

Zure regen

Zure regen

Een analyse van dertig jaar verzuringproblematiek in Nederland

E. Buijsman, J.M.M. Aben, J.-P. Hettelingh, A. van Hinsberg, R.B.A. Koelemeijer, R.J.M. Maas



Zure regen. Een analyse van dertig jaar verzuringsproblematiek in Nederland

© Planbureau voor de Leefomgeving (PBL)

Den Haag/Bilthoven 2010

PBL-publicatienummer 500093007

ISBN: nummer

Contact: ed.buijsman@pbl.nl

Dit onderzoek werd uitgevoerd in het kader van project M500093, Kennisbasis verzuring en grootschalige luchtverontreiniging.

U kunt de publicatie downloaden of bestellen via de website www.pbl.nl, of opvragen via reports@pbl.nl onder vermelding van het PBL-publicatienummer of het ISBN-nummer en uw postadres.

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Planbureau voor de Leefomgeving, de titel van de publicatie en het jaartal.

Het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) is het nationale instituut voor strategische beleidsanalyses op het gebied van milieu, natuur en ruimte. Het PBL draagt bij aan de kwaliteit van de politiek-bestuurlijke afweging door het verrichten van verkenningen, analyses en evaluaties waarbij een integrale benadering vooropstaat. Het PBL is voor alles beleidsgericht. Het verricht zijn onderzoek gevraagd en ongevraagd, onafhankelijk en altijd wetenschappelijk gefundeerd.

Planbureau voor de Leefomgeving

Vestiging Den Haag

Postbus 30314

2500 GH Den Haag

T 070 3288700

F 070 3288799

E: info@pbl.nl

www.pbl.nl

Vestiging Bilthoven

Postbus 303

3720 AH Bilthoven

T 030-2742745

F 030-2744479

Abstract

Thirty years of acid rain

In February 1983, the Dutch Lower House passed the 'De Boois' motion, which asked that an extensive inventory research would be conducted into 'the magnitude of the damage expected from soil acidification'. It also asked for a 'programme of measures'. The motion marked the beginning of the political awareness that, also in the Netherlands, acid rain was a major environmental problem. What were the measures taken in the beginning – and to what effect? Is acid rain currently a thing of the past? Or was it ever an immediate problem?

This report looks back on all aspects of nearly thirty years of acid rain problems in the Netherlands, and provides an overview of the latest insights. The main conclusion of this study is that, in the past, no unnecessary measures have been taken to counter acidification. The seriousness of the acidification problem has been visibly reduced, although it has definitely not been solved yet.

Keywords: acid rain, acidification, deposition, policy.

Inhoud

- Abstract 5

- **Bevindingen 9**

- **Zure regen. Een analyse van dertig jaar verzuringsproblematiek in Nederland 11**
 - Inleiding 13
 - Zure regen in Europa 13
 - Zure regen in Nederland 14
 - Beleidsdoelstellingen 15
 - Ontwikkelingen in de emissies 16
 - Trends in zure depositie en luchtkwaliteit 17
 - Effecten van verzuring 18
 - Verminderde media-aandacht 18
 - Van één-stof-één-effect naar multi-pollutant-multi-effect 18
 - Dertig jaar verzuringsproblematiek in een notendop 19

- **Verdieping 21**

- **1 Het begin van een probleem 23**
 - 1.1 Luchtverontreiniging in historisch perspectief 23
 - 1.2 Erkenning van een internationaal probleem 25
 - 1.3 Zure regen in Nederland 27
- **2 Effecten van zure regen 31**
 - 2.1 Effecten op ecosystemen 31
 - 2.2 Het concept van de 'critical load' 38
 - 2.3 Afnemende schade 41
 - 2.4 Belangrijkste bevindingen 44
- **1 Beleid 47**
 - 3.1 Luchtbeleid in Nederland en Europa: een terugblik 47
 - 3.2 Gevolgen van beleid voor emissies en milieukwaliteit 53
 - 3.3 Belangrijkste bevindingen 63
- **4 Slotbeschouwing 65**
 - 4.1 Inzicht in de problematiek 65
 - 4.2 Maatschappelijke en politieke aandacht 66
 - 4.3 Hoe nu verder? 70
 - 4.4 Tot slot 70
- **Bijlage 1 Kritische depositieniveaus voor stikstof en zuur 73**
- **Verklarende woordenlijst 74**
- **Stikstof in de media 75**
- **Literatuur 76**
- **Colofon 81**

Bevindingen



Zure regen. Een analyse van dertig jaar verzuringsproblematiek in Nederland

Samenvatting

Het begin van een probleem

- De Zweedse onderzoeker Svante Odén alarmeerde in 1967 het publiek en de wetenschappelijke gemeenschap over het langeafstandstransport van luchtverontreiniging en de daarbij behorende verzuring van de neerslag in grote delen van Europa.
- Het transport van luchtverontreiniging over grote afstanden en de samenhang met verzuring in Scandinavië werden in de jaren zeventig van de twintigste eeuw onomstotelijk vastgesteld.
- In 1979 sloten 31 landen, waaronder Nederland, en de Europese Economische Gemeenschap zich in de Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (LRTAP) aaneen om de geconstateerde achteruitgang in milieukwaliteit door langeafstandstransport van luchtverontreiniging en verzuring tegen te gaan.

Effecten van zure regen

- Onderzoek heeft de afgelopen decennia bevestigd dat overmatige verzurende depositie leidt tot aantasting van natuurlijke ecosystemen.
- Effecten van verzuring op bomen treden op wanneer ook andere stressfactoren spelen, zoals ziekten, stormen, koude, droogte en bijvoorbeeld te hoge concentraties aan ozon.
- De bossen zijn niet doodgegaan, maar ze zijn wel aangetast. De atmosferische depositie van zuur (en stikstof) heeft meetbaar bijgedragen aan veranderingen in de bodemchemie, de grondwaterkwaliteit en het biodiversiteitsverlies in de ondergroei van bossen. Ook in andere ecosystemen zijn effecten opgetreden.
- De schade aan de Nederlandse natuur zou aanzienlijk groter zijn geweest als de depositie van zuur (en stikstof) op het hoge niveau van 1980 was gebleven.
- Bodemmodellen voorspellen dat het bereiken van een schadelijke bodemverzuring is vertraagd en dat de uitputting van de buffercapaciteit van bosbodems is uitgesteld. Metingen van de bodemchemie bevestigen dat de bodemverzuring in Nederland inmiddels minder snel gaat, maar nog steeds wel degelijk plaatsvindt.
- Stikstof, een onderdeel van de verzurende depositie, heeft bovendien een vermestende werking. Zo leidt te veel stikstof tot een afname van het aantal soorten. Effecten van de vermestende werking van depositie blijken in het veld makkelijker te relateren aan de omvang van de depositie dan de strikt verzurende werking.

Beleid

- In 1984 verscheen de eerste Nederlandse beleidsnota die geheel was gewijd aan het verzuringsprobleem. In opeenvolgende beleidsnota's is het beleid verfijnd en aangescherpt. Aansluitend zijn bestrijdingsmaatregelen in wetgeving en andere beleidsinstrumenten vastgelegd.
- De nationale doelstellingen voor emissies en deposities zijn sinds de jaren tachtig enkele malen versoepeld, omdat ze niet haalbaar bleken of omdat wetenschappelijke inzichten veranderden. Tegenwoordig spelen deze nationale doelstellingen echter geen rol meer in het beleid; doelen worden in Europees verband vastgesteld.

- De emissies van zwaveldioxide in West-Europa en Nederland zijn sinds 1980 gedaald met 75 respectievelijk 85 procent. Ook de emissie van stikstofoxiden is vanaf eind jaren tachtig gedaald: in West-Europa met 30 procent en in Nederland met 40 procent. De emissie van ammoniak kende in West-Europa sinds 1990 een daling van 10 procent; de afname in Nederland was aanzienlijk hoger en bedroeg 50 procent.
- De verzurende depositie in Nederland is sinds 1980 met 50 procent afgenomen. De overschrijding van kritische depositieniveaus voor verzuring in Nederlandse natuurgebieden is door het ingezette beleid gemiddeld met 80 procent gedaald.
- De ernst van de verzuringsproblematiek is afgenomen door het gevoerde beleid, maar het verzuringsprobleem is zeker nog niet opgelost.
- Het gevoerde beleid heeft de verzuring van bodem en water tegengegaan. Tegelijkertijd is de ernst van de vermesting en de gezondheidsschade door luchtverontreiniging verminderd. Terugkijkend kan dan ook worden gesteld dat de genomen maatregelen terecht zijn geweest.
- Het beleid is steeds integraler geworden. Apart beleid voor afzonderlijke stoffen wordt uiteindelijk een samenhangend beleid voor verschillende stoffen en verschillende effecten.

Slotbeschouwing

- Beleidsmaatregelen op de terreinen van verzuring, klimaat, biodiversiteit, nitraat en lokale luchtkwaliteit raken steeds meer met elkaar verweven. Steeds meer ook gaat het om de aanpak van de gemeenschappelijke oorzaken: energiegebruik, landbouw, en verkeer en vervoer. Een dergelijke aanpak brengt ook kostenvoordelen met zich mee.
- De politieke besluitvorming is de afgelopen dertig jaar verschoven van het nationale niveau naar de Europese arena.
- Het beleid om de verzurende depositie tegen te gaan, is zeker succesvol geweest. Er is echter duidelijk minder resultaat bereikt bij de aanpak van de overmatige stikstofdepositie.
- Er zijn geen overbodige beleidsmaatregelen genomen om de verzuring terug te dringen. Toepassing van het voorzorgsbeginsel blijkt achteraf gezien terecht te zijn geweest.

Inleiding

Afbakening en vraagstelling

Zure regen ontwikkelde zich begin jaren tachtig van de twintigste eeuw tot een breed ervaren milieuprobleem. Het veroorzaakte grote maatschappelijke onrust. Zo bestond de vrees dat grote delen van de natuur, en dan vooral bossen, onherstelbaar zouden worden beschadigd. De overheid kwam onder grote druk te staan om maatregelen te nemen. Het beleid kreeg vorm in het midden van de jaren tachtig en was er grotendeels op gericht de emissies van verzurende stoffen terug te dringen.

Nu, bijna dertig jaar later, is de kennis over zure regen en de effecten ervan aanzienlijk toegenomen. Er is ook veel beleid ontwikkeld en de resultaten van dit beleid kunnen worden beoordeeld. Deze publicatie behandelt het onderwerp dat aanvankelijk bekendheid kreeg onder de naam 'zure regen', maar daarna werd aangeduid met de term 'verzuring' en nu 'Verzuring en Grootschalige Luchtverontreiniging' wordt genoemd. Het is een terugblik en beschrijft de ontwikkelingen in de wetenschap en in het beleid op het gebied van zure regen en verzuring.

De centrale vraag in deze publicatie is: hoe kijken we met de wetenschappelijke kennis van nu aan tegen dertig jaar verzuringsbeleid? Hierbij komen deelvragen aan de orde als: zijn er in het verleden maatregelen genomen om de verzuring te bestrijden en waarvan met de kennis van nu zou kunnen worden gezegd dat ze niet terecht zijn geweest? Of is er te weinig of – achteraf bezien – onvoldoende effectief beleid gevoerd? En waarom zijn de bossen niet doodgegaan, zoals sommigen hadden voorspeld?

Leeswijzer

Het eerste deel van het rapport, Bevindingen, behandelt de belangrijkste elementen van het verzuringsdossier. Achtergrondinformatie en een verantwoording van de conclusies zijn te lezen in het deel Verdieping.

Het tweede deel van het rapport, Verdieping, begint met een schets op hoofdlijnen van de historische achtergrond van zure regen tot in het begin van de jaren tachtig van de twintigste eeuw, het moment van de publieke en politieke bewustwording van het probleem van zure regen.

Vervolgens komen de effecten van verzuring aan de orde. Daarbij wordt ook de vraag behandeld of, gezien de huidige wetenschappelijke kennis over de effecten van (verzurende) luchtverontreiniging, het beleid op het gebied van verzuring in de jaren tachtig van juiste en relevante, wetenschappelijke informatie is voorzien. Hierbij komt ook aan de orde in hoeverre de toenmalige kennis toereikend was voor de beleidsontwikkeling.

Ook het beleid op het terrein van de verzuring zal worden belicht. Daarbij gaat het om vragen als: welke doelstellingen voor depositie (en emissies) worden gehanteerd? Hoe en waarom zijn die in de loop der jaren veranderd? Welke maatregelen zijn, nationaal en internationaal, genomen? En wat zijn de effecten van het beleid op emissies en depositie geweest?

In de slotbeschouwing worden de belangrijkste bevindingen uit de voorgaande hoofdstukken samengenomen om te komen tot een antwoord op de centrale vraag. Daarnaast zal worden geanalyseerd wanneer en hoe zure regen de maatschappelijke en politieke agenda heeft bepaald en welke gevolgen dit heeft gehad. Tot slot zal aandacht worden besteed aan de huidige status van zure regen binnen de context van milieuproblemen, zoals klimaatverandering, biodiversiteitsverlies en gezondheidsrisico's door lokale luchtverontreiniging.

Nadere afbakening

De tekst van de Verdiepingen is op een aantal plaatsen uitgebreid met onderwerpen die apart in een tekstbox worden besproken. Het gaat om onderdelen die niet noodzakelijk zijn voor een begrip van de hoofdtekst, maar die bepaalde aspecten van de verzuringsproblematiek nader toelichten.

Er is ook een aantal aspecten dat in deze publicatie niet of slechts zijdelings aan de orde komt. Zo werd het luchtkwaliteitsbeleid aanvankelijk in hoge mate gestuurd door zorgen over de gezondheidseffecten van luchtverontreiniging. Later bleek dat de stoffen die bijdragen aan zure regen ook invloed hebben op ecosystemen. Gezondheidseffecten van verzurende stoffen en verzuring zullen in deze publicatie echter niet nader worden besproken. Hetzelfde geldt voor de schadelijke effecten van luchtverontreiniging en zure regen op materialen.

Het zwaartepunt van deze publicatie ligt bij Nederland. Ontwikkelingen in Nederland kunnen in het verzuringsdossier echter niet los worden gezien van internationale ontwikkelingen; deze zullen daarom – waar relevant – eveneens worden besproken. De effectiviteit van beleidsmaatregelen zal in dit rapport alleen in kwalitatieve zin aan de orde komen. Er zal dus bijvoorbeeld geen analyse van beleidseffectiviteit in termen van kosten-batenanalyses plaatsvinden.

Deze publicatie gaat over het beleidsthema 'verzuring'. Stikstofverbindingen hebben, naast de rol die ze spelen in de verzuring, ook nog andere effecten. Dat laatste aspect van de stikstofproblematiek, door beleidsmakers 'vermesting' genoemd, zal echter in deze publicatie slechts zijdelings ter sprake komen.

Zure regen in Europa

Het begin van een probleem

'Nederbördens förurning', verzuring van de neerslag, zo luidde de kop van een artikel van de Zweedse wetenschapper Svante Odén in het dagblad *Dagens Nyheter* van 24 oktober 1967. Het markeerde het begin van het milieuprobleem van de zure regen. Odén had vastgesteld dat in veel meren in het zuidwesten van Zweden de visstand ernstig was teruggelopen. Bovendien bleken de meren verzuurd. Hij schreef dit onder andere toe aan de neerslag die zuur was. Verder had hij de waarnemingen van de chemische samenstelling van de neerslag in Europa onderzocht. Zo ontdekte hij dat al in 1955 de neerslag in delen van Midden-Europa licht was verzuurd. Daarna had de verzuurde neerslag zich over grotere delen van Europa uitgebreid; bovendien was de neerslag steeds zuurder

geworden. Odén veronderstelde verder dat luchtverontreiniging in de atmosfeer blijkbaar grote afstanden kon afleggen, want ook in gebieden zonder luchtverontreiniging viel zure regen. Hij concludeerde daarom dat de achteruitgang van de visstand en de verzuring van de neerslag in Zweden mede het gevolg moesten zijn van de emissie van verzurende luchtverontreiniging in Noordwest- en Midden-Europa. De fenomenen 'zure regen' en 'langeafstandstransport van luchtverontreiniging' waren daarmee geboren. Het waren opzienbarende veronderstellingen, die op dat moment echter lang niet door iedereen werden onderschreven.

Zure regen moeilijk op de agenda te krijgen

Zweden nam snel maatregelen om in eigen land de emissies van verzurende stoffen terug te dringen. Bovendien probeerde Zweden andere Europese landen te bewegen om op hun beurt de emissies van verzurende stoffen te verminderen, maar aanvankelijk had dit weinig succes. Zo probeerde Zweden op de *UN Conference on the Human Environment* in 1972 tevergeefs de zure regen op de politieke agenda te krijgen. De algemene opinie in de wetenschappelijke wereld was dat er te weinig bewijsmateriaal voor de veronderstellingen van Odén bestond. Het was pas in 1977, toen de Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (OESO) de resultaten van een groot Europees onderzoek naar grensoverschrijdende luchtverontreiniging en de mogelijke relatie ervan met zure regen publiceerde, dat overtuigend bewijsmateriaal beschikbaar kwam.

De resultaten van het OESO-onderzoek bevestigden dat in grote delen van Europa zure regen viel. Ook kon de verzuring van meren in Scandinavië nu onomstotelijk worden toegeschreven aan emissies van verzurende stoffen in West-Europa. Daarnaast was in Scandinavië een uitgebreid onderzoek opgezet om een beter inzicht te krijgen in de omvang en ernst van de effecten van zure regen. Resultaten van deze onderzoeken werden in 1976 gepresenteerd op het *First International Symposium on Acid Precipitation and the Forest Ecosystem*. De belangrijkste conclusie was dat er een oorzakelijke relatie bestond tussen verzuring van ecosystemen in Scandinavië en de zure regen.

Erkenning langeafstandstransport leidt tot Europese aanpak

Zure regen en het langeafstandstransport van luchtverontreiniging waren hiermee in de tweede helft van de jaren zeventig wetenschappelijk onomstotelijk vastgesteld. Het was nu ook duidelijk dat de bestrijding van luchtverontreiniging en zure regen door hun grensoverschrijdende karakter een internationale aanpak vereiste. Deze internationale aanpak van de verzuring kreeg in eerste instantie gestalte door de inspanningen van de Economic Commission for Europe van de Verenigde Naties (UNECE). In de tijd van de Koude Oorlog werd de problematiek rond grensoverschrijdende luchtverontreiniging bovendien gezien als een politiek relatief onschuldig samenwerkingsterrein om de relaties tussen de landen van het Warschaupact en de NAVO te verbeteren. Daardoor, en vooral ook door de bezorgdheid van de Scandinavische landen over de ernst van de verzuringsproblematiek, kwam in 1979 in UNECE-verband de *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP)* tot stand (UNECE 1979). In deze conventie hadden 31 landen, waaronder Nederland, en de Europese Economische Gemeenschap zich aaneengesloten

om luchtverontreiniging, zure regen en de gevolgen ervan te bestrijden.

Uiteindelijk zou dit in juli 1985 leiden tot het eerste Zwavelprotocol, waarin 21 landen afspraken om hun emissies van zwaveldioxide tussen 1980 en 1993 met 30 procent terug te brengen. Bijna twintig jaar na de uitspraken van Odén over zure regen hadden internationale onderhandelingen hun eerste resultaat opgeleverd. De aanpak van een gelijk emissiereductiepercentage voor alle landen was op dat moment politiek gezien het hoogst haalbare. Toch was toen ook al duidelijk dat om een bepaalde milieuwinst te halen, een dergelijke benadering niet in alle landen zou leiden tot de meest kosteneffectieve aanpak.

Zure regen wordt ingewikkelder

Wetenschappelijke ontwikkelingen leidden tot een steeds beter begrip van de atmosferisch-chemische processen die aan de zure regen ten grondslag liggen. Het was duidelijk geworden dat het niet alleen om toevoer van zure stoffen door de neerslag ging, maar ook om toevoer direct vanuit de atmosfeer naar het aardoppervlak, de zogeheten droge depositie. Onderzoekers spraken daarom inmiddels liever over zure depositie dan over zure regen. Het bleek dat in onze streken zelfs twee derde van de verzurende depositie uit droge depositie bestond. Bovendien leidde niet alleen zwaveldioxide tot verzuring, maar konden ook stikstofoxiden een forse bijdrage leveren. Onderzoek had verder aangetoond dat ammoniak in Nederland in aanzienlijke mate kon bijdragen aan de verzuring. Ammoniak bleek zich in de atmosfeer weliswaar als een zuurneutraliserende component te gedragen, maar fungeerde in de (Nederlandse) bodem als een verzurende stof. Dit zou vervolgens jarenlang een bron van grote verwarring zijn, vooral bij diegenen wier activiteiten een belangrijke bijdrage leveren aan de ammoniakemissie.

Zure regen in Nederland

Zure regen leek eerst geen probleem

Minister Ginjaar van Volksgezondheid en Milieuhygiëne presenteerde in oktober 1979 het *SO₂ Beleidskaderplan* aan de Tweede Kamer. Dit plan betekende een doorbraak, want het was de eerste integrale beleidsnota over luchtverontreiniging. De nota ging grotendeels over zwaveldioxide als luchtverontreinigingsprobleem. De aandacht was gericht op problemen met de luchtkwaliteit in de lokale leefomgeving. Zorgen over de mogelijke effecten van luchtverontreiniging op de gezondheid van de mens voerden de boventoon. Het begrip 'zure regen' werd weliswaar in de nota genoemd, maar serieuze effecten van zure regen werden op dat moment in Nederland niet verwacht.

Berichten over zure regen verschenen in Nederland voor het eerst rond 1980. Dit was vooral een gevolg van ontwikkelingen in Duitsland, waar al eerder onrust was ontstaan over zure regen en de mogelijke aantasting van bossen. Het was de onderzoeker Ulrich die in Duitsland in hoge mate bijdroeg aan het ontstaan van de wetenschappelijke én maatschappelijke bewustwording over de zure regen. Ulrich schuwde stellige uitspraken niet. Zo stelde hij dat de eerste bossen in Duitsland binnen vijf jaar dood zouden zijn als gevolg van

bodemverzuring. De optredende grootschalige schadesymptomen in bossen werden omschreven als 'neuartig'. Hiermee werd aangegeven dat de schadebeelden afweken van die van vroeger en dat er bovendien geen verklaring voor handen was. De boodschap was dat het waargenomen 'Waldsterben' voortvloeide uit door de mens veroorzaakte luchtverontreiniging. Daarna bereikte het nieuws het grote publiek, ook in Nederland.

Toch ophef over zure regen in Nederland

Aanvankelijk hadden weinigen in Nederland zich druk gemaakt over de mogelijke effecten van zure regen. Omvangrijke schade aan ecosystemen door zure regen, zoals in de Scandinavische meren, leek hier onwaarschijnlijk. Vergelijkbare situaties als in Scandinavië kwamen hier immers niet voor. De schade door zure regen leek zich in Nederland aanvankelijk te beperken tot vennen die hun water kregen via de neerslag. De toestand van de Nederlandse bossen was echter onbekend, simpelweg omdat er in Nederland nog nooit iemand vanuit verzurings- of luchtverontreinigingsperspectief naar de toestand van de bossen had gekeken.

Een eerste beoordeling van bossen was pas mogelijk toen in 1983 de resultaten van het eerste grote onderzoek naar de gezondheidstoestand van de Nederlandse bossen werden gepubliceerd in het *Verslag van het landelijk onderzoek naar de vitaliteit van het Nederlandse bos*. De onderzoekers karakteriseerden de gezondheidstoestand van het Nederlandse bos als 'zeer zorgwekkend'. Zij spraken ook van een 'ernstig probleem'. Als belangrijkste factor wezen de onderzoekers de 'luchtverontreiniging' aan. Het zou echter één aspect blijken van een problematiek die veel complexer was dan alleen luchtverontreiniging en schade aan bossen.

De zure regen leidde tot veel maatschappelijke aandacht en ook tot veel publicaties. Vaak hadden de publicaties niet mis te verstane titels als *Zure regen*, *Kwaadaardige bedreiging van ons welzijn*, *Zure regen*, *de georganiseerde vernietiging* en *Zure regen: een sluipend onheil*. Het waren uitingen van een denkwijze waarbij de vrees bestond dat de mens op grote schaal bezig was de wereld te vernietigen. De Vereniging Milieudefensie en de Stichting Natuur en Milieu speelden in Nederland een belangrijke rol in het publieke debat over zure regen. Zo meenden deze organisaties dat er onmiddellijk maatregelen moesten worden genomen, hoewel nog niet precies bekend was hoe de verzuring zijn werk deed. Zij bekritiseerden de overheid over de in hun ogen lakse houding.

Een vroege beleidsmatige reactie

In september 1982 verscheen het *Indicatief Meerjarenprogramma Lucht 1981-1985*. Luchtkwaliteit was hierin nog steeds het hoofdthema. Waarneembare effecten van zure regen in Nederland werden op dat moment nog steeds als onbetekend gezien. Dit werd vooral toegeschreven aan een groter bufferend vermogen van water en bodem in Nederland in vergelijking met de situatie in Scandinavië. Wel constateerde de overheid dat op voedselarme gronden door 'bemesting' vanuit de atmosfeer verdringing van plantensoorten kon optreden. Dit was een vroege signalering van het probleem van de eutrofiëring, wat later vermesting zou heten. De overheid meende dus dat er geen ernstig probleem in Nederland was. Niettemin heerste wel de opvatting dat de problemen in

Scandinavië bestreden zouden moeten worden door de emissies van zwaveldioxide en stikstofoxiden te beperken, ook in Nederland. Hierbij speelde dat uit berekeningen was gebleken dat Nederland een netto-exporteur van verzurende stoffen was. Dit werd in Nederland als moreel niet correct gezien.

Bij de behandeling van het *Indicatief Meerjarenprogramma Lucht 1981-1985* in 1983 werd de motie-De Boois ingediend. De motie was onder andere een reactie op de al genoemde verontrustende berichten over de aantasting van de bossen in Duitsland. Mevrouw De Boois vroeg om een 'breed inventariserend onderzoek naar de omvang van te verwachten schade op verschillend gebied door verzuring van de bodem'. Ook vroeg zij om een 'programma van maatregelen'. Deze motie betekende een kantelpunt in de beleidsmatige benadering van het probleem van de zure regen. De motie maakte namelijk de zure regen ook tot een Nederlands probleem. Het is zeker de verdienste van minister Winsemius geweest dat hij het maatschappelijke momentum uit het begin van de jaren tachtig heeft gebruikt om de Tweede Kamer (en daarmee hemzelf) tot politieke actie te dwingen.

De eerste publieke erkenning dat zure regen in Nederland wel degelijk een probleem was, vormde het symposium *Zure regen* in 1983 in 's-Hertogenbosch. Minister Winsemius, die ook op dit symposium sprak, maakte duidelijk dat zure regen nu in het brandpunt van de politieke arena stond.

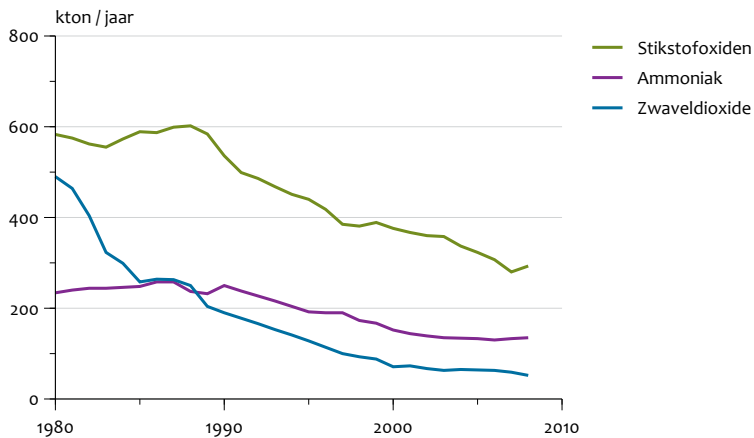
Beleidsdoelstellingen

Aanvankelijk strenge depositiedoelstellingen

De eerste onderzoeken van Nederlandse bosbodems in de eerste helft van de jaren tachtig leerden dat de bosbodems ernstig waren verzuurd. De hoeveelheid opgelost aluminium in het bodemvocht was verhoogd; de hoeveelheid calcium was verlaagd. Deze condities zijn giftig voor boomwortels. Ook zijn ze schadelijk voor het bodemleven: in de verzuurde bodem ontbrak het aan wormen en andere bodemorganismen. Uit vervolgonderzoek bleek dat – uitgaande van de Duitse methode om bosvitaliteit te meten – minstens 90 procent van de naaldbossen licht was aangetast.

In 1983 startte een groots opgezet onderzoeksprogramma naar de effecten van zure regen. Het onderzoek besloeg uiteenlopende terreinen als atmosferisch-chemische processen, bodem, vegetatie, oppervlaktewater en hydrobiologie. De bevindingen van het onderzoek, die werden gepubliceerd onder de titel *Verzuring door atmosferische depositie*, vormden een belangrijke bron voor beleidsformulering op het terrein van de zure regen.

In 1984 verscheen daarop onder de titel *De problematiek van de verzuring* de eerste beleidsnota die geheel was gewijd aan het probleem van de verzuring. Een nieuw element in de discussie was ammoniak. Kort daarvoor was duidelijk geworden dat juist in gebieden in Nederland die het meest gevoelig zijn voor verzuring, de zandgebieden dus, mogelijk hoge ammoniakemissies voorkwamen. Verder was berekend dat de depositie van verzurende stoffen op bossen op dat moment vijfmaal hoger was dan het niveau waarbij geen schade zou optreden. Ook was gecijferd dat herstel van de bossen pas mogelijk zou



Bron: PBL

zijn als de depositie zou worden teruggebracht tot een vijfde van het toenmalige niveau.

De eerste Nederlandse doelstellingen voor de verzurende (en vermestende) depositie dateren van deze periode. Een maximale zuurdepositie van 1.400 mol zuur per hectare werd toelaatbaar geacht om vitale en onaangetaste bosgebieden te beschermen. Voor de maximaal toegestane stikstofdepositie werd een hoeveelheid van 1.600 mol stikstof per hectare aangehouden, hoewel men zich realiseerde dat bij een dergelijke depositie mogelijk toch vegetatieveranderingen zouden kunnen optreden.

De hypothese over de grootschalige aantasting van bossen door zure regen vormde in 1984 de aanleiding tot het *Additioneel Programma Verzuringsonderzoek*. De resultaten hiervan werden mede gebruikt om de toegestane depositieniveaus voor zuur en stikstof opnieuw te definiëren. Tegelijkertijd was de opinie dat doelstellingen politiek gezien 'realistisch en haalbaar' moesten zijn. Dit leidde tot nieuwe milieukwaliteitsdoelstellingen voor het jaar 2000: 2.400 mol zuur per hectare, waarvan maximaal 1.600 mol stikstof. In 1989 werden hier nog een langetermijndoelstelling van 1.400 mol per hectare per jaar en een streefwaarde van 400 mol per hectare per jaar voor zuur aan toegevoegd, evenals een langetermijndoelstelling van 1.000 mol per hectare per jaar voor stikstof.

Ontwikkelingen in de emissies

Emissiereductie van zwavel dioxide: een succesverhaal

Al lang voor de periode van het integrale luchtbeleid had zich in Nederland een aanzienlijke daling in de emissie van zwavel dioxide voorgedaan. Het gebruik van kolen voor de verwarming van huizen was tot in de jaren zestig de belangrijkste bron van (stedelijke) luchtverontreiniging in Nederland. De vondst van aardgas in Slochteren en de daaropvolgende introductie van aardgas voor huishoudelijk gebruik heeft de situatie aanzienlijk verbeterd. Zo nam de emissie van zwavel dioxide sinds 1965 sterk af. Een navenante verbetering van de

stedelijke luchtkwaliteit in Nederland was een van de direct waarneembare gevolgen.

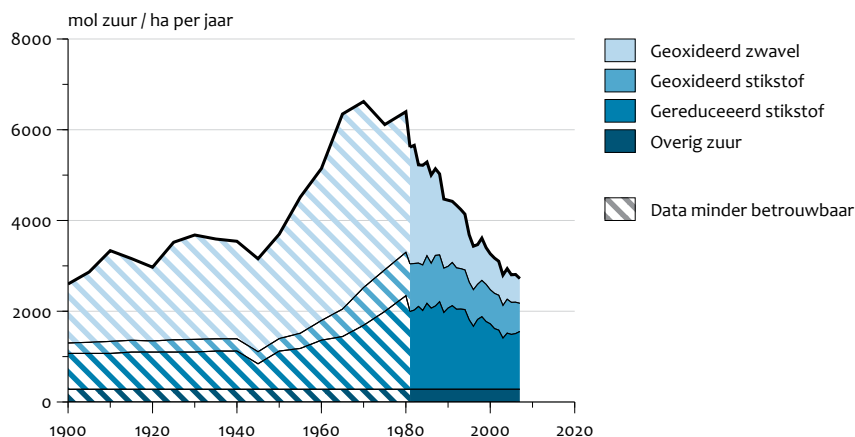
De emissies van zwavel dioxide kwamen daarna vooral nog voor bij elektriciteitscentrales en raffinaderijen. De aanpak om de emissies verder omlaag te brengen was daarom verhoudingsgewijs overzichtelijk – het ging om een beperkt aantal puntbronnen waarvoor rookgasontzwavelingsinstallaties werden voorgeschreven. Wel protesteerden de betrokken bedrijven aanvankelijk. Belangrijkste reden voor het bezwaar lag in de angst voor aantasting van de concurrentieverhoudingen in Europees verband.

De emissie van zwavel dioxide lag in Nederland rond 1965 op 1 miljoen ton. In 1980 was de emissie al afgenomen tot 490.000 ton. Mede door opeenvolgende Europese afspraken over emissiereducties werd de emissie verder verlaagd tot 60.000 ton in 2007 (zie figuur 1). Dat is een reductie van 89 procent in vergelijking met 1980. Een verdere daling tot 40.000 ton in 2010 ligt in het verschiep. De emissiedaling voor West-Europa¹ bedraagt sinds 1980 75 procent.

Emissiereductie van stikstofoxiden en ammoniak: weerbarstige materie

De aanpak van de emissies van stikstofoxiden bleek lastiger, omdat ze bij alle verbrandingsprocessen vrijkomen. Hier leverde uiteindelijk de introductie van de driewegkatalysator bij personenauto's vanaf het eind van de jaren tachtig een forse bijdrage aan de emissieverlaging. Vanaf die tijd zijn de emissies van stikstofoxiden in West-Europa met 30 procent en in Nederland met 40 procent gedaald. De daling had echter groter kunnen zijn als deze niet gedeeltelijk teniet zou zijn gedaan door de forse volumegroei van het verkeer. Beleid om deze volumegroei te beperken via prijsbeleid is niet van de grond gekomen.

1 De EU-15 (België, Denemarken, Duitsland, Finland, Frankrijk, Griekenland, Ierland, Italië, Luxemburg, Nederland, Oostenrijk, Portugal, Spanje, Verenigd Koninkrijk, Zweden) plus Noorwegen en Zwitserland.



Bron: periode 1900-1980: Eerens & Van Dam (2001); periode 1981-2007: voorlopige gegevens van herberekeningen op basis van nieuwe inzichten

De emissies van ammoniak bleken eveneens moeilijk omlaag te brengen. Deze zijn voor meer dan 90 procent afkomstig van agrarische bronnen, lees: mest. Een deel van de reductie in de ammoniakemissie werd – onbedoeld vanuit het verzuringsperspectief – in de jaren tachtig gerealiseerd door invoering van melkquota in Europa, waardoor de Nederlandse rundveestapel moest worden ingekrompen. Een latere reductie werd grotendeels gerealiseerd door invoering van de plicht om mest onder te werken en door invoering van mestquota. Hierbij kan worden aangetekend dat de productie van mest, de uiteindelijke bron van de ammoniak in de atmosfeer, veel minder is afgenomen. Beoogde, technische maatregelen om de emissie van ammoniak naar de lucht te beperken, bleken uiteindelijk veel minder effect te hebben dan aanvankelijk werd gedacht. Tevens is de ammoniakproblematiek gedeeltelijk afgewenteld op bodem en grondwater. Sinds 1980 is de emissie van ammoniak in Nederland met 50 procent afgenomen. Voor West-Europa bedroeg de reductie 10 procent.

Trends in zure depositie en luchtkwaliteit

Zure depositie in Nederland fors gedaald, maar nog steeds de hoogste in Europa

De gedaalde emissies in Nederland en (West-)Europa hebben geleid tot een forse daling van de depositie van verzurende stoffen in Nederland. De gemiddelde verzurende depositie is hier sinds 1980 met 50 procent afgenomen, de stikstofdepositie met 30 procent. De overschrijding van kritische depositieniveaus voor verzuring en vermistening in natuurgebieden is sterk gedaald.

Nederland kent al lange tijd een hoog depositieniveau van verzurende (en vermistende) stoffen. Al in 1900 was er een relatief hoge depositie van 2.400 mol zuur per hectare, die geleidelijk aan steeg tot 3.300 mol per hectare in 1950. Daarna trad een aanzienlijke versnelling in de toename op, waarbij rond 1970 een niveau van bijna 6.000 mol per hectare werd

bereikt. Vervolgens bleef de depositie tot 1980 in de orde van 5.500-6.000 per hectare, waarna een daling inzette tot het niveau van 2.700 mol per hectare in 2007.

De depositie bedroeg in 1980 gemiddeld 5.600 mol per hectare. Hierbij kwamen lokaal deposities tot 10.000 mol per hectare voor. De gemiddelde depositie was in 2007 gedaald tot 2.700 mol per hectare (zie figuur 2)², waarbij lokaal deposities tot 5.600 mol per hectare konden voorkomen. De hoogste deposities werden (en worden) waargenomen in de gebieden met intensieve veehouderij, zoals de Gelderse Vallei en de Peel. Dit zijn ook juist gebieden met veel kwetsbare natuur.

Na 1990 zijn de doelstellingen voor de depositie in beleidsnota's herhaaldelijk geëvalueerd. Dit heeft geleid tot een versoepeling van de doelstellingen, vooral omdat eerdere doelstellingen niet haalbaar bleken. De huidige depositiedoelstellingen dateren van 2002 en bedragen 2.300 mol per hectare voor zuur en 1.650 mol per hectare voor stikstof. Dit zijn gemiddelde waarden voor Nederland. Bij deze niveaus is 20 procent van het areaal aan Nederlandse natuur volledig beschermd. De huidige doelstellingen voor verzurende en vermistende depositie voor 2010 zullen echter niet worden gehaald.

Luchtkwaliteit fors verbeterd, toch nog problemen

Het Nederlandse (en Europese) luchtkwaliteitsbeleid was tot begin jaren tachtig vooral gericht op verbetering van de luchtkwaliteit om de menselijke gezondheid te beschermen. In het (latere) verzuringsbeleid ging het echter gedeeltelijk om dezelfde stoffen. De vermindering van de verzurende emissies heeft daarom ook geleid tot een aanzienlijke verbetering van de (lokale) luchtkwaliteit. Zo zijn de zwaveldioxi-

² De grootste daling deed zich voor in de emissie van geoxideerd zwavel. De grafiek in figuur 2 is voor de jaren 1981 tot en met 2007 gebaseerd op voorlopige gegevens. De definitieve gegevens kunnen in geringe mate afwijken van hetgeen hier is gepresenteerd. Voor een nadere toelichting zie de uitleg bij figuur 3.5 in de Verdieping.

deconcentraties in Nederland momenteel ongeveer tienmaal zo laag als in 1985. Ook in steden zijn de concentraties van verzuringgerelateerde stoffen als zwaveldioxide en stikstofdioxide afgenomen. Verder is fijn stof, dat gedeeltelijk bestaat uit atmosferisch-chemische omzettingproducten van ammoniak, stikstofoxiden en zwaveldioxide, in concentratie afgenomen. Niettemin wordt op nog niet alle plaatsen in Nederland voldaan aan de luchtkwaliteitseisen van de Europese Unie.

Effecten van verzuring

Bossen niet dood, wel veranderd

De atmosferische depositie van zuur en stikstof heeft ook in Nederland zonder meer bijgedragen aan veranderingen in de bodemchemie, de (oppervlakte)waterkwaliteit en het biodiversiteitsverlies. Deze veranderingen hebben op hun beurt geleid tot verzwakking van de ecosystemeresistentie tegen ziekten, stormen, koude, droogte en insecten.

In Nederland was de situatie voor bomen gunstiger dan op veel plaatsen in het buitenland. De voor verzuring gevoelige zandbodems in Nederland hebben meer buffercapaciteit dan de ondiepe rotsbodems in bijvoorbeeld Scandinavië. Daarnaast kunnen bomen gemakkelijker hun wortels aanpassen in zandbodems. Verder was het bosbeheer in Nederland minder grootschalig en gevarieerder. Dit was (en is) gunstig voor uitstel van schade aan bomen. De veranderingen in het bosbeheer na 1990 hebben de gevoeligheid van Nederlandse bossen bovendien verder verminderd. Zo is tegenwoordig meer dan vroeger de aanplant van voor verzuring gevoelige exoten beperkt en is de houtoogst – die bodembuffering vermindert – in intensiteit afgenomen.

De bossen zijn niet doodgegaan, maar het boscysteem is wel zichtbaar veranderd. Zo zijn korstmossen sterk achteruitgegaan, is de ondergroei verruigd met onder andere grassen, bramen en brandnetels, zijn bospaddenstoelen verdwenen en is de bodemchemie in nadelige zin veranderd. De overmatige depositie van zuur en stikstof heeft in belangrijke mate bijgedragen aan deze veranderingen.

Verzuring niet verdwenen, tempo ervan wel vertraagd

De depositiedaling van de laatste decennia heeft geresulteerd in een betere milieu- en natuurkwaliteit. Snel reagerende, minder gevoelige korstmossen keren weer terug in het bos en snel reagerende bodemcondities laten herstel zien. De bodemverzuring is vertraagd en modelberekeningen wijzen uit dat de uitputting van de buffercapaciteit van bosbodems daarmee 150 tot 400 jaar is uitgesteld. Modelstudies laten zien dat een groter deel van het bos duurzaam behouden kan blijven dankzij de verbeterde bodemkwaliteit. De schade aan de Nederlandse bodem- en vegetatiestructuur zou zeker groter zijn geweest als de depositieniveaus van stikstof en zuur op het niveau van 1980 waren gebleven.

De risico's van atmosferische depositie kunnen in beeld worden gebracht door de overschrijding van de kritische depositiewaarden te berekenen. De kritische waarden geven in feite duurzame beschermingsniveaus aan. Onderzoek heeft aangetoond dat ze een betrouwbare maat zijn om risico's voor ecosystemen te schatten. Kritische depositiewaarden

blijken bovendien wetenschappelijk robuuste grootheden te zijn.

Op basis van de huidige kennis moet worden geconcludeerd dat veel beschermde ecosystemen, waaronder bossen, nog steeds blootstaan aan risico's. De kritische depositieniveaus worden immers nog steeds overschreden. Waarnemingen aan de bodem bevestigen dat verzuring, zij het vertraagd in vergelijking met de jaren tachtig, nog steeds optreedt. Verandering in het voorkomen van gevoelige soorten laat ook zien dat condities nog steeds niet op orde zijn. De vermindering van de depositie heeft er echter wel toe geleid dat grootschalige plagen momenteel minder vaak optreden.

Verminderde media-aandacht

De zure regen werd begin jaren tachtig in brede kring als een ernstig milieuprobleem ervaren. Milieuorganisaties speelden bij de bewustwording van het probleem een belangrijke rol. De Nederlandse overheid maakte later in voorlichtingscampagnes bewust gebruik van dit gevoel om maatregelen aanvaardbaar te maken. Beleidsmaatregelen, zowel in Nederland als in Europa, kwamen vanaf het midden van de jaren tachtig tot uitvoering. De aanpak van het zure regenprobleem kwam, om met minister Winsemius te spreken, geleidelijk aan in de 'beheersfase'. Kortom: er waren maatregelen genomen en deze zouden op termijn effect hebben.

Zure regen verdween daarmee uit de publieke aandacht. Het is dan ook lang geleden dat in de publieke media aandacht aan de zure regen is geschonken. Dit heeft ertoe geleid dat bij het grote publiek de indruk is ontstaan dat de zure regen geruisloos is verdwenen, dat het probleem misschien wel is opgelost of dat het om een hype ging en de overheid er nu liever het zwijgen toe doet. Zoals uit het voorgaande is gebleken, is niets van dit alles waar. Media-aandacht – of het gebrek eraan – is een slechte indicator voor de ernst van een probleem. Van zure regen kan in dit opzicht worden gezegd dat aan de oplossing wordt gewerkt en dat dat veel tijd kost. Dit blijkt dan vanuit mediaoogpunt weinig interessant, met als gevolg dat zure regen de krantenkoppen al lang niet meer haalt.

Van één-stof-één-effect naar multi-pollutant-multi-effect

Het beleid is steeds integraler geformuleerd. Apart beleid voor afzonderlijke stoffen wordt uiteindelijk een samenhangend beleid voor verschillende stoffen en verschillende effecten. Het luchtbeleid heeft daarnaast door het grensoverschrijdende karakter van luchtverontreiniging een verschuiving van nationaal naar internationaal te zien gegeven. Ook internationaal ging in het *eerste Zwavelprotocol* uit 1985 de aandacht nog uit naar één thema (verzuring) en één stof (zwaveldioxide) en verplichtten alle landen zich tot een gelijk emissiereductiepercentage. Het *tweede Zwavelprotocol* (1994) nam voor het eerst de kritische depositiewaarden als uitgangspunt en kwam voor elk land tot verschillende emissiereducties, waarmee Europees gezien de milieuwinst tegen de laagste kosten was te bereiken. Gaandeweg zette zich een verbreding in. Het *Gotenburg Protocol* (1999) omvatte vier stoffen

(zwaveldioxide, stikstofoxiden, ammoniak en koolwaterstoffen) en drie thema's (verzuring, vermesting, ozon) De *Thematische strategie luchtverontreiniging* van de Europese Commissie uit 2005 voegde daar fijn stof en gezondheid aan toe. Bij de komende herziening van het Gotenburg Protocol zal ook de samenhang met klimaatverandering worden betrokken.

Dertig jaar verzuringsproblematiek in een notendop

De emissies van verzurende stoffen zijn in Nederland en in Europa fors afgenomen. Het grootste succes is geboekt bij zwaveldioxide. De emissies van stikstofoxiden en ammoniak bleken moeilijker aan te pakken. Bijgevolg is onder meer de emissie van ammoniak per hectare in Nederland nog steeds de hoogste in Europa.

Wel is door de emissiereducties de ernst van de verzuringsproblematiek in Nederland de afgelopen dertig jaar afgenomen. Het probleem van de zure regen is echter nog steeds niet opgelost. De verzuring gaat nog steeds door, zij het in een lager tempo dan voorheen. Tegenwoordig legt het beleid vooral de nadruk op maatregelen die zijn bedoeld om de gevolgen van vermesting (en verdroging) tegen te gaan. Ook de problematiek van vermesting en van gezondheidsschade door luchtverontreiniging is door het gevoerde verzuringsbeleid echter in omvang afgenomen.

Met de wetenschappelijke kennis van nu kan worden gesteld dat de genomen maatregelen tegen de zure regen zeker terecht zijn geweest. Voortschrijdende wetenschappelijke kennis heeft bovendien duidelijk gemaakt dat het probleem van de zure regen niet op zichzelf staat. Het vertoont door de aard van de onderliggende oorzaken samenhang en overlap met andere milieuproblemen als vermesting, schade door ozon, biodiversiteitsverlies en klimaatverandering. De kosten van het beleid hadden daarom lager kunnen uitvallen als eerder met deze samenhang rekening zou zijn gehouden.

Verdieping



Het begin van een probleem



Dit hoofdstuk schetst op hoofdlijnen de historische achtergrond van zure regen tot het begin van de jaren tachtig van de twintigste eeuw, het moment van de publieke en politieke bewustwording van het probleem van zure regen. Hierbij komen aspecten aan de orde als: wat is zure regen? Hoe lang is er al zure regen? Welke maatschappelijke ontwikkelingen spelen een rol bij zure regen? Waarom was er ongerustheid over zure regen? Wat waren de eerste effecten die werden toegeschreven aan zure regen?

1.1 Luchtverontreiniging in historisch perspectief

1.1.1 Ontwikkelingen in de industrie, de mobiliteit en de agrarische sector

De industriële revolutie heeft de wereld op een fundamentele manier veranderd. De meest in het oog springende veranderingen zijn de onstuimige industrialisatie en de technologische vooruitgang. Het laatste heeft in de loop van de twintigste eeuw onder andere geleid tot een sterke toename van de mobiliteit. Deze ontwikkelingen zijn in hoge mate mogelijk gemaakt door fossiele brandstof. De keerzijde ervan is dat het gebruik van fossiele brandstof gepaard gaat met milieuverontreiniging. Klassieke luchtverontreiniging met hoge concentraties stof en zwaveldioxide werd daarmee de gewoonte zaak van de wereld met luchtverontreinigingsrampen zoals in 1930 in de Maasvallei bij Luik en in 1952 in Londen als onbedoelde hoogtepunten (Biersteker 1980).

De industriële productie en de mobiliteit namen na de Tweede Wereldoorlog een hoge vlucht, ook in Nederland (figuur 1.1). De sterke toename van de mobiliteit na de jaren zestig droeg door de emissie van stikstofoxiden (en koolwaterstoffen) vervolgens in hoge mate bij aan het ontstaan van een voor Europa nieuwe vorm van luchtverontreiniging, de fotochemische smog met hoge concentraties ozon en irriterende koolwaterstoffen. Deze ontwikkelingen deden zich ook in Nederland voor. Een gelukkige bijkomstigheid echter was de ontdekking van het aardgas in Slochteren in 1959. De daarop volgende introductie van aardgas voor huisverwarming leidde al aan het eind van de jaren zestig tot een sterke verbetering van de (stedelijke) luchtkwaliteit in Nederland (Buijsman 2009).

Daarnaast is er nog de verandering in het grondgebruik. We noemen het tegenwoordig natuur, maar vroeger heette het 'woeste grond'. Woeste gronden waren bijvoorbeeld duinen

en strand. Maar ook natuurtypen die in Nederland veel op de van oorsprong arme zandgronden worden aangetroffen, zoals heide, veen en moeras. Weliswaar waren sommige van dergelijke gebieden enigszins in cultuur gebracht, zoals veel heidevelden, maar in economisch opzicht ging het om marginale, agrarische activiteiten. De introductie van goedkope kunstmeststoffen bood voor deze gebieden de mogelijkheid om tot een spectaculaire productieverhoging te komen.

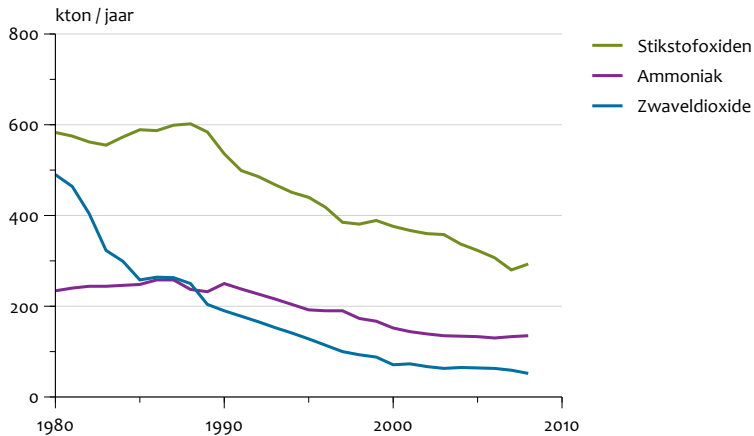
Na de Tweede Wereldoorlog kwam in de Nederlandse agrarische sector een proces van schaalvergroting, rationalisatie en ruilverkaveling op gang. De vooroorlogse ontwikkelingen zetten zich hierbij in versterkte mate voort. In gebieden als de Gelderse Vallei en de Peel ontstonden daardoor hoge concentraties intensieve veehouderijbedrijven. Een verdere impuls ging na 1958 uit van het Europese landbouwbeleid. Dit beleid garandeerde een grote afzetmarkt in combinatie met een hoog prijsniveau.

Deze ontwikkelingen leidden ertoe dat de agrarische sector niet alleen een economische factor van betekenis werd, maar ook een belangrijke bron van milieuverontreiniging (Van Zanden & Verstege 1993). Vooral de emissie van ammoniak is in de context van deze publicatie van belang. De ernst van deze milieubelasting werd nog verzaamd, omdat ze vooral bleek voor te komen in de van oudsher kwetsbare gebieden, namelijk de (voorheen) arme zandgronden. Later is de belasting echter weer verminderd, toen de emissies afnamen door de verlaging van de melkquota en door de Europese Nitraatrichtlijn.

1.1.2 Luchtverontreiniging en zure regen: niets nieuws

De industriële ontwikkeling ging lange tijd gepaard met een ongebreidelde toename van de luchtverontreiniging. Luchtverontreiniging is echter van alle tijden. Al in de antieke tijd en in de middeleeuwen waren er klachten over luchtverontreiniging en de effecten ervan (Brimblecombe 1975, 1987). Lange tijd werd luchtverontreiniging echter als een hinderlijk, maar in feite onvermijdelijk bijverschijnsel van ontwikkeling en industrialisatie gezien (figuur 1.2). Beleid op dit gebied was er niet of nauwelijks en overheden traden alleen handelend op bij ernstige mistoestanden (Diederiks 1970; Diederiks & Jeurgens 1989).

Zure regen was ook niets nieuws. Het was al in de eerste helft van de negentiende eeuw dat de Duitser Lampadius, de Fransman Ducros en de Engelsman Robert Angus Smith wezen op

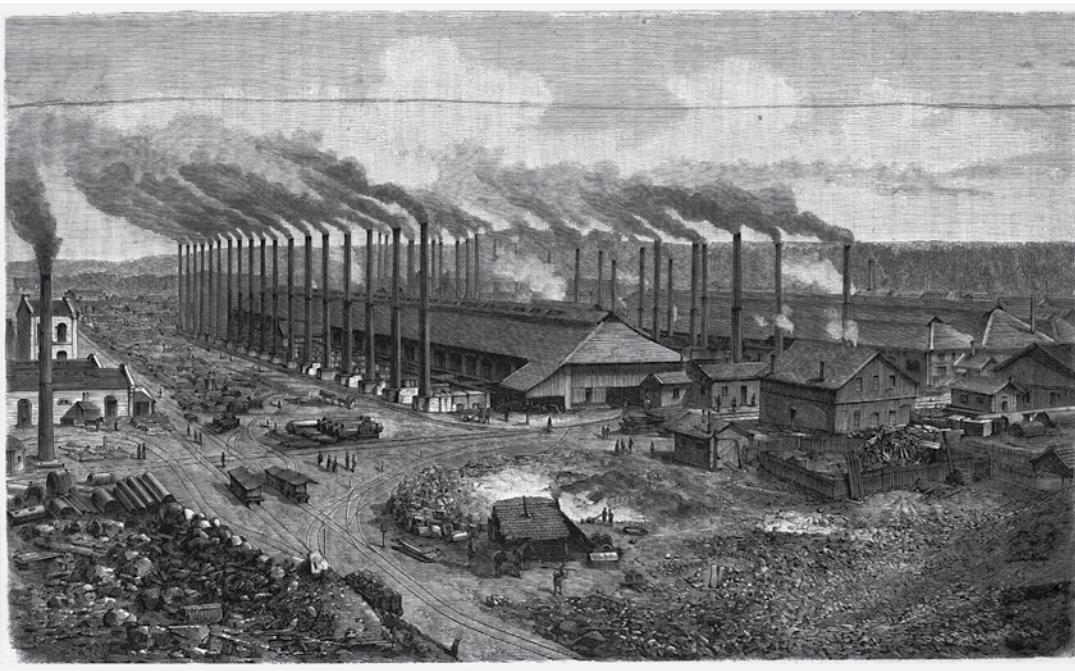


Bron: PBL

De stormachtige economische ontwikkeling in Nederland na de Tweede Wereldoorlog blijkt onder andere uit de sterke toename van de mobiliteit (hier weergegeven aan de hand van het aantal voertuigkilometers), de volumegroei in de agrarische sector (aantal varkens) en de industrie (productie-index van de industrie, een maat voor de totale industriële productie).

Luchtverontreiniging in de negentiende eeuw: neveneffect van vooruitgang

Figuur 1.2



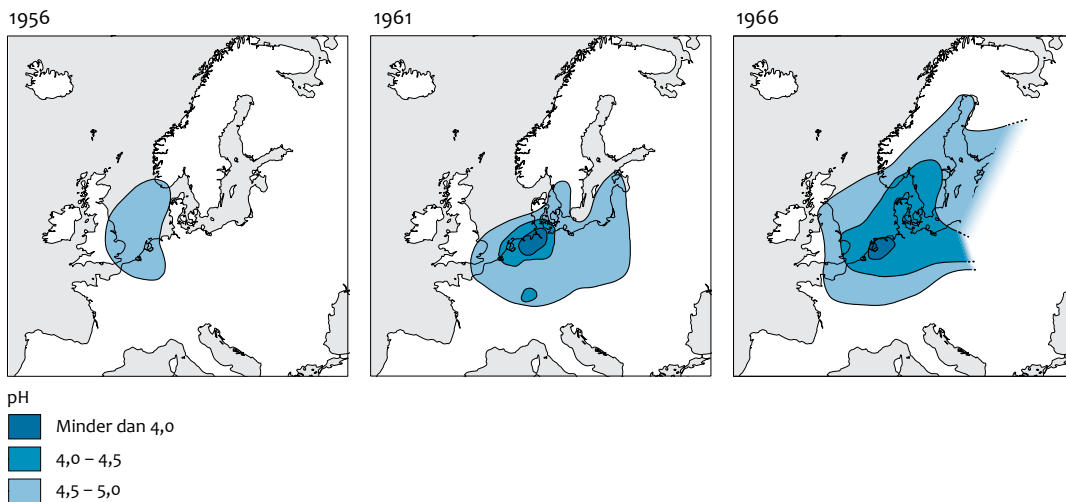
Luchtverontreiniging was lange tijd de normaalste zaak van de wereld. Zo waren op afbeeldingen uit de negentiende eeuw rokende schoorstenen hét symbool voor vooruitgang. De afbeelding toont het 'Walzwerk der Burbacher Hütte bei Saarbrücken', een gravure van een onbekende artiest, omstreeks 1870. Gereproduceerd met vriendelijke toestemming van het Bildagentur für Kunst, Kultur und Geschichte in Berlin.

de verzuring van de neerslag. Zure regen was vastgesteld in de nabijheid van metallurgische bedrijven in het Ertsgebergte en in de buurt van grote Engelse steden (Lampadius 1834a, 1834b; Smith 1852, 1872). De verzuring van de neerslag schreven de onderzoekers toe aan de invloed van de luchtverontreinigende stof zwavel dioxide (SO_2). Ducros was de eerste die de term 'pluie acide' gebruikte (Ducros 1845), nog voordat de

Engelsman Smith met de uitdrukking 'acid rain' kwam (Smith 1852, 1872).

1.1.3 Zure regen en bosschade

Schade aan bossen door luchtverontreiniging, maar ook aan vegetatie en gebouwen, was ook al geen nieuw verschijnsel. Zo gaat de gedocumenteerde geschiedenis hierover in Enge-



Bron: Odén (1976); bewerking PBL

Dit is een veelgebruikte figuur om de ontwikkeling van het probleem van de zure regen in Europa te illustreren. De zuurgraad van de neerslag is in pH-eenheden uitgedrukt. Hoe lager de pH-waarde, hoe zuurder de regen. Neerslag met een pH-waarde van 5 of lager werd destijds als zure regen beschouwd. De zure regen bleek zich in de loop van de tijd over een steeds groter deel van Europa uit te spreiden. Bovendien werd de regen steeds zuurder. Dergelijke beelden speelden een belangrijke rol bij de beeldvorming over zure regen bij het grote publiek

land terug tot de veertiende eeuw (Brimblecombe 1975, 1977, 1987; zie ook Evelyn 1661). Het al genoemde onderzoek in het Ertzgebergte leerde dat de zure regen tot aanzienlijke schade in de omgeving kon leiden. De documentatie over hinder en schade door luchtverontreiniging in Nederland in vroeger tijden is echter bescheiden (Biersteker 1968; Diederiks 1970; Diederiks & Jeurgens 1989; Homburg 1998; Homburg et al. 1998).

In Duitsland werd aan het eind van de negentiende en in de eerste helft van de twintigste eeuw uitvoerig onderzoek gedaan naar de gevolgen van luchtverontreiniging voor vegetatie (Stoklasa 1923; Spelsberg 1984; Wislecenus 1985). Deze onderzoeken besteedden echter geen aandacht aan de mogelijk schadelijke invloed van verontreinigde (of verzuurde) neerslag.

De eerste grootschalige schade aan bosopstanden werd in 1947 geconstateerd in het Krušné Horygebergte ofwel Ertzgebergte in de grensstreek tussen Duitsland, Polen en het toenmalige Tsjecho-Slowakije (de zogeheten Zwarte Driehoek). Als oorzaak van de schade werd bodemverzuring aangewezen (Nèmec 1952). Dergelijke schade verspreidde zich gestaag tussen 1950 en het begin van de jaren zeventig.

1.2 Erkenning van een internationaal probleem

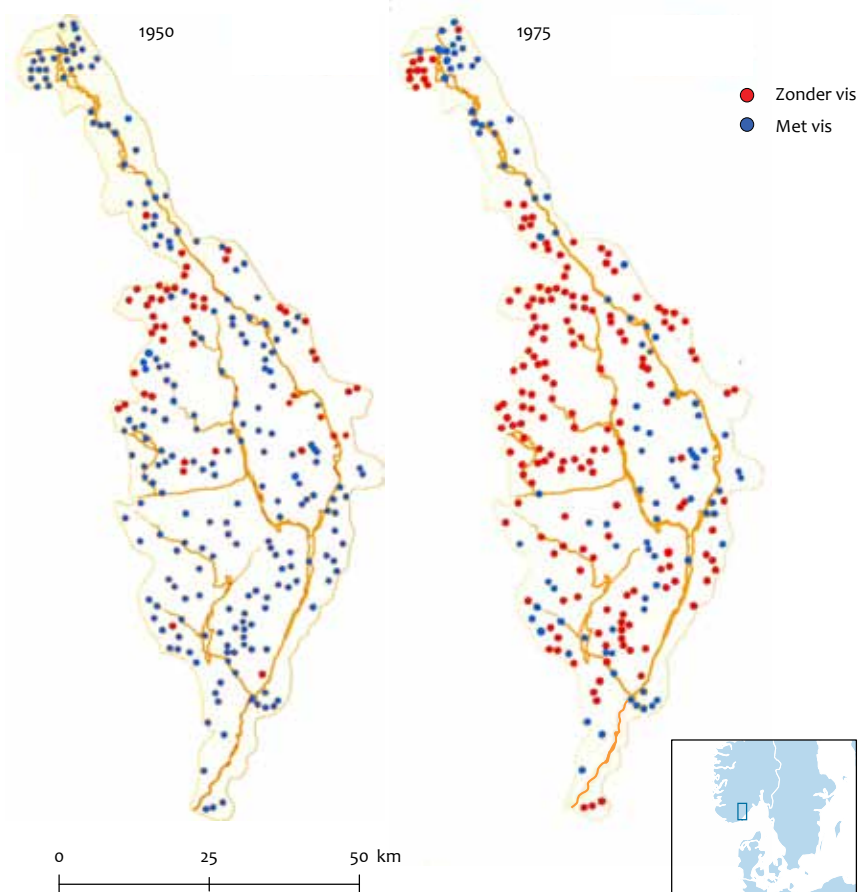
1.2.1 Verzuurde meren in Scandinavië

De Zweedse onderzoeker Svante Odén stelde omstreeks 1961 vast dat de neerslag in het midden en zuiden van Zweden zuur kon zijn. Onderzoek had verder uitgewezen dat sommige meren in Zweden in de loop van de tijd ook zuurder waren geworden. Het was ook Odén die in 1967 wees op de verzuring van de neerslag in andere delen van Europa (Odén 1967).

Hij stelde ook vast dat de Zweedse neerslag vooral zuur was wanneer de lucht was aangevoerd uit het midden en noordwesten van Europa. Odén was de eerste die het oprukkende zuur in Europa in kaart bracht (figuur 1.3). Aanvankelijk vond hij weinig gehoor voor zijn alarmerende boodschap, maar tien jaar later werden zijn bevindingen door uitgebreid wetenschappelijk onderzoek bevestigd (Brække 1976; Overrein 1976).

De Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (OESO) publiceerde in 1977 de resultaten van een onderzoek naar grensoverschrijdende luchtverontreiniging en de mogelijke relatie ervan met zure regen (OECD 1977). Aan dit onderzoek deden elf West-Europese landen mee, waarbij Nederland was vertegenwoordigd door het toenmalige Rijks Instituut voor de Volksgezondheid (RIV) en het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). De uitkomsten van het onderzoek bevestigden onomstotelijk dat in grote delen van Europa zure regen viel. Ook kon de verzuring van meren in Scandinavië worden toegeschreven aan emissies van verzurende stoffen in West-Europa. Hierdoor kreeg luchtverontreiniging, en ook zure regen, met het zogeheten langeafstandstransport van luchtverontreiniging een internationale dimensie.

De *Conference on the Human Environment* in Stockholm in 1972, die door de Verenigde Naties was georganiseerd, markeerde het beginpunt van de internationale samenwerking voor de bestrijding van luchtverontreiniging. Ook werd duidelijk dat een probleem als zure regen en verzuring alleen goed aangepakt kon worden door internationale samenwerking. Dit alles leidde in 1979 tot de oprichting van de Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLTRAP). In deze conventie sloten 31 landen en de Europese Gemeenschap zich aaneen om de geconstateerde achteruitgang in de milieuk-



Bron: Braekke (1976); bewerking PBL

De beelden over de achteruitgang van de visstand in Scandinavië maakten in Nederland veel indruk. Dergelijke ecosystemen kwamen echter in Nederland niet voor, zodat het beeld niet als maatgevend voor de situatie in Nederland mocht worden beschouwd.

waliteit door transport van luchtverontreiniging over grote afstanden tegen te gaan. Het was het eerste voorbeeld van een platform waar wetenschap en politiek elkaar ontmoetten.

Daarnaast was in Scandinavië een uitgebreid onderzoek opgezet om meer inzicht te krijgen in de omvang en ernst van de effecten van zure regen (figuur 1.4 en 1.5). Het grootste project op dit gebied was het Noorse SNSF-project met de titel *Acid Precipitation – Effects on Forest and Fish*. De resultaten van dit onderzoek en van vergelijkbare studies in andere landen werden gepresenteerd op het *First International Symposium on Acid Precipitation and the Forest Ecosystem* (Brække 1976). De belangrijkste conclusie was dat er een oorzakelijke relatie bestond tussen verzuring van ecosystemen in onder andere Scandinavië en de zure regen.

1.2.2 Zure regen in Duitsland

In Duitsland ontstond aan het eind van de jaren zeventig grote onrust over zure regen omdat die de gezondheid van bossen mogelijk zou aantasten. Het was de onderzoeker Ulrich die in hoge mate bijdroeg aan het ontstaan van de wetenschappelijke én maatschappelijke bewustwording over de zure regen. Ulrich schuwde stellige uitspraken niet: 'It cannot be excluded that within a few years or decades the

trees growing on the soils investigated are heavily damaged or die to Al-toxicity' (Ulrich et al. 1979; Anonymus 1981) en 'Wir stehen vor einem ökologisch Hiroshima' (Anonymus 1983; zie ook Buijsman 2008).

Het was ook Ulrich die met de uitspraak kwam dat de eerste bossen in Duitsland binnen vijf jaar dood zouden zijn als gevolg van verzuring van de bodem (Ulrich et al. 1979). Hij kreeg steun van zijn collega Schütt, die de destijds optredende grootschalige schadesymptomen in bossen omschreef als 'neuartige Waldschäden' (Schütt 1980, 1981, 1982; Schütt & Blaschke 1984). De boodschap was dat het waargenomen 'Waldsterben' veroorzaakt was door antropogene, grensoverschrijdende luchtverontreiniging. Daarna bereikte het nieuws het grote publiek.

Toch waren er van meet af aan ook andere geluiden. Zo betwijfelden sommige onderzoekers, onder wie Braun (1981), of er wel een simpele relatie was tussen zure regen en de geconstateerde schade in de bossen. Zo stelden Krause et al. (1984): 'Bedenklich an der Diskussion um das Waldsterben war vor allem, daß die wissenschaftliche Deduktion inzwischen einen hohen Grad an Undifferenziertheit erreicht hatte.'



De verzuring van de meren in Scandinavië speelde een belangrijke rol bij de publieke bewustwording van het probleem van de zure regen. De verzuring in meren in het zuiden van Zweden werd aanvankelijk in afwachting van meer structurele maatregelen op grote schaal bestreden door kalk in de meren te storten.
Foto met toestemming van Willem Asman

1.3 Zure regen in Nederland

1.3.1 Eerste bewustwording

In navolging van ontwikkelingen in het buitenland leidde het verschijnsel zure regen in Nederland in de tweede helft van de jaren zeventig tot een uitbreiding van de onderzoeksactiviteiten op neerslaggebied (Buijsman 2009). Metingen toonden aan dat in Nederland – evenals in een groot deel van Noordwest- en Noord-Europa – zure regen viel (Vermeulen 1977; KNMI/RIV 1979; zie figuur 1.6).

Rond 1980 maakten aanvankelijk weinigen in Nederland zich druk over de effecten van zure regen. Het werd wel voor mogelijk gehouden dat de zure regen een schadelijke invloed zou hebben op oppervlaktewateren (Van Dam et al. 1981; Van Dam & Beljaars 1984), de schade zou zich echter beperken tot de vennen die hun water kregen via de neerslag. Het verschijnsel zure regen was in Nederland in de jaren tachtig nog steeds maar in beperkte mate tot de media, en daarmee tot het grote publiek, doorgedrongen. In de jaren daarna veranderde dat echter snel, vooral onder invloed van de zorgelijke berichten uit Duitsland en de resultaten van eerste onderzoeken in Nederland. Er kwam in bredere kring aandacht voor zure regen (Vermeulen 1977, 1978a, 1978b; Buijsman & Reijnders 1980; Bütjman & Asman 1980; Asman & Buijsman 1981; Buijsman 1982).

‘Verzuring! Tot voor enkele jaren was dit een onderwerp waar we zelden over hoorden. [...] We worden overspoeld door berichten over de schadelijke effecten van verzuring.’ Deze uitspraak uit 1983 van de toenmalige minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Winsemius,

laat zien dat zure regen al in de eerste helft van de jaren tachtig door de overheid als een ernstig milieuprobleem werd beschouwd (Winsemius 1984). Zure regen werd op dat moment verantwoordelijk gehouden voor de grootschalige aantasting van bossen in Europa. De vrees bestond dat ook in Nederland de gezondheid van de bossen in gevaar zou komen.

De toestand van de Nederlandse bossen kon pas goed worden beoordeeld toen in 1983 de resultaten van het eerste brede inventariserende onderzoek naar de gezondheidstoestand van de Nederlandse bossen werden gepubliceerd in het *Verslag van het landelijk onderzoek naar de vitaliteit van het Nederlandse bos* (Staatsbosbeheer 1983). De onderzoekers stelden in dit rapport: ‘[...] de gezondheidstoestand van het Nederlandse bos [...] kan gekarakteriseerd worden als zeer zorgwekkend.’ Zij meenden dat ook in Nederland sprake was van een ernstig probleem. Als belangrijkste factor wezen de onderzoekers de ‘luchtverontreiniging’ aan. Dergelijke berichten werden door anderen overgenomen. Zo staat in *Het zure-regen boek* (Van Ooyen & De la Court 1984): ‘In Nederland is ook op grote schaal zichtbare schade geconstateerd met dezelfde symptomen als in West-Duitsland.’ En: ‘Volgens de West-Duitse normen is zelfs meer dan 90% van het Nederlandse bos aangetast.’ Poortinga (1984) formuleerde het als volgt: ‘Als de Duitse normen ongewijzigd zouden worden gehanteerd bij de interpretatie van de gegevens, zou meer dan 90% van het vitale naaldbos als lichtbeschadigd moeten worden geclassificeerd. Van de niet-vitale opstanden is dat 100%.’



Bron: KNMI/RIV (1979)

De zuurgraad van de neerslag in Nederland in 1978, uitgedrukt in pH-waarden. Hoe lager de pH-waarde, hoe zuurder de neerslag. Een pH-waarde beneden de 5 zou kunnen duiden op 'zure regen'. Overal in Nederland bleek de neerslag volgens deze maatstaf zuur te zijn. Later zou blijken dat de pH van de neerslag een slechte indicator is voor de aanwezigheid van zure regen (Buijsman 2008; Bütjman & Asman 1980;). Niettemin speelden kaartbeelden als deze aanvankelijk een belangrijke rol om de ernst van het probleem van de zure regen aan te duiden.

1.3.2 Maatschappelijke onrust

De zure regen leidde daarna tot veel maatschappelijke aandacht en ook tot veel publicaties (zie bijvoorbeeld Bruinsma 1985, 1986; De la Court et al. 1987; De Fraiture 1985). Soms ook werden niet mis te verstane titels voor publicaties gekozen, zoals: *Zure regen, kwaadaardige bedreiging van ons welzijn* (Poortinga 1985), *Zure regen, de georganiseerde vernietiging* (Schildermans & Vanhoute 1986) en *Zure regen: een sluipend onheil dat spoedig moet worden gekeerd* (CRMH 1987). En de krantenkoppen uit die tijd logen er ook niet om: 'Het bos is stervende, leve de automobiel', 'Zure regen beangstigt Kamerleden', 'Zure regen vereist snel maatregelen. Minister Ginjaar uit bezorgdheid tijdens congres', 'Schade door zure regen veel groter dan gedacht' en 'Bomen gaan indirect dood aan zure regen' (Buijsman 2008). De Nederlandse overheid voerde in de jaren tachtig onder de titel 'Gisteren. Vandaag. Morgen?' een voorlichtingscampagne om de mensen bewust te maken van het probleem van de zure regen (figuur 1.7).

De Vereniging Milieudefensie speelde in de jaren tachtig in Nederland een belangrijke rol in het publieke debat, samen met organisaties zoals de Stichting Natuur en Milieu. Deze organisaties meenden dat er onmiddellijk maatregelen moesten worden genomen. Zij bekritiseerden de overheid over de in hun ogen lakse houding: 'Elke houding die leidt tot uitstel van noodzakelijke maatregelen is onverantwoord. Het is waar dat we nog niet precies weten hoe de verschillende processen die bij de verzuring een rol spelen verlopen. Maar

de huidige kennis biedt wel voldoende aanknopingspunten om maatregelen te nemen.' (Van Ooyen & De la Court 1984).

De internationale onrust over zure regen en de ontwikkeling van een internationale beleidsstrategie noopten ook Nederland ertoe maatregelen te nemen. Zo speelde Nederland al in het begin van de jaren tachtig een actieve rol in de LRTAP-conventie (UNECE 1979). Hier beoogde men om in internationaal verband tot afspraken te komen over emissiereducties van zwaveldioxide. Uitgaande van het voorzorgsbeginsel werd in Nederland al vroegtijdig beleid geformuleerd om de gevolgen van verzuring te bestrijden (zie de tekstbox *Het voorzorgsbeginsel*) (zie verder ook hoofdstuk 3, Beleid).



Bron: VROM (1985)

Een beeld uit de voorlichtingscampagne die de Nederlandse overheid in de jaren tachtig voerde onder de titel 'Gisteren, vandaag, morgen'. De campagne was bedoeld om mensen bewust te maken van het probleem van de zure regen en van hun eigen betrokkenheid bij dat probleem.

Het voorzorgsbeginsel

Het voorzorgsbeginsel houdt in dat op basis van nog onvolledig wetenschappelijk bewijs maatregelen worden genomen om een probleem aan te pakken. Het is dus een vorm van preventieve anticipatie (Hettelingh 1998). Er wordt actie ondernomen en beleid ontwikkeld vooruitlopend op mogelijk nadere wetenschappelijke informatie. Een achterliggend argument is hierbij dat uitstel van maatregelen zou kunnen leiden tot hogere kosten voor maatschappij en milieu.

Verdere aspecten die bij het voorzorgsbeginsel een rol kunnen spelen, zijn:

- de milieugebruiksruimte beschermen, om te voorkomen dat tolerantiegrenzen van buffermechanismen te dicht worden benaderd of zelfs worden overschreden.
- de bewijslast bij de initiatiefnemer van een activiteit leggen. Dit is bedoeld om de ontwikkeling en ontplooiing van milieuvriendelijke handelingen te stimuleren in plaats van af te gaan op vermeende 'berekende' risico's van mogelijk schadelijke activiteiten.

- van intrinsieke natuurlijke waarden erkennen, door een (wettelijk) kader te scheppen voor de handhaving van natuurlijke processen die voor het voortbestaan van het leven op aarde onontbeerlijk zijn.
- historische ecologische schulden meetellen, zodanig dat de noodzaak om voorzorgsmaatregelen te nemen groter wordt voor die activiteiten die in verband kunnen worden gebracht met in het heden of verleden reeds veroorzaakte schade.

Het voorzorgsbeginsel is een belangrijk principe in het milieubeleid. Het vond voor het eerst toepassing bij de discussie over de *Wet inzake de luchtverontreiniging* in 1970; dit in navolging van de opvatting van de toenmalige Raad van Europa. Het beginsel is in het internationale milieubeleid nadrukkelijk vastgelegd in Agenda 21 zoals aangenomen tijdens de UN Conference on Environment and Development in 1992 in Rio de Janeiro. Het voorzorgsbeginsel is sinds 1998 vermeld in de preambule van de CLRTAP-protocollen over Heavy Metals (zware metalen) en POP (persistente organische stoffen) en van het *Gotenburg Protocol*.

Effecten van zure regen

Dit hoofdstuk beschrijft de effecten van zure depositie op natuur. De centrale vraag hierbij is of de wetenschappelijke onderbouwing van het overheidsbeleid in de jaren tachtig wordt gerechtvaardigd vanuit de huidige kennis over de effecten van luchtverontreiniging. Daartoe wordt in eerste instantie ingegaan op de ontwikkeling van de beschikbare kennis en data. Vervolgens komt aan de orde hoe deze kennis is uitgemond in ondersteuning van Nederlands en internationaal luchtbeleid, dat erop is gericht om negatieve effecten te voorkomen. Tot slot wordt aangegeven waarom de verzuringsschade beperkt is gebleven.

2.1 Effecten op ecosystemen

2.1.1 Invloed verzuring op waterleven en biodiversiteit van bos, heide en grasland

Waterleven

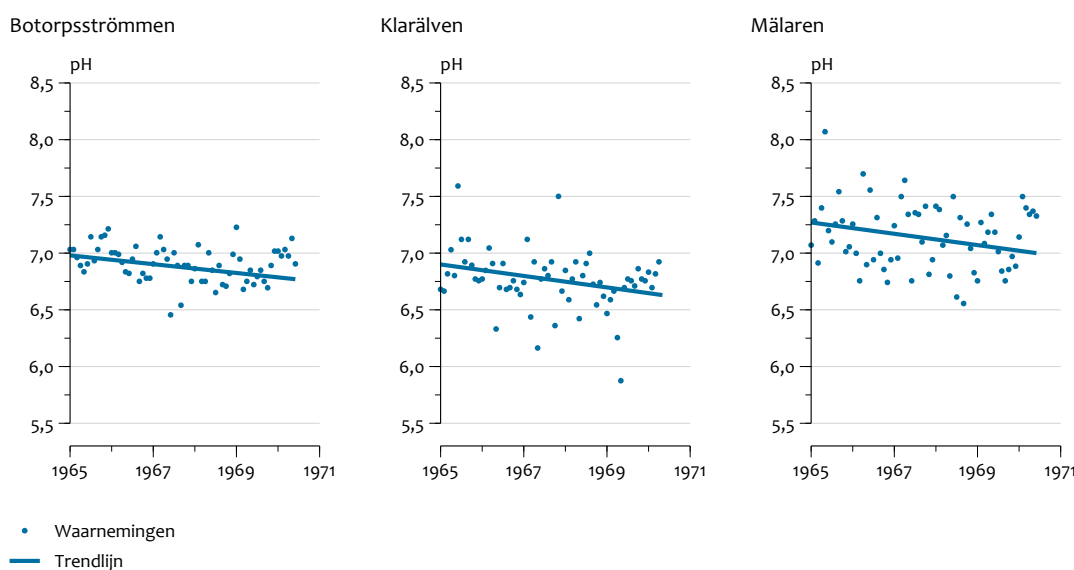
Wetenschappelijk onderzoek in de jaren zeventig leerde dat de oorzaak van vissterfte in de meren van Zweden en Noorwegen moest worden gezocht in de verzuring van oppervlaktewater. Vanaf de jaren zestig steeg de zuurgraad van het

oppervlaktewater in Scandinavië (figuur 2.1), daalde de visstand en werd ook het plantenleven in de meren aangetast. De relatie tussen verzuring en vissterfte bleek uit het moment waarop vissterfte werd waargenomen. Deze trad vooral op in het voorjaar, wanneer de zuurgraad van het water steeg doordat zuur smeltwater in de meren stroomde. De vissen hadden schade aan hun kieuwen door een teveel aan aluminium in het water. Onderzoek toonde aan dat dit aluminium vrijkwam als de bodem verzuurde. Daarnaast werden eieren van vissen aangetast als het water te zuur werd. Vergelijkbare schade werd later gemeld in onder andere Canadese en Amerikaanse meren (zie bijvoorbeeld Beamish & Harvey 1972; Beamish et al. 1975; Schofield 1976).

Ook in Nederland en België was schade zichtbaar in door regenwater gevoede wateren (Van Dam & Kooyman-Van Blokland 1978; Van Dam et al. 1981). Waterleven in vennen, in de vorm van kiezelwieren, plantensoorten en amfibieën verdween en kwam op de Rode Lijst van beschermde soorten. Verzuring van oppervlaktewateren bleef in Nederland beperkt tot deze vennen, omdat andere wateren minder onder invloed staan van regen. Verzuring in Scandinavië en Canada was door de schade aan de meren een grootschalig

Zuurgraad Zweedse meren

Figuur 2.1



Bron: Odén (1968); bewerking PBL

Geleidelijke daling van de pH (stijging zuurgrond) in Zweedse meren.

1976



1995



Bron: Černý & Pačes (1995)

Bossterfte in de Jizerské Hory: 1976 (boven) en 1995 (onder).

probleem. Nog steeds worden in Zweden meer dan 7.000 meren en 12.000 kilometer aan beken jaarlijks bekalkt om verzuring tegen te gaan (Naturvardsverket 2009). Effectgerichte maatregelen om verzuring van vennen (bekalking, schoning), van bosbodems (bekalking) en van heide (plaggen) te voorkomen, zijn en worden ook in Nederland uitgevoerd (De Haan et al. 2008).

Bossen

Rond 1947 werd schade aan bossen, zoals bladverlies en vergeling, geconstateerd in het Ertsgebergte (Krušné Hory) in de grensstreek tussen Duitsland, Polen en het toenmalige Tsjecho-Slowakije. Deze schade werd toegeschreven aan bodemverzuring (Němec 1952). Tussen 1950 en 1980 verspreidde de bosschade zich gestaag in deze zogeheten Zwarte Driehoek.

In het Erts- en het IJzergebergte (Krušné Hory en Jizerské Hory) moest tussen 1974 en 1990 jaarlijks voortijdig 300.000 tot 600.000 kubieke meter aan dode en beschadigde bomen worden verwijderd (Galinskí & Witowski, geciteerd in Černý & Pačes 1995). In het totale Sudetengebied liep dit op tot bijna 2 miljoen kubieke meter aan bomen, waarbij in totaal 14.000 hectare bosgebied moest worden gerooid (figuur 2.2).

In de jaren zeventig werd ook grootschalige bosschade vastgesteld op andere locaties in Duitsland. Luchtverontreiniging werd daarbij als een van de belangrijkste oorzaken genoemd. Bij een inventarisatie van de schade in de Duitse bossen in 1982 werd 8 procent van alle bomen als ziek omschreven. Slechts één jaar later, in 1983, was dit 34 procent (Poortinga 1984). Wel moet worden opgemerkt dat dit verschil deels

werd veroorzaakt doordat een gestandaardiseerde meetmethode ontbrak.

Naar aanleiding van de bevindingen in Duitsland startte in 1980 in Nederland ook onderzoek naar bosvitaliteit en de relatie met luchtverontreiniging. Argument voor het uitvoeren van dit onderzoek was dat de concentraties van luchtverontreiniging in Nederland niet veel lager waren dan die in Duitsland. Daarnaast was in het Duitse onderzoek bossterfte gemeld tot aan de Nederlandse grens. Bovendien werd verwacht dat ook de Nederlandse bossen gevoelig zouden kunnen zijn voor verzuring, aangezien de meeste bossen in Nederland voorkomen op verzuringsgevoelige zandgronden. Het vitaliteitsonderzoek kwam voort uit de motie-De Boois, waarin de Tweede Kamer de regering verzocht schade in beeld te brengen en een programma van maatregelen op te stellen om bodemverzuring te voorkomen en te bestrijden.

Uit eerste onderzoeken bleek dat Nederlandse bosbodems waren verzuurd (Van Breemen et al. 1983, 1984). De hoeveelheid opgelost aluminium in het bodemvocht was verhoogd en de hoeveelheid calcium was verlaagd. Deze condities zijn giftig voor boomwortels. Ook zijn ze schadelijk voor het bodemleven: in de verzuurde bodem ontbrak het aan wormen en andere bodemorganismen. Uit vervolgonderzoek in 1.500 als vitaal aangemerkte bossen bleek dat minstens 90 procent van de naaldbossen licht was aangetast (Staatsbosbeheer 1983). De onderzoekers kwamen tot deze gevolgtrekking op grond van de Duitse methode om bosvitaliteit te meten. De inspectie Bosbouw trok daarop de volgende conclusie: de conditie van het Nederlandse bos is zorgwekkend, omdat zelfs in de naar verhouding meest vitale opstan-

den zeer frequent verschijnselen worden waargenomen die duiden op een labiele toestand. Een 'labiele toestand' wilde zeggen dat er maar weinig extra belasting in de vorm van droogte, vroege najaarsvorst, insecten of hogere luchtverontreiniging nodig was om bossen op grote schaal te laten afsterven. Daarbij moet overigens worden opgemerkt dat het waargenomen vitaliteitsverlies niet leek op de krantenfoto's die destijds van het Duitse 'Waldsterben' werden gepubliceerd.

Effecten van bodemverzuring

Sinds de jaren tachtig zijn duizenden wetenschappelijke artikelen en boeken verschenen over verzuring in Europa en in toenemende mate ook daarbuiten. Ook nu nog wordt veel gepubliceerd over verzuring van de bosbodem. Dit blijkt bijvoorbeeld uit het stijgende aantal artikelen uit China. Hier is de zuurdepositie erg hoog en wordt bodemverzuring en bosschade gemeld (onder andere Tao et al. 2002; Duan et al. 2004; Guo et al. 2004).

Bodemverzuring, een belangrijke oorzaak voor de effecten op bos en natuur, is goed onderzocht (zie de toelichting in de tekstbox *Zure regen, verzuring en bodemverzuring*). Het treedt op na toevoer van zuur en de daarmee gepaard gaande afname van zuurbufferende stoffen, zoals basische kationen (o.a. calcium en magnesium). Daarnaast kan de bodem verzuren als gevolg van natuurlijke processen (De Vries & Breeuwsma 1986, 1987). Zo kunnen uit afgestorven plantenresten zuren worden gevormd. Door oogst van gewassen of hout kunnen zuurbufferende stoffen, zoals kalium en calcium, uit de bodem verdwijnen, waardoor de bodem uitgeput raakt en verzuurt. Ook kan door bemesting of door grond-

Zure regen, verzuring en bodemverzuring

Wat in populaire termen 'zure regen' heet, wordt ook wel aangeduid met de term 'zure depositie', 'verzurende depositie', 'potentieel verzurende depositie' of nog algemener 'verzuring'. Verzuring omvat de gezamenlijke (milieu-)effecten van luchtverontreinigende zure stoffen die via de atmosfeer worden aangevoerd. De aandacht gaat daarbij vooral uit naar zwaveldioxide (SO_2) en stikstofoxiden (NO_x), verbindingen waaruit zwavelzuur en salpeterzuur ontstaan, en naar ammoniak. Stikstofoxiden dragen bij aan de vorming van troposferisch ozon, dat negatieve effecten heeft op de gezondheid van de mens en de kwaliteit van de natuur. Stikstof in de vorm van nitraat, afkomstig van salpeterzuur, en ammoniak zorgt niet alleen voor verzuring, maar werkt het ook als meststof voor planten.

Bij verzuring gaat het niet alleen om de effecten van zuurtoevoer via de neerslag (De Vries 2008). Ook gassen – zwaveldioxide (SO_2) en ammoniak (NH_3) – hebben een verzurend effect. Hoge concentraties van deze stoffen in de lucht zijn giftig voor bijvoorbeeld korstmossen en planten. Daarnaast kan toevoer van verzurende stoffen zoals stikstof- en zwavelverbindingen via droge of natte depositie aan de bodem tot bodemverzuring leiden.

De term bodemverzuring moet daarbij ook niet te beperkt worden opgevat. Van bodemverzuring is niet alleen sprake als de bodem zuurder wordt (ofwel als de pH daalt). Ook het proces dat aan pH-daling voorafgaat en de cascade van effecten die optreden als gevolg van de stijgende zuurgraad zijn in de definitie betrokken. Wanneer zuur op een bodem terecht komt, zal op termijn de zuurgraad van die bodem veranderen. Veranderingen in de pH treden echter niet meteen op. Bodems bevatten van nature stoffen die zuur bufferen of neutraliseren, zoals kalk, kleimineralen, humus en aluminium- en ijzeroxiden. De aanwezigheid van deze stoffen wordt ook wel de buffercapaciteit van de bodem genoemd. Als zuur wordt toegevoegd, zal de buffercapaciteit langzaam afnemen. Tijdens dit proces lossen de bufferende stoffen gaandeweg op in het bodemvocht en neutraliseren daarbij het zuur. Zo komt aluminium vrij in zure bodems die gebufferd worden door aluminiumoxiden. Zolang er voldoende bufferende stoffen aanwezig zijn, verandert de pH nauwelijks bij toevoer van zuur. Wel verandert de chemische samenstelling van de bodem en de samenstelling van flora en bodemfauna. Zo kan toename van het giftige aluminium in het bodemvocht planten en bodemleven nadelig beïnvloeden, al voordat de zuurgraad van die bodem is veranderd. Wanneer de bodem de toename van zuur niet meer kan bufferen, neemt de zuurgraad plotseling snel toe.

waterstandverlaging een stijging van de zuurgraad optreden (Runhaar et al. 1996). In dit rapport wordt alleen verzuring van de bodem als gevolg van toevoer van zure of verzurende stoffen uit de lucht behandeld.

Wetenschappelijk onderzoek (zie onder andere Ulrich 1983; De Vries et al. 1995; Carnol et al. 1997; De Vries 2008) heeft aangetoond dat toevoer van zuur aan de bodem uiteindelijk leidt tot:

- Stijging van de zuurgraad (= een daling van de pH).
- Vermindering van de hoeveelheid basische kationen, zoals calcium, magnesium of kalium. Basische kationen zijn tevens voedingsstoffen voor planten. Wanneer deze stoffen uitspoelen uit de bodem, zijn zij niet meer beschikbaar als voedingsstof.
- Verhoogde concentraties van aluminium en zware metalen.
- Veranderingen in de verhouding tussen nitraat en ammonium in de bodem.

Het is aangetoond dat deze veranderingen ook plaatsvonden en -vinden in bossen, heiden en graslanden in situaties met een hoge zuurdepositie. Zo is in zandige Belgische bosbodems een significante toename van de zuurgraad vastgesteld tussen 1950/65 en 1985 (Ronse et al. 1988) en tussen 1985 en 2000 (De Schrijver et al. 2006). In sommige delen van de Zwarte Driehoek was in de jaren negentig de zuurgraad van de bodem vergelijkbaar geworden met die van azijn (Walendzik, geciteerd in Černý & Pačes 1995). Verschillende onderzoeken hebben een verband gelegd tussen de mate van de bodemchemische veranderingen en het depositieniveau van zuur.

Tal van onderzoek heeft laten zien dat bovengenoemde chemische veranderingen in de bodem effecten hebben op de natuur (zie onder andere Houdijk et al. 1993; Van Breemen & De Vries 1998; Achermann & Bobbink 2003; Van den Berg et al. 2005). Enkele van deze effecten zijn:

- Een te hoge zuurgraad van de bodem tast wortelcellen aan.
- Een tekort aan basische kationen leidt tot verminderde plantengroei en tot gebreksziekten in planten.
- Te hoge concentraties van aluminium in de bodem resulteren in schade aan wortels. Datzelfde geldt voor toename van giftige zware metalen, zoals cadmium.
- Verandering in zuurgraad beïnvloedt biologische bodemprocessen zoals de omzetting van organische stikstofverbindingen in nitraat (nitrificatie). Door nitrificatie stijgt de concentratie van ammonium, hetgeen toxisch is voor sommige plantensoorten.

Effecten van een veranderende bodemchemie zijn niet alleen aangetoond bij de planten, hoewel het merendeel van het effectonderzoek zich op planten heeft gericht. Zo is aangetoond dat schimmels en bodemfauna te leiden hebben van een hoge zuurgraad (tabel 2.1). Datzelfde geldt voor te hoge concentraties van bijvoorbeeld zware metalen en aluminium in de bodem. Van Breemen & De Vries (1998) geven een overzicht van effecten op bosecosystemen, waaronder de aangetoonde aantasting van de mycorrhizaschimmels (Arnolds 1991), die onder meer van belang zijn voor plantengroei.

Ook bestaan er aanwijzingen voor effecten op bijvoorbeeld vogels. Bodemverzuring heeft hier een indirect effect. Verhoogde vogelsterfte bij mezen bleek veroorzaakt door het dunner worden van eischalen (Graveland et al. 1994), een gevolg van de afgenomen beschikbaarheid van calciumverbindingen in het voedsel van die vogels. Dit effect wordt door Graveland et al. (1994) toegeschreven aan verhoogde verzuring. Ook de gezondheid van de mens kan via indirecte beïnvloeding theoretisch te leiden hebben van bodemverzuring (Albers et al. 2001). Veranderingen in bodemvocht kunnen via oppervlaktewater en grondwater het drinkwater beïnvloeden. Blootstelling aan te veel aluminium verhoogt het risico op de ziekte van Alzheimer en langdurige blootstelling aan nitraat (in drinkwater) verhoogt het risico op aandoeningen als blaas- en eierstokkanker (Weyer et al. 2001). Niet alleen chemische veranderingen in het milieu kunnen de mens beïnvloeden, maar ook andere veranderingen in de ecosystemen. Er is inmiddels veel werk gedaan om het belang van ecosystemen voor de mens en de aantasting van deze ecosysteemdiensten te beoordelen (bijvoorbeeld in de *Mil-lenium Ecosystem Assessment*, zie Corvalan et al. 2005).

Bovengenoemde biologische effecten van verzuring zijn veelal directe of toxische effecten van bodemchemische veranderingen. Veranderingen in ecosystemen kunnen echter ook verlopen zonder dat vergiftiging een belangrijke rol speelt. Plant- en diersoorten zijn aangepast aan de omgeving waarin zij voorkomen. Veranderen de condities van die omgeving, dan verandert ook de soortensamenstelling. Biologen beschouwen de zuurgraad van de bodem als één van de belangrijke kenmerken die variaties tussen ecosystemen of vegetatietypen bepalen (zie bijvoorbeeld Runhaar et al. 1987). Onderzoek heeft aangetoond dat bij veranderingen in de zuurgraad soorten die waren aangepast aan de oorspronkelijke condities, verdwijnen en worden verdrongen door zuur-tolerante soorten. Dit betekent meestal een achteruitgang van de oorspronkelijke biodiversiteit.

Stikstof alleen geeft ook effecten

Verschuivingen in soortensamenstelling van de flora treden ook op door enkel het stikstofdeel van de zure depositie. Stikstof is een groeistof voor planten en heeft daarom naast een verzurend effect ook een vermestend effect. In veel natuurlijke ecosystemen is de beschikbaarheid van stikstof een limiterende factor voor plantengroei. Bij een toenemende stikstoftoevoer verandert daarom de diversiteit van de bosondergroei en neemt het aantal stikstofminnende soorten af (Van Dobben et al. 1999; Achermann & Bobbink 2003; De Haan et al. 2008). Experimenten hebben aangetoond dat de vegetatie hoger en dichter wordt door de toevoer van extra stikstof. Een veranderende vegetatiestructuur kan daarbij weer gevolg hebben voor diersoorten, zoals vlinders (Wallis de Vries & Van Swaay 2006) en vogels (zie Kros et al. 2008). Het is overigens lastig om verzurende en vermestende effecten op natuur te scheiden, omdat een deel van de betrokken stoffen zowel verzuring als vermesting veroorzaakt. Daarnaast zijn verzuringsgevoelige soorten ook vaak gevoelig voor vermesting door stikstofdepositie (tabel 2.1).

Stikstof als meststof kan boomgroei bevorderen. Zo laten Kauppi et al. (1992) zien dat er in Europa sprake is van een versneld groeiende houtvoorraad door de vermestende werking

Ecosysteem	Belangrijkste effecten van zuur	Belangrijkste effecten van stikstof
Bossen		
<i>Bossen op arme zandgronden</i>	Achteruitgang gevoelige soorten Verhoogde uitspoeling van basische kationen en toename van aluminium Wortelschade Verminderd bodemleven Toename plaaggevoeligheid door schade aan naalden/bladeren	Veranderingen in ondergroei, zoals toename braam en grassen Verruiging en vergrassing ondergroei Afname paddenstoelen, waaronder cantharel Verhoogde stikstofuitspoeling Toename plaaggevoeligheid bomen door verstoorde nutriëntenbalans
<i>Bossen op rijke gronden</i>		Veranderingen in de ondergroei
Heiden		
<i>Droge heide</i>	Achteruitgang gevoelige soorten Toename aluminium, daling pH	Vergrassing, bijvoorbeeld door toename bochtige smele Ophoping van stikstof
<i>Natte heide en hoogveen</i>	Achteruitgang gevoelige soorten Toename aluminium, daling pH	Achteruitgang kenmerkende mossen Toename van grassen, zoals pijpestrootje Ophoping van stikstof
Soortenrijke graslanden		
<i>Nat schraal grasland</i>	Achteruitgang gevoelige soorten Toename aluminium, daling pH	Achteruitgang gevoelige soorten
<i>Droog schraal grasland</i>	Achteruitgang gevoelige soorten Toename aluminium, daling pH	Vergrassing, zoals toename gewoon struisgas Achteruitgang gevoelige soorten
<i>Kalkgrasland</i>	Achteruitgang gevoelige soorten Toename aluminium, daling pH	Verhoogde mineralisatie Ophoping van stikstof en uitspoeling Toename grassen, zoals geveerde kortsteel Achteruitgang gevoelige soorten
Oppervlaktewater		
<i>Meren, beken en bronnen</i>	Verzuring; ammoniumtoxiciteit Schade aan vissen, amfibieën	Bijdrage aan verzuring Achteruitgang (onder)waterplanten
<i>Kustwateren</i>	Afname gevoeligheid	Ophoping van stikstof
<i>Vennen</i>	Verzuring; ammoniumtoxiciteit Schade aan amfibieën	Achteruitgang gevoelige soorten Toename van soorten als knolrus

¹ De effecten van verzuring en vermesting kunnen in combinatie met elkaar of in combinatie met andere stressoren (zoals ozon) worden versterkt.

van stikstof. Zij verwachten echter dat deze groei op de lange termijn zal stoppen en verminderen als gevolg van verzuring. Als door verzuring de basische kationen uit de bodem blijven uitspoelen, zal de boomgroei op den duur vertragen en zullen gebreksziekten kunnen gaan optreden. De groei van de bomen zal dan namelijk worden gelimiteerd door het gebrek aan basische kationen en niet verder toenemen door het stikstofaanbod. Dergelijke effecten van luchtverontreiniging op bodemchemie zijn ook eenduidig vastgesteld. Dat geldt veel minder voor de mogelijk beperkende invloed van basische kationen op de groei.

Gevolgen van overmatige stikstofdepositie laten zich in het veld makkelijker herkennen dan gevolgen van verzuring. Zo is er, zoals uit buitenlands onderzoek blijkt, in het veld een waarneembare relatie tussen de hoogte van de depositie en het voorkomen van plantensoorten (figuur 2.4); ook is er een verband tussen de stikstofdepositie en de mate waarin nog open vegetaties voorkomen in de Nederlandse duinen (Van Hinsberg & Van der Hoek 2003). Met dergelijke dosis-effectfuncties kunnen effecten worden gekwantificeerd. Wel

geldt dat het voorkomen van plant- of diersoorten afhangt van tal van factoren zoals bos- en natuurbeheer, omvang van het leefgebied, versnippering van het leefgebied en mate van verdroging. Bij ongunstige condities is schade aan bomen aantoonbaar.

Schade aan bomen is vooral goed zichtbaar als mechanismen die boomschade kunnen uitstellen, minder goed werken. Het gaat om mechanismen als:

- De bodemchemie. In de bodem kan de buffercapaciteit lange tijd een toename van de zuurgraad tegengaan.
- De boomgroei. Schade aan wortels en bladeren van een individuele boom kan binnen het groeiseizoen worden opgevangen door ontwikkeling van nieuwe wortels of bladeren. Bomen kunnen ook gaan wortelen in diepere, nog niet verzuurde, bodemlagen. Effecten worden pas zichtbaar als de bomen niet meer kunnen herstellen of als ook diepere bodemlagen verzuurd raken.
- De bosvariatie. De capaciteit van bomen om veranderingen in de omgeving te weerstaan varieert per leeftijd, ras en soort. In natuurlijke bossen zal door deze variatie

grootschalige schade worden gebufferd. Bij bosbeheer dat gebruikmaakt van aanplant van één en dezelfde leeftijd, ras en soort kan schade zich grootschalig manifesteren.

In de Zwarte Driehoek in het grensgebied van Duitsland, Polen en Tjecho-Slowakije kon grootschalige schade optreden, doordat genoemde mechanismen nog maar beperkt

Potentieel zuur

De verzurende depositie wordt in Nederland uitgedrukt in 'potentieel zuur'. Dit begrip werd in 1986 geïntroduceerd in het allereerste jaaroverzicht van de luchtkwaliteit (RIVM 1986). De definitie luidt: 'Potentieel zuur is gedefinieerd als de maximale verzuring, die zwaveldioxide, stikstofoxiden en ammoniak en hun omzettingproducten in bodem en water teweeg kunnen brengen.' De daadwerkelijke verzuring in bodem en water kan lager zijn, doordat in de bodem potentieel verzurende stoffen worden gebufferd en vervolgens omgezet in niet-verzurende stoffen of opgenomen door planten.

Wat er in werkelijkheid met verzurende stoffen na depositie gebeurt, hangt dus af van wat er in de bodem en de vegetatie met die stoffen gebeurt. Als de gedeponeerde stoffen niet worden opgenomen en uitspoelen, dan zal de zuurgraad van de bodem en het grondwater stijgen. Uit Europees onderzoek blijkt dat de depositie van zwavel grotendeels wordt uitgespoeld en dus verzurend werkt.

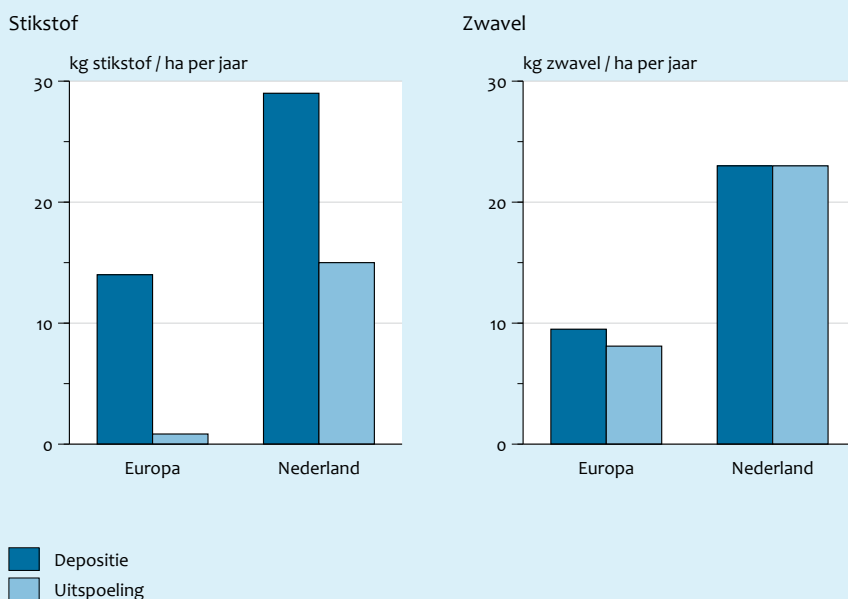
Voor stikstof ligt dit anders. Daarbij is soms verwarring over de verzurende werking van ammoniak, omdat in de atmosfeer ammoniak zuurneutraliserend werkt. Komt ammoniak (of het omzettingproduct ammonium) in de bodem dan kan het worden omgezet in salpeterzuur (Lekkerkerk et al. 1995; De Haan et al. 2008). Er is dan alsnog een verzurend effect. In 1982 verscheen een artikel waarin de verzurende werking van ammonium in de bodem in Nederlandse bossen werd aangetoond (Van Breemen et al. 1982).

Onderzoek in Europese bossen laat zien dat een deel van de gedeponeerde stikstof niet wordt opgenomen, maar uitspoelt en daardoor verzurend werkt (Kros et al. 2008). Zetten we deze gegevens in een Nederlandse context, dan zal bij het gemiddelde depositieniveau van 30 kilogram stikstof per hectare per jaar ongeveer 15 kilogram stikstof per hectare per jaar uitspoelen en dus verzurend werken. Anders geformuleerd: in Nederland zal, gemiddeld, ongeveer 50 procent van de gedeponeerde stikstof verzurend kunnen werken. Overigens gelden de hiervoor genoemde getallen alleen voor bossen. De situatie kan voor andere ecosystemen, zoals heide en (natuurlijk) grasland, geheel anders liggen.

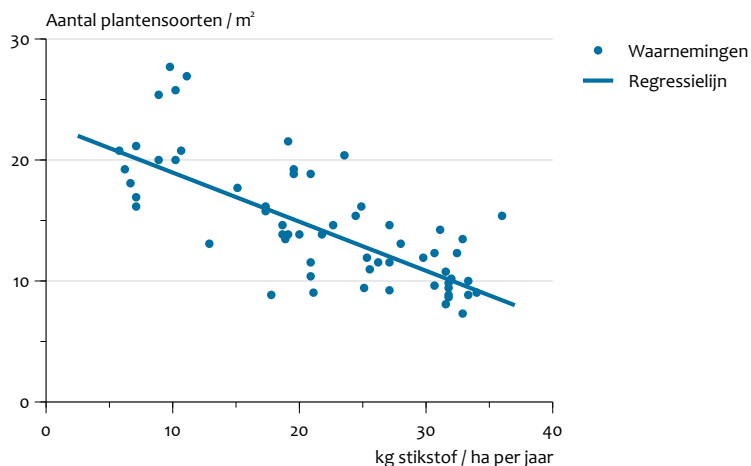
Figuur 2.3 toont de depositie van zwavel en stikstof op Europese bossen en de mate van uitspoeling onder deze bossen (Kros et al. 2008). De figuur toont mediaanwaarden op basis van onderzoek op 121 beboste plaatsen. Nederlandse bossen waren niet in het onderzoek betrokken. De balken die de situatie voor Nederlandse bossen aangeven, zijn dan ook hypothetisch. Ze zijn voor zwavel gebaseerd op de huidige, gemiddelde zwaveldepositie in Nederland en de veronderstelling dat de Nederlandse bosbodem geheel met zwavel is verzadigd. Al het gedeponeerde zwavel werkt dan verzurend. Voor stikstof zijn de balken gebaseerd op de huidige, gemiddelde stikstofdepositie in Nederland en de veronderstelling dat per jaar 15 kilogram stikstof per hectare uitspoelt. In het voorbeeld zou dan bijna 50 procent van de gedeponeerde stikstof (= 14 kilogram op een totaal van 29) verzurend werken

Figuur 2.3

Depositie en uitspoeling, 1995 – 1998



Bron: Kros et al. 2008; bewerking PBL



Bron: Stevens et al. (2004); bewerking PBL

Afname van het aantal plantensoorten in Engelse graslanden in relatie tot de heersende depositie.

werkzaam waren. Zo gold daar dat:

- De depositie van zuur en stikstof erg hoog was.
- De chemische buffering van de rotsachtige bodem beperkt was.
- De rotsachtige bodem weinig mogelijkheden liet voor worteling in diepere, minder snel verzurende bodemlagen.
- De biologische variatie in bomen door het gevoerde bosbeheer zeer gering was en alle bomen even gevoelig waren.
- Het bosbeheer de bodem gevoelig voor verzuring had gemaakt.
- Er sprake was van andere met verzuring samenhangende, slechte milieucondities zoals hoge atmosferische concentraties van ozon en zwaveldioxide.

2.1.2 Luchtverontreiniging en bosvitaliteit

Nederlandse bomen zijn niet doodgegaan, wel zijn bossen aangetast

Er is wetenschappelijke consensus over de invloed van verzuring op de achteruitgang van waterleven en biodiversiteit van bos, heide en grasland. De relatie tussen luchtverontreiniging en de vitaliteit van bomen is echter nog steeds onderwerp van studie. Augustin et al. (2005) beschrijven hoe symptomen zoals vergeling en verlies van boombladeren en naalden niet met de gangbare, wetenschappelijke kennis over verzuring konden worden verklaard. Sommige onderzoeken melden een versnelde groei van bomen (Utschig 1989; Spiecker et al. 1996), terwijl Ulrich et al. (1979) in hun studie een afname hadden verwacht. Stikstofdepositie, die sinds de jaren tachtig hoog is gebleven, kan boomgroei bevorderen, tenzij deze extreem hoog is. De snelle groei van bomen hoeft niet te betekenen dat ook de vitaliteit toeneemt: zo kan depositie de worteling van de bomen verzwakken (zie volgende paragraaf, Schade blijkt gevolg van complex samenspel van factoren).

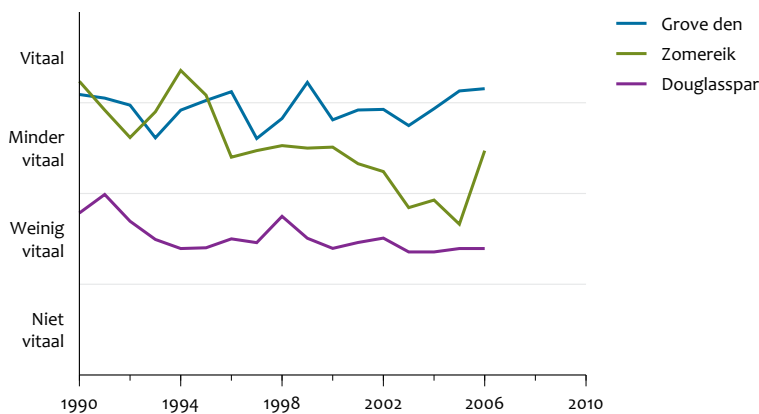
Ook uit het Nederlandse onderzoek naar bosvitaliteit, dat in 1998 werd gepresenteerd, blijkt dat veranderingen in de vitaliteit van bomen moeilijker te duiden zijn dan in de jaren

tachtig werd gedacht (Leeters et al. 2007). ‘Het Nederlandse bos is op korte en middellange termijn niet bedreigd in zijn voortbestaan’, zo concludeerden Reuver et al. (1998). De trend in vitaliteit van een aantal boomsoorten, afgemeten aan de mate van bladverlies, vertoont ook geen duidelijke relatie met de afname van de zure depositie. Bij sommige soorten gaat de vitaliteit geleidelijk achteruit sinds 1990, bij andere boomsoorten is er geen zichtbare trend (figuur 2.5).

Duidelijk is wel dat het bosesysteem als geheel is aangetast. De Nederlandse eikenbossen verkeren naar Europese maatstaven in een slechte staat van instandhouding. Belangrijkste redenen zijn de slechte bodemkwaliteit (door te hoge voedselrijkdom) en de verstoorde vegetatiestructuur van de ondergroei. Dit laatste blijkt onder andere uit de dichte grasmat, het ontbreken van een moslaag en van paddenstoelen, en een toename van stikstofminnende plantensoorten. Te hoge atmosferische depositie van zowel zuur als stikstof wordt gezien als een belangrijke oorzaak van deze slechte condities. Dit geldt ook voor andere verzuringsgevoelige natuur zoals duinen, heide en vennen. Effecten op de bomen zelf blijken vaak moeilijk zichtbaar door interacties van atmosferische depositie met andere omgevingsfactoren.

Schade blijkt gevolg van complex samenspel van factoren

Sinds 1985 houdt het *International Co-operative Programme on Forests* bij wat de vitaliteit van de Europese bossen is (zie www.icp-forests.org). Augustin et al. (2005) geven een overzicht van het wetenschappelijke onderzoek dat in de afgelopen twee decennia is gedaan naar de oorzaak-gevolgrelaties van boomschade (voorbeelden zijn Ellenberg et al. 1986; Matzner 1988; Schulze 1989; Ulrich 1989; Innes 1992; Matschullat et al. 1994; Wright et al. 1995; Müller-Edzard et al. 1997; Lükewille et al. 1997; Augustin & Andreae 1998; De Vries et al. 2000). Boomschade blijkt te worden veroorzaakt door een complex samenspel van factoren. Vele factoren zoals weer, klimaat, ziekten (schimmels, virussen), bodemcondities (verzuring en vermesting) en plagen (insecten) hebben invloed op de gezondheidstoestand van bomen. Ook interacties met andere stressoren, zoals een te hoog depositieniveau



Bron: Leeters et al. (2007); bewerking PBL

Onderzoek wijst uit dat de vitaliteit van zomereik en douglasspar vanjaar tot jaar wisselt, maar geleidelijk achteruitgaat. De grove den lijkt zich de laatste jaren wat te herstellen.

van stikstof en een te hoge concentratie van (troposferisch) ozon, kan belangrijk zijn.

Luchtverontreiniging beïnvloedt niet alleen de bodemcondities maar heeft ook gevolgen voor het klimaat en voor de aanwezigheid van ziekten en plagen. Het was en is dan ook te simpel om de schade aan bomen toe te schrijven aan verzurende atmosferische depositie alleen. Zo zijn de gevolgen van verzuring voor bomen vaak pas goed zichtbaar na het optreden van een storm of na de uitbraak van een ziekte, veroorzaakt door schimmels of insecten. In 1999 zorgde bijvoorbeeld de Lothar-storm voor grote schade aan Zwitserse bossen. Dit kon gebeuren doordat de wortels al door verzuring waren aangetast (Braun et al. 2003). In totaal viel 12,7 miljoen kubieke meter aan bomen om; dit is het drievoudige van de jaarlijkse oogst. De schade bleek significant af te hangen van de hoeveelheid basische kationen in de bodem. Bij verzuurde bodems, waarin wortels minder goed gedijen, was de schade een factor vier tot vijf hoger dan in bodems met veel basische kationen (ofwel met een hoge basenverzadiging).

In een recent overzichtsartikel over verzuringseffecten in Noord-Amerikaanse bossen geven Fenn et al. (2006) aan dat onderzoek in toenemende mate wijst op de rol van basische kationen. De uitputting van deze kationen speelt een rol in het mechanisme waarbij zure depositie de duurzaamheid en de productiviteit van bossen beïnvloedt. Dit is vooral het geval bij bossen op bodems die van nature al weinig basische kationen bevatten en/of bodems die al zijn uitgeput door bosbouw. Fenn et al. (2006) zien duidelijke relaties tussen de omvang van de zure depositie, de aanwezigheid van calcium en de gevoeligheid van belangrijke boomsoorten als spar (red spruce) en esdoorn (sugar maple) voor abiotische stressoren. Zo zijn er sterke aanwijzingen dat zure depositie boomsterfte bij de spar veroorzaakt als gevolg van afgenomen tolerantie voor kou (Driscoll et al. 2001).

Onderzoek heeft ook duidelijk gemaakt dat de gevoeligheid voor ziekten en plagen wordt vergroot door de depositie van zuur en stikstof. In aangetaste bossen in Nederland bleek de bodem vaak verzuurd (Kros et al. 2008). In de jaren tachtig werden nog vele honderden hectaren bos gekapt vanwege plaagschade. Nu is dat niet meer het geval en komt plaagschade in de Nederlandse bossen veel minder voor dan vroeger. Deze verminderde schade wordt toegeschreven aan de verlaagde depositie van zuur en stikstof. Niettemin is ook de relatie tussen plaagschade en verzuring complex. Zo is in matig vervuilde gebieden in Europa een toename van insectenplagen vastgesteld, terwijl in zeer sterk vervuilde gebieden juist sprake blijkt van een afname.

2.2 Het concept van de 'critical load'

2.2.1 Methoden om risico's tijdig in beeld te brengen

In de jaren tachtig werd het niet als een optie gezien om te wachten op een afgerond wetenschappelijk onderzoek naar de oorzaak-gevolgrelaties tussen depositie en schade aan natuurlijke ecosystemen. Het voorzorgsbeginsel speelde in het beleid dan ook een belangrijke rol: men wilde de noodzakelijke omvang van emissiereducties vaststellen en drong er bij onze buurlanden, inclusief het Verenigd Koninkrijk, op aan om hetzelfde te doen (Keizer 2009).

Wel werd tegelijk met het inzetten van emissiereducties binnen de LRTAP-conventie een omvangrijk internationaal wetenschappelijk netwerk opgezet om de risico's en effecten van verzuring beter in beeld te brengen. Dit leidde tot de ontwikkeling van het begrip kritisch depositieniveau ofwel *critical load*. Een kritisch depositieniveau is gedefinieerd als de maximaal toelaatbare hoeveelheid atmosferische depositie waarbij, volgens de huidige wetenschappelijke kennis, negatieve effecten op de structuur en de functies van ecosystemen niet voorkomen. Deze kritische depositieniveaus zijn *no-effect*niveaus, ofwel niveaus waarbij geen enkele schade als gevolg van verzuring (door zuurdepositie) of vermessing

Effect	Kritisch depositieniveau 1991 ²			Kritisch depositieniveau 2001/2003 ³	
	Naaldbos	Loofbos	Stikstof (in mol stikstof/ha.jaar)		Heide ⁴
Vegetatieveranderingen	400-800	400-800	350-700	700-1.100	a) 350-700 b) 700-1.100 c) 700-1.800
Toename stressgevoeligheid	1.500	1.500		1.100-1.400	
Nutriëntenbalans	1.000	1.500		1.100-1.400	
Nitraatuitspoeling grondwater	1.000-1.600	1.600-2.800	2.000-3.600	700-1100	
			Zuur (in mol zuur/ha.jaar) ⁵		
Wortelschade	1.400	1.800	-	1.800 ⁶	
Aluminiumuitspoeling ondiep grondwater	200	200		1.800 ⁶	
Bodemkwaliteit				1.400 ⁶	

¹ De resultaten van een tussentijdse revisie in 1995 – als onderdeel van het APV derde fase – zijn in de bijlage weergegeven.

² Volgens Heij & Schneider (1991).

³ Zie Albers et al. (2001), Achermann & Bobbink (2003).

⁴ In 2003 is heide uitgesplitst in vennen en hoogveen (a), droge heide (b) en natte heide (c).

⁵ Is identiek aan equivalenten zuur/(jaar).

⁶ 95 procent van kritische niveaus van alle natuurgebieden in Nederland.

(door stikstofdepositie) te verwachten is. Deposities die gelijk aan of lager zijn dan de kritische niveaus worden geacht duurzaam te zijn in de zin dat zij bescherming bieden aan ecosystemen, ook op de lange termijn en voor volgende generaties.

De kritische niveaus kunnen eenvoudig met historische, huidige en toekomstige deposities worden vergeleken, zodat zij kunnen worden gebruikt in scenarioanalyses van luchtbeleid en in modevaluaties van schade en herstel. Door de berekende depositie in doeljaren te vergelijken met kritische niveaus wordt inzicht verkregen in de mate waarin, en de locatie waar, (Europese) emissies verminderd dienen te worden. De duur en hoogte van een overschrijding van kritische niveaus vormen een maat voor het schaderisico.

Kritische depositieniveaus zijn gebaseerd op experimenteel onderzoek, waarbij een directe relatie is gelegd tussen de mate van depositie en de geconstateerde schade. Ook kunnen kritische niveaus worden ontleend aan modellen die kritische depositieniveaus relateren aan concentraties in bodem, grondwater of bladeren waarboven negatieve effecten zijn aangetoond. Over de aldus afgeleide kritische depositieniveaus werd reeds eind jaren tachtig gepubliceerd (De Vries 1988). Van Breemen & De Vries (1998) en De Vries (2008) hebben niveaus afgeleid voor:

- maximale nitraatconcentraties in bodemvocht waarboven vegetatieveranderingen zijn aangetoond;
- maximale stikstofconcentraties in bladeren waarboven schade door ziekte of vrieskou kan optreden;
- de maximale zuurgraad en maximale aluminiumconcentraties in oppervlaktewateren waarbij nog geen schade aan vispopulaties optreedt.
- de maximale aluminiumconcentraties en de verhouding van aluminium en calcium in het bodemvocht waarbij nog geen schade aan wortels optreedt.

Kritische depositieniveaus die experimenteel zijn vastgesteld, zijn veelal gebaseerd op veranderingen in de soortensamenstelling, vergrassing en achteruitgang van soorten (Achermann & Bobbink 2003).

2.2.2 Gevoeligheid van ecosystemen vroeger niet anders ingeschat dan nu

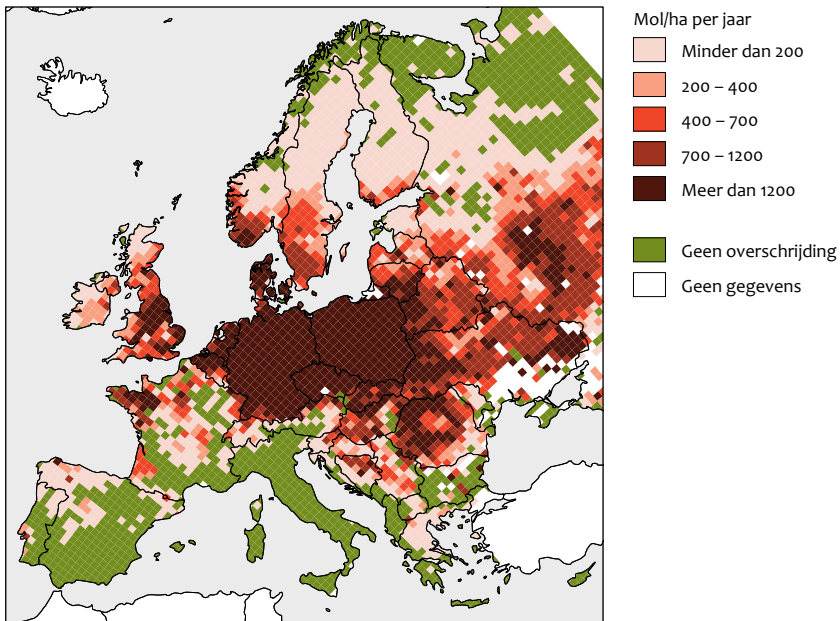
Al in 1983, namelijk in het *Indicatief Meerjaren Programma 1984-1988* (VROM 1983), werden kritische depositieniveaus voor gevoelige bodems in Nederland afgeleid uit Canadees en Zweeds onderzoek. Later kwamen daar specifiek Nederlandse onderzoeksresultaten voor beschikbaar dankzij de eerste fase (1988) van het Additioneel Programma Verzuringsonderzoek (APV). In tabel 2.2 zijn de kritische niveaus voor stikstof en zuur uit het APV, tweede fase weergegeven (Heij & Schneider 1991). Bij vergelijking van informatie uit 1991 en 2003 valt op dat in meer dan tien jaar tijd de kritische niveaus niet veel zijn veranderd. Uitzondering daarbij is de kritische depositie van zuur voor aluminiumuitspoeling naar het ondiepe grondwater. Volgens de huidige inzichten ligt de kritische niveau hiervoor veel hoger dan vroeger gedacht.

Meer dan in 1991 kunnen in Nederland tegenwoordig ecologische modellen worden gebruikt om kritische niveaus te berekenen. Met deze modellen is het mogelijk geweest om voor afzonderlijke natuurtypen (Bal et al. 2007; De Haan et al. 2008) en habitattypen (Van Dobben & Van Hinsberg 2008) kritische niveaus voor stikstof te berekenen. Bij vergelijking van gemodelleerde kritische niveaus en experimenteel vastgestelde waarden voor stikstof is wederom de conclusie dat kritische niveaus robuust zijn. De modellen geven een verdere ondersteuning van de experimenteel vastgestelde waarden.

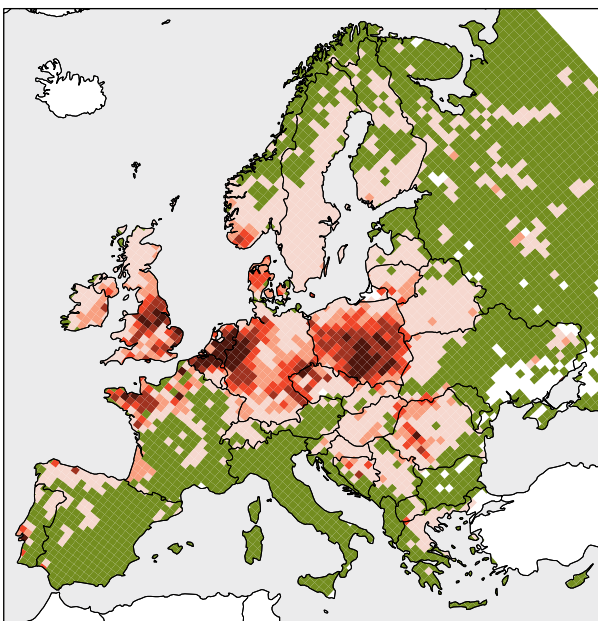
De kritische niveaus bleken in de derde en laatste fase van het APV voor totaal zuur en stikstof voor bosesystemen en heide op een wat hoger niveau te liggen dan eerder was geconcludeerd. Voor vegetatieverandering in bos bleven de waarden onveranderd; ditzelfde gold voor stressgevoeligheid.

In Europa is er een groot internationaal samenwerkingsverband van onderzoekers die werken aan het opstellen van kritische niveaus en het verbeteren van het gebruik van die waarden (zie ook www.pbl.nl/cce). In de afgelopen tien jaar is de kennis over kritische niveaus verbeterd voor andere ecosystemen dan bossen. Daarnaast is de Europese deposi-

1990



2000



Bron: Hettelingh et al. (2008)

Door emissiedaling is in Europa de overschrijding van kritische depositieniveaus verminderd

tiemodellering verbeterd, zodat kritische niveaus voor natuur beter kunnen worden gekoppeld met de milieudruk op die ecosystemen. Ook in Nederland is de depositiemodellering verbeterd door onder meer een hogere ruimtelijke resolutie toe te passen en door de depositieschatting van ammoniak meer te laten aansluiten bij metingen.

Met al deze verbeteringen van kennis en modellen worden nu hogere overschrijdingen van de kritische niveaus voor verzuring geschat (Hettelingh et al. 2008). Hierdoor bleek

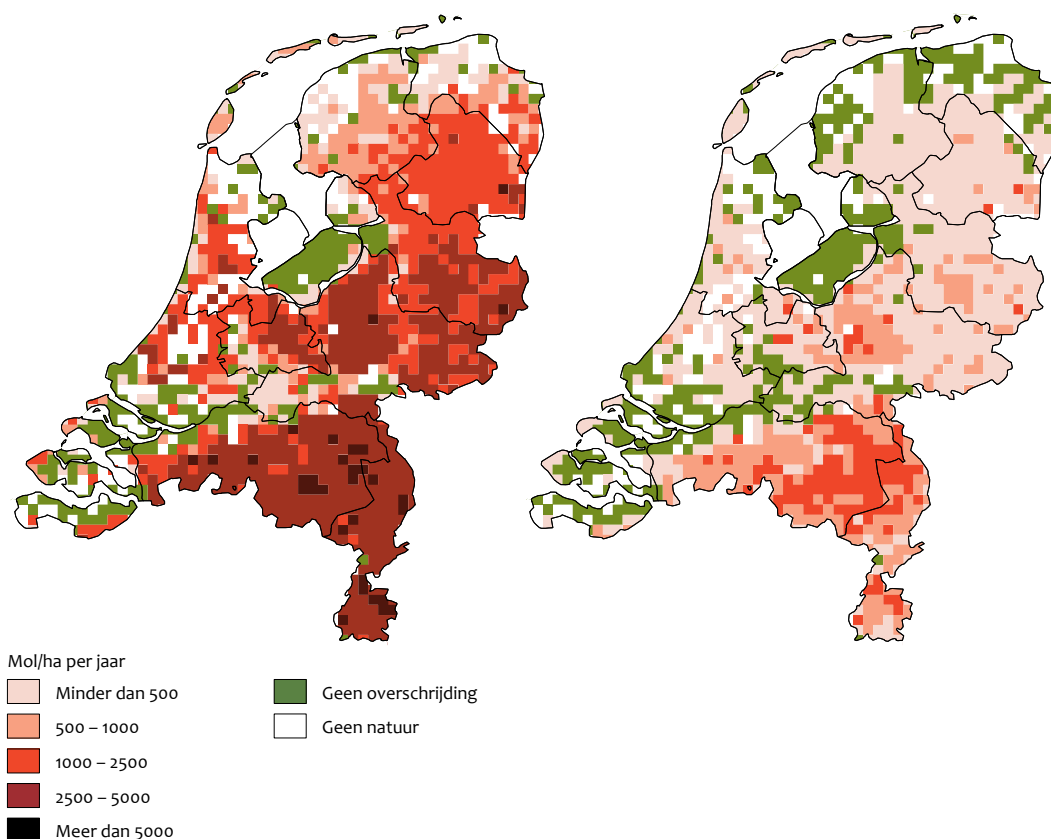
het voorzorgsbeginsel, dat een belangrijk uitgangspunt was voor het verzuringsbeleid in de jaren tachtig, een terecht uitgangspunt.

2.2.3 Kritische niveaus nog steeds gebruikt en steeds breder toegepast

Overschrijdingen van kritische deposities werden en worden onder andere voor de beleidsondersteuning in Nederland en in Europa berekend (Hettelingh et al. 2008). In het luchtbeleid zoekt men daarbij naar mogelijkheden om via emissiereduc-

1990

2005



Bron: PBL

Door emissiedaling is ook in Nederland de overschrijding van kritische depositieniveaus verminderd

ties de effecten uiteindelijk terug te dringen door de overschrijdingen van kritische deposities te verkleinen (Hettelingh et al. 1995, 2001, 2007). Recentelijk stelde de *Taskforce Stikstof*, die onderzoek deed naar de ammoniakproblematiek rond Natura 2000-gebieden in Nederland, dat kritische waarden worden beschouwd als hulpmiddel op basis waarvan de uiteindelijk te behalen depositiedoelstelling mede is gebaseerd (Trojan 2008). In de praktijk blijkt het op zowel economische als technische gronden moeilijk om overal de depositieniveaus te verlagen tot het kritische niveau. In de beleidsondersteuning worden modellen gebruikt om te bepalen welke kosteneffectieve maatregelen kunnen worden ingezet om de effecten van overmatige depositie te verminderen. De doelstelling om de overschrijding van kritische depositieniveaus in Europa te reduceren, vormt het uitgangspunt voor emissiebeleid in de LRTAP-conventie (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, zie ook hoofdstuk 3).

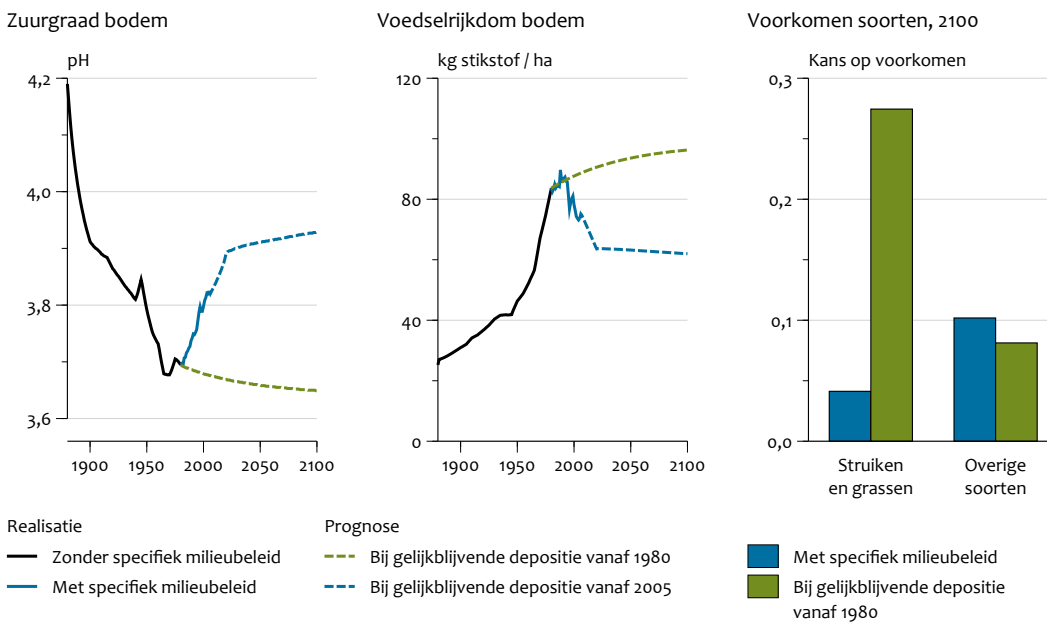
Ook buiten het luchtbeleid worden kritische depositieniveaus gebruikt. Zo is de mate van overschrijding van de kritische depositieniveaus recentelijk toegevoegd aan de verzameling van hoofdindicatoren voor het Europees natuurbeleid (EEA 2007). Overschrijding van kritische depositieniveaus voor stikstof gezien als mogelijke oorzaak van biodiversiteitsverlies. In Nederland zijn correlaties aangetoond tussen het voorkomen van bedreigde vogel-, vlinder- en plantensoorten

en de overschrijding van de kritische stikstofdepositie (Van Hinsberg et al. 2008). Het risico op het optreden van effecten en de verspreiding van verzuring in Europa zijn sinds 1990 verminderd. Dit komt vooral door de daling van de zure depositie (figuur 2.6). Er blijft echter sprake van een piek op de grens van Nederland en Duitsland. Ook op basis van ruimtelijk gedetailleerdere informatie blijkt dat, volgens de meest recente wetenschappelijke informatie, in Nederland kritische niveaus worden overschreden (figuur 2.7). De depositie is weliswaar duidelijk afgenomen door het gevoerde emissiereductiebeleid, maar er blijft sprake van te hoge depositieniveaus in vooral Noord-Brabant en Gelderland. Dit betekent dat de ecosystemen nog niet duurzaam zijn beschermd tegen de effecten die kunnen optreden bij knelpunten in bodemcondities. Belangrijk is nu de vraag wat de overschrijding betekent: welke effecten kunnen we verwachten en wanneer?

2.3 Afnemende schade

2.3.1 Schade in Nederland neemt af door verminderde deposities; risico's blijven

Kritische depositieniveaus van zuur en stikstof worden in Nederlandse bossen nog steeds overschreden. Dit geldt ook voor de kritische niveaus die aangeven wanneer er risico van boomschade ontstaat (Albers et al. 2001). Onder de



Bron: Van Hinsberg & Kros (2001); bewerking PBL

Berekende verandering in zuurgraad van de bodem (links), stikstofbeschikbaarheid (midden) en voorkomen van plantensoorten in een typisch Nederlands bos (rechts), bij gelijkblijvende depositie (groen) en bij depositiedaling (blauw).

LRTAP-conventie is berekend dat de kritische niveaus voor zuur en stikstof worden overschreden in 71 respectievelijk 88 procent van de Nederlandse natuurgebieden (Hettelingh et al. 2008). Bij overschrijding van de kritische niveaus hoeven zichtbare effecten echter niet onmiddellijk op te treden, wel neemt het risico toe met de hoogte van de overschrijding en de duur ervan (Van Breemen & De Vries 1998; zie ook de tekstbox *Uit fase lopende effecten bij overschrijding van het kritische depositieniveau*).

De tijdsvertraging die optreedt tussen de verandering van (zure) depositie en de verandering in bodemchemie, kan sinds de jaren tachtig worden beschreven met (bodem) modellen (De Vries & Kros 1989, 1991; De Vries et al. 1994). Modelleren van die tijdsvertraging is een kernpunt in het *International Cooperative Programme on Modelling and Mapping* en het onderdeel *Coordination Centre for Effects (CCE)* daarvan. Het CCE gebruikt dynamische modellen om gevolgen van de overschrijding van kritische niveaus voor de bodemchemie te bepalen. De vertraagde gevolgen van overschrijdingen op effecten in de vegetatie krijgt recentelijk ook veel aandacht (De Vries et al. 2007; Sverdrup et al. 2007). Met SMART-MOVE, een dynamisch bodemvegetatiemodel, is berekend hoe de bodem-pH, de voedselrijkdom en de flora veranderen bij verschillende ontwikkelingen van de deposities van zuur en stikstof (figuur 2.8). Eén scenario geeft de ontwikkeling aan wanneer de depositie op het niveau van 1980 zou zijn gebleven. Een tweede scenario geeft de verandering tot 2020 als gevolg van het huidige beleid. Na 2020 is daarbij de depositie als constant verondersteld. Het blijkt dat de bodemverzuring en de vermesting waren doorgegaan als het beleid van emissiereducties van verzurende stoffen niet was ingezet. Daardoor zou de ondergroei van de bossen, sterker

nog dan nu, zijn vergrast en verruigd en zou de soortendiversiteit afnemen. Inheemse soorten als braam en pijpestrootje en exoten als vogelkers nemen sterk toe, gaan de ondergroei domineren en verdringen andere planten waaronder veel zeldzame soorten. Deze verandering is ook zichtbaar in het veld en wordt vanuit het natuurbeleid als ongewenst beschouwd (De Haan et al. 2008). Vergelijkbare uitkomsten komen ook uit andere modellen (Wamelink 2007).

In Nederland was in de jaren tachtig de uitgangssituatie voor bomen gunstiger dan bijvoorbeeld in de beruchte Zwarte Driehoek. De voor verzuring gevoelige zandbodems in Nederland zijn beter gebufferd dan de ondiepe rotsbodems in de Zwarte Driehoek en in het IJzergebergte (Jizerské Hory). Daarnaast kunnen bomen makkelijker de worteldiepte aanpassen in de zandbodems.

In de ondergroei van de Nederlandse bossen, waar planten voorkomen die minder diep kunnen wortelen, zijn de negatieve effecten van verzuring op plantengroei wel zichtbaar. Daarnaast was het bosbeheer in Nederland minder groot-schalig en gevarieerder dan in de Zwarte Driehoek. Dit was (en is) gunstig voor uitstel van schade aan bomen. De veranderingen in het bosbeheer na 1990 hebben de gevoeligheid van Nederlandse bossen bovendien verder verminderd. Zo is tegenwoordig meer dan vroeger de aanplant van voor verzuring gevoelige exoten beperkt en is de houtoogst – die bodembuffering vermindert – in intensiteit afgenomen. Ten slotte is natuurlijk door de grote depositieafname ook de overschrijding van de kritische niveaus afgenomen (figuur 2.7) en zijn de verwachte verslechtingen van bodemcondities afgeremd (figuur 2.8).

Uit fase lopende effecten bij overschrijding van het kritische depositieniveau

Figuur 2.9 illustreert het theoretische verloop van de gevolgen van een veranderende depositie. In het bovenste deel is te zien hoe de depositie verandert in de tijd. Wanneer de depositie stijgt tot boven het kritische depositieniveau (tijdstip 1, t_1), dan zal na een Damage Delay Time (DDT) van t_1 naar t_2 de bodemchemie veranderen (middelste deel van de figuur). Op t_2 zal deze verandering zodanig zijn dat kritische chemische niveaus in termen van bijvoorbeeld buffercapaciteit worden overschreden. Bij een dergelijke aantasting zullen, na een DDT van t_2 naar

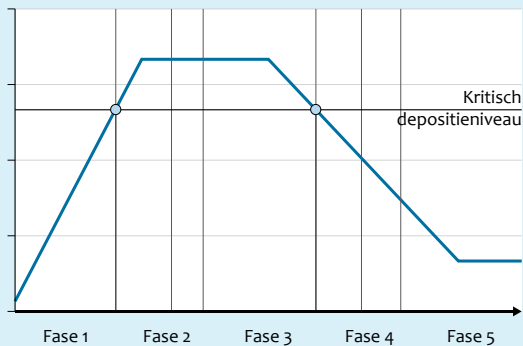
t_3 , ook de biologische omstandigheden zodanig veranderen dat sprake is van schade (onderste deel van de figuur).

Wanneer omgekeerd de depositie daalt tot onder de kritische depositie op t_4 , dan zal na vertraging (de zogeheten Recovery Delay Time (RDT)) een verbetering van de chemische kwaliteit op t_5 volgen. De biologische kwaliteit zal pas na een RDT tussen t_5 en t_6 kunnen verbeteren (zie ook Posch et al. (2003) voor details).

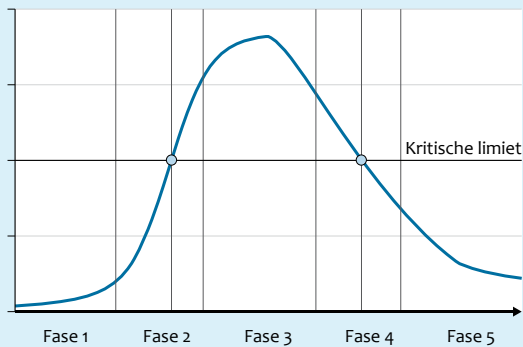
Volgtijdelijke effecten zure depositie

Figuur 2.9

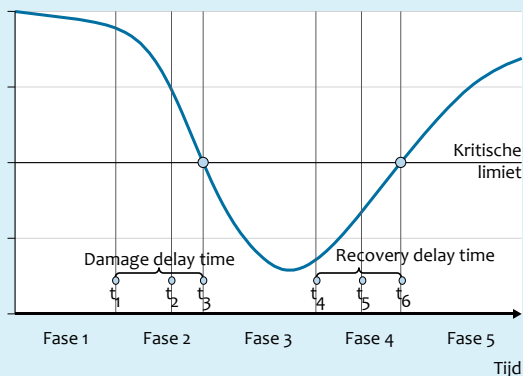
Zure depositie



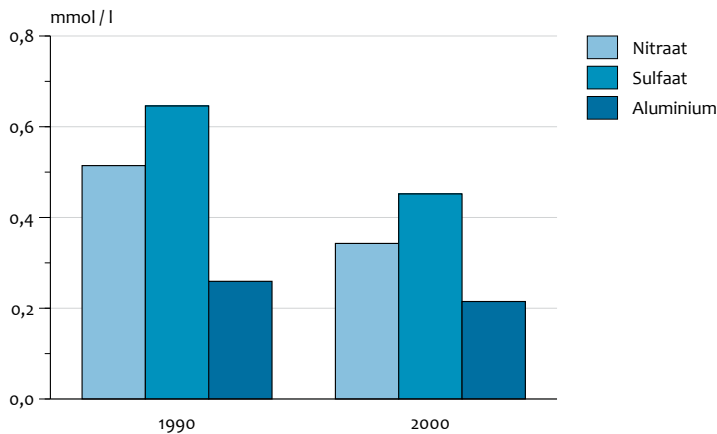
Chemische gevolgen in de bodem



Biologische gevolgen voor de bodem



Bron: CCE



Bron: RIVM (2002)

Het gaat in deze figuur om gemiddelde concentraties in de bovenste meter van het grondwater onder 150 boslocaties in Nederland in 1990 en 2000. De veranderingen duiden erop dat de situatie verbeterd door de verminderde depositie

2.3.2 Depositiedaling heeft verzuring teruggedrongen maar nog niet gestopt

Met bodemmodellen wordt geschat dat het bereiken van een voor de bossen risicovolle basenverzadiging mogelijk met 150 tot 400 jaar kan zijn uitgesteld door het sinds 1980 gevoerde verzuringsbeleid (Hettelingh et al. 2008).

De (gemodelleerde) tijdsvertraging waarmee effecten van atmosferische depositie optreden, is ook zichtbaar in het veld. De depositievermindering vanaf 1980 heeft daar tot een significante verbetering van de bodemvochtkwaliteit geleid. Zo is de sulfaat- en nitraatconcentratie in het bovenste grondwater aantoonbaar afgenomen en is de concentratie van het potentieel giftige aluminium in het bodemvocht sterk gedaald (figuur 2.10). Als gevolg daarvan is ook de verhouding tussen aluminium en basische kationen als calcium, magnesium en kalium in het bodemvocht gedaald, wat wijst op een verbetering van het wortelmilieu (De Vries 2008).

Herstel van de buffercapaciteit in de bodem vereist echter een nog verdergaande reductie van de depositie: de buffercapaciteit is nog niet hersteld. De hiervoor genoemde metingen zijn in lijn met de uitkomsten van modelberekeningen. Deze laten zien dat snel herstel van de bodemvochtkwaliteit mogelijk is bij een depositiereductie, maar dat de bodem zich zeer langzaam herstelt (De Vries 2008). Bovendien laten veranderingen zien dat de bodemverzuring aantoonbaar is afgeremd maar nog niet is gestopt (De Vries 2008).

Verbeteringen in de atmosfeer hebben soms ook al geresulteerd in verbeteringen in de natuur. De eerste tekenen van voorzichtig herstel zijn zichtbaar bij korstmossen, die direct kunnen reageren op een verlaging van de concentratie zwaveldioxide in de lucht (Aptroot et al. 1998; Van Herk 2001; Van Herk et al. 2002). Soorten die afhankelijk zijn van verbetering in het bovenste deel van de bodem komen langzaam weer terug; daarbij gaat het bijvoorbeeld om bodemkorstmossen

en mycorrhizapaddenstoelen (De Vries et al. 2002). Toename van soorten die duiden op volledig herstel van de gewenste ecologische kwaliteit (doelsoorten), is echter nog maar mondjesmaat geconstateerd. Zo herstellen de natuurlijke levensgemeenschappen van wieren, planten en dieren in vennen zich nog niet spontaan, terwijl de zuurgraad van veel verzuurde vennen is verbeterd van gemiddeld pH 3,8 in 1980 tot tussen de 4,5 en 5,0 nu (Brouwer 2001). Ook in andere ecosystemen is dit patroon zichtbaar.

Er blijkt veelal een behoorlijke hersteltijd nodig te zijn, als biologische schade eenmaal is aangericht. Wel blijken herstelmaatregelen in het kader van het *Overlevingsplan Bos en Natuur* (OBN) die zijn genomen, zoals bij het verwijderen van de verzuurde en vermeste bodemlagen, langer een positief effect op natuur te hebben dan 10 tot 15 jaar geleden (Kros et al. 2008). Om de meest kwetsbare natuur duurzaam te behouden zonder herstelmaatregelen te gaan herhalen, is verdergaande depositieverlaging nodig.

2.4 Belangrijkste bevindingen

- De atmosferische depositie van zuur en stikstof heeft meetbaar bijgedragen aan veranderingen in de bodemchemie, de (oppervlakte)waterkwaliteit en het biodiversiteitsverlies. Deze veranderingen hebben ook geleid tot verzwakking van de ecosysteemresistentie tegen ziekten, stormen, koude, droogte en insecten.
- Interacties met andere stressoren, zoals een te hoge stikstofdepositie en een te hoge concentratie van troposferisch ozon, spelen een belangrijke rol bij het optreden van effecten van zure depositie.
- De bossen zijn niet doodgegaan, maar de vitaliteit van bomen heeft zich niet altijd in positieve zin ontwikkeld en het bosesysteem is zichtbaar veranderd. Korstmossen zijn sterk achteruitgegaan, de ondergroei is verruigd met grassen, bospaddenstoelen zijn verdwenen en de

bodemchemie is veranderd. De depositie van zuur en stikstof heeft in belangrijke mate bijgedragen aan deze veranderingen.

- De depositiedaling van de laatste decennia heeft geresulteerd in een betere milieu- en natuurkwaliteit. Snel reagerende korstmossen zijn weer terug in het bos en snel reagerende bodemcondities laten herstel zien. Met bodemmodellen kan worden geschat dat het bereiken van een schadelijke bodemverzuring is vertraagd en dat de uitputting van de buffercapaciteit van bosbodems met 150 tot 400 jaar kan zijn uitgesteld. Modelstudies laten zien dat momenteel een groter deel van het bos duurzaam behouden kan blijven dankzij de verbeterde bodemkwaliteit.
- De schade aan de Nederlandse bodem- en vegetatiestructuur zou groter zijn geweest als de depositieniveaus van stikstof en zuur op het niveau van 1980 waren gebleven. Die grotere schade is ongewenst gezien de huidige behouds- en hersteldoelstellingen met betrekking tot voor verzuring gevoelige natuur.
- De risico's van atmosferische depositie kunnen in beeld worden gebracht door kritische depositieniveaus te vergelijken met huidige of toekomstige depositieniveaus. Hoewel sinds de jaren negentig veel effectonderzoek is gedaan, verschillen de eerste schattingen van de kritische niveaus voor Nederlandse natuur weinig van de laatste inzichten. Recent modelonderzoek heeft de bestaande kritische niveaus verder ondersteund.
- Met de huidige kennis over de kritische niveaus voor de Europese natuur en van deposities op die natuur wordt bevestigd dat de zure depositie weliswaar is verminderd, maar nog niet overal in Europa op een duurzaam niveau ligt. De overschrijding van kritische niveaus voor stikstof vormt in vele Europese natuurgebieden een belangrijk risico voor de plantendiversiteit.
- Kritische depositieniveaus zijn geformuleerd vanuit het voorzorgsbeginsel. De toepassing ervan is gerechtvaardigd gebleken vanuit het oogpunt van natuurbescherming. Ook nu worden kritische niveaus gebruikt om condities voor duurzaam natuurbehoud te definiëren. Gebruik van de methode buiten Europa is toegenomen, onder meer in Azië, terwijl een toepassing in de Verenigde Staten momenteel actief wordt onderzocht in het kader van de *National Atmospheric Deposition Programme*. Recentelijk is het kritische depositieniveau aangewezen als één van de kernindicatoren waarmee men in Europa biodiversiteitsbescherming wil monitoren (EEA 2007). Ook in het Europese natuurbeleid wordt gebruikgemaakt van kritische depositieniveaus, waarbij ook rekening wordt gehouden met klimaatbeleid.
- Er is geen simpele relatie tussen de overschrijding van kritische niveaus en het optreden van effecten in ecosystemen. Dit komt onder meer door een vertraagde doorwerking van te hoge depositie – in combinatie met andere (lokale) omstandigheden – op bodemchemie en biologische omstandigheden. Gevolgen van de vermestende werking van depositie blijken in het veld makkelijker te relateren aan depositie dan gevolgen van de strikt verzurende werking van de depositie, waarschijnlijk doordat de verzuring sneller gaat dan vermesting. Maar ook hier geldt dat andere factoren sterk (mede)bepalend zijn.
- Op basis van huidige kennis over kritische depositieniveaus moet worden geconcludeerd dat veel waardevolle natuurgebieden, waaronder bossen, nog steeds blootstaan aan risico's. Kritische depositieniveaus worden nog steeds overschreden. Onder de LRTAP-conventie is berekend dat de kritische niveaus voor zuur en stikstof worden overschreden in respectievelijk 71 en 88 procent van de Nederlandse natuurgebieden (Hettelingh et al. 2008). Metingen van de bodemchemie bevestigen dat verzuring minder snel gaat, maar nog steeds plaatsvindt. Ook verandering in het voorkomen van gevoelige soorten laat zien dat condities nog niet op orde zijn.
- Effectgerichte maatregelen, zoals het bekalken van bosbodems en meren of, vooral in Nederland, het plaggen van heidegronden, worden nog steeds toegepast om effecten van verzuring en vermesting te bestrijden.

Beleid

3

Dit hoofdstuk behandelt de beleidsmatige aspecten van de verzuringsproblematiek. Het bestaat uit twee delen. Het eerste deel geeft een beknopte schets van de ontwikkeling van het luchtbeleid. Hierbij komt aan de orde welke nationale en internationale doelstellingen voor de emissie en depositie van verzurende stoffen werden en worden gehanteerd. Het tweede deel bespreekt welke maatregelen zijn genomen en wat de gevolgen ervan zijn geweest voor emissies, deposities en overschrijding van kritische niveaus.

3.1 Luchtbeleid in Nederland en Europa: een terugblik

3.1.1 Gezondheidseffecten luchtverontreiniging hoofdzorg

Begin van een nationale aanpak

In 1970 kwam in Nederland met de *Wet inzake de Luchtverontreiniging* een adequaat bestuurlijk-juridisch kader beschikbaar om luchtverontreiniging te bestrijden. Vanaf dat moment gold luchtverontreiniging ook als een beleidsprioriteit op nationaal niveau. In de *Urgentienota Milieuhygiëne* (VOMIL 1972) werd al gewezen op de wijde verspreiding van luchtverontreiniging. De eerste integrale beleidsvisie op luchtgebied verscheen in 1976, onder de titel *Indicatief meerjarenprogramma 1976-1990, ter bestrijding van de luchtverontreiniging* (VOMIL 1977). Kenmerkend voor deze periode was dat de aandacht vooral was gericht op de lokale luchtkwaliteit, waarbij zorgen over mogelijk schadelijke effecten van luchtverontreiniging voor de mens de boventoon voerden.

Wettelijke luchtkwaliteitsnormen bestonden in die tijd nog niet. Er lagen wel adviezen voor grenswaarden voor zwaveldioxide (Gezondheidsraad 1971), koolmonoxide (VOMIL 1974) en roet, zwevend stof en zwavelzuur (VOMIL 1975) – adviezen die in het kader van de vergunningverlening werden toegepast. De nationale luchtkwaliteitsnormen kregen pas een wettelijke status in de jaren tachtig, als uitvloeisel van de uitvoering van luchtkwaliteitsrichtlijnen van de Europese Economische Gemeenschap (EEG).

Begin van een internationale aanpak

Veel van de Nederlandse beleidsvoornemens waren mede beïnvloed door ontwikkelingen in andere Europese landen. Tegelijkertijd werd in Nederland al snel onderkend dat voor veel aspecten van luchtverontreiniging een internationale aanpak nodig was (zie bijvoorbeeld de *Urgentienota Milieuhygiëne* uit 1972 (VOMIL 1972)). Nederland heeft dan ook samen

met Duitsland en de Scandinavische landen een essentiële rol gespeeld bij de vormgeving van het internationale beleid.

Ook internationaal ging de beleidsaandacht in de jaren zeventig in eerste instantie uit naar verbetering van de luchtkwaliteit om de negatieve gezondheidseffecten van luchtverontreiniging te verminderen. Zo werd er in Europees verband, als onderdeel van het *Eerste Actieprogramma van de Europese gemeenschappen inzake milieu* (MAP) uit 1973, al gesproken over luchtkwaliteitsrichtlijnen voor zwaveldioxide en zwevende deeltjes. Verder werden voorstellen aangekondigd voor de verlaging van het loodgehalte in benzine en het zwavelgehalte in stookolie. Eisen aan de samenstelling van uitlaatgassen van auto's werden sinds 1970 in EEG-richtlijnen vastgelegd, in navolging van reglementen van de UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). Als uitvloeisel van de milieuactieprogramma's van de Europese Gemeenschappen uit 1973, 1977 en 1982 werden binnen de EEG luchtkwaliteitsnormen vastgelegd voor zwaveldioxide en zwevende deeltjes (EG 1980), lood (EG 1982) en stikstofdioxide (EG 1985). Deze richtlijnen waren primair gericht op de bescherming van de menselijke gezondheid. De belangrijkste drijfveer voor harmonisatie van nationale milieunormen was aanvankelijk dat de EEG de handelsbelemmeringen, die werden opgeworpen door ongelijke normen in lidstaten, wilde wegnemen. Pas in het vijfde MAP (1993) was van een thematische aanpak van verzuring sprake.

De problematiek van grensoverschrijdende luchtverontreiniging – en de mogelijke relatie daarvan met zure regen – kreeg in 1977 internationale aandacht na publicatie van een studie door de Organisatie voor Economische Samenwerking en Ontwikkeling (OESO) (OECD 1977). Dit onderzoek toonde aan dat in grote delen van Europa zure regen viel. Ook kon de verzuring van meren in Scandinavië worden toegeschreven aan emissies van verzurende stoffen in West-Europa. Die conclusies werden in 1978 ook bevestigd door de eerste resultaten van het internationale onderzoeksprogramma *European Monitoring and Evaluation Programme* (EMEP). Het EMEP-programma was een bundeling van bilaterale en multilaterale (Duitsland/Nederland, VS/Canada, Scandinavische landen, OESO) meet- en onderzoeksprogramma's die in de jaren zeventig waren gestart.

De internationale aanpak van de verzuring kreeg dus in de jaren zeventig gestalte. Dit was niet alleen vanwege bezorgdheid over het milieu. In de tijd van de Koude Oorlog werd de problematiek rond grensoverschrijdende luchtverontreiniging

namelijk ook gezien als een relatief onschuldig samenwerkingsterrein om de relaties tussen de landen van het Warschaupact en de NAVO aan te halen (Kakebeeke et al. 2004). Daardoor – en door bezorgdheid van de Scandinavische landen over de ernst van de verzuringsproblematiek – kwam in 1979 de *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution* (CLRTAP) tot stand (UNECE 1979). De Conventie kreeg onderdak bij de UN ECE, die het secretariaat op zich nam.

3.1.2 Verzuring komt op de agenda

Verzuring krijgt in Nederland aandacht

In 1979 presenteerde minister Ginjaar van Volksgezondheid en Milieuhygiëne het *SO₂ Beleidskaderplan* aan de Tweede Kamer (VOMIL 1979). De nota ging grotendeels over zwaveldioxide als luchtverontreinigingsprobleem. Er werden richtlijnen voor luchtkwaliteit geformuleerd die waren gericht op de bescherming van de menselijke gezondheid. De nota ging ook in op de effecten van zwaveldioxide en zwevende deeltjes op mens, flora en fauna, maar besteedde nauwelijks aandacht aan zwaveldioxide als (mede)veroorzaker van zure regen. De veronderstelling op dat moment was dat de effecten van zure regen in Nederland marginaal waren. Het zou slechts gaan om een aantal vennen 'die uitsluitend door regenwater gevoed' werden. Het Nederlandse luchtkwaliteitsbeleid richtte zich op dat moment nog volledig op de oplossing van lokale en nationale luchtkwaliteitsproblemen.

De voorgestelde aanpak bestond uit een emissieplafond voor zwaveldioxide van 500 kiloton per jaar, wat overeenkwam met het gemiddelde jaarlijkse emissieniveau sinds 1970. Bij dat niveau kon worden voorkomen dat de door de Gezondheidsraad geadviseerde grenswaarden ergens in Nederland werden overschreden (Adema 1980). De nota van minister Ginjaar presenteerde bovendien een overzicht van de beoogde maatregelen. De daarbij genoemde verlaging van het zwavelgehalte in brandstoffen werd nog in hetzelfde jaar in de wetgeving vastgelegd. In de toelichting bij de desbetreffende wijziging van het *Besluit zwavelgehalte brandstoffen* (Staatsblad 1979) werden de verbanden tussen het emissieplafond, droge en natte depositie, langeafstandstransport van Nederlandse emissies en de mogelijke positie van Nederland als netto-exporteur van zwaveldioxide aan de orde gesteld.

Bij de aanscherping van de eisen voor het zwavelgehalte in brandstoffen speelde het voornemen om de brandstofinzet bij centrales aan te passen om aardgas te sparen een essentiële rol. Dit beleid, dat in 1980 werd vastgelegd in het *Brandstof Inzet Plan Centrales* (BIPC), leidde eind jaren zeventig tot een forse verschuiving in de brandstofinzet in elektriciteitscentrales: het gebruik van olie nam toe teneinde aardgas te sparen. In het meest sombere scenario zou dit tot een vervijfvoudiging van de emissies in 2000 kunnen leiden. Overigens werd deze strategie eind 1981 alweer verlaten, omdat de overheid de aardgasbaten hard nodig bleek te hebben (De Jong et al. 2005).

In september 1982 verscheen het *Indicatief Meerjarenprogramma Lucht 1981-1985* (VOMIL 1982). Net als in het *Meerjarenprogramma* (VOMIL 1977) was luchtkwaliteit het hoofdthema. Waarneembare effecten van zure regen in Nederland

werden omschreven als 'nog geringer dan bijvoorbeeld in Scandinavië'. Dit werd vooral toegeschreven aan een groter bufferend vermogen van water en bodem in Nederland. Effecten van zure regen op ecosystemen werden vermoed, maar de omvang ervan was nog onduidelijk. Wel ging het slecht met de korstmossen en de cantharellen in Nederland en kon op voedselarme gronden door 'bemesting' vanuit de atmosfeer verdringing van plantensoorten optreden. Tegelijkertijd was de opvatting dat de problemen in Scandinavië bestreden zou moeten worden door de emissie van zowel zwaveldioxide als stikstofoxiden te beperken. Hierbij speelde dat Nederland een netto-exporteur van verzurende stoffen bleek te zijn; een situatie die moreel als niet correct werd gezien (Hajer 1995).

Verzuring hoog op de politieke agenda

Bij de behandeling van het *Indicatief Meerjarenprogramma Lucht 1981-1985* in februari 1983 werd de motie-De Boois ingediend (Tweede Kamer 1983). De motie was onder andere een reactie op de verontrustende berichten over de aantasting van de bossen in Duitsland, het 'Waldsterben'. Mevrouw De Boois vroeg om een 'breed inventariserend onderzoek naar de omvang van te verwachten schade op verschillend gebied door verzuring van de bodem'. Ook vroeg zij om een 'programma van maatregelen'. Deze motie betekende een kantelpunt in de beleidsmatige benadering van het probleem van de zure regen. De motie maakte namelijk de zure regen ook tot een Nederlands probleem.

Er startte vervolgens een groots opgezet onderzoeksprogramma. Het onderzoek besloeg uiteenlopende terreinen als atmosferisch-chemische processen, bodem, vegetatie, oppervlaktewater en hydrobiologie. De bevindingen van het onderzoek getiteld *Verzuring door atmosferische depositie* vormden een belangrijke bron voor de formulering van het beleid op het terrein van de zure regen (Manuel 1984).

Eind 1983 was de situatie in Nederland dus drastisch veranderd. Een publicatie van een aantal Nederlandse onderzoekers had bovendien veel opzien gebaard (Van Breemen et al. 1982). De onderzoekers hadden aangetoond dat ammoniak in Nederland bijdroeg aan de verzuring. De eerste publieke erkenning dat zure regen in Nederland wel degelijk een probleem was, vormde het symposium *Zure regen* in 1983 in 's-Hertogenbosch. Onderzoek had inmiddels geleerd dat de zure regen – onderzoekers spraken inmiddels liever over zure depositie en nog later over verzurende depositie – in Nederland wel degelijk ook ernstige effecten kon veroorzaken (Adema & Van Ham 1984). Het was nu voor het eerst ook duidelijk hoe nauw ammoniak in Nederland met het probleem van de zure regen was verweven. En ook hoe groot de bijdrage van (Nederlands) ammoniak aan het zureregenprobleem was (Van Aalst 1984). Het gehele politieke spectrum, van links tot rechts, was begin jaren tachtig doordrongen geraakt van de ernst van de verzuringsproblematiek. De opinie was dat er uit voorzorg maatregelen moesten worden genomen ondanks het feit dat er nog veel onderzocht moest worden (Hajer 1995).

In januari 1984 verscheen onder de titel *De problematiek van de verzuring* de eerste beleidsnota die geheel gewijd was aan het verzuringsprobleem (VROM 1984a). Deze nota werd samen

met de resultaten van het inventariserend onderzoek naar de verzuring (Manuel 1984) aan de Tweede Kamer toegezonden. Een nieuw element in de discussie was de rol van ammoniak. Kort daarvoor was duidelijk geworden dat in Nederlandse gebieden met zandgronden, die het meest gevoelig zijn voor verzuring, juist hoge ammoniakemissies voorkwamen (Buijsman 1984; Buijsman et al. 1984). Verder was berekend dat de depositie van verzurende stoffen op bossen vijfmaal boven het niveau lag waarbij geen schade optrad. Ook was becijferd dat herstel van de bossen pas mogelijk zou zijn als de depositie zou worden teruggebracht tot 20 procent van het niveau op dat moment.

In het *Indicatief Meerjaren Programma Lucht 1985-1989* (VROM 1984b) werden emissienormen voor zwaveldioxide en stikstofoxiden voor centrales, raffinaderijen en overige industrie opgenomen. In de daarop volgende jaren werden die emissie-eisen, die deels geïnspireerd waren op de Duitse *Grossfeuerungsanlageverordnung*, in de wetgeving vastgelegd (Staatsblad 1987). Ook eisen voor het zwavelgehalte in brandstoffen werden verder aangescherpt (Staatsblad 1988). Notificatie van de emissie-eisen in Brussel vormde mede de aanzet voor de EEG-richtlijn grote stookinstallaties die in november 1988 werd vastgesteld.

Erste internationale afspraken over emissiereductie

Eind jaren zeventig waren er al sterke aanwijzingen voor schade door luchtverontreiniging en voor het grensoverschrijdende karakter van deze verontreiniging. Toch waren nog niet alle landen in Europa overtuigd van de noodzaak om in internationaal verband maatregelen te nemen. Dat kwam pas enkele jaren later, na een verdere toename en een bredere acceptatie van wetenschappelijke kennis, en betere inzichten in emissiereductietechnieken en de kosten daarvan. Ook de uitgebreide media-aandacht voor zure regen speelde een rol (Kakebeeke et al. 2004).

Het eerste protocol onder de CLRTAP, het EMEP-protocol uit 1984, regelde de financiering voor EMEP, een internationaal onderzoeksprogramma dat zich richtte op de vergaring van kennis over concentraties, depositie en grensoverschrijdend transport van luchtverontreinigende stoffen. Ook werden in EMEP-verband berekeningen uitgevoerd die lieten zien hoeveel landen bijdragen aan verzurende depositie in andere landen. Dergelijke berekeningen, de zogeheten *blame matrices*, bevestigden dat alleen een internationale aanpak effectief kon zijn bij het bestrijden van de verzuring.

Het daaropvolgende *eerste Zwavelprotocol* (Helsinki, 1985) bevatte de eerste internationale doelstellingen die overwegend waren gericht op het bestrijden van verzuring. Het legde een voor alle landen gelijk emissiereductiepercentage op: de emissie van zwaveldioxide moest in ieder land in 1993 met 30 procent zijn gedaald ten opzichte van het niveau in 1980. De aanpak via een voor elk land gelijke emissiereductie was politiek gezien haalbaar, omdat veel landen – waaronder Nederland – al zelf beleid hadden ontwikkeld dat daarop aanstuurde of al verder ging. Voor sommige andere landen, waaronder Engeland, Ierland en de Zuid-Europese landen, was een dergelijke reductie te hoog gegrepen of kwam het gekozen basisjaar niet goed uit (VS). Die landen ondertekenden het protocol daarom niet (Keizer 1997).

Enkele jaren later volgde het *NO_x-Protocol* (Sofia, 1988) met de verplichting de nationale emissies van stikstofoxiden ten minste te stabiliseren op het niveau van 1987 (of een te kiezen eerder jaar) en met de verplichting voor nieuwe installaties de zogeheten Best Beschikbare Technieken (BBT) toe te passen. Een voor alle landen gelijke procentuele emissiereductie of stabilisatie was politiek gezien op dat moment het maximaal haalbare. Niettemin was toen ook al duidelijk dat, om een bepaalde milieuwinst op Europese schaal te halen, dit niet de meest kosteneffectieve aanpak was (Hordijk 1986).

Formulering van depositiedoelstellingen

De eerste Nederlandse depositiedoelstellingen dateren van het begin van de jaren tachtig. In het *Indicatief Meerjarenprogramma Lucht 1984-1988* (VROM 1983), dat in september 1983 verscheen, werd een voorlopig kritisch depositieniveau geformuleerd voor verzuring door zwaveldioxide, stikstofoxiden en ammoniak tezamen van 1800 mol zuur ha⁻¹ jaar⁻¹.

In het *Indicatief Meerjaren Programma Lucht 1985-1989* (VROM 1984b) werd voor de maximaal toegestane stikstofdepositie een hoeveelheid van 1.600 mol stikstof per hectare per jaar aangehouden, hoewel men zich realiseerde dat bij een dergelijke depositie mogelijk toch vegetatieveranderingen zouden kunnen optreden. Voor de zure depositie werd een maximum van 1.400 mol zuur per hectare per jaar toelaatbaar geacht om vitale en onaangetaste bosgebieden te beschermen. Dit werd toentertijd 'effectieve zure depositie' genoemd. De veronderstelling was dat 1.600 mol stikstof per hectare per jaar niet verzurend zou werken. De doelstelling voor zure depositie kwam daarmee in feite op 3000 mol zuur ha⁻¹ jaar⁻¹. Forse emissiereducties zouden nodig zijn om die doelstellingen te halen: de gemiddelde depositie in Nederland lag in die tijd namelijk nog boven de 6.000 mol zuur ha⁻¹ jaar⁻¹.

De vrees voor grootschalige aantasting van bossen door zure regen vormde in 1984 de aanleiding tot het *Additioneel Programma Verzuringsonderzoek* (APV). De resultaten van de eerste fase van dit onderzoek (APV-1, zie Schneider & Bresser 1988) werden gebruikt voor een nieuwe definitie van de kritische depositieniveaus voor zuur en stikstof. Dit leidde tot nieuwe milieukwaliteitsdoelstellingen voor het jaar 2000: 2.400 mol zuur ha⁻¹ jaar⁻¹, waarvan maximaal 1.600 mol stikstof ha⁻¹ jaar⁻¹. Hierbij werd de aantekening gemaakt dat de doelstelling mede zo was gedefinieerd omdat de doelstelling politiek gezien 'realistisch en haalbaar' moest zijn. Voor de langere termijn (2010) werd de doelstelling gesteld op 1.400 mol zuur ha⁻¹ jaar⁻¹, waarvan maximaal 1.000 mol stikstof ha⁻¹ jaar⁻¹. De veronderstelling was dat bij deze laatste depositieniveaus bossen geen negatieve effecten zouden ondervinden als gevolg van nutriëntenonbalans, toegenomen stressgevoeligheid en wortelschade door aluminium. Bovendien zouden te hoge concentraties in het grondwater (voor drinkwater) en vergrassing van de heiden worden voorkomen. Andere effecten, zoals te hoge concentraties aluminium in het ondiepe grondwater en vegetatieveranderingen, konden daarentegen bij deze niveaus niet worden voorkomen.

Ook voor vennen lagen de niveaus van de verzurende depositie nog veel te hoog. De veronderstelling was dat om alle effecten te vermijden een depositieniveau van maximaal 400 mol zuur ha⁻¹ jaar⁻¹ toelaatbaar zou zijn. Daarom werd nog een

streefwaarde, dat wil zeggen een na te streven niveau voor de verre toekomst, van 400 mol zuur per hectare per jaar gedefinieerd. Berekende en empirisch geschatte gemiddelde kritische depositieniveaus voor landecosystemen op droge zandgronden lagen ten grondslag aan deze doelstellingen (Schneider & Bresser 1988).

Bij de aanpak van de verzuringsproblematiek in Nederland werd overigens al vroeg gekozen voor een tweesporenbeleid (Adema 1980; Keizer 1997). Er werden niet alleen depositiedoelstellingen geformuleerd, maar samenhangend daarmee ook emissiedoelstellingen. Deze tweesporenaanpak is later ook internationaal overgenomen en is terug te vinden in het *tweede Zwavelprotocol* en het *Gotenburg Protocol* onder de CLRTAP (Keizer 1997).

Het *Bestrijdingsplan Verzuring* (VROM 1989a), waarin de depositiedoelstellingen uit het APV-1 waren verwerkt, gaf aan dat voor de realisatie van de depositiedoelstellingen de emissie van zwaveldioxide (SO₂) in Nederland teruggebracht zou moeten worden tot 56 kiloton. Dat was een vermindering met 88 procent ten opzichte van 1980. Voor stikstofoxiden (NO_x) werd een emissiedaling van 80 procent nodig geacht tot 120 kiloton en voor ammoniak (NH₃) een daling van 75-80 procent tot 54 kiloton. Om die doelstellingen te halen werden structurele aanpassingen voorzien in de energievoorziening, het verkeer en de landbouw en werden bovendien maatregelen als aanscherping van emissie-eisen aangekondigd.

Het *Bestrijdingsplan Verzuring* werd vergezeld van enkele meer sectorspecifieke beleidsdocumenten: het *Plan van Aanpak Ammoniakemissie uit de Landbouw* (VROM 1989b) en de *Notitie Verkeer en Milieu* (VROM & VenW 1987). Dit alles vormde één pakket met het eerste *Nationaal Milieubeleidsplan* (NMP-1, zie VROM 1989b) dat alle milieubeleidsterreinen bestreek. Er werden middelen vrijgemaakt voor een forse extra inspanning op het gebied van energiebesparing, hernieuwbare energie en integraal stikstofmanagement in de landbouw (luchtwaters, centrale mestverwerking). Om de toename van het autoverkeer te beperken, werd voorzien in een stapsgewijze verhoging van de accijnzen op benzine, diesel en LPG. De inzet van het NMP-1 was om bij een verwachte groei van het nationaal inkomen met 3 procent per jaar het fossiele energiegebruik te laten dalen met 1 procent per jaar.

Bij de behandeling van het NMP-1, dat als overkoepelend beleidsstuk vóór het *Bestrijdingsplan Verzuring* aan de Kamer was voorgelegd, bleken de beperking van het reiskostenforfait en de verhoging van de dieselaccijns voor de VVD-fractie niet acceptabel. Deze maatregelen vormden begin mei 1989 zelfs de aanleiding voor de val van het kabinet-Lubbers II. En zo bleek dus het milieubeleid aan het eind van de jaren tachtig een harde politieke kwestie.

3.1.3 Naar een integraler beleid

Internationale doelstellingen steeds integraler

In de loop van de jaren tachtig kwam steeds meer kennis beschikbaar over de effecten van verzuring en over de effecten en kosten van maatregelen om verzuring tegen te gaan. Deze kennis werd vevat in een rekenmodel, een Integrated Assessment Model, met de naam RAINS (zie de tekstbox

RAINS, GAINS en GAINS-NL). Met het RAINS-model kon worden berekend waar de kosten van maatregelen het laagst waren en de milieuwinst het grootst. Op deze wijze zou het beleid kosteneffectiever dan voorheen kunnen worden vormgegeven. Zo werd bijvoorbeeld met het RAINS-model aangetoond dat de kosten om depositie van stikstofverbindingen te reduceren conform de doelstellingen uit het *NO_x-Protocol* (Sofia, 1988), 55 procent lager zouden kunnen uitvallen, als niet alleen stikstofoxiden maar ook ammoniak zou zijn aangepakt (Amann & Klaassen 1995).

Eind jaren tachtig werd het streven naar duurzame niveaus voor gezondheid en natuur het uitgangspunt voor verdere afspraken over emissiereducties (Sliggers 2007). Het begrip kritische depositieniveaus ofwel *critical load* deed daarmee zijn intrede in de beleidsvorming. In het *tweede Zwavelprotocol* (Oslo, 1994) waren de emissiereducties van de deelnemende landen niet langer gelijk, maar gebaseerd op het uitgangspunt dat in alle landen dezelfde milieuwinst voor verzuring moest worden bereikt.

In het *Gotenburg Protocol* (1999) werd ook rekening gehouden met verschillen in kosten van maatregelen in de verschillende landen. Dit protocol richtte zich bovendien op vier stoffen of groepen van stoffen tegelijk, namelijk zwaveldioxide, stikstofoxiden, ammoniak en vluchtige organische stoffen. In het *Gotenburg Protocol* zijn voor elk land specifieke emissieplafonds vastgelegd, waaraan vanaf 2010 moest worden voldaan om op Europese schaal de beoogde milieuwinst te boeken tegen de laagste kosten (Maas et al. 2004). Het verzuringsbeleid werd zo gaandeweg integraler en meer gericht op kosteneffectiviteit, maar ook complexer. Bij de herziening van het *Gotenburg Protocol*, die momenteel gaande is, zullen ook emissieplafonds worden opgenomen voor direct uitgestoten fijn stof. Doel daarvan is een betere bescherming van de menselijke gezondheid. Het dossier verzuring heeft zich zo geleidelijk verbreed tot grootschalige luchtverontreiniging.

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de protocollen onder de LTRAP-conventie (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution) die betrekking hebben op verzurende stoffen. Daarnaast zijn nog de volgende protocollen overeengekomen: Protocol concerning the Control of Emissions of Volatile Organic Compounds or their Transboundary Fluxes (Genève, 1991), Protocol on Heavy Metals (Århus, 1998) en Protocol on Persistent Organic Pollutants (POPs) (Århus, 1998).

Evaluatie nationale depositiedoelstellingen

De nationale doelstellingen voor verzurende depositie en emissies uit het *Bestrijdingsplan Verzuring* en het NMP-1 werden in de jaren negentig overgenomen in de elkaar opvolgende nationale milieubeleidsplannen. In 1995 verscheen het eindrapport van de derde fase van het *Additioneel Programma Verzuringsonderzoek* (APV-3). Het APV-3 gaf aan dat de kritische depositieniveaus voor bomen hoger lagen dan in APV-1 en APV-2 werd verondersteld en ook hoger dan de niveaus die waren gebruikt om de doelstellingen in het *Bestrijdingsplan Verzuring* te formuleren. In het NMP-3 werden desondanks de oorspronkelijke depositiedoelstellingen gehandhaafd, maar is aangegeven dat deze voorafgaand aan het *Nationale Milieubeleidsplan 4* (NMP-4) zouden worden geëvalueerd (Albers et al. 2001).

Protocol	Toelichting
<i>Protocol on the Reduction of Sulphur Emissions or their Transboundary Fluxes by at least 30 per cent, Helsinki 1988</i> [eerste Zwavelprotocol]	<ul style="list-style-type: none"> Het eerste 'Flat rate' reductieprotocol, dat wil zeggen alle landen hebben een gelijke verplichting; Vermindering van de emissie van zwaveldioxide van 30 procent in 1993 ten opzichte van 1980.
<i>Protocol concerning the Control of Nitrogen Oxides or their Transboundary Fluxes, Sofia 1988</i> [NO _x -Protocol]	<ul style="list-style-type: none"> Stabilisatie van de emissies van stikstofoxiden in 1994 op het niveau van 1987; twaalf landen waaronder Nederland verklaren bij het ondertekenen dat zij hun emissies met 30 procent zullen terugbrengen in plaats van stabilisatie; Toepassing van emissie-eisen bij nieuwe stookinstallaties en mobiele bronnen gebaseerd op het principe van de best beschikbare technieken; Toepassing van de best beschikbare technieken bij bestaande grote stookinstallaties.
<i>Protocol on Further Reduction of Sulphur Emissions, Oslo 1994</i> [tweede Zwavelprotocol]	<ul style="list-style-type: none"> Het eerste protocol met verschillende emissieverplichtingen voor de deelnemende partijen gebaseerd op de critical-loadsbenadering. Gelijke milieuwinst (verzuring), verspreiding van luchtverontreiniging en kosteneffectiviteit leiden tot verschillende emissieplafonds/reducties voor lidstaten. Emissieplafonds voor zwaveldioxide voor de verschillende landen voor de jaren 2000, 2005 en 2010 Emissie-eisen voor grote stationaire bronnen Eisen aan het zwavelgehalte in brandstoffen
<i>Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, Gotenburg 1999</i> ¹ [Gotenburg Protocol]	<ul style="list-style-type: none"> Emissieplafonds gebaseerd op verschillende effecten (verzuring, eutrofiëring, ozon) en kosteneffectiviteit Emissieplafonds voor zwaveldioxide, stikstofoxiden, ammoniak en vluchtige organische stoffen voor 2010 Emissie-eisen voor stationaire en mobiele bronnen Verplichte toepassing van de best beschikbare technieken

¹ De doelstellingen uit de NEC-richtlijn (uit 2001) van de Europese Unie – een richtlijn voor nationale emissieplafonds – zijn gelijk aan of iets strenger dan die uit het *Gotenburg Protocol*.
Bron: Sliggers (2007)

Opeenvolgende Nederlandse doelstellingen voor verzuring en vermesting

Tabel 3.2

Bron (jaar)	Verzurende depositie			Vermestende depositie		
	In 2000	In 2010	Op de lange termijn	In 2000	In 2010	Op de lange termijn
<i>Indicatief Meerjaren Programma (1984)</i>			1.400 ¹			1.600
<i>Indicatief Meerjaren Programma (1985)</i>			1.400/2.400 ²			
<i>Bestrijdingsplan Verzuring (1989) tot en met NMP-3 (1997)</i>	2.400	1.400		1.600	1.000	
<i>NMP-4 (2001)</i>		2.150 ⁴	400-600 ⁵		1.550 ³	300-500 ⁵
<i>Rapportage emissieplafonds verzuring en grootschalige luchtverontreiniging (2002)</i>		2.300 ⁴	400-600 ⁵		1.650 ⁴	300-500 ⁵
<i>Toekomst agenda milieu (2006)</i>	-	-	-	-	-	-

¹ Uitgedrukt in eenheden van de 'effectieve zure depositie'. De veronderstelling was dat 1.600 mol stikstof per hectare per jaar niet verzurend zou werken. De doelstelling kwam daarmee in feite op 3.000 ha⁻¹ jaar⁻¹.

² Een waarde van 1.400 gold voor bossen op arme zandgronden; voor bossen op rijkere gronden werd een waarde van 2.400 aangehouden.

³ 30 procent van het areaal Nederlandse natuur zal bij deze niveaus volledig beschermd zijn.

⁴ 20 procent van het areaal Nederlandse natuur zal bij deze niveaus volledig beschermd zijn.

⁵ Milieukwaliteitsdoelstellingen voor de lange termijn waarbij 95 procent van het areaal Nederlandse natuur beschermd is.

Het *Nationale Milieubeleidplan 4* (NMP-4; VROM 2001; zie ook Sliggers 2000) formuleerde in 2001 nieuwe (nationale) depositiedoelstellingen, waaraan in 2010 voldaan zou moeten zijn. Hierbij werd voor de verzurende depositie aangetekend: 'Gemiddeld depositieniveau op ecosystemen van 2150 mol zuur per hectare per jaar dat in 2010 volledige bescherming biedt aan circa 20% van het areaal Nederlandse natuur'. En voor de vermestende depositie: 'Gemiddeld depositieniveau op ecosystemen van 1550 mol stikstof per hectare per jaar dat in 2010 volledige bescherming biedt aan circa 30% van het areaal Nederlandse natuur'. Deze doelstellingen waren

gebaseerd op informatie in Beck et al. (2001). Daarnaast werden ook langetermijndoelstellingen geformuleerd (VROM 2001; zie ook Sliggers 2000). Het grootste deel, dat is 95 procent, van de Nederlandse natuur, zou bij de niveaus van de langetermijndoelstelling volledig beschermd zijn. In 2002 werden de verzuringsdoelstellingen uit het NMP-4 opnieuw bijgesteld op grond van nieuwe inzichten in emissies en depositie, die leidden tot de ontwikkeling van een nieuwe berekeningsmethodiek (VROM 2002). De conclusie was toen dat de eerder geformuleerde doelstellingen nog steeds valide

Vershil beleidsoriëntatie EU en UNECE is geleidelijk vervaagd

De Europese Economische Gemeenschap (EEG) heeft zich tot het midden van de jaren negentig niet actief gericht op bestrijding van de verzuring, maar volgde de CLRTAP als Partij bij de Conventie. De EEG richtte zich aanvankelijk op het stellen van eisen aan producten: vanaf begin jaren zeventig stonden emissie-eisen voor auto's centraal en vanaf 1975 kwaliteitseisen voor brandstoffen (zwavel in gasolie en stookolie en lood in benzine). Vanaf het begin van de jaren tachtig werden luchtkwaliteitsnormen geformuleerd om de volksgezondheid te beschermen. Vanaf het midden van de jaren tachtig werden eisen aan productieprocessen gesteld; van belang was vooral het beschrijven van de 'best beschikbare technieken', die moesten worden toegepast in de industrie. Een belangrijke drijfveer voor het harmoniseren van product- en productieproces-eisen en van milieunormen was, naast de verbetering van het milieu, de verdere vormgeving van de gemeenschappelijke markt met gelijke concurrentieverhoudingen voor bedrijven.

Sinds het midden van de jaren negentig is het luchtbeleid in Nederland, de EU en UNECE integraler geworden. Het beleid richt zich sindsdien op de gelijktijdige aanpak van verschillende schadelijke effecten van luchtverontreiniging op de menselijke

gezondheid en de natuur. Ook de traditionele afbakening tussen de UNECE/CLRTAP (nadruk op natuur) en de EU (nadruk op gezondheid) is steeds meer vervaagd. Voor de beleidsontwikkeling maakt de EU gebruik van de kennis die door de UNECE/CLRTAP is ontwikkeld. Omgekeerd steunt de LTRAP-conventie op de EU voor technische voorschriften en emissie-eisen.

In EU-verband hebben sommige landen hun emissieplafonds uit het Gotenburg Protocol iets aangescherpt en vastgelegd in een richtlijn voor nationale emissieplafonds, de zogeheten NEC-richtlijn (EU 2001a). Het vastleggen van emissiedoelstellingen in de NEC-richtlijn schept verdergaande sanctiemogelijkheden. De Thematische strategie inzake luchtverontreiniging van de Europese Commissie (EU 2005) heeft als langetermijndoelstelling vastgelegd dat de kritische waarden voor verzurende en vermestende depositie niet mogen worden overschreden. De daarvoor benodigde emissiereducties zijn echter met technische maatregelen nog niet haalbaar, ook niet op middellange termijn. Daarom zullen voor het jaar 2020 nieuwe tussendoelstellingen worden voorgesteld, die in het herziene Gotenburg Protocol en de herziene NEC-richtlijn zullen worden opgenomen.

RAINS, GAINS en GAINS-NL

RAINS (Regional Air Pollution INformation and Simulation) is een zogeheten Integrated Assessment Model. Het model integreert een aantal wezenlijke factoren die van invloed zijn op de luchtkwaliteit, de ontwikkeling van de economie en de energievraag, emissiebeperkende maatregelen voor luchtverontreinigende stoffen en de kosten van deze maatregelen, en atmosferische verspreiding van luchtverontreiniging. Ook doet het model uitspraken over de effecten van luchtverontreiniging in relatie tot de hiervoor genoemde factoren (Alcamo et al. 1990; Schöpp et al. 1999). Het model is sinds 1983 ontwikkeld bij het International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) te Laxenburg, Oostenrijk.

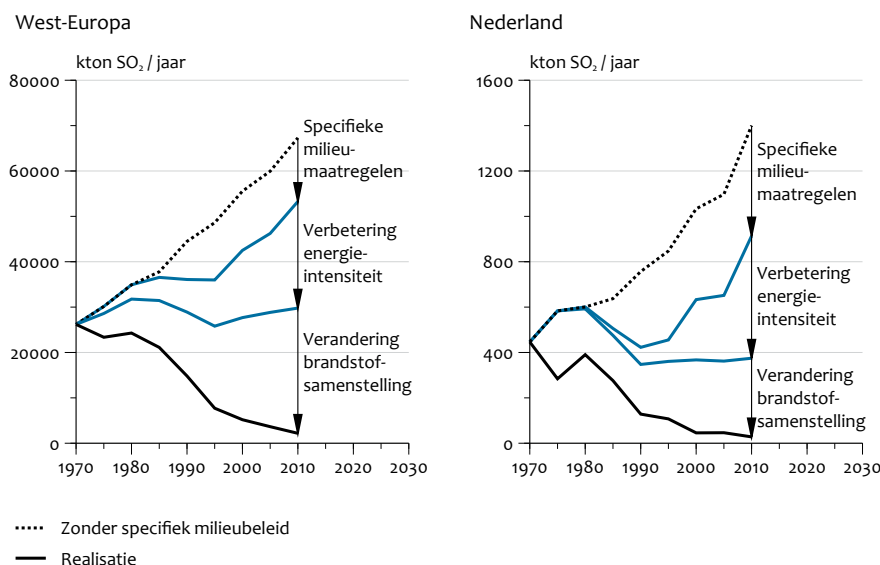
RAINS is een *multi-pollutant-multi-effect-model*. Dit houdt in dat het model bedoeld is voor verschillende verontreinigende stoffen en ook diverse soorten effecten kan beschrijven. Zo beschrijft het model de gezondheidseffecten van fijn stof en ozon, maar ook de negatieve effecten op ecosystemen door te hoge belasting met zuur (verzuring) of stikstof (vermesting) of de gevolgen van blootstelling aan te hoge ozonconcentraties. Het model faciliteert aldus de integrale aanpak van het milieubeleid.

RAINS kan in twee modi worden toegepast. De scenarioanalysemodus maakt het mogelijk om voor een gegeven energie- en landbouwscenario de kosten en milieueffecten te schatten van door de gebruiker opgelegde emissiebeperkende maatregelen. Projecties van economische activiteiten zijn beschikbaar door koppelingen die zijn aangebracht met gespecialiseerde energie-, verkeer- en landbouwmodellen. De optimalisatiemodus maakt het mogelijk te zoeken naar die combinatie van maatregelen waarmee door de gebruiker gestelde doelstellingen voor bescherming van gezondheid en ecosystemen tegen mini-

male kosten kunnen worden gerealiseerd. Bij de optimalisatie wordt rekening gehouden met verschillen die tussen de landen bestaan met betrekking tot de kosten van de maatregelen en met betrekking tot milieuumstandigheden.

Het model is een aantal jaren geleden op initiatief van Nederland uitgebreid met broeikasgassen en heeft toen de naam GAINS (Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies) gekregen (Klaassen et al. 2004). Ook werd toen de optimalisatiemodule aangepast. Er wordt niet langer met een component-specifieke kostencurve gewerkt, maar met individuele maatregelen die op verschillende stoffen gericht kunnen zijn; een voorbeeld van dergelijke maatregelen zijn de EURO-normen voor het wegverkeer. Ook is het in GAINS toegestaan om de energiestructuur tijdens de optimalisatie te laten veranderen, waardoor behalve technische ook andere typen maatregelen kunnen worden genomen. Structuurmaatregelen, zoals verandering van brandstofsamenstelling en verbeterde energie-efficiëntie, zijn nu ook op hun effect te beoordelen. Een belangrijk pluspunt is dat met GAINS het klimaat- en luchtbeleid in samenhang kan worden geanalyseerd.

GAINS-NL is een voor Nederland specifieke uitbreiding van het GAINS-model. Deze uitbreiding betreft in het bijzonder het ruimtelijke detailniveau. In RAINS en GAINS is de ruimtelijke resolutie 50x50 vierkante kilometer. Dit betekent dat Nederland met circa 30 gridcellen wordt beschreven. Gezien de sterke ruimtelijke gradiënten van luchtverontreiniging binnen Nederland is deze resolutie ontoereikend; hotspots worden bij deze resolutie onderschat. In GAINS-NL is de resolutie daarom verhoogd naar 5x5 vierkante kilometer.



Bron: IIASA (2009)

De bovenste stippellijnen geven de emissies zoals die zouden zijn geweest als de economie vanaf 1970 zou zijn gegroeid als in werkelijkheid, maar zonder verdere verbetering van de energie-intensiteit, zonder verandering van het relatieve aandeel van verschillende brandstoffen, en zonder specifieke milieumaatregelen. De zwarte lijn geeft het verloop van de werkelijk opgetreden emissies.

waren, met uitzondering van de effecten zoals die bij bomen waren voorzien.

De nationale depositiedoelstellingen zijn dus herhaaldelijk herzien naar aanleiding van nieuwe wetenschappelijke inzichten in critical loads (lange termijn) en haalbaarheid (tussendoelstellingen). Deze bijstelling kon tamelijk 'ongestraft' plaatsvinden. De doelstellingen waren weliswaar vastgelegd in Nederlandse beleidsnotities, maar ze waren niet wettelijk verankerd. In de *Toekomstagenda Milieu* (VROM 2006) komen depositiedoelstellingen in het geheel niet meer aan de orde. In deze notitie wordt 'vastgehouden aan de resultaatsverplichtingen uit het NMP-3 en NMP-4', maar noch de nationale depositiedoelstellingen, noch de nationale emissiedoelstellingen maken daar deel van uit. De emissieplafonds uit de NEC-richtlijn wel. Milieudoelstellingen voor natuur worden tegenwoordig onder andere gebaseerd op de Europese Vogel- en Habitatrichtlijn. Daarin wordt gestreefd naar het bereiken van een 'gunstige staat van instandhouding' voor aangewezen natuurterreinen (Natura 2000-gebieden). Daarnaast zijn er ook nationale doelstellingen voor natuur geformuleerd.

Tabel 3.2 geeft een overzicht van de opeenvolgende Nederlandse milieukwaliteitsdoelstellingen voor verzuring en vermisting, vastgelegd in diverse programma's in de periode 1984-2006.

3.2 Gevolgen van beleid voor emissies en milieukwaliteit

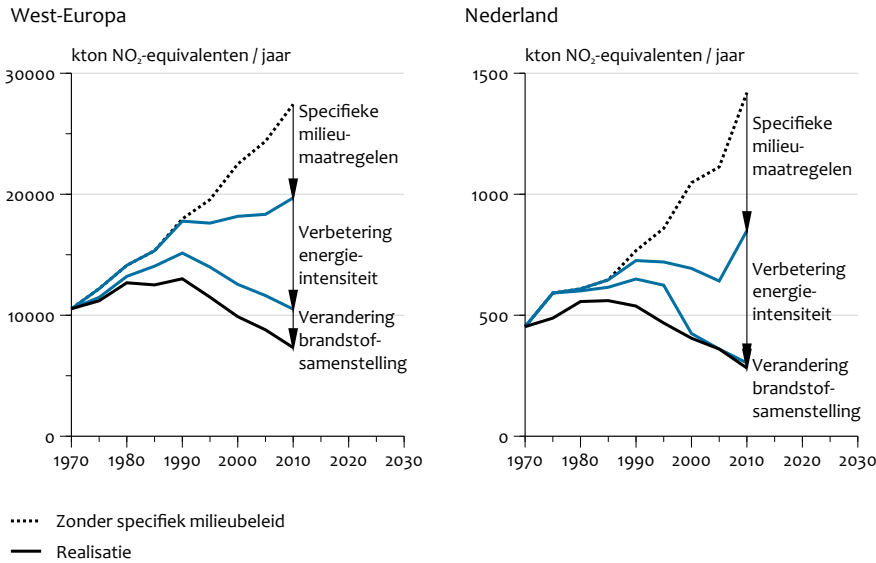
3.2.1 Maatregelen in Europa

Forse emissiereducties door maatregelen en autonome ontwikkelingen

Sinds 1980 is de emissie van zwaveldioxide in West-Europa en Nederland sterk gedaald, namelijk met respectievelijk 75 en 85 procent (figuur 3.1). De emissie van stikstofoxiden is pas later, namelijk vanaf eind jaren tachtig, gedaald: in West-Europa met 30 procent en in Nederland met 40 procent (figuur 3.2). De ammoniakemissie is in West-Europa minder sterk gedaald, namelijk met 10 procent. In Nederland is de ammoniakemissie sinds 1980 met 50 procent afgenomen (figuur 3.3).

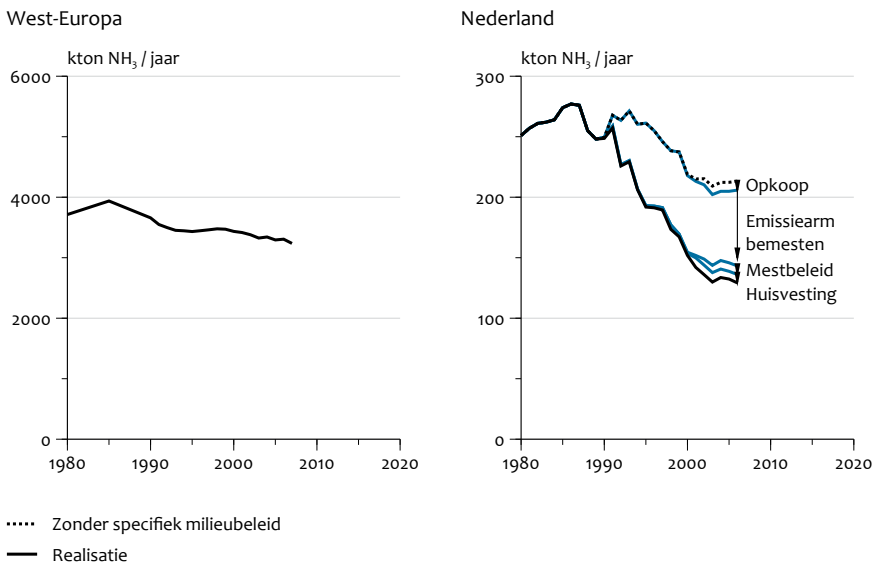
Het International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) heeft onlangs berekeningen gepresenteerd die behulpzaam zijn bij het verklaren van de emissieontwikkelingen van zwaveldioxide en stikstofoxiden (figuur 3.1, 3.2) (IIASA 2009). Te zien is dat verbetering van de energie-intensiteit, verandering van de brandstofmix en specifieke milieumaatregelen (zoals 'end-of-pipe' maatregelen, technische verbeteringen van het verbrandingsproces en schonere brandstoffen) hebben bijgedragen aan de vermindering van de emissies van zwaveldioxide en stikstofoxiden in West-Europa.

Specifieke milieumaatregelen die in belangrijke mate hebben bijgedragen aan de vermindering van de zwaveldioxide-emissie zijn rookgasontzwaveling en het gebruik van kolen en aardolieproducten met een lager zwavelgehalte. Deze maatregelen zijn sinds 1980 toegepast bij elektriciteitscentrales, raffinaderijen, industrie en wegverkeer (Stanners & Bourdau



Bron: IIASA (2009)

De bovenste stippellijnen geven de emissies zoals die zouden zijn geweest als de economie vanaf 1970 zou zijn gegroeid als in werkelijkheid, maar zonder verdere verbetering van de energie-intensiteit, zonder verandering van het relatieve aandeel van verschillende brandstoffen, en zonder specifieke milieumaatregelen. De zwarte lijn geeft het verloop van de werkelijk opgetreden emissies.



Bron: EMEP (links), De Haan et al 2009 (rechts)

De bovenste stippellijnen geven de emissies zoals die zouden zijn geweest als de economie vanaf 1970 zou zijn gegroeid als in werkelijkheid, maar zonder verdere verbetering van de energie-intensiteit, zonder verandering van het relatieve aandeel van verschillende brandstoffen, en zonder specifieke milieumaatregelen. De zwarte lijn geeft het verloop van de werkelijk opgetreden emissies.

1995). Een milieumaatregel die veel heeft bijgedragen aan de emissiereductie van stikstofoxiden, is de invoering van de driewegkatalysator bij personenauto's.

Het gevoerde milieubeleid is zeker niet de enige oorzaak geweest van de gerealiseerde emissiedaling. Zo zijn energie-

besparingsmaatregelen en veranderingen in de brandstofmix mede, of zelfs hoofdzakelijk, ingegeven door economische overwegingen of door het energiebeleid (De Jong et al. 2005). De oplopende energieprijzen na de oliecrisis in het begin van de jaren zeventig gaven een belangrijke impuls aan energiebesparing. Specifieke milieumaatregelen, zoals rook-

Sector	Specifieke milieumaatregel
Energie/industrie/ raffinaderijen/afvalverbranding	<ul style="list-style-type: none"> • Rookgasontzwaveling • Selectieve katalytische reductie (SCR) • Lage NO_x-branders • Rookgasrecirculatie • In-vuurhaard NO_x-reductie • Wervelbedverbranding • Eisen aan zwavelgehalte in brandstoffen
Verkeer	<ul style="list-style-type: none"> • Driewegkatalysator • Schonere verbrandingstechnologie • Eisen aan brandstof (o.a. zwavel- en loodgehalte)
Landbouw	<ul style="list-style-type: none"> • Emissiearm onderwerken van mest • Afdekken mestopslag • Verminderen stikstofgehalte in veevoer • Emissiearme stallen
Consumenten	<ul style="list-style-type: none"> • NO_x-eisen CV-ketels • Typekeur openhaarden

gasreiniging, hebben bedrijven daarentegen primair getroffen om te voldoen aan milieuregelgeving. Het is daarom niet mogelijk om eenduidig aan te geven welke emissiereductie het gevolg is van milieubeleid. De emissiereducties die door specifieke milieumaatregelen zijn bereikt, vormen de ondergrens van het effect van het milieubeleid.

De energie-intensiteit van de economie – een maat voor de hoeveelheid energie per eenheid bruto binnenlands product (bbp) – is gedaald door energiebesparing in de industrie en de energiesector. Bovendien hebben sectoren die relatief weinig energie gebruiken, zoals de dienstensector, een hogere economische groei doorgemaakt dan energie-intensieve industriële sectoren. De verbetering van de energie-intensiteit is relatief belangrijker geweest voor de emissiereductie van stikstofoxiden dan voor de emissiereductie van zwaveldioxide.

Voorbeelden van veranderingen in de brandstofmix zijn de overschakeling van kolen op olie en aardgas en het toenemende gebruik van kernenergie in Europa (EEA 1995). De verandering van de brandstofsamenstelling heeft een belangrijke bijdrage geleverd aan de emissiereductie van zwaveldioxide. Voor stikstofoxiden is deze verandering van minder betekenis geweest.

In Oost-Europa hebben economische hervormingen sinds het begin van de jaren negentig, waaronder het sluiten van bruinkoolgestookte elektriciteitscentrales, eveneens bijgedragen aan de emissieafname van zwaveldioxide en stikstofoxiden (EEA 2003). Ook de economische teruggang in de jaren negentig heeft een rol gespeeld.

De afname van de ammoniakemissie in West-Europa is hoofdzakelijk het gevolg van afnemende dieraantallen en minder van technische maatregelen (EEA 2003). De invoering van de melkquota medio jaren tachtig om de boterberg en melkplas weg te werken, heeft een grens gesteld aan de omvang van de melkveehouderij in de Europese Unie. In Nederland is de ammoniakemissie sterker gedaald dan gemiddeld in Europa, omdat in Nederland verdergaande, technische maatregelen zijn genomen om de ammoniakemissies te verminderen in vergelijking met andere landen (zie ook figuur 3.3).

Ondanks deze maatregelen behoort Nederland nog steeds tot de gebieden in Europa met de hoogste emissies per vierkante kilometer. De Nederlandse natuur staat dan ook bloot

aan relatief hoge deposities van verzurende en vermestende stoffen (zie ook hoofdstuk 2).

3.2.2 Maatregelen in Nederland

Emissiereducerende maatregelen

Vanaf de jaren tachtig van de vorige eeuw zijn in Nederland verschillende maatregelen genomen om de emissie van verzurende stoffen te reduceren. Een overzicht van deze milieumaatregelen (end-of-pipemaatregelen, technische verbeteringen en schonere brandstoffen) is opgenomen in tabel 3.3. In het vervolg van deze paragraaf worden de ontwikkelingen in enkele maatschappelijke sectoren besproken.

Energiesector, raffinaderijen en industrie

Aan het eind van de jaren tachtig werden de eerste kolencentrales in Nederland voorzien van rookgasontzwavelingsinstallaties. Daarnaast werden er eisen gesteld aan het zwavelgehalte in brandstoffen. Emissie-eisen werden wettelijk vastgelegd in het *Besluit Emissie-eisen Stookinstallaties* (BEES) uit 1987. Verder werd in 1990 het *Verzuringsconvenant* met de elektriciteitsbedrijven gesloten met daarin emissiedoelstellingen voor zwaveldioxide en stikstofoxiden voor het jaar 2000, van respectievelijk 18 en 35 kiloton. Die emissiedoelstellingen werden al medio jaren negentig gehaald. Deze reducties zijn onder meer bereikt doortoepassing van rookgasontzwaveling, inzet van zwavelarme kolen, zogeheten lage NO_x-branders, aanpassing van gasturbines en – bij enkele centrales – toepassing van selectieve katalytische reductie (SCR) (EnergieNed 2003).

Maatregelen bij raffinaderijen werden later genomen dan bij energiecentrales. In het BEES werd een uitzonderingsbepaling opgenomen waardoor de gefaseerde inwerkingtreding van de emissie-eisen voor zwaveldioxide mede afhankelijk werd gemaakt van ontwikkelingen in het buitenland. Dit was met het oog op bescherming van de concurrentiepositie van de Nederlandse raffinagesector. In 1995 werd met de raffinaderijen overeenstemming bereikt over een maximale uitstoot van 36 kiloton vanaf het jaar 2000. Deze doelstelling is gehaald. In 2005 werd een verdere verlaging naar 16 kiloton per jaar afgesproken, waaraan vanaf 2010 moet worden voldaan. De raffinaderijen die nog olie gebruiken, nemen momenteel maatregelen om over te schakelen naar gas of zullen rookgasreiniging toepassen om de zwaveldioxide-emissies te reduceren.

Om de emissie van stikstofoxiden uit salpeterzuurfabrieken te verminderen, is in 1987 het *Besluit NO_x-emissie-eisen salpeterzuurfabrieken* ingevoerd (zie VROM 1998). Sinds het begin van de jaren negentig is met nog elf andere bedrijfstakken, waaronder de basismetale, de chemische industrie en de olie- en gaswinningsindustrie, zogeheten Integrale Milieu Taakstellingen afgesproken. Hierin zijn doelstellingen opgenomen voor de emissieverlaging van verzurende stoffen (90 procent reductie in 2010 voor zwaveldioxide en stikstofoxiden ten opzichte van 1985). De bereikte emissiereducties lagen in 2007 voor zwaveldioxide en stikstofoxiden op 77 en 65 procent (FO Industrie 2008).

Landbouw

In de Nederlandse landbouw zijn diverse specifieke milieumaatregelen van belang geweest om de ammoniakemissie te beperken. Vanaf 1992 volgde een gefaseerde invoering van de verplichting om mest op het land emissiearm op te brengen. Dit werd vanaf 1995 landelijk verplicht. Emissiearme mestopbrenging is de belangrijkste maatregel geweest om de ammoniakemissie te verminderen. Begin jaren negentig volgden de eerste eisen om mestopslagen af te dekken. Ook werd de ammoniakemissie verminderd door het stikstofgehalte in het veevoer te verlagen (De Haan et al. 2008).

Het blijkt echter moeilijker om stalaanpassingen door te voeren. Begin jaren negentig werd de bouw van nieuwe emissiearme stallen (Groen Labelstallen) gesubsidieerd. In 1995 werd in de *Integrale Notitie Mest en Ammoniak* voor 1998 de AMvB huisvesting aangekondigd, waarin algemene verplichtingen zouden worden vastgelegd om bestaande stallen emissiearm te maken. Deze AMvB is echter pas in 2008 in werking getreden, met eisen die vanaf 2010 zouden gelden. Begin 2009 is voor sommige staltypen uitstel verleend tot 2013 via het *Actieplan Ammoniak veehouderij*.

Naast generiek ammoniakbeleid is ook gebiedsgericht beleid gevoerd. Het doel hiervan is om de ammoniakemissie vooral

in de buurt van kwetsbare natuur terug te dringen. Vanaf 1987 werden grenzen gesteld aan uitbreiding of nieuwe vestiging van veehouderijbedrijven nabij kwetsbare natuur (Kros et al. 2008).

Wegverkeer en scheepvaart

In Europees verband zijn vanaf het begin van de jaren zeventig bindende eisen gesteld aan emissies door personenauto's en vrachtauto's. Sindsdien moeten autofabrikanten ervoor zorgen dat nieuwe autotypen zijn goedgekeurd met toepassing van deze eisen; pas dan kunnen ze in de Europese Unie op de markt worden gebracht. Sinds 1973 is in de Nederlandse wetgeving (Staatsblad 1973) aan deze Europese regels uitvoering gegeven door een verbod op vervaardiging, invoer en verkoop van auto's die niet tot een goedgekeurd type behoren. Er werden eisen geformuleerd voor koolmonoxide en vluchtige organische stoffen (in 1970), fijn stof (1972) en stikstofoxiden (1977). Aanvankelijk kwamen de emissienormen voor auto's tot stand in UNECE-verband, de zogeheten ECE-normen. Ze werden doorgaans door de Europese Commissie overgenomen in Europese richtlijnen en werden daardoor bindend voor de lidstaten. Deze vroegere richtlijnen waren echter vooral bedoeld om handelsbelemmeringen tegen te gaan. De Europese Commissie nam met de Euronormen vanaf het eind van de jaren tachtig het initiatief over van de UNECE. Zo zijn de normen voor uitlaatemissies vanaf begin jaren negentig ongeveer elke vijf jaar aangescherpt (figuur 3.4). De Euro-1-norm heeft ertoe geleid dat vrijwel alle nieuw verkochte auto's in Nederland vanaf het begin van de jaren negentig waren uitgerust met een driewegkatalysator.

Autofabrikanten hebben ook via motortechnische aanpassingen voldaan aan de emissie-eisen. Overigens is de feitelijke emissie van wegverkeer minder sterk gedaald dan figuur 3.4 doet vermoeden; dieselauto's stoten in de praktijk namelijk meer stikstofoxiden uit dan tijdens de testen in het laboratorium. Ondanks deze tegenvaller, en ondanks een groei van het wegverkeer met 35 procent sinds 1990, is de emissie van

Best beschikbare technieken

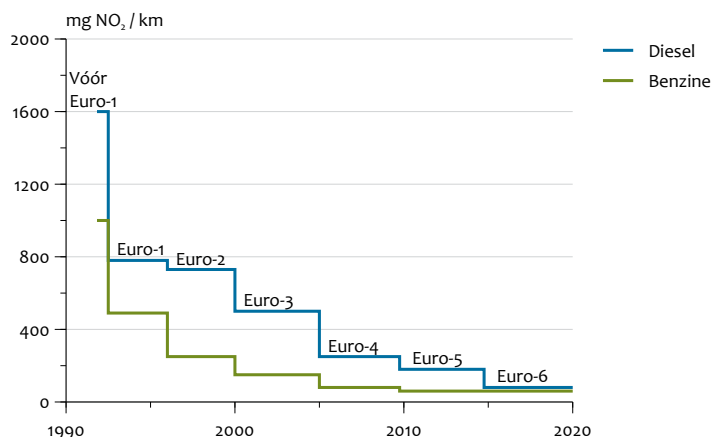
Voor sommige bedrijfscategorieën, zoals grote stookinstallaties en afvalverbrandingsinstallaties, zijn op Europees niveau algemeen geldende emissie-eisen vastgelegd (Richtlijn grote stookinstallaties (EU 2001b); Richtlijn afvalverbranding (EU 2000)).

Voor de meeste bedrijfstakken of productieprocessen zijn echter 'best beschikbare technieken' (BBT) omschreven. EU-lidstaten hebben de toepassing van BBT in hun wetgeving verplicht gesteld op grond van de Richtlijn inzake geïntegreerde preventie en bestrijding van verontreiniging (IPPC-richtlijn) (EU 1996). Deze richtlijn verving een eerdere, specifiek voor luchtverontreiniging door industriële inrichtingen geldende richtlijn uit 1984. Ook bij diverse CLRTAP-protocollen zijn, naast algemene emissie-eisen, verplichtingen opgenomen om BBT toe te passen (zie ook tabel 3.1). Doorgaans is er niet één techniek aangewezen als BBT, maar zijn verschillende technieken beschreven. Op die manier kunnen landen bij vergunningverlening rekening houden met de lokale milieukwaliteit en de

kosten die het bedrijfsleven moet maken om de best beschikbare technieken toe te passen.

In de Nederlandse wetgeving werden eisen voor emissies van zwaveldioxide (SO₂) en stikstofoxiden (NO_x) uit stationaire bronnen opgenomen via het *Besluit emissie-eisen stookinstallaties A en B*, het *Besluit luchtemissies afvalverbranding*, en het *Besluit emissie-eisen NO_x salpeterzuurfabrieken*. Technieken die in Nederland als BBT gelden, zijn omschreven in de Nederlandse emissierichtlijn Lucht (NeR).

Sinds 2005 is er in Nederland ook een handelssysteem in werking waarin bedrijven die veel stikstofoxiden uitstoten, emissierechten kunnen verhandelen. Bedrijven hebben daarbij de keus tussen twee opties: zelf maatregelen nemen om te voldoen aan de prestatienorm van de NO_x-handel, of emissierechten kopen om aan die norm te voldoen. Dit handelssysteem beoogt de kosten van het beleid te verlagen.



Bron: Gegevens over de Europese regelgeving; bewerking PBL

stikstofoxiden door het wegverkeer fors gedaald: van 240 kiloton in 1990 tot ongeveer 120 kiloton in 2007.

De emissies van verzurende stoffen van bronnen op het land zijn gedurende de afgelopen decennia duidelijk verminderd. De emissies van de zeescheepvaart zijn daarentegen in die tijd nauwelijks aangepakt. Zo vallen de emissies van zeescheepvaart buiten de afspraken over nationale emissieplafonds. De emissies van zwaveldioxide en stikstofoxiden van zeescheepvaart op het Nederlandse deel van het continentale plat en in de havens zijn sinds 1990 met respectievelijk 30 en 50 procent toegenomen. De stikstofoxidenemissies uit deze bron bedragen inmiddels 45 procent van de emissie van alle bronnen op het Nederlandse landoppervlak, terwijl die van zwaveldioxide inmiddels hoger zijn dan alle bronnen op het Nederlandse landoppervlak (PBL 2009a).

Pas in 2008 zijn internationale afspraken gemaakt om emissies van zwaveldioxide en stikstofoxiden in de zeescheepvaart te verminderen. Hierbij is onder andere afgesproken dat zeeschepen die op de Noordzee varen, moeten overschakelen op brandstoffen met een lager zwavelgehalte (1 procent in 2010 en 0,1 procent in 2015). Naar verwachting zullen hierdoor de zwaveldioxide-emissies op de Noordzee met ruim 90 procent afnemen tussen 2008 en 2015. De eisen voor de emissiereductie van stikstofoxiden zijn minder vergaand en hebben pas op de langere termijn (na 2020) een substantieel effect.

3.2.3 Effecten van maatregelen

Vooraf emissie zwaveldioxide sterk teruggedrongen

De uitstoot van zwaveldioxide nam sterker af dan die van andere verzurende stoffen. Deze emissie bleek relatief eenvoudig aan te pakken. Een groot deel van de uitstoot werd veroorzaakt door een beperkt aantal bronnen, zoals kolen centrales, raffinaderijen, en industrie. Bovendien waren rookgasreinigingstechnieken al commercieel beschikbaar sinds het eind van de jaren zeventig. Ook de overschakeling naar brandstoffen met een lager zwavelgehalte heeft bijgedragen aan de sterke daling van de emissie van zwaveldioxide. Deze

emissie was overigens in Nederland in 1980 al lang over haar hoogtepunt heen.

De emissies van stikstofoxiden bleken lastiger aan te pakken, omdat deze stoffen bij veel kleine bronnen vrijkomen, zoals auto's. Deze emissies daalden pas sinds het begin van de jaren negentig. De invoering van de driewegkatalysator heeft de belangrijkste bijdrage geleverd aan de afname van de stikstofoxidenemissie. Deze afname is gerealiseerd ondanks een sterke toename van de verkeersprestatie. Zonder deze volumegroei zou de emissie dus nog sterker zijn afgenomen.

Ook de aanpak van de ammoniakemissie bleek lastig. Ook hier is sprake van veel kleine bronnen, agrarische in dit geval. De belangrijkste bijdrage aan de emissiedaling van ammoniak is hier geleverd door de verplichting om, vanaf het begin van de jaren negentig, mest emissiearm toe te dienen. De baten hiervan zouden echter beperkt zijn geweest als niet ook het mestgebruik zelf zou zijn verminderd. Immers, bij emissiearm gebruik van mest komt de stikstof dan wel niet in de lucht, maar komt de stikstof wel in de bodem en, in geval van overmatige bemesting, in het grondwater terecht. De mestproductie in Nederland is echter sinds 1980 gedaald met 20 procent. De groei van de veestapel is beperkt door de instelling van de melkquota en indirect via het mestbeleid en de Nitraatrichtlijn. Ook is het gebruik van kunstmest afgenomen. De hoeveelheid stikstof die op de bodem wordt gebracht en niet door het gewas wordt opgenomen, is hierdoor sinds 1990 met 35 procent gedaald (De Haan et al. 2008a).

Depositie basische kationen afgenomen

Zure depositie wordt deels geneutraliseerd door depositie van basische kationen zoals calcium, kalium en magnesium, mits deze niet afkomstig is van zeezout. Een deel van deze depositie van basische kationen is van antropogene oorsprong, het andere deel is van natuurlijke oorsprong (met name bodemstof). Uit metingen blijkt dat in Nederland de *natte* depositie van basische kationen min of meer constant is geweest sinds 1980. Dit duidt erop dat de bijdrage van antropogene bronnen aan de natte depositie niet heel groot is (Van Jaarsveld et al. in voorbereiding). Alleen in Zuid-Limburg is in de jaren tachtig

	Bestrijdingsplan Verzuring (1989)			Gotenburg Protocol (1999)	NEC- plafond (2001)	Realisatie				Raming
	1994	2000	2010	2010	2010	1980	1995	2000	2007	2010
Zwavel dioxide	280	105	56	50	50	465	129	73	60	42
Stikstofoxiden	440	270	120	266	260	548	464	390	299	264
Ammoniak	175	90	54	128	128	251	193	153	135	131

wel een duidelijke afname van de natte depositie gemeten, die samenhangt met de cementproductie aldaar.

Het beeld voor de *droge* depositie is minder duidelijk. De luchtconcentraties van calciumaerosol zijn gedaald (in min of meer gelijke mate aan de afname van de fijnstofemissies), maar deze metingen betreffen alleen de kleine deeltjes. Metingen van voor 1988 suggereren dat de totale natte plus droge depositie van basische kationen in de jaren tachtig is gedaald. De huidige voor zeezout gecorrigeerde depositie van basische kationen bedraagt 260 mol ha⁻¹ jaar⁻¹, gerekend als zuurequivalenten. Er zijn aanwijzingen dat deze depositie begin jaren tachtig circa 70 mol per hectare per jaar hoger lag dan tegenwoordig (Van Jaarsveld et al. in voorbereiding). Als deze veronderstelling klopt dan zou deze afname van de depositie van basische kationen enkele procenten van de depositieafname van verzurende stoffen sinds 1980 teniet hebben gedaan.

Emissiereductiedoelstellingen stikstofverbindingen bleken niet haalbaar

In terugblik kan worden gesteld dat de mogelijkheden zijn overschat om de structurele veranderingen, zoals die werden geschetst in het Bestrijdingsplan Verzuring en het NMP-1, in praktijk te brengen. Het NMP-1 beoogde een energiebesparingstempo van 4 procent per jaar te realiseren bij een economische groei van 3 procent. Dit is bij lange na niet gehaald. De energiebesparing in Nederland bedroeg in de periode 1995-2006 gemiddeld nog geen 1 procent per jaar (Boonekamp et al. 2008). Het autoverkeer nam veel sneller toe dan in het NMP-1 was voorzien en het gebruik van fossiele energie was in 2008 ruim 20 procent hoger dan in 1990, terwijl juist een daling van ruim 20 procent was voorzien.

In de milieuverkenning *Zorgen voor Morgen* (Langeweg 1988) werd geschat dat de ammoniakemissie in Nederland in 2010 met technische maatregelen tot 80 kiloton zou kunnen worden verlaagd, tegen 237 kiloton voor stikstofoxiden en 137 kiloton voor zwavel dioxide. In werkelijkheid zijn de zwavel dioxide-emissies veel sterker gedaald, en die van stikstofoxiden en ammoniak veel minder sterk (tabel 3.4). Dit komt doordat een deel van de technische maatregelen in de landbouw, waaronder centrale mestverwerking en biofilters op stallen, uiteindelijk te duur werden bevonden. Het effect van technische maatregelen voor stikstofoxiden werd gedeeltelijk teniet gedaan door de groei van het energiegebruik en het verkeer. Bovendien viel de voortgang van de milieutechnologieontwikkeling tegen (Sliggers 2000).

De beoogde structurele veranderingen zijn dus niet erg van de grond gekomen. Daarom moesten extra end-of-pipemaat-

regelen worden genomen om de emissiegroei te beperken. Achteraf bezien zijn de kosten van het luchtbeleid in de energie- en transportsector daardoor hoger uitgevallen dan het geval zou zijn geweest als het klimaatbeleid al in de jaren negentig steviger zou zijn ingezet.

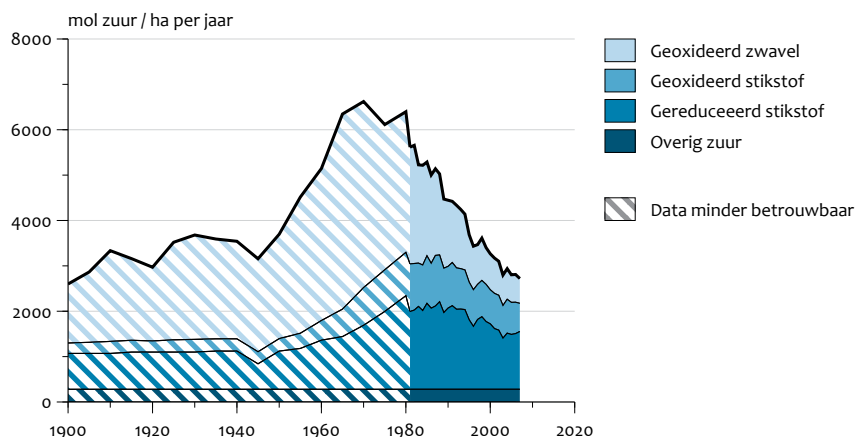
De tegenvallers in de energie- en transportsector en in de landbouw zijn er mede de oorzaak van geweest dat de in 1989 geformuleerde emissiedoelstellingen voor stikstofoxiden en ammoniak niet zijn gehaald (tabel 3.4). Onder invloed van maatschappelijke en politieke weerstanden en de gebleken overschatting van de effectiviteit van de voor energiebesparing ingezette convenanten en heffingen, werden de nationale emissiedoelstellingen bijgesteld. In het NMP-3 werd de doelstelling voor 2000 voor de emissie van stikstofoxiden doorgeschoven naar 2005. Een grote bijstelling van de emissiedoelstellingen voor stikstofoxiden en ammoniak kwam met het NMP-4 (VROM 2001a; Sliggers 2001). Hierin werden de emissiedoelstellingen voor 2010 bijgesteld tot 231 kiloton voor stikstofoxiden en 100 kiloton voor ammoniak. Ook de beoogde beschermingsniveaus van natuurgebieden zijn na 2000 minder ambitieus geworden (tabel 3.2).

De emissieontwikkeling van zwavel dioxide vormt hierop een uitzondering. Door de genomen maatregelen en het grotendeels uitfaseren van olie als brandstof in de industrie en de energiesector en door de inzet van zwavelarme kolen in elektriciteitscentrales, zal de emissie in 2010 lager uitvallen dan het oorspronkelijke doel van 56 kiloton.

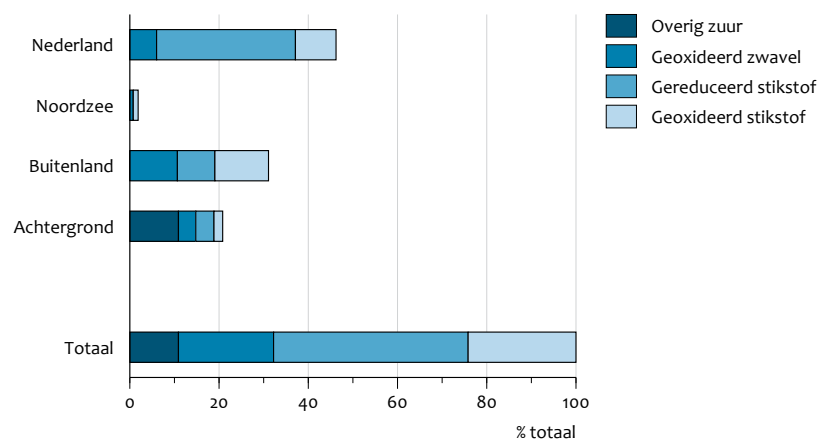
De emissies van verzurende stoffen zullen in 2010 wel in de buurt komen van de huidige Europese emissiedoelstellingen voor 2010 (Daniëls & Van der Maas 2010).

Effectgericht beleid naast bronbeleid

Naast brongericht beleid is ook beleid gevoerd om de effecten van verzuring (en vermisting en verdroging) tegen te gaan. Dit bleek nodig omdat het brongerichte beleid pas op langere termijn leidt tot deposities onder de kritische niveaus en natuurherstel daarbij na-ijlt (zie ook hoofdstuk 2). Zeker de stikstofdepositie ligt ook nu nog in veel delen van Nederland ver boven de kritische niveaus. Bovendien is de stikstof in de loop der jaren in de bodem geaccumuleerd. Sinds 1989 worden via het programma *Effectgerichte Maatregelen* (EGM) en het *Overlevingsplan Bos en Natuur* (OBN) effectgerichte maatregelen gesubsidieerd. Voorbeelden van maatregelen zijn plagen, baggeren en maaien, waardoor stikstof uit het ecosysteem wordt afgevoerd (Lekkerkerk et al. 1995). Deze maatregelen hebben ook waarneembaar succes gehad, want de soortenrijkdom in veel gebieden is toegenomen (Van Duinen et al. 2004).



Bron: periode 1900-1980: Eerens & Van Dam (2001); periode 1981-2007: voorlopige gegevens van herberekeningen op basis van nieuwe inzichten



Gereduceerd stikstof (NHx) levert tegenwoordig met ruim 45 procent de hoogste bijdrage aan de verzurende depositie in Nederland.

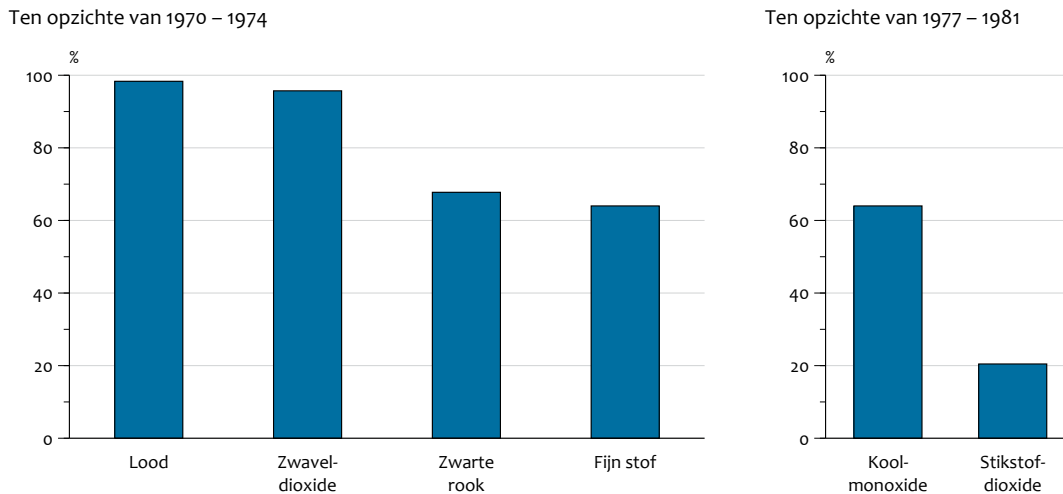
Minder depositie en betere luchtkwaliteit

Veranderingen in de depositie worden sinds het begin van de jaren tachtig berekend met het Operationele Prioritaire Stoffen model (OPS-model) (Van Jaarsveld 2004; De Ruiter et al. 2006). Daarnaast zijn er schattingen gemaakt van de verzurende depositie vóór 1981 (Eerens & Van Dam 2001; RIVM 1999). Door de afnemende emissies van ammoniak, stikstofoxiden en zwaveldioxide in Nederland en omliggende landen is sinds 1980 de depositie van verzurende en vermestende stoffen gedaald met 50 respectievelijk 30 procent (figuur 3.5). Duidelijk is te zien dat de depositie van zwavel in Nederland al vanaf 1965 is afgenomen, aanvankelijk vooral door de overschakeling van kolen naar gas, dat na de ontdekking van de gasbel bij Slochteren werd gebruikt voor de verwarming van huizen.

Berekeningen leren dat momenteel de helft van de verzurende depositie in Nederland afkomstig is van Nederlandse

bronnen. Gereduceerde stikstofverbindingen leveren ongeveer de helft van de zuurdepositie; het merendeel daarvan is afkomstig van Nederlandse bronnen. Geoxideerde zwavelverbindingen en geoxideerde stikstofverbindingen dragen elk bijna een kwart bij aan de verzurende depositie en zijn grotendeels afkomstig uit bronnen buiten Nederland (figuur 3.6).

De gemiddelde depositie van verzurende stoffen in Nederland is gedaald van 6.000 mol zuur ha⁻¹jaar⁻¹ rond 1980 tot 2.700 mol zuur ha⁻¹jaar⁻¹ in 2007. Vooral de bijdrage van zwavel is fors gedaald. In de periode 1981-2007 is de stikstofdepositie gedaald van 2.800 mol ha⁻¹jaar⁻¹ naar 1.900 mol ha⁻¹jaar⁻¹ in 2003. Na 2003 is de depositie van verzurende en vermestende stoffen nauwelijks verder afgenomen. De depositie zal in 2010 daarom waarschijnlijk nog aanzienlijk boven de voor dat jaar beoogde depositieniveaus van 2.300 mol zuur ha⁻¹jaar⁻¹ en 1.650 mol stikstof ha⁻¹jaar⁻¹ liggen (PBL 2009b). Dit ondanks het feit dat de emissies in Nederland in 2010 wel rond of

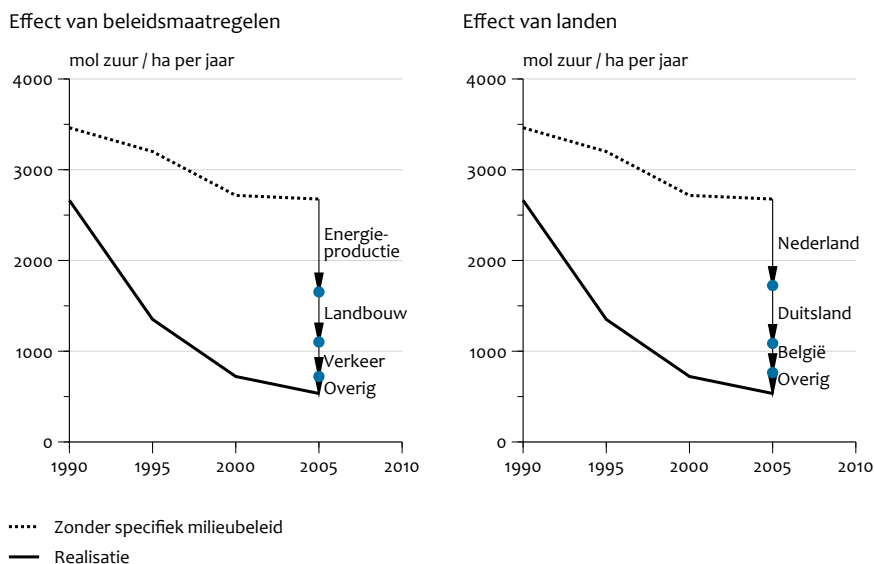


Bron: Buijsman (2009); bewerking PBL

De gegevens over stof zijn op verhoudingsgewijs weinig data gebaseerd en zijn daarom minder betrouwbaar.

Gemiddelde overschrijding zuur

Figuur 3.8



Bron: IIASA; Aben (2009)

onder de in Europees verband overeengekomen emissieplafonds zullen uitkomen (tabel 3.4).

De cijfers voor de periode 1981-2007 in figuur 3.5 zijn voorlopige gegevens van herberekeningen op basis van nieuwe inzichten. Voor een toelichting op het laatste zie de tekstbox *Nieuwe inzichten en nieuwe berekeningsmethodiek voor verzurende depositie*. De gegevens voor de jaren 1900-1980 zijn minder nauwkeurig, omdat vooral de emissiegegevens (veel) minder goed bekend zijn. Deze deposities zijn daarom gearceerd weergegeven. De categorie 'Overig zuur' omvat de bijdrage van organische en halogeenhoudende zuren.

De vermindering van de verzurende emissies heeft – behalve tot een afname van de verzurende depositie – ook geleid tot

een verbetering van de (lokale) luchtkwaliteit in Nederland. Zo zijn de regionale zwaveldioxideconcentraties een factor tien lager dan in 1985 (MNC 2009b). In steden zijn de luchtconcentraties van de verzuringsgerelateerde componenten zwaveldioxide (SO_2) en stikstofdioxide (NO_2) afgenomen (figuur 3.7). Ook stof, dat gedeeltelijk bestaat uit atmosferisch-chemische omzettingen van zwaveldioxide, stikstofoxiden en ammoniak, is in concentratie afgenomen.

Kritische niveaus nog steeds overschreden, zij het in mindere mate

De beleidsmaatregelen in Nederland en het buitenland hebben sinds 1990 geleid tot een reductie van 80 procent van de mate waarin kritische niveaus voor verzuring in Nederland worden overschreden (figuur 3.8; zie ook figuur 2.7). In figuur

3.8 is ook aangegeven hoe groot de overschrijding zou zijn geweest als er geen specifieke milieumaatregelen waren getroffen. Voor het laatste jaar in de afbeelding (2005) is aangegeven in hoeverre specifieke milieumaatregelen in verschillende sectoren hebben bijgedragen aan het verminderen van de depositie. De effecten van alle specifieke milieumaatregelen in heel Europa zijn hierin meegenomen. Ondanks de

afname van de verzurende depositie hebben grote delen van de Nederlandse natuur ook nu nog te maken met overschrijding van de kritische verzuringsniveaus. Vooral in gebieden waar gevoelige ecosystemen en intensieve veehouderij dicht bij elkaar liggen, zoals in de Peel en de Gelderse Vallei, worden de kritische niveaus nog fors overschreden (zie ook figuur 2.7).

Nieuwe inzichten en nieuwe berekeningsmethodiek voor verzurende depositie

In het verleden is geconstateerd dat de met het OPS-model (het Operationele Prioritaire Stoffen model) berekende concentraties ongeveer 25 procent lager waren dan de gemeten concentraties (RIVM 1998; Van Pul et al. 2004). Dit verschil werd destijds het ammoniakgat genoemd. Het was op dat moment niet duidelijk wat de oorzaak van het verschil was. Als mogelijke oorzaken werden genoemd een onderschatting van de emissies of een (per saldo) overschatting van de depositiesnelheid.

Het RIVM gebruikte tot 2002 twee methoden om de depositie te berekenen. De ene methode ging uit van gemeten of op metingen geschaalde berekende concentraties en een bekend veronderstelde depositiesnelheid (DEADM); bij de andere methode werd gebruikgemaakt van ongeschaalde OPS-berekeningen. In Albers et al. (2001) wordt geconstateerd dat tussen beide methodieken een aanzienlijk verschil in resultaten kan bestaan; in 1995 was dit een verschil van 600 mol per hectare per jaar.

In 2002 werd de DEADM-methode verlaten en werden OPS-berekeningen van depositie van gereduceerde stikstof (NH_x) geschaald op metingen om rekening te houden met het ammoniakgat (De Ruiter et al. 2006). Dit was feitelijk een worstcase-benadering, waarbij men veronderstelde dat het verschil geheel werd veroorzaakt door een onderschatting van de ammoniakemissie. In de rapportage over ammoniakemissies werd vervolgens vermeld dat bij het vaststellen van deze emissies geen rekening werd gehouden met het ammoniakgat; dit gat werd geschat op 3-23 kiloton (zie bijvoorbeeld PBL 2007).

Uit onderzoeken naar het ammoniakgat is gebleken dat de snelheid waarmee ammoniak uit de atmosfeer verdwijnt doordat het wordt opgenomen door de vegetatie en de bodem, aanzienlijk lager is dan in de berekeningen werd aangenomen (Wichink Kruit et al. 2007; Van Pul et al. 2008). Op basis van dit inzicht is recentelijk het OPS-model aangepast en kon worden vastgesteld dat er geen significant verschil meer is tussen de gemeten en de berekende concentraties van ammoniak.

Overigens zijn er nog steeds onzekerheden over de ammoniakemissies. Zo wordt in de berekeningen geen rekening gehouden met emissies bij het afsterven van bladeren en stengels op landbouwgrond na het rooien van gewas (geschat op 5 kiloton) en ook niet met emissies van ammoniak uit de zee. Ook zijn er aanwijzingen dat de ammoniakemissies uit melkveestallen worden onderschat, evenals de emissies bij het uitrijden van mest. Door de emissieregistratie is nader onderzoek hiernaar in gang gezet.

Begin 2010 is op basis van nieuwe wetenschappelijke inzichten een herziene methodiek ingevoerd voor het berekenen van de depositie van gereduceerd stikstof (NH_x). Daarnaast is een wijziging in het bijtellingssysteem doorgevoerd. De cijfers voor de jaren 1981-2007 in figuur 3.5 wijken daarom af van wat eerder door het Planbureau voor de Leefomgeving is gepubliceerd, zoals in De Ruiter et al. 2006. De zure depositie komt op jaarbasis volgens de nieuwe inzichten gemiddeld 300 mol per hectare lager uit. De depositie is, afhankelijk van het jaar, 2 tot 12 procent minder dan voorheen is berekend.

In zowel de oude als de herziene methodiek wordt een bijtelling gepleegd voor bronnen die niet in de berekeningen zijn verdisconteerd. Deze bijtellingen dienen om rekening te houden met bijdragen van natuurlijke bronnen en van bronnen buiten het modelgebied.

In de oude methodiek betrof dit een bijtelling voor organische en halogeenhoudende zuren en bijtellingen bij de depositie van geoxideerd stikstof en geoxideerd zwavel. Verder waren er correcties voor de droge en de natte depositie van gereduceerde stikstof om de uitkomsten van de modelberekeningen in overeenstemming te brengen met de meetresultaten. Het totaal van de bijtellingen en correcties volgens de oude methodiek komt daarmee in 1990, 2000 en 2005 op respectievelijk 1000, 800 en 750 mol per hectare.

De nieuwe methodiek behelst bijtellingen voor de depositie van gereduceerd stikstof, geoxideerd stikstof en geoxideerde zwavel en voor de depositie van organische en halogeenhoudende zuren. Deze bijtellingen zijn bedoeld om rekening te houden met bijdragen van natuurlijke bronnen en van bronnen buiten het modelgebied. Daarnaast zijn er nog correcties voor de natte en droge depositie van ammoniak om de uitkomsten van de modelberekeningen in overeenstemming te brengen met de meetresultaten. Het totaal van de bijtellingen en correcties volgens de nieuwe methodiek komt daarmee in 1990, 2000 en 2005 op respectievelijk 750, 700 en 675 mol.

De genoemde wijzigingen in de methodiek zijn pas kort van kracht. De hier gepresenteerde resultaten van de herberekeningen zijn dan ook voorlopig van aard. Later zullen definitieve resultaten beschikbaar komen. Het is daarom mogelijk dat de definitieve gegevens zullen afwijken van wat in dit rapport is gepresenteerd. Op basis van de huidige inzichten wordt geschat dat deze afwijkingen zeer waarschijnlijk minder dan 200 mol per hectare zullen bedragen.

Vergelijking en evaluatie

Nederlandse inspanningen vergeleken met die in andere landen Nederland behoorde internationaal, samen met de Scandinavische landen en Duitsland, tot de meest ambitieuze landen als het gaat om de aanpak van verzuring. De Nederlandse eisen aan productieprocessen of producten werden (en worden) vaak eerder van kracht; ook waren ze vaak scherper gesteld of hadden ze betrekking op meer productieprocessen of producten dan die in veel andere Europese landen. Zo reguleert de Europese IPPC-richtlijn alleen bronnen groter dan 50 MWth, terwijl met het Besluit Emissie-eisen Stookinstallaties B in Nederland ook kleinere bronnen (vanaf 0,9 MWth) zijn gereguleerd. Verder zijn op Europees niveau alleen eisen gesteld aan het zwavelgehalte in vloeibare brandstoffen, terwijl het *Besluit zwavelgehalte brandstoffen* in Nederland ook het zwavelgehalte reguleert van kolen. Het emissiearm toedienen van mest werd in Nederland ingevoerd tussen 1988 en 1994, terwijl dat in de omliggende landen pas na 2000 verplicht is gesteld (De Haan et al. 2008). Tot slot werden (en worden) naast emissie-eisen ook subsidies of fiscale stimulanzen gebruikt om emissies terug te dringen. Er zijn echter ook voorbeelden van het tegenovergestelde te geven. Zo is mede onder druk van Nederland in de Europese Richtlijn voor grote stookinstallaties (EU 2001b) een uitzonderingsbepaling voor raffinaderijen opgenomen om de Nederlandse raffinagesector te beschermen (VROM 2010).

Met het GAINS-model (zie ook de tekstbox *RAINS, GAINS en GAINS-NL*) is gekwantificeerd hoe de Nederlandse beleidsinspanning zich verhoudt tot die in de ons omringende landen. Als in Nederland dezelfde milieumaatregelen zouden zijn genomen zoals in Duitsland, zou de depositieafname minder groot zijn geweest (figuur 3.9). Dit komt vooral doordat het Nederlandse beleid meer dan het Duitse op ammoniak gericht is geweest. Voor zwaveldioxide en stikstofoxiden zijn er geen noemenswaardige verschillen in effectiviteit tussen het Nederlandse en Duitse beleid. Een vergelijking met België en Frankrijk leert dat de afname nog minder zou zijn geweest als Nederland dezelfde milieumaatregelen had genomen als deze twee landen. In België en Frankrijk is immers sprake van minder emissiereducties voor alle verzurende stoffen. De conclusie is dan ook dat de Nederlandse beleidsmaatregelen over de gehele linie meer resultaat hebben opgeleverd dan het geval zou zijn geweest wanneer Nederland hetzelfde beleid zou hebben gevoerd als de ons omringende landen.

Kosten en baten van het beleid

De totale jaarkosten van het luchtbeleid in Nederland bedroegen in 1990 860 miljoen euro. Sindsdien zijn de kosten verdubbeld tot 1.745 miljoen euro in 2007¹ (MNC 2009c). Dit zijn kosten van maatregelen om emissies van verzurende stoffen, vluchtige organische stoffen en fijn stof terug te dringen. Ze worden voornamelijk gemaakt door de doelgroepen Industrie & energie en Verkeer met een aandeel van 55 respectievelijk 35 procent (PBL 2009b). De kosten die worden gemaakt door het bedrijfsleven worden veelal doorberekend aan eindgebruikers, bijvoorbeeld via de prijs van elektriciteit of auto's.

Tot de baten van het luchtbeleid behoren vermindering van de stikstofdepositie op natuur, verlaging van de fijnstofconcentratie en vermindering van schade aan cultureel erfgoed door luchtvervuiling. Het luchtbeleid heeft daarnaast ook invloed gehad op de ozonconcentraties, met gunstige effecten voor gezondheid, natuur en landbouwgewassen.

De landelijk gemiddelde depositie van stikstof nam vanaf begin jaren tachtig geleidelijk af van ruim 2.800 mol stikstof per hectare per jaar naar 1.900 mol stikstof ha⁻¹ jaar⁻¹. Door verbeterde milieuocondities is het aantal soorten in duinen en bossen toegenomen. In veel natuurgebieden is de toevoer van stikstof echter nog altijd te hoog. Verdroging, vermisting en verzuring blijven daarom belangrijke knelpunten voor het duurzame behoud van planten en dieren (PBL 2009c).

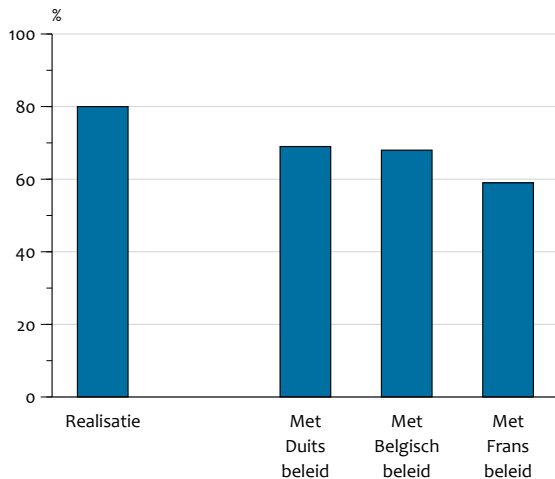
De fijnstofconcentratie is de laatste decennia ook substantieel omlaaggegaan. Metingen van fijn stof worden pas vanaf 1992 verricht. Er zijn echter wel metingen beschikbaar van totaal stof en zwarte rook vanaf het eind van jaren zestig (Buijsman 2009). Uit die metingen kan worden opgemaakt dat de fijnstofconcentraties waarschijnlijk sinds de jaren zeventig ongeveer zijn gehalveerd (zie ook figuur 3.7). De vermindering van de gemiddelde fijnstofconcentratie in Nederland tussen 1990 en 2007 is voor 70 tot 75 procent een gevolg van de vermindering van de emissies van verzurende stoffen (Matthijsen & Koelemeijer 2010). Blootstelling aan fijn stof leidt tot toename van ziekten en vroegtijdige sterfte. Er zijn schattingen gemaakt van de gemiddelde levensduurverkorting door blootstelling aan fijn stof. Hieruit blijkt dat in 2000 de gemiddelde Nederlander bijna een jaar eerder overleed door langdurige blootstelling aan fijn stof. Met het nu vastgestelde beleid zal dat afnemen tot zeven maanden in 2020 (Amann 2008).

Gemonetariseerde baten

Er zijn nog geen methoden toepasbaar om de baten van de afgenomen depositie van verzurende en vermestende stoffen voor de natuur in geld uit te drukken. Wel zijn gezondheidsbaten door afgenomen concentraties fijn stof en ozon in geld uitgedrukt, evenals de schade aan landbouwgewassen door ozon en de schade aan gebouwen. De gezondheidsbaten door vermindering van fijnstofconcentraties domineren in dergelijke batenschattingen. In de voorbereiding van het *Gotenburg Protocol* zijn kosten-batenschattingen gepubliceerd, die laten zien dat voor vrijwel alle landen de baten van het beleid dat nodig is om te voldoen aan de doelen uit het *Gotenburg Protocol*, de kosten met een factor twee of meer overtreffen (Amann et al. 1999; Holland et al. 1999). Voor Nederland is de kosten-batenverhouding van de effecten van het *Gotenburg Protocol* berekend op 2,5. Ook voor de huidige herziening van de NEC-richtlijn zijn kosten-batenberekeningen gemaakt. Deze berekeningen tonen aan dat de baten de kosten ruimschoots overtreffen (Dönszelmann et al. 2008; AEA Technology 2008).

Achteraf bezien hadden de kosten van het verzuringsbeleid lager kunnen uitvallen of hadden de baten hoger geweest kunnen zijn. Dit zou vooral het geval zijn geweest als eerder en zwaarder zou zijn ingezet op energiebesparing en duurzame energieproductie (wind en zon) en als het internatio-

¹ Alle gegevens conform het prijspeil van 2008.



Bron: Aben (2009)

De Nederlandse beleidsmaatregelen hebben meer opgeleverd dan het geval zou zijn geweest wanneer Nederland hetzelfde beleid zou hebben gevoerd als de omringende landen.

nale beleid om de emissies bij de zeescheepvaart te verminderen voortvarender zou zijn opgepakt.

Maatregelen terecht, maar verzuringsproblematiek nog niet opgelost

Dankzij het gevoerde beleid is de overschrijding van kritische niveaus voor verzuring sinds 1990 met 80 procent gedaald. Daarmee zijn de milieucondities voor de Nederlandse natuur aanzienlijk verbeterd. De omvang en ernst van de verzuringsproblematiek is daardoor afgenomen, maar de problemen zijn zeker nog niet opgelost. Zelfs als de doelstelling van 2.300 mol zuur ha⁻¹ jaar⁻¹, gemiddeld over ons land, is bereikt, wordt slechts 20 procent van het Nederlandse natuurareaal volledig beschermd tegen verzuring. De ontegenzeggelijke vermindering van de verzuringsproblematiek heeft er wel toe geleid dat verbetering van andere milieucondities om de natuur te beschermen nu urgenter wordt geacht. Het betreft hier vooral maatregelen om vermisting en verdroging tegen te gaan.

Niet alleen verzuring van bodem en water is door het gevoerde beleid tegengegaan, ook de problematiek van vermisting en de gezondheidsschade door luchtverontreiniging zijn daardoor verminderd. Met de kennis van nu kan daarom worden gesteld dat er geen maatregelen ten onrechte zijn genomen. Wel zouden de kosten van het verzuringsbeleid lager zijn uitgevallen en zouden de baten hoger zijn geweest als het beleid van meet af aan integraler zou zijn vormgegeven.

3.3 Belangrijkste bevindingen

- Bij de behandeling van het Indicatief Meerjarenprogramma Lucht 1981-1985 in 1983 werd de motie-De Boois ingediend. Hiermee werd het probleem van de verzuring in Nederland beleidsmatig op de kaart gezet.
- In 1984 verscheen de eerste Nederlandse beleidsnota die geheel gewijd was aan het verzuringsprobleem. In

opeenvolgende beleidsnota's is het beleid verfijnd en aangescherpt. Aansluitend zijn bestrijdingsmaatregelen in wetgeving en andere beleidsinstrumenten vastgelegd.

- De nationale doelstellingen voor emissies en deposities zijn sinds de jaren tachtig enkele malen versoepeld door nieuwe inzichten in emissies of depositie, of omdat ze niet haalbaar bleken. Tegenwoordig spelen deze nationale doelstellingen geen rol meer in het beleid.
- Het luchtbeleid van de Europese Unie was aanvankelijk gericht op verbetering van de luchtkwaliteit. In 1979 kwam de Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLTRAP) van de UNECE tot stand.
- Nederland heeft, met vooral Duitsland en de Scandinavische landen, door zijn nationale beleid en de inspanningen om zulk beleid ook ingang te doen vinden op Europese schaal, de internationale aanpak van de verzuring sterk bevorderd.
- Het luchtbeleid is in de afgelopen decennia steeds integraler geworden en ook steeds meer gericht op kosteneffectiviteit. Het *Eerste Zwavelprotocol* onder de LTRAP-conventie behelsde één thema (verzuring) en één stof (zwaveldioxide). Alle partijen namen dezelfde emissiereductiepercentages op zich. Later volgde een meer samenhangende aanpak van verschillende stoffen met aandacht voor bescherming van natuur en gezondheid. Er kwamen per land gedifferentieerde emissiedoelstellingen om op Europese schaal de beoogde milieuwinst te realiseren tegen de laagste kosten.
- De emissies van zwaveldioxide in West-Europa en Nederland zijn sinds 1980 gedaald met 75 respectievelijk 85 procent. De emissie van stikstofoxiden is vanaf eind jaren tachtig gedaald: in West-Europa met 30 procent en in Nederland met 40 procent. De emissie van ammoniak is in West-Europa sinds 1990 met 10 procent gedaald. De ammoniakemissie in Nederland is in die periode afgenomen met 50 procent.
- Belangrijke maatregelen die in Nederland hebben bijgedragen aan de afname van verzurende emissies waren:

energiebesparing, overschakeling van kolen en olie op gas, gebruik van brandstoffen met een lager zwavelgehalte, rookgasontzwavelingsinstallaties bij elektriciteitscentrales, driewegkatalysatoren bij auto's en emissiearme opslag en aanwending van mest.

- De verzurende depositie in Nederland is sinds 1980 met 50 procent afgenomen, de vermestende depositie met 30 procent. De overschrijding van kritische depositieniveaus voor verzuring en vermesting in Nederlandse natuurgebieden is door het ingezette beleid sterk gedaald.
- De kosten van het luchtbeleid in Nederland bedroegen in 2007 1,75 miljard euro. Wanneer de baten voor gezondheid en natuur in geld worden uitgedrukt, dan overtreffen die baten de kosten ruimschoots.
- De ernst van de verzuringsproblematiek is door het gevoerde beleid afgenomen, maar het verzuringsprobleem is nog niet opgelost.
- De kosten van het beleid zouden lager zijn geweest en de baten hoger, als het beleid bij de zeescheepvaart voortvander was geweest, en het klimaatbeleid eerder van de grond was gekomen.
- Het gevoerde beleid heeft de verzuring van bodem en water tegengegaan. Tegelijkertijd is de ernst van de vermesting en de gezondheidsschade door luchtverontreiniging verminderd. In terugblik kan dan ook worden gesteld dat de genomen maatregelen terecht zijn geweest.

Slotbeschouwing

4

Dit laatste hoofdstuk geeft een recapitulatie van de belangrijkste elementen uit de voorgaande hoofdstukken. Hierdoor kan de centrale vraag worden beantwoord: hoe kijken we met de wetenschappelijke kennis van nu aan tegen dertig jaar verzuringsproblematiek? Daarnaast zal worden geanalyseerd wanneer en hoe zure regen de maatschappelijke en politieke agenda heeft bepaald en welke gevolgen dit heeft gehad. Ook is er aandacht voor de status van zure regen binnen de context van de tegenwoordige milieuproblemen.

4.1 Inzicht in de problematiek

4.1.1 Van eenvoudig naar complex

Zwavel dioxide (SO_2) werd in de jaren zestig van de vorige eeuw als de veroorzaker van zure regen beschouwd. Later volgde de erkenning dat ook stikstofoxiden belangrijk waren voor de verzuring. De rol van ammoniak als potentieel verzurende stof zou uiteindelijk in de jaren tachtig worden geaccepteerd. Verder was verzuring een probleem dat zich aanvankelijk alleen via de neerslag leek te manifesteren. Onderzoek leerde echter dat het niet alleen om natte maar ook om droge depositie ging. En zo maakte zure regen plaats voor (het begrip) verzurende depositie.

De gezondheidstoestand van bomen en bossen werd in de jaren tachtig beoordeeld aan de hand van criteria die later ontoereikend bleken. Aanvankelijk was de veronderstelling dat er eenvoudige relaties bestonden tussen luchtverontreiniging, zure regen en dode bossen. Later kwam men echter tot het inzicht dat verzuring een van de factoren is binnen het complexe geheel dat de gezondheidstoestand van bomen en bossen bepaalt. Verder is uit onderzoek inmiddels duidelijk geworden dat door de afnemende bijdrage van zwavel tegenwoordig stikstof, eveneens een onderdeel van de verzurende depositie, een groter probleem is geworden.

De zorgen over de zure regen, de verzurende depositie en de effecten ervan hebben al in het begin van de jaren tachtig aanleiding gegeven tot nationaal beleid om emissies van verzurende stoffen te beperken. Wetenschappelijke kennis over grensoverschrijdende luchtverontreiniging maakte al snel duidelijk dat alleen nationaal beleid onvoldoende zou zijn om de effecten van verzuring afdoende te beperken. Mede door de inzet van Nederland zijn toen al afspraken gemaakt over emissiereducties van verzurende stoffen op Europese schaal. De verzurende depositie is daarop ook verminderd, waarbij vooral de depositie van geoxideerde zwavelverbin-

dingen sterk is afgenomen. Minder depositie zou daarbij op termijn moeten leiden tot minder verzuring. Onderzoek heeft bevestigd dat de concentratie van verzurende stoffen in de bodem van Nederlandse bossen inderdaad daalt. Daardoor is bijvoorbeeld de concentratie van giftige stoffen, die door verregaande verzuring in de bodem worden gemobiliseerd, eveneens afgenomen.

4.1.2 Beter inzicht in mechanismen

Het is echter niet zo dat de problemen tot het verleden behoren. De verzurende depositie heeft behalve tot een zuurder bodemvocht, uitspoeling van voedingsstoffen en mobilisatie van metalen, geleid tot een afname van de buffercapaciteit. Door de verminderde depositie van zure bestanddelen zijn de bodemcondities inmiddels iets verbeterd. Niettemin is het depositieniveau nog steeds te hoog en de verzuring tast dan ook nog steeds de buffercapaciteit aan. Het komt er dus op neer dat het tempo van de aantasting door de afgenomen depositie weliswaar sterk omlaag is gegaan, maar dat de aantasting nog doorgaat. Herstel van het buffervermogen vereist dan ook een nog verdergaande reductie van de verzurende depositie en daarmee van de emissies van verzurende stoffen.

Atmosferische depositie van zuur (en stikstof) heeft in het verleden in belangrijke mate bijgedragen aan verzwakking van de weerstand van ecosystemen tegen ziekten, koude, droogte, stormen en insecten. Atmosferische depositie van zuur en stikstof heeft ook meetbaar bijgedragen aan veranderingen in de bodemchemie, de (oppervlakte)waterkwaliteit en de biodiversiteit. Veel verzuringsgevoelige natuur heeft momenteel, mede door de achteruitgang, een nationale of internationale beschermde status gekregen.

De risico's van atmosferische depositie kunnen worden beoordeeld door kritische depositiewaarden te vergelijken met huidige of toekomstige depositiewaarden. Op basis van de huidige kennis moet worden geconcludeerd dat veel beschermde natuurgebieden, waaronder bossen, nog steeds blootstaan aan risico's. Kritische depositieniveaus worden ook nog altijd overschreden. Waarnemingen aan de bodem bevestigen dat verzuring, zij het vertraagd ten opzichte van de jaren tachtig, nog steeds plaatsvindt. Verandering in het voorkomen van gevoelige soorten laat ook zien dat condities voor biodiversiteit nog niet op orde zijn.

Er is geen simpele relatie tussen de overschrijding van kritische waarden en het optreden van effecten in ecosystemen.

Dit komt onder meer door een vertraagde doorwerking van te hoge depositie – in combinatie met andere (lokale) omstandigheden – op bodemchemie en biologische factoren. Gevolgen van de vermestende werking van depositie blijken in het veld makkelijker te relateren aan de stikstofdepositie dan de gevolgen van de strikt verzurende werking van de depositie, waarschijnlijk doordat de verzuring sneller werkt dan vermesting. Maar ook hier geldt dat andere factoren sterk (mede)bepalend zijn.

De bossen in Nederland zijn door de verzurende depositie niet doodgegaan, het boscysteem is echter wel aange-tast. Korstmossen en veel paddenstoelen zijn verdwenen, de ondergroei is sterk verruigd en zeldzame plantensoorten zijn verdwenen. De door het beleid ingezette depositiedaling heeft ertoe geleid dat snel reagerende bodemcondities zijn verbeterd en dat verslechtering van de bodemkwaliteit is uitgesteld. Modelstudies laten zien dat momenteel een groter deel van het bos duurzaam behouden kan blijven gezien de verbeterde bodemkwaliteit.

De vitaliteit van de bomen is sinds de jaren tachtig verbeterd. Toen werden nog vele honderden hectaren grove den en Corsicaanse den gekapt, bijvoorbeeld vanwege het voorkomen van schimmelziekten. Deze ziekten vonden mede hun oorzaak in de te hoge stikstofbelasting. Onderzoek heeft uit-gewezen dat schimmelziekten sinds 2000 sterk in intensiteit en frequentie zijn afgenomen. Ook de gele verkleuring van dennenaalden in de winter, een indicator voor een slechte vitaliteit, komt momenteel veel minder voor dan vroeger. De vermindering van de verzurende depositie heeft er dus toe geleid dat grootschalige plagen momenteel minder vaak optreden. Het blijft echter moeilijk om in het veld de gevolgen van verzurende depositie voor de vitaliteit te onderscheiden van andere gelijktijdig optredende invloeden op de vitaliteit.

Veel van de nationaal en internationaal beschermde natuur is gevoelig voor depositie van zuur en stikstof; dit geldt ook voor bossen. Wanneer de depositieniveaus van stikstof en zuur op het hoge niveau van rond 1980 waren gebleven, dan was de schade groter en het herstel onzekerder geweest. Uitgaande van de huidige behouds- en hersteldoelstellingen voor verzuringsgevoelige natuur, alsmede op basis van de wetenschappelijke kennis over effecten van verzuring kan worden gesteld dat de vermindering van de zuur- en stikstof-depositie vanaf 1980 heeft bijgedragen aan de kwaliteitsver-betering van ecosystemen.

4.2 Maatschappelijke en politieke aandacht

4.2.1 Nederlands beleid in Europees verband

De Nederlandse overheid kwam in de jaren tachtig met verstrekkende doelstellingen voor de verzurende depositie: 4.000 mol per hectare per jaar te realiseren in 1994, 2.400 in 2000 en 1.400 op de lange termijn, lees 2010 (VROM 1989a). Hiervoor zouden, naast emissiereducties in Europees verband, in ieder geval de Nederlandse emissies van verzu-rende stoffen met 80 tot 90 procent moeten afnemen.

Gaandeweg bleken de depositiedoelstellingen op de oor-spronkelijk bedachte termijn niet te realiseren en kwamen er

diverse malen bijgestelde doelstellingen. De meest recente zijn: a) een doelstelling voor de zure depositie van 2.300 mol per hectare per jaar (waarbij 20 procent van het Nederlandse natuurareaal volledig is beschermd tegen te veel zuur) en b) een doelstelling voor de stikstofdepositie van 1.650 mol stikstof per hectare per jaar (waarbij 30 procent van het Nederlandse natuurareaal volledig beschermd tegen te veel stikstof). Beide doelstellingen zouden in 2010 gerealiseerd moeten zijn (VROM 2002). Feitelijk heeft Nederland de laatste depositiedoelstellingen echter losgelaten. Omdat een louter nationale aanpak ontoereikend is gezien het grensoverschrij-dende karakter van luchtverontreiniging en onmogelijk gezien de internationale concurrentieverhoudingen, streeft Neder-land naar een aanpak in Europees verband. Realisatie van emissiedoelstellingen in de vorm van emissieplafonds, zoals afgesproken in het Gotenburg Protocol en de NEC-richtlijn, is nu leidend voor het nationale beleid. Daarbij heeft het beleid zich verbreed. Er is nu niet alleen aandacht voor verzuring – ook overmatige stikstofdepositie en te hoge ozon- en fijnstof-concentraties zijn tegenwoordig onderdeel van het beleid dat gevat wordt onder het beleidsthema ‘verzuring en grootscha-lige luchtverontreiniging’.

De omvang van de verzurende depositie is sinds 1980 gehal-veerd. De daling is vooral het gevolg van de sterke reductie van de zwaveldioxide-emissies in binnen- en buitenland. De zwaveldioxide-emissie in Nederland is sinds 1980 gedaald met ruim 80 procent. De emissie van stikstofoxiden is sinds 1980 eveneens gedaald, zij het minder spectaculair, namelijk met ruim 30 procent. De emissie van ammoniak is in dezelfde periode met 40 procent gedaald. De aanvankelijke Neder-landse emissiedoelstellingen voor ammoniak en stikstofoxi-den volgens het *Bestrijdingsplan Verzuring* (VROM 1989a) zijn echter niet gerealiseerd (tabel 4.1). Volgens de laatste inzichten lijkt Nederland wel aan de huidige Europese emissie-doelstellingen voor 2010 te kunnen voldoen (PBL 2009b). De emissie van zwaveldioxide komt volgens de laatste schattin-gen uit op 40 kiloton, die van stikstofoxiden op 244 kiloton en die van ammoniak 129 kiloton.

4.2.2 Aandachtscyclus zure regen

De Zweedse onderzoeker Odén alarmeerde in de jaren zestig de wetenschappelijke gemeenschap (en het publiek) over de gevolgen van grootschalige grensoverschrijdende luchtver-ontreiniging en de daarmee samenhangende verzuring van de neerslag (Odén 1967, 1968). Halverwege de jaren zestig toonde onderzoek aan dat verzuring van meren in Zweden en Noorwegen de oorzaak was van vissterfte in die meren. Onderzoekers hielden de zure regen daarvoor verantwoor-delijk. Bovendien kon de zure regen in Scandinavië worden herleid tot emissies van verzurende stoffen in Noordwest-Eu-ropa (Odén 1968; Odén 1976; Brække 1976; Overrein 1976). De hier beschreven ontwikkelingen speelden zich vrijwel geheel af in wetenschappelijke kringen. Daarbuiten was er nauwelijks aandacht voor de zure regen. In de theorie van Downs over aandacht voor milieuproblemen is hier sprake van de ‘pre-problem stage’ (Downs 1972; zie ook Breeman & Timmermans 2008). Nisbet en Huge onderzochten eveneens hoe politieke aandacht voor milieuproblemen zich ontwikkelt. Zij spreken van een ‘technische fase’ (Nisbet & Huge 2006). De aandacht in Nederland was in deze periode nog volledig gericht op

Component	Emissiedoelstelling volgens Bestrijdingsplan Verzuring ³			Realisatie ⁴			NEC-plafond	Gotenburg Protocol
	1980	1994	2000	1995	2000	2007	2010	2010
	kiloton							
Ammoniak (NH ₃)	251	175	90	193	153	135	128	128
Stikstofoxiden (NO _x)	548	440	270	464	390	299	260	266
Zwavel dioxide (SO ₂)	465	280	105	127	73	60	50	50

¹ Gerealiseerde doelstellingen volgens het Bestrijdingsplan Verzuring zijn blauw aangegeven.

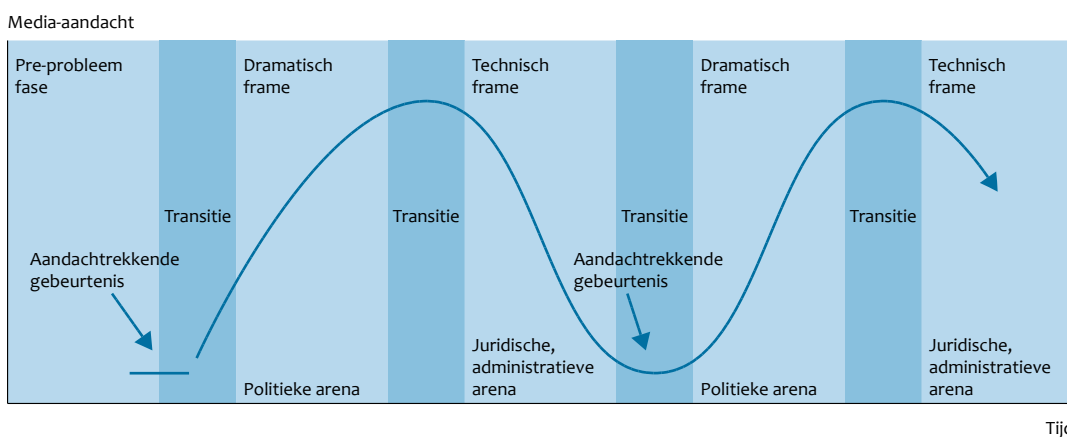
² In deze zelfde context zijn ook emissiedoelstellingen voor Vluchtige Organische Stoffen gedefinieerd.

³ VROM (1989a).

⁴ PBL (2009b).

Aandachtscyclus voor milieuproblemen

Figuur 4.1



Bron: Nisbet & Huge (2006); zie ook Breeman & Timmermans (2008); bewerking PBL

luchtkwaliteitsproblemen, vooral in de steden (Hajer 1995; Buijsman 2009)

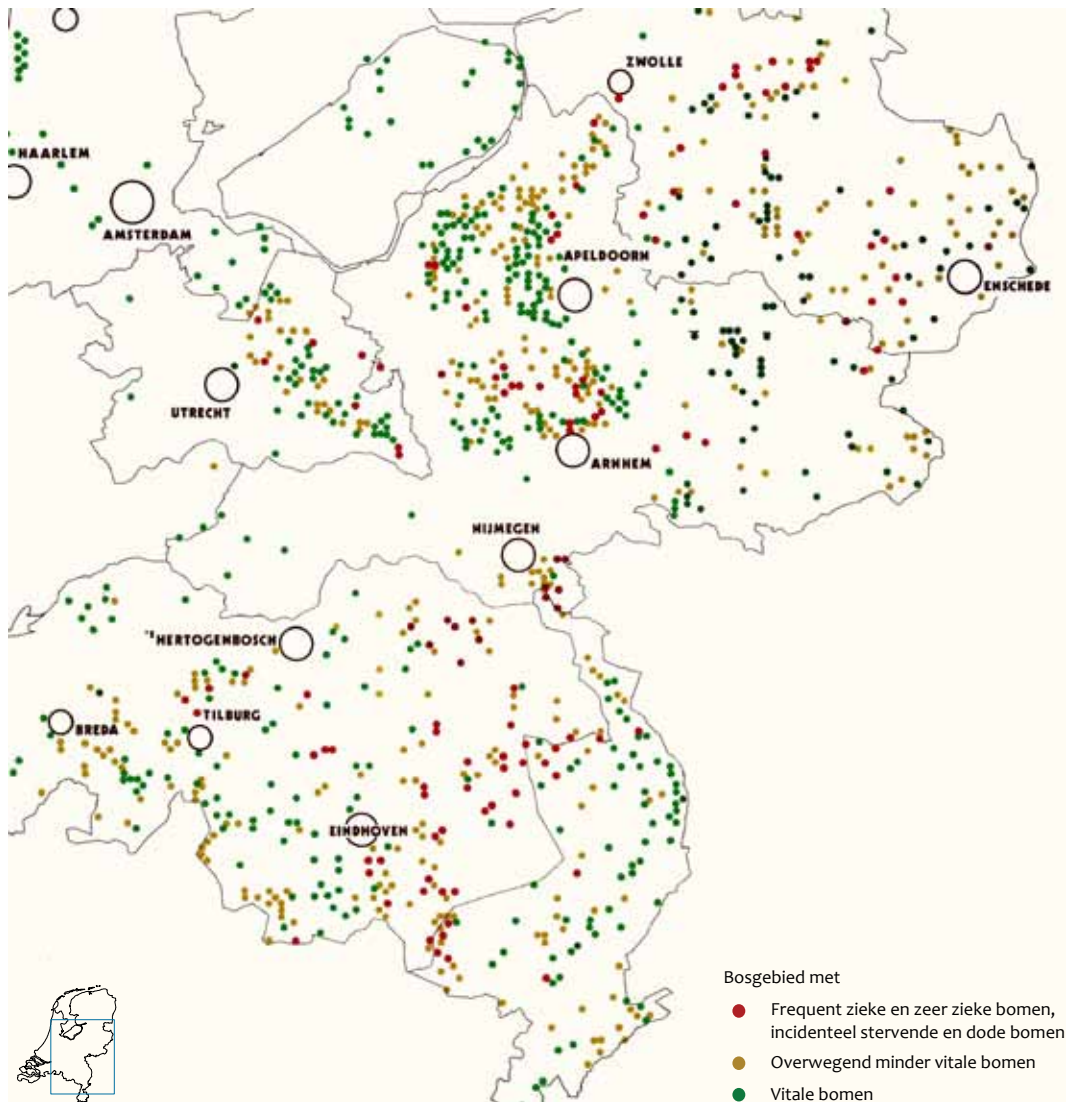
De situatie veranderde toen de berichten over onder andere de aantasting van de Scandinavische meren ook buiten de wetenschappelijke en beleidsarena verschenen. Ook de berichten uit Duitsland over grootschalige bossterfte, het Waldsterben, droegen hieraan bij. Deze uitingen werkten als ‘alarmsignalen’ (Breeman & Timmermans 2008). Hierdoor verschoof de aandacht en kwam het probleem in de maatschappelijke en politieke arena terecht (figuur 4.1). Downs spreekt hier van ‘alarmed discovery and euphoric enthusiasm’. In Nederland kwam een stroom van publicaties op gang waarin het probleem van de zure regen meest in urgente termen werd beschreven (Buijsman 2009). Deze fase heeft als kenmerk dat de nadruk ligt op politieke, emotionele en morele aspecten van het probleem. Later is wel gesteld dat milieuorganisaties in deze fase met opzet overdrijving hebben toegepast om publieke aandacht voor de problematiek van de zure regen te krijgen (Hajer 1995; NRC 2009).

De rol van ammoniak bij zure regen en bosschade was in wetenschappelijke kring al in de eerste helft van de jaren tachtig duidelijk. In het publieke en politieke domein was dit besef echter nog niet doorgedrongen. Dit veranderde in korte tijd, nadat een kaart met een overzicht van de bosvitaliteit was gepubliceerd (figuur 4.2). Hierop was duidelijk te zien dat gebieden met niet of weinig vitale bossen samenvielen

met de gebieden met intensieve veehouderij en dus hoge ammoniakemissies.

De maatschappelijke aandacht voor de zure regen leidde ook tot een versterkte politieke aandacht. De Nederlandse overheid kwam met maatregelen en voorlichtingscampagnes. De centrale boodschap van die laatste was: het probleem is weliswaar ernstig, maar zou met ingrijpende maatregelen kunnen worden opgelost. Tegelijkertijd stimuleerde de overheid in hoge mate onderzoek naar zure regen, omdat veel aspecten, vooral aan de effectenkant, nog niet voldoende duidelijk waren. Hierdoor kwam het zureregenprobleem geleidelijk in een fase waarin juridische en administratieve aspecten steeds meer de bovenaan voerden. Onderzoek was uitgezet, de eerste aanzetten tot beleid waren geformuleerd en het probleem leek – op termijn – oplosbaar. Het probleem verdween daarop dan ook geleidelijk uit de publieke aandacht. Vervolgens bleek dat de oplossing van het probleem, die vooral gezocht werd in de hiervoor genoemde forse emissiereducties, veel lastiger was te realiseren dan aanvankelijk werd verondersteld. Dit leidde tot een bijstelling van de doelen, maar zure regen bereikte niet meer het publieke domein. Recentelijk volgde een tweede opleving, die echter vooral ging over de effecten van de overmatige stikstofdepositie op natuurgebieden.

De aandachtscyclus van Downs geeft inzicht in de beleving van milieuproblemen. De cyclus verklaart ook waarom sommigen achteraf van een ‘hype’ spraken (zie bijvoorbeeld



Bron: Staatsbosbeheer (1983)

De kaart laat duidelijk zien dat de problemen met de vitaliteit van bossen het grootst waren in gebieden met intensieve veehouderij, zoals De Peel, de Gelderse Vallei en Twente. De eerste kaart in deze vorm verscheen in 1983 en veroorzaakte veel maatschappelijke en politieke ophef. Hiermee was de rol van ammoniak in de zure regenproblematiek duidelijk op 'de kaart gezet'

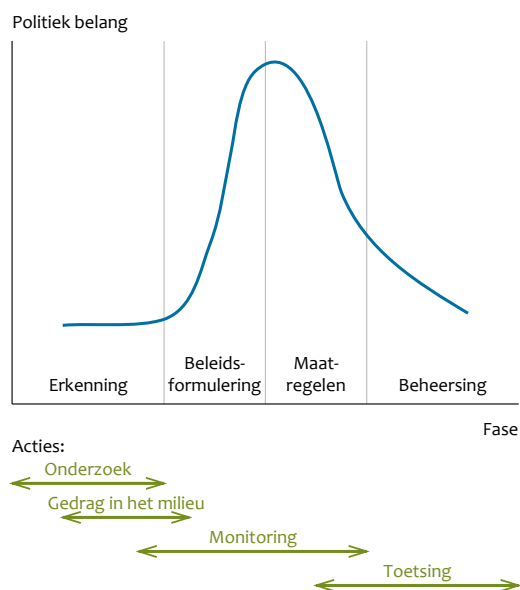
Rozendaal 2007; Keil 2004). De berichtgeving rond zure regen heeft immers lange tijd een dramatisch karakter gehad, maar de publieke beleving werd lang niet altijd volledig door wetenschappelijke kennis gedragen.

Nu de zure regen al geruime tijd in een soort 'post-probleem'fase verkeert, kan in terugblik het beeld ontstaan van een overtrokken reactie op een probleem. Media-aandacht en publieke interesse voor een probleem blijken echter niet altijd parallel te lopen met de ontwikkeling in wetenschappelijke kennis. En zo betekent de afwezigheid van de aandacht in de media geenszins dat het probleem wetenschappelijk tot het verleden behoort, er nooit is geweest of is opgelost.

Overigens is de cyclus van Downs een andere dan die van Winsemius. Winsemius kwam, in zijn periode als minister van

Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu, met de zogeheten beleidscyclus. Deze geeft de achtereenvolgende stadia die problemen in de politiek doorlopen (figuur 4.3). De erkenning van zure regen als probleem lag in het begin van de jaren tachtig. Daarop volgende medio jaren tachtig de formulering van het beleid en vervolgens de definitie van maatregelen in opeenvolgende milieubeleidsplannen. In dit denkmodel verkeert de zure regen tegenwoordig in de fase van 'beheer'.

Kenmerken van deze laatste fase zijn dat er beleid is geformuleerd en dat maatregelen zijn genomen. De maatregelen zullen op termijn, zo is de veronderstelling, leiden tot de oplossing van het probleem, waarbij de voortgang van de verbetering in het oog wordt gehouden ('gemonitord', zie bijvoorbeeld MNC 2009a). Een nuancering is hier echter wel op zijn plaats. Verlaging van het stikstofaandeel in de



Bron: PBL

zure depositie blijkt lastig te realiseren. Indien zou worden gestreefd naar een vermindering van de stikstofdepositie tot het kritische niveau voor de meest gevoelige ecosystemen (zie ook de bijlage), dan zou er geen enkele antropogene emissie meer mogen plaatsvinden.

4.2.3 Verzuring te midden van andere problemen

Milieuproblemen die tegenwoordig veel (media)aandacht krijgen, zijn klimaatverandering, verlies van biodiversiteit en (lokale) gezondheidsrisico's door luchtverontreiniging. De toekomst van het verzuringsbeleid is hiermee nauw verbonden. Over het algemeen leidt klimaatbeleid tot minder gebruik van fossiele brandstoffen en dat betekent ook een lagere uitstoot van zwaveldioxide en stikstofoxiden. Het verdwijnen van plantensoorten, vlinders en vogels hangt samen met de stikstofdepositie en vraagt om verdere vermindering van de uitstoot van stikstofoxiden (NO_x) en ammoniak (NH_3). Ook de Europese kaderrichtlijn voor water en zeker de Nitraatrichtlijn kunnen leiden tot minder mestproductie en daardoor tot minder ammoniakuitstoot.

Het lokale luchtkwaliteitsbeleid richt zich momenteel sterk op vermindering van de blootstelling van de bevolking aan stikstofdioxide (veroorzaakt door de uitstoot van stikstofoxiden) en aan fijn stof. Het gaat hier niet alleen om de noodzaak van nationale emissieverminderingen. Europese emissieafspraken blijken een kosteneffectief middel te zijn om de kans op overschrijding van de luchtkwaliteitsgrenswaarden te verkleinen (Visser et al. 2008).

En dan is er nog de problematiek van ozon in de lagere luchtlagen: de zomersmog, die bij hogere temperaturen steeds weer de kop op steekt. Dit ozon wordt onder invloed van zonlicht in de atmosfeer gevormd uit stikstofoxiden, koolwaterstoffen, methaan en koolmonoxide. De aanpak van de ozonproblematiek vergt bij uitstek een internationale zo niet mondiale aanpak.

Verzuringbeleid en de aanpak van andere milieuvraagstukken zullen echter niet altijd hand in hand kunnen gaan. Er zijn ook tegenstellingen denkbaar die beleidskeuzen vergen. Zo kan minder luchtverontreiniging (op korte termijn) extra opwarming van de aarde betekenen. En de inzet van bio-brandstoffen kan leiden tot extra uitstoot van stikstofoxiden en fijn stof. Dat is ook het geval bij de eerste systemen voor de opvang en opslag van kooldioxide bij elektriciteitscentrales (Hammingh et al. 2008). In zulke gevallen zal verdere technologieontwikkeling nodig zijn om te komen tot een oplossing die voor zowel het klimaatbeleid als het luchtbeleid gunstig is. Ook tussen het nitraatbeleid en het ammoniakbeleid bestaat een dergelijke spanning. De ammoniakemissie kan namelijk worden beperkt door de mest onder te werken. Dat leidt echter wel tot extra nitraat in het grondwater. Ook hier wordt momenteel gezocht naar een samenhangende aanpak (Galloway et al. 2008; Erisman 2010).

Het Europese milieubeleid krijgt steeds meer oog voor dergelijke samenhangen tussen milieuvraagstukken. Daardoor raken verzuringsbeleid, klimaatbeleid, biodiversiteitsbeleid, nitraatbeleid en lokaal luchtbeleid steeds meer met elkaar verbonden en gaat het steeds meer om de aanpak van de gemeenschappelijke oorzaken: het energiegebruik, de landbouw en het verkeer en vervoer. Elementen van streefbeelden voor de lange termijn zijn: een koolstofarme economie, rookvrije of astmavrije steden, en een productie van voeding en biomassa die geen verdere aanslag op de nog resterende biodiversiteit betekent.

4.3 Hoe nu verder?

Een van de langetermijndoelstellingen van de Europese Unie en de landen van de UN ECE is 'het bereiken van luchtkwaliteitsniveaus die geen significante negatieve effecten en risico's voor de menselijke gezondheid en het milieu tot

gevolg hebben' (zie bijvoorbeeld het *Gotenburg Protocol* en het zesde *Milieuactieprogramma van de Europese Gemeenschap* (EU 2002)). De *Thematische strategie inzake luchtverontreiniging* (EU 2005) stelt dat, wil men deze milieudoelstelling bereiken, kritische belastings- en depositieniveaus niet mogen worden overschreden. Deze strategie onderkent dat, zelfs wanneer alle technisch haalbare maatregelen ongeacht de kosten zouden worden uitgevoerd, de doelstellingen van het zesde Milieuactieprogramma niet haalbaar zijn.

De Thematische Strategie van de Europese Commissie kent daarom tussentijdse doelstellingen om de luchtverontreiniging in de EU te verminderen. Een van die doelstellingen is om het bosareaal en het zoetwaterareaal waarin het kritische verzuringsniveau wordt overschreden met respectievelijk 74 en 39 procent te verminderen in 2020 in vergelijking met 2000. Een andere doelstelling is om de overschrijding van het kritische niveau voor vermisting van ecosystemen te reduceren met 43 procent. Ook streeft de EU ernaar om de schadelijke effecten van fijn stof en ozon voor de gezondheid en de bossen te verminderen.

Momenteel wordt het *Gotenburg Protocol* herzien. Er komen aangescherpte plafonds voor 2020. Fijn stof wordt toegevoegd en emissie-eisen voor installaties worden aangepast naar de huidige stand van de techniek. De emissieplafonds vormen een nieuwe tussenstap op weg naar duurzame beschermingsniveaus voor mens en natuur. Bij de komende herziening zal ook de samenhang met klimaatverandering worden betrokken. Naar verwachting zal de Europese Unie daarna het herziene *Gotenburg Protocol* wettelijk implementeren in een herziening van de NEC-richtlijn.

Tevens wordt steeds nadrukkelijker gekeken naar de neveneffecten van het luchtbeleid op het klimaat. Vermindering van emissies van roethoudend aerosol en van gassen waaruit troposferisch ozon wordt gevormd, leidt ook tot vermindering van de opwarming van de aarde. Vermindering van de uitstoot van luchtverontreinigende stoffen zoals zwaveldioxide, stikstofoxiden en ammoniak leidt ook tot minder aerosolvorming. Dit aerosol heeft echter juist een koelende werking op het klimaat. Verschillende studies hebben laten zien dat de opwarming door toegenomen broeikasgasconcentraties deels wordt gemaskeerd door de aanwezigheid van het (secundair) aerosol dat het gevolg is van emissies van vooral zwaveldioxide, stikstofoxiden en ammoniak. Schattingen van de mate waarin dit het geval is, lopen uiteen van 15-90 procent, met een beste schatting van 40 procent.

Luchtverontreinigingsbeleid dat leidt tot vermindering van de hoeveelheid sulfaataerosol – en sommige andere aerosolen – leidt enerzijds tot vermindering van de bodemverzuring, maar anderzijds tot een versnelling van de opwarming van de aarde. Overigens zal ook zonder extra luchtbeleid vermindering van het gebruik van fossiele brandstoffen (dan wel opvang en opslag van koolstofdioxide) al leiden tot een daling van de emissies van zwaveldioxide. Dit betekent dat de opwarming op de korte termijn groter is dan de koeling die wordt bereikt met de bijbehorende emissiereductie van koolstofdioxide. Pas na enkele decennia zal het koelende effect van deze reductie overheersen. De opwarming die op korte termijn optreedt, kan tot op zekere hoogte worden vermin-

derd door snellere emissiereducties van methaan, ozon en roethoudend aerosol. Dit alles geeft de noodzaak aan om de samenhang tussen klimaat- en luchtbeleid te vergroten.

4.4 Tot slot

De risico's van grootschalige bossterfte hebben in het begin van de jaren tachtig in de publieke beeldvorming veel aandacht gekregen. Dit heeft geleid tot de nodige politieke actie. Dankzij het gevoerde beleid is de kans dat binnen enkele decennia grootschalige bossterfte zal optreden vrijwel nihil geworden, maar het proces van bodemverzuring gaat nog steeds – zij het sterk vertraagd – door. Uiteindelijk zijn de bossen niet doodgegaan, maar zijn de bosbodem en het bosecosysteem wel aangetast. Zonder maatregelen zouden de effecten van bodemverzuring echter groter zijn geweest.

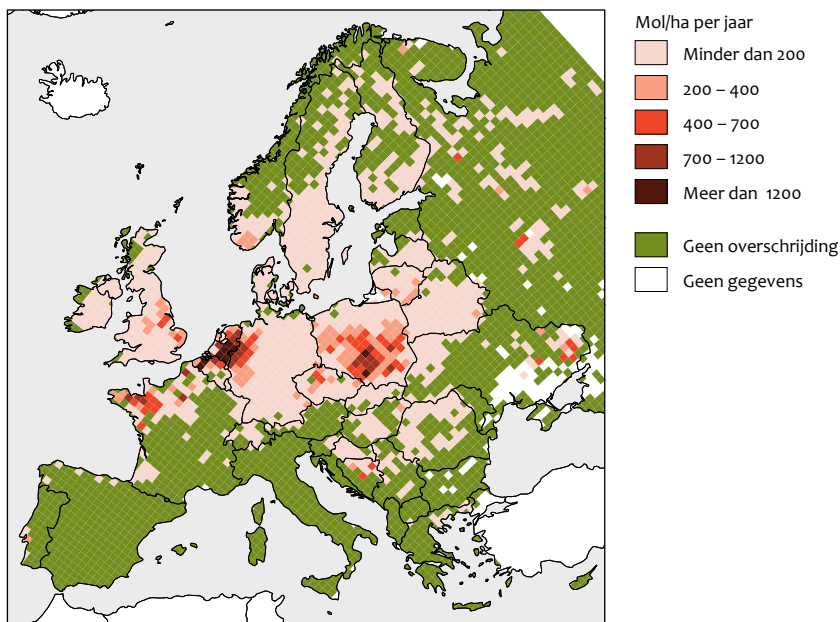
Er zijn geen overbodige beleidsmaatregelen genomen. Toepassing van het voorzorgsbeginsel, in een tijd waarin voldoende kennis ontbrak, blijkt achteraf terecht te zijn geweest. Wel zou het verzuringsbeleid een stuk goedkoper zijn uitgevallen als al van het begin af aan de samenhang met het klimaatbeleid was onderkend. Het zou ook zeker hebben geholpen als zwaarder was ingezet op energiebesparing en de inzet van vernieuwbare energiebronnen. De eutrofiërende invloed van stikstof is lange tijd onderbelicht gebleven, waardoor het beleidsaccent in Europa sterk lag op zwaveldioxide. In Nederland is vanaf 1984 stikstof (onder meer in de vorm van ammoniak) als verzurende stof wel in beschouwing genomen. Vooral de reductie van de emissie van ammoniak is echter achtergebleven bij de emissiereducties van de andere verzurende stoffen.

De toepassing van alle beschikbare technieken om emissies van zwaveldioxide, stikstofoxiden en ammoniak te verminderen, laat onverlet dat er in 2020 nog steeds natuurgebieden in Europa zullen zijn waar de depositie hoger is dan de duurzame beschermingsniveaus voor zuur (figuur 4.4). In gebieden waar het zuurbufferende vermogen is uitgeput, zal daardoor herstel op zich laten wachten. In gebieden met een geringe buffercapaciteit zal nog steeds het risico bestaan dat zichtbare effecten optreden. Daar blijven aanvullende natuurbeheersmaatregelen dan ook nodig. Het beleid om de zure depositie tegen te gaan is zeker succesvol geweest. Er is echter duidelijk minder resultaat geboekt bij de aanpak van overmatige stikstofdepositie en te hoge ozon- en fijnstofconcentraties. Hier is zeker nog een lange weg te gaan.

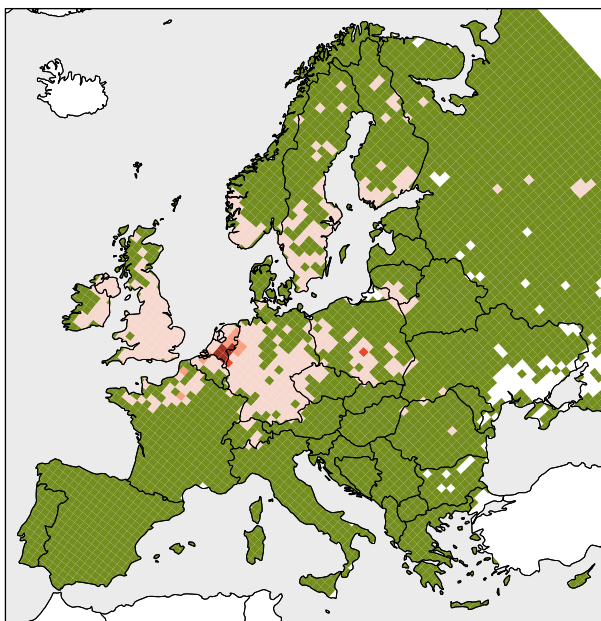
Een samenhangend lucht- en klimaatbeleid kan eraan bijdragen dat hogere beschermingsniveaus van natuurgebieden worden bereikt en dat hogere gezondheidsbaten worden gerealiseerd dan bij verzuringsbeleid alleen het geval zou zijn. Wel moet daarbij rekening worden gehouden met de eerdergenoemde interacties tussen broeikasgassen en luchtverontreinigende stoffen bij de opwarming van de aarde.

Voor de komende jaren bestaat allereerst de uitdaging om de kennis over en het beleid voor lucht en klimaat dichter bij elkaar te brengen. Lucht- en klimaatprocessen lijken soms te worden bestudeerd alsof ze in verschillende compartimenten van de atmosfeer plaatsvinden. Ook bij de definitie

Situatie bij huidig beleid



Situatie bij maximale toepassing beperkende maatregelen



Bron: Hettelingh et al. (2008)

van maatregelen wordt soms gedaan alsof het om totaal verschillende bronnen gaat, terwijl toch broeikasgassen én luchtverontreinigende stoffen vrijkomen uit schoorstenen, auto-uitlaten en landbouwgronden. Een tweede uitdaging is om de samenhang in beleidsprocessen te vergroten: dat zijn de onderhandelingen in het kader van de Klimaatconventie van de Verenigde Naties en die rondom de nieuwe nationale emissieplafonds binnen de EU en in het kader van de VN-conventie voor grensoverschrijdende luchtverontreiniging. Hoe kan worden voorkomen dat problemen tussen beide processen worden afgewenteld en hoe kan een oplossing worden

bereikt die voor beide problemen gunstig uitwerkt? Berekeningen met het GAINS-model geven aan dat een gezamenlijke benadering tot een optimaal resultaat kan leiden (Maas et al. 2009).

Duidelijk mag zijn dat zowel het wetenschappelijke debat als de politieke besluitvorming de afgelopen dertig jaar gaandeweg zijn verschoven van het nationale niveau naar de Europese arena en dat een verdere globalisering ook bij dit dossier onontkoombaar lijkt.

Bijlage 1 Kritische depositieniveaus voor stikstof en zuur

De waarden in de tabellen B1 en B2 zijn genoemd in het APV-III.

Kritisch depositieniveau voor (potentieel) zuur

Tabel B1

Ecosysteem (effect/indicatie)	kritisch depositieniveau
	mol/ha
<i>naaldbos (aluminiumuitputting)</i>	1.650
<i>naaldbos (schade aan wortels, remming van opname)</i>	1.900
<i>loofbos (aluminiumuitputting)</i>	1.800
<i>loofbos (schade aan wortels, remming van opname)</i>	2.450
<i>droge heidevegetatie</i>	1.100-1.400
<i>natte heidevegetatie</i>	1.100-1.400
<i>heideschraallanden</i>	1.000-1.500
<i>kalkgraslanden</i>	>5.000
<i>duinvegetaties</i>	1.000-1.500
<i>zwak gebufferde wateren</i>	400
<i>bronnen en stromend water</i>	500-1.000

Bron: Hey & Schneider (1995)

Kritisch depositieniveau voor stikstof

Tabel B2

Ecosysteem (effect/indicatie)	kritisch depositieniveau
	mol/ha
<i>naaldbomen (remming van opname/nutriëntenonbalans)</i>	1.500-2.000
<i>naaldbomen (toename stressgevoeligheid)</i>	1.500-3.000
<i>zeer arme naaldbossen (vegetatieveranderingen)</i>	500-700
<i>overige naaldbossen (vegetatieveranderingen)</i>	700-1.400
<i>naaldbos (nitraatuitspoeling naar grondwater)</i>	2.150
<i>loofbomen (remming van opname/nutriëntenonbalans)</i>	-
<i>loofbomen (toename stressgevoeligheid)</i>	-
<i>loofbos (vegetatieveranderingen)</i>	700-1.400
<i>loofbos (nitraatuitspoeling naar grondwater)</i>	3.000
<i>heide (overgang dwergstruiken naar gras)</i>	1.100-1.600
<i>kalkgrasland (toename hoog gras, afname diversiteit)</i>	1.100-1.800
<i>kalkrijk duin (toename hoog gras, afname diversiteit)</i>	1.100-1.400
<i>kalkarm duin (toename hoog gras, afname diversiteit)</i>	700-1.100
<i>hoogveen (vegetatieverandering)</i>	350-700
<i>vennen (vegetatieverandering)</i>	350-700
<i>trilvenen (vegetatieverandering)</i>	1.400-2.500
<i>kalkrijke duinplassen (vegetatieverandering)</i>	700-1.400
<i>droog schraalland, zilverhaver (vegetatieverandering)</i>	1.400-2.200
<i>droog schraalland, buntgras (vegetatieverandering)</i>	1.100-1.400
<i>heischraalland (vegetatieverandering)</i>	700-1.100

Bron: Heij & Schneider (1995)

Verklarende woordenlijst

EMEP

European Monitoring and Evaluation Programme.

End-of-pipetechnieken

Technieken die bij een productieproces aan het eind van de productieketen gebruikt worden om gevormde verontreinigingen weg te nemen of te reduceren.

IIASA

International Institute for Applied Systems Analysis.

LRTAP

Long-Range Transboundary Air Pollution.

Mol

Eenheid voor hoeveelheid stof. De omrekening van hoeveelheid stof in mol naar gewichtshoeveelheden (mol naar kilogram) is als volgt: ammoniak (NH₃): 17; stikstof (N): 14; zwavel (S): 32; zwaveldioxide (SO₂): 64.

pH

Chemische aanduiding voor de zuurgraad. Formeel: de negatieve logaritme van de waterstofionenconcentratie; in formule: $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$. Deze definitie betekent dat de pH daalt als de zuurgraad (= waterstofionenconcentratie) stijgt.

NH₃

Ammoniak.

NH_x

Verzamelterm voor de depositie van gereduceerde stikstofverbindingen.

NO_x

Stikstofoxiden; een uitdrukking voor NO (stikstofmonoxide) en NO₂ (stikstofdioxide) gezamenlijk.

OECD

Organisation for Economic Co-operation and Development.

OPS

Operationeel Prioritaire Stoffen (model).

SO₂

Zwaveldioxide.

UNECE

United Nations Economic Commission for Europe.

Verzurende stoffen

Verzamelterm voor ammoniak, stikstofoxiden en zwaveldioxide.

Stikstof in de media

- 'Ammoniak helpt natuur om zeep', *Trouw*, 6 september 2003.
- 'Brussels mestbeleid ondergraven. Stikstof uit landbouw en industrie is niet de grootste bedreiging voor de natuur. Het is de overmaat aan fosfor die zeldzame planten doet verdwijnen', *Trouw*, 22 september 2005.
- 'Fosfaat funest voor planten, niet stikstof', *de Volkskrant*, 22 september 2005.
- 'De zure regen is niet verdwenen. Het grote bossterven dat uitbleef', *Boomblad* 17 (5), december 2005.
- 'Alterra: Effect ammoniak amper meetbaar' *Agrarisch Dagblad*, 12 september 2006
- 'Verburg teleurgesteld in Natuur en Milieu', *De Telegraaf*, 5 juli 2007.
- 'Ook weinig stikstof vermindert biodiversiteit', *Vroege Vogels*, 28 maart 2008.
- 'Het gevaar van verstikstofing, verbraming en verbrandneteling', *de Volkskrant*, 26 april 2008.
- 'Natuur lijdt onder uitstoot ammoniak', *Trouw*, 26 april 2008.
- 'Nederland legt Europees natuurbeleid te streng uit', *Agrarisch Dagblad*, 9 mei 2008.
- 'Ammoniak verdrijft plantensoorten', *Agrarisch Dagblad*, 26 juni 2008.
- 'Ammoniak écht slecht voor natuur', *Vroege Vogels*, 27 juni 2008.
- 'Veehouderij bij natuurgebied niet 'op slot'', *ANP*, 2 juli 2008.
- 'Ammoniak nog groter knelpunt', *Boerderij*, 3 november 2008.
- 'Ammoniakmoeras', *Agrarisch Dagblad*, 25 november 2008.
- 'Natuurregels barrière aanleg wegen', *De Telegraaf*, 25 november 2008.
- 'Maatwerk nodig voor oplossing ammoniakvraagstuk bij Natura 2000-gebieden', *Mvnieuws*, 28 november 2008.
- 'Uitstoot ammoniak stallen nog te hoog', *De Telegraaf*, 24 augustus 2009.
- 'Natura2000 vertraagt infrastructurele projecten', *Cobouw* 2009.
- 'Uitstoot ammoniak dierenstallen nog te hoog', *Vroege vogels*, 24 augustus 2009.

Literatuur

- Aalst, R.M. van (1984) 'Depositie van verzurende stoffen in Nederland', in: E.H. Adema & J. van Ham (red.) (1984) *Zure regen – oorzaken, effecten en beleid*, Wageningen: Pudoc.
- Aben, J.M.M. (2009) *Integrated Assessment Modelling in The Netherlands. A brief overview*, presentatie op de 34ste bijeenkomst van de Task Force on Integrated Assessment Modelling, Madrid, 7-9 mei 2008.
- Achermann, B. & R. Bobbink (eds.) (2003) *Empirical critical loads for nitrogen: Expert workshop, Berne, 11-13 November 2002*, Environmental Documentation 164, Bern: Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape.
- Adema, E. (red.) (1980) *Proceedings van het SO₂-symposium Wageningen 1980*, Wageningen: Pudoc.
- Adema, E.H. & J. van Ham (red.) (1984) *Zure regen – oorzaken, effecten en beleid*, Wageningen: Pudoc.
- AEA Technology (2008) *Analysis of the Costs and Benefits of Proposed Revisions to the National Emission Ceilings Directive NEC CBA Report 3. National Emission Ceilings for 2020 based on the 2008 Climate & Energy Package (Final report)*, Report ED48763, London: AEA Technology.
- Albers, R., J. Beek, A. Bleeker, L. van Bree, L., J. van Dam, L., van der Eerden, J. Freijer, A. van Hinsberg, M. Marra, C. van der Salm, A. Tonneijck, W. de Vries, L. Wesseling, L. & F. Wortelboer (2001) *Evaluatie van de verzuringsdoelstellingen: de onderbouwing*, rapport 725501001, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- Alcamo, J., R. Shaw, & L. Hordijk (1990) *The RAINS model of acidification: science and strategies in Europe*, Dordrecht: Kluwer.
- Amann, M. & G. Klaassen (1995) 'Cost-effective strategies for reducing nitrogen deposition in Europe', *Journal of Environmental Management* 43: 289-311.
- Amann, M., I. Bertok, J. Cofala, F. Gyarfas, C. Heyes, Z. Klimont & W. Schöpp (1999) *Integrated assessment modelling for the Protocol to abate acidification, eutrophication and ground-level ozone in Europe*, Publikatiereeks lucht en energie nr. 132, Den Haag: Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.
- Amann, M., I. Bertok, J. Cofala, C. Heyes, Z. Klimont, P. Rafaj, W. Schöpp, F. Wagner (2008) *National Emission Ceilings for 2020 based on the 2008 Climate & Energy Package*, NEC Scenario Analysis Report Nr. 6, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, URL: www.iiasa.ac.at/rains/reports/NEC6-final110708.pdf
- Anonymus (1981) 'Säureregen: Da liegt was in der Luft', *Der Spiegel* 47: 96-110. Zie ook vervolgen in *Der Spiegel* 1981, 48: 188-200 en 1981, 49: 174-188, maar ook in *Der Stern* (1982, 'Der saure Tod') en in *Die Zeit* (1981, 'O Tannenbaum, wo sind deine Blätter'; 1983, 'Noch zwanzig Jahre deutscher Wald').
- Anonymus (1983) *Der Spiegel*, nummer 7, 14 februari.
- Aptroot, A., C.M. van Herk, H.F. van Dobben, P.P.G. van den Boom, A.M. Brand & L. Spier (1998) 'Bedreigde en kwetsbare korstmossen in Nederland. Basisrapport met voorstel voor Rode Lijst', *Buxbaumia* 46: 1-101.
- Arnolds, E. (1991) 'Decline of ectomycorrhizal fungi in Europe', *Agriculture, Ecosystems & Environment* 35: 209-244.
- Asman, W.A. & E. Buijsman (1981) 'Verwijdering van luchtverontreiniging door neerslag – het zure regenprobleem, TNO-project 9: 238-244.
- Augustin, S. & H. Andreae (eds.) (1998) *Cause-effect interrelations in forest condition – state of knowledge. Study elaborated for the International Cooperative Programme on Forests under the LRTAP Convention*, Hamburg: Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft.
- Augustin, S., A. Bolte, M. Holzhausen & B. Wolff (2005) 'Exceedance of critical loads of nitrogen and sulphur and its relation to forest conditions', *European Journal for Forest Research* 124: 289-300.
- Bal, D., H.M. Beije, H.F. van Dobben & A. van Hinsberg (2007) *Overzicht van kritische stikstofdeposities voor natuurdoeltypen*, Ede: Ministerie van LNV, Directie Kennis.
- Beamish, R.J. & H.H. Harvey (1972) 'Acidification of the La Cloche Mountain Lakes, Ontario and resulting fish mortalities', *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 29: 1131-1143.
- Beamish, R.J., W.L. Lockhart, J.C. van Loon & H.H. Harvey (1975) 'Long-term acidification of a lake and resulting effects on fishes', *Ambio* 4: 98-102.
- Beck, J.P., L. van Bree, M.L.P. van Esbroek, J.I. Freijer, A. van Hinsberg, M. Marra, K. van Velze, H.A. Vissenberg & W.A.J. Van Pul (2001) *Evaluatie van de Verzuringsdoelstellingen: de emissievarianten*, rapport 725501002, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- Berg, L.J.L. van den, E. Dorland, P. Vergeer, M.A.C. Hart, R. Bobbink & J.G.M. Roelofs (2005) 'Decline of acid-sensitive plant species in heathland can be attributed to ammonium toxicity in combination with low pH', *New Phytologist* 166: 551-564.
- Biersteker, K. (1968) 'Luchtverontreiniging in Haarlem in 1608', *Nederlands Tijdschrift voor Sociale Geneeskunde* 112 (1): 33-34.
- Biersteker, K. (1980) 'Effecten van SO₂ op de menselijke gezondheid', in: E.H. Adema, *Proceedings van het SO₂-symposium, Wageningen 19 en 20 maart 1980*, Wageningen: Pudoc.
- Boonekamp, P.G.M., J. Gerdes, H.H.J. Vreuls, H.H.J., M. Verdonk & H. Pouwelse (2008) *Energiebesparing in Nederland 1995-2006: Update op basis van het Protocol Monitoring Energiebesparing*, rapport ECN-E-08-055, Petten: Energieonderzoek Centrum Nederland.
- Brække, F.H., (ed.) (1976) *Impact of acid precipitation on forest and freshwater ecosystems in Norway: summary report on the research results from the phase I (1972-1975) of the SNSF-project*, fagrapport 6, Oslo: SNSF (Sur nedbørs virkning på skog og fisk, Acid precipitation – Effects on forest and fish).
- Braun, H.J. (1981) 'Zur Erkrankung der Fichten im Forstamt Sauerlach', *Allgemein Forstzeitschrift* 36: 661.
- Braun, S., C. Schindler, R. Volz & W. Flückiger (2003) 'Forest damages by the storm "Lothar" in permanent observation plots in Switzerland: the significance of soil acidification and nitrogen deposition', *Water Air and Soil Pollution* 142: 327-340.
- Breeman, G.E. & A. Timmermans (2008) *Politiek van de aandacht voor milieubeleid*, rapport 77, Wageningen: Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, Universiteit Wageningen.
- Breemen, N. van, P.A. Burrough, E.J. Velthorst, H.F. van Dobben, T. de Wit, T.B. Ridder & H.F.R. Reijnders (1982) 'Soil acidification from atmospheric ammonium sulphate in forest canopy throughfall', *Nature* 299: 548-550.
- Breemen, N. van, J. Mulder & C.T. Driscoll (1983) 'Acidification and alkalization of soils', *Plant and Soil* 75: 283-308.
- Breemen, N. van, C.T. Driscoll & J. Mulder (1984) 'Acidic deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters', *Nature* 307: 599-604.
- Breemen, N. van & W. de Vries (1998) 'Criteria and indicators of acceptable atmospheric deposition of sulfur and nitrogen on forests in Western Europe', in: *The contribution of soil science to the development of and implementation of criteria and indicators of sustainable forest management*, Special publication no. 53, Madison: Soil Science Society of America, 99-111.
- Brimblecombe, P. (1975) 'Industrial air pollution in thirteenth-century Britain', *Weather* 30: 388-396.
- Brimblecombe, P. (1977) 'London air pollution 1500-1900', *Atmospheric Environment* 11: 1157-1162.
- Brimblecombe, P. (1987) *The Big Smoke*, London: Methuen.
- Brouwer, E. (2001) *Restoration of Atlantic softwaterlakes and perspectives for characteristic macrophytes*. Proefschrift, Nijmegen.
- Bruinsma, P. (1985) *Zure neerslag*, Aula pocket 751. Utrecht: Spectrum.
- Bruinsma, P. (1986) *Zure neerslag*, AO-boekje 2112.
- Buijsman, E. & H.F. Reijnders (1980) 'Neerslag verzuurt ons leven', *Intermediair* 16 (29), 13-27.
- Buijsman, E. (1982) *Zure regen, atmosferische processen*, rapport V82-29, Utrecht: Instituut voor Meteorologie en Oceanografie, Rijksuniversiteit Utrecht.
- Buijsman, E. (1984) 'Ammoniak in de Nederlandse atmosfeer', in: E.H. Adema & J. van Ham (red.), *Zure regen – oorzaken, effecten en beleid*, Wageningen: Pudoc.

- Buijsman, E., W.A.H. Asman, H. Maas (1984) *Een gedetailleerde ammoniak emissiekaart van Nederland*, publikatierreeks Lucht nr. 41, Den Haag: Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.
- Buijsman, E. (2008) 'Gisteren, vandaag, morgen. Een terugblik op het probleem van de zure regen', *Studium* 1 (4): 251-268.
- Buijsman, E. (2009) 'Metten waar de mensen zijn, deel 5', *Tijdschrift Lucht* nr 3, juni: 12-15.
- Buijsman, E. & H.F. Reijnders (1980) 'Zure regen', *Intermediair* 16 (29): 13-27.
- Bütjman, E. & W.A.H. Asman (1980) 'Hoe komt de pH van regenwater tot stand?', *Chemisch Weekblad* 76: 379.
- Carnol, M., P. Ineson & A.L. Dickinson (1997) 'Soil solution nitrogen and cations influenced by (NH₄)₂SO₄ deposition in a coniferous forest', *Environmental Pollution* 97: 1-10.
- Černý, J. & Pačes, T. (1995) *Acidification in the Black Triangle, Report for the 'Acid Reign '95 conference'*, Praag: Czech Geological Survey.
- CRMH (1987) *Zure regen: een sluipend onheil dat spoedig moet worden gekeerd*, rapport 1987/11, Den Haag: Centrale Raad voor de Milieugehygiëne.
- Corvalan, C., S. Hales & A. McMichael (2005) *Ecosystems and Human Well-being: health synthesis, report prepared by WHO as contribution to the Millennium Ecosystem Assessment*, Geneva: World Health Organization.
- Court, T. de la, J. Franssen & B. Papendorp (1987) *Zure regen. Gisteren, vandaag, morgen*, Amsterdam: World Information Service on Energy.
- Dam, H. van & H. Kooyman-van Blokland (1978) 'Man-made changes in some Dutch moorland pools, as reflected by historical and recent data about diatoms and macrophytes', *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie* 63: 587-607.
- Dam, H. van, G. Suurmond & C.J.F. ter Braak (1981) 'Impact of acidification on diatoms and chemistry of Dutch moorland pools', *Hydrobiologica* 83: 425-459.
- Dam, H. van & K. Beljaars (1984) 'Historische veranderingen in microflora en chemie van vennen in relatie tot zure neerslag', in: E.H. Adema & J. van Ham (red.) *Zure regen – oorzaken, effecten en beleid*, Wageningen: Pudoc.
- Daniëls, W.B. & C.W.M. van der Maas (red.) (2010) *Actualisatie referentieramingen. Energie en emissies 2009-2020*, rapport in voorbereiding, Petten/Bilthoven: Energieonderzoek Centrum/Planbureau voor de Leefomgeving.
- Diederiks, H.A. (1970) 'Luchtverontreiniging in het verleden', *Intermediair* 6 (37): 45-51.
- Diederiks, H.A. & C. Jeurgens, (1989) 'Nijverheid versus milieu in Holland 1500-1990', *Holland regionaal-historisch tijdschrift* 21: 190-208.
- Dobben, H.F. van, C.J.M. ter Braak & G.M. Dirkse (1999) 'Undergrowth as a biomonitor for deposition of nitrogen and acidity in pine forest', *Forest Ecology and Management* 114: 83-95.
- Dobben, H.F. van & A. van Hinsberg (2008). *Overzicht van kritische stikstofdeposities voor habitattypen, toegepast op habitattypen en Natura 2000-gebieden*, rapport 1654, Wageningen: Alterra.
- Dönszelmann, C.E.P., S.M. de Bruyn, M.H. Korteland, F. de Jong, M.N. Sevenster, M. Briene, M. Wienhoven & J. Bovens (2008) *Maatschappelijke effecten vermindering luchtverontreiniging, MKBA van mogelijke NEC-plafonds*, rapport 08764234, CE: Delft.
- Downs, A. (1972) 'Up and down with ecology: the issue attention cycle', *Public Interest* 28: 38-50.
- Driscoll, C.T., G.B. Lawrence & A.J. Bulger (2001). 'Acidic deposition in the northeastern United States: Sources and inputs, ecosystem effects, and management strategies', *BioScience* 51: 180-198
- Duan, L., Y.M. Huang, J. M. Hao, S.D. Xie & M. Hou (2004) 'Vegetation uptake of nitrogen and base cations in China and its role in soil acidification', *Science of the Total Environment* 330: 187-198.
- Ducros, M. (1845) 'Observation d'une pluie acide' *Journal de Pharmacie et de Chimie*, Troisième série, Tome septième (et 8): 273-277.
- Duinen, G.J. van, R. Bobbink, Ch. van Dam, H. Esselink, R. Hendriks, M. Klein, A. Kooijman, J. Roelofs & H. Siebel (2004) *Duurzaam natuurherstel voor behoud biodiversiteit. 15 jaar herstelmaatregelen in het kader van het overlevingsplan bos en natuur*, Ede: Expertisecentrum LNV.
- EEA (1995) *Europe's environment, the Dobris assessment*, Copenhagen: European Environment Agency.
- EEA (2003) *Europe's environment, the third assessment*, Copenhagen: European Environment Agency.
- EEA (2007) *Halting the loss of biodiversity by 2010: proposal for a first set of indicators to monitor progress in Europe*, Technical report No 11/2007, Copenhagen: European Environment Agency.
- Eerens, H.C. & J.D. van Dam (red.) (2001) *Grootschalige luchtverontreiniging en depositie in de Nationale Milieuverkenning 5*, rapport 408129016, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- EG (Europese Gemeenschap) (1980) 'Richtlijn van de raad van 15 juli 1980 betreffende grenswaarden en richtwaarden van de luchtkwaliteit voor zwaveldioxyde en zwevende deeltjes (80/779/EEG)', *Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen*: L 229/30.
- EG (Europese Gemeenschap) (1982) 'Richtlijn van de raad van 3 december 1982 betreffende een grenswaarden van de luchtkwaliteit voor lood (82/884/EEG)', *Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen*: L 378/15.
- EG (Europese Gemeenschap) (1985) 'Richtlijn van de raad van 7 maart 1985 inzake luchtkwaliteitsnormen voor stikstofdioxyde (85/203/EEG)', *Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen*: L 81/1.
- Ellenberg, H., R. Mayer & J. Schauerermann (1986) *Ökosystemforschung – Ergebnisse des Sollingsprojekts*, Stuttgart: Ulmer.
- EnergieNed (2003) *10 jaar verzuringsconvenant, resultaten van de bestrijding van SO₂ en NO_x door de Nederlandse elektriciteitsproductiebedrijven*, rapport 2003-22268, Arnhem: EnergieNed.
- Erismans, J.W. (2010) *Het bemesten van lucht*, inaugurele rede, Amsterdam: Vrije Universiteit.
- EU (Europese Unie) (1996) 'Richtlijn 96/61/EG inzake geïntegreerde preventie en bestrijding van verontreiniging', *Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen*: L 257, 26.
- EU (Europese Unie) (2000) 'Richtlijn 2000/76/EG van het Europees Parlement en de Raad van 4 december 2000', Richtlijn betreffende de verbranding van afval, *Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen*: L332, 91.
- EU (Europese Unie) (2001a) 'Richtlijn 2001/81/EG inzake nationale emissieplafonds voor bepaalde luchtverontreinigende stoffen', *Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen*: L 309, 22.
- EU (2001b) 'Richtlijn 2001/80/EG inzake de beperking van de emissies van bepaalde verontreinigende stoffen in de lucht door grote stookinstallaties', *Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen*: L 309, 1-21.
- EU (Europese Unie) (2002) 'Besluit 1600/2002/EG van het Europees Parlement en de Raad van 22 juli 2002 tot vaststelling van het Zesde Milieuoactieprogramma van de Europese Gemeenschap', *Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen*: L 242, 1.
- EU (Europese Unie) (2005) *Thematische strategie inzake luchtverontreiniging*, eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2005:0446:FIN:N L:PDF, geraadpleegd op 1 februari 2010.
- Evelyn, J. (1661) *Fumifugium*, London: Bedel & Collins.
- Fenn, M.E., T.G. Huntington, S.B. McLaughlin, C. Eagar, A. Gomez & R.B. Cook (2006) 'Status of soil acidification in North America', *Journal of Forest Science* 52: 3-13.
- FO Industrie (2008) *Doelgroepbeleid Milieu en Industrie Jaarrapportage 2007, Stand van zaken van het Doelgroepbeleid Milieu en Industrie in Nederland*, rapport R081204a, Den Haag: Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.
- Fraiture, R. de (1985) *Raindrops keep falling on my head: een lessenreeks over zure regen voor de 3e en 4e klassen mavo/havo/vwo*, Utrecht: Stichting Milieu-Edukatie.
- Galloway, J.N., A.R. Townsend, J.W. Erismans, M. Bekunda, Z. Cai, J.R. Freney, L.A. Martinelli, S.P. Seitzinger & M.A. Sutton (2008) 'Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions', *Science* 320: 889-892.
- Gezondheidsraad (1971) *Advies inzake grenswaarden SO₂*, advies Gezondheidsraad 268/67, Den Haag: Gezondheidsraad.
- Graveland, J.R., R. van der Wal, J.H. van Balen & A.J. Van Noordwijk (1994) 'Poor reproduction in forest passerines from decline of snail abundance on acidified soils', *Nature* 368: 446-448.
- Guo, J., R.D. Vogt, X. Zhang, Y. Zhang, H.M. Seip & H. Tang (2004) 'Ca-H-Al exchanges and aluminium mobility in two Chinese acidic forest soils: a batch experiment', *Environmental Geology* 45: 1148-1153.
- Haan, B.J. de, Kros, J., Bobbink, R., J.A. van Jaarsveld, W. de Vries & H. Noordijk (2008) *Ammoniak in Nederland*, rapport 500125003, Bilthoven/Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- Haan B.J. de; J.D. van Dam, W.J. Willems, M.W. van Schijndel, S.M. van Sluis, G.J. van Born & J.J.M. van Grinsven (2009) *Emissiearm bemesten geëvalueerd*, rapport 500155001, Bilthoven/Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- Hajer, M.A. (1995) *The politics of environmental discourse. Ecological modernization and the policy process*, Oxford: Clarendon Press.
- Hammingh, P., K. Smekens, R. Koelemeijer, B. Daniels & P. Kroon (2008) *Effecten van klimaatbeleid op emissies van luchtverontreinigende stoffen in Nederland. Eerste resultaten van het Beleidsgericht Onderzoeksprogramma Lucht en Klimaat (BOLK)*, rapport 500146002, Bilthoven/Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- Heij, G.J. & T. Schneider (eds.) (1991) *Dutch Priority program on acidification. Final report second phase Dutch Priority Programme on acidification*, rapport 200-09, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieugehygiëne.
- Heij, G.J. & T. Schneider (red.) (1995) *Eindrapport Additioneel Programma Verzuringsonderzoek, derde fase (1991-1994)*, rapport 300-05, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieugehygiëne.
- Herk, C.M. van (2001) 'Bark pH and susceptibility to toxic air pollutants as independent causes of changes in epiphytic lichen composition in space and time', *Lichenologist* 33 (5): 419-441.

- Herk, C.M. van, A. Aptroot & H.F. van Dobben (2002) 'Long-term monitoring in the Netherlands suggests that lichens respond to global warming', *Lichenologist* 34 (2): 141-154.
- Hettelingh, J.-P. (1998) *Faal-veilig of risicoolos: de rol van milieumetrische onderzoek voor de analyse van kettingreacties naar eindpunten van milieubeheer*, inaugurale rede, Leiden: Rijksuniversiteit Leiden.
- Hettelingh, J.-P., M. Posch, M., P.A.M. de Smet & R.J. Downing (1995) 'The use of critical loads in emission reduction agreements in Europe', *Water, Air and Soil Pollution* 85: 2381-2389.
- Hettelingh, J.-P., M. Posch, M. & P.A.M. de Smet (2001) 'Multi-effect critical loads used in multi-pollutant reduction agreements in Europe', *Water, Air, and Soil Pollution* 130: 1133-1138.
- Hettelingh, J.-P., M. Posch, G.J. Reinds, T. Spranger & L. Tarrason (2007) 'Critical loads and dynamic modelling to assess European areas at risk of acidification and eutrophication', *Water, Air, and Soil Pollution Focus* 7: 379-384.
- Hettelingh, J.-P., M. Posch & J. Slootweg (eds.) (2008). *Critical load, dynamic modelling and impact assessment in Europe*, Status Report 2008, Bilthoven: Coordination Centre of Effects.
- Hinsberg, A. van & J. Kros (2001) 'Dynamic modelling and the calculation of critical loads for biodiversity', M.A. Posch, P.A.M. de Smet, J.-P. Hettelingh & R.J. Downing (eds.) *Modelling and mapping of critical thresholds in Europe: CCE Status Report 2001*, report 259101010, Bilthoven: Coordination Centre for Effects/National Institute for Public Health and the Environment, 73-80.
- Hinsberg, A. van, & D.C.J. van der Hoek (2003) 'Oproep: meer onderzoek naar oorzaken van verstuiking', *De Levende Natuur* 2: 58-59.
- Hinsberg, A. van, R. Reijnen, P. Goedhart, B. de Knecht & M. van Esbroek (2008) 'Relation between critical load exceedance and species loss', in: *CCE Status Report 2008: Critical Load, Dynamic Modelling and Impact Assessment in Europe*, report 500090003, Bilthoven: Coordination Centre of Effects.
- Holland, M.R., D. Forster & K. King (1999) *Cost-benefit analysis for the protocol to abate acidification, eutrophication and ground level ozone in Europe*, Publikatiereeks lucht en energie nr. 133, Den Haag: Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.
- Homburg, E. (1998) 'Pollution and the Dutch Chemical Industry', in: E. Homburg, A.S. Travis & H.G. Schröter (eds.), *The chemical industry in Europe 1850-1914*. Dordrecht: Kluwer.
- Homburg, E., Travis A.S., Schröter, H.G. (red.) (1998) *The chemical industry in Europe, 1850-1914*, Dordrecht: Kluwer.
- Hordijk, L. (1986) 'Towards a targetted emission reduction in Europe', *Atmospheric Environment* 20 (10): 2053-2058.
- Houdijk, A.L.F.M., P.J.M. Verbeek, H.F.G. van Dijk & J.G.M. Roelofs (1993) 'Distribution and decline of endangered herbaceous heathland species in relation to the chemical composition of the soil', *Plant and Soil* 148: 137-143.
- IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) (2009) Presentatie op de Workshop on non-binding aspirational targets for air pollution for the year 2050, Utrecht, www.iiasa.ac.at/rains/meetings/Aspiration2050/Aspiration2050.html, geraadpleegd op 1 februari 2010.
- Innes, J.L. (1992) 'Forest decline', *Progress in Physical Geography* 16: 1-64.
- Jaarsveld, J.A. van (2004) *The Operational Priority Substances model. Description and validation of OPS-Pro 4.1*, rapport 500045001, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- Jaarsveld, J.A. van, G.-J. Reinds, A. van Hinsberg & M. van Esbroek (in voorbereiding) *Depositie van basische kationen in Nederland*, Bilthoven/ Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- Jong, J.J. de, E.O. Weeda, Th. Westerwoudt & A.F. Correljé (2005) *Dertig jaar energiebeleid – Van Bonzen en polders via markten naar Brussel zonder koolstof*, rapport CIEP 02/2005, Den Haag: Clingendael International Energy Programme.
- Kakebeeke, W., L. Björkbom, L., D. Jost, H. Martin, & V. Sokolovsky, V. (2004) 'Fruits of the Cold War: The convention and the first sulphur protocol', in: J. Sliggers, J. & W. Kakebeeke (eds.), *Clearing the Air – 25 years of the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*, New York/Geneva: United Nations.
- Kauppi, P.E., Mielikäinen K. & Kuusela K. (1992) Biomass and Carbon Budget of European Forests, 1971 to 1990, *Science* 256, pp. 70 – 74
- Keil, G. (2004) 'Chronik einer Panik', *Die Zeit*, 9 december 2004.
- Keizer, V.G. (1997) 'Nederlands verzuringsbeleid na 2000', *Lucht*, nr. 2, juni 1997.
- Keizer, V.G. (2009) Persoonlijke mededeling.
- Klaassen, G., M. Amann, C. Berglund, J. Cofala, L. Höglund-Isaksson, C. Heyes, R. Mechler, A. Tohka, W. Schöpp & W. Winiwarter (2004) *The Extension of the RAINS Model to Greenhouse Gases. An interim report describing the state of work as of April 2004*, report IIASA IR-04-015, Laxenburg; IIASA.
- KNMI/RIV (1979) *Meetnet voor bepaling van de chemische samenstelling van de neerslag in Nederland, jaaroverzicht 1978*, rapport 155-1, rapport 117/79/ LMC, De Bilt/Bilthoven: Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut/ Rijksinstituut voor de Volksgezondheid.
- Krause, G.H.M, B. Prinz & K.-D. Jung (1984) 'Untersuchungen zur Aufklärung immissionsbedingter Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland 1984', in: E.H. Adema & J. van Ham (red.), *Zure regen: oorzaken, effecten en beleid. Proceedings van het symposium 's-Hertogenbosch 1983*, Wageningen: Pudoc.
- Kros, J., B.J. de Haan, R. Bobbink, J.A. van Jaarsveld, J.G.M. Roelofs & W. de Vries (2008). *Effecten van ammoniak op de Nederlandse natuur, achtergrondrapport bij Ammoniak in Nederland*, rapport 1098, Wageningen: Alterra.
- Lampadius, W.A. (1834a) 'Über die Quellwasser des Sächsischen Erzgebirges, so wie über die atmosphärischen Wasser', *Journal für Praktische Chemie* 2, 100-111
- Lampadius, W.A. (1834b) 'Über die Quellwasser des Sächsischen Erzgebirges, so wie über die atmosphärischen Wasser', *Journal für Praktische Chemie* 2, 281-290.
- Langeweg, F. (red.) (1988) *Zorgen voor morgen. Nationale milieuerkenning 1985-2010*, rapport 010198801, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne.
- Leeters, E.E.J.M., W. De Vries, T. Hoogland, B. van Delft, R. Wieggers, D.J. Brus, A.F.M. Olsthoorn, H. van Dobben & A. Bleeker (2007) *What happened to our forests in the last decades? Results of more than ten years of forest ecosystem monitoring in the Netherlands*, rapport 1528, Wageningen: Alterra.
- Lekkerkerk, L.C.A., G.J. Heij & M.J.M. Hootsmans (1995) *Ammoniak de feiten*, rapport 300-06, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- Lükewille, A., D. Jeffries, M. Johannessen, G. Raddum, J. Stoddard & T. Traaen (1997) *The nine year report: acidification of surface water in Europe and North America – long term developments (1980s and 1990s)*, report 3637, Oslo: Norsk institutt for vannforskning (Norwegian Institute for Water Research).
- Maas, R., M. Amann, H. Apsimon, L. Hordijk & W. Tuinstra (2004) 'Integrated assessment modeling – the tool', in: J. Sliggers & W. Kakebeeke (eds.), *Clearing the air – 25 years of the convention on long-range transboundary air pollution*, New York/Geneva: United Nations.
- Maas, R., A. Englerlyd & E. Dame (2009) 'Towards a joint strategy for air pollution and climate change', in: H. Pleyel (ed.), *Air pollution & climate change, two sides of the same coin?*, Stockholm: Swedish Environmental Protection Agency.
- Manuel, A.R. (red.) (1984) *Verzuring door atmosferische depositie – evaluatierapport*, publicatiereeks Milieubeheer 2, Rotterdam/Den Haag, Adviesbureau voor Watervoorziening IWACO/Ministerie van Landbouw en Visserij/Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening.
- Matschullat, J., H. Heinrichs, J. Schneider & B. Ulrich (1994) *Gefahr für Ökosysteme und Gewässer – Ergebnisse interdisziplinärer Forschung im Harz*, Berlin: Springer.
- Matthijsen J. & R.B.A. Koelemeijer (2010) *Beleidsgericht onderzoeksprogramma fijn stof: resultaten op hoofdlijnen*, rapport 500099013, Bilthoven/Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- Matzner, E. (1988) *Der Stoffumsatz zweier Waldökosysteme im Solling*, Reihe A, Band 41, Göttingen: Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme der Universität Göttingen.
- MNC (Milieu- en Natuurcompendium) (2009a). *Verzurende depositie 1981-2007*, www.milieuennatuurcompendium.nl/indicatoren/nl0184, geraadpleegd op 13 maart 2009.
- MNC (Milieu- en Natuurcompendium) (2009b) *Herkomst verzurende deposities in Nederland 2004*, www.milieuennatuurcompendium.nl/indicatoren/nl0179, geraadpleegd op 13 maart 2009.
- MNC (Milieu- en Natuurcompendium) (2009c) Milieukosten per thema 1990-2007, www.compendiumvoorleefomgeving.nl/indicatoren/nl0422-Milieukosten-per-thema.html?i=10-73, geraadpleegd op 15 februari 2010.
- Müller-Edzard, C., W. de Vries & J.W. Erisman (eds.) (1997) *Ten years of monitoring forest condition in Europe*, Brussel/Geneva: EC-UNECE.
- Naturvardsverket (2009) www.naturvardsverket.se. Geraadpleegd 1 september 2009.
- Nèmc, A. (1952) 'Contribution to the question of spruce die-back in the Ore mountains with special emphasis on smoke damage' (In Tsjechisch), in: *Práce výzkumných ústav lesnických*, Praag: Brázda.
- Nisbet, M. & M. Hüge (2006) 'Attention cycles and frames in the plant biotechnology debate', *Harvard International Journal of Press/Politics* 11: 3-40.
- NRC (2009) 'Wat is er met de zure regen gebeurd?', *NRC-Next*, 24 juni 2009.
- Odén, S. (1967) 'Nederbördens försurning', *Dagens Nyheter*, 24 oktober 1967.
- Odén, S. (1968) *Nederbördens och luftens försurning, dess orsaker, förlopp och verkan i olika miljöer. [De verzuring van lucht en neerslag en de gevolgen ervan voor het milieu]*, Bulletin no 1, Stockholm: Ekologikommittéen.
- Odén, S. (1976) 'The acidity problem – an outline of concepts', *Water, Air, and Soil Pollution* 6: 137-166.

- OECD (1977) *The OECD programme on longrange transport of air pollutants. Measurements and findings*, Paris: Organization for Economic Cooperation and Development.
- Ooyen, D. van & T. de la Court (1984) *Het zure-regen boek*, Amsterdam: Miliedefensie/WISE.
- Overrein, L. (1976) 'A presentation of the Norwegian project 'Acid precipitation – Effects on forests and fish', *Water, Air, and Soil Pollution* 6: 167-172.
- PBL (Planbureau voor de Leefomgeving) (2007) *Milieubalans 2007*, Bilthoven/Den Haag: PBL.
- PBL (Planbureau voor de Leefomgeving) (2009a) Website EmissieRegistratie, <http://www.emissieregistratie.nl>. Geraadpleegd 1 september 2009.
- PBL (Planbureau voor de Leefomgeving) (2009b) *Milieubalans 2009*, Bilthoven/Den Haag: PBL.
- PBL (Planbureau voor de Leefomgeving) (2009c) *Natuurbalans 2009*, Bilthoven/Den Haag: PBL.
- Poortinga, G. (1984) *Zure regen. Kwaadaardige bedreiging van ons welzijn*, Amsterdam: Elsevier.
- Posch, M., J.-P. Hettelingh & J. Slootweg (2003), *Manual for the dynamic modeling of soil response to atmospheric deposition*, rapport 259101012, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- Pul, A. van, H. van Jaarsveld, T. van der Meulen & G. Velders (2004) 'Ammonia concentrations in the Netherlands: spatially detailed measurements and model calculations', *Atmospheric Environment* 38: 4045-4055.
- Pul, W.A.J. van, V.M.M.P. van den Broek, H. Volten, A. van der Meulen, A.J.C. Berkhout, K.W. van der Hoek, R.J. Wichink Kruit, J.F.M. Huijsmans, J.A. van Jaarsveld, B.J. de Haan & R.B.A. Koelmeijer (2008) *Het ammoniakgat: onderzoek en duiding*, rapport 680150002, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- Reuver, P.J. H.M., J.J. Borgesius, G.T.M. Grimberg & G. van Tol (1998) *De vitaliteit van bossen in Nederland in 1998*, verslag Meetnet Bosvitaliteit 4, Wageningen: Integraal Kenniscentrum Natuurbeheer.
- RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu) (1986) *Luchtkwaliteit Jaarverslag 1984 en 1985*, rapport 228216052, Bithoven: RIVM.
- RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu) (1998) *Milieubalans 98*, Bilthoven: RIVM.
- RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu) (1999) *Milieubalans 99*, Bilthoven: RIVM.
- RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu) (2002) *Milieubalans 2002*, Bilthoven: RIVM.
- Ronse, A., L. Temmerman, M. de Guns & R. de Borger (1988) 'Evolution of Acidity, Organic Matter Content, and Cec in Uncultivated Soils of North Belgium During the Past 25 Years', *Soil Science* 146: 453-460.
- Rozendaal, S. (2007) *Het Grote Goed Nieuws Boek*, Amsterdam: Contact.
- Ruiter, J.F. de, W.A.J. van Pul, J.A. van Jaarsveld & E. Buijsman (2006) *Zuur- en stikstofdepositie in Nederland in de periode 1981-2002*, rapport 500037005, Bilthoven: Milieu- en Natuurplanbureau.
- Runhaar, J., C.L.G. Groen, R. van der Meijden & R.A.M. Stevers (1987) 'Een nieuwe indeling in ecologische groepen binnen de Nederlandse flora', *Gorteria* 13: 277-359.
- Runhaar, J., C.R. van Gool & C.L.G. Groen (1996) 'Impact of hydrological changes on nature conservation areas in the Netherlands', *Biological Conservation* 76: 269-276.
- Schildermans, J. & P. Vanhoute (1986) *Zure regen, de georganiseerde vernietiging*, Berchem: EPO.
- Schneider, T. & A.H.M. Bresser (red.) (1988) *Dutch priority programme on acidification*, report 00-06, Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- Schofield, C.L. (1976) 'Lake acidification in the Adirondack Mountains of New York causes and consequences', in: L.S. Dochinger & T.A. Seliga (eds.) *Proceedings of the first international symposium on acid precipitation and the forest ecosystem*, Gen. Tech. Rep. NE-23, Upper Darby, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station.
- Schöpp, W., M. Amann, J. Cofala, C. Heyes, & Z. Klimont (1999) 'Integrated assessment of european air pollution emission control strategies', *Environmental Modelling & Software* 15: 1-9.
- Schrijver, A. de, J. Mertens, G. Geudens, J. Staelens, E. Campforts, S. Luysaert, L. de Temmerman, L. de Keersmaecker, S. de Neve, & K. Verheyen (2006) 'Acidification of forested podzols in North Belgium during the period 1950-2000', *Science of the Total Environment* 363: 18-195.
- Schulze, E.-D. (1989) 'Air pollution and forest decline in a spruce (*Picea abies* L.) forest', *Science* 244: 776-783.
- Schütt, P. (1980) 'Das Tannensterben – ein Umweltproblem?', *Holz-Zentralblatt* 10: 545-546.
- Schütt, P. (1981) 'Folgt dem Tannensterben ein Fichtensterben?', *Holz-Zentralblatt* 11: 159-160.
- Schütt, P. (1982) 'Aktuelle Schäden am Wald – Versuch einer Bestandaufnahme', *Holz-Zentralblatt* 25: 369-372.
- Schütt, P. & H. Blaschke (1984) *Der Wald stirbt an Stress*, München: Bertelsmann.
- Sliggers, J. (2000) *Evaluatie van de verzuringsdoelstellingen: maatregel-pakketten, emissies en kosten*, www.vrom.nl/pagina.html?id=2706&sp=2&dn=w589, geraadpleegd 15 februari 2010.
- Sliggers, J. (red.) (2001) *Op weg naar duurzame niveaus voor gezondheid en natuur*, Den Haag: Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.
- Sliggers, J. (red.) (2007) *Een swingende conventie. Acid, Heavy Metal en POP*, Den Bosch: Vereniging van Milieuprofessionals.
- Smith, R.A. (1852) 'On the air and rain of Manchester', *Memoirs of the Manchester Literary and Philosophical Society* 10: 207-217.
- Smith, R.A. (1872) *Air and Rain: The beginnings of a chemical climatology*, London: Longmans, Green & Co.
- Spelsberg, G. (1984) *Rauchplage: hundert Jahre saurer Regen*, Aachen: Alano.
- Spiecker, H., K. Mielikäinen, M. Köhl & J. Skovsgaards (1996) *Growth trends in European forests. Studies from 12 Countries*, Research Report 5, Berlin/Heidelberg: Springer.
- Staatsblad (1973) 'Besluit typekeuring motorrijtuigen luchtverontreiniging', *Staatsblad* 356.
- Staatsblad (1979) 'Besluit zwavelgehalte brandstoffen', *Staatsblad* 424.
- Staatsblad (1987) 'Besluit van 10 april 1987, houdende emissie-eisen stookinstallaties', *Staatsblad* 164.
- Staatsblad (1988) 'Besluit zwavelgehalte brandstoffen', *Staatsblad* 408.
- Staatsbosbeheer (1983) *De vitaliteit van het Nederlandse bos. Verslag van het landelijk onderzoek naar de vitaliteit van het Nederlandse bos*, Utrecht: Afdeling Bosontwikkeling, Staatsbosbeheer.
- Stanners, D. & Bourdau, P., eds. (1995) *Europe's Environment – The Dobbris Assessment*, Copenhagen: European Environmental Agency.
- Stevens, C.J., N.B. Dise, J.O. Mountford & D.J. Gowing (2004) 'Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands', *Science* 303: 1876-1879.
- Stoklasa, J. (1923) *Die Beschädigung der Vegetation durch Rauchgase*, Berlin: Urban & Schwarzenberg.
- Sverdrup, H., S. Belyazid, B. Nihlgård & L. Ericson (2007) 'Modelling Change in ground Vegetation Response to Acid and Nitrogen Pollution, Climate Change and Forest Management in Sweden 1500-2100 A.D.', *Water, Air, and Soil Pollution* 7: 163-179.
- Tao, F. L., Y. Hayashi & E.D. Lin (2002) 'Soil vulnerability and sensitivity to acid deposition in China', *Water, Air, and Soil Pollution* 140: 247-260.
- Trojan, C. (2008) *Stikstof/ammoniak in relatie tot Natura 2000. Een verkenning van oplossingsrichtingen*, Den Haag: Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.
- Tweede Kamer (1983) *Motie van mevrouw De Boois d.d. 21 februari 1983*, Tweede Kamer, zitting 1982-1983 17600, hoofdstuk IX, nr. 84.
- Ulrich, B. (1983) 'Soil acidity and its relation to acid deposition', in: B. Ulrich & J. Pankrath (eds.), *Effects of accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems*, Dordrecht: Reidel.
- Ulrich, B. (1989) 'Effects of acidic precipitation on forest ecosystems in Europe', in: D.C. Adriano & A.H. Johnson (eds.) *Acidic precipitation. Vol. 2: Biological and ecological effects*, Berlin: Springer.
- Ulrich, B., R. Mayer & P.K. Khanna (1979) *Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling*, Schriften aus der Fortslichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt Band 58, Frankfurt: Sauerländers Verlag.
- UNECE (1979) *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution*, www.unece.org/env/lrtap/lrtap_h1.htm, Geneva: UNECE, geraadpleegd op 1 september 2009.
- Utschig, H. (1989) *Waldwachstumskundliche Untersuchungen im Zusammenhang mit Waldschäden. Auswertung der uwachstrendanalyseflächen des Lehrstuhles für Waldwachstumskunde für die Fichte (Picea abies (L.) Ksarst.) in Bayern*, Forstliche Forschungsberichte München nr. 97, München: Technische Universität München.
- Vermeulen, A.J. (1977) 'Verzuring van de neerslag: oorzaken en gevolgen', *Natuur en Milieu* nummer 6/7: 12-21.
- Vermeulen, A.J. (1978a) *Acid precipitation in the Netherlands*, Haarlem: Provincie Noord-Holland.
- Vermeulen, A.J. (1978b) 'Acid precipitation in the Netherlands', *Environmental Science and Technology* 12: 1016-1021.
- Visser, M., W.L.M. Smeets, G.P. Geilenkirchen & W.F. Blom (2008) *Effecten van de Euro-VI-emissie-eisen voor zwaar wegverkeer in Nederland*, rapport 500094006, Bilthoven/Den Haag: Planbureau voor de Leefomgeving.
- VOMIL (Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne) (1972) *Urgentienota Milieuhygiëne*, Tweede Kamer, vergaderjaar 1971-1972, 11906, nr. 1-2., Den Haag: Ministerie VOMIL.
- VOMIL (Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne) (1974) *Eerste interimrapport grenswaarden luchtverontreiniging*, Rapport van de Gezondheidsraad. Verslagen, Adviezen, Rapporten 1975, nr. 18, Den Haag: Ministerie VOMIL.

- VOMIL (Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne) (1975) *Advies inzake de vaststelling van grenswaarden voor roet, zwevend stof en zwavelzuur*, Rapport van de Gezondheidsraad, Verslagen, Adviezen, Rapporten 1975, nr. 17, Den Haag: Ministerie VOMIL.
- VOMIL (Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne) (1976) *Indicatief meerjarenprogramma 1976-1990, ter bestrijding van de luchtverontreiniging*, Tweede kamer, zitting 1979-1980 15834, nrs. 1-2, Den Haag: Ministerie VOMIL.
- VOMIL (Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne) (1977) *Indicatief Meerjarenprogramma ter bestrijding van de luchtverontreiniging (IMP Lucht) 1976-1980*, Tweede kamer, zitting 1976-1977, 14 314, nrs. 1-2, Den Haag: Ministerie VOMIL.
- VOMIL (Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne) (1979) *SO₂ Beleidskaderplan*, Tweede kamer, zitting 1976-1977, 14314, nrs. 1-2, Den Haag: Ministerie VOMIL.
- VOMIL (Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne) (1982) *Indicatief Meerjarenprogramma Lucht 1981-1985*, Tweede Kamer, vergaderjaar 1982-1983 17600, nrs. 1-2, Den Haag: Ministerie VOMIL.
- Vries, W. de (1988) 'Critical deposition levels of nitrogen and sulphur on Dutch forest ecosystems', *Water, Air, and Soil Pollution* 42: 221-239.
- Vries, W. de (2008) *Verzuring: oorzaken, effecten, kritische belastingen en monitoring van de gevolgen van ingezet beleid*, rapport 1699, Wageningen: Alterra.
- Vries, W. de & A. Breeuwsma (1986) 'Relative importance of natural and anthropogenic proton sources in soils in the Netherlands', *Water, Air, and Soil Pollution* 28: 173-184.
- Vries, W. de & A. Breeuwsma (1987) 'The relation between soil acidification and element cycling', *Water, Air, and Soil Pollution* 35: 293-310.
- Vries, W. de & J. Kros (1989) *De lange termijn effecten van verschillende depositiescenario's op de bodemvochtsamenstelling van representatieve bosecosystemen*, rapport 30, Wageningen: Staring Centrum.
- Vries, W. de & J. Kros (1991) *Assessment of critical loads and the impact of deposition scenarios by steady state and dynamic soil acidification models*, rapport 36, Wageningen: Staring Centrum.
- Vries, W. de, J. Kros & C. van der Salm (1994) 'Long-term impacts of various emission deposition scenarios on Dutch forest soils', *Water, Air, and Soil Pollution* 75: 1-35.
- Vries, W. de, C.E.-J.M. Leeters, C.M.A. Hendriks, H.F. van Dobben, J. van den Burg & L.J.M. Boumans (1995) 'Large scale impacts on forests and forest soils in the Netherlands', in: G.J. Heij & J.W. Erisman, (eds.), *Studies in Environmental Science* 64, Amsterdam: Elsevier.
- Vries, W. de, J.M. Klap & J.W. Erisman (2000) 'Effects of environmental stress on forest crown condition in Europe, Part I: hypotheses and approach to the study', *Water, Air, and Soil Pollution* 119: 317-333.
- Vries, W. de, H.F. van Dobben, C.M. van Herk, J. Roelofs, A. van Pul, A. van Hinsberg, J. Duijzer & J.W. Erisman (2002) 'Effecten emissiebeleid voor verzuring op de natuur' *ArenA* 8 (7): Dossier 105-108.
- Vries, W. de, J. Kros, G.J. Reinds, G.W.W. Wamelink, J.P. Mol-Dijkstra, H. van Dobben, R. Bobbink, S. Smart, C. Evans, A. Schlutow, P. Kraft, S. Belyazid, H.U. Sverdrup, A. van Hinsberg, M. Posch, & J.-P. Hettelingh, (2007) *Developments in modelling critical nitrogen loads for terrestrial ecosystems in Europe*, report 1382, Wageningen: Alterra.
- VROM (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer) (1983) *Indicatief Meerjarenprogramma Lucht 1984-1988*, Tweede Kamer vergaderjaar 1983-1984 18100, hoofdstuk XI, nr. 7, Den Haag: Ministerie VROM.
- VROM (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer) (1984a) *Notitie inzake de problematiek van de verzuring*, Tweede kamer, zitting 1983-1984, no. 18 225, nrs. 1-2. Den Haag: Ministerie VROM
- VROM (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer) (1984b) *Indicatief Meerjaren Programma Lucht 1985-1989*, Tweede Kamer, vergaderjaar 1984-1985 18605, nrs. 1-2, Den Haag: Ministerie VROM.
- VROM (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer) (1985) *Zure regen*, Den Haag: Ministerie VROM.
- VROM (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer) (1989a) *Bestrijdingsplan Verzuring*, Tweede Kamer, vergaderjaar 1988-1989 18825, nr. 31, Den Haag: Ministerie VROM.
- VROM (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer) (1989b) *Nationaal milieubeleidsplan: kiezen of verliezen*, Den Haag: Ministerie VROM.
- VROM (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer) (1998) *Themadocument verzuring 1998. Stand van zaken verzuringsbeleid 1998, effecten, huidige doelstellingen en resultaten*, publikatiereeks lucht en energie 128, Den Haag: Ministerie VROM.
- VROM (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer) (2001a) *Een wereld en een wil: werken aan duurzaamheid. Nationaal Milieubeleidsplan 4*, Den Haag: Ministerie VROM.
- VROM (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer) (2001b) *Op weg naar duurzame niveaus voor gezondheid en natuur*, Den Haag: Ministerie VROM.
- VROM (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer) (2002) *Rapportage emissieplafonds verzuring en grootschalige luchtverontreiniging 2002*, Den Haag: Ministerie VROM.
- VROM (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer) (2006) *Toekomstagenda Milieu: schoon, slim, sterk*, Den Haag: Ministerie VROM.
- VROM (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer) (2010) *Handboek Implementatie Milieubeleid EU in Nederland*, www.vrom.nl/milieuhandboek, geraadpleegd op 1 februari 2010.
- VROM/VenW (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer/ Ministerie van Verkeer en Waterstaat) (1987) *Notitie Verkeer en Milieu*, Den Haag: Ministerie VROM/VenW.
- Wallis de Vries, M.F. & C.A.M. van Swaay (2006) 'Global warming and excess nitrogen may induce butterfly decline by microclimate cooling', *Global Change Biology* 12(9): 1620-1626
- Wamelink, G.W. (2007) *Simulation of vegetation dynamics as affected by nitrogen deposition*, Proefschrift, Universiteit Wageningen.
- Weyer, P.J., J.R. Cerhan, B.C. Kross, G.R. Hallberg, J. Kantamneni, G. Breuer, M.P. Jones, W. Zheng & C.F. Lynch (2001) 'Municipal drinking water nitrate level and cancer risk in older women: The IOWA woman's health study', *Epidemiology* 11: 327-338.
- Wichink Kruit, R.J., W.A.J. van Pul, R. Otjes, P. Hofschreuder, A.F.G. Jacobs & A.A.M. Holtslag (2007) 'Ammonia fluxes and derived canopy compensation points over non-fertilized agricultural grassland in The Netherlands using the new gradient ammonia-high accuracy-monitor (Graham)', *Atmospheric Environment* 41: 1275-1287.
- Winsemius, P. (1984) 'Opening van het symposium', in: E.H. Adema & J. van Ham (red.), *Zure regen – oorzaken, effecten en beleid. Proceedings van het symposium 's-Hertogenbosch*, Wageningen: Pudoc.
- Wislecenus, H. (1985) *Waldsterben im 19. Jahrhundert. Sammlung von Abhandlungen über Abgase und Rauchschäden 1860-1916*, Düsseldorf: VDI. 1
- Wright, R.F., J.G.M. Roelofs, M. Bredemeier, K. Blanck, A.W. Boxman, B.A. Emmett, P. Gundersen, H. Hultberg, O.J. Kjonaas, F. Moldan, A. Tietema, N. van Breemen & H.F.G. van Dijk (1995) 'Nitrex – responses of coniferous forest ecosystems to experimentally changed deposition of nitrogen', *Forest Ecology and Management* 71: 163-169.
- Zanden, J.L. van & S.W. Versteeg (1993) *Groene geschiedenis van Nederland*, Utrecht: Spectrum.

1 Fotomechanische herdruk van de eerste uitgave door Parey, Berlijn 1908-1916

Colofon

Eindverantwoordelijkheid

Planbureau voor de Leefomgeving

Met medewerking van

M.B. Posch en J. Slootweg (beiden PBL) leverden belangrijke bijdragen aan de berekeningen van de critical loads. W.J. de Vries (PBL) maakte de berekeningen voor de herkomst en de trend van de verzurende depositie.

Met dank aan

Een eerdere versie van het onderdeel 'Verdieping' van deze publicatie werd voor commentaar voorgelegd aan dr. R. Bobbink, Universiteit Utrecht, prof. ing. J.W. Erisman, Energieonderzoek Centrum Nederland, Petten, mr. V. Keizer, voormalig medewerker van het ministerie van Volkshuisvesting, Milieubeheer en Ruimtelijke Ordening en voormalig lid van de Nederlandse delegatie in de Working Group on Strategies and Review, LRTAP-conventie, drs. J. Sliggers, ministerie voor Volkshuisvesting, Milieubeheer en Ruimtelijke Ordening en dr. ir. W. de Vries, Universiteit Wageningen. Wij danken hen voor het kritische commentaar en hun nuttige bijdragen. Prof. ir. N.D. van Egmond, Universiteit Utrecht, deed een aantal waardevolle suggesties.

Tekstredactie

S. Opdam

Redactie figuren

M.J.L.C. Abels-van Overveld, F.S. de Blois, E. Buijsman, P.R. van Hooydonk, R. de Niet, J.F. de Ruiter, W.J. de Vries

Opmaak

Uitgeverij RIVM

