen, gebruiken boeren reactieve stikstof. Ze bemesten akkers met kunstmest of dierlijke mest, of telen gewassen die stikstof binden uit de lucht (zie 2.2). Bodemprocessen zetten een deel van deze stikstof vroeg of laat gedeeltelijk om in lachgas (figuur 27). De wereldwijde emissies van lachgas worden geschat op 21-27 miljoen ton per jaar. Zeker 75 procent daarvan komt uit de landbouw, de rest uit de industrie, het verkeer en de energiecentrales.



Figuur 29. Oorzaken van verminderde CO_2 -vastlegging in landbouwgronden en bosgronden door NO_x -emissies en de daaraan gerelateerde vorming van ozon (O_3). Verlaagde koolstofvastlegging door ozon als gevolg van NO_x -uitstoot is op wereldschaal vergelijkbaar met circa 15 procent van de lachgasemissies. (Bron: Wim de Vries, WUR)

Vastlegging van CO₂

De stikstofkringloop is zeer nauw verbonden met de koolstofkringloop. Zo leidt bemesting in de landbouw tot veranderingen in de uitstoot of opname van koolstofdioxide in landbouwgronden. Door bemesting neemt de gewasopbrengst toe en daarmee ook de toevoer van gewasresten zoals wortels en stoppels naar de bodem. Circa de helft van de koolstof in die gewasresten komt uit de lucht: de planten leggen het koolstofdioxide met behulp van licht en fotosynthese vast. Dat kan leiden tot een toename van de hoeveelheid koolstof in de bodem. Aan de andere kant kan stikstof in de bodem ook weer de afbraak van koolstof bevorderen door een toename van de bacteriën die organische stof afbreken.

Daarnaast zorgt de stikstofdepositie voor bemesting van bossen en natuurgebieden. De planten, struiken en bomen gaan harder groeien, waardoor er meer koolstofdioxide uit de lucht wordt vastgelegd. Alleen bij hoge stikstofdeposities – meestal boven de 15-25 kg per hectare per jaar – is daar geen sprake meer van. Dit geldt voor de meeste bossen in Nederland. Dan kan de groei stagneren of zelfs afnemen door verzuring. Tenslotte kan de uitspoeling van nitraat naar het water de productie van biomassa in aquatische ecosystemen bevorderen en zo leiden tot koolstofvastlegging in die systemen. Waterplanten en algen zullen harder groeien (figuur 28).

Op wereldschaal is berekend dat met name de extra groei van bossen circa driekwart van de lachgasemissies van de mens compenseert. Daarbij moet wel worden bedacht dat die extra koolstofvastlegging niet voor eeuwig is, maar waarschijnlijk ‘slechts’ een paar decennia duurt, afhankelijk van het bosmanagement en wat er met het hout gebeurt.

Ozon

Uitstoot van stikstofoxiden kan ook leiden tot de vorming van troposferische ozon (O₃). Dat is het op twee na belangrijkste broeikasgas, na koolstofdioxide en methaan. Verhoogde ozonconcentraties zijn boven een bepaalde waarde schadelijk voor mens, dier en plant. Ze verstoren hun functioneren. Daardoor kunnen bomen en land-

bougewassen weer minder goed groeien en dus minder koolstof vastleggen (figuur 29).

Methaan en fijnstof

Stikstof heeft ook effect op de opname en afbraak van het broeikasgas methaan (CH₄) in de bodem. Hoe meer stikstof, des te kleiner de opname en des te groter de hoeveelheid van dit gas in de lucht. Maar die toename is te verwaarlozen als je het vergelijkt met de toename van lachgas door stikstof. En dan heb je nog het afkoelende effect van ammoniak en stikstofoxiden wanneer die fijnstof vormen. Dit fijnstof weerkaatst het zonlicht en zorgt voor meer wolkenvorming. Daardoor koelt de aarde een klein beetje af; er komt immers minder zonlicht op de aarde. Fijnstof heeft echter maar een korte levensduur. De effecten zijn dus niet van belang op de lange termijn.

Wat is het totale effect van reactieve stikstof?

Alles bij elkaar – directe en indirecte effecten, inclusief de compenserende werkingen – bedraagt het effect van reactieve stikstof op de totale emissie van broeikasgassen zo’n 10 procent. Dat komt vooral door de uitstoot van lachgas en de vorming van ozon door de uitstoot van stikstofoxiden. Netto heeft stikstof nog wel een koelende werking als gevolg van fijnstof, maar dat effect is kortdurend.

Stikstofweetjes

Algemene weetjes

‘S TIKSTOF’ KOMT VAN AZOTE, EEN FRANS WOORD OP GRIEKSE BASIS, DAT ‘ZONDER LEVEN’ BETEKENT. DE SCHOTSE WETENSCHAPPER DANIEL RUTHERFORD WORDT GEZIEN ALS DE ONTDEKKER ERVAN. HIJ TOONDE IN 1772 AAN DAT MUIZEN IN EEN STOLP ZONDER ZUURSTOF EN KOOLSTOFDIOXIDE STIERVEN.

S TIKSTOF MAAKT 95 PROCENT UIT VAN DE DAMPKRING OP TITAN, DE GROOTSTE MAAN VAN SATURNUS, EN MAAR 2,6 PROCENT VAN DE MARS-ATMOSFEER. ONZE EIGEN DAMPKRING BESTAAT VOOR 78 PROCENT UIT STIKSTOFGAS (N_2). DAT ADEMEN WE IN EN UIT ZONDER DAT ONS LICHAAM ER IETS MEE DOET. HET RICHT OOK GEEN SCHADE AAN.

S TIKSTOFGAS SPEELT EEN ROL BIJ DE VORMING VAN HET NOORDERLICHT, EEN NATUURLIJKE LICHTSHOW AAN DE HEMEL DIE VOORAL KAN WORDEN WAARGENOMEN IN HET NOORD- EN ZUIDPOOLGEBIED. NOORDERLICHT ONTSTAAT WANNEER SNEL BEWEGENDE ELEKTRONEN UIT DE RUIMTE BOTSSEN MET ZUURSTOF EN STIKSTOF IN DE ATMOSFEER.

O NS LICHAAM BESTAAT, AFGEZIEN VAN WATER, VOOR 48 PROCENT UIT KOOLSTOF, VOOR 30 PROCENT UIT ZUURSTOF EN VOOR 8 PROCENT UIT STIKSTOF. STIKSTOF ZIT MET NAME IN EIWITTEN, ENZYMEN EN DNA, DIE ESSENTIEEL ZIJN VOOR HET LEVEN EN VOOR HET FUNCTIONEREN VAN BIOLOGISCHE SYSTEMEN.

Weetjes over het gebruik van stikstof

V LOEIBARE STIKSTOF WORDT VAAK GEBRUIKT ALS KOELMIDDEL, BIJVOORBEELD OM SPERMA EN EICELLEN OP TE SLAAN. OOK KUN JE ER HUIDAANDOENINGEN MEE BEHANDELEN.

V LOEIBARE STIKSTOF WORDT OOK GEBRUIKT OM LEVENSMIDDELEN SNEL IN TE VRIEZEN EN ZO HUN SMAAK, TEXTUUR, VOCHTIGHEID EN AROMA TE BEHOUDEN.

L ACHGAS (N_2O) IS EEN ZOET, KLEURLOOS GAS WAARMEE MENSEN ONDER NARCOSE WORDEN GEBRACHT. HET IS OOK EEN POPULAIR GENOTSMIDDEL EN EEN HEEL KRACHTIG BROEIKASGAS, DRIEHONDERD KEER STERKER DAN KOOLSTOFDIOXIDE EN SLECHT AFBREEKBAAR.

A MMONIAK (NH_3) IS EEN STERK RUIKEND GAS DAT WE GEBRUIKEN ALS SCHOONMAAKMIDDEL, ALS KOELMIDDEL IN IJSKASTEN EN BIJ HET MAKEN VAN PLASTICS, MUNITIE EN KUNSTMEST.

A MMONIAKGAS ZIT OOK IN ONZE ADEM EN ONS ZWEET.

S TIKSTOF KOMT ALS DELFSTOF NAUWELIJKS VOOR. EEN UITZONDERING IS CHILISALPETER OFTEWEL NATRIUMNITRAAT ($NaNO_3$), DAT VOORKOMT IN DE ATACAMAWOESTIJN. TUSSEN 1879 TOT 1884 VOERDEN CHILI, BOLIVIA EN PERU OORLOG OM DEZE SALPETERVELDEN IN BEZIT TE KRIJGEN: DE ZOGEHETEN SALPETEROORLOG. CHILI WON.

S ALMIAK (AMMONIUMCHLORIDE, NH_4Cl) IS EEN WIT KRISTALLIJN POEDER DAT VEEL IN DROP WORDT VERWERKT. DE OUDE EGYPTENAREN MAAKTEN HET DOOR DIERLIJKE UITWERPSELEN, URINE EN ZOUT TE VERHITTEN.

VÓÓR DE UITVINDING VAN KUNSTMEST GEBRUIKTEN BOEREN GUANO OM HUN AKKERS TE BEMESTEN. GUANO BESTAAT UIT DE UITWERPSELEN VAN DIEREN ZOALS VOGELS EN VLEERMUIZEN. DE UITWERPSELEN KUNNEN DIKKE LAGEN VORMEN VAN HONDERDEN TOT DUIZENDEN JAREN OUD. GUANO WAS VOORAL TE VINDEN BIJ DE KUST VAN PERU EN CHILI, EN ROND EILANDEN IN DE GROTE OCEAAN.

IN 1908 SLAAGDE DE DUITSE WETENSCHAPPER FRITZ HABER ERIN OM AMMONIAK UIT STIKSTOFGAS TE PRODUCEREN IN EEN LABORATORIUM. VIER JAAR LATER HAD HET DUITSE CHEMIEBEDRIJF BASF, ONDER LEIDING VAN CARL BOSCH, HET PROCES ZODANIG VERBETERD DAT AMMONIAK OP GROTE SCHAAL GEPRODUCEERD KON WORDEN.

DE DUITSERS PASTEN HET HABER-BOSCH-PROCES TIJDENS DE EERSTE WERELDOORLOG VOORAL TOE VOOR DE FABRICAGE VAN EXPLOSIEVEN. NA DE TWEEDE WERELDOORLOG WERD HET PROCES GEBRUIKT VOOR DE PRODUCTIE VAN KUNSTMEST.

VAN KUNSTMEST KUN JE OOK EXPLOSIEVEN MAKEN. DE NOORSE EXTREEMRECHTSE TERRORIST ANDERS BREIVIK GEBRUIKTE DIE BIJ ZIJN AANSLAG IN 2012. HIJ DOODDE ACHT MENSEN MET ZIJN EXPLOSIEF EN NOG EENS 69 MET VUURWAPENS.

NITROGLYCERINE, EEN KRACHTIG EXPLOSIEF DAT WORDT GEBRUIKT BIJ DE PRODUCTIE VAN DYNAMIET, IS EEN OLIE-ACHTIGE, KLEURLOZE VLOEISTOF DIE STIKSTOF, ZUURSTOF EN KOOLSTOF BEVAT.

INTERVIEW – Natasja Oerlemans, Wereld Natuur Fonds (WWF-NL)
'We moeten voldoen aan het verslechteringsverbod'



Waarom is stikstof zo'n belangrijk thema voor het WNF?

'Stikstof vormt een groot probleem voor de biodiversiteit en de gezondheid van ecosystemen waarvan we afhankelijk zijn. In 2015 bracht het WNF het eerste Living Planet Report uit over Nederland waarin werd geïdentificeerd dat stikstof een groot probleem is en het huidige beleid onvoldoende. De PAS-uitspraak in 2019 was een wake-upcall. Het bevestigde wat we al wisten: dat de situatie in Nederland onhoudbaar is.'

Hoe komen we tot een oplossing?

'Het belangrijkste is te voldoen aan het verslechteringsverbod in de Europese Vogel- en Habitatrichtlijn. De commissie-Remkes kwam daartoe op een noodzakelijke stikstofreductie van 50 procent in 2030. Recent ecologisch onderzoek stelt die waarde zelfs op 70 procent. Maar dat is het minimale. Dan blijft de vraag hoe je dit vervolgens gaat doen? Wij zien als antwoord een integrale aanpak waarbij je op alle fronten winst boekt: stikstof, klimaat, biodiversiteit, verdroging en bodemgezondheid. Dan blijkt dat een transitie naar een natuurinclusieve kringlooptlandbouw in Nederland een antwoord kan zijn op al deze uitdagingen. Je wilt niet pappen en nathouden, pleisters plakken en miljarden aan gemeenschapsgeld investeren in het instandhouden van het huidige systeem en technische oplossingen. Dat systeem is inherent niet duurzaam.'

Staan de belangen van de landbouw en de natuur hier tegenover elkaar?

'WWF-NL is beslist niet tegen boeren, maar tegen het huidige landbouwsysteem. Dat systeem hebben we met zijn allen veroorzaakt, dus wij vinden het legitiem om miljarden gemeenschapsgeld te steken in de overgang naar een duurzame landbouw. De boeren moet perspectief worden geboden. Naar onze beleving is de landbouw niet gebaat bij een exportgerichte positie. 70 procent

van onze productie wordt geëxporteerd, maar de rommel en dus ook de maatschappelijke kosten houden we hier.’

Hoe staat WNF tegenover het versnellingsakkoord?

‘Het verslechteringsverbod staat geen compromissen meer toe. Het enige dat helpt, zijn maatregelen die bewezen effect hebben. Vanuit dit perspectief hebben we ook gekeken naar het versnellingsakkoord. Daarin is zes miljard gereserveerd voor technische maatregelen en extensivering, terwijl niet eenduidig is vastgesteld dat daarmee ook de stikstofreductie wordt gerealiseerd. Deze maatregelen dragen ook niet bij aan de integrale aanpak en de transitie naar een duurzame kringlooplandbouw. Het is een politiek compromis waarin economische ruimte wordt weggegeven, terwijl de voorgestelde reductie van 40 procent van de stikstofuitstoot onvoldoende is om de natuur te beschermen tegen verdere achteruitgang. De discussie moet niet gaan over het ‘wat’, maar over het ‘hoe’. Het ‘wat’ staat niet meer ter discussie: dat heeft de rechter namelijk bepaald en dat is voldoen aan het verslechteringsverbod.’

Hoe kunnen we wel verder?

‘De overheid moet kiezen, knopen doorhakken, de boeren steunen bij de transitie. Er is politiek leiderschap nodig! Het gaat erom in wat voor land wij in de toekomst willen leven en wat de rol van de landbouw hierin is. We moeten toe naar een duurzamere landbouw. Dat is ingrijpend voor de boeren en daar moeten we als maatschappij bij helpen, zodat zij een beter verdienmodel krijgen. Uiteindelijk moeten we ook naar een andere waardering en beprijzing van ons voedsel en andere diensten die de landbouw levert.’

Merle Scholten & Jelle Reumer

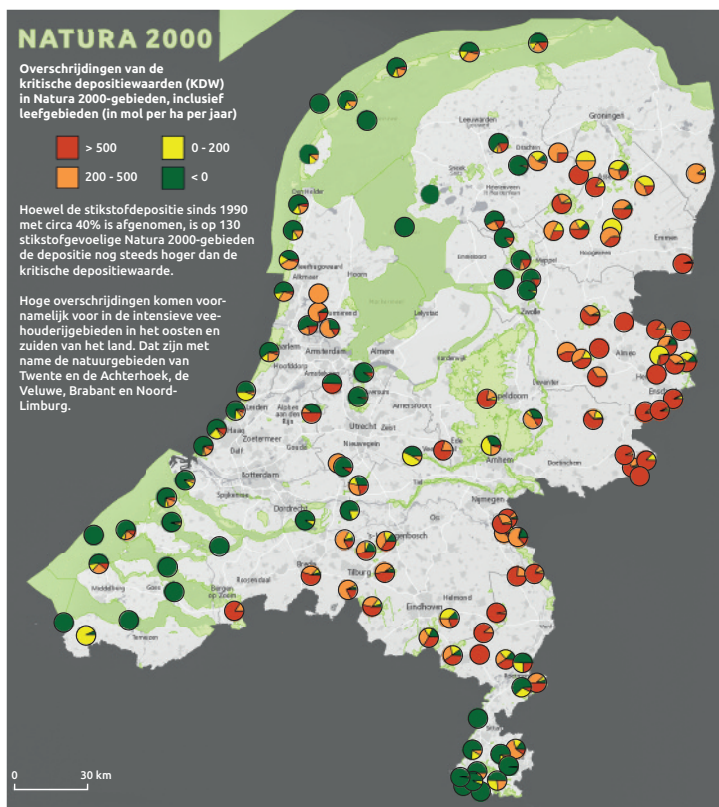
3. Stikstofaanpak

3.1 Stevige reductie stikstofemissie noodzakelijk

– Wim de Vries & Jan Willem Erisman

Om de beschermde natuurgebieden in Nederland te behouden of te verbeteren is een flinke reductie nodig van de stikstofemissie. Maar hoe fors moet die zijn en waar kan die het beste plaatsvinden?

Het is onduidelijk hoeveel emissiereductie er in ons land nodig is om de Natura 2000-gebieden – natuurgebieden met een Europese beschermde status – te behouden of verbeteren. Welke reductieniveaus zijn noodzakelijk? Dat is afhankelijk van de ‘kritische depositiewaarde’ (KDW, zie 2.7). Die verschilt per habitat en dus per Natura 2000-gebied. Het kabinet wil in 2035 driekwart van de oppervlakte van Natura 2000-gebieden onder de kritische depositiewaarde brengen. Dat komt neer op een binnenlandse emissiereductie van 50 procent ten opzichte van 2018. De commissie-Remkes – die het kabinet adviseerde over de aanpak van de stikstofproblematiek – stelt daarentegen een binnenlandse emissiereductie voor van 50 procent in 2030 en 100 procent natuurbescherming in 2040. De vraag die echter openblijft is: hoeveel binnenlandse en buitenlandse emissiereductie is er nodig bij 100 procent natuurbescherming en hoe snel moet emissiereductie plaatsvinden?



Figuur 30. De absolute overschrijding van kritische depositiewaarden (KDW) in stikstofgevoelige habitats per Natura 2000-gebied. De taartpunten geven het percentage areaal aan dat in de verschillende overschrijdingsklassen valt. (Bron: WUR)

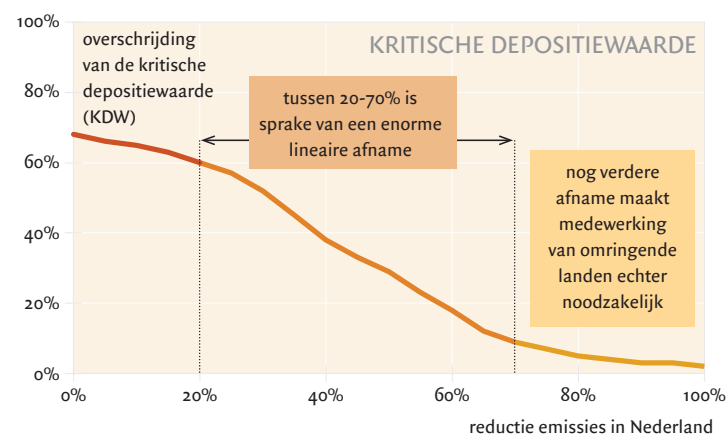
Noodzaak van reducties in stikstofemissies

Hoewel de stikstofdepositie sinds 1990 met circa 40 procent is afgenomen, ligt die in 130 stikstofgevoelige Natura 2000-gebieden nog steeds boven de kritische depositiewaarde (figuur 30). Hoge overschrijdingen komen voornamelijk voor in de gebieden met intensieve veehouderij in het oosten en zuiden van ons land. Dat zijn met name de natuurgebieden van Twente en de Achterhoek, de Veluwe, Brabant en Noord-Limburg. Daar is de huidige depositie soms wel het dubbele

van de kritische depositiewaarde. Om natuurwinst te behalen moet de depositie daar flink omlaag. Vergaande depositiereductie is veel minder noodzakelijk in andere regio's, zoals Groningen, Flevoland, Zuid-Holland en Zeeland.

Vereiste reductie in stikstofemissies

Wanneer de buitenlandse emissies afnemen volgens de EU-emissieplafonds voor 2030, komt al circa 35 procent van het natuurareaal onder de kritische depositiewaarde, zo blijkt uit de modelberekeningen van WUR (Wageningen University Research) en het RIVM. Uit de berekening blijkt verder dat, als bovendien de binnenlandse emissie met een kwart vermindert, de helft van de Natura 2000-gebieden onder de kritische depositiewaarde komt. Bij halvering van de emissie komt driekwart van die natuurgebieden eronder. Bij een binnenlandse stikstofreductie van 100 procent komen echter nog steeds niet alle natuurgebieden onder de kritische depositiewaarde (figuur 31). Deposities door buitenlandse emissies leiden dan nog steeds tot overschrijding van de kritische depositiewaarde in de meest gevoelige Natura 2000-gebieden, en dan is er bij de berekening al van uitgegaan dat het buitenland voldoet aan de emissieplafonds voor 2030.

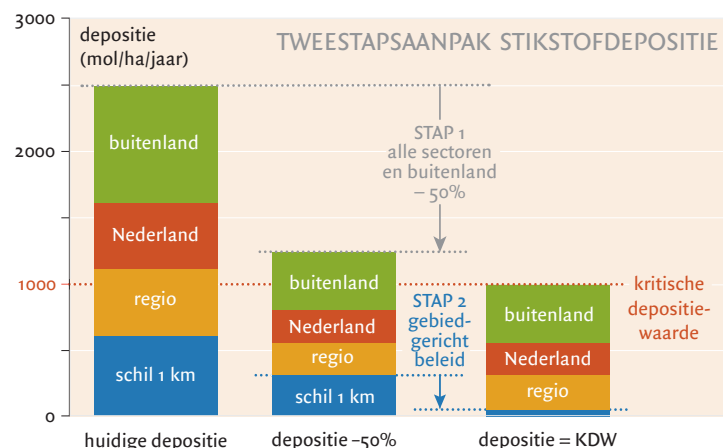


Figuur 31. Het percentage Natura 2000-areaal dat de kritische depositiewaarde overschrijdt bij reductie van stikstofemissies in Nederland. (Bron data: Van den Burg et al., 2021)

De conclusie is dat er ook in het buitenland maatregelen nodig zijn die verder gaan dan wat er is afgesproken voor 2030. Nul procent overschrijding van de kritische depositiewaarde in 2040 is zonder die reducties in het buitenland onhaalbaar.

Wat te doen?

De benodigde emissiereductie zou teruggelegd kunnen worden bij sectoren zoals landbouw, verkeer en industrie, inclusief die in het buitenland. Als hun huidige bijdrage aan de depositie vertaald wordt



Figuur 32. Voorbeeld van emissiereductie per sector: de stikstofdepositie in de huidige situatie, bij reductie van 50 procent en bij het bereiken van de kritische depositiewaarde. (Bron: Universiteit Leiden)

naar de overschrijding van de kritische depositiewaarde, dan weet iedere sector wat zijn depositieopgave is. Die kan dan uitgedrukt worden in een emissiereductie per sector. Dat moet dan wel per gebied worden bepaald, omdat de gewenste bijdragen van de sector overal variëren. Je kunt beginnen met alle sectoren een reductie van 50 procent op te leggen en dan gebiedsgericht beleid voeren om de overschrijding tot nul terug te brengen. Voor een willekeurig Natura 2000-gebied ziet dat er dan bijvoorbeeld uit zoals in figuur 32. Dit vergt een fors buitenlands beleid, maar ontslaat de binnenlandse sectoren niet

van hun verantwoordelijkheid om hun aandeel te verminderen. In 3.2 wordt toegelicht dat het voor de landbouw effectiever zou kunnen zijn om minder generiek, maar meer gebiedsgericht emissies te verminderen.

Benodigde snelheid van emissiereducties

Blijft staan de vraag: hoe snel moet de depositie ecologisch gezien terug? Aangezien er al sprake is van een erfenis van meer dan vijftig jaar te veel stikstofdepositie, is het eenvoudige antwoord: zo snel mogelijk. Om een duidelijker tijdspad te adviseren aan de politiek moet de vraag in ecologische en juridische zin worden gespecificeerd. Dat kan door te vragen: bij welk depositieniveau is het niet mogelijk om instandhouding (laat staan verbetering) van de natuurkwaliteit te garanderen, zelfs niet bij het nemen van alle mogelijke herstelmaatregelen? Vooralsnog is hier geen harde informatie over en kan de benodigde reductie dus niet worden berekend. Wel laten herstelmaatregelen tot nu toe zien dat het dweilen met de kraan open is en dat de depositie aanzienlijk moet worden gereduceerd om zelfs maar instandhouding te kunnen garanderen (zie ook 3.5). Dan nog leidt ook een reductie van de depositie niet altijd tot direct herstel (zie 2.7), maar kan het vanwege de opgehoopte stikstof in – en verzuring van – de bodem enige tijd duren voor de achteruitgang wordt omgebogen. De uitspraak ‘zo snel mogelijk’ is derhalve op dit moment toch het meest verantwoord.

3.2 Waar kun je de stikstofuitstoot het best verminderen?

– Jan Willem Erisman & Ton Brouwer

Er is veel verwarring over waar je nu het best de stikstofuitstoot kunt verminderen. Moet je inzetten op buitenlands beleid, moet je de Nederlandse stikstofdeken verkleinen of is het voldoende om in een randzone rond Natura 2000-gebieden de bronnen sterk te verminderen? Voor de landbouw maakt het nogal wat uit of je gebiedsgericht te werk gaat of niet. Voor andere bronnen is dat veel minder het geval.

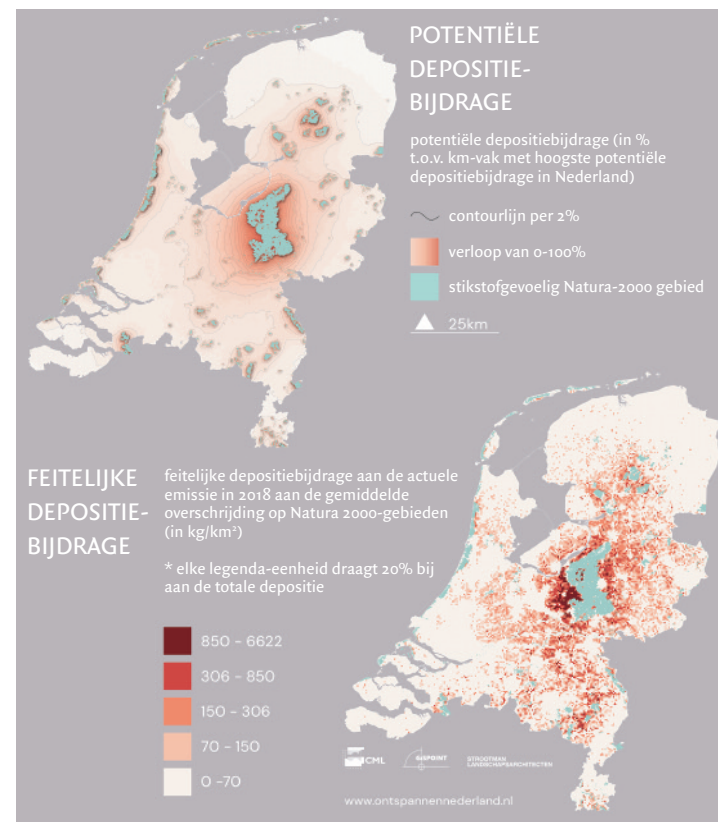
Depositiepotentie en depositiebijdragekaart

Met de kennis over het gedrag van de stoffen in de atmosfeer kun je bepalen waar emissies het effectiefst gereduceerd kunnen worden om de overschrijding van de kritische depositiewaarde zo klein mogelijk te maken. Voor de reductie van stikstof-oxiden is generiek beleid het effectiefst vanwege de grote spreiding over het land. Voor verkeer geldt nog wel dat daar waar drukke wegen pal langs natuurgebieden lopen, de lokale bijdrage aan de depositie relatief hoog kan zijn. Voor landbouw geldt dat heel veel bronnen dicht bij de natuur liggen en dat de bijdrage aan de depositie hoog is. Hier heeft het zin om te bepalen waar je het best kunt inzetten op emissiereductie. Daarvoor is een potentiële depositiebijdragekaart ontwikkeld die aangeeft waar in Nederland de bijdrage aan de depositie het grootst is. Ook is de feitelijke depositiebijdrage berekend die voor ieder kilometervak in Nederland aangeeft wat de huidige landbouwemissie bijdraagt aan de depositie op alle Natura 2000-gebieden (figuur 33).

Met de depositiebijdragekaart kan bijvoorbeeld worden bepaald dat bij een gebiedsgerichte emissievermindering van 50 procent in de landbouw bijna tweemaal zoveel hectares Natura 2000-gebied onder de kritische depositiewaarde zouden kunnen komen als bij generieke emissievermindering. Gericht stikstofbeleid voor de landbouw, met name de aanpak van ammoniak, is dus effectiever dan generiek beleid.

Per gebied zijn de maximaal toelaatbare ammoniakemissies bepaald op basis van de kritische depositiewaarden voor Natura 2000-gebieden. Daarbij is ervan uitgegaan dat de landbouw zelf zijn deel van de overschrijding van de kritische depositiewaarde tot nagenoeg nul terugbrengt. Als ook de andere sectoren en het buitenland dat doen, zullen de kritische depositiewaarden worden gehaald.

Voor iedere habitat in de Natura 2000-gebieden is bepaald hoeveel de Nederlandse landbouw daar bijdraagt aan de overschrijding van de kritische depositiewaarde. Vervolgens is gekeken waar en hoeveel ammoniakreductie nodig is om die overschrijding te minimaliseren. Voor verschillende varianten is de emissie per kilometervak doorgerekend



Figuur 33. De bijdrage van een 1x1 km-vak aan de depositie op alle Natura 2000-gebieden (potentiële depositiebijdrage). Elke stip (1x1 km-vak) op de feitelijke depositiebijdragekaart geeft aan hoeveel de uitstoot van de landbouw in dat vak bijdraagt aan de gemiddelde depositie op alle Natura 2000-gebieden. De vijf verschillende gekleurde legenda-eenheden dragen elk 20 procent bij aan de totale depositie. (Bron: OntspannenNederland.nl)

en is berekend hoeveel vermindering daar noodzakelijk is om het landbouwaandeel in de stikstofdepositie op Natura 2000-gebieden naar nul terug te brengen.

Uit de berekeningen blijkt dat je met 30 procent emissiereductie het landbouwaandeel in de depositie op 95 procent van de totale Natura

2000-hectares kunt verminderen tot de kritische depositiewaarde. Afhankelijk van de reducties door andere niet-landbouw sectoren wordt dan bepaald of de totale overschrijding van de kritische depositiewaarde kan worden weggenomen. Honderd procent bescherming van de Natura 2000-gebieden vergt een heel grote reductie van de emissie: om de laatste 5 procent te beschermen zul je nog eens 30 procent landbouwemissie moeten reduceren. De vraag is of dat, gezien alle onzekerheden, realistisch is. Daarbij moet wel duidelijk zijn dat het altijd de meest stikstofgevoelige habitats zullen zijn die deze extra reductie bepalen.

Er zijn verschillende opties voor de benodigde emissiereductie. Je kunt een relatief beperkte emissiereductie toepassen op een relatief groot aantal bedrijven, of een relatief sterke emissiereductie op een relatief beperkt aantal bedrijven. De keuze voor de te volgen strategie wordt bepaald door politiek. Hier spelen factoren als totale kosten, mate van vrijwilligheid bij het nemen van maatregelen en de mogelijkheden voor het voeren van een gezond agrarisch bedrijf een rol. De meest efficiënte route is een sterke emissiereductie in een beperkt aantal kilometervakken ofwel bij een klein aantal boerenbedrijven.

3.3 Hoe emissies van ammoniak en stikstofoxiden te beperken

– Gerard Migchels & Wim de Vries

Boeren hebben tal van mogelijkheden om ammoniakemissies te reduceren. Evenzo is er een breed scala aan maatregelen beschikbaar voor de uitstoot van stikstofoxiden door het verkeer, de industrie en de bouw. De opties op een rij.

Minder ammoniakemissie uit de melkveehouderij

Zo'n 85 procent van de ammoniakemissie komt uit de landbouw en daarvan komt ruim de helft uit de melkveehouderij. Hier is nog veel milieuwinst te halen. Dat kan door verlaging van het eiwitgehalte in het voer, betere behandeling van de mest, vermindering van kunstmestgebruik, uitbreiding van de weidegang en aanpassingen aan de stallen. Een duurzame melkveehouderij is volledig grond-

gebonden – dus alle mest op eigen land en slechts onder voorwaarden gedeeltelijk bij boeren in de nabije omgeving. In de huidige melkveehouderij is 25 tot 40 procent reductie van ammoniakemissie mogelijk zonder dat de kosten van zuivelproducten en rundvlees omhoog hoeven.

Minder eiwitrijk voer: De urine is de belangrijkste ammoniakbron in de melkveehouderij. Hoe eiwitrijker het voer, hoe meer ammoniak in de koeienplas. Door het eiwitgehalte in het voer te verlagen, kan de ammoniakemissie uit stallen naar beneden. Minder eiwitrijk voer kan door verlaging van het krachtvoergebruik en verlaging van het eiwitgehalte in gras. Dit laatste kan door minder stikstof aan te brengen via kunstmest en dierlijke mest. De emissie in de hele mestketen kan zo worden teruggebracht.

Mest en urine scheiden: Zodra urine en mest bij elkaar komen, ontstaan drijfmest en ammoniak. Stallen met vloeren die de vorming van drijfmest voorkomen, verminderen de ammoniakemissie sterk. In de praktijk is dat lastig te realiseren, maar er zijn wel vloeren die urine en mest zoveel mogelijk scheiden. Ook zijn er dichte en nagenoeg dichte vloeren die zorgen dat er minder ammoniak uit de kelder vervliegt, maar de ammoniakafname is dan kleiner dan bij gescheiden opvang van urine en feces.

Water bij de mest: Ruwweg de helft van de ammoniakemissie van een melkveebedrijf vindt plaats tijdens het uitrijden van mest. Deze emissie kan omlaag door water bij de mest te doen. Hoe meer water, des te groter dat effect. Voorkomen moet worden dat de uitspoeling van nitraat naar grondwater sterk toeneemt. Ook het uitrijden bij lage temperaturen en zwakke wind, bij bewolkt weer of tijdens regen kan de emissie verminderen. Daarnaast doet de boer er goed aan zo zuinig mogelijk met de mest om te gaan, om verlies te beperken maar ook om de stikstof zo goed mogelijk te benutten.

Stalaanpassingen: Net als bij de varkenshouderij werkt ook het plaatsen van een luchtwasser, die de ammoniak uit de ventilatielucht haalt. Het effect is echter kleiner, omdat melkveestallen niet volledig gesloten

zijn. Sproeien met water over de roosters zorgt eveneens voor een flinke reductie. Het grote nadeel van zulke aanpassingen in de stal zijn de grote investeringen die ervoor nodig zijn. Recente ontwikkelingen zijn systemen die de urine en de vaste fractie gescheiden opvangen en behandelen, gecombineerd met afzuiging van de lucht uit de mestkelders.

Minder ammoniakemissie uit de kippen- en varkenshouderij

Pluimvee- en varkenshouderijen nemen een kwart van de totale agrarische ammoniakemissie voor hun rekening. Hoe droger de kippenmest, des te kleiner de hoeveelheid fijnstof en daarmee ook de ammoniakemissie. De pluimveehouders houden de kippenmest daarom zo droog mogelijk. Daarnaast verwijderen ze met luchtwassers de ammoniak en het fijnstof uit de stallucht. Varkenshouders beperken met verschillende stalaanpassingen al langer het samenkomen van urine en mest, en daarmee ook de ammoniakemissie. Daarnaast koeien ze de mest en verwijderen ze de varkenspoep regelmatig uit de stal. Aanvullende luchtwassers halen de ontstane ammoniak vervolgens uit de stal.

Minder stikstofoxiden uit het verkeer, de industrie en bouw

Ook in het verkeer, de industrie en de bouw – vooral verantwoordelijk voor de uitstoot van stikstofoxiden – zijn er tal van mogelijkheden om de emissies te reduceren. Het ligt voor de hand om de maatregelen te koppelen aan het klimaatakkoord, want als je CO₂ uit fossiele brandstoffen aanpakt, gaat dat bijna altijd gepaard met vermindering van stikstofoxiden.

Verkeer: Een van de eerste maatregelen na de uitspraak van de Raad van State was het verminderen van de maximumsnelheid op snelwegen overdag van 130 naar 100 km/u. Dat leverde de benodigde stikstofruimte voor een jaar huizenbouw. Door beperking van het verkeer kan de emissie van stikstofoxiden behoorlijk afnemen, zo bleek gedurende de coronacrisis (zie figuur 26 in 2.11). Als burgers en bedrijven meer gebruikmaken van auto's met katalysatoren of elektrische aandrijving, daalt de emissie van stikstofoxiden ook flink. Dankzij Europees beleid zet deze daling door (zie 1.5). De binnenvaart en meer nog

de zeevaart kunnen de grootste reducties verwachten van schonere motoren. De recente aanscherping van de emissie-eisen zal daarbij helpen.

Industrie: Lagere stikstofemissies in de industrie zijn met name te bereiken door dalend energieverbruik, toepassing van rookgasreinigingstechnieken, elektrificatie van processen en de inzet van waterstof als energiebron. De emissie van stikstofoxiden neemt ook af wanneer er meer wind- en zonne-energie wordt gebruikt in plaats van fossiele bronnen als kolen en gas. Biomassa als energiebron levert juist meer emissie van stikstofoxiden op en kan daarom beter niet worden toegepast.

Bouw: Als aannemers en bouwbedrijven beter letten op het brandstofverbruik en meer materiaal prefab laten aanleveren, scheelt dat in de emissie van stikstofoxiden. Ook zou een afname van het aantal vervoersbewegingen van werknemers en leveranciers schelen in de uitstoot. En misschien kan meer bouw materiaal worden hergebruikt. Daarnaast zouden de bouw machines – bulldozers, graafmachines, hijskranen – kunnen overschakelen op elektrische aandrijving.

De commissie-Remkes adviseert de emissies in 2030 te halveren om de natuur te beschermen. Om die doelstelling te halen, moet in alle sectoren fors geïnvesteerd worden en is volumebeleid – inkrimping van de veestapel of vermindering van het auto gebruik – niet uit te sluiten. Hierbij is het van belang om zoveel mogelijk andere milieueffecten mee te nemen, zoals fijnstofuitstoot, broeikasgassen, waterkwaliteit, biodiversiteit en landschap.

3.4 De directe en indirecte kosten en baten van stikstof

– Hans van Grinsven

Wat kost stikstof ons als samenleving? En wat levert het op? De maatschappelijke voor- en nadelen van stikstofgebruik en van beleid voor stikstofreductie kun je wegen met een kosten-batenanalyse.

Integrale maatregelen met robuuste nettobaten voor de samenleving hebben de voorkeur in het stikstofbeleid. Maar hoe weeg je een kilogram stikstof op natuur af tegen een kilogram op de stedelijke omgeving? Of een kilogram stikstofdepositie op landnatuur tegen een kilogram in het oppervlaktewater? Dat zijn lastige vraagstukken, zowel voor de politiek als voor de wetenschap.

Een hulpmiddel is de maatschappelijke kosten-batenanalyse. Die geeft inzicht in alle maatschappelijke effecten van een bepaalde beleidsingreep, ongeacht of er een marktprijs voor bestaat. Economen spreken in dat verband over geprijsde en niet-geprijsde effecten. Investeringskosten die een boer maakt om de ammoniakemissie van zijn stal te verminderen zijn een voorbeeld van een geprijsd effect. Niet-geprijsde effecten zijn bijvoorbeeld de baten in de vorm van meer biodiversiteit of schonere lucht. Als het saldo van maatschappelijke kosten en baten positief is, neemt de welvaart voor de maatschappij als totaal toe.

Geen markt voor schonere lucht

Maatschappelijke baten zijn meetbaar, maar lastiger in geld uit te drukken omdat er niet direct voor betaald wordt; er is geen markt van vraag en aanbod voor schonere lucht en rijkere natuur. Toch kun je ze wel degelijk economisch waarderen. Zo kun je gebruikmaken van enquêtes waarin mensen aangeven hoeveel ze willen betalen voor meer natuur of schonere lucht. Of je kunt het afleiden uit de waardeestijging van huizen wanneer de omgeving groener wordt. En er worden natuurlijk kosten gemaakt om stikstofschaade te herstellen, zoals het plaggen van heide of het bestrijden van astma (zie 2.11).

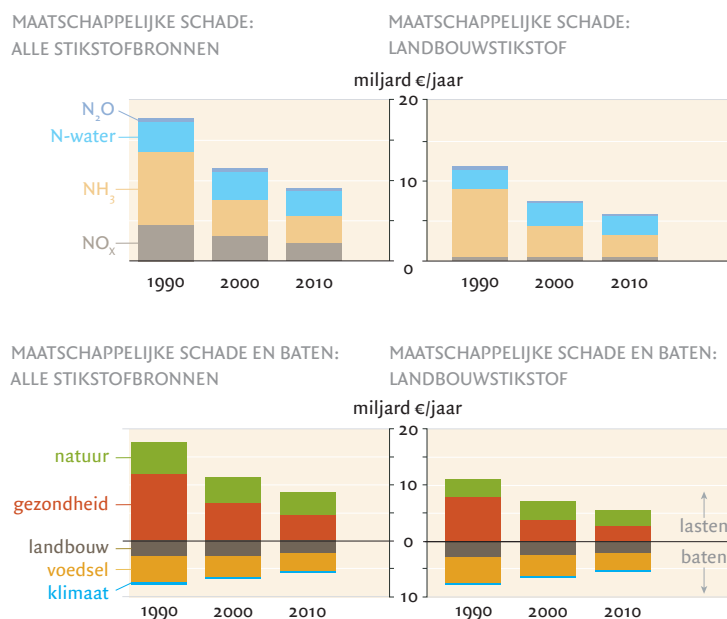
De economische waardering voor stikstofmaatregelen is vaak gebaseerd op de bereidheid van mensen om te betalen voor een langer en gezonder leven, meer biodiversiteit, mooiere natuur of vermindering van de koolstofdioxide-uitstoot. Die betalingsbereidheid (zie tabel 2) is geen constante, maar afhankelijk van opleiding, inkomen, informatievoorziening en de eigen ervaring met de problemen. Die is hier uitgedrukt in euro per kilogram afname van stikstofvervuiling, per effect en uitgesplitst naar stikstofvorm.

Maatschappelijk effect	Verantwoordelijke stikstofcomponent en milieucompartiment	Economische baten van vermindering van stikstofvervuiling (per kg stikstof)
Menselijke gezondheid (fijnstof, NO _x en ozon)	NO _x in troposfeer	10 – 30
Menselijke gezondheid (fijnstof)	NH ₃ in troposfeer	10 – 20
Menselijke gezondheid (drinkwater)	NO ₃ ⁻ in grondwater	0 – 4
Menselijke gezondheid (meer UV-straling door afbraak ozonlaag)	N ₂ O in stratosfeer	1 – 3
Ecosystemen op land (eutrofiëring, biodiversiteitsverlies)	NH ₃ en NO _x in depositie	2 – 10
Ecosystemen in water (eutrofiëring, biodiversiteitsverlies)	Uitspoeling van NO ₃ ⁻ naar of depositie van NH ₃ op oppervlaktewater	5 – 20
Klimaatverandering (emissie broeikasgassen)	N ₂ O in atmosfeer	5 – 15
Gewasschaade (ozon)	NO _x in troposfeer	1 – 2

Tabel 2. De belangrijkste schadelijke effecten van stikstof en de betalingsbereidheid van EU-burgers in 2008, in euro per kilo minder stikstofvervuiling per effect. (NO_x zijn stikstof-oxiden, NH₃ is ammoniak, NO₃⁻ is nitraat, N₂O is lachgas). (© Hans van Grinsven, PBL)

Een ton voor een jaar langer en gezonder leven

De betalingsbereidheid is het hoogst voor het effect op de gezondheid. Mensen zijn bereid om vijftig- tot honderdduizend euro te betalen voor een jaar langer en gezonder leven, zo blijkt uit een Europese peiling uit 2008. Voor natuur en klimaat hebben ze minder over. Niet perse omdat het probleem minder erg is, maar omdat de risico's minder tastbaar en voorstelbaar zijn. De kennis en mening over die effecten kunnen veranderen, bijvoorbeeld doordat een probleem veel media-aandacht krijgt. Daarom is regelmatige actualisering noodzakelijk.



Figuur 34. Maatschappelijke kosten en baten van stikstof in Nederland in 1990, 2000 en 2010 voor alle sectoren en alleen door landbouw. Voor alle drie de jaren is met dezelfde kosten per kilogram stikstof gerekend. (© Hans van Grinsven, PBL)

Gebruik van stikstof levert natuurlijk ook maatschappelijke baten op. Veruit de belangrijkste is de hogere gewasopbrengst per hectare door stikstofbemesting. De boer verdient daardoor 0,50 tot 3,70 euro per kg stikstof. De eigenaar van een productiebos verdient 0,20 tot 3,00 euro per kg stikstofbemesting uit depositie. Deze economische baten zijn niet alleen goed voor de boer en boseigenaar, ze zorgen ook voor lagere prijzen voor de consument. De bewerking van de gewassen en hout tot bijvoorbeeld levensmiddelen en meubelen creëert nog eens extra economische waarde en zorgt zo voor meer omzet, bruto binnenlands product en belastinginkomsten.

75 tot 485 miljard euro schade door stikstofvervuiling

De totale schade door stikstofvervuiling voor de EU27 (Europese Unie zonder Kroatië) werd voor het jaar 2008 geschat op 75 tot 485

miljard euro per jaar. Dat komt overeen met honderdvijftig tot duizend euro per Europeaan per jaar. Dat is een flink bedrag, maar ook een met een grote onzekerheidsmarge. Recentere schattingen zijn nog niet beschikbaar.

Waarderingsexperimenten zijn tijdrovend en duur. Maar de stikstofuitstoot is tussen 2008 en 2020 niet erg verminderd en de voorkeuren van mensen veranderen langzaam. De schattingen van 2008 zeggen daarom ook veel over de huidige situatie. Figuur 34 toont de maatschappelijke kosten (schade) en baten van stikstofbelasting in 1990, 2000 en 2010 voor Nederland.

Grootste schade is aan gezondheid

Meer dan de helft van de schade heeft betrekking op de gezondheid, de rest op de natuur. De bijdrage van stikstof aan het klimaatprobleem is relatief beperkt doordat de opwarmende effecten van lachgas (N₂O) worden gecompenseerd door bijvoorbeeld de klimaatkoelende effecten van fijnstof, gevormd uit ammoniak en stikstofoxiden (zie 2.12). In 2010 is twee derde van de stikstofschade, bijna zes miljard euro, gerelateerd aan emissies uit de landbouw, waarvan ammoniak de helft voor zijn rekening neemt. Als je wilt dat de maatschappij baat heeft bij de vermindering van de stikstofvervuiling, dan kunnen ammoniak- en nitraatemissies dus verder omlaag met technische maatregelen, maar voor een halvering kom je al snel uit bij een kleinere veestapel, minder kunstmest en minder stikstofintensieve teelten.

De directe economische stikstofbaten voor het landbouw- en voedselsysteem in 2010 zijn lager dan de betalingsbereidheid van de Nederlanders om de schade aan gezondheid en natuur door stikstof te voorkomen: vijf miljard tegenover bijna zes miljard. Maar beide cijfers zijn grove benaderingen. Bovendien vertaalt deze betalingsbereidheid zich nog weinig naar ander koopgedrag, zoals kiezen voor minder vlees en zuivel. Er zit dus een gat tussen wat mensen zeggen en doen.

De belangrijkste boodschap van deze kosten-batenanalyse voor burgers, boeren en beleidsmakers is dat een minder vervuillende landbouw nettobaten heeft voor de maatschappij. De lagere opbrengsten en daarmee inkomsten voor de boer kunnen worden gecompenseerd doordat consumenten meer betalen voor hun voedsel.

3.5 Heide en bos knappen nog niet op van herstelmaatregelen

– Henk Siepel

Veel heidegebieden hebben last van te veel stikstof. In eerste instantie verdwijnen de heideplanten langzaam. Snellere groeiers komen ervoor in de plaats, zoals bochtige smele en pijpenstrootje, twee grassoorten. Daarom worden allerlei herstelmaatregelen genomen. Maar hoe effectief zijn die?

Plaggen en maaien werkt averechts

Bij plaggen en maaien gaat het in feite om traditioneel heidebeheer. Herinvoering daarvan leek aanvankelijk goed te werken: de heide keerde terug. Maar de goede waarnemer zag dat alleen de heide terugkwam, niet de vele andere kruiden die in die vegetatie ook thuishoorden. Oorzaak: in veel van die plantensoorten was de verhouding tussen stikstof en fosfaat te hoog geworden, waardoor ze niet meer goed groeiden (zie ook 2.4).

Het plaggen van de armste heide zorgt niet alleen voor de afvoer van stikstof, maar ook voor de afvoer van fosfaat, kalium, magnesium en calcium. Stikstof blijft onverminderd inregenen en het effect is dat de verhouding tussen stikstof en fosfaat verder toeneemt. Sommige planten en dieren overleven dat niet. Het middel blijkt dus erger dan de kwaal. Dat werd ook aangetoond in experimenten met heide. Toen na het afplaggen een klein beetje fosfaat werd toegediend, nam de bodemfauna met een factor tien toe. De fosfaathuishouding op deze doorgaans mineraalarme bodems steekt dus heel nauw. Het toevoegen van fosfaat is een goede oplossing, maar dan moet de stikstofdepositie wel stoppen, anders ben je de natuur gewoon aan het bemesten in plaats van herstellen. Fosfaat toevoegen in minerale vorm, met ook nog andere bestanddelen zoals kalium en magnesium, zou enig soelaas kunnen bieden maar vooral de stikstofdepositie zal flink omhoog moeten.

Bekalking vermindert verzuring maar verhoogt fosfaatgebrek

Een andere herstelmaatregel is bekalking. Deze methode wordt zo-

wel toegepast op de heide als in bossen die te lijden hebben van hoge stikstofdeposities. Bekalken met calciumcarbonaat is bedoeld om de zuurgraad te verhogen en daarmee het opgeloste schadelijke aluminium weer vast te leggen. Gehoopt wordt dan op de vorming van aluminiumoxiden en -hydroxiden, maar het aluminium slaat ook neer met fosfaat. Aluminiumfosfaat is onder natuurlijke omstandigheden nauwelijks nog oplosbaar. In experimenten met bekalking van bosbodem met toenemende hoeveelheden kalk werden inderdaad afnemende concentraties opneembaar fosfaat gevonden en ook een vermindering van de herbivore bodemfauna. Als in grote hoeveelheden wordt bekalkt, kan het calcium ook reageren met fosfaat, waarbij calciumfosfaat oftewel apatiet ontstaat. Ook dat zorgt voor een fosfaattekort.

Kortom, het terugdringen van de verzuring door bekalking zorgt voor meer vastlegging van fosfaat, waardoor deze belangrijke voedingsstof niet meer beschikbaar is voor planten en dieren. Net als bij het plaggen van de heide, wat zorgt voor afvoer van fosfaat, zien we een negatief effect op het ecosysteem: er komen minder diersoorten voor, hun dichtheden zijn lager en ook de diversiteit aan planten vermindert.

Herstel van de hydrologie

In veel gevallen is door ingrepen in het landschap de hydrologie sterk verstoord. De ecologisch minst problematische route om de effecten van verzuring met succes tegen te gaan, is herstel van de hydrologie, waarbij gebufferd (grond)water tot in de wortelzone van planten kan doordringen. Dat zorgt ervoor dat zuur voortdurend gebufferd wordt, waardoor de voorraad aan basische kationen in de bodem op peil wordt gehouden. Deze maatregel is echter in veel gebieden slechts beperkt mogelijk of hij stuit op weerstand omdat voor hydrologisch herstel vaak maatregelen in de omgeving van natuurgebieden nodig zijn.

Steenmeel als laatste redmiddel

Op dit moment wordt er geëxperimenteerd met het verspreiden van steenmeel – gemalen rots uit Midden-Europa of Scandinavië – in heide en bos. Dat werkt iets langzamer dan bekalking, maar het geeft

een minder sterke verhoging van de calciumconcentratie en er zitten meer mineralen in die ook in het oorspronkelijke moedermateriaal van onze bodem zitten. Het idee erachter is dat tegelijkertijd de verzuring wordt tegengegaan én de mineralenbalans weer meer in evenwicht komt.

Er zijn nu al beheerders die steenmeel als laatste redmiddel inzetten. Ze strooien het met helikopters uit boven arme zandgronden. Enige voorzichtigheid is wel geboden, want er is nog weinig bekend over de effecten op de middellange en lange termijn. De eerste resultaten laten nog geen eenduidig beeld zien. Positieve ontwikkelingen zijn een iets minder zure bodem met een hogere buffercapaciteit, een grotere hoeveelheid fijne boomwortels – een teken dat bomen zich weer herstellen – en een toename van strooiselafbrekers zoals regenwormen. Negatief is het teruglopend aantal herbivore mijten en springstaarten in de bodem, wat duidt op een nog steeds verstoorde voedingsbalans.

Praktijkrijp zijn deze maatregelen dus eigenlijk nog niet. Daarvoor zijn er nog te veel vragen: over de dosering, de grootte van de deeltjes, het effect op schimmels, de doorwerking naar de fauna – en vooral ook over het effect op de enorme hoeveelheid stikstof die nu vastligt in de organische stof van de bos- en heidebodems. Natuurherstel is dus mogelijk maar moeilijk. Het werkt alleen als de stikstofdepositie sterk afneemt, tot onder de kritische depositiewaarden. Alleen dan kunnen herstelmaatregelen effectief worden.

INTERVIEW: Teo Wams, Natuurmonumenten
'Overall bramen, brandnetels, pijpenstrootje en stervende eiken'

Wat betekent de stikstofcrisis voor Natuurmonumenten?



'Als directeur natuurbeheer ontvang ik de stikstof in mijn natuurgebieden. De impact daarvan is enorm. De grootste bedreiging van biodiversiteit in onze natuurgebieden is de overmaat aan stikstof. We zien overal bramen, brandnetels, pijpenstrootje en stervende eiken; dat doet stikstof. Natuurlijk wordt de staat van instandhouding van natuurgebieden bepaald door meerdere fac-

toren. Ook bijvoorbeeld verdroging en versnippering spelen een rol. De oplossing bestaat dus uit minder stikstof, maar ook uit herstelmaatregelen in en rondom natuurgebieden, uit hydrologisch herstel en herstel van verbindingen. Een gebied waar ook deze andere zaken op orde zijn, kan meer stikstof hebben dan een klein, verdroogd en dus kwetsbaar gebiedje.'

Op welke manier kunnen we deze natuurgebieden versterken?

'De stikstofuitstoot moet omlaag. Ja, er zijn allerlei sectoren die daarin een rol hebben en alle sectoren moeten bijdragen. Maar we moeten de ogen er niet voor sluiten dat vooral een verandering in de landbouw cruciaal is. Ammoniak heeft met zijn kortafstandseffecten de grootste impact en het meeste komt uit de landbouw. We zoeken daarom naar mogelijkheden om dit met elkaar op te lossen. Naar een toekomst waarin natuurgebieden zijn veiliggesteld en waarin de landbouw op een andere manier functioneert.'

In het versnellingsakkoord werken jullie samen met onder andere LTO. Maar er is ook kritiek vanuit andere natuurorganisaties dat het plan voor de natuur te weinig doet.

'Een van de ongemakken uit de nieuwe stikstofwet was dat met het doel van 50 procent reductie in 2035 de helft van de reductie pas plaats zou vinden in die laatste vijf jaar. Het versnellingsakkoord wil dat de belangrijkste klap juist in het begin wordt gemaakt. Wat er niet uit is gekomen, en dat zou je een zwak-

te kunnen noemen, is dat we uiteindelijk naar 70 of 80 procent reductie moeten. Natuurmonumenten is ervan overtuigd dat die 40 procent in 2030 (in plaats van 26 procent wat nu in de wet staat) en 50 procent in 2035 slechts tussenstappen zijn. In samenwerking met de andere partijen kijken we naar de komende tien jaar. Hoe krijgen we ruimte voor de bouw, duidelijkheid voor de boeren en een wezenlijke verbetering voor de natuur?’

Hoe zie je de toekomst voor je?

‘Meer en meer partijen willen naar geïntegreerde oplossingen voor de stikstofproblemen in natuurgebieden. De uitstoot moet omlaag, naast verbetering van de hydrologie en de verbindingen tussen gebieden. Een verandering van de landbouw is cruciaal. We moeten toe naar een nieuwe, gezondere balans tussen natuurgebieden en het omliggende buitengebied. Met een ander type agrarische bedrijfsvoering sla je meerdere vliegen in één klap: natuurgebieden houden zichzelf beter in stand en er komt ruimte voor recreatie in de overgangsggebieden tussen landbouw en natuur zonder extra belasting van die natuur. Daarvoor is ook ruimtelijke sturing nodig en die is er nog niet. Dat is de grote uitdaging voor nu en voor de komende jaren. Maar de urgentie is hoog en het bewustzijn dat er iets moet gebeuren is er. Dat maakt deze tijd uniek om het voor elkaar te krijgen. Maar uiteindelijk is het de vraag of we als samenleving bereid zijn om een landbouw in te richten die past binnen de natuurlijke randvoorwaarden.’

Merle Scholten & Jelle Reumer

4. Stikstofbeleid

4.1 Het stikstofbeleid vanaf 1970

– Jan Willem Erisman & Wim de Vries

Vanaf de jaren zeventig is er ingezet op vermindering van de stikstofbelasting in Nederland. Dat heeft geleid tot stevig beleid, mede aangestuurd vanuit de Europese Unie. Maar de resultaten zijn er nog niet naar. Nederland heeft grote moeite om aan de gestelde stikstofdoelen te voldoen.

Luchtbeleid en de uitstoot van stikstofoxiden

Vanaf de jaren zeventig werd luchtvervuiling een beleidsprioriteit in Nederland. Met de Wet inzake de luchtverontreiniging is in 1970 een bestuurlijk-juridisch kader opgetuigd om luchtverontreiniging te bestrijden. Ook internationaal ging de aandacht van het beleid in eerste instantie uit naar verbetering van de luchtkwaliteit om de negatieve gezondheidseffecten van vervuilde lucht te verminderen. In 1985 legde de Europese Economische Gemeenschap luchtkwaliteitsnormen vast voor stikstofdioxide.

In het Indicatief meerjarenprogramma lucht 1985-1989 werden emissienormen voor zwaveldioxide en stikstofoxiden voor centrales, raffinaderijen en overige industrie opgenomen en in de daaropvolgende jaren in de Nederlandse wetgeving verankerd. De maximaal toegestane hoeveelheid stikstofdepositie was 22 kg (1600 mol) per hectare

per jaar. De overheid realiseerde zich dat bij een dergelijke depositie mogelijk toch vegetatieveranderingen konden optreden.

In 1988 kwam het internationale NO_x-protocol met de verplichting de nationale emissies van stikstofoxiden ten minste te stabiliseren op het niveau van 1987 (of een te kiezen eerder jaar). Daarnaast was er de verplichting om voor nieuwe installaties de zogeheten best beschikbare technieken (BBT) toe te passen om de uitstoot van stikstofoxiden te verminderen.

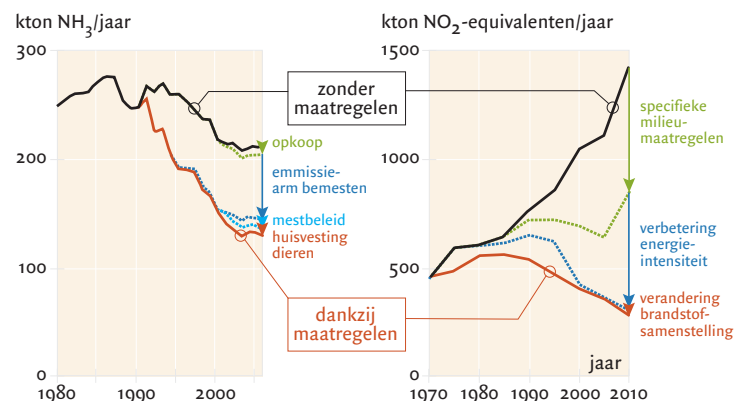
In Europees verband zijn vanaf het begin van de jaren zeventig ook bindende eisen gesteld aan emissies van personenauto's en vrachtauto's. De nieuwe autotypen moeten voldoen aan deze eisen; alleen dan kunnen ze in de Europese Unie worden verkocht. De Europese Commissie scherpste de normen voor uitlaatemissies vanaf begin jaren negentig ongeveer elke vijf jaar aan. De Euro 1-norm zorgde ervoor dat vrijwel alle nieuw verkochte auto's in Nederland vanaf het begin van de jaren negentig beschikten over een driewegkatalysator. Momenteel wordt Euro 6 ingevoerd. Daarin zijn de normen voor onder andere stikstofoxiden verder aangescherpt. Deze milieumaatregel heeft veel bijgedragen aan de emissiereductie van stikstofoxiden. Daarnaast werden voor de energieproducenten en industrie branders ingevoerd met een lage stikstofemissie, evenals rookgasrecirculatie en selectieve katalytische reductie. Daarnaast mochten cv-ketels van huizen en kantoorgebouwen voortaan nog maar kleine hoeveelheden stikstofoxiden uitstoten. Dit alles leidde tussen 1970 en 2010 tot een flinke afname van de stikstofoxide-uitstoot in Nederland (figuur 35).

Het milieubeleid is zeker niet de enige oorzaak geweest van de emissiedaling. Ook de energiebesparingsmaatregelen en veranderingen in de brandstofmix met een groter aandeel gas droegen daaraan bij. De oplopende energieprijzen na de oliecrisis in het begin van de jaren zeventig hebben daar een belangrijke impuls aan gegeven.

Mestbeleid en de uitstoot van ammoniak

De Nederlandse landbouw heeft al jaren een hardnekkig mestprobleem. Daaraan lagen de snelle intensivering en schaalvergroting van

MAATREGELN HEBBEN EFFECT GESORTEERD



Figuur 35. Verloop van de uitstoot van stikstofoxiden (links) en ammoniak (rechts) tussen 1970 en 2010. De zwarte lijnen geven de emissies zoals die zouden zijn geweest als de economie vanaf 1970 zou zijn gegroeid als in werkelijkheid, maar zonder verbetering van de energie-intensiteit, zonder verandering van het aandeel van verschillende brandstoffen en zonder milieumaatregelen. De rode lijn geeft het verloop van de werkelijk opgetreden emissies. (Bron data/figuur: Buisman et al., 2010)

de veehouderij ten grondslag, alsmede de bijbehorende productieverhoging van vlees, eieren en zuivel voor relatief lage prijzen. Dat werd mede mogelijk gemaakt door het gebruik van kunstmest en de import van goedkoop veevoer vanaf de jaren vijftig. Het gevolg was een grote stijging van de stikstof- en fosfaatbelasting van het milieu.

In de jaren zeventig ontstond er maatschappelijke kritiek op de intensieve wijze van produceren in de Nederlandse landbouw. De drinkwaterbronnen raakten vervuild met nutriënten. Vanwege de maatschappelijke zorgen begonnen de Nederlandse en Europese overheden de problemen te onderkennen. Dat werd nog sterker toen in de jaren tachtig de zure regen op de politieke agenda kwam te staan. Het ging daarbij om de neerslag van zwaveloxiden, stikstofoxiden en ammoniak. De overheid nam maatregelen om de uitstoot ervan te verminderen tot een maximaal niveau. Daarnaast richtte de overheid zich op vermindering van de nitraat- en fosfaatafvoer naar grond- en opper-

MESTSTOFFENMARATHON 1972-2021

1972

Rapport 'Augiasstal bio-industrie' van Natuur & Milieu

1978

Nota 'Boer Blijven'

1981

Hinderwetvergunning voor agrarische bedrijven

1984

Europese melkquota

1984

Interimwet Beperking varkens- en pluimveehouderij

1987

Richtlijn 'Ammoniak en veehouderij'

1989

Eerste Nationaal Milieubeleidsplan geeft regels voor de vermindering van ammoniakuitstoot en de maximale fosfaatgift

1991

Europese Nitraatrichtlijn (uitgewerkt in Meststoffenwet)

1994

Interimwet 'Ammoniak en Veehouderij' (noodwet Alders) verplicht het emissiearm uitrijden van drijfmest

1996

Mineralenaangiftesysteem MINAS in werking

1997

Varkenspest breekt uit en houdt meer dan een jaar aan; miljoenen varkens worden 'geruimd'

1998

MINAS wordt wettelijk verplicht en schrijft maximale verliesnormen voor fosfaat op bouwland en grasland voor

1998

Herstructureringswet met dierrechten varkenshouderij: het aantal varkens wordt aan een maximum gebonden

1998

Nieuwe Natuurbeschermingswet van kracht, vereist vergunning van bedrijven voor schadelijke ammoniakuitstoot

1999

Dierrechten varkens ingevoerd

2000

Europese Kaderrichtlijn Water (uitgewerkt in de Waterwet)

2000

Aanvraag energiesubsidie voor verbranding kippenmest

2000

Natura 2000, het netwerk van Europese natuurgebieden van Vogel- en Habitat-richtlijnen (in Nederland uitgewerkt in de Natuurbeschermingswet)



Figuur 36. Een halve eeuw mest- en ammoniakbeleid. (Bron: Stichting Natuur en Milieu)

vlaaktewater. Ze legde een landelijk fosfaatplafond op en stelde bemestingsnormen op voor stikstof en fosfaat, waaronder een maximum voor de aanvoer van stikstof in dierlijke mest. Het hele moeizame beleidstraject is door Stichting Natuur & Milieu samengevat in de zogeheten Mestmarathon (zie figuur 36 voor een bewerking daarvan).

Beleid en wetgeving van de Europese Unie hebben het Nederlandse mest- en ammoniakbeleid richting gegeven. Omgekeerd heeft Nederland bijgedragen aan de totstandkoming van dat beleid door veel kennis te leveren. De Europese Unie en de Europese Economische Commissie van de Verenigde Naties (UNECE) hebben mede op basis daarvan limieten vastgesteld. Er kwamen grenswaarden voor de stikstofemissies van landbouw, industrie, verkeer en huishoudens naar bodem, lucht en water. Er kwamen maximaal toegestane concentraties in lucht en water. En voor reactieve stikstofverbindingen werden kritische depositiewaarden op natuur vastgesteld (zie 2.7 en 3.1).

Het Nederlandse mest- en ammoniakbeleid heeft tot doel de uitstoot van ammoniak en lachgas naar de lucht en van nitraat, ammonium en fosfaat naar grondwater en oppervlaktewater te beperken om EU-doelstellingen te realiseren. Het gaat om de doelstelling voor de waterkwaliteit en om instandhoudingsdoelen voor natuur. Met het Programma Aanpak Stikstof (PAS) werd gepoogd dat laatste te bereiken, maar de Raad van State oordeelde in 2019 dat die aanpak onvoldoende was. Ook de EU-normen voor de waterkwaliteit die in 2027 moeten

worden gehaald, worden nog op veel plaatsen niet gerealiseerd. En al zijn door het Nederlandse mestbeleid de fosfaat- en stikstofoverschotten sinds de jaren tachtig sterk gereduceerd, toch heeft Nederland nog steeds grote moeite om de milieudoelen te halen.

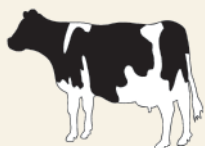
4.2 Hoe de overheid voor de muziek uitliep

– Ralph Frins

Het Programma Aanpak Stikstof (PAS) moest ervoor zorgen dat natuurgebieden werden beschermd tegen stikstofdepositie. Tegelijkertijd moest het bedrijven mogelijkheden geven om verder te bouwen en uit te breiden. Een creatieve oplossing, die uitstekend werkte voor de economie, maar niet voor de natuur.

‘Stikstofregels raken 18.000 projecten’, kopte NRC op 5 september 2019. De directe aanleiding was de zogenoemde PAS-uitspraak van de Raad van State van 29 mei 2019 (zie ook 4.3). Daarin oordeelde de bestuursrechter dat de overheid de natuur onvoldoende beschermt tegen een te hoge uitstoot en neerslag van stikstof. De projecten die door deze uitspraak worden geraakt zijn de bouw van woningen, de verbreding van snelwegen zoals de A27 bij Utrecht en de uitbreiding van bedrijven.

Door zulke projecten slaat stikstof neer in kwetsbare natuurgebieden, waardoor allerlei planten en dieren die daar voorkomen schade oplo-

2001Dierrechten pluimvee-
houderij**2001**Vierde Nationaal Milieu-
beleidsplan 'Een wereld en
een wil' geeft richting-
gevende milieudoelen voor
onder meer de landelijke
ammoniakuitstoot**2001**NEC richtlijn 2001
(National Emission
Ceilings Directive, in
Nederland uitgewerkt in de
wet Milieubeheer, Regeling
ammoniak en veehouderij)**2002**Reconstructiewet
herstructurering intensieve
veehouderij**2003**Europees Hof verwerpt
MINAS**2006**Meststoffenwet ingevoerd
met bemestingsnormen**2008**Start van kippenmest-
verbranding in energie-
centrale Moerdijk**2008**Afspraak rijksoverheid,
landbouwsector en natuur-
beschermingsorganisaties
om een Programmatische
Aanpak Stikstof (PAS) te
ontwikkelen**2009**Convenant 'Uitvoerings-
agenda Duurzame
Veehouderij'**2010**Compartimentering
concentratiegebieden
opnieuw ingevoerd:
aantallen varkens en
pluimvee in zuidelijke en
oostelijke zandgebieden
kunnen niet verder
toenemen**2010**Richtlijn Industriële
Emissies (RIE)**2012**Fraudezaken met mest-
afzet komen aan het licht

pen of zelfs verdwijnen (zie ook 2.1). Het EU-recht eist echter dat Nederland verzekert dat de natuurgebieden worden behouden en zo nodig worden hersteld. Nederland heeft deze eis overgenomen in de Wet natuurbescherming. Die bepaalt onder andere dat een project alleen mag worden uitgevoerd als verzekerd is dat het kwetsbare natuurgebieden niet aantast.

Het is belangrijk om te beseffen dat vrijwel iedere activiteit tot emissie en depositie van stikstof leidt. Niet alleen energiecentrales en snelwegverkeer – dat ligt voor de hand – maar ook het houden van vee in een stal en zelfs het grazen van koeien in de wei. Door de slechte staat van de natuur worstelt Nederland al ruim tien jaar met dit soort projecten en activiteiten. Daarom is bij de vergunningverlening een grenswaarde aan extra stikstofdepositie van 0,01 mol (circa 0,14 gram) per hectare per jaar aangehouden, wat feitelijk betekent dat een activiteit niet tot noemenswaardige verhoging van de depositie mag leiden. Ter vergelijking: het uitlaten van een hond in een natuurgebied veroorzaakt iets meer dan drie gram stikstofdepositie – ruim twintig keer zoveel.

PAS, creatieve oplossing voor knellende stikstofregels

Rond 2007 verschenen de eerste uitspraken waarin de Raad van State oordeelde dat projecten niet mochten doorgaan omdat ze kwetsbare natuurgebieden met extra stikstof zouden belasten. De overheid vond die belemmering van de economische ontwikkeling onwenselijk. Ze zag weliswaar in dat de kwaliteit van de natuur aanzien-

lijk moest worden verbeterd om aan de eisen te voldoen die uit het EU-recht voortvloeien. Maar ze vond ook dat de economie zo min mogelijk hinder moest ondervinden van de slechte staat van de natuur.

Vandaar dat aan twee adviescommissies – de taskforce-Trojan en de adviesgroep-Huys – gevraagd werd een creatieve oplossing te bedenken die zowel economische ontwikkelingen zou stimuleren als de natuurkwaliteit verbeteren. Die creatieve oplossing werd uiteindelijk het Programma Aanpak Stikstof. Het idee was dat door het treffen van zogeheten bron- en herstelmaatregelen depositieruimte kon worden gecreëerd voor nieuwe projecten.

De bronmaatregelen moesten de stikstofemissie van de landbouwsector verminderen. Daartoe werden onder meer de geldende emissienormen voor stallen en het op land uitrijden van dierlijke mest aangescherpt. Bij de herstelmaatregelen ging het om ingrepen in of nabij de natuurgebieden zelf, zoals het plaggen en begrazen van heidevelden om stikstof te verwijderen en het verhogen van de grondwaterstand waardoor de grond minder verzuurt. De gedachte was dat een deel van de stikstofruimte die met de bronmaatregelen zou worden gecreëerd, ten goede zou kunnen komen aan nieuwe projecten, omdat de herstelmaatregelen de natuurkwaliteit zouden verbeteren.

Run op depositieruimte

De totstandkoming van het PAS duurde enkele jaren. Uiteindelijk werd het programma op 1 juli 2015 van kracht. Een deel van de depo-

2012
'Convenant weidegang' ondertekend door meer dan 50 organisaties en rijksoverheid

2013
Verplichte mestverwerking met regionaal verschillende normen

2013
Deltaplan agrarisch waterbeheer.

2014
Dierrechten voor varkens en pluimvee blijven gelden tot minstens 2018, een voorwaarde voor het verkrijgen van de derogatie van de Nitraatrichtlijn

2014
Convenant overheid en landbouwsector om de ammoniakuitstoot met 10 miljoen kilo te verminderen en tegelijk 5,6 miljoen voor de ontwikkeling van bedrijven beschikbaar te stellen

2014
Natuurbeschermingswet wordt gewijzigd voor de PAS (Programmatiese Aanpak Stikstof)

2015
Bestedingsnormen aangescherpt tot niveau van evenwichtsbemesting

2015
Afschaffing van de Europese melkquota fosfaatrechten voor de melkveehouderij

2015
PAS in werking.

2016
AMvB 'Beperking groei melkveehouderijbedrijven'

2019
Raad van State zet streep door vergunningverlening op basis van PAS

2019
Eerste rapport Commissie Remkes: 'Niet alles kan'

2020
Tweede rapport Commissie Remkes: 'Niet alles kan overal'

2021
Rapport Wamelink e.a.: 'Relaties tussen stikstofdepositie en natuurkwaliteit'



sitieruimte was voorbestemd voor 'prioritaire' projecten, zoals snelwegverbredingen en dijk aanleg. Op het andere deel van de depositieruimte, dat voor 'reguliere' projecten beschikbaar was, ontstond direct een run. Bijna achtduizend projecten hebben uiteindelijk gebruikgemaakt van de depositieruimte die ter beschikking werd gesteld. Het PAS heeft de economie dan ook ruimschoots gestimuleerd. De uitvoering van de bron- en herstelmaatregelen verliep echter minder voorspoedig. Zo werd een deel van de strengere stikstofemissienormen te laat van kracht, kwam de uitvoering van de herstelmaatregelen maar moeizaam op gang en vielen de resultaten ook nog eens tegen.

De overheid liep in feite te ver voor de muziek uit. Er werden immers al toestemmingen verleend voor projecten zonder dat bekend was of de toekomstige maatregelen werkelijk positieve effecten zouden hebben. Die bleken vervolgens dus tegen te vallen of er zelfs helemaal niet te zijn. Geen wonder dat de bestuursrechter oordeelde dat er geen toestemmingen meer verleend mogen worden op grond van het PAS (zie ook 4.3). De Wet natuurbescherming bepaalt immers dat een project in beginsel alleen kan doorgaan als verzekerd is dat dat project de natuur niet aantast. In de toekomst te behalen resultaten bieden die garantie niet. De emissie en depositie van stikstof zal dan ook eerst aanzienlijk omlaag moeten. Pas dan ontstaat er weer meer ruimte voor economische ontwikkelingen en alleen zo kan verdere achteruitgang van onze kwetsbare natuurgebieden worden voorkomen.

4.3 De rechter grijpt in – pas op de plaats voor stikstof

– Floor Fleurke

Door twee uitspraken van de Raad van State in 2019 zijn veel vergunningen ingetrokken voor activiteiten die stikstof verspreiden, zoals bouwprojecten en de uitbreiding van veehouderijbedrijven. Sindsdien weegt Nederland dergelijke activiteiten opnieuw, met randvoorwaarden van het Europees Hof.

De rechterlijke macht in Nederland heeft de laatste jaren furore gemaakt met baanbrekende uitspraken over klimaat- en milieubeleid. In de uitspraken stonden tien besluiten centraal waarbij vergunningen waren verleend aan agrarische bedrijven waaruit stikstof neerslaat in Natura 2000-gebieden.

Natura 2000 is een Europees netwerk van beschermde natuurgebieden. Daarin worden bedreigde planten- en diersoorten en hun natuurlijke leefomgeving beschermd. Dat is vastgelegd in de Europese Vogel- en Habitatrichtlijn. Nederland heeft ruim 160 Natura 2000-gebieden. Ze worden beschermd door de Wet natuurbescherming, waarin de verplichtingen uit de bovengenoemde richtlijn is overgenomen. Al decennia komt op Natura 2000-gebieden te veel stikstof terecht in de vorm van ammoniak en stikstofoxiden. Daarom is een natuurvergunning of een ander toestemmingsbesluit nodig voor agrarische en andere activiteiten waarbij stikstof vrijkomt.

2021

Rapport Bobbink: 'Green peace. Effecten van stikstofdepositie nu en in 2030'

2021

Rapport Van den Burg e.a. WNF: 'Naar een ecologisch noodzakelijke reductiedoelstelling van stikstof'

2021

Rapport Ter Haar ABDTOP-Consult: 'Normeren en bepalen van stikstofemissies'

2021

Rapport Paul ABDTOP-Consult: 'Stikstofruimte voor de toekomst'

2021

Rapport Erisman/Strootman 'Naar een ontspannen Nederland' bepleit ruimtelijke benadering om de stikstofproblematiek op te lossen

2021

Planbureau voor de Leefomgeving: Rapport 'Naar een uitweg uit de stikstofcrisis' bepleit integrale, effectieve en juridisch houdbare aanpak



PAS, de Wet natuurbescherming en de Europese Habitatrichtlijn

Het Programma Aanpak Stikstof (PAS) verleende een vergunning voor een activiteit als er een onderzoek was uitgevoerd naar de negatieve gevolgen van die activiteit voor het beschermde gebied (zie ook 4.2). Het PAS had een dubbele doelstelling: vermindering van de stikstofdepositie en herstelmaatregelen die waarborgen dat op termijn de instandhoudingsdoelstellingen voor de gebieden worden waargemaakt, terwijl er intussen ruimte blijft voor verdere economische ontwikkeling.

De hoofdvraag in de rechtszaken was of het PAS wel in overeenstemming is met de Wet natuurbescherming en de Europese Habitatrichtlijn. Die laatste stelt namelijk verplicht dat voor Natura 2000-gebieden de nodige instandhoudingsmaatregelen en andere passende maatregelen ter voorkoming van achteruitgang worden genomen, zoals reductie van stikstofemissies. Die moeten ervoor zorgen dat de kwaliteit van de natuurlijke habitat waarin beschermde soorten leven niet verslechtert en dat er geen storende factoren met een significant effect optreden. Bovendien moest voor elke activiteit die een effect kon hebben op het gebied – zoals een wegverbreding of een staluitbreiding – een zogenoemde 'passende beoordeling' komen, een onderzoek naar de gevolgen. Er kon vervolgens slechts toestemming worden gegeven nadat met zekerheid was vastgesteld dat de natuurlijke kenmerken van het betrokken gebied niet werden aangetast.

De Raad van State vroeg zich af hoe de Habitatrichtlijn moest worden uitgelegd in het kader van het PAS. De Raad heeft daarover vragen gesteld aan het Hof van Justitie van de Europese Unie in Luxemburg, dat het monopolie heeft op de uitleg van Europees recht. Dat oordeelde in november 2018 dat ook bij het PAS de positieve gevolgen van de maatregelen die in dat programma zijn opgenomen, vooraf vast moeten staan. Pas dan kan de overheid een nieuwe activiteit toestaan. Omdat het PAS niet aan die voorwaarde voldeed, mocht het niet als toestemingsbasis voor nieuwe activiteiten worden gebruikt.

De Raad van State concludeerde op basis van de uitspraken van het Europees Hof dat de 'passende beoordeling' van het PAS strijdig is met de Habitatrichtlijn, omdat de doelstelling van de richtlijn, het beschermen van Natura 2000-gebieden, niet gegarandeerd kon worden. Daardoor zijn veel vergunningverleningsbesluiten – zoals de tien voor de agrarische bedrijven waarmee het begon – vernietigd. Er is inmiddels een nieuw pakket aan maatregelen vastgesteld en het PAS is ongeldig verklaard.

Voorwaarden aan toekomstig stikstofbeleid – eerst minder stikstof, dan projecten

In het arrest heeft het Europees Hof voorwaarden gesteld aan toekomstig beleid om de stikstofdepositie te beteugelen. Zo moet er een garantie zijn dat er redelijkerwijs geen wetenschappelijke twijfel bestaat dat plannen of projecten géén schadelijke gevolgen hebben voor de natuurlijke kenmerken van het Natura 2000-gebied. Daartoe moet de wetenschappelijke deugdelijkheid van de beoordeling grondig en volledig worden getoetst.

De positieve gevolgen van instandhoudingsmaatregelen en passende maatregelen kunnen bij de beoordeling van de effecten van een plan of project niet worden gecompenseerd. Die positieve gevolgen kunnen alleen worden meegenomen bij de beoordeling van een plan of project als de verwachte voordelen daarvan ten tijde van de beoordeling al vaststaan. Dat betekent dat de maatregelen in principe al uitgevoerd moeten zijn en dat duidelijk moet zijn hoe de voordelen tot stand zijn gekomen of zullen komen. Er vindt geen vrijstelling van

plannen en projecten plaats tenzij schadelijke gevolgen voor de natuurlijke kenmerken met zekerheid ('zonder redelijke wetenschappelijke twijfel') uitgesloten kunnen worden. De uitspraken van het Europees Hof en de Raad van State maken hiermee glashelder dat de stikstofdepositie eerst moet worden verminderd door bronmaatregelen, en geven hiervoor duidelijke aanwijzingen.

4.4 Buurlanden gaan anders om met het stikstofprobleem

– Wim de Vries & Hans Kros

In buurlanden worden veel makkelijker vergunningen afgegeven voor activiteiten die leiden tot stikstofuitstoot op een nabijgelegen natuurgebied. Hoe komt dat? En is dat terecht?

De manier waarop België, Duitsland en Denemarken met de stikstofproblematiek omgaan, heeft in Nederland veel aandacht gekregen. Veel partijen hebben gesuggereerd dat Nederland het braafste jongetje van de klas is en derhalve een voorbeeld zou moeten nemen aan de stikstofaanpak in die landen. Die zouden veel ruimere en werkbaardere richtlijnen hanteren in de vergunningverlening. In de discussie worden de begrippen 'kritische depositiewaarde' en 'grenswaarde' nogal eens door elkaar gehaald. De *kritische depositiewaarde* is de ecologische grens waarboven het risico op effecten stijgt bij toenemende stikstofdepositie en blootstellingsduur. Over de inschatting van die waarde bestaat internationaal overeenstemming. De *grenswaarde* is de hoeveelheid stikstofdepositie van een activiteit waarbij nog geen vergunning nodig is. En die grenswaarde vult ieder land voor Natura 2000, het Europese netwerk van beschermde natuurgebieden, weer anders in.

Nederland, Duitsland en Denemarken

In Nederland gold een grenswaarde van 1 mol stikstof (14 gram) per hectare per jaar voor een activiteit in de nabijheid van een Natura 2000-gebied. Toen de Raad van State het Programma Aanpak Stikstof (zie ook 4.3) in mei 2019 ongeldig verklaarde, ging de grenswaarde vrijwel naar nul.

In Duitsland is een stikstofvergunning pas nodig als door een nieuwe activiteit meer dan 7 mol stikstof (100 gram) per hectare per jaar neerslaat in een Natura 2000-gebied. Bovendien hanteren de Duitsers ook nog een foutenmarge van 20 procent. Daar staat tegenover dat er in Duitsland sprake is van een geringere overschrijding van de kritische depositiewaarde, waardoor er meer depositieruimte beschikbaar is.

Tenslotte wordt in Denemarken de vergunningverlening voor de stikstofaanpak alleen gerelateerd aan de ammoniakuitstoot en de eisen voor het staltype. De stal moet de best beschikbare technologie in huis hebben om de uitstoot van ammoniak te reduceren. Daarnaast mag de bijdrage aan de depositie maximaal 50 mol stikstof (700 gram) per hectare zijn als er geen andere bedrijven in de nabijheid zijn, 28 mol stikstof (400 gram) als er een ander bedrijf in de nabijheid is en 14 mol stikstof (200 gram) als er meerdere bedrijven in de nabijheid liggen.

De Vlaamse PAS

Vlaanderen heeft, net als Nederland tot 2019, ook een beleidsprogramma voor de aanpak van stikstof met de naam PAS (Programmatische Aanpak Stikstof). Tot voor kort legde de Vlaamse PAS uitsluitend beperkingen op aan veehouderijen met een grote bijdrage aan de stikstofdepositie op nabijgelegen Natura 2000-habitats. Daarbij kreeg een veehouderij een vergunning voor uitbreiding als zijn stikstofdepositie lager was dan 5 procent van de kritische depositiewaarde van een nabijgelegen Natura 2000-gebied. En die beperking gold alleen in natuurgebieden waar die kritische depositiewaarde al werd overschreden.

Er wordt echter een Vlaams PAS-systeem ontwikkeld dat vergelijkbaar is met de Nederlandse situatie. Doel is daarbij om de depositie in 2030 met 50 procent te verminderen ten opzichte van 2020 en om in 2050 de depositie op alle natuurgebieden tot op of onder de kritische depositiewaarde te hebben. De regionale regering van Vlaanderen heeft daarom recent een strengere tijdelijke stikstofwet aangenomen. Daarmee kunnen agrarische ondernemers alleen nog bouwvergunningen krijgen als ze kunnen aantonen dat de natuur er niet door wordt aangetast. De nieuwe drempels zijn veel lager: voor ammoniakuitstoot

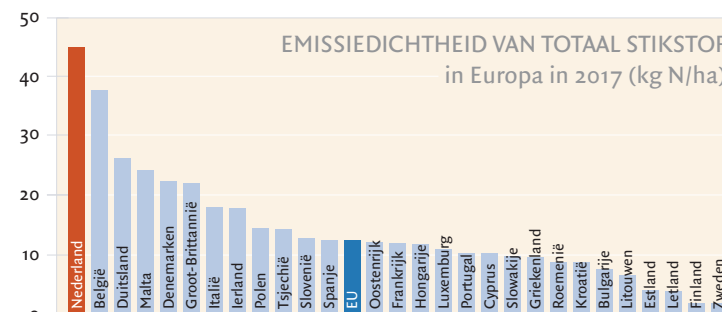
(veeteelt en mestverwerking) bedraagt de drempel 0 procent: uitbreiding kan niet tenzij er elders wordt gecompenseerd. Boerderijen die meer dan 50 procent bijdragen aan de kritische depositiewaarde moeten krimpen of sluiten. Voor stikstofoxiden (industrie en transport) bedraagt de drempel 1 procent.

De Vlaamse regering verwacht dat met deze aanpak zo'n 90 procent van de industriële projecten die nu op stapel staan, kan worden uitgevoerd. Overige stikstofemissies, zoals die van verkeer en industrie, worden via generieke emissieregelingen geregeld. Boeren die hun activiteiten door deze verordening niet kunnen voortzetten of hun bedrijf niet kunnen uitbreiden, krijgen compensatie, zoals financiële steun voor bedrijfsadvies, bedrijfsverplaatsing, bedrijfsconversie of bedrijfssluiting.

Aanpassing van de grenswaarde?

De stikstofemissie per hectare land in Nederland is nog altijd het hoogst van alle EU-landen (figuur 37). Dit komt doordat de veedichtheid in Nederland het hoogst is (3,8 grootvee-eenheden per hectare, tegenover een EU-gemiddelde van 0,8). Daardoor is de overschrijding van de kritische depositiewaarde in buurlanden veelal ook minder en de urgentie van emissiereductie lager. Dat verklaart waarom in buurlanden veel ruimhartiger wordt omgegaan met vergunningverlening. In gebieden dicht bij de grens, bijvoorbeeld in Duitsland, is de depositie echter wel degelijk vergelijkbaar met de Nederlandse en staan Natura 2000-gebieden net zo onder druk. In Nederland heeft de Raad van State zich gebaseerd op een uitspraak van het Europees Hof. Deze uitspraak geldt voor alle Europese landen en mogelijk zullen ook andere landen hun beleid moeten bijstellen als milieuorganisaties daar naar de rechter stappen.

In Nederland is er nog steeds grote druk om de grenswaarde te verhogen. Zo pleitte LTO Nederland, de belangenorganisatie van de landbouw, voor herinvoering van de tot 2019 gebruikte grenswaarde van 1 mol stikstof. LTO stelt voor dit dan te combineren met een lagere stikstofuitstoot vanuit alle betrokken sectoren en met maatwerk per gebied om kwetsbare natuur te beschermen. In een recente reactie van



Figuur 37. Gemiddelde stikstofuitstoot in EU-landen. (Bron data: website CEIP)

het kabinet op het eindrapport van het Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof (de commissie-Hordijk) wordt ook weer gesproken over de mogelijkheid om de grenswaarde te verhogen. Dit in samenhang met een ambitieuzere aanpak van de stikstofbronnen. Gegeven de huidige wetgeving is dit echter niet mogelijk zolang de natuurgebieden in ons land nog sterk overbelast zijn door stikstof. Die visie is ook overgenomen in Vlaanderen.

4.5 Beloning van boeren voor maatschappelijke diensten

– Jan Willem Erisman, Anne van Doorn & Wim de Vries

De landbouw zit in een crisis. Veel boeren protesteren tegen de stikstofmaatregelen. Ze vrezen ten onder te gaan door nieuwe milieuwetgeving en overheidsvoorschriften. De financiële situatie van de boer zou verbeterd moeten worden om milieumaatregelen die geld kosten te kunnen doorvoeren. Want: wie rood staat, kan niet groen denken.

Een succesverhaal, maar voor wie?

Onze huidige landbouw is sinds de jaren vijftig gericht op het produceren van voldoende en betaalbaar voedsel. Met steun van de overheid en kennis van de wetenschap kregen boeren dit voor elkaar. Ze wisten de productie enorm op te voeren en de arbeidskosten drastisch te verminderen. Ze zijn zo succesvol dat ze zo-

wel de interne als externe markt in ruime mate van goedkope landbouwproducten kunnen voorzien. Nederland beschikt momenteel over een zeer goed georganiseerde agroketen waarin kleine en grote bedrijven floreren.

De bijdrage van de primaire agrarische sector aan het bruto binnenlands product (bbp) is 1,4 procent terwijl boeren en tuinders 2 procent van de beroepsbevolking uitmaken. Voeg je daar de verwerkende industrie en toeleveranciers aan toe, zoals de zuivelindustrie en veevoerproducenten, dan ligt dat aandeel in Nederland op 7,5 procent van het bbp terwijl 9 procent van de beroepsbevolking werkzaam is in de agrosector. Verhoudingsgewijs draagt de agrosector dus zeker niet méér bij aan het bbp dan andere sectoren.

De boer is voor de verkoop van zijn producten afhankelijk van de grote supermarkten: er zijn slechts vijf inkoopkantoren voor die grote partijen. En die hebben behoefte aan een standaardproduct dat op veel plekken in de wereld te verkopen is en een concurrerende prijs heeft. Door deze strategie zijn boeren genoopt hun kostprijzen te verlagen en dus aan schaalvergroting te doen.

Slechts een kwart van onze voedselproductie consumeren we zelf. Die wordt afgezet via supermarkten (80 procent) en speciaalzaken (20 procent). Terwijl boeren driekwart van hun productie exporteren, bestaat de helft van ons boodschappenmandje uit producten die van elders komen. Een gemiddelde hap in Nederland heeft 30.000 kilometer afgelegd. Zelfs het voedsel dat op Nederlandse bodem is verbouwd, maakt vaak een lange omweg. Denk aan de ham uit Italië, die van Nederlandse varkens komt.

De consument beschikt over een overvloed aan voedsel tegen lage prijzen en de agro-industrie vaart er wel bij. Maar de boer verdient er weinig aan. De kostprijs voor een kilo aardappelen of uien is slechts 10 procent van de winkelprijs. Een groot deel van de winst gaat naar de tussenhandel, de transportsector en de supermarkten, die ook nog eens met elkaar concurreren. Intensiveren is vaak de enige uitweg voor de boer om overeind te blijven.

Noodzaak tot verandering

Economisch gezien heeft dit systeem goed gewerkt. Maar de benodigde milieumaatregelen leiden tot steeds hogere kosten en de stikstofcrisis heeft laten zien dat er nog steeds onvoldoende rekening wordt gehouden met de kwaliteit van de leefomgeving. Het economische plaatje komt er anders uit te zien als de maatschappelijke kosten, met name de effecten op natuur en gezondheid, worden meegerekend. Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) schat die van de Nederlandse landbouw op 6,5 miljard euro per jaar. Dit is mogelijk wat laag, aangezien de maatschappelijke kosten van alleen al het stikstofgebruik op natuur en gezondheid worden geschat op zo'n 6 miljard per jaar (zie 3.4), maar de getallen zijn met een vrij grote onzekerheid omgeven. In elk geval is de schade zeer groot, gegeven een toegevoegde waarde van 10 miljard in de land- en tuinbouw. De totale omzet van de agroketen is 50 miljard euro.

Ketenpartijen en boeren kunnen deels zelf aan de slag met verduurzaming. Sommige boeren zijn in staat om daar zelf invulling aan te geven: denk aan onderscheid op smaak, kwaliteit en dergelijke. Vaak passen daar nichemarkten bij, waar hogere marges haalbaar zijn. Verder kan de boer via samenwerking met andere boeren schaalvoordelen realiseren, streekproducten maken, zich onderscheiden door duurzaamheidsprestaties, transparante ketens opzetten en de lokale afzet vergroten door bijvoorbeeld voedselpakketten direct aan de consument te leveren, dus zonder tussenhandel. Anderen halen een deel van hun inkomen uit met de landbouw verweven diensten, zoals natuurbeheer of zorglandbouw.

Uiteindelijk zal de overheid behulpzaam moeten zijn om het landbouwsysteem stapsgewijs om te schakelen naar een vorm die wel past binnen de milieueisen. Dat kan door heldere doelen te stellen op het gebied van klimaat, water en stikstof en door budget beschikbaar te stellen voor de omschakeling. Het zorgt uiteindelijk voor een forse reductie in maatschappelijke kosten. Daarnaast zal de overheid de inspanningen van boeren voor landschap, biodiversiteit, natuur, waterkwaliteit en koolstofopslag moeten belonen.

Kritische prestatie-indicatoren

Voor het integraal sturen op doelen zou de overheid kritische prestatie-indicatoren (KPI's) moeten ontwerpen die aangeven waar een bedrijf, een regio en het land staan, en die door verschillende partijen kunnen worden gebruikt om die prestaties te belonen. KPI's zijn integrale resultaatgerichte indicatoren voor onderdelen van het landbouwsysteem. Ze sturen op doelen en resultaten, en niet op de maatregelen of het proces. Daarbij gaat het niet alleen om het verminderen van stikstofverliezen, maar ook om een integrale benadering van het verduurzamen van de landbouw, waarbij behoud dan wel verbetering van bodem-, lucht- en waterkwaliteit centraal staan. Er zijn bijvoorbeeld KPI's geformuleerd voor het stikstofoverschot en voor de organischestofbalans van de bodem. Maatregelen zoals diversificatie van gewassen, strokenteelt, bodembewerking en een andere bemesting zijn dan middelen om een KPI te halen.

Het realiseren van de KPI's en dus de doelen kan deels aan de markt overgelaten worden via duurzaamheidsschema's – denk aan het sterrensysteem voor dierenwelzijn. De hogere kosten van voedsel zijn voor de consument in beeld te brengen via een integrale kostenbenadering, waarin alle maatschappelijke kosten verrekend zijn. Hetzelfde geldt voor de maatschappelijke kosten verbonden aan minder duurzame productie, de eerdergenoemde 6,5 miljard euro.

Maar de KPI's kunnen ook de basis vormen voor een systeem dat de maatschappelijke diensten vergoedt en daarmee de extra kosten compenseert in gebieden waar de maatschappelijke opgave en dus kosten voor milieumaatregelen het grootst zijn. Kern is dat voedselproductie niet de enige maatschappelijke dienst is die moet worden beloond. Ook andere diensten, zoals het beheer van landschap en de bescherming van biodiversiteit, verdienen aandacht. De KPI-systematiek kan heel goed worden gebruikt om tot andere verdienmodellen te komen.

Wat kunt u doen?

– Jan Willem Erisman

Om uit de stikstofcrisis te komen moeten alle partijen iets bijdragen. Wat kunt u als consument doen?

Het model van de stikstofvoetafdruk

Om inzichtelijk te maken wat de consument bijdraagt aan de stikstofverliezen naar het milieu heeft de universiteit van Virginia samen met het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) een model ontwikkeld voor de zogeheten stikstofvoetafdruk: Nitrogen Footprint (N-print.org). Op basis van individuele voedselconsumptie, energievoorziening thuis, woon-werkverkeer en reisgedrag wordt het verlies aan reactieve stikstof naar het milieu berekend. Deze totale stikstofverliezen worden vergeleken met de uitstoot van de 'gemiddelde Nederlander' en er worden aanbevelingen gedaan om de uitstoot te beperken. Als voorbeeld laat figuur 38 het stikstofverlies in gram stikstof zien bij de consumptie van verschillende lunchbroodjes: een sandwich met groente, kaas, tonijn of vleeswaren. In de figuur is onderscheid gemaakt in de stikstof die wordt geconsumeerd (N-inname) en

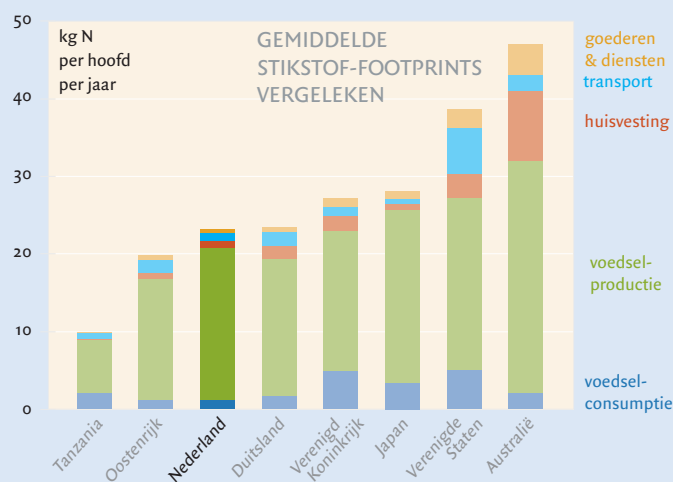


Figuur 38. De stikstofvoetafdruk van een lunchsandwich.

het stikstofverlies (daarboven) dat optreedt in de voedselketen, bij transport of gebruik op het land. Duidelijk is dat de sandwich met groente de laagste stikstofverliezen geeft en die met vleeswaren de hoogste. In het algemeen leiden diëten met een lage stikstofvoetafdruk ook tot een betere gezondheid. De dagelijkse eiwitbehoefte is vijf tot tien gram stikstof per dag en die wordt al overgeschreden bij de consumptie van één sandwich met vleeswaren. Er treedt altijd stikstofverlies op bij consumptie van voedsel, ook bij consumptie van een sandwich met groente. Het stikstofgebruik is nooit honderd procent efficiënt.

Internationale vergelijking

De voetafdruk, uitgedrukt als stikstofverbruik en verliezen naar het milieu per persoon, verschilt per land omdat de voedselproductiemethoden verschillen. De gemiddelde stikstofverliezen voor een reeks landen zijn weergegeven in figuur 39. De voetafdruk wordt voor driekwart bepaald door de voedselcon-



Figuur 39. Gemiddelde stikstofvoetafdruk per persoon voor verschillende landen (Bron: N-print.org)

sumptie. Het verlies als gevolg van voedselconsumptie is het hoogst in de ontwikkelde landen. De voetafdruk is het grootst in de Verenigde Staten en Australië. Dat komt door een hoger stikstofverlies bij voedselconsumptie en -productie: verwarming, koeling, vervoer en fabrieken gebruiken veel energie. In ontwikkelingslanden is de voetafdruk veel lager, zoals blijkt uit het voorbeeld van Tanzania. Daar ligt het consumptieniveau lager en wordt voedsel geproduceerd met veel minder stikstofaanvoer.

4.6 De stikstofcrisis ligt nog lang niet achter ons

– Jan Willem Erisman & Wim de Vries

Na de uitspraak van de Raad van State op 29 mei 2019 heeft de overheid verschillende pogingen gedaan om de vergunningverlening weer vlot te trekken. De economie werd immers sterk gehinderd door het gebrek aan stikstofruimte. In 2020 kwam er een Spoedwet aanpak stikstof en een Wet stikstofreductie en natuurverbetering. Toch is de stikstofdepositie in Nederland nog niet afgenomen.

Adviescolleges en een directoraat-generaal Stikstof

De commissie-Remkes, oftewel het Adviescollege Stikstofproblematiek, werd in het leven geroepen om voor de korte en de lange termijn beleidsadviezen te leveren. Zij heeft een aantal adviesrapporten uitgebracht: ‘Niet alles kan’ (25 september 2019), ‘Beweiden en bemesten in 2020’ (19 december 2019), ‘Advies luchtvaartsector’ (15 januari 2020) en ‘Niet alles kan overal’ (8 juni 2020). Het belangrijkste advies van de commissie was om de stikstofuitstoot in 2030 te halveren en te zorgen dat in 2050 de instandhoudingsdoelen voor Natura 2000-gebieden ten aanzien van stikstof gehaald zouden worden. Daarnaast moest er een drempelwaarde worden geïntroduceerd voor tijdelijke en geringe stikstofemissies uit de bouwsector.

In 2020 bracht ook het Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof (de commissie-Hordijk) advies uit. De voornaamste opdracht van het kabinet aan deze commissie was te adviseren over de bestaande meet-

en rekenmethodiek voor de relatie tussen stikstofuitstoot en stikstofdepositie. In februari 2020 bracht deze commissie het advies 'Niet uit de lucht gegrepen' uit en in juni 2020 'Meer meten, robuuster rekenen'. Een van de belangrijkste conclusies van de commissie-Hordijk is dat de huidige wetenschappelijke aanpak voor het meten en berekenen van stikstofneerslag op regionale schaal geschikt en betrouwbaar is.

Spoedwet aanpak stikstof

Inmiddels is er een directoraat-generaal Stikstof in het leven geroepen, waar meer dan honderd mensen werken. Dit geeft aan hoe belangrijk én complex het onderwerp is. Op 1 januari 2020 is de Spoedwet aanpak stikstof in werking getreden. Die is bedoeld om de vergunningverlening voor stikstofveroorzakende activiteiten op korte termijn weer mogelijk te maken. Door stikstofemissiereductie wordt ruimte gecreëerd voor nieuwe projecten. De beschikbare depositieruimte mag maar tot 70 procent worden opgevuld, 30 procent komt ten goede aan de natuur.

Daartoe zijn drie maatregelen geïntroduceerd. De maximumsnelheid op snelwegen werd in maart 2020 overdag verlaagd naar 100 km/u, er zou een warme sanering van de varkenshouderij komen en het veevoer zou worden aangepast. De laatste maatregel is overigens niet doorgevoerd in 2020. De ruimte die met de maatregelen is gecreëerd kan maar eenmalig worden opgevuld, voor nieuwe projecten zijn aanvullende maatregelen nodig. Een project heeft ruimte nodig wanneer het significante gevolgen kan hebben voor een Natura 2000-gebied.

Wanneer de projectaanvrager zelf emissiereducerende maatregelen neemt en die voor een deel weer opvult, het zogeheten intern salderen, is geen vergunning nodig. De discussie die hierbij ontstaat is of men moet uitgaan van de vergunde emissie of van de actuele, gerealiseerde emissie. In de praktijk blijken die waardes behoorlijk van elkaar te kunnen afwijken.

Wet stikstofreductie en natuurverbetering

Na de Spoedwet aanpak stikstof werd in december 2020 het wetsvoorstel Wet stikstofreductie en natuurverbetering aangenomen door

de Tweede en Eerste Kamer. Deze Stikstofwet en de Spoedwet aanpak stikstof bestaan naast elkaar. Voor de wet is een budget van vijf miljard euro gereserveerd, drie miljard voor natuurherstel tot 2030 en twee miljard voor bronmaatregelen. De Stikstofwet voorziet in een nieuwe, structurele aanpak van de stikstofproblematiek en bevat de volgende punten:

- een resultaatsverplichting om stikstofdepositie in alle Natura 2000-gebieden te verminderen door middel van vastgestelde omgevingswaarden. Een bepaald percentage van alle stikstofgevoelige habitattypen en leefgebieden van soorten in Natura 2000-gebieden moet onder de kritische depositiewaarde (KDW) liggen: ten minste 40 procent in 2025, 50 procent in 2030 en 74 procent in 2035;
- een verplichting voor de minister van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit om een programma stikstofreductie en natuurverbetering met bron- en natuurmaatregelen vast te stellen voor het verminderen van de stikstofdepositie in Natura 2000-gebieden en om te voldoen aan instandhoudingsdoelstellingen;
- periodieke monitoring en bijsturing van het programma en zogenoemde omgevingswaarden;
- Gedeputeerde Staten moeten provinciale gebiedsplannen opstellen waarin de bijdrage aan de landelijke omgevingswaarde is uitgewerkt;
- een programma met bron- en eventuele natuurmaatregelen om bepaalde onder het PAS afgegeven vergunningen te legaliseren;
- een gedeeltelijke vrijstelling van de vergunningplicht voor de bouwsector voor tijdelijke stikstofemissies tijdens het bouwen.

De praktijk anno 2021

Twee jaar na de uitspraak van de Raad van State is er dus een akkoord over de structurele aanpak van de stikstofproblematiek. Daarbij is de depositie nog niet gedaald en lopen er vele gerechtelijke procedures. In navolging van de verschillende adviezen – onder meer van de afdeling Advisering van de Raad van State en de adviescolleges – is de doelstelling om het areaal onder de kritische depositiewaarde te brengen wettelijk verankerd. Veel belanghebbende partijen zijn ontevreden. Ofwel omdat de maatregelen en de doelstellingen niet ver ge-

noeg gaan om de natuur te beschermen. Ofwel omdat ze juist te ver gaan en te veel bij de landbouw worden neergelegd. De natuurorganisaties Natuur & Milieu en Natuurmonumenten, de werkgeversorganisatie VNO-NCW, Bouwend Nederland en de landbouworganisatie LTO hebben vanuit deze ontevredenheid gewerkt aan een gezamenlijk alternatief voorstel, het zogenoemde Versnellingsakkoord.

Er zijn bij verschillende partijen ook twijfels over het programma van maatregelen. Zal het voldoende succesvol zijn om de emissies te reduceren? De aanpak bestaat tenslotte nog uit vrijwillige maatregelen. En er is twijfel over de juridische houdbaarheid van bepaalde instrumenten, zoals de vrijstelling voor bouwactiviteiten, het salderen en de daarbij gehanteerde uitgangspunten, het verhuren van stikstofruimte en de stikstofbank oftewel het stikstofregister, dat transacties en de stikstofruimte bijhoudt. Inmiddels zijn er in opdracht van het directoraat-generaal Stikstof enkele rapporten verschenen, die aangeven dat de instandhoudingsdoelen minimaal 70 procent emissiereductie vragen, die ook nog eens sneller dan nu gerealiseerd moeten worden. De stikstofcrisis ligt dus nog lang niet achter ons.

INTERVIEW – Sjaak van der Tak, LTO Nederland
‘LTO Nederland wil onderdeel van de oplossing zijn’



Wat is de impact van de stikstofcrisis op de boer?

‘Die is heftig. Mensen verkeren in onzekerheid. Het grootste deel van de boeren vindt het goed dat er een plan is, maar niet allemaal. Het versnellingsakkoord ‘Een duurzaam evenwicht’, dat in brede samenwerking met natuur- en ondernemersorganisaties is opgesteld, noem ik wel een coalition of the willing, van mensen en organisaties die dit vraagstuk ook zien. En daarmee probeer je verder te komen. Ik vind ook dat als de samenleving verduurzaamt, je als samenleving een oplossing voor dit soort vraagstukken moet vinden, met de politiek als eindverantwoordelijke.’

Met welke maatregelen willen jullie de stikstofuitstoot terugdringen?

‘In de landbouw is er op dit moment vooral een opgave bij de melkveehouderij. Met ons akkoord is er sprake van een drieslag. Stap één is stikstofreductie door innovaties zoals het scheiden en verdunnen van mest, mest gebruiken om kunstmestgebruik te verminderen, minder eiwitrijk voer en emissiereductie door betere luchtwassers. Stap twee is het aanpakken van piekbelasters door innovatie, maar ook door vrijwillige verplaatsing of stoppen van deze bedrijven. Als laatste gaat er rechtstreeks geld naar de natuur door agrarisch natuurbeheer te stimuleren waarbij boerengrond ook echt boerengrond blijft. Alles bij elkaar is in negen jaar tijd 15,3 miljard euro nodig om deze belangrijke stappen te zetten.’

Moeten we niet richting een kleinschaligere landbouw met evenveel boeren?

‘Ik ga niet één profiel schetsen van wat voor soort boer er moet komen. Ik sta voor iedere boer die wil nadenken over dit vraagstuk. Ongeveer 30 procent van de boerenbedrijven heeft geen opvolger. Er blijft krimp. Van die bedrijven gaat een deel naar de buurman, een ander deel gaat naar het agrarisch natuurbe-

heer of stopt. En dat zijn lastige gesprekken aan de keukentafel. Dat zie ik ook. Maar het is de overheid die de boer een kader moet geven.'

Is onze exportpositie nog wel houdbaar als daarvoor veel stikstof in de vorm van kunstmest en veevoer wordt geïmporteerd?

'Ik ben niet voor minder export. Ja, we importeren spullen, maar bijvoorbeeld de soja-import betreft het restproduct van sojaolie. Ruim een kwart van onze export gaat naar Duitsland. Dat blijft in dezelfde zone, Noordwest-Europa; die productie hoort hier. En voedsel is een eerste levensbehoefte! Als Nederland produceren we voedsel van hoge kwaliteit op zó'n efficiënte manier dat iedereen juist komt kijken hoe we dat doen. Een goede ontwikkeling is ook dat Nederlandse boerenbedrijven elders op de wereld een tweede of derde bedrijf opzetten. Hiermee gebruik je de goede Nederlandse infrastructuur en kennis ook voor de lokale markt.'

En hoe nu verder?

'Uiteindelijk moeten we dit vraagstuk met z'n allen oplossen. Met het versnelingsakkoord bieden we boeren een kader met verschillende mogelijkheden. Maar nu is het aan de overheid om dit om te zetten in beleid en de boeren perspectief te bieden. De onzekerheid bij boeren moet worden weggenomen. We gaan naar een duurzamere landbouw, waarbij boeren als de natuurbeheerders van hun eigen platteland beloond worden. We willen onderdeel van de oplossing zijn.'

Merle Scholten & Jelle Reumer

Nawoord

– Jan Willem Erisman & Wim de Vries

In mei 2019 deed de Raad van State een uitspraak met vergaande gevolgen voor vele projecten in Nederland. Het oordeelde dat het Programma Aanpak Stikstof (PAS) niet mag worden gebruikt voor het verlenen van vergunningen die extra neerslag van stikstofverbindingen in natuurgebieden veroorzaken. Het PAS-beleid kon een structurele daling van de depositie niet garanderen en daarmee werd onvoldoende gedaan om de instandhoudingsdoelen voor Natura 2000-gebieden te garanderen.

De regering was daar niet op voorbereid en had ook geen alternatief voor het PAS op de plank liggen. Het gevolg van de uitspraak was dat er geen extra stikstofdepositie op Natura 2000-gebieden bij mocht voordat de depositie afnam. Duizenden projecten kwamen stil te liggen. ABN AMRO schatte de kosten hiervan op veertien miljard euro. Inmiddels zijn bij de provincies tientallen stikstofspecialisten aangenomen, er is een directoraat-generaal Stikstof met nu al meer dan honderd medewerkers, er zijn commissies in het leven geroepen en vele plannen, notities en berekeningen gemaakt. Ook het aantal juridische procedures is fors gestegen.

De belangen zijn groot, waardoor al snel vragen gesteld werden over de onderbouwing van het beleid: kloppen de modellen wel? Wordt er

genoeg gemeten? Zijn de kritische depositiewaarden niet te laag? Zijn de Natura 2000-gebieden wel goed gekozen? Kloppen de bijdragen wel van de sectoren aan de depositie?

Dit boek geeft een zo goed mogelijk overzicht van wat we weten van de stikstofproblematiek en welke mogelijkheden er zijn om uit de stikstofcrisis te komen. Een eerste stap is een goed overzicht van de kennis over stikstof. Die is in Nederland heel groot omdat we al decennia geleden geconfronteerd werden met de milieugevolgen van een te hoge stikstofuitstoot. Daardoor kunnen we putten uit veel onderzoeken, maatregelen, data en monitoringgegevens. Er bestaat onder wetenschappers geen twijfel dat we de kennis hebben om de problematiek goed in kaart te brengen: emissieprocessen, verspreiding, neerslag, kringlopen en uiteindelijk de effecten zijn goed bekend. Dat wil niet zeggen dat we alles weten, maar het gat tussen ecologische draagkracht en stikstofneerslag is op veel plaatsen momenteel nog zo groot, mede door de overbelasting gedurende vele decennia, dat onzekerheid niet het grootste probleem is voor het beleid.

Veel belangrijker is de discussie over welke waarden we in de maatschappij nastreven en welke keuzes we daarin maken. We hechten in ons land aan de ene kant zwaar aan de kwaliteit van natuur, water, bodem, lucht, klimaat, biodiversiteit en landschap. En we zijn voor de bescherming ervan internationale verplichtingen aangegaan. Denk aan het Klimaatakkoord van Parijs uit 2015 en de Europese verplichting om in 2030 broeikasgasemissies met 55 procent te reduceren. Maar ook aan de Vogel- en Habitatrichtlijn waar de stikstofwetgeving uit voortkomt en de Kaderrichtlijn Water, die normen stelt voor waterkwaliteit, om de belangrijkste te noemen.

Aan de andere kant willen we voorkomen dat er economische belemmeringen voortkomen uit strenge maatregelen om aan de afspraken te voldoen. We willen ook graag de woningnood oplossen en dus huizen bouwen. We willen wegen uitbreiden om de mobiliteit te bevorderen. Ook is er angst dat we de mensen niet meer kunnen voeden als we landbouwproductie moeten gaan verminderen voor het milieu of klimaat, ook al produceert Nederland maar 1 procent van al het voedsel

op de wereld. Dit zijn veel belangrijkere afwegingen dan de onzekerheid in kennis.

De commissie-Remkes gebruikte de titel ‘Niet alles kan overal’ voor haar belangrijke en degelijke rapport dat in 2020 uitkwam. Het geeft aan dat we keuzes moeten maken om een goede balans tussen economie en ecologie te garanderen. Daarbij moeten we ons realiseren dat bepaalde zaken vastliggen als gevolg van de internationale verplichtingen die we zijn aangegaan. Zo zijn de Natura 2000-gebieden niet zomaar te vervangen door andere gebieden. Ook komen we niet onder bepaalde verplichtingen uit, zoals het Klimaatakkoord of de Europese richtlijnen. Hoe daaraan te voldoen is een politieke keuze en vergt een langetermijnvisie, een vertaling van doelen en verplichtingen naar gebieden en bedrijven binnen die gebieden, goed georganiseerde regionale uitvoeringsorganisaties, instrumenten om de transitie te faciliteren en toekomstige verdienmodellen. Wij hopen dat we met dit boek hebben bijgedragen aan het inzicht en de kennis die nodig zijn om de noodzakelijke politieke keuzes te maken.

AUTEURS

Prof. dr. M.P. Berg, hoogleraar bodemfauna en ecosysteemdynamiek, Vrije Universiteit Amsterdam en Rijksuniversiteit Groningen
Dr. R. Bobbink, senior onderzoeker ecologie en biogeochemie, B-Ware
Prof. dr. J.M. van den Broek, emeritus hoogleraar (biomedische) wetenschapscommunicatie, Universiteit Leiden en LUMC
Dr. E. Brouwer, senior onderzoeker ecologie, B-Ware
Ir. T. Brouwer, eigenaar adviesbureau Gispoint
Dr. ir. A.B. van den Burg, onderzoeker stikstof in voedselketens, Radboud Universiteit, en oprichter stichting BioSFeer
Dr. H.F. van Dobben, onderzoeker vegetatie en bosecologie, Wageningen University & Research
Dr. ir. A.M. van Doorn, projectleider en programmacoördinator biodiversiteit in de landbouw, Wageningen University & Research
Prof. dr. ing. J.W. Erisman, hoogleraar milieu en duurzaamheid, Universiteit Leiden
Mr. dr. F.M. Fleurke, universitair docent Europees milieurecht, Tilburg University
Mr. dr. R.H.W. Frins, universitair docent algemeen bestuursrecht en omgevingsrecht, Radboud Universiteit
Dr. ir. J.J.M. van Grinsven, senior wetenschappelijk onderzoeker en programmeur landbouw, milieu en duurzaamheid, Planbureau voor de Leefomgeving (PBL)
Dr. ir. J. Kros, onderzoeker bodem en milieu, Wageningen University & Research
Ir. G. Migchels, coördinator groen ondernemen met veehouderij, Wageningen University & Research
Prof. dr. J.W.F. Reumer, emeritus hoogleraar vertebratenpaleontologie, Universiteit Utrecht, bestuurslid stichting Biowetenschappen en Maatschappij
Prof. dr. ir. C.P. van Schayck, hoogleraar preventieve geneeskunde, Universiteit Maastricht
M. Scholten, Msc., molecular en cellular life sciences, Universiteit Utrecht
Prof. dr. H. Siepel, hoogleraar dierecologie, Radboud Universiteit
Dr. S. Teurlincx, projectmanager aquatische ecologie, NIOO-KNAW
Dr. A. Tietema, onderzoeker earth surface science, Universiteit van Amsterdam
Dr. A.J. Veraart, universitair docent aquatische ecologie en milieubiologie, Radboud Universiteit

Prof. dr. ir. F.T. de Vries, hoogleraar earth surface science, Universiteit van Amsterdam
 Prof. dr. ir. W. de Vries, hoogleraar integrale stikstofeffectanalyse, Wageningen University & Research
 Dr. ir. D.B. van de Waal, senior onderzoeker aquatische ecologie, NIOO-KNAW
 Prof. dr. ir. M.F. Wallis de Vries, hoogleraar ecologie & bescherming van insecten, Wageningen University & Research
 Dr. ir. R.J. Wichink Kruit, onderzoeker luchtkwaliteit, RIVM
 Dr. M.C. van Zanten, hoofd Emissieregistratie, RIVM

BRONNEN

Stikstofproblematiek

Buisman et al 2010: <https://www.pbl.nl/publicaties/Zure-regen.-Een-analyse-van-dertig-jaar-Nederlandse-verzuringproblematiek>
 Erisman, J.W., 2000. De Vliegende Geest. Ammoniak uit de landbouw en de gevolgen voor de natuur. <https://www.janwillemerisman.nl/de-vliegende-geest/>
 Hordijk, L., J.W. Erisman, H. Eskes, J.C. Hanekamp, M.C. Krol, P.F. Levelt, M. Schaap en W. de Vries, 2020. Meer meten, robuuster rekenen. Eindrapport van het Adviescollege Meten en Berekenen Stikstof. Minister van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2020/06/15/meer-meten-robuuster-rekenen>
 Oenema, O., 2019. Factsheet Stikstofbronnen. <https://edepot.wur.nl/503747>
 TNO 2019. Factsheet stikstof emissie en depositie. <https://www.tno.nl/nl/stikstof/>
 Van Pul, A., R. Wichink Kruit, A. Frumau, J. Kros en W. de Vries, 2018. Trends in ammoniak- en ammonium concentraties en depositie. Vfocus, augustus 2018, 18-21.
 Website RIVM stikstof: <https://www.rivm.nl/stikstof>

Stikstofeffecten

Bergsma H., J. Vogels, A. van den Burg en R. Bobbink, 2018. Is de bodemverzuring in Nederland onomkeerbaar? Vakblad Natuur, Bos en Landschap 144, 4-7.
 Bobbink, R., 2021. Effecten van stikstofdepositie nu en in 2030: een analyse. Onderzoekcentrum B-WARE, Nijmegen. Rapportnummer RP-20.135.21.35.
 Bobbink, R., H.L.T. Bergsma, J. den Ouden en M.L. Weijters, 2017. Bodemverzuring in droog zandlandschap: na het zuur geen zoet? Landschap 34(2), 61-69.
 Bobbink, R. en M. L. Weijters, 2018. Verschil in effecten op natuur van gereduceerd versus geoxideerd stikstof. Lucht, maart 2018, 23-27.
 Bobbink, R., 2019. Stikstofdepositie: sluipmoordenaar voor natuur. Bodem 6, 34-37.
 Boxman A.W., 2002. Is stikstofverzadiging in Nederlandse bossen omkeerbaar? Vakblad Natuurbeheer 8, 127-130.

De Vries, W., 2008. Verzuuring: oorzaken, effecten, kritische belastingen en monitoring van de gevolgen van ingezet beleid. Wageningen, Alterra Wageningen UR, Rapport 1699, 88pp.

De Vries, W., P. Bolhuis, A. van de Burg en R. Bobbink, 2017. Doorgaande verzuuring van bosbodems: oorzaken en gevolgen voor het boscossysteem. Vakblad Natuur, Bos en Landschap, september 2017, 32-35.

De Vries, W., J. Kros, J., E. Wattel-Koekkoek en A. van Pul, 2018. Trends in ammonium en nitraat concentraties in bodemvocht en grondwater. Vfocus, oktober 2018, 40-43.

Kros, J., W. de Vries, A. van Pul, E. Wattel-Koekkoek, R. Wichink Kruit, K. van Herk en A. Frumau, 2018. Effecten van het verzurings- en ammoniakbeleid. Vfocus, juni 2018, 26-29.

Lucassen E.C.H.E.T., L.J.L. van den Berg, A.J.P. Smolders, R.C.H. Aben, J.G.M. Roelofs en R. Bobbink, 2014. Bodemverzuuring en achteruitgang zomereik. Landschap 2014/4, 185-192.

Van den Burg, A.B., 2017. Rammelende eieren en brekebenen bij de koolmees: verzuuring terug bij af? Vakblad Natuur, Bos en Landschap 136, 3-7.

Van den Burg, A.B., 2019. Blijft de rekening van de stikstofemissie nu nog bij de natuur liggen? Milieu en Recht 2019/19, 112-116.

Van Dobben, H.F., R. Bobbink, D. Bal en A. van Hinsberg, 2012. Overzicht van kritische depositiewaarden voor stikstof, toegepast op habitattypen en leefgebieden van Natura 2000. Alterra-rapport 2397, Wageningen.

Van Herk, K., J. Kros, W. de Vries en A. van Pul, 2018. Ammoniak in het milieu: trends bij korstmossen. Vfocus, December 2018: 30-33.

Wamelink, G.W.W., P.W. Goedhart, H.D. Roelofs, R. Bobbink, H.F. van Dobben en Data providers, 2021. Relaties tussen de hoeveelheid stikstofdepositie en de kwaliteit van habitattypen. Wageningen Environmental Research, Rapport WENR 3089, Wageningen.

Website RIVM: <https://www.rivm.nl/ggd-richtlijn-medische-milieukunde-luchtkwaliteit-en-gezondheid/gezondheidseffecten-luchtverontreiniging/context-gezondheidseffecten-luchtverontreiniging>.

Stikstofherstelmaatregelen

Bobbink, R., R. Loeb, E. Verbaarschot, M. Weijters, J. Vogels, H. Bergsma en F. van der Zee, 2020. Werkt steenmeel als herstelmaatregel tegen bodemverzuuring in heischrale graslanden. Vakblad Natuur, Bos en Landschap 166, juni 2020, 16-19.

De Vries, W., M.J. Weijters, J.J. de Jong, S.P.J. van Delft, J. Bloem, A. van den Burg, G.A. van Duinen, E. Verbaarschot en R. Bobbink, 2019. Verzuuring van loofbossen op droge zandgronden en herstelmogelijkheden door steenmeeltoediening. Rapport OBN229-DZ. Vereniging van Bos- en Natuurterreinen (VBNE), Driebergen, 136 blz.

Hoek, D.-J. van der, B. de Knecht en P. Giesen, 2020. Bijdrage van herstelmaatregelen aan verbeteren biodiversiteit in het Natuurnetwerk. Achtergrondrapport lerende evaluatie van het Natuurpact, Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag.

Smits, N.A.C. en D. Bal, eds., 2014a. Herstelstrategieën stikstofgevoelige habitats. Ecologische onderbouwing van de Programmatische Aanpak Stikstof (PAS). Deel I: Algemene inleiding herstelstrategieën: beleid, kennis en maatregelen, Alterra, Wageningen UR & Programmadirectie Natura 2000 van het Ministerie van Economische zaken, Wageningen.

Smits, N.A.C., A. S. Adams, D. Bal en H.M. Beije, eds., 2014b. Herstelstrategieën stikstofgevoelige habitats. Ecologische onderbouwing van de Programmatische Aanpak Stikstof (PAS). Deel II: Herstelstrategieën voor stikstofgevoelige habitats, Alterra, Wageningen UR & Programmadirectie Natura 2000 van het Ministerie van Economische zaken, Wageningen.

Van den Burg, A.B., 2019. Schelpkalk als oplossing voor gebroken pootjes bij bosvogels. Vakblad Natuur, Bos en Landschap 157, 26-30.

Van den Burg, A.B., F. Berendse, H.F. van Dobben, J. Kros, R. Bobbink, J.G.M. Roelofs, B. Odé, C. van Swaay, H. Siebel, H. Sierdsema en W. de Vries, 2021. Stikstof en natuurherstel. Onderzoek naar een ecologisch noodzakelijke reductiedoelstelling van stikstof. Wereld Natuur Fonds Nederland, Zeist.

Van Diggelen, R., H. Bergsma, R.-J. Bijlsma, R. Bobbink, A. van den Burg, J. Sevinck, H. Siebel, H. Siepel, J. Vogels, W. de Vries en M. Weijters, 2019. Steenmeel en natuurherstel: een gelukkige relatie of een risicovolle combinatie? Vakblad Natuur, Bos en Landschap, mei 2019, 20-23.

WNF, 2021. Stikstof en natuurherstel, Onderzoek naar een ecologisch noodzakelijke reductiedoelstelling van stikstof, Wereld Natuur Fonds Nederland, Zeist.

Stikstofaanpak en -beleid

Adviescollege Stikstofproblematiek, 2020. Niet alles kan overal: Eindadvies over structurele aanpak. Adviescollege Stikstofproblematiek, Amersfoort.

Bakker, M.M., J.P. Witte, G.H. Ros, W. de Vries, B. Mashhoodi, S. de Vries, H. Kros en T. Kuhlman, 2021. Zoneren biedt landbouw toekomstperspectief. Milieu Dossier, april 2021, 39-44.

Berenschot en BugelHajema, 2020. Beleidsevaluatie van het PAS en het wets-traject voorafgaand aan het PAS. <https://www.rijksoverheid.nl/documenten/rapporten/2020/10/14/beleidsevaluatie-van-het-pas-en-het-wetstraject-voorafgaand-aan-het-pas>

BugelHajema, H+N+S Landschapsarchitecten, Sweco, TAUW, Witteveen+Bos, 2021. Naar een natuurinclusieve ruimtelijke inrichting rond natura-2000 gebieden.

De Vries, W., 2020. Bouwstenen voor nieuw stikstofbeleid. Milieu Dossier, april 2020, 37-43.

De Vries, W., G.H. Ros, J. Kros en R. Jongeneel, 2020. Eindrapport Adviescollege Stikstofproblematiek: een evaluatie. Milieu Dossier, september 2020, 41-47.

Erisman, J.W. en T. Brouwer, 2021. De stikstofdepositie bijdragekaart voor effectieve emissievermindering uit de landbouw. Vol. UL-CML-rapport 200, Universiteit Leiden, Centrum voor Milieuwetenschappen, Leiden.

Erisman, J.W. en B. Strootman, 2021. Naar een ontspannen Nederland. <https://ontspannennederland.nl/>

Frins, R.H.W., 2021. Gloort er licht aan het einde van de stikstofunnel? Een analyse van het wetsvoorstel stikstofreductie en natuurverbetering. Tijdschrift voor Bouwrecht, 14(1), 4-16.

Hermans, T., N.A.C. Smits, J. Dijkstra, P. Geerdink, K. Groenestein, J. Huijsmans, R. E. E. Jongschaap, R. Jongeneel, H. Kros, S. Munniks, N. Ogink, M. Ravesloot, G. Velthof en J. C. H. Voogd, 2020. Ruimtelijke aanpak van het stikstofprobleem, inzicht in oplossingsrichtingen vanuit landbouw en natuur. Wageningen UR, Wageningen.

Kuindersma, W., D. Kamphorst en F. Kistenkas, 2021. De gevolgen van de stikstofaanpak voor het natuur-beleid, Wageningen UR, Wageningen.

LTO Nederland, VNO-NCW, MKB-Nederland, Bouwend Nederland, Natuurmonumenten en Natuur & Milieu, 2021. Een Duurzaam Evenwicht, Versnellingsakkoord stikstofemissiereductie 2021-2030.

Paul, H., 2021. Stikstofruimte voor de Toekomst, Langetermijnverkenning stikstofproblematiek: doel, integraliteit en regie. ABDTOPConsult, Den Haag.

Ploegmakers, H., S. Turnhout, R.P.B. Foppen, J.C.J.M. de Kroon en H. Siepel, 2021. Natuurherstel na de PAS-uitspraak: van juridische zekerheid naar borging van ecologische effectiviteit. Milieu en Recht 2021/4, 10-17.

Ten Haar, B., 2021. Normeren en beprijzen van stikstofemissies. ABDTOPConsult, Den Haag.

Vink, M., L. Pols en F. van Dam, 2020. Stikstof: Ruimte voor perspectief, Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag.

Vink, M., A. van Hinsberg, C. Backes, D. Boezeman, P. van Egmond en D.-J. van der Hoek, 2021. Naar een uitweg uit de stikstofcrisis. Overwegingen bij een integrale, effectieve en juridisch houdbare aanpak, Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag.

Engelstalige bronnen figuuronderschriften

Figuur 5. Hertel, O. et al., 2006. Modelling nitrogen deposition on a local scale – A review of the current state of the art. Environmental Chemistry 3(5): 317-337.

Figuur 15. Sutton M.A. et al., 2013. Our Nutrient World: The challenge to pro-

duce more food and energy with less pollution. Global Overview of Nutrient Management. Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh & United Nations Environment Programme, Nairobi.

Figuur 18. Fowler, D. et al., 2018. The global nitrogen cycle in the twenty first century. Phil Trans R Soc B 368: 20130164. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>

Figuur 37. Website CEIP: https://ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/webdab_emepdatabase/reported_emissiondata/

REGISTER

Cursieve paginanummers verwijzen naar figuren, kaarten en tabellen

adem 13, 22, 49, 92, 94
aerosolen 29, 34, 57
akkerbouw 20, 89
aluminium 56, 60, 61, 64, 113
aminozuren 13, 23, 64, 65
ammoniak (NH_3) 14, 20, 28, 31, 34-36, 38-39, 42, 47, 57, 66-68, 85, 94, 104-106, 109, 114, 118-120
 beleid 43, 120, 120
 concentraties 35, 36
 emissie/uitstoot 23, 32, 35, 38-39, 40, 42, 44, 102, 104-106, 119, 120, 122, 124, 129
 gat 43-44
 schade 66-68, 85
ammonificatie 24-25, 51, 53
ammonium (NH_4) 24-25, 35, 47, 51, 52, 53-54, 60-61, 62, 67-68, 83
ammoniumnitraat (NH_4NO_3) 24-25, 27, 47, 49, 62
aquatisch milieu 81, 82, 90
astma 85, 86, 87
atmosfeer 21, 29, 29, 31, 50, 67, 68, 102, 109
auto's 38, 85, 106, 118
 zie ook wegverkeer

bacteriën 24, 26, 51-53, 55, 80-81
 Rhizobium 52-53
bemesting 50, 56, 76, 90, 110, 124
betalingsbereidheid 108-109, 111
binnenwateren 76-79
biodiversiteit 23, 45, 47, 49, 55, 60, 63, 65, 75, 77, 84, 95, 108, 109, 115
biomassa 28, 55, 56, 58, 90, 107
bladeren 57, 62-63, 66-67
blauwalgen 25, 27, 79, 81
bliksem 14, 27, 53
bodem 21, 22, 24-25, 27, 32, 50, 54-56, 59-61, 63, 67-68, 80, 82, 83-84, 90, 112-114, 134

bacteriën 24, 51, 52, 80
fauna 56, 112, 113
leven 48, 54-56
verzuring 22, 44, 47, 48, 49, 56, 58-61, 64-65, 67-68, 112-114, 123
voedselweb 54, 56, 58
bomen 44, 58, 61, 62, 90, 114
Bosch, Carl 14, 20, 94
bossen 48, 50, 53, 58, 61, 75-76, 89, 90, 110, 112-114
Bouwend Nederland 46, 69-70, 140
bouwsector 13, 41, 46, 68-70, 106-107, 121, 137, 139, 140, 144
bramen 48, 57, 63, 114
brandnetels 48, 63, 65, 115
brandstoffen *zie* energie
broeikasgassen 42, 50, 82, 88, 90-91, 109, 144
bronchitis 85, 86
buitenland, uitstoot uit 31, 32, 42, 97, 99-100, 102, 129-130

calcium 59, 60, 64, 114
chilisalpeter 19, 20, 94
coronacrisis 13, 87, 87, 106
cv-ketels 39, 118
cyanobacteriën *zie* blauwalgen 25, 27, 79, 81

denitrificatie 24-25, 49, 51-52, 81-83
depositie *zie* stikstof, depositie
dieren 28, 38-39, 63-65, 79-81, 113
 zie ook fauna, kippen; koeien; pluimvee; varkens; vee; vogels
doelstellingen 107, 120, 126, 129, 134, 139
drijfmest 24, 40, 105
drinkwater 50, 109
duurzaamheid 45, 69, 70, 95-96, 104, 133-134, 141, 142

ecologie 76-79, 84, 101, 128, 144-145
economie 14, 70, 108-111, 122-124, 126, 131-133, 127, 144-145
ecosysteem 23, 24, 48, 49, 55-58, 76-77, 90, 95, 109, 113
eiken 60, 62-63, 76, 115
eiwitten 24, 53, 64, 80, 105, 136, 141
elektriciteit 39, 106-107
emissie *zie* ammoniak; stikstof
energie 14, 20, 28, 41, 53, 88, 107, 118, 119, 135, 137
 fossiele 14, 28, 106, 107
Europees Hof 122, 127-128, 130

Europese Unie 35, 42, 97, 99, 106, 110, 117-122, 126-128, 130, 131, 144, 145
eutrofiëring 48, 57-58, 63, 78, 80, 108, 109
experimenten 59, 71, 75, 112, 113

fauna 56, 63-65, 76, 112-114
fijnstof 24, 28, 50, 67, 85, 88, 90, 106, 109
flora 57-63, 76
fosfaat 11, 76-77, 79, 80, 112-113, 119, 120
fosfor 56, 58, 64, 78
fytoplankton 79-81
 schuim door 48, 79-80

gebiedsgerichte aanpak 46, 100-102, 139
generiek beleid 102, 130
gezondheid 49, 84-87, 95, 108-111, 117, 113, 136
Gezondheidsraad 85
giftigheid 48, 56, 57, 60, 68, 77, 80-81, 85
grasland 44, 50, 57, 59, 63-64, 67, 72, 75, 76, 105
grassen 57, 63, 105, 112
grenswaarden 72, 120, 122, 128, 130-131
grondwater(stand) 24-25, 54, 58, 68, 72, 77, 78, 105, 109, 120, 123
guano 19, 84

Haber, Fritz 14, 20, 94
heide 61-63, 67, 76, 112-113
Hordijk, commissie- 131, 137-138
hydrologie 113, 115, 116
hypoxie (zuurstofgebrek) 80

ijzer(tekorten) 60, 77
industrie 21, 39, 107, 130
insecten 62-64, 76

kalk 59, 78, 112-113
KDW zie kritische depositiewaarde
kernfusie 23, 26
kilometervakken 102, 103, 104
kippen 28, 106, 121, 122
klimaat 50, 80, 88-91, 106, 109, 144
 opwarming 50, 78, 111
Klimaatakkoord (Parijs) 106, 144, 145
koeien 39, 105, 122

koolstof 26, 55, 58, 76, 88, 90
koolstofdioxide (CO₂) 50, 90, 93, 108
kosten 70, 87, 104-105, 131-134, 143
 batenanalyse 107-108, 110, 111, 133
kritische depositiewaarden (KDW's) 71-75, 97-104, 114, 128-130, 139
kritische prestatie-indicatoren (KPI's) 134
kroos 76-77, 81, 83-84
kunstmest 14, 20, 24, 39, 49, 52, 54, 94, 110, 142
kustwateren 80-81

lachgas (N₂O) 14, 49, 50, 55, 82, 83, 88-91, 111
landbouw 20, 22, 38-40, 45, 70, 88, 95-96, 102-104, 110, 115-116, 131-133, 141-142
 gebieden 17, 20, 36, 38, 54, 77, 79, 89, 90
 productie 17, 18, 20, 22, 132-133, 144
LML (meetnet luchtkwaliteit) 34-35
longschade 49, 50, 85, 87
LTO, landbouworganisatie 45, 46, 115, 130, 140, 141-142
lucht 14, 20, 24-25, 28, 34, 36, 49, 67, 85, 89, 90, 108, 117
 kwaliteit 34, 49, 49, 117
 schone 39, 42, 85-87, 108
 verontreiniging 20, 22, 42, 57, 85, 117
luchtvaart 28, 40-42, 137
luchtwassers 105, 106, 141
luchtwegklachten 49-50, 85-86
luchtwervelingen (turbulentie) 36

magnesium 50, 64, 68, 112
MAN (meetnet ammoniak) 34-35
meetapparatuur 33-36
meetnetten 33-34, 43, 65
melkvee 35, 104-105, 124-125, 141
mensen 17-18, 24-25, 27-28, 49, 54, 87, 88, 90, 108-109, 144
mest 22, 24-25, 28, 39, 43-44, 50, 52, 105-106, 118-121
 zie ook bemesting; kunstmest
methaan (CH₄) 77, 90-91
metingen 33-37, 43-44
micro-organismen 53, 56, 81
microben 55, 56, 62-63, 67-68, 84
milieu 22, 42, 45-46, 48, 65, 104, 107, 118-119, 122, 131, 133-136, 144
 maatregelen 48, 118, 119, 131, 133, 134
mineralen 40, 60, 64, 72, 112, 114

- mineralisatie 53, 58
- minimum, Wet van het 19
- modelberekeningen 36, 43, 72-73
- mossen 57, 61, 62, 67
- motoren, verbrandings- 25, 27, 107

- natriumnitraat (NaNO_3) 20, 94
- Natura 2000-gebieden 32, 35, 69, 74, 97-100, 102-104, 125-129, 137-139, 143-144
- natuur 13-14, 25-27, 35, 45-48, 66, 68, 74-75, 97-99, 108, 115-116, 120-126, 138-140
 - beheer 115, 142
 - bescherming 97, 121, 122, 124, 126
 - gebieden 32, 35, 48, 70, 90, 97-99, 102, 113, 115
 - herstel 75, 114, 139
 - kwaliteit 73-74, 76, 101, 123
 - organisaties 45-46, 70, 115
 - verbetering 137-139
- Natuur & Milieu 45-46, 120, 140
- Natuurmonumenten 46, 115-116, 140
- Nederland, statistisch 28, 31, 32, 36-37, 40-41, 87, 98, 99, 103, 110, 136
- nitraat (NO_3^-) 20, 24-25, 27, 49, 50-55, 58, 61, 67-68, 77, 83
 - verbindingen, zie ook ammonium; natrium
 - uitspoeling van 50, 55, 58, 68, 77, 90, 105, 109
- nitriet 50, 52
- nitrificatie 24-25, 51-52, 55, 60, 67, 68, 81-84

- oevers 83-84
- omgeving(sfactoren) 29, 108, 113, 125, 133, 139
- oppervlaktewater 49, 54, 77, 108, 120
- OPS-model 31, 33
- organische stoffen 22, 53-59, 114
- ozon (O_3) 49, 50, 85, 88, 90-91, 109

- PAS (Programma Aanpak Stikstof) 13, 15, 45, 69, 95, 120-124, 126-129, 139, 143
- PBL (Planbureau voor de Leefomgeving) 74, 126, 133
- plafonds (maxima) 42, 99, 120
- planten 14, 19, 48, 51-58, 63-64, 66-68, 83-84, 90, 112-113
 - zie ook bomen, flora, heide, mossen, natuur, veen, waterplanten
- pluimvee 39, 40, 106, 120-124
- politiek 22, 45, 87, 96, 101, 104, 119, 145
- Raad van State 13, 106, 120-122, 125, 127-128, 130, 139, 143

- raffinaderijen 28, 38, 41, 117
- regen 34-35, 59, 105, 112
 - zie ook zure regen 44, 47, 119
- regenwater 34, 59
- Remkes, commissie- 40, 42, 45, 95, 97, 107, 125, 137, 145
- rivieren 17, 48, 49, 80
- RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu) 33-35, 43, 44, 85, 99
- rookgasreiniging 48, 107, 118
- rupsen 62-63, 64, 65

- salpeter(zuur) (HNO_3) 18-19, 20, 47, 67
- satellietmetingen 36-37, 87
- scheepvaart 39, 42
- schimmels 24, 50, 52, 54-56
- sloten 76-77, 81-84
- smog 49
- snelwegen 36, 102, 121, 138, 144
- soja 22, 28, 142
- sperwers 65, 76
- stallen 21, 38, 42-44, 104-106, 108, 122, 123, 125, 129
- steenmeel 113-114
- sterren(stof) 22, 26
- stikstof
 - aanpak 97-113, 128
 - aanvoer 76, 83, 84, 137
 - armoede 48, 65
 - belasting 27, 71, 111, 117
 - beleid 42, 71, 87, 102, 108, 117-140
 - binding 17-18, 50, 52, 53, 54
 - bronnen 29, 53, 61, 110, 131
 - concentraties 37, 48, 58, 79
 - crisis 13-15, 46, 69, 115, 135-140
 - cyclus 24-25, 58
 - depositie 32-37, 37, 38, 40, 42, 47, 55-56, 57-66, 71-75, 78, 90, 98, 100, 102, 112-114, 122, 128, 139
 - dioxide (NO_2) 36, 85, 86, 109, 117
 - effecten 47-91
 - emissie/uitstoot 28, 31, 38, 46, 69, 87-91, 96-104, 107, 115, 118, 119, 123-130, 130, 131, 137-139, 141, 144
 - fixatie 25, 49, 51
 - gas (N_2) 27, 29, 47, 50-51, 54, 80, 82
 - gebruik 50, 89, 107-108, 133, 136

gehalte 62-63
 gevoeligheid 32, 32, 73-75, 98, 104, 139
 gradient 72, 75
 indicator 65, 66
 kringloop 50-54, 52, 75, 90
 maatregelen 108, 131
 -minnende soorten 66, 78
 neerslag 40, 138, 144
 overmaat 47, 49, 50, 58, 60, 63, 81, 115
 overschot 58, 64, 134
 oxiden (NO_x) 27, 29, 30, 31, 34, 38-39, 41, 42, 49-50, 66-68, 84-85, 90-91,
 104-107, 109, 117-119, 130
 probleem 13-15, 128-131, 139
 reactieve 27-29, 31, 32, 57, 81, 83, 88-89, 91, 120, 135
 reductie 33, 69-70, 97-104, 114-115, 118, 138-141
 rijkdom 56, 65
 ruimte 123, 126, 137, 140
 schade 49-50, 66-68, 108-111, 115
 tekort 21, 78
 toevoer 48, 58, 61, 71
 uitstoot zie emissie
 verspreiding 29, 32, 125
 verbindingen 13, 23, 27-28, 41, 59, 64, 67, 120
 verlies 135-136
 verrijking 54-56, 66
 vervuiling 109, 110-111
 verwijdering 82-84
 voetafdruk 135-137
 vormen 14, 38, 61
 Wet 45, 69, 115, 116, 129, 138, 139, 144
 strooisel 55, 56, 58, 60, 64, 114
 systeem, gesloten/open 21

 toxiciteit zie giftigheid
 Tropomi 36, 87

 uitstoot zie ammoniak; buitenland; stikstof

 urine 19, 24, 105-106

 varkens 28, 39, 40, 106, 121, 132, 138
 vee(houderij) 20, 28, 35, 39, 42, 104-107, 119, 120, 124-125, 129, 130

intensieve 22, 98, 111, 122, 132
 veen 77; zie ook waterplanten
 veevoer 21, 28, 49, 119, 132, 138, 142
 vegetatie 34, 57-58, 61-63, 71, 72
 vennen 48, 61, 67, 76, 78
 verbranding 14, 20, 25, 27, 38, 53
 verdienmodellen 96, 110, 132, 134, 145
 verdroging 58, 75, 76, 95, 115
 vergunningen 14, 45, 69, 122, 125-130, 138-139
 vermessing 48, 57-58, 63, 78, 80, 108, 109
 verslechteringsverbod 95-96
 Versnellingsakkoord 46, 69, 96, 115, 140, 142
 vervoer zie luchtvaart; scheepvaart; wegverkeer
 verzuring zie bodem, verzuring
 vlinderbloemigen 52, 54
 vlinders 65-66
 VNO-NCW 46, 140
 voedingsstoffen 48, 54-56, 59, 64, 67, 79, 80, 113
 voedsel 14, 17-18, 63, 65, 110, 131-132, 134, 136-137, 142
 arm milieu 57, 65, 73, 78
 consumptie 136-137
 keten 14, 65, 135
 kwaliteit 64-65, 75-76
 productie 14, 17, 21, 132, 134
 Vogel- en Habitatrichtlijn, Europese 95, 121, 125, 126-127, 144
 vogels 19, 63, 64-65, 76
 vrijwilligheid 104, 140, 141
 vulkaanuitbarstingen 14, 17, 28

 water
 beheer 84, 124
 kwaliteit 48-49, 120-121
 verontreiniging 22, 109
 zie ook grondwater; oppervlaktewater
 watercrassula 78
 wateren 81-84
 waterlobelia 78, 78
 waterplanten 48, 76-78, 81-83, 84, 90; zie ook veen
 waterstof 20, 23, 26-27, 26, 67, 77, 107
 wegverkeer 14, 28, 32, 38-39, 69, 87-88, 102, 106, 118, 135
 maximalsnelheid 106, 138
 WNF (Wereld Natuur Fonds) 95-96

wolken 37, 91, 105
woningbouw zie bouwsector
wortel(stelsel) 52-53, 55, 58, 61-62, 68, 83, 113, 114

zandgronden 20, 22, 59, 65, 114
zoetwatermeren 79, 81
zure regen 44, 47, 119
zuurbuffering 47, 59-60, 67, 113, 114
zuurgraad (pH) 60, 72, 113
zuurstof 26-27, 48, 77, 79-80, 82, 83-84
zwavel(verbindingen) 20, 44, 47-48, 77, 117, 119