

drs. Gerben Poortinga

zure regen

kwaadaardige bedreiging
van ons welzijn

elsevier

zure regen

Zure regen vormt een kwaadaardige bedreiging van ons welzijn. Bossen sterven in de lucht die wij inademen. Zure regen heeft veel planten en dieren doen verdwijnen en negentig procent van onze bossen blijkt al ziek te zijn. Is de huidige ellende pas de top van de ijsberg? West-Duitsland, waar een groot publiek zich al jaren bewust is van de dramatische bossterfte wordt overspoeld met publikaties over zure regen. Ook in Nederland is een stroom van publiciteit losgebarsten sinds Poortinga en andere wetenschappers hebben aangetoond dat de zure regen niet bij de grenzen ophoudt. Zure regen lijkt uit te groeien tot het belangrijkste probleem van deze eeuw. Poortinga behandelt op heldere wijze de stand van de kennis over de aard van de zure regen - de bronnen van vervuiling - de aantasting van de gezondheid van mensen en bomen - de verzuring van de bomen en het verval van cultuurgoederen - de problematiek van de ammoniak en de mestbergen en ten slotte de bestrijdingsmogelijkheden. De auteur analyseert scherp of politiek Nederland bereid is om de regering te dwingen wel de noodzakelijke actie te ondernemen. Het boek geeft duidelijk weer in hoeverre de schade in Nederland is onderzocht, maar ook wie bij verdergaand onderzoek nog schade kan verwachten.

drs. Gerben Poortinga

zure regen

Kwaadaardige bedreiging van ons welzijn



MCMLXXXIV

Elsevier – Amsterdam/Brussel

Omslagontwerp: Ron Putto

© MCMLXXXIV B.V. Uitgeversmaatschappij Elsevier, Amsterdam/Brussel
D/MCMLXXXIV/0199/597 ISBN 90 10 05383 0

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

INHOUD

Voorwoord	5
Inleiding	7
Zure regen, het ecologische Hiroshima	
1. Historie	12
Van bossterfte tot wiegedood	
2. Wat is zure regen?	25
Zuur ontstaat en verdwijnt	
3. Bossterfte	30
In heel Europa sterven de bossen	
4. Oorzaken van bossterfte	57
Is bossterfte onverklaarbaar verklaard?	
5. Schadebeelden	77
Bossterfte is voor een ieder zichtbaar	
6. Het grote uitsterven	90
Het afsterven van natuurgebieden	
7. Duizenden dode meren	103
Vissterfte in de Scandinavische meren	
8. Korstmossen	111
De gevoelige soorten zijn al verdwenen	
9. Paddestoelen	115
Als de wortelschimmels sterven, verdwijnt het bos	
10. Volksgezondheid	123
Een op de tien Nederlanders	
11. Betonrot en verval van natuursteen	138
Sociale woningbouw en monumentenzorg	
12. Metalen, papier en textiel	154
Alle waardevolle dingen worden aangetast	
13. Ammoniak, mest en zure regen	174
Kunstmest en krachtvoer scheppen drijfmestzeeën	
14. Bestrijding van stallucht	189
Biogas en mestspreiding, de boer kan het niet betalen	
15. Drinkwater	200
Natuurlijk water is niet langer drinkbaar	

16. Zwaveldioxide	209
Ontstaan en bestrijding	
17. Stikstofoxiden	217
Ontstaan, bestrijding en automotoren	
18. Fotochemische oxidanten	231
Natuurlijke ozonconcentraties zijn schadelijk	
19. Zure regen en rechtsbescherming	240
Wie betaalt de schade?	
– Het Fonds Luchtverontreiniging	
– De onrechtmatige overheidsdaad	
– Schone lucht als grondrecht	
– Boswet opschorten	
Referenties	263

Afkortingen

L.C.	Leeuwarder Courant
Vkr	Volkskrant
NvhN	Nieuwsblad van het Noorden
AZF	Allgemeine Forst Zeitschrift
LÖLF	Landesanstalt für ökologie Landschaftsentwicklung und Forstplanung Nordrhein-Westfalen
VEWIN	Vereniging van waterexploitanten in Nederland
EPA	Environmental Policy Agency, Washington V.S.
PB	Publicatieblad Europese Gemeenschappen
IPO	Instituut voor Plantenziektkundig onderzoek
EEG	Europese Economische Gemeenschap
SNSF	Het Noorse interdisciplinaire onderzoeksprogramma

VOORWOORD

In de vroege morgen van deze prachtige nazomer liggen de landerijen er vredig bij, bedekt onder een fijn waas van kristalheldere druppeltjes. De rust in het bos doet vredig en weldadig aan. De schoonheid van de natuur, als een onvernietigbaar gegeven, veroorzaakt gevoelens van veiligheid, geborgenheid en blijheid.

En toch, deze ogenschijnlijk vredige rust is opgebouwd uit onnoemelijke spanningen, waarbij elk stukje leven, hoe nietig ook, op zijn eigen wijze betrokken is. Dit spanningsveld is ontstaan in de loop van miljarden jaren, waarin de evolutie zich heeft voltrokken. Talloze nieuwe soorten van levende organismen ontwikkelden zich ten koste van andere. Alleen die organismen konden overleven, die de sterkste waren of voorzien waren van de meest geraffineerde afweermechanismen. Maar tegelijkertijd kunnen ze ook niet buiten elkaar. Ze hebben elkaar nodig, ze ruimen elkaars afvalprodukten op. Zo zijn hele levensgemeenschappen ontstaan van zeer vele soorten, die op subtiële wijze van elkaar afhankelijk zijn. Van zo'n intensief samenhangend geheel van organismen en hun omgeving, dat ecosysteem genoemd wordt, maakt ook de mens deel uit. Hij kan voortbestaan mede dank zij de natuurlijke hulpbronnen, die in de loop van de evolutie voor hem zijn weggelegd door de levende organismen, die hem zijn voorgedaan. Denk aan de betekenis voor ons van water, lucht, vruchtbare grond, de planten en dieren met de zon als bron van energie, maar ook aan de eindige en dus tijdelijke hulpbronnen, zoals mineralen, kolen, olie en gas.

Vooraf door het intensieve gebruik van deze laatste bronnen wordt de natuur zwaar belast door de afvalstoffen, die daarbij ontstaan. Een van de vormen van deze belasting staat bekend onder de naam 'zure regen'. Samen met de wijze, waarop thans landbouw en veeteelt bedreven worden en bepaalde cultuurtechnische voorzieningen worden getroffen (kanaliseren, ruilverkaveling, verlaging grondwaterpeil, inpoldering, enz.) wordt onherstelbare schade aan de natuur toegebracht in een onnatuurlijk hoog tempo.

Het is inderdaad 'jammer van die pinksterblommen'* en de cantharelens. Maar zijn dit geen voortekenen van het ineenstorten van ecosystemen, die voor de mens wel van levensbelang zijn, zodat we

* 19NU, Stichting Public Relations Land- en Tuinbouw, 5 september 1984, blz. 37, 38.

straks ook kunnen zeggen: jammer van de bossen, landerijen, meren en zeeën?

Hopelijk draagt dit boek bij tot een beter begrip van de oorzaken en gevolgen van de zure regen, zodat een zeer noodzakelijke ombuiging van het menselijk gedrag mogelijk wordt.

september 1984

Prof. Dr. E. H. Adema,
hoogleraar luchthygiëne,
Landbouwhogeschool Wageningen

INLEIDING

Zure regen, het ecologische Hiroshima

Zure regen lijkt Nederland definitief in zijn greep te hebben. In 1982 verschenen in de landelijke dagbladen de eerste mededelingen over bodemverzuring en bossterfte. Sindsdien hebben pers, radio en televisie gezorgd voor een aanzwellende stroom berichten over de grootste milieucatastrofe uit de geschiedenis. De Europese verkiezingen werden in 1984 voor een belangrijk deel uitgevochten rondom het thema zure regen, en de luchtvervuiling groeit onvermijdelijk uit tot het belangrijkste politieke probleem van de jaren tachtig.

Voorboden van wat ons in Nederland te wachten staat zien we in W. Duitsland. Daar demonstreren sinds het begin van de bossterfte jagers en bosbouwers, altijd de meest behoudende en gezagsgetrouwe burgers, met spandoeken tegen de industrie en het overheidsbeleid. Daar worden diverse monsterprocessen tegen de staat en tegen elektriciteitsproducenten gevoerd. Daar organiseren rustige burgers zich in harde actiegroepen, doodsbang dat, na de bomen, hun kinderen door verstikking zullen sterven. Een toeneming van pseudo-kroep, een oorzaak van wiegedood, verstoort bij onze Duitse burens de vreugde van het ouderschap.

Wiegedood door luchtverontreiniging speelt in Nederland geen rol, zeggen deskundigen nu. Maar in 1982 verklaarden andere deskundigen met even grote stelligheid dat onze bossen in geen enkel opzicht waren aangetast. De berichten die daarover de ronde deden waren volgens de betrokken overheidsinstanties volstrekt onjuist. Nauwelijks anderhalf jaar later kwamen diezelfde instanties tot de conclusie dat in het Nederlandse bos negen van de tien bomen ziek waren. Nog een jaar later is het bos zo ernstig aangetast dat een grootschalig afsterven onvermijdelijk is.

De schade aan metalen, constructies en apparatuur lijkt nu nog beperkt, maar in ons land is nog amper onderzoek gedaan naar de werkelijke schade. Tot nu toe levert elke inventarisatie onaangename verrassingen op. Naar aanleiding van enkele catastrofale ongelukken zijn in de Verenigde Staten alle stalen bruggen onderzocht op metaalmoeheid. Het bleek dat al die bruggen wegens roest en metaalmoeheid onbetrouwbaar waren en binnen vijf jaar vervangen moesten worden. Ook werd na onderzoek duidelijk dat het neerstorten van enkele Amerikaanse gevechtsvliegtuigen zou kunnen zijn veroorzaakt door corrosie en metaalmoeheid ten gevolge van luchtveront-

reiniging. Er is geen reden om aan te nemen dat roestvorming in Amerika anders verloopt dan in Nederland.

Betonrot is in Nederland alleen becijferd aan de hand van de herstelkosten van balkonnetjes en flatgalerijen. Voor een half miljard worden de scheuren opgevuld of bedekt met een frisse laag beton. Dit gebeurt ook met andere, dragende, constructies. Als na enkele jaren de mortel opnieuw uit de scheuren valt, krabt men de barsten iets dieper uit en wordt het pleisterwerk herhaald. Niemand kan weten wat er aan haarscheuren niet is gerepareerd en in hoeverre de treksterkte van het beton is verminderd door de roestvorming op de wapening. Het wachten is op de eerste catastrofes, dan is te zien wat de werkelijke aard van de aantasting is.

De kosten van twijfel

Zolang niet elke wetenschappelijke twijfel is verdwenen, wordt van overheidswegen geen actie ondernomen. Het recente structuurschema voor de drinkwatervoorziening bijvoorbeeld rept geen woord over de grootschalige verzuring van het grondwater. Toch bestreed de directeur van de WAPROG, ir. K. D. Venhuizen, in 1983 op de jaarvergadering van de Vereniging van Exploitanten van Waterleidingbedrijven, het schijnbaar onverwachte karakter van de zure regen. Volgens hem hadden wij, mensen, die zo knap zijn in het uitdenken van de meest geavanceerde technieken en in het uitwerken van de ingewikkeldste denkpatronen, beter moeten weten. 'We wisten natuurlijk ook wel beter,' schreef hij, 'maar vervielen voor de zoveelste keer in onze standaardfout: niet doordenken van A tot Z maar ophouden bij de letter K van kortzichtigheid. We zullen ons er nu terdege van bewust moeten zijn, dat ons thans de rekening van onze explosieve industrialisatie wordt gepresenteerd. En reken er maar op, dat wij die rekening zullen moeten betalen. Wat mij dan steeds weer frappeert is, dat onze bestuurlijke instanties, die nauw betrokken zijn bij het aangeven van wat wel of wat niet toelaatbaar is, zeer vernuftig zijn in het stellen van normen.' Venhuizen begrijpt best dat deze normen gebaseerd zijn op datgene wat maatschappelijk en politiek al dan niet haalbaar is. Toch is hij van mening dat wij bij de luchtverontreiniging te maken hebben met een verschijnsel dat ver uitgaat boven andere vormen van vervuiling en dat letterlijk en figuurlijk verstrekkende gevolgen heeft.

Nederland vervuult bewust

Inderdaad blijkt de overheid heel goed te weten wat de risico's van de

luchtverontreiniging zijn. Daarom nam in april 1979 dr. L. Ginjaar, minister van Volksgezondheid en Milieuhygiëne, in de ministerraad van de EG het initiatief tot een daadwerkelijke aanpak van de luchtverontreiniging. Volgens een werkdocument van zijn ministerie zou de zwavelemissie in ons land tot het jaar 2000 met het vier- tot zeven-voudige stijgen. Daardoor zou niet uitgesloten zijn dat de in Scandinavië opgetreden verzuring zich ook elders in Europa zou voordoen. Het emissiebeleid moest volgens dit document streven naar het zo-veel mogelijk handhaven van het emissieplafond van 500000 ton zwaveldioxide per jaar en een luchtkwaliteitsnorm van 75 microgram per kubieke meter. De regering wees er echter op dat deze norm in de eerste plaats gericht was op de gezondheid van de mens en dat de

Wereldgezondheidsorganisatie een strengere waarde aanbeveelt, namelijk 60 microgram per kubieke meter. Voor de bescherming van flora en fauna zouden nog strengere waarden nodig zijn volgens de bewindsman.

Om zijn beleidsstreven te onderbouwen, is door Ginjaar in oktober 1979 het SO₂-beleidskaderplan aan de Tweede Kamer aangeboden, een belangwekkend geschrift dat onomwonden de schaderisico's onderstreept. Er wordt in vermeld dat onderzoekers hebben aangetoond dat beschadiging of groeivermindering van zowel naald- als loof-bomen is vastgesteld bij een jaargemiddelde in de lucht van 30-40 microgram zwaveldioxide per kubieke meter. Verwezen werd naar Duitse commissies die in verband met de herziening van de Duitse wetgeving ter bescherming van planten en dieren een gehalte van 20 microgram als jaargemiddelde toelaatbaar achtten. In het beleids-kaderplan onderstreept de minister de noodzaak een luchtkwaliteits-norm van 30 microgram (als 50-percentiel, dwz. die waarde waarbij minimaal 50% van de controlemetingen lager, en maximaal 50% van de controlemetingen hoger uitvalt) te hanteren ter bescherming van de flora in de natuurgebieden. Daarmee zou tevens schade aan cultuurgewassen worden voorkomen. Het zou volgens de bewindsman echter duidelijk zijn dat met deze norm geen zekerheid voor een afdoende bescherming van het milieu wordt verkregen. Verdieping van de inzichten zou in de toekomst mogelijk tot aanpassing van de genoemde waarden moeten leiden. Deze inzichten zijn in de navolgende jaren op dramatische wijze verdiept, niet zozeer door wetenschappelijk onderzoek als wel door een explosieve toeneming van de schade.

Ginjaar kon in 1980 de omvang van zijn gelijk nog niet vermoeden. Hij verwoordt daarom zijn beleid, samengevat, als volgt: 'Het is onontkoombaar enige verontreiniging te aanvaarden. Aantasting van de flora moet geacht worden te beginnen bij een zwaveldioxideconcen-

tratie van circa 30 microgram per kubieke meter lucht*. Deze waarde moet gelden voor natuurgebieden. In de dichtbevolkte en geïndustrialiseerde gebieden is het natuurlijk milieu ook door vele andere oorzaken in sterke mate verdrongen. Ook voor deze gebieden is het gewenst de verontreiniging zoveel mogelijk terug te dringen. Gezien de feitelijke situatie en de mogelijkheden deze op korte termijn te verbeteren moet hier voorlopig als uiterste grens van verontreiniging die voor de bescherming van de volksgezondheid worden gehanteerd. De richtlijn voor een luchtkwaliteitsnorm hiervoor is 75 microgram/m³.¹ In feite onderbouwde het SO₂-beleidskaderplan achteraf het eerder geformuleerde beleid, namelijk een stabilisering van de SO₂-emissies op 500000 ton per jaar.

Het trieste was dat de regering dus in 1980 op grond van de feitelijke bestaande situatie een beleidsnorm vaststelde op een niveau dat tweeëneenhalf maal hoger lag dan het verontreinigingsniveau waarop zij schade aan flora en fauna bewezen achtte. Deze norm bleek enkele kabinetten te kunnen overleven. Stabilisering van de zwaveldioxide-uitworp op 500000 ton per jaar werd tot in 1983 gepresenteerd als een doelmatige maatregel voor de korte termijn.

In 1984 meldt P. Winsemius, toen de verantwoordelijke minister, aan de Tweede Kamer dat er geen aanleiding is de tot nu toe bij de beleidsvoering gehanteerde grenswaarde ter bescherming van de bevolking te herzien. De bestaande luchtkwaliteitsnorm van 75 microgram/m³ kon worden gehandhaafd. De tot nu toe gehanteerde waarde voor bescherming van de flora in natuurgebieden van 30 microgram/m³ was naar zijn oordeel waarschijnlijk niet streng genoeg om schade aan planten te voorkomen. Dit laatste was voor Winsemius echter geen aanleiding om de norm direct bij te stellen van 75 tot minder dan 30 microgram zwaveldioxide per kubieke meter lucht.

Het probleem van de verzuring gaf volgens de minister wel aanleiding om het uitworpplafond van 500000 ton SO₂ te 'heroverwegen'. 'In de toekomst' zou op basis van de huidige globale inzichten in de verzuring de SO₂-depositie moeten worden verlaagd tot aanzienlijk kleinere waarden. Voor Europa zou een verlaging met een factor drie à vier nodig zijn, een reductie met 65-75% dus. De minister hanteerde echter een rekenmethode waarbij de emissie evenredig wordt verdeeld per inwoner van Noordwest-Europa. Hierdoor zou ons dichtbevolkte land recht hebben op een emissie van 350000 ton SO₂ per jaar. Nederland hoefde de zwavelemissies daarom maar met 30% te verminderen. Een eerste stap in deze richting noemde Winsemius het

* Tenzij anders vermeld, geldt bij luchtkwaliteitsnormen de 50-percentielwaarde, dwz. die waarde die in 50% van de metingen wordt overschreden (noot van de schrijver).

bijstellen van het Nederlandse emissieplafond van 500.000 ton tot 475.000 ton per jaar, een reductie van slechts 5%. De omvang van de huidige emissie en de voorspellingen van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS) deden volgens de minister veronderstellen dat het bestaande programma van maatregelen tot een realistische uitvoering van dezetaakstelling zou leiden.

Een merkwaardig contrast met de hoogte van het emissieplafond vormende berekeningen die het Centraal Bureau voor de Statistiek maakte van de werkelijke zwaveldioxide-uitstoot. Herhaalde malen is een poging gedaan om de totale emissie van zwaveldioxide in 1980 te berekenen. Daarbij is de berekende uitworp van dat jaar gezakt van 500.000 tot 450.000 ton en volgens sommigen zou de uitworp nog lager zijn geweest. De emissies blijken slechts met een grove on-nauwkeurigheid te kunnen worden berekend. In dit geval met een mogelijke afwijking van 10%. Overigens wordt bij dit type metingen en de daaruit voortvloeiende berekeningen een afwijking van 20% nog als normaal gezien. Controle op een verlaging van het emissie-plafond is daardoor erg moeilijk. Rie de Boois, fractiewoordvoester inzake milieu van de Partij van de Arbeid, noemt de ervaringen met het emissieplafond uit het eerste Indicatieve Meerjarenplan Lucht slecht.

Verder heeft het CBS berekend dat de zwaveldioxide-uitworp van stationaire installaties, elektriciteitscentrales en andere grote vuurhaarden, in 1982 met 19% en in 1983 met 25% is gezakt. Omdat deze installaties 70% van de totale uitworp voor hun rekening nemen, is de totale emissie van zwaveldioxide in 1983, ten opzichte van 1980, met ten minste 30% afgenomen. De totale emissie ligt, zelfs als de hoogste schatting van het referentiejaar 1980 wordt aangenomen, 30% onder het door de regering gestelde emissieplafond.

Men zal zich na de berekeningen van het CBS afvragen waarom Winsemius een verlaging van het emissieplafond van een oncontroleerbare 5% aan de Tweede Kamer als beleidsombuiging voorlegt, maar vooral waarom Winsemius in 1984 zo'n enorme publiciteit heeft gegeven aan het Verdrag van Ottawa. De minister van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer tekende daar namelijk samen met tien andere landen een verdrag om binnen tien jaar de emissies van SO_2 ten opzichte van 1980 met 30% te verminderen, een streven dat in Nederland al lang en breed is gehaald. Aangenomen dat de minister op de hoogte is van de feiten, was de ondertekening van het verdrag een aardige demonstratie, maar verder een volstrekt leeg gebaar.

1. HISTORIE

Van bossterfte tot wiegedood

Door de gedramatiseerde berichtgeving over de gevolgen van zure regen wordt valselijk de indruk gewekt dat het om een nieuw, pas ontdekt verschijnsel gaat. Niets is minder waar. De globale effecten op materialen, vegetatie en gezondheid waren al in de vorige eeuw bekend. Onlangs sloeg ik, zoekend naar een duidelijke beschrijving van bepaalde schadebeelden, een handboek over planteziekten op uit het jaar 1909. De auteur van dit boek, P. Soraurer, verontschuldigde zich dat hij maar een beperkt aantal schadebeelden ten gevolge van zwaveldioxide behandelde. De reden was dat er al zo veel boeken over schadebeelden door zwavelhoudende rookgassen waren; 'immers, de beschrijving van deze schade vormde zo langzamerhand een aparte tak van de leer der planteziekten,' schreef hij. Kennelijk was dit aan het eind van de jaren zeventig een vergeten tak van de wetenschap, want niemand heeft toen de toeneming van die schadebeelden herkend.

De term 'zure regen' raakte in de jaren zeventig binnen een kleine kring van wetenschappers weliswaar weer bekend, maar het duurde tot 1982 voordat hij bij het grote publiek ingeburgerd raakte. Niet de kennis van de schade, maar de dramatische toeneming van de schade is er de oorzaak van dat de term 'zure regen' zich ontwikkelde van een curieus wetenschappelijk begrip tot een volksuitdrukking waarmee bijna het totaal van de luchtverontreiniging wordt bedoeld.

Robert Smith

Veel verschijnselen die door zure regen worden veroorzaakt zijn meer dan 130 jaar geleden ontdekt door de Engelse chemicus Robert Agnus Smith (Cowly, 1982). In 1852 publiceerde Smith een gedetailleerd rapport over de chemische eigenschappen van de regen in en rondom de toen al zwaar geïndustrialiseerde stad Manchester. In dit rapport vestigde hij de aandacht op het feit dat de chemische samenstelling van de regen, gaande vanuit het centrum van de vervuilde stad naar de landelijke omgeving, veranderde. 'We treffen zo drie soorten lucht aan,' schrijft hij, 'lucht met ammoniumcarbonaat op het platteland, lucht met ammoniumsulfaat in de voorsteden en lucht met zwavelzuur in de stad.' Smith wees erop dat het zwavelzuur in de stad de kleuren van textiel aantastte en metalen deed roesten.

Twintig jaar later gebruikt Smith in het opmerkelijke boek *Air and Rain: The Beginnings of Chemical Climatology* voor het eerst de term 'zure regen'. In dit boek beschreef hij veel van de belangrijkste basale processen en deze vormen nog steeds de grondslag voor ons tegenwoordige begrip van zure regen. Op grond van gedetailleerd onderzoek toonde Smith aan dat de chemische eigenschappen van de regen in Schotland, Engeland en Duitsland regionaal werden beïnvloed door de verbranding van kolen en de vertering van organisch materiaal. Het enige verschil met de huidige beïnvloeding door verbranding van olie en kolen en door de mestproductie was het toen nog plaatselijke karakter. Smith beschreef ook de schade door zure regen aan planten en materialen en hij constateerde eveneens de neerslag van arseen, koper en andere metalen in geïndustrialiseerde gebieden.

Ongelukkig genoeg is Smiths pionierende en bijna profetische boek klaarblijkelijk door veel volgende onderzoekers over het hoofd gezien. Pas in 1980 heeft de Amerikaanse National Academy of Sciences een gedetailleerde analyse van het werk van Smith laten maken door de bijna even opmerkelijke pionier prof. Evil Gorham.

Pioniers van de 20ste eeuw

De huidige kennis aangaande de milieugevolgen van zure regen heeft zijn oorsprong in enkele heel verschillende takken van wetenschap: het ecologisch onderzoek van meren, de bos- en de landbouw en de bestudering van atmosferische processen.

Het verband tussen de chemische samenstelling van de regen en de chemische veranderingen in het zoete oppervlaktewater bleef tot het midden van de twintigste eeuw onduidelijk. In de eerste helft van deze eeuw bestudeerden verscheidene Europese en Amerikaanse wetenschappers een groot aantal op zichzelf staande aspecten van chemische processen in de atmosfeer en de oppervlaktewateren. Zelden werden er verbanden geconstateerd, maar ten slotte ontwikkelde Evil Gorham, professor in de ecologie in Minnesota, de hoofdlijnen van onze huidige kennis van de gevolgen van zure regen voor het leven in meren. Vanaf het begin van de jaren vijftig heeft hij hierover een omvangrijke serie rapporten doen verschijnen. Op basis van onderzoek in Engeland en Canada bewezen Gorham en zijn collega's de volgende hypothesen.

1. De zuurgraad van de regen is in geïndustrialiseerde landen grotendeels te wijten aan de emissies bij de verbranding van fossiele brandstoffen (gas, kolen, olie).
2. Een toenemende verzuring van meren en vennen wordt veroor-

zaakt door de neerslag van zure stoffen uit de atmosfeer.

3. Veel van het vrije zuur in bodems die zure neerslag ontvangen wordt veroorzaakt door zwavelzuur.

4. De mate waarin bronchitis voorkomt bij de plaatselijke bevolking komt overeen met de zuurgraad van de regen.

5. Depositie van zwaveldioxide in de nabijheid van ertssmelters draagt bij tot de aantasting van vegetaties, bodems en water in meren. Zo is in het midden van de jaren vijftig tot het begin van de jaren zestig de basis gelegd voor onze huidige kennis van de oorzaak en de ecologische gevolgen van zure regen. Helaas stuiten deze pionierende onderzoeken, evenals die van Smith een eeuw tevoren, op een muur van stilzwigen, zowel in wetenschappelijke als in publieke en politieke kringen. Doordat men niet de consequenties van het werk van Gorham onderkende, verwijdde zich de kloof tussen het wetenschappelijke bewustzijn inzake de zure regen en de ecologische betekenis daarvan enerzijds en het gebrek aan kennis bij het publiek anderzijds.

Het belang van de atmosfeer als bron van plantenvoedende stoffen werd het eerst onderkend door Robert Hooke in 1687. Van 1855 tot 1916 hebben Engelse wetenschappers van het onderzoeksstation te Rothamsted bepaald welke waarde in de lucht zwevende stoffen als bemesting voor landbouwgewassen hebben. In het midden van de jaren veertig begon de Zweedse bodemkundige Hans Egnér, een man met een rijk voorstellingsvermogen, een systematisch onderzoek naar de waarde van nutriënten uit de lucht voor de groei van gewassen. Vanuit zijn laboratorium op de Landbouwhogeschool van Uppsala schiep Egnér vanaf 1948 het eerste twintigste-eeuwse netwerk voor het verzamelen en chemisch analyseren van lucht en regenwater. Een groot aantal regenvangers werd in heel Zweden uitgezet en de belangrijkste chemische bestanddelen werden maandelijks gemeten. Ook werd daarbij de zuurgraad bepaald. Het meetnetwerk dat door Egnér was opgezet werd geleidelijk door andere wetenschappers uitgebreid, eerst over Noorwegen, Denemarken en Finland, later over de meeste West- en Middeneuropese landen. Dit netwerk leverde de eerste gegevens over de veranderingen in de chemische samenstelling van lucht en regen en de betekenis daarvan voor land- en bosbouw op nationale en Europese schaal en gedurende een lange periode. Voor het eerst werd het mogelijk een beeld te krijgen van de verschillen in de luchtvervuiling over heel Europa en van de toeneming van de vervuiling over een aantal jaren. In 1956 nam het Internationaal Meteorologisch Instituut te Stockholm de coördinatie op zich van de uitbreiding van Egnérs netwerk over Europa.

Met dit meetnet voor onderzoek naar de chemie van de atmosfeer, dat in 1957 in het kader van het Internationaal Geofysisch Jaar werd uitgebreid over Polen en een groot deel van de Sovjet-Unie, zijn nu gedurende vijfendertig jaar onafgebroken gegevens verzameld. Onlangs is als permanent samenwerkingsverband voor meting en onderzoek van grensoverschrijdende luchtvervuiling de EMEP opgericht, die onder toezicht staat van de Economische Commissie voor Europa, een organisatie van de Verenigde Naties.

Chemische oorlog

Een van de eersten die de kennis over zure regen vanuit de verschillende takken van wetenschap integreerde was Svante Odén, een bodemkundige van de Landbouwhogeschool van Uppsala en een jongere collega van Egnér. Hij begon in 1961 een meetnet op te zetten om de chemische veranderingen in het water van de Zweedse meren te volgen. Toen de gegevens van dit netwerk gecombineerd werden met die van het Europese luchtmeetnet, kwam een aantal verrassende verbanden aan het licht. De publikaties van Odén in Stockholms gezaghebbende nieuwsblad *Dagens Nyheter* zorgden in 1967 voor grote opschudding. Het blad beschreef op grond van Odéns ideeën de grensoverschrijdende luchtverontreiniging als een geniepige chemische oorlog tussen de landen van Europa. Toen eenmaal de aandacht van de pers getrokken was, begon een langdurig proces van publieke bewustwording van het verschijnsel zure regen. Ook in wetenschappelijke kringen ontstond een heftige discussie over Odéns ongewone theorieën. Odéns analyse van de aard en het transport van chemische verontreiniging door de lucht bewees onomstotelijk dat: 1. zowel zwavel- als stikstofoxiden met winden over afstanden van honderden tot duizenden kilometers over Europa worden vervoerd, 2. zure regen een verschijnsel is op Europese schaal, waarbij duidelijk sprake is van exporterende en importerende landen, en 3. zowel de regen als het oppervlaktewater steeds zuurder wordt. Odén opperde ook een aantal veronderstellingen over de ecologische gevolgen van zure regen, zoals het afsterven van vispopulaties, het verminderen van de bosproductie, het toenemen van planteziekten en een versnelde aantasting van materialen.

Deze veronderstellingen leidden werkelijk tot een hausse in de wetenschappelijke en publieke aandacht voor zure regen. De Zweedse overheid reageerde op de groeiende bezorgdheid door het onderzoek te stimuleren. Dit resulteerde in een onderzoek voor de Verenigde Naties getiteld: *Luchtvervuiling over de nationale grenzen: de invloed van zwavel in lucht en regen*.

Wegens het grensoverschrijdend karakter van de zure regen begonnen ook andere landen met onderzoek. In Noorwegen werd het later geruchtmakende SNSF-project, een interdisciplinair onderzoeksprogramma naar de gevolgen van zure regen voor bossen, bodems, vissen en meren, gestart. Dit programma, onder supervisie van het Noorse ministerie van Milieu, beschikte vanaf 1972 over een jaarlijks budget van 6 miljoen gulden. Het werd afgesloten in 1980.

Een tweede belangrijk onderzoek dat buiten Zweden werd gestart betrof de zogenaamde OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), een onderzoek dat moest voorzien in kwantitatieve gegevens over het grensoverschrijdend transport en de depositie van zwavelverbindingen. Het resultaat van dit onderzoek, dat in 1977 werd gepubliceerd, bevestigde veel van de veronderstellingen zoals Odèn die in het Stockholmse nieuwsblad had laten publiceren.

Kritiek

De ideeën van Odèn kregen niet alleen bijval maar ondervonden ook heftige kritiek. Vanuit de landen die voor een groot deel verantwoordelijk waren voor de zure regen in Zweden (het land importeert driekwart van zijn zwaveldepositie) klonk zo'n heftig en overhaast protest dat de grensoverschrijdende luchtvervuiling inderdaad de sfeer kreeg van een geniepige chemische oorlogvoering. Zo kregen de Zweden te horen dat ze zelf verantwoordelijk zijn voor de verzuring van bossen en meren, door hun verkeerde manier van bosbouw en doordat hun papierindustrie het water met zwavelzuur vervuult. Maar er kwam ook felle kritiek vanuit Scandinavië zelf.

Prof. Rosenqvist van de Universiteit van Oslo heeft als een Don Quichot de zure regen als oorzaak van de verzuring van de Scandinavische meren bestreden. Hij bevocht met een waarlijke geloofsijver de stelling van Odèn tot voor het Europese Parlement in 1983 – dit in een tijd dat het al een onomstreden feit was dat miljoenen hectaren bos in West-Europa door dezelfde zure regen waren aangetast.

'Het is mogelijk,' zegt Rosenqvist (1983), 'de hoeveelheid zuur die sedert de IJstijd door een bepaald bodemprofiel is gepercoleerd, te berekenen aan de hand van chemische veranderingen. Uit die berekeningen wordt duidelijk dat sinds de IJstijd jaarlijks tweemaal zoveel zuur door het bodemprofiel is gestroomd als nu jaarlijks met de zure regen op de bodems in Zuid-Zweden valt. Daarom kan zure regen nooit de oorzaak zijn van de verzuring. Het is wel typerend,' zegt hij, 'dat bijna alle verzuurde meren zich bevinden in gebieden met van oudsher verzuurde bodems.' Dat de huidige verzuring van het water in die meren samenvalt met een grote toeneming van de

zure luchtverontreiniging, is volgens hem maar toeval. De verzuring zou eigenlijk al eerder zijn begonnen dan de toeneming van het zwavelgehalte in de Scandinavische lucht. Rosenqvist wijt de verzuring aan de grote hoeveelheid zuur die wordt geproduceerd uit de zich ophopende humuslaag. De humus ontstond recent door het plotse-ling stopzetten van de begrazing in uitgestrekte gebieden bovenstrooms van de meren. Hij verwijst hiervoor naar twee onderzoeken van collega's.

In de eerste plaats wordt verwezen naar Frode Berge, die in Zuid-Noorwegen het Langtjernmeer heeft bestudeerd. Berge onderzocht de verschillende lagen slib die zich gedurende duizenden jaren op de meerbodem hebben afgezet. In deze slibafzettingen bevinden zich de fossiele skeletjes van kiezelwieren. Nu bevat zoet water bij een bepaalde zuurgraad altijd een combinatie van soorten kiezelwieren die heel kenmerkend voor die zuurgraad zijn. Doordat de oudere sliblagen altijd onder jongere zitten, geven de lagen een beeld van opeenvolgende perioden. Door in elke laag aan de hand van kiezelskeletjes de vroegere zuurgraad te bepalen, kan de veranderende zuurgraad tot in het verre verleden worden gevolgd.

Berge toonde aan dat de bovenste twee centimeter slib gekenmerkt worden door meer zuurminnende soorten dan de daaronder gelegen lagen. Dit wees op een nogal recente verzuring. Maar op een diepte van 78-79 centimeter vond hij een flora van kiezelwieren die bij een nog veel zuurder milieu hoort. Ongelukkig genoeg beschikte Berge niet over een absolute datering van de sliblagen, maar als de bovenste laag van twee centimeter de recente verzuring vertegenwoordigt, kunnen we volgens Rosenqvist aannemen dat de diepere laag uit de middeleeuwen stamt. Bij gebrek aan andere gegevens zou men kunnen veronderstellen dat deze laag ongeveer de tijd van de grote pest vertegenwoordigt. In die tijd stierf een groot deel van de bevolking en daarna bleef het boerenland meer dan honderd jaar onbewoond. Deze omstandigheid komt overeen met het wegvallen van de begrazing in de twintigste eeuw.

De tweede collega naar wie Rosenqvist verwees was Helge Hoeg, die de historische samenstelling van de vegetatie in het Storgamma-gebied onderzocht. Een methode om een beeld van het verleden te krijgen is het onderzoek van fossiele stuifmeelkorrels, het pollen-onderzoek. Stuifmeelkorrels worden door de wind over zekere afstand verspreid en wanneer ze in het veen terechtkomen, worden ze daar geconserveerd. Stuifmeelkorrels van heel nauw verwante planten lijken op elkaar, maar die van minder verwante soorten zijn heel goed van elkaar te onderscheiden. Door stuifmeelonderzoek van de verschillende veenlagen kan een indruk worden verkregen van de

soortensamenstelling van de vegetatie in de streek rondom het veen. Die samenstelling wordt beïnvloed door de zuurgraad van de bodem en door de menselijke exploitatie van het gebied. Hoeg toonde in 1980 aan dat deze streek al gedurende 4700 jaar in gebruik was als weidegebied. De menselijke exploitatie vertoonde slechts twee lange onderbrekingen, de ene zo'n 1500 jaar geleden en de andere in de middeleeuwen. Hij schreef deze onderbrekingen toe aan de Justiniaanse pest in de laat-romeinse tijd en aan de grote pestepidemie in de middeleeuwen. Ook gedurende de laatste tweehonderd jaar verdween de samenstelling van stuifmeelkorrels die karakteristiek is voor beweide gebieden, en na het stoppen van de beweiding leek de samenstelling van de stuifmeelkorrels te wijzen op de geleidelijke invasie van bossen in het onderzoeksgebied.

Volgens Rosenqvist houdt dit in dat de biomassa en de hoeveelheid dood organisch materiaal (humus) in een tamelijk recent verleden zijn toegenomen. Dit heeft volgens hem een enorm verzurend effect en deze theorie zou worden ondersteund door de gevolgen van recente bosbranden voor de zuurgraad van enkele meren. In augustus van het droge jaar 1976 woedde een hevige bosbrand in een deel van Telemark, een gebied met zure bodems en met sinds de Tweede Wereldoorlog erg verzuurde meren. Niet alleen de levende vegetatie verbrandde maar ook de hele humuslaag. In 1983, nadat alle as was uitgeloogd, bleek het water in de bergmeentjes en stroompjes nagenoeg neutraal, zelfs in perioden met heel zure regenval. De zuurconcentratie (de concentratie protonen of positief geladen waterstofionen – de H^+ -concentratie) is tot 2000 maal lager dan in vergelijkbare watertjes buiten het verbrande gebied (een pH-verschil van iets meer dan 3).

Het verhaal van Rosenqvist klopt voor zover hij veronderstelt dat de exploitatie van een gebied de bodem kan verzuren. Eigenlijk zorgt elke extreme exploitatievorm in ons klimaat voor een versnelde bodemverzuring. We kennen dit verschijnsel van de heidevelden, die door overbegrazing zo verzuurden dat zelfs het ijzer naar diepere lagen uitspoelde en daar onder minder zure omstandigheden de zandkorrels tot een ondoordringbare laag deed aaneenkitten. Helemaal niet-begraasde heidevelden, het andere uiterste, blijken nog erger te verzuren. Ook bepaalde vormen van bosbouw, vooral met naaldbomen, werken verzurend op de bodem. Dit is de Scandinavische landen dan ook lang verweten, evenals het overvloedig gebruik van bodemverzurende kunstmeststoffen, bijvoorbeeld ureum. Toch is men in wetenschappelijke kringen bijna unaniem tot de overtuiging gekomen dat de zure regen een sleutelrol speelt bij de verzuring van bodems en oppervlaktewateren en dat deze rol vele malen groter is

dan die van organisch gevormde zuren. Een instituut dat met de wetenschappelijke onderbouwing van deze stelling wereldfaam heeft verworven is de Universiteit van Göttingen.

Voorspelling en ongelooft

In dezelfde jaren dat in Zweden de eerste theorieën omtrent de waarde van de luchtverontreiniging rijpten, startte in Duitsland het Solling-project. De Solling is het grootste aaneengesloten bosgebied van de Bondsrepubliek en onder leiding van de beroemde ecoloog prof. H. Ellenberg werd dit bos gekozen als onderzoeksgebied in het kader van het internationale biologische programma van de UNESCO.

Een onderdeel van dit programma vormt het onderzoek naar de invloed van de mineralenhuishouding op de bodemchemie en de ontwikkeling van het wortelstelsel. Dit onderzoek, dat wordt verricht door de Universiteit van Göttingen, heeft in wetenschappelijke kringen wereldfaam verworven, omdat hier in een heel vroeg stadium, nog voor er sprake was van bossterfte, de essentiële kennis werd verkregen aangaande een proces dat nu een catastrofale afloop dreigt te krijgen. Een sleutel tot begrip van de bossterfte ten gevolge van luchtverontreiniging bleek het onderzoek van prof. B. Ulrich van het Institut für Bodenkunde und Waldernährung te zijn. De metingen van de luchtverontreiniging en de werking daarvan op het boscossysteem begonnen in de Solling al in de jaren zestig.

Hoewel het begrip zure regen al veel eerder door Engelse onderzoekers was geformuleerd en ook de giftigheid van vrij aluminium in zure bodems al in 1927 door Mevius was bewezen, is Ulrich ongetwijfeld de eerste die de gevolgen van luchtvervuiling op het hele boscossysteem heeft doorvoorst (Niemeyer, 1983).

Bij mijn bezoek in 1983 vertelde Ulrich mij dat hij door zijn metingen al in de jaren zestig tot de conclusie was gekomen dat de zure regen de vernietiging van de Duitse bossen zou veroorzaken. Er viel tien- tot honderdmaal zoveel zuur op de bossen als door de natuurlijke verwerking van bodembestanddelen geneutraliseerd kon worden. Hierdoor verzuurde de bodem, spoelden essentiële voedingszouten eruit en losten steeds meer giftige metalen, met name aluminium, op in het bodemvocht. Bij een onafgebroken voortzetting van dit proces zou binnen enkele decennia gebrek ontstaan aan magnesium en kalium, twee voor bomen onmisbare elementen, en tegelijkertijd zou het bodemvocht, door een toenemend gehalte aan oplosbaar aluminium, giftig worden voor de wortels. De laatste jaren blijkt de bodem inderdaad in steeds sterkere mate te verzuren. Speciaal als na een droge periode veel regen valt, ontstaat een zogenaamde zure schok in de

bodem. Dan wordt door de op dat moment plotseling toegenomen vertering van organisch materiaal veel zuur in de bodem gevormd. De bodem heeft echter zijn capaciteit om dit zuur te bufferen verloren.

Juist tijdens deze zure schok sterven de kleine wortels af. Deze kunnen zich weliswaar snel regenereren, maar dit gaat ten koste van de diktegroei van de bomen. Momenteel blijken de bomen hun kleine wortels, die normaal jaren oud kunnen worden, vaak enkele malen per jaar te moeten vernieuwen. Bij een voortgaande verzuring wordt het herstel steeds moeilijker en uiteindelijk leidt dit proces tot boomsterfte. Een ander verontrustend verschijnsel is de groeiende hoeveelheid cadmium in de bast van bomen. Dit giftig metaal wordt waar- schijnlijk direct vanuit de lucht en de regen opgenomen.

Hoewel Ulrich al langer dan tien jaar waarschuwde voor de komende catastrofe, heeft men in Duitsland in het geheel niet naar hem geluisterd. Men wilde hem eenvoudig niet geloven, vanwege de verstrekkende maatschappelijke gevolgen die de erkenning van Ulrichs bevindingen zou hebben voor de politiek en de industrie. Nu was het echter te laat. Voor de bossterfte staat de klok niet op vijf minuten voor twaalf, evenmin op vijf minuten na twaalf, maar al op twintig jaar na twaalf.

Epidemische bossterfte

Ondertussen was in de Oostbloklanden in het midden van de jaren zeventig het bos over zeer omvangrijke gebieden ziek geworden. In het Tsjechische ertsgebergte stierven plotseling honderdduizenden hectaren bos af. Dit leidde tot ontvolking van hele streken wegens het wegvallen van de bestaansmogelijkheden.

Het duurde tot 1980 voor men zich in Duitsland algemeen bewust begon te worden van een zich voltrekkende nationale ramp. Al heel lang werd na droge zomers een groot naaldverlies bij sparren vastgesteld, wat gepaard ging met het afsterven van een gering aantal bomen. Het bos herstelde zich echter vanzelf. Maar na de droge zomer van 1976 bleek het bosherstel, na verloop van enkele jaren, te zijn uitgebleven, terwijl het kwijnen en afsterven van bomen, ook in vochtiger jaren, gewoon doorgingen.

Omstreeks 1980 begon in West-Duitsland de zilverspar in Beieren massaal af te sterven en deze sterfte breidde zich snel uit over alle deelstaten van de Bondsrepubliek. De zilverspar, die in Duitsland als kerstboom wordt gebruikt, vertegenwoordigt een stuk nationaal sentiment, zodat het daadwerkelijke verlies schokkender op de publieke opinie werkte dan de wetenschappelijke voorspelling van de sterfte. Net toen het leek dat de publieke opinie zich zou neerleggen bij het

verlies van de zilverspar, begon de fijnspar massaal af te sterven en ook deze sterfte werd het eerst waargenomen aan de oostgrens. Het verlies van de fijnspar trof het Duitse volk gevoelig.

Duitsland is voor een derde deel bedekt met bos en daarin is de fijnspar economisch de belangrijkste boom. Bovendien is bos voor Duitsers nauw verbonden met status. Iedereen in Duitsland, of hij nu eigenaar van een supermarkt, dokter of boer is, streeft ernaar een stuk bos in bezit te krijgen, om te laten zien dat hij het in dit leven heeft 'gemaakt', en tevens als een waardevaste pensioenvoorziening. Het kleine bosbezit is hierdoor wijdverspreid in alle lagen van de Duitse samenleving. Toen dan ook in 1982 tijdens de Duitse verkiezingen de Groenen het milieubelang tot een cruciaal punt binnen de politiek maakten, werd de zure regen door alle partijen in hun verkiezingscampagne opgenomen.

Maar ook toen de bossterfte al zeer ernstige vormen had aangenomen, werden de onderzoeksresultaten van Ulrich door andere Duitse wetenschappers nog fel bestreden: het afsterven van de kleine boomwortels zou niet gebeuren door bodemverzuring maar door droogte; bomen zouden eerder sterven aan te hoge ozonconcentraties dan aan bodemverzuring; bossterfte was bovendien geconstateerd op kalkverweringsgronden in het Teutoburger Woud.

Internationale actie

Door verscheidene overkoepelende internationale organisaties, zoals de OESO, de Europese Gemeenschap en de Economische Commissie van Europa, werden ondertussen de eerste voorbereidingen getroffen om in Europees verband tot een vermindering van de zwavel-emissies te komen. Het belangrijkste resultaat daarbij was de overeenkomst van Genève. Deze conventie verplichtte de deelnemende landen en organisaties om het onderzoek van grensoverschrijdende luchtverontreiniging te bevorderen en onderzoeksgegevens uit te wisselen. Het belangrijkste onderdeel van de conventie was de paragraaf waarin de landen de verplichting werd opgelegd een beleid te ontwikkelen dat gericht is op vermindering van de luchtvervuiling. Welke waarde internationaal aan deze overeenkomst werd gehecht, bleek uit het feit dat dit de eerste door de Europese Gemeenschap geratificeerde overeenkomst is die ook door de Oostbloklanden werd getekend (EG, 1981). Deze landen hadden tot dat moment de EG in geen enkel opzicht willen erkennen. Het is daarom des te spijtiger dat, door de hardnekkige tegenwerking van Engeland en de Verenigde Staten, geen akkoord over een eerste verlaging van de zwaveluitstoot met 30% werd bereikt op de OESO-vergadering in 1984. Slechts de

grensoverschrijding van zwavel zou met 30% verlaagd worden. Dit is echter wegens de onnauwkeurigheid van de meetsystemen op geen enkele manier te controleren.

Ook binnen de EG werden talrijke initiatieven genomen. Een sprekend resultaat hiervan is dat alle wettelijke normen die Nederland bezit, of volgens het Indicatief Meerjarenprogramma Lucht nog moet vaststellen, voor bijvoorbeeld de toegelaten verontreiniging door auto's, afkomstig zijn van EG-richtlijnen.

Het Europese Parlement benoemde in 1982, naar aanleiding van Duitse resoluties, het Nederlandse socialistische parlements lid Hemmo Muntingh tot rapporteur inzake zure regen. Zelf kreeg ik van Muntingh de opdracht hem daarbij als beleidsmedewerker te assisteren. Het is overigens opmerkelijk, maar weinig bekend, dat de Nederlandse Stichting Natuur en Milieu deze ontwikkelingen voortdurend op de voet heeft gevolgd. Ze heeft bij monde van Jan Franssen en via het Europees Milieubureau alle voorstellen in EG-verband uitvoerig en deskundig van commentaar voorzien.

Bewustwording in Nederland

Buiten Duitsland en de internationale samenwerkingsverbanden begon in de EG-landen de publieke bewustwording pas veel later, ondanks het duidelijk grensoverschrijdend karakter van de zure regen. In Nederland kwam de bewustwording pas in 1982 op gang. In dat jaar verschenen diverse publikaties van de Vrije Universiteit te Amsterdam. In opdracht van het ministerie van VROM was een schatting gemaakt van de schade door luchtverontreiniging aan verschillende materialen. De potentiële schade zou vele honderden miljoenen gulden bedragen. Ook was de kwaliteit van het grondwater op de Veluwe onderzocht en dit bleek tot op grote diepte verzuurd.

Het was overigens al tientallen jaren bekend dat in Nederland ten gevolge van de luchtverontreiniging talloze korstmossen waren uitgestorven. Ook de vergrassing van de heide en de verdwijning van bepaalde paddestoelen, bijvoorbeeld de cantharel, werden door sommigen toegeschreven aan luchtverontreiniging. Deze feiten waren vanuit het oogpunt van natuurbehoud triest maar economisch van geringe betekenis. Het uitsterven van korstmossen en het vergrassen van de heide hadden daarom in de jaren zestig en zeventig geen politieke of bestuurlijke actie tot gevolg gehad.

In 1982 kwam ik na een veldonderzoek tot drie droevige conclusies. In de eerste plaats bevonden enkele grote boscomplexen in Friesland zich in een vergevorderd stadium van afsterven. In de tweede plaats kwamen de schadebeelden in deze bossen op de rand van het Drent-

se keileemplateau volledig overeen met de symptomen zoals die worden toegeschreven aan luchtverontreiniging en zoals die op dat moment voor de inventarisatie van de Duitse bosschade werden gehanteerd. In de derde plaats leerde een globale steekproef dat op zijn minst twee derde van het Nederlandse bos waarschijnlijk al beschadigd zou zijn. Helaas herhaalde de geschiedenis van de bewustwording zich in ons land vanaf het allereerste begin op dezelfde wijze en in hetzelfde tempo als in Duitsland. Er bleek in 1982 nog nauwelijks aarde te zijn om in te zaaien en niet iedereen was direct overtuigd. De inspectie van Staatsbosbeheer reageerde aanvankelijk zeer ontkennend. Fijnsparren hoorden in Nederland niet thuis en zouden na 30 à 40 jaar op zijn. Ook vanuit het Bosbouwkundig Proefstation 'de Dorschkamp' werd uiterst terughoudend gereageerd. De Nederlandse bodem zou te kalkrijk zijn om de schade te ondervinden en op de Veluwe waren bomen aangeplant die uitstekend tegen de zure gronden daar bestand zouden zijn, zoals fijnspar, grove den, sitka-spar, douglas, berk en zomereik (Blom, 1983). Uit allerlei modellen zou blijken dat de zuurgraad van de bodem per jaar met niet meer dan een honderdste pH daalde, zodat de verzuring pas na vele jaren meetbaar zou zijn. Het was daarom onmogelijk dat de schade door zure regen zou zijn veroorzaakt.

In tegenspraak met de reserve van 'de Dorschkamp' waren de onderzoeksresultaten van dr. N. van Breemen van het Instituut voor Bodemkunde en Geologie van de Landbouwhogeschool Wageningen in samenwerking met het Rijksinstituut voor Natuurbeheer. Zijn onderzoek, dat in dezelfde tijd grote aandacht kreeg, toonde aan dat ten gevolge van de ammoniakvervuiling door de intensieve landbouw en de zwavelverontreiniging door de verbranding van kolen en olie, ammoniumsulfaat in enorme hoeveelheden door het bos uit de lucht werd gefilterd (Van Breemen, 1982). Hierdoor ontvingen bosbodems vier- tot achttmaal zoveel ammoniumsulfaat als bodems buiten het bos. In de bodem werd het ammoniumsulfaat omgezet in zwavelzuur en salpeterzuur. Dit proces zou een sterke bodemverzuring tot gevolg hebben.

Het onderzoek van Van Breemen werd op zijn beurt tegengesproken door prof. Van Diest, eveneens verbonden aan de Landbouwhogeschool, die in het blad *de Boerderij* stellig verklaarde dat ammonium in de zure bosgronden niet in salpeterzuur kon worden omgezet, omdat de bacteriën die in landbouwgronden voor deze omzetting zorgen niet in de zure bosgronden kunnen leven.

Niet alle bosbouwers lieten zich hierdoor geruststellen. Bij een symposium waarop ik samen met prof. E. H. Adema en dr. N. van Breemen op uitnodiging van de Staten van Gelderland een lezing hield,

bleek de zaal niet bomvol te zitten met politici maar met toch bezorgde bosbouwers en boscijneren.

Ook vanuit het ministerie van Volksgezondheid, Ruimtelijke Ordening en Milieuhygiëne, dat ten behoeve van zijn beleidsontwikkeling al een reeks studies over grensoverschrijdende luchtvervuiling financierde, drong men aan op een snel vervolgonderzoek. De Landbouwhogeschool Wageningen en mijn bureau Ecoplan kregen opdracht voor een vervolgstudie.

Mede naar aanleiding van een Tweede-Kamermotie van de PvdA werd met enige voortvarendheid een samenwerkingsverband geschapen tussen het ministerie van VROM en het ministerie van Landbouw en Visserij. Deze samenwerking resulteerde in vijf literatuuronderzoeken en een uitgebreide rapportage aan de Tweede Kamer. Tevens werd in dit verband door Staatsbosbeheer een inventariserend onderzoek naar de vitaliteit van het hele Nederlandse bos gestart. De uitkomst was na inspectie van 1500 bossen schrikbarend.

Staatsbosbeheer noemde het resultaat van de inventarisatie daarom zorgwekkend omdat van de naaldbossen, zelfs van die welke men tot nu toe kende als de vitaalste, meer dan 90% was beschadigd. Bij hantering van de Duitse normen was 100% van de overige naaldbossen ten minste licht beschadigd (Staatsbosbeheer, 1983).

2. WAT IS ZURE REGEN?

Zuur ontstaat en verdwijnt

Zure regen is een weids begrip voor iets dat desastreus is voor ons milieu. Het is in feite een te beperkte term, want het gaat om meer dan regen. Toen de term in de vorige eeuw voor het eerst door Adam Smith werd gebruikt, sloeg deze uitdrukking uitsluitend op het zure karakter van de regen. Smith bepaalde de hoeveelheid zwavelzuur, ammoniumsulfaat en ammoniak in het regenwater. Daarbij constateerde hij dat de regen boven de industriestad Manchester zuur was door de grote hoeveelheid zwavelzuur.

Een korte naam is beter dan een lange omschrijving

De term 'zure regen' schiet om drie redenen te kort. Door het accent te leggen op het zure karakter van de regen wordt valselyk de indruk gewekt dat de zuurgraad van het regenwater bepalend zou zijn voor de schadelijkheid. Dit is maar ten dele waar. Een groot deel van het zuur wordt in het regenwater geneutraliseerd door basen zoals ammonia. Daarmee vermindert de hoeveelheid vuil niet. Het ammoniumsulfaat wordt in de bosbodems snel omgezet in zwavelzuur en salpeterzuur. Door die omvorming is dus een basisch reagerende stof, ammoniak, door binding met zuurstof omgezet in een zuur. Belangrijker dan de zuurgraad van de regen is daarom het potentieel zuurvormend vermogen van de regen.

Een tweede reden waarom de term 'zure regen' te kort schiet is dat de verschillende potentieel zuurvormende stoffen ook in droge lucht voorkomen. De zuren worden pas onder vochtige omstandigheden gevormd uit zwaveldioxide, stikstofoxiden, ammoniak, of het al genoemde ammoniumsulfaat. Dit proces kan overal plaatsvinden waar de stoffen in contact komen met water. De vorming van salpeterzuur uit ammoniak schijnt alleen in de bosbodem plaats te vinden. Ten minste de helft van de zuurvormende stoffen hecht zich zonder tussenkomst van de regen op planten, bodems en materialen. Neerslag van deze stoffen via regen noemt men met een geleerde term 'natte depositie' en neerslag vanuit droge lucht 'droge depositie'.

Een derde reden waarom de populaire term 'zure regen' te kort schiet is het feit dat de schadelijkheid van de luchtverontreiniging niet alleen wordt veroorzaakt door zuren. De zuurvormende stoffen zijn net zo goed schadelijk als hun zure volgprodukten. Bovendien bevatten

lucht en regen talloze andere verontreinigingen, zware metalen, roet, vliegias en fotochemische oxidantia, die helemaal niet zuur zijn. Toch is deze vervuiling onlosmakelijk verbonden met het probleem van de zure regen. Deze luchtvervuiling wordt immers veroorzaakt door dezelfde bronnen. Bovendien ontstaan de schadelijke effecten voor bossen, gezondheid en materialen door samenwerking van alle stoffen.

Hoewel de schadelijke werking door het afsterven van de bossen meer dan duidelijk is, blijkt het in de praktijk onmogelijk de schade in procenten toe te schrijven aan het effect van stoffen afzonderlijk. De gezamenlijke werking is veel groter dan die van de stoffen apart. Het is zelfs zo dat de niveaus van de luchtverontreiniging in de gebieden waar nu de ergste bossterfte wordt waargenomen zo gering zijn, dat in het laboratorium de stoffen afzonderlijk geen schade konden veroorzaken.

Puristen zullen vanwege het bovenbeschrevene altijd moeite houden met de term 'zure regen'. Toch moeten we hem maar accepteren. Hij is over de hele wereld ingeburgerd als een populaire verzamelnaam voor de luchtverontreiniging ten gevolge van het verbranden van kolen, olie en gas en ten gevolge van enkele andere zuurvormende stoffen zoals ammoniak. Het gebruik van de term 'zure regen' voor het geheel van de luchtvervuiling heeft tenminste het voordeel dat een mondvul moeilijke woorden om hetzelfde aan te duiden kan worden vermeden. Politiek of bestuurlijk heeft het geen enkel gevolg. De noodzakelijke bestrijdingsmaatregelen worden er echt niet anders door.

Zuur is geen stof maar een chemische toestand

Zuur is op zichzelf geen stof. Er zijn stoffen die als zuur kunnen reageren doordat ze chemisch actieve waterstof-ionen (H^+) leveren. Zwavelzuur bijvoorbeeld valt in water voor een deel uiteen in sulfaat-ionen met een negatieve elektrische lading en in waterstof-ionen met een positieve lading. Salpeterzuur valt uiteen in negatief geladen nitraat-ionen en positief geladen waterstof-ionen.

Zuurmoleculen vallen in water slechts voor een gering deel uiteen in ionen. Een sterk zuur als zwavelzuur valt voor een groter deel uiteen dan een zwak zuur als koolzuur. De zuurgraad van het water meet men aan de hand van de concentratie vrije waterstof-ionen. Hoe hoger de concentratie, hoe zuurder de oplossing.

De zuurconcentratie, de zogenaamde zuurgraad of pH, wordt uitgedrukt op een voor de leek nauwelijks te volgen wijze. Zelfs een chemicus heeft moeite om desgevraagd prompt te antwoorden dat 'de

zuurgraad (pH) wordt uitgedrukt als de negatieve logaritme van de concentratie van de vrije waterstof-ionen'. Dit precieze begrip is ook niet zo belangrijk. Wel belangrijk is het, te beseffen dat het gaat om een zogenaamde logaritmische schaalverdeling.

Wanneer de pH één schaaldeel zakt, wordt, vanwege het logaritmische karakter van de schaal, de concentratie vrije waterstof-ionen niet eenmaal, maar tienmaal zuurder. Wanneer de zuurgraad drie schaal-delen daalt, van pH 6 naar pH 3, wordt de oplossing dus $10 \times 10 \times 10$ keer, dwz. duizendmaal, zuurder.

Het is belangrijk de volgende waarden aandachtig te lezen, omdat deze bij elk verhaal over verzuring onvermijdelijk gebruikt worden. De schaal loopt van ongeveer 14 tot 1. Daarbij is pH 14 heel erg basisch (alkalisch); pH 7 is neutraal en beneden pH 7 noemt men een oplossing zuur. Beneden pH 6,2 is de vrije kalk uit de bodem verdwenen (dan verdwijnen ook bepaalde kalkminnende organismen). Beneden pH 5 is ook het aan bodemmineralen gebonden calcium grotendeels verdwenen, evenals magnesium en kalium. Wat nog aanwezig is spoelt in snel tempo uit. Veel planten kunnen dan niet meer voldoende voedingsstoffen verzamelen en verdwijnen, evenals een groot aantal diersoorten. In een humusarme omgeving kan beneden pH 5 aluminiumvergiftiging optreden. Beneden pH 4 treedt algemene vergiftiging op door vrije aluminium-ionen en ionen van andere metalen. Alleen een zeer gering aantal tolerante organismen kan nog overleven.

Kennis van het logaritmische karakter van de schaalverdeling is belangrijk als men een gemiddelde zuurgraad wil uitrekenen. Wanneer immers op drie opeenvolgende dagen de pH van het regenwater respectievelijk 3, 4 en 5 is, is het rekenkundig gemiddelde niet 4, maar dichterbij de buurt van 3,5. Een halvering van de zuurvormende vervuiling zal de zuurgraad slechts licht beïnvloeden.

Schoon regenwater is niet neutraal maar licht zuur. Er is een weinig kooldioxide uit de lucht in opgelost. In water vormt kooldioxide net als zwaveldioxide een zuur. Het koolzuur valt echter maar voor een heel klein deel uiteen in carbonaat-ionen en waterstof-ionen. Het is een zogenaamd zwak zuur, in tegenstelling tot zwavel- en salpeterzuur.

Schoon regenwater heeft een zuurgraad van 5,6. Tegenwoordig is het regenwater in Nederland en vele andere geïndustrialiseerde landen tien- tot honderdmaal zuurder (een verschil van 1 à 2 pH-schalen). Dit gegeven zegt niet alles. Immers, de luchtverontreiniging bevat ook oxiden en basen, die uiteindelijk eveneens zuur kunnen leveren. De pH zegt wel iets over de snelheid waarmee tal van materialen door het zuur worden aangetast. De aantasting van gevoelige steensoorten verloopt door de tegenwoordige zuurgraad van de regen tientallen

malen zo snel als vroeger. Belangrijker nog dan de zuurgraad is het potentieel zuurleverende vermogen.

Door zijn positieve lading is het 'zure' waterstof-ion chemisch erg actief. Het verdringt andere stoffen uit hun chemische bindingen. Die stoffen gaan op hun beurt als positief geladen ionen in oplossing. De reactieve waterstof-ionen grijpen het eerst die elementen die zelf de zwakste chemische binding hebben. Pas als deze goeddeels zijn opgelost, worden elementen met een sterkere binding uit de humus en bodemdeeltjes verdrongen.

Er ontstaat zo een verdringsreeks waarbij de zure waterstof-ionen eerst de kalk en het magnesium uit de bodem oplossen en pas daarna bijvoorbeeld aluminium en ijzer. De concentratie waterstof-ionen moet steeds groter worden naarmate elementen verder uit de reeks verdrongen kunnen worden. In de chemie geldt kennelijk ook dat vele handen licht werk maken.

Zuur, zo is intussen duidelijk, is geen stof maar eerder een aan waterstof gebonden chemische energie. Daarom kunnen zuren gemaakt en vernietigd worden. Een fraai voorbeeld daarvan zien we in het wetboek: ammoniak, een base vormende stof, en salpeterzuur worden beide gebruikt als kunstmest. Deze stoffen mogen in een bepaalde hoge concentratie niet worden gemengd en vervoerd, wegens ontplofingsgevaar. Samen 'verbranden' deze stoffen tot stikstofgas en water. Zowel het zuur als de base is dan verdwenen. Dit proces wordt momenteel algemeen toegepast bij de rookgasreiniging van Japanse elektriciteitscentrales.

Door het voorgaande wordt het ook begrijpelijk dat ammoniak, een base, na binding aan zuurstof een zuur vormt. Daarvoor hoeven geen nieuwe stoffen aan het systeem te worden toegevoegd. Alleen heeft de nieuwe chemische ordening van de betrokken elementen de hoeveelheid chemische energie veranderd.

Eigenlijk zijn al deze zaken in hun finesses nogal moeilijk te begrijpen, ook voor chemici. Het lijkt zo eenvoudig. Zuren en basen werken tegengesteld, dus ammoniak zou het verzurende effect van de regen opheffen. Toen de bossterfte in Duitsland pas was onderkend, hebben bepaalde deskundigen daarom serieus voorgesteld om de bossen met ammoniak te bemesten. Intussen weten we dat op deze wijze het paard achter de wagen wordt gespannen. In Nederland is het door het onderzoek van Van Breemen goed bekend dat juist in bosbodems uit het gevormde (neutrale) ammoniumsulfaat opnieuw zuren worden gemaakt (Van Breemen, 1982), al is ook dit feit aanvankelijk heftig bestreden. Veel belangrijker dan de actuele zuurgraad van regen en bodem is daarom, en dat benadruk ik nogmaals, het potentieel zuurleverende vermogen (Van Breemen, 1984).

Ook allerlei organische processen kunnen zuur maken of consumeren. Iedereen weet bijvoorbeeld dat azijnzuurbacteriën uit alcohol azijn maken en melkzuurbacteriën uit suikers melkzuur, en dat deze zuren weer door andere bacteriën kunnen worden verbrand tot kool-dioxide en water. Een probleem is dat juist in bodems die al verzuurd zijn de productie van organische zuren hoog is.

3. BOSSTERFTE

In heel Europa sterven de bossen

Bossterfte door rookgassen is, althans lokaal, een heel oud verschijnsel. Vroeger beperkte het zich tot de onmiddellijke omgeving van grote centrales en ertssmelterijen. Door de toenemende industrialisatie begon het bos op regionale schaal te kwijnen. In het zwaar geïndustrialiseerde Ruhrgebied was de produktiviteit van de bossen in de jaren veertig al sterk verminderd. Nadat in de Tweede Wereldoorlog de Duitse industrie door de zware bombardementen was platgelegd, nam de diktegroei van de bomen in de eerste naoorlogse jaren weer toe. In de jaren zestig begon het bos in het Ruhrgebied opnieuw te kwijnen. De produktie van relatief gevoelige naaldhoutsoorten werd zo onrendabel dat naaldbossen op grote schaal werden vervangen door loofbossen (Poortinga, 1982).

Tegelijkertijd werd in Duitsland tegen het eind van de jaren zestig de politiek van de hoge schoorstenen ingevoerd. Alle schoorstenen in het Ruhrgebied werden verhoogd, met de bedoeling in het kader van het groeiende milieubesef, het industriële hart van Duitsland weer groen te maken. Deze maatregel is in Nederland op grote schaal nagevolgd. Ook hier werd aan talloze schoorstenen een mouw gepast. Reizigers tussen de Randstad en het noorden kunnen dit vanuit de trein goed zien aan de schoorstenen van de IJsselcentrale.

Het uitsmeren van de vervuiling over heel West-Duitsland was slechts uitstel van executie. In het eind van de jaren zeventig werd Duitsland geschokt door massale sterfte van zilversparren in zogenaamde *Reinluftgebiete*. Enkele jaren later bleek het kwijnen van de zilverspar slechts een voorbode te zijn van een grote ecologische nachtmerrie. De exponentiële groei van de vervuiling, door hoge schoorstenen gelijkelijk verdeeld over het hele noordelijk halfrond, had de grenzen van het toelaatbare bereikt. Alle bossen in West-, Midden- en Oost-Europa, van Schotland tot de Oeral, lijken af te sterven.

Bossterfte in Nederland

Bij het bureau Ecoplan ontstond in 1982 bezorgdheid over de kwaliteit van enkele bossen die onder ons toezicht stonden. De gezondheid van de bomen ging zienderogen achteruit, ook zonder dat er van een veranderd beheer sprake was. Voor een adviesbureau als Ecoplan is zo'n constatering uiterst zorgwekkend. Het is nauwelijks nog mogelijk

bij het ontwerpen van begroeiingen of het maken van bosbeheersplannen te adviseren bepaalde bomen te plaatsen, als het vermoeden bestaat dat de klant slechts zijn toekomstige schade aanplant. Zolang overigens een probleem onduidelijk is en maatschappelijk niet is geaccepteerd, wordt zo'n opstelling, hoe oprecht ook, iemand niet in dank afgenomen.

Omdat wij al enige tijd de ontwikkelingen van de bossterfte in Duitsland nauwlettend volgden, hadden we het vermoeden dat de boschade bepaald niet bij de Duitse grens ophield. In de zomer van 1982 deed ik daarom uitvoerig navraag bij de instanties die zich in Nederland bij uitstek met de verzorging van bos en bomen bezighouden, zoals Staatsbosbeheer, het Rijksinstituut voor Natuurbeheer, de Stichting Bos en Hout en diverse natuurbeschermingsorganisaties. Nergens bleek enige schade door zure regen te zijn geconstateerd en geen van de gevraagde instanties verwachtte dat in de nabije toekomst de Nederlandse bossen zouden worden bedreigd.

De reacties van de verschillende instanties worden goed samengevat door de woorden van ir. H. A. van der Meiden, directeur van de Stichting Bos en Hout, een instantie ter bevordering van de produktie van industriehout. 'Het ziet er inderdaad naar uit,' aldus Van der Meiden, 'dat zure regen in ieder geval mede verantwoordelijk is voor het vooral in Duitsland en Polen gesignaleerde afsterven van bossen. Mij zijn geen gegevens over schade in Nederland bekend. Hoewel wij over het hele land onze connecties in de bosbouw hebben en daarvoor regelmatig geconfronteerd worden met berichten over aantastingen en schaden, zijn tot dusver geen verschijnselen gesignaleerd welke in Duitsland zoveel aandacht trekken.'

Toch waren er twee typen reacties die erop duiden dat de verschijnselen bij uitzondering wel gezien, maar niet onderkend waren. In de eerste plaats was bij Staatsbosbeheer bekend dat bepaalde bossen in de nabijheid van bioindustrie in slechte toestand verkeerden, bijvoorbeeld de bossen bij de Rouwkuilen (gemeente Venray). Hierbij was door de nabijheid van de vervuiler echter op het eerste gezicht geen sprake van een grensoverschrijdend probleem zoals bij de Duitse bossterfte. In de tweede plaats bleek bij navraag naar enkele zeer kenmerkende schadebeelden dat deze vaak wel waren gezien maar werden toegeschreven aan andere oorzaken, zoals droogte en windgevoeligheid. Doorslaggevend argument voor verder onderzoek was dat de luchtverontreiniging in Nederland bepaald niet geringer is dan in Duitsland, terwijl bossterfte was geconstateerd tot aan de Nederlandse grens. Bovendien is het bekend dat de Nederlandse bossen voornamelijk op arme en al zure zandgronden staan en dus erg gevoelig zijn voor verdere aantasting.

Al met al was er weinig reden om de algemene ontkenning van de schade op te vatten als een geruststelling. Tenslotte was wel bekend dat in ons land korstmossen en paddestoelen verdwenen waren, heidevelden vergrasten en vennen verzuurden. Het vermoeden rees daarom dat door een zeker isolement van de Nederlandse bosbouw de schadebeelden bij de bosbeherende instanties onbekend waren. Aangezien de symptomen in een vergevorderd stadium gepaard gaan met allerlei parasitaire ziekten en verdroging, beschouwde men, kennelijk ten onrechte, deze ziekten als de directe en enige oorzaak. Reden genoeg om zelf een oriënterend onderzoek te starten en daarmee in Nederland te zorgen voor een zekere impuls voor het bosonderzoek (Winsemius, 1983).

Gevoelige bodems

Van heel Nederland bestaat een uitgebreide bodemkartering, tot stand gekomen op basis van vele tienduizenden bodemanalyses van de Stichting voor Bodemkartering. Het is dus voor een bodemkundige heel eenvoudig na te gaan waar in Nederland bodems gevoelig zijn voor verzuring. In principe zijn dit de kalkarme zandgronden, waar de bodem bovendien door eeuwenlange exploitatie is uitgeput. Daar bevonden zich tot in de vorige eeuw uitgestrekte heidevelden en daar is het grootste Nederlandse bosareaal ontwikkeld.

Op basis van deze kartering blijken er ruwweg twee typen zandgronden te zijn. Er zijn grote gebieden met dikke, goed doorlatende zandlagen en een diepe grondwaterstand, bijvoorbeeld de zandgronden van het centrale Veluwemassief, en er zijn gebieden met een dunne laag zand op een ondiepe keileemondergrond, bijvoorbeeld de zandgronden op het keileemplateau onder Groningen, Friesland en Drenthe. Voor ons onderzoek kozen we de ondiepe zandgronden. Daar stagneert het inzijsende zure regenwater in een dunne zandbodem en vormt de afwisseling van droogte in de zomer en waterstagnatie in de winter een extra handicap voor boomgroei.

Onder normale omstandigheden zouden bomen niet ziek hoeven te worden op dergelijke bodems. De produktiviteit, de groeisnelheid dus, zou beperkt kunnen zijn, maar een boom heeft alle tijd om langzaam groot te worden. Als echter, zoals in Duitsland was geconstateerd, voortdurend erg veel energie moet worden gestoken in een herstel van schade door zure regen, is een zichtbare aftakeling te verwachten. In Duitsland was immers geconstateerd dat in bepaalde bossen, op redelijk vruchtbare grond en ver van industriële centra, de bomen al twintig jaar niet meer dikker werden. Vanwege de grote schade moesten ze al hun produktievermogen in herstel steken.

In Nederland is de luchtvervuiling hoger en staan de bossen op arme grond. Daarom was het naar analogie van de Duitse bevindingen, beslist geen onlogische veronderstelling dat in de Nederlandse situatie het produktievermogen van de bomen niet groot genoeg zou zijn voor het herstel van de schade. Dit zou net zo goed als in Duitsland moeten leiden tot een geleidelijk afsterven van de bomen. Het was eigenlijk vreemd dat een dergelijke achteruitgang nog niet was geconstateerd.

Kwijnende bossen in Friesland

Op theoretische gronden moest de schade dus gemakkelijk zijn te vinden. Dit was inderdaad zo, en de situatie was ernstiger dan ik had vermoed.

Voor het onderzoek koos ik enkele boscomplexen in de Friese woudstreek op de rand van het keileemplateau. Samen vormden ze een areaal van circa 600 hectare bos tussen Drachten en Olterterp, met een fraaie, kleinschalige afwisseling van de belangrijkste in Nederland groeiende loof- en naaldboutsoorten. De metingen van de STIBOKA wezen erop dat bepaalde bodems in deze streek al omstreeks 1960 zo zuur waren dat ze gevoelig moesten zijn voor verdere verzuring. Bovendien lagen deze bossen ver van alle Nederlandse industriële centra, zodat schade in geen geval aan de directe invloed van de lokale industrie zou kunnen worden geweten.

De schadebeelden in deze bossen bleken, wanneer de Duitse criteria werden gehanteerd, zeer ernstig te zijn. Zowel loof- als naaldbomen waren aangetast. Verificatie van de schade bij Duitse experts zoals prof. B. Ulrich en dr. Knabe bevestigde de conclusies omtrent de aard van de schadebeelden. Zure regen had het Nederlandse bos aangetast en waarschijnlijk niet in geringere mate dan in West-Duitsland. Door de grote aandacht die de media aan dit onderzoek gaven begonnen na enige tijd ook andere bosbeherende instanties te twijfelen aan de kwaliteit van het Nederlandse bos.

Eind 1983 ontvingen mijn bureau Ecoplan en de Landbouwhogeschool Wageningen van het ministerie van vROM opdracht de schade en de relatie met bodemverzuring in de Friese bossen nader te onderzoeken. De resultaten van dit onderzoek hebben volgens dr. B. J. C. Zoeteman, de directeur Lucht bij het ministerie, samen met het onderzoek van Staatsbosbeheer naar de vitaliteit van de Nederlandse bossen, als basis gediend voor de rapportage aan de Tweede Kamer over de aantasting van bossen door verzuring (Zoeteman in: Van Breemen, 1984).

De bodems in de onderzochte bossen (in Gaasterland en bij Olter-

terp) bleken ernstig verzuurd. De hoeveelheid opgelost aluminium in het bodemvocht was hoger dan de hoeveelheid calcium, een toestand die giftig is voor boomwortels. Dat de verzuurde bodem ook giftig was voor het bodemleven bleek uit de messcherpe overgang tussen de zandige ondergrond en de slecht verteerde humuslaag. Elke activiteit van wormen en andere bodemwoelende organismen ontbrak. Ook de beworteling van de bomen concentreerde zich voornamelijk in de humuslaag en deze laag fungeerde als een soort vluchtheuvel in de verzuurde bodem (Poortinga, 1984).

Het vitaliteitsonderzoek van het Nederlandse bos, een tussenbalans

In augustus 1983 heeft Staatsbosbeheer in 1500 bossen de schade door zure regen geïnventariseerd als onderdeel van een gezamenlijk programma van het ministerie van vROM en het ministerie van Landbouw en Visserij.

Het onderzoek is een concrete actie die uit de motie-De Boois is voortgevloeid, zegt Zoeteman van het ministerie van vROM. In die motie sprak de Tweede Kamer op 21 februari 1983 haar verontrusting uit over de verzuring van de Nederlandse bodem. Daarbij werd de regering verzocht een breed inventariserend onderzoek te verrichten naar de te verwachten schade, plus een programma van maatregelen op te stellen ter voorkoming en bestrijding van bodemverzuring.

Begin 1983 was toegezegd dat het verslag van het vitaliteitsonderzoek in de herfst van 1983 voor de Kamer beschikbaar zou zijn. Deze belofte kon evenwel niet worden nagekomen, maar Staatsbosbeheer heeft in afwachting van het definitieve rapport een voorlopig verslag gepresenteerd. Vlak voor de behandeling van het Indicatief Meerjarenprogramma Lucht in de Tweede Kamer, december 1983, werden de voorlopige resultaten van het vitaliteitsonderzoek van de naaldbossen bekend. Van de loofbomen was ook in 1984, in de tijd dat dit boek bezig was te verschijnen, de verwarrende hoeveelheid gegevens nog niet uitgewerkt.

Het voorlopig resultaat van het onderzoek vervulde de inspectie Bosbouw met zorg. Meer dan 95% van het bos moet volgens de Duitse criteria als ziek worden aangemerkt. De vraag die men zich daarom stelde was: moeten we de Duitse normen ook in Nederland hantieren? (Staatsbosbeheer, 1983.)

Het zou logisch zijn van wel. Immers, de oorspronkelijke bedoeling was dat het onderzoek op dezelfde wijze, in dezelfde tijd (de maand augustus) en volgens dezelfde criteria zou worden uitgevoerd als het Duitse vitaliteitsonderzoek. Alleen dan kan men de toestand in beide

landen met elkaar vergelijken. Ook Oostenrijk, Zwitserland en België volgen deze methode.

Ten behoeve van het veldonderzoek heeft de inspectie Bosbouw tweehonderd provinciale medewerkers en een aantal particulieren in korte tijd vertrouwd gemaakt met een aantal schadebeelden. De medewerkers moesten de bossen zelf, op grond van hun terreinkennis en aan de hand van voorgeschreven criteria, uitzoeken.

Dit laatste week fundamenteel af van de Duitse methode, waarbij men de te onderzoeken opstanden op statistisch verantwoorde wijze selecteerde door een kilometerraster over de boskaart te leggen.

Er werden 1500 bossen onderzocht, in twee groepen: een groep zogenoemde vitale bossen en een groep bossen waarvan men geen verklaring had voor de verminderde vitaliteit. Uitgesloten van het onderzoek werden houtopstanden die recent ernstig te lijden hadden gehad van stormschade of parasieten, alsmede de bossen waar de slechte vitaliteit het gevolg kon zijn van daling van het grondwater, een verkeerde boomsoortenkeus of een verkeerde bosbehandeling. Motief voor deze keus was dat de effecten van zure regen zich het duidelijkst openbaren wanneer er geen andere aanwijsbare oorzaken zijn van de geringe vitaliteit van de opstand.

Per boswachterij werden zo minimaal 10 en maximaal 20 opstanden geselecteerd. De keuze van de vitale opstanden leverde geen moeilijkheden op, in tegenstelling tot de keuze van de niet-vitale-opstanden-zonder-bijkomende-oorzaken. Dat is de reden dat van de laatste minder zijn geïnventariseerd. Bij de uiteindelijke verwerking zijn de gegevens van slechts 1200 opstanden betrokken.

Van de naaldbomen zijn 13 vitaliteitskenmerken opgenomen en van de loofbomen 8. Door de ongelukkige keuze van de geïnventariseerde schadekenmerken van loofbomen leverde de interpretatie daarvan problemen op. De kenmerken van loofbomen hadden namelijk op één na alle betrekking op bladschade en door de extreem droge zomer was te verwachten dat bladeren het in 1983 toch al hard te verduren hadden. De verwerking van de gegevens is daarom moeilijk en een eerste interpretatie van de toestand van de loofbossen was vooralsnog niet te maken. Doordat in ons land nooit eerder een overeenkomstige beschrijving heeft plaatsgevonden, kon de inspectie op grond van de inventarisatie wel uitspraken doen over de stabiliteit van de bossen, maar niet over de mate waarin de stabiliteit is verminderd. De moeilijkheid bij de interpretatie van de cijfers van het onderzoek is dat niet bekend is hoe het bos in Nederland er nu zou uitzien onder condities met schone lucht. Wel is bekend dat de vitaliteitskenmerken erg slecht zijn. De naaldbezetting is uiterst gering en er is maar weinig voor nodig of de bomen kunnen het niet meer bolwerken.

Potentieel heeft volgens Staatsbosbeheer de grove den een naaldbezetting van vier jaarklassen, dat wil zeggen: er kunnen scheuten van vier achtereenvolgende jaren bezet zijn. In 1983 bleek bijna 40% van de grove dennen uit de niet-vitale groep een naaldbezetting te hebben van minder dan een hele jaarklasse. Dit betekent dat de bomen balanceren op de rand van hun bestaansmogelijkheden.

De fijnspar, die gezond zes of meer volledige jaarklassen naalden heeft, bezat nergens meer dan vijf zesde van dit aantal. Dit gold eveneens voor de douglas. Van de fijnspar bezat 44% van de niet-vitale groep en 17% van de vitale groep zelfs lang niet de helft van de naalden die ze als gezonde bomen zouden moeten hebben. Bij de douglas gold dit voor bijna het totale bestand: 94% in de niet-vitale groep en 75% in de vitale groep.

Zorgwekkend

De inspectie Bosbouw trok de volgende conclusie uit het onderzoek: de conditie van het Nederlandse bos is zorgwekkend, omdat zelfs in de naar verhouding meest vitale opstanden zeer frequent verschijnselen worden waargenomen die duiden op een labiele toestand. Een 'labiele toestand' wil zeggen dat er maar weinig extra belasting in de vorm van droogte, vroege najaarsvorst, insekten of hogere luchtverontreinigingswaarden nodig is om bossen op grote schaal te laten afsterven. Er waren aanwijzingen dat de vitaliteit was verminderd. Een goede groei is alleen mogelijk met voldoende naaldbezetting. De gevonden naaldbezetting, ook in de vitale opstanden, was niet voldoende om de groei in het verleden te verklaren. Dit duidde op een recente vermindering van de naaldbezetting en daarmee van de vitaliteit van de onderzochte opstanden.

Als de Duitse normen ongewijzigd zouden worden gehanteerd bij de interpretatie van de gegevens, zou meer dan 90% van het vitale naaldbos als licht beschadigd moeten worden geclassificeerd. Van de niet-vitale opstanden is dit 100%. Dit is een schokkend beeld volgens de inspectie Bosbouw. Er bestonden bij Staatsbosbeheer daarom reserves tegen het toepassen van de Duitse normen op de Nederlandse bossen. De normen zouden zijn opgesteld voor bossen die onder andere omstandigheden zijn opgegroeid en voorzichtigheid is dus op zijn plaats. In werkelijkheid is dan ook, volgens de inspectie, waarschijnlijk een lager percentage 'licht beschadigd'.

Toch stelde de inspectie van Staatsbosbeheer onomwonden dat de omvang van de luchtverontreiniging van dien aard is dat de bosinstandhouding wordt bedreigd. Omdat de situatie in Nederland principieel niet anders is dan in Duitsland, kunnen in Nederland de ver-

schijnselen dezelfde omvang krijgen. Dit heeft bij het uitblijven van maatregelen verstrekken gevolgen voor de in de bosbouw gedane investeringen, voor de werkgelegenheid, voor de recreatie en het natuurbewoud en voor de waterhuishouding en het klimaat. De inspectie stelt dat binnen het bos de effecten van luchtverontreiniging niet kunnen worden opgeheven of gecompenseerd. Het aanpassen van de boomsoortenkeuze is op lange termijn ook geen oplossing, daar geen enkele boomsoort tegen deze toestand is opgewassen. Dit betekent dat de oplossing moet worden gezocht in het voorkomen van de luchtverontreiniging.

Coördinatie

Hoewel het resultaat van het onderzoek van Staatsbosbeheer indrukwekkend is, zijn de volgende kanttekeningen te maken ten aanzien van de onderzoeksopzet en de interpretatie van de gegevens over 1983 (Poortinga, 1984-2).

1. Door een subjectieve interpretatie van het begrip 'vitale opstand' (opm. van de inspectie Bosbouw) werd niet duidelijk welk percentage bos daaronder viel. Hetzelfde kan in principe worden gezegd van de Duitse term 'licht beschadigd', daar deze term kennelijk inhoudt dat een doorgaand proces van vitaliteitsvermindering al ver gevorderd is, zonder uitzicht op herstel.
2. Door een groot deel van de bossen, waar de schade gepaard ging met stormschade en parasitaire plagen, niet te inventariseren, lag het voor de hand dat weinig zeer zwaar beschadigd bos zou worden aangetroffen. Een tweede bezwaar daarbij was dat niet meer statistisch kon worden achterhaald welk percentage van het totale Nederlandse bos vitaal, licht beschadigd of zwaar beschadigd was.
3. Gezien het feit dat van de groep vitale bossen meer dan 90% volgens de Duitse criteria als licht beschadigd moest worden aangemerkt, was de term 'vitaal bos' een tamelijk ongelukkig gekozen etiket. Hetzelfde geldt overigens voor de Duitse termen 'licht' en 'ernstig beschadigd'. Ook terminologieën als 'Schadstufe 1, - 2', enz., geven een slechte relatieve maat, omdat de meeste schade al is opgetreden voordat ze zichtbaar wordt.
4. Voor een harmonisering van het internationale onderzoek was de enige juiste methode om werkelijk de Westduitse methodiek aan te houden.
5. Omdat de kwaliteit van het blad erg afhankelijk is van seizoensinvloeden, zijn loofbomen beter te onderzoeken op chronische schadeontwikkeling aan twijgen, bast en stam dan aan het blad.
6. Voor een goede interpretatie geeft onderzoek naar de ontwikkeling

van de boom gedurende vier seizoenen een duidelijker en completer beeld dan een onderzoek tijdens één seizoen.

7. Door de grote hoeveelheid schattingen bij de opname van de vitaliteitskenmerken werd de interpretatie eerder subjectief dan exact.

Koudwatervrees

De bevindingen van het Nederlands onderzoek werden aanvankelijk met enige voorzichtigheid gepresenteerd. Zelfs de toch schokkende conclusie van Staatsbosbeheer dat ten minste 90% van de naaldbomen licht is aangetast, werd heel behoedzaam geformuleerd. Dit blijkt niet zo maar een kwestie van ingeburgerde voorzichtigheid of koudwatervrees van wetenschappers, maar een kwestie van geleidelijke gewenning. In Duitsland, waar men al vele jaren langer met de bossterfte wordt geconfronteerd, is men het stadium van aarzeling al lang voorbij. Dit werd duidelijk gedemonstreerd op een excursie in de Drentse bossen, waar een aantal gerenommeerde Duitse wetenschappers de Nederlandse deelnemers met enkele verrassende, zeer stellige uitspraken schokte (Poortinga, 1984).

In 1983 stond de permanente uitwisseling tussen de universiteiten van Groningen en Göttingen in het teken van de zure regen en de bossterfte. De Duitse professoren Hüttermann, Ulrich en Runge werden daarbij ontvangen door hun Groningse collega's Van Andel, Wessels en Kuiper. Het bureau Ecoplan en Staatsbosbeheer verzorgden ieder een deel van de op het programma staande excursie. Het deel onder leiding van de Drentse houtvester ir. Kalb voerde de Duitse gasten naar de naaldhoutbossen bij Veenhuizen. Het excursiedeel onder de hoede van mij en mijn compagnon Van der Lans nam de schade in loofhoutbossen in ogenschouw.

In de bossen van Staatsbosbeheer werden enkele percelen fijnspaar, douglas en grove dens bezocht. Daarvan waren de bomen bij het vitaliteitsonderzoek beoordeeld aan de hand van 18 criteria, zoals de ernst van de verkleuringen, het naaldverlies en de vorming van waterloten. Ir. Kalb over de zwaarbeschadigde bestanden: 'We vinden schadebeelden, maar we weten niet waardoor ze veroorzaakt worden. Droogte kan hier in elk geval niet de oorzaak zijn. De bodem is hier niet droog en de grondwaterspiegel niet diep. Ik hoop dat u een precieze verklaring kunt geven.' De Duitsers schreven onomwonden de schadebeelden toe aan luchtverontreiniging; dat was volgens hen al lang boven elke discussie verheven. Toch bleef ir. Kalb, in tegenstelling tot zijn collega's uit o.a. Overijssel en Gelderland, nog lang tegenover de pers volhouden dat de bossterfte niet alleen wordt veroorzaakt door zure regen (NvhN, juli 1984).

Bij het vitaliteitsonderzoek van Staatsbosbeheer was niet gekeken naar wortelschade, omdat dat te bewerkelijk zou zijn. De Duitse deskundigen demonstreerden daarom met boor en spade hoe gemakkelijk de wortelbeschadigingen te controleren zijn. In de verschillende bodemlagen vonden zij alleen massa's dode fijne wortels, nauwelijks levend. Hieruit viel veel te concluderen.

Zij constateerden aan de hand van de afgestorven wortels dat het na de droge zomer in Veenhuizen helaas alweer geregend had. 'Als na een lange droge zomer,' zo legde prof. Ulrich uit, 'de droge bodem weer nat wordt, veroorzaken micro-organismen een versnelde afbraak van humus en daarbij komen veel zuren vrij. Tijdelijk wordt ook het bodemvocht heel zuur. Men noemt dit verschijnsel een zure schok en hierdoor sterven de fijne wortels. Vroege regens blijken na een droge zomer zoals in 1983 helemaal niet heilzaam. Het zou voor de bossen veel beter zijn geweest als ook de warme herfst droog was gebleven. Wanneer de bodem namelijk in de winter pas nat wordt, is in de koude grond de biologische activiteit klein en dus de productie van zuur gering. Er is dan geen zure schok en de fijne wortels, die normaal overjarig zijn, kunnen dan overleven. Nu is er wel regen gevallen, maar de bomen hebben daar met hun dode wortels weinig aan.' Omdat de fijne wortels binnen vier weken na het afsterven geheel verteren, moest het korter dan vier weken geleden geregend hebben op de bossen van Veenhuizen.

Bij een kwakkelend perceel douglassparren verbaasden de Duitse gasten zich erover dat zo'n veeleisende soort als de douglasspar in Nederland zelfs werd aangeplant. In Duitsland kenden ze geen vitale bestanden van deze soort op arme en zure bodems. De douglas moest hier, en dat werd door de professoren snel geverifieerd aan de uiterst oppervlakkige beworteling, in zijn jeugdfase de bodem al hebben uitgeput. De bomen, en dat gold min of meer voor alle naaldbomen in deze bossen, zouden zich hier in stand houden door de nodige voedingsmineralen uit de luchtverontreiniging op te nemen, uitgezonderd fosfor. Vandaar dat de bomen hun wortels aan het bodemoppervlak concentreren. Alle mineralen die met de regen op de grond komen worden meteen gegrepen.

'De bomen hebben,' aldus prof. Runge, 'de luchtverontreiniging dus nodig om zich te kunnen weren tegen de schadelijke effecten van diezelfde luchtverontreiniging. Hierbij is daarom geen sprake van evenwicht maar van een geleidelijk verslechterende situatie. Wrang is dat bos op deze bodems pas echt acuut in moeilijkheden komt, als de luchtverontreiniging met succes is bestreden. Dan hebben de bomen helemaal geen bron van mineralen meer en moeten ze dus snel afsterven.'

Drentse eikenbossen

Het excursiedeel over beschadigd loofhout voerde het gezelschap naar het Norgerholt. In dit oude Drentse eikenbos verliezen de eiken massaal hun bladdragende kortloten en plaatselijk treedt al sterfte op. Metingen die we hier in 1979 hadden gedaan wezen reeds uit dat de bodem tot grote diepten extreem zuur was, terwijl ook het bodemchemische complex voornamelijk met zuur verzadigd was. Toentertijd twijfelden we aan deze gegevens, omdat deze zo ver afweken van wat volgens de gangbare literatuur normaal was voor bosbodems. Herhaling van de metingen gaf echter exact dezelfde uitkomsten.

De Duitse professoren vergeleken de meetgegevens met die welke wij in 1983 in de Friese bossen hadden verkregen. (Het Norgerholt is, evenals een groot deel van de Friese en Drentse bossen, aangeplant op zure, arme zandgronden boven een ondiepe keileemlaag). Men kwam eenstemmig tot de conclusie dat dit soort bodems tot de zuurste in Europa hoorde en dat herplant hier zinloos en verspilde moeite zou zijn. De ziektebeelden van de eiken in dit bos vertoonden volgens hen de typische kenmerken van een chronische schadeontwikkeling ten gevolge van luchtverontreiniging. Deze ontwikkeling was hier zo ver gevorderd dat het verval zeker tien jaar geleden begonnen was. Gezien de deplorabele toestand van de eiken, zou het verval zich in de komende jaren onomkeerbaar voortzetten.

Toen tijdens de terugtocht een van de Nederlandse professoren hoffelijk wees op de schoonheid van dit beboste landschap, merkte iemand uit het Duitse gezelschap op: 'Mooi, hoe zo? Het is een stervend landschap, dat kan toch niet mooi zijn?'

Bossterfte in het buitenland

Sinds het eind van de jaren zeventig, maar vooral sedert 1981, wordt in West-Duitsland op grote schaal bossterfte geconstateerd. Zorgwekkend zijn vooral de omvang en de snelheid van de ontwikkeling. Bij een inventarisatie van de schade in alle Duitse bossen bleek in 1982 8% van alle bomen ziek. Slechts één jaar later, in 1983, was dit al 34%.

Nu moet men niet denken dat dit voor een leek duidelijk te zien is. Het is niet zo dat twee derde van de bossen gezond oogt en dat de rest een afschuwelijke aanblik geeft. Integendeel, de echte bosruïnes, zoals die veelvuldig op krantefoto's te zien zijn, komen slechts sporadisch voor. In de praktijk is de 2,5 miljoen hectare een statistische grootheid en staan de zieke en minder zieke bomen door elkaar in dezelfde bospercelen.

Voor een boom zo ziek is dat dit een leek opvalt, is hij meestal al gekapt. Iemand die uitsluitend in de bossen komt om zich te recreëren maar de schadebeelden niet kent, zal het veeleer opvallen dat de laatste jaren veel gedund en gekapt en opnieuw aangeplant wordt. Voor het opvalt dat ook de nieuwe aanplant zich slecht ontwikkelt, is het tien jaar later. Zo verdwijnen geleidelijk de bossen zonder dat men het beseft.

Het is zeer de vraag of de bossterfte in de Bondsrepubliek wel zo snel verloopt. Er waren ook tegen het eind van de jaren zeventig al berichten dat een groot deel van het bos in slechte conditie verkeerde. Deze berichten werden alleen niet serieus genomen. Net als in Nederland kende men, ondanks het feit dat in de oostelijke buurlanden de bossterfte al ten minste vijf jaar eerder bekend was, de schadebeelden niet.

Pas toen de bomen daadwerkelijk massaal gingen afsterven, zijn de schadebeelden in bredere kring bekend geworden. Ook in Duitsland kostte het vele jaren om het verschijnsel zelfs in bosbouwkundige kringen geaccepteerd te krijgen. De enorme groei van de geconstateerde bosschade moet daarom voor een groot deel worden toegeschreven aan de snelle verspreiding van nieuwe kennis. Nog steeds is in West-Duitsland geen compleet en gedetailleerd overzicht verkrijgbaar van alle schadebeelden bij de verschillende boomsoorten. Waarschijnlijk verloopt de werkelijke snelheid van de bossterfte dus enkele malen langzamer dan in Duitsland wordt gesuggereerd. Met enige kennis van de schadebeelden is dit bovendien duidelijk te demonstrieren aan de hand van fotomateriaal of met ziektesymptomen die enkele jaren ontwikkeling vergen.

Bossterfte in West-Duitsland

Vanaf het begin van de jaren zeventig, maar vooral sinds de extreem droge zomer van 1976, blijkt in de zogenaamde *Reinluftgebiete* in het zuiden van West-Duitsland voor het eerst ernstige sterfte van zilversparren op te treden. De zilverspar is een boom die in Nederland niet wordt aangeplant, maar die in Duitsland zijn natuurlijke verspreidingsgebied heeft.

In het midden van de jaren zeventig is geleidelijk de fijnspar begonnen te kwijnen. In 1979 is het Landschafts Ökologisch Institut in Noordrijn-Westfalen een inventarisatie van de symptomen begonnen. Na twee jaar onderzoek liet de verantwoordelijke minister verklaren dat in 60% van de onderzochte sparrenbossen de naaldbezetting dermate van de normale bezetting afweek dat gevaar dreigde voor de instandhouding van het bos. Het percentage stemt goed overeen met

de schade-inventarisatie van augustus 1983, maar in begin 1981 werd deze mededeling nog met scepsis ontvangen (Schmidt, 1983). Een sterke toeneming van de schade aan fijnsparren is vooral geconstateerd in de herfst van 1980 en die van 1982. Het is opvallend dat de schade met nagenoeg dezelfde symptomen tegelijkertijd werd waargenomen in de middelgebergten van Noordrijn-Westfalen en in andere delen van de Bondsrepubliek.

Vooral in het zuiden werd de schadeontwikkeling duidelijk beïnvloed door het hoogteniveau. Zowel in het Beierse Woud als in het Zwarte Woud trad de eerste schade op boven 800 tot 1000 meter hoogte. Ondertussen is de schade ook geconstateerd tot in de dalen. Verder zijn in heel West-Duitsland de bossen op westelijke en zuidwestelijke hellingen het zwaarst getroffen.

Op grond van de alarmerende ontwikkeling in het jaar daarvoor heeft het Duitse ministerie voor Voeding, Land- en Bosbouw in 1982 een schade-inventarisatie voor het hele Duitse bos gemaakt. Sedert deze inventarisatie zijn talloze nieuwe schademeldingen uit alle deelstaten binnengekomen. Zo is bijvoorbeeld in Baden-Württemberg de gezondheid van zilversparren en vooral van fijnsparren in het daaropvolgende jaar dramatisch achteruitgegaan.

Wanneer het huidige tempo van aftakeling doorzet, wordt er rekening mee gehouden dat de bossen van de middelgebergten over grote oppervlakten geheel afsterven (Bundesminister, 1983). In Hessen toonden steekproeven aan dat in 60- à 80-jarige fijnsparrenbossen nog slechts 37% van de bomen gezond lijkt te zijn.

Dennenbossen verbijsterend ziek

Het meest verbijsterende van de recente ontwikkeling is de snelle achteruitgang van de grove dennen. De dennen stonden tot voor kort bekend als minder gevoelige bomen en de geconstateerde schade was gering in verhouding tot andere soorten. In 1982 bleek 60% van de zilversparren, 9% van de fijnsparren en 'slechts' 4% van de dennen te zijn aangetast. In 1983 bleek 75% van de zilversparren, 41% van de fijnsparren en 44% van de dennen aangetast.

De schade aan dennen was niet alleen in absolute zin toegenomen, vertienvoudigd zelfs, maar de achteruitgang van de dennen was in verhouding tot andere boomsoorten ook veel sneller toegenomen. Voor Duitsland is dit cijfer minder schokkend dan voor Nederland. De Nederlandse bossen bestaan immers voor een aanzienlijk deel uit dennen, maar in de Duitse bosbouw speelt deze boomsoort een ondergeschikte rol.

Dennen worden hoofdzakelijk geteeld in de laagvlakten. Het zwaarte-

punt van de schade aan dennen lag dan ook in de laagvlakten van Noordrijn-Westfalen (Lammel, 1984). Daar worden de dennen veelal op soortgelijke arme zandgronden aangeplant als in het oosten van Nederland. Daar is net als in Nederland door een overeenkomstige landbouwstructuur sprake van bioindustrie en ammoniakemissies. De neerslag van ammoniumsulfaat is daarom in deze Duitse dennenbossen niet minder groot dan in de Nederlandse.

Boschade in West-Duitsland naar boomsoort en naar schade-klasse in procenten van het totale oppervlak van de boomsoorten (1983)

	totale opp. per boom- soort	1 (kwijnend) in %	2 (ziek) in %	3 (erg ziek) in %	1+2+3 in %
fijnspar	2,950	30,0	10,0	1,1	41,1
zilver-spar	0,178	26,8	40,8	7,8	75,4
den	1,463	32,3	10,1	1,4	43,8
beuk	1,262	22,0	4,0	0,4	26,4
eik	0,612	12,7	1,8	0,2	14,7
andere soorten	0,940	9,0	7,7	0,4	17,1
totaal	7,405	24,7	8,7	1,0	34,4

Een belangrijk schadegebied van de den ligt in het uiterste westen van Noordrijn-Westfalen. Daar zijn in de vlakten tussen de rivieren Niers, Swalm en Nette, vlak over de Limburgse grens, uitgestrekte zandgebieden met dennen bebost. Van deze 5700 hectare dennen blijkt 92% door zure regen aangetast. Bovendien is daarvan ruim de helft ernstig beschadigd. Dit percentage komt verrassend overeen met het resultaat van de Nederlandse inventarisatie. (Bij de voorlopige inventarisatie bleken de Nederlandse bossen veel ernstiger te zijn aangetast dan de Duitse.) Van Duitse zijde wordt daarom met een beschuldigende vinger naar Nederlandse en in tweede instantie ook naar Belgische bronnen van luchtvervuiling gewezen (Genssler, 1983). Vooral de bouw van een ongezuiverde kolencentrale in de grensstreek bij Buggenum werd ons niet in dank afgenomen.

Het toekomstperspectief voor de dennen is niet opwekkend. Direct na de schade-inventarisatie is een zeer ernstige verslechtering van de dennen opgetreden, zowel in Nederland als op de zandgronden in Noordrijn-Westfalen (Poortinga, 1984).

Bossterfte in het westen van Europa

Niet alleen in Duitsland is de bossterfte vroeg waargenomen. Het ziek worden van zilversparren wordt in Luxemburg al sinds 1968 geconstateerd. Fijnsparren, dennen en andere bomen gaan in dit land sedert 1976 zienderogen achteruit. De ziekteontwikkeling is in Luxemburg volledig onafhankelijk van klimaat en bodem. Daarentegen is duidelijk vastgesteld dat winderige hellingen en plaatsen waar de wind wordt gestuwd bijzonder ernstig door de bossterfte zijn getroffen.

Bij de zilverspar betrof het een zeer geleidelijke achteruitgang. Aanvankelijk kon de ziekteontwikkeling alleen in oude bossen worden vastgesteld. In de loop der jaren werden echter ook steeds jongere opstanden aangetast. Bij de fijnspar werd de ziekteontwikkeling gelijktijdig bij alle leeftijdsklassen vastgesteld, tot de kiemplanten toe. In de Luxemburgse staatsbossen zijn tussen 1960 en 1970 grote oppervlakten bekalkt, maar ook daar zijn de bossen ziek geworden.

Een verrassende uitkomst van het Luxemburgse onderzoek was dat bij de zilversparren de groeivermindering ten minste tien jaar eerder (1958) inzette dan de zichtbare schadeontwikkeling. De sterfte grijpt zo snel om zich heen dat, ook al worden direct maatregelen getroffen om de luchtverontreiniging te beperken, volgens het Luxemburgse Forstamt veel bos niet meer te redden is (Scheffold, 1983).

In Frankrijk, België en Engeland was tot voor kort nog geen sprake van bosschade. Ook in deze landen bestaan echter talloze wetenschappelijke onderzoeken naar bijvoorbeeld de invloed van emissies op naalden, bodemleven, vennen en vegetaties. De resultaten verschillen in niets van de bevindingen in Duitsland, Scandinavië of Nederland. Ook blijken buitenlandse schade-experts bij toevallige bezoeken aan de eerstgenoemde landen wel eens schade te constateren. De afwezigheid van schade aldaar moet daarom, net als de verklaringen van Staatsbosbeheer vóór 1982, slechts worden gezien als een officieel overheidsstandpunt dat weinig met de werkelijke ontwikkeling heeft te maken.

In de zomer van 1983 beweerde de Forestry Commission in alle toonaarden dat in het geheel niet bekend was of en in welke mate zwavelemissies de bosgroei beïnvloedden. Ook op de zure, kalkarme en aluminiumrijke gronden zouden de sparren geen schade ondervinden. Het zag ernaar uit dat bodems met een hoge depositie aan luchtverontreiniging, hoewel verzuring in vele gevallen waarschijnlijk was, na een passende bodembewerking altijd nog voor het telen van bomen geschikt zouden blijven. In veel belaste gebieden was weliswaar de keuze van houtsoorten beperkt, maar tot dan toe had men in Groot-Brittannië geen schade door het oplossen van aluminium-

ionen in het bodemvocht ten gevolge van zure regen ontdekt. De meeste bossen in de bergen zouden zeer gezond zijn, afgezien van schade die tot mineraalgebreken, insekten, schimmels, wild, vorst en storm was te herleiden. Over het verzuren van beken en meren in Schotland en Wales meldde de woordvoerder van de commissie dat het publiek zich veel meer zorgen maakte over de verzurende invloed van de bossen (door hun filterende werking) op de meren dan over de mogelijke immissieschade van het bos (Binns, 1983).

Door de toenemende publieke druk heeft de Britse overheid eind 1983 bekendgemaakt dat de bossen in Zuid-Wales ten zuidwesten van enkele zwaar geïndustrialiseerde gebieden immissieschade hebben. Ook de verzuring van de meren in Schotland en Noord-Engeland is plotseling volop in de publieke belangstelling gekomen.

De zuurgraad van de regen neemt van het westen naar het oosten af. Doordat het aan de westzijde van Engeland en Schotland veel meer regent dan aan de oostkant, is in de praktijk de meeste schade aan de westzijde te vinden (Lehringer, 1984).

Een grauwsliuier over het bos

Uit talloze wetenschappelijke onderzoeken uit de jaren zestig en zeventig blijkt dat in landen als Engeland en Frankrijk sprake is van dezelfde schade door luchtverontreiniging als in Oost-Europa en West-Duitsland. Omdat van regeringszijde tot in de jaren tachtig is volgehouden dat deze landen geen last hadden van zieke bossen of verzurende meren door zure regen, zou men kunnen denken dat deze onderzoeken geen bekendheid hebben gekregen of niet in een breder kader zijn geplaatst. Niets is minder waar. Veel van de onderzoeksresultaten is gepresenteerd op de tientallen internationale symposia over zure regen. Ter illustratie volgt een voorbeeld van Engels onderzoek naar de aantasting van de waslaag op dennenaalden, een verschijnsel dat in alle Europese landen kan worden waargenomen.

De laatste jaren is het heldere, glanzende diepgroen uit de Europese naaldbossen verdwenen. Ook over de Veluwe is een grauwsliuier getrokken (persbericht Ecoplan 1983). De oorzaak hiervan is de aantasting van de waslaag door de luchtverontreiniging. De was wordt niet afgespoeld, maar verliest zijn glanzende en gesloten structuur. Dit heeft ernstige gevolgen voor de vitaliteit van de naalden, want de cuticula, de buitenste celwandlaag, met daarop de beschermende waslaag, is de belangrijkste barrière tussen vervuiling van lucht en kwetsbare weefsels in de plant. Een gesloten waslaag is bovendien noodzakelijk als bescherming tegen het uitdrogen bij zonnig weer en

tegen het uitwassen van kostbare mineralen bij regen.

In de jaren zeventig is in Engeland onderzoek gedaan naar de aantasting van de waslaag (Fowler, 1980). Daartoe heeft men de was onderzocht op de naalden van grove dennen in een schone omgeving (10 microgram SO_2/m^3 lucht) en in een vervuilde omgeving (100 microgram SO_2/m^3 lucht).

Na het strekken van de naalden waren deze in het bezit van een glanzende waslaag met een gladde structuur. De structuur van de laag, zo bleek uit onderzoek met de elektronenmicroscoop, werd in vervuilde lucht veel sneller aangetast dan in schone lucht. Na 8 maanden was in de vervuilde lucht de structuur in dezelfde mate aangetast als in de 'schone' lucht na 16 maanden. Na de aantasting van de gesloten structuur leek de waslaag weinig meer te veranderen. Ook in relatief schone lucht verloor de waslaag geleidelijk zijn gesloten oppervlak. Na drie jaar had de natuurlijke veroudering, zo goed als de veroudering door de luchtverontreiniging, het eindstadium bereikt. De was bleek qua gewicht in vuile lucht niet sneller te verminderen dan in schone lucht. Kennelijk wordt alleen de structuur door de vervuiling beïnvloed. Bij het onderzoek werd namelijk gevonden dat in beide bossen de totale hoeveelheid was per naaldoppervlak nageenough gelijk bleef.

De geconstateerde veranderingen in de wasstructuur bleken het functioneren van de waslaag inderdaad te beïnvloeden. Onder andere de weerstand tegen verlies van waterdamp uit de onderliggende weefsels werd gemeten. Deze weerstand nam bij het ouder worden van de naalden af. Bij de door luchtverontreiniging aangetaste naalden was de weerstand tegen vochtverlies in elke leeftijdscategorie significant lager dan bij gezonde naalden.

Een toegenomen vochtverlies door de versnelde veroudering van de waslaag in vervuilde lucht kan de groei van de bomen beperken als water slechts in beperkte mate beschikbaar is. Dit kan bijvoorbeeld op de Veluwe het geval zijn geweest in de droge zomer van 1983 op de zandgronden met een diepe grondwaterstand. Ook moet de boom dan meer energie steken in het reguleren van zijn water- en mineralenhuishouding. Dit kan slechts gebeuren ten koste van de groei of de opbouw van reserves. De boom zal een extra waterverlies door de cuticula proberen te compenseren door sluiting van de huidmondjes. Daardoor wordt de uitwisseling van koolzuur en zuurstof belemmerd. Het effect hiervan op de groei werd door de Engelse onderzoekers op 5% geschat.

Uiteindelijk bleek de luchtverontreiniging gevolgen te hebben voor de maximale leeftijd van de naalden. In de relatief schone omgeving werd 50% van de naalden bijna drie jaar oud, in de vervuilde omge-

ving slechts twee jaar. Volgens de huidige Duitse normen waren deze bomen dus al in de jaren zeventig aan te merken als licht aangetast.

Bossterfte in Scandinavië

In Zweden wordt volgens berichtgeving van de Universiteit van Uppsala sedert 1983 groeiende schade bij fijnsparren geconstateerd. Er is een toenemend naaldverlies en bij veel bomen wordt de kroon vlak onder de top kaal. De schadesymptomen lijken sterk op die in West-Duitsland. Een landelijk onderzoek heeft uitgewezen dat de bossen tussen 1965 en 1974 sterker zijn gegroeid dan in de jaren daarvoor. Dit is waarschijnlijk te danken aan de bemestende werking van de zwavel en de stikstof uit de luchtverontreiniging, die aanvankelijk de schadelijke effecten overheerste. Schade aan naaldbomen, in het bijzonder aan fijnsparren, was in beperkte mate bekend van de bossen rondom industriële concentraties, bijvoorbeeld bij Göteborg en Sundsvall. Nieuw zijn de berichten over toenemende en zich relatief snel uitbreidende schadesymptomen in het gewest Blekinge (Wunder, 1984). Deze zijn des te merkwaardiger omdat hier tot 1976 een centrale zonder enige vorm van rookgasreiniging in bedrijf was. Deze centrale wordt sindsdien nog slechts bij uitzondering gebruikt, in geval van een tijdelijk zeer hoge elektriciteitsbehoefte. Andere zwavel-emittenten zijn in deze streek niet voorhanden. De schadebeelden betreffen vooral de volwassen bomen ouder dan 50 jaar en de bomen in bosranden, in randen naast kapvlakten en op winderige hellingen. De bomen waaien gemakkelijk om en plaatselijk is de schade zo ernstig dat de hoeveelheid schadehout al groter is dan de geplande oogst door eindkap. Het is opvallend dat de houtindustrie in Zweden, in tegenstelling tot andere landen, nu eigen bedrijfseenheden heeft die zich met de bossterfte bezighouden.

De dreigende bossterfte heeft de gemoederen in Zweden ernstig in beroering gebracht. De bossen en de houtindustrie zijn zeer belangrijk voor de Zweedse economie. Bovendien zijn de bossen voor een groot deel privé-bezit en dit bezit is evenals de bosschade groten-deels in Zuid-Zweden geconcentreerd.

In het voorjaar van 1983 is Zweden begonnen met een omvangrijk onderzoeksprogramma om de gezondheid van de bossen te inventariseren.

Erosie in de Alpen

In de landen ten zuiden van West-Duitsland staat de bossterfte al veel langer in het centrum van de belangstelling. De minister voor Land-

en Bosbouw van Oostenrijk heeft er bij de FAO op aangedrongen om, evenals zijn regering, 1985 uit te roepen tot het Jaar van het Bos (Bauer, 1984). In Oostenrijk volgden de schademeldingen elkaar de afgelopen jaren snel op. Het eerste officiële cijfer sprak in 1982 nog van 120 000 hectaren bosschade in Oostenrijk. Enkele maanden later was dit getal al gestegen tot 200 000 hectaren, 40% van het hele bosbestand. In de tijdschriften worden toekomstbeelden van Oostenrijk geschetst met karstlandschappen en naakte rotsen waar alle vruchtbare bodems zijn weggespoeld. Niets dan stenen en ravijnen en een enkele graspol of doornstruik in de rotsspleten. Ernstig beschadigd zijn de Oostenrijkse bosgebieden nabij de industriële en stedelijke centra, in de grote bekkenlandschappen en de Alpendalen. Van west naar oost geeft de schade het volgende beeld: in Vorarlberg is de grootste bosschade te vinden in het Rijndal, bij Bregenz. In Tirol is het dal van de Inn over de volle lengte aangetast. Daar is de schade aan zilversparren al vroeg waargenomen. In Salzburg is veel schade in het gebied rondom de provinciehoofdstad. Grote schade is ook geconstateerd ten zuiden van de industriestreek van Hallein en in Flachgau, Tennengau, het Fritzbach- en het Ennsdal. In Boven-Oostenrijk vond men vooral bossterfte in het Innviertel, in het noorden van Salzkammergut en in ontstellende mate in het centrale gebied rondom Linz, waar de bedrijven VOEST en Chemie-Linds worden aangewezen als de hoofdschuldigen. Het Mühlviertel wordt beïnvloed door de geïmporteerde verontreiniging uit Beieren en Tsjechoslowakije. In Neder-Oostenrijk kwijnen in het legendarische Wenerwoud reeds de beuken. Verder zuidwaarts sterft het bos over reusachtige oppervlakten af. In Stiermarken en Karinthië wordt gevreesd dat hele gebieden spoedig zullen zijn ontbost.

Als men de balans opmaakt, blijken alleen het uiterste oosten van Oostenrijk, Oost-Tirol en de centrale delen van de Alpen nog vrij van schade te zijn. De situatie is nog niet zo ernstig als in West-Duitsland, stelde de milieuminister Kurt Steyer, maar het is zeker tien voor twaalf (Graupe, 1983).

In het propere buurland Zwitserland breidt de verzuring zich eveneens hand over hand uit. Dit lijkt op het eerste gezicht merkwaardig, omdat de Zwitserse energievoorziening voor een groot deel plaatsvindt in waterkracht- en kerncentrales. De totale zwavelemissie is slechts een derde van die van Nederland. Het verkeer is echter met name in de zomermaanden intensief en het lijkt of de industriedampen van heel West-Europa tegen de Zwitserse Alpen blijven hangen. Alleen in het uiterste noorden is nog sprake van niet verzuurd water, maar in de bergen verzuren de meren. Vooral de lager gelegen bossen rondom Basel zijn sterk aangetast en nergens zijn de bossen

meer volledig schadevrij.

Er wordt verondersteld dat de nevelvorming in de bergen een versterkend effect heeft. De nevel slaat op de bladeren en naalden neer en daar verdampt een deel van het vocht, zodat de zuurconcentratie stijgt. Een tweede versterkend effect zou worden veroorzaakt door de schommelende luchtbewegingen in de dalen. Zoals men zand in een zeef heen en weer schudt, zo wordt het vuil uit de over de bossen heen en weer schuivende luchtlagen gezeefd (Ow, 1984).

Als in de Alpen bossterfte gaat optreden op dezelfde schaal als nu in het Eertsgebergte, zijn de gevolgen niet te overzien. In ons vlakke Nederland hebben wij nauwelijks een voorstelling van de bodembeschermende werking van bossen op berghellingen, maar de Zwitsers zijn zich daarvan pijnlijk bewust. Zonder bergbossen zal Zwitserland te kampen krijgen met enorme modderlawines. Men vreest dat hele dalen onbewoonbaar zullen worden. Als de laatste vruchtbare grond van de bergen is verdwenen, blijven de periodieke watervloeden en de daaropvolgende droogten, alle landbouw in de dalen onmogelijk maken.

Bossterfte in het Oostblok

Zeer merkwaardig is de geringe aandacht die de bossterfte in de Oostbloklanden in de westerse media heeft gekregen. In bijvoorbeeld Polen en in Tsjechoslowakije was al vele jaren eerder dan in West-Duitsland sprake van ernstige aftakeling van grote oppervlakten bos. De westerse bosbouw, die wel degelijk op de hoogte was, schijnt daaruit weinig lering te hebben getrokken.

In Tsjechoslowakije vormt de fijnspar momenteel met een aandeel van 60% economisch de belangrijkste boomsoort. De eerste immisieschade aan bossen werd al in 1947 in het Eertsgebergte van Noord-Bohemen waargenomen. Bij de eerste inventarisaties in 1970 (!) waren 100 000 tot 300 000 hectaren van het bosbestand beschadigd. De financiële verliezen bedroegen in dat jaar 200 miljoen Tsjechische kronen. Daar zou eigenlijk bijgeteld moeten worden de aanzienlijke schade die is opgetreden door de versterking van de waterhuishouding en de daaruit voortvloeiende verliezen in de landbouw en de veeteelt. In totaal schat men het verlies in 1970 op 2,3 tot 2,9 miljard kronen. Door de Tsjechische Academie voor Wetenschappen is uitdrukkelijk gesteld dat schade aan eigendom en gezondheid in deze raming niet is meegeteld. Over 1980 berekende men een totaalverlies van 6,4 miljard kronen.

Men houdt er reeds rekening mee dat de emissies tegen het jaar 2000 ten minste 40% van het bos in Tsjechoslowakije zullen hebben

aangetast. In 1990 zal 30% van het totale Tsjechische bos, 650 000 hectare, in zijn bestaan zijn bedreigd en zonder emissiebeperkende maatregelen zal van 2000 tot 2010 meer dan een miljoen hectare bos ernstig zijn aangetast.

Hoewel al in 1973 was geconstateerd dat de bomen in het Ertzgebergte de helft van hun groeivermogen hadden verloren, nam de produktiviteit van het bos tot 1977 met nog eens 15% af. Sindsdien blijkt het bos zeer gevoelig voor droogte en koude en wordt het continu door insektenplagen geteisterd. De plagen worden intensief bestreden met insekticiden en lokstoffen. In 1979 heeft een normaal op lariks levend, zeldzaam insekt zich in de sparrenbossen zo hevig vermenigvuldigd, dat de plaag is overgeslagen naar andere berggebieden. In totaal zijn 46 000 hectaren door dit insekt aangetast. Ook bastkevers vermenigvuldigen zich ongebreideld in de aangetaste bossen. Sinds kort betreft men uit West-Duitsland valletjes met sex-lokstoffen en in 1981 ving men alleen al in Zuid-Bohemen circa 32 miljoen letterzetters, een van de soorten schadelijke bastkevers, met 5000 valletjes.

Overigens is op dit moment in het Ertzgebergte het eindstadium volop te zien. In het Tsjechische Ertzgebergte zijn al meer dan honderdduizend hectaren bos dood of volledig verdwenen. Hele streken zijn er ontvolkt, omdat er zonder bosbouw geen bron van inkomsten is. Ook toeristen komen niet meer en zelfs is het niet verantwoord er groente te kweken. Wanneer men overigens de Tsjechen een beschrijving van de huidige situatie in Nederland toont, krijgt men onveranderlijk te horen dat het er zeven jaar geleden in Tsjechoslowakije precies zo uitzag.

Twee derde deel van de Poolse bossen wordt door de luchtverontreiniging bedreigd en heeft te kampen met gevoeligheid voor droogte en periodieke epidemieën van insekten en schimmels. Sterke schade door rupsen van de nonvlinder treedt al verscheidene jaren op; de insekten worden gezien als bioindicatoren voor de schade door luchtvervuiling. De schade ontstaat vooral bij dennen en sparren, de belangrijkste boomsoorten in de Poolse bosbouw. Al in 1973 waren 47 000 hectaren dennenbos zeer ernstig aangetast, vergelijkbaar met de situatie in slechte dennenpercelen op de Veluwe of in Zuidoost-Drenthe in 1984. In 1984 waren 64 000 hectaren bos in Polen volledig verdwenen.

Volgens Sierpinski van het Poolse bosbouwproefstation te Warschau was in 1982 al een half miljoen hectaren zichtbaar beschadigd, de niet zichtbare schade zou nog veel groter zijn. In Polen vindt men de meeste bosschade in de zuidelijke industriegebieden. De belangrijkste schadegebieden zijn Boven-Silezië, Sudetenland en de grens met

Tsjechoslowakije. Alle zilversparren langs de hele Beskiden en het Tatragebergte zijn afgestorven; fijnsparren, beuken en eiken volgen. De zaden zijn zelfs onvruchtbaar.

Rondom een stikstof-kunstmestfabriek bij Lublin, die op bruinkool wordt gestookt en pas in 1969 in bedrijf werd genomen, waren in 1973 5000 hectaren bos vernield en inmiddels zijn daar al meer dan 10000 hectaren bos verdwenen. Op de vlakke groeien nu grassen noch mossen en er is geen levende boom of struik meer te zien. Herplant met elzen, berken, populieren of dennen is niet gelukt. Ook landbouwgewassen zoals bieten, maïs, haver en aardappelen sterven hier, ondanks hoge mestgiften (Zumr, 1984).

In Oost-Duitsland is de bewoonbaarheid van hele dalen in gevaar. Door de ontbossing van de hoger gelegen hellingen hebben de landerijen in het dal tijdens de sneeuwsmeelt te kampen met krachtige watervloeden en modderstromen. In de zomer is daarentegen sprake van een ernstige droogte, doordat er geen bossen en bosbodems meer zijn die water kunnen vasthouden en zo de rivieren en grondwaterstromen in de zomer van water blijven voorzien. Landbouw als middel van bestaan wordt in dergelijke gebieden onmogelijk. Triest is dat men in Oost-Duitsland weinig heeft gedaan om de emissies te beperken; men stuurt slechts de kinderen uit gebieden met zware luchtverontreiniging en bossterfte jaarlijks enkele weken naar een gezondheidskolonie.

Rusland heeft als grootste emittent van zwaveldioxide in Europa natuurlijk ook met bossterfte te maken, al hoort men daar tot nu toe weinig van. Volgens Brondke van de Duitse vakbond voor land- en bosbouw luiden, via informele contacten met Oosteuropese bosarbeiders, de berichten dat de situatie overal in het Oostblok ernstig is. Zelfs in Siberië ziet het bos er nu niet meer uit zoals kort geleden.

Inmiddels beginnen door het toenemend milieubewustzijn van de communistische overheden meer officiële berichten te verschijnen. De Russische bossterfte blijkt vooral ernstig in de naaldbossen in de regio's van Archangel en Moskou. In het zwaar geïndustrialiseerde Wit-Rusland heeft men, net als in het Duitse Ruhrgebied, de relatief gevoelige naaldbomen proberen te vervangen door minder gevoelige loofboomsoorten. Ook hier blijken echter de loofbomen in steeds sterkere mate te worden aangetast.

Bossterfte, een mondiale catastrofe

Soortgelijke treurige verhalen kunnen worden afgestoken over de geïndustrialiseerde landen elders in de wereld. China heeft bijvoorbeeld te kampen met de ernstige gevolgen van zure regen in het

industriegebied van Sjanghai en de Gele Rivier.

Over bossterfte in het zwaar geïndustrialiseerde en vervuilde Japan is niets bekend. Japan heeft zijn vergaande maatregelen tegen de zwavel- en stikstofoxiden niet genomen naar aanleiding van bossterfte, maar naar aanleiding van het veelvuldig ziekteverzuim onder de schoolkinderen van Tokio.

In het Zuidamerikaanse Venezuela worden delen van het tropisch regenwoud door de zure neerslag bedreigd. In Noord-Amerika komt de situatie vrijwel overeen met die in Europa. Canada, met zijn meren en zure granietverweringsbodems, speelt daar dezelfde historische rol als Scandinavië in Europa. In de provincies Ontario en Quebec zijn duizenden meren verzuurd. In bepaalde streken waar de oorspronkelijke Indiaanse bevolking voor haar voedselvoorziening is aangewezen op visvangst, treedt wegens het hoge gehalte aan zware metalen de beruchte Japanse Minamata-ziekte op. In de Arondidackbergen in de Verenigde Staten, ten westen van New York en Washington, zijn de honderden verzuurde meren al jaren dood en in grote gebieden is de bossterfte niet minder hoog dan in Europa. Het fenomeen van de bossterfte is overigens het eerst geconstateerd en onderzocht in het sterk vervuilde Californië.

Het heeft geen zin u te vermoeien met een eindeloze opsomming van alle schade en schadeontwikkelingen in deze landen. De herhaling zou vervelen. Het is wel belangrijk te beseffen dat bossterfte geen Duits of Nederlands probleem is. Het is een probleem op wereldschaal en het is alleen op te lossen indien alle landen zich beperkingen opleggen in het gebruik van fossiele brandstoffen. Het reinigen van rookgassen is slechts een voorlopige oplossing, want hierbij wordt alleen het vuil op een hoop geveegd en blijft het koolzuurgehalte van de atmosfeer onherroepelijk stijgen. De enige werkelijke oplossing ligt in het vernuftig aanwenden van de natuurlijke energiebronnen. In de westerse landen maar ook in het Oostblok wordt de zure regen door bepaalde groeperingen aangegrepen om de discussie over kernenergie opnieuw op te rakelen. De technische voor-sprong op het gebied van zonnetechnologie hebben wij al lang laten glijpen. Daarin heeft Japan, dat bekendstaat als zeer milieuverwoestend maar dat als eerste ten behoeve van de volksgezondheid zijn lucht begon te zuiveren, de leidende rol veroverd. In Japan legt men net zo gemakkelijk zonnecellen als dakpannen. Binnenkort plakt men ze als behang.

Zijn alle populieren ziek?

Bomen sterven niet alleen in bossen. Ook buiten bossen komen veel

bomen voor, in parken, erfbeplantingen en langs wegen. In economisch opzicht zijn deze bomen voor ons land zeker zo belangrijk als het bos, niet omdat ze bedoeld zijn voor de houtproductie, maar ze bepalen de leefbaarheid van het landschap. In de aanleg en het onderhoud van deze beplantingen wordt daarom veel geld gestoken. Maar ook park- en laanbomen kwijnen door luchtvervuiling. Er is alle reden om te veronderstellen dat de bomen langs wegen, meer nog dan de bomen in het bos, schade ondervinden door de luchtvervuiling. Ze groeien immers al onder betrekkelijk moeilijke omstandigheden. In de smalle berm tussen sloot en asfalt ondervinden ze de invloed van lood, stroomloze, bodemverdichting, landbouwgif en uitlaatgassen. Ook stadsbomen hebben tussen het asfalt en de stoeptegels een stiefmoederlijk plekje waar hun wortels door talloze graveerrijen worden mishandeld.

Boomchirurgen hebben goede jaren. Veel gemeenten spenderen miljoenen guldens om hun bomen een *facelift* te geven. Zonder een daadwerkelijke bestrijding van de luchtverontreiniging is het waarschijnlijk nooit méér dan één *facelift*. Boomchirurgie kan het sterven door luchtverontreiniging niet stoppen.

In de ons omringende landen is de slechte toestand van de bomen langs de wegen al lang een bron van zorg. Vooral in Engeland zijn de gevolgen van de aftakeling goed te zien, omdat men daar niet de gewoonte heeft de bomen zodra ze sterven te kappen. In ons land daarentegen worden de bomen verwijderd zodra de hoop op herstel is opgegeven. Zo precies gebeurt dat dat men licht de indruk krijgt dat een boom met te weinig bladeren als onzedelijk bloot wordt gezien. Het zou een indrukwekkende demonstratie zijn indien een jaar lang in heel Nederland geen boom werd gekapt. De Nederlander zou geschokt raken door de plotseling zichtbaar wordende omvang van de sterfte. Nu valt dat niet op, omdat elke plantsoendienst alleen een goede indruk heeft van de ontwikkeling op het eigen terrein. Met het verdwijnen van de bomen uit het landschap is het net als met het verdwijnen van de bladeren van de bomen: circa driekwart moet verdwenen zijn voordat de leek het onbehaaglijke gevoel bekruipt dat het erg kaal wordt in de wereld.

Een duidelijk voorbeeld van schade buiten bosgebieden wordt gevormd door de populieren. In Nederland wordt het kwijnen van populieren al heel lang aan beschadiging door ozon geweten. Het bestaan van ozon als een luchtverontreinigende stof is volgens het Instituut voor Planteziektenkundig Onderzoek (IPO) in ons land tot voor enkele jaren onderschat. Omdat in 1975 weinig bekend was over de effecten van ozon op bomen, is men bij het IPO begonnen populieren experimenteel te begassen met afzonderlijke ozon en met ozon in combina-

tie met zwavel- en stikstofoxiden. Van populieren was wel vanuit Amerika bekend dat ze uiterst gevoelig zijn voor ozon (Mooi, 1980). Aangezien overal ter wereld de meeste begassingsexperimenten werden gedaan met hoge concentraties gedurende korte perioden, besloot het IPO de proeven te doen met lage concentraties gedurende langere perioden (Mooi, 1983). De proeven en ook de controles gebeurden in kassen waarin de lucht met actiefkoolfilters was gezuiverd. De concentraties van de drie luchtverontreinigende stoffen waren bij de proeven van een orde van grootte die ook buiten voorkomt en de resultaten geven daarom een goed beeld van de schade die in werkelijkheid wordt geleden.

De groei en de conditie van populieren zijn reeds lang een bron van zorg. In de nazomer van 1978 werd geconstateerd dat in veel beplantingen, overwegend bestaande uit 'Populus Heidemij', langs wegen een vervroegde bladval en incidenteel sterfte voorkwamen (*Bosbouwvoorlichting* 22, no. 1). Dit verschijnsel deed zich het meest voor in Utrecht en Zuid-Holland. Het blad van de aangetaste bomen vertoonde steeds duidelijke bruinverkleuringen aan de rand. Het midden van de bladspiegel was steeds groen of hoogstens geelgroen van kleur. Op verzoek van de afdeling Verkeerswegen van Staatsbosbeheer had een onderzoek plaats naar de oorzaken.

Uit het onderzoek is gebleken dat het niet een incidentele groei-stoornis betrof. De groei van andere 'Heidemij'-beplantingen was al een aantal jaren slecht. De groeiplaatsen werden onderzocht op tal van factoren: verdichting van de grond, beperking van de groeiruimte door wegverbreding, wortelbeschadiging door aanleg van kabels, beschadiging door maaimachines en strooizout en verstoring van het grondwaterniveau. Er kon echter geen specifieke oorzaak worden aangewezen die grotendeels verantwoordelijk zou zijn voor de slechte groei of de achteruitgang van de onderzochte beplantingen. Eigenlijk bleef alleen de invloed van de luchtverontreiniging over, maar die was volgens de onderzoekers niet groter dan in de rest van Nederland.

Naar aanleiding van dit onderzoek heeft Staatsbosbeheer enkele maatregelen aanbevolen om de toestand van de bodem onder populieren te verbeteren. Sinds die tijd is de conditie van de populieren er over het algemeen evenwel niet op vooruit gegaan. Zowel in België en Duitsland als in Nederland is geconstateerd dat deze boomsoort er steeds minder florissant uitziet. In Duitsland wordt de populier momenteel aangemerkt als een van de boomsoorten die ernstige sterfte ondervindt door de luchtverontreiniging.

Gedurende het groeiseizoen verliezen populieren dikwijls een groot gedeelte van hun bladeren, schijnbaar zonder aanwijsbare oorzaak.

Populieren zijn echter heel gevoelig gebleken voor ozon, zwavel- en stikstofoxiden (Mooi, 1983). Het IPO heeft daarom de schadelijke werking van de luchtverontreiniging in zijn laboratoria onderzocht. Daarbij werden zes soorten populieren zes weken lang blootgesteld aan combinaties van lage concentraties SO_2 , O_3 (ozon) en NO_2 (overdag respectievelijk 60, 58 en 57, 's nachts respectievelijk 60, 0 en 23 microgram/ m^3 lucht).

Het bleek dat de combinaties van de drie stoffen veel schadelijker waren dan de stoffen afzonderlijk. De combinaties van zwaveldioxide met ozon en van stikstofoxide met ozon waren veel schadelijker dan de combinatie van zwaveldioxide met stikstofoxide. Daarom werd het schadelijke effect voor het grootste deel toegeschreven aan de werking van ozon. Dit bleek ook uit de overheersing van typische ozon-schadesymptomen. Tijdens de zes weken durende begassing werd het (droog) gewicht van de planten duidelijk negatief beïnvloed door de opgetreden bladval. Dit gewichtsverlies bedroeg voor de combinatie $\text{SO}_2 + \text{O}_2$ 10 à 15%, en voor de andere combinaties zelfs 20 à 30%.

Het beschreven onderzoek stelt dat een combinatie van stoffen op het niveau dat voorkomt onder normale buitenluchtomstandigheden al schadelijk voor populieren is. Omdat deze combinatie van stoffen voorkomt in grote delen van Europa en Noord-Amerika, moet in die gebieden rekening worden gehouden met een wijdverspreide schade door deze vorm van luchtverontreiniging aan populieren.

Hoewel in dit boek weinig wordt ingegaan op schade aan landbouwgewassen, is het goed te bedenken dat er geen reden is om bij voorbaat aan te nemen dat landbouwgewassen minder gevoelig zouden zijn dan bomen. Landbouwgewassen hebben weliswaar niet te lijden onder bodemverzuring, maar wel onder dezelfde vormen van milieustress als de bomen buiten het bos. (De populieren zijn groten-deels aangeplant op bodems die niet gevoelig zijn voor verzuring.) Uit buitenlands onderzoek is bijvoorbeeld bekend dat weidegrassen door luchtverontreiniging een aanzienlijke daling van de produktiviteit geven. Het IPO heeft daarom soortgelijke proeven gedaan met landbouwgewassen. Proeven met weegbree gaven, wanneer alle drie de stoffen werden toegediend, een groeireductie van maar liefst 40-60% te zien ten opzichte van de controleplanten zonder verontreiniging. Controleproeven zonder zwaveldioxide of zonder ozon vertoonden slechts een groeivermindering van 0-20%.

De ozonbevattende mengsels veroorzaakten bij rode en witte klaver spikkelvormige dode plekken aan oudere bladeren. Die bladeren werden geleidelijk bleek en vielen na sterfte af. Ook bij deze planten bleek de combinatie van de verschillende stoffen een aanmerkelijk

groter effect te hebben dan de gesommeerde effecten van de stoffen afzonderlijk.

Met mengsels van ozon en stikstofoxiden en van zwaveldioxyden en stikstofoxiden zijn eveneens meer dan additieve effecten aangetoond bij bonen, komkommers, radijs en tomaat.

Erosie van de rijkdom aan erfelijke eigenschappen

De luchtverontreiniging oefent een grote selectiedruk uit op het totaal van erfelijke eigenschappen binnen de Nederlandse populaties van weegbree, populier en andere gewassen. In Nederland worden bijvoorbeeld op instigatie van het Bosbouwproefstation al tientallen jaren *Populus euramericana* en *Populus canescens*, cultivars van Amerikaanse oorsprong, massaal aangeplant. De Amerikaanse populier en grauwe abeel hebben net als andere populieren veel te lijden van luchtverontreiniging en worden snel vervangen door jong plantgoed. Onze eigen inheemse soorten, de esp en de zwarte populier, worden steeds zeldzamer. Deze bomen moeten het voornamelijk hebben van natuurlijke verjonging op de enkele overhoekjes waar dat nog getolereerd wordt (Ecoplan, 1982). Wanneer echter oudere exemplaren verdwijnen van standplaatsen waar men wel graag populieren ziet, worden deze in de regel vervangen door de moderne cultivars, bijvoorbeeld *Populus euramericana* 'Dorskamp' of 'Zeeland'.

Zelden zal het voorkomen dat de bevoegde instanties herkennen welke soort populier is gekapt en nooit gebeurt het dat onze wilde inheemse populier expres wordt aangeplant. Er is bovendien geen kweker die hem teelt. Zo verdwijnt, door de snelle verjongingscyclus ten gevolge van de luchtverontreiniging, de inheemse variëteit en daarmee verdwijnt ook een kostbare bron van erfelijk materiaal voor de teelt van tegen ziekten resistente populieregrassen.

Dit voorbeeld staat niet op zichzelf. Een dergelijke selectiedruk bestaat waarschijnlijk voor heel veel plant- en diersoorten. Wellicht is deze sluipende verarming een van de fundamentele bedreigingen van onze biosfeer. De ecologische schade is op dit moment niet bij benadering te schatten. De eruit voortvloeiende economische schade heeft voornamelijk betrekking op de verarming aan potentieel nuttige eigenschappen binnen cultuurgewassen of de wilde variëteiten daarvan.

De verarming kan ook indirect met de cultuurgewassen in verband staan. Doordat bijvoorbeeld de diertjes die schadelijke insecten eten, stoffen zoals zware metalen in relatief hoge mate accumuleren, worden ze selectief benadeeld ten opzichte van de schadelijke insecten. De insecten krijgen daardoor min of meer vrij spel.

4. OORZAKEN VAN BOSSTERFTE

Is bossterfte onverklaarbaar verklaard?

De bossterfte is nog niet zo duidelijk verklaard als bijvoorbeeld de vissterfte. Er zijn weliswaar veel oorzaken bekend die ieder voor zich vroeg of laat voor bomen en bossen dodelijk kunnen zijn, maar het gelijktijdig afsterven van de bossen in alle landen en op alle bodems blijft moeilijk te verklaren.

Zoveel professoren, zoveel theorieën

Vroeger was vervuiling een lokaal probleem, eerst later in de onmiddellijke nabijheid van fabrieken en ertssmelterijen, later meer regionaal in geïndustrialiseerde streken zoals het Ruhrgebied. De politiek van de hoge schoorstenen heeft tot gevolg gehad dat de vervuiling over het hele noordelijk halfrond schadelijke niveaus heeft bereikt.

Toch zijn er verschillen. Nabij industriegebieden en stedelijke concentraties wordt de vervuiling gedomineerd door vliegias en aerosol van metalen en zwaveloxiden. Ver van de industriegebieden, met name in kuststreken en berggebieden, wordt de vervuiling gedomineerd door fotochemische oxidanten zoals ozon. De zwaveldioxideconcentraties zijn in Midden-Europa bijna een factor tien hoger dan in Zuid-Zweden en voor de neerslag van zwavel is het verschil een factor vier. Ook de zuurgraad van de regen verschilt aanzienlijk van land tot land. Toch treedt overal op het noordelijk halfrond tegelijkertijd bossterfte op.

Juist die gelijktijdigheid is een beangstigend verschijnsel dat nog door geen enkele theorie afdoend is verklaard. Weliswaar is het algemeen geaccepteerd dat de sterfte in eerste instantie wordt veroorzaakt door de gigantische hoeveelheid rookgassen die wij met elkaar in de dunne aardse atmosfeer blazen, maar het is nog omstreden hoe deze vervuiling precies zijn schadelijke uitwerking heeft.

Tallose details zijn bekend. Er zijn vele duizenden fundamentele onderzoeken gedaan naar de effecten van zure regen. Dat aantal neemt jaarlijks met vele honderden toe en er is meer geschreven over luchtvervuiling dan iemand in zijn hele leven kan doornemen. Door samenvoeging van brokstukken kennis zijn er enkele theorieën ontstaan die de grootschalige bossterfte grotendeels kunnen verklaren, maar toch zijn die theorieën niet sluitend.

Aanvankelijk gaf het grote aantal verklaringen aanleiding tot een zeke-

re polarisatie binnen de wetenschap. Vooraanstaande wetenschapsmensen of instituten verzamelden zoveel mogelijk volgelingen om aan de eigen theorie te bouwen en andere opvattingen te vuur en te zwaard te bestrijden. Deze geloofsijver is afgenomen naarmate het bos sneller verdween. Steeds vaker ziet men nu wederzijdse erkenning van elkaanders verklaringen.

In juli 1983 bezocht ik op uitnodiging van prof. Ulrich de proefvlakken van de Universiteit van Göttingen in de Solling en de Harz. Op basis van het bodemkundig onderzoek in deze bossen is de theorie ontstaan dat bossen pas sterven als de bodem verzuurt. De theorie heeft wereldfaam en wordt ook in Nederland, getuige het Meerjarenprogramma Lucht en de notitie over verzuring aan de Tweede Kamer, aangehangen als de enige ernstig te nemen verklaring over de sterfte van de bossen.

Toen ik Ulrich de door mij geconstateerde schade in de kleigebieden, een schade die onmogelijk door bodemverzuring kon zijn veroorzaakt, voorlegde, wees hij erop dat zijn theorie niet volledig is. De werkelijkheid is nog steeds ingewikkelder dan de wetenschappelijke modellen. Het leek hem niet onwaarschijnlijk dat ook de andere, schijnbaar tegenstrijdige theorieën, juist zouden blijken en deel konden uitmaken van de totale verklaring van de bossterfte.

Klassieke rookschade

Bij de zogenaamde klassieke rookschade in de nabijheid van industrieën constateerde men een directe aantasting der gewassen door schadelijke gasvormige stoffen zoals zwaveldioxide en fluorwaterstof. In Nederland werd deze schade door het Instituut voor Plantenziektenkundig Onderzoek al onderzocht voor er van bossterfte sprake was.

Het gevolg van de klassieke schade was het voortijdig afvallen van bladeren en naalden. Vooral boomsoorten zoals sparren, waarvan de naalden vele jaren oud moeten worden, zijn erg gevoelig voor de continue aantasting door rookgassen. In het Rijn- en Ruhrgebied, waar deze schade al vele tientallen jaren optreedt, zijn gevoelige sparresoorten reeds lang vervangen door minder gevoelige dennen en loofbomen. Dennen groeien nog goed als hun naalden 2 tot 3 jaar oud kunnen worden en loofbomen vernieuwen hun blad elk jaar. De klassieke rookschade herstelt zich zodra de luchtverontreiniging stopt.

De huidige bossterfte zou verschillen van de klassieke rookschade, doordat de bomen niet sterven aan directe beschadiging, maar aan een fundamentele verandering in het hele ecosysteem. De luchtverontreiniging is sinds de oliecrisis van 1970 immers niet dermate toe-

genomen dat de plotselinge sterfte wordt verklaard door een verheviging van de klassieke rookschade. De Duitse overheid spreekt daarom veelal van 'neuartigen Waldschäden'. Het lijkt erop dat de continue toevoer van luchtverontreinigende stoffen niet de vitaliteit van een aantal bomen op een laag maar stabiel niveau houdt, maar dat deze stoffen de reserve aan vitaliteit van het hele bos of de elasticiteit van het hele ecosysteem geleidelijk aan hebben verdreven.

Door een onomkeerbare verandering in het ecosysteem sterven plotseling de bomen en het maakt daarbij politiek gezien geen wezenlijk verschil of die verandering gelokaliseerd moet worden in de planten of in de bodem. De bossterfte kan alleen tot staan worden gebracht door de luchtverontreiniging terug te dringen tot een fractie van het huidige niveau. Dat wil niet zeggen dat verder onderzoek zinloos is. Integendeel. Slechts op basis van vroeger wetenschappelijk onderzoek begrijpen wij nu de hoofdlijnen van het desastreuze proces. Op grond van het onderzoek is de bossterfte ook lang van tevoren voorspeld. Dat de investering in wetenschappelijk onderzoek voor een deel vruchteloos is gebleven, is niet alleen te wijten aan gebrek aan gegevens, maar ook en veeleer aan de gebrekkige besluitvorming in de maatschappij. Beleidsuitvoerenden en politici hebben de waarschuwingen te lang als onrealistisch naast zich neergelegd en bleken slechts te overtuigen door een daadwerkelijk afsterven van de bossen.

Verder onderzoek zal weliswaar niets kunnen bijdragen aan het nemen van de juiste maatregelen, maar het is van het grootste belang dat de precieze processen, met name de veranderingen in bodem en water, worden onderkend, willen wij ooit de vruchtbaarheid van onze wereld kunnen herstellen. In het volgende wordt daarom een schets gegeven van de verschillende ecosysteemtheorieën.

Bodemverzuring en blikvergiftiging

Als eerste ontwikkelde de reeds vaker genoemde prof. Ulrich, vroeg in de jaren zeventig, een theorie over de oorzaken van bossterfte. Aangezien hij in de eerste plaats bodemkundige is, staat in zijn theorie de verzuring van de bodem centraal. De giftige werking van aluminium-ionen in verzuurde bodems is volgens hem de hoofdoorzaak van de bossterfte (Ulrich, 1983).

Het verzuringsproces verloopt min of meer trapsgewijs. Boven pH 6,2 wordt de zuurgraad voornamelijk gebufferd door kalk (calciumcarbonaat). De kalk lost op tot calciumhydrocarbonaat en verdwijnt met het grondwater. (Het grondwater wordt 'hard'.) Pas wanneer de vrije kalk bijna geheel is verbruikt, daalt de pH beneden dit niveau. De grote

hoeveelheid calcium in de bodem werkt in dit bufferbereik enigszins remmend op de kaliumopname van de bomen. Hoewel hier bepaald geen sprake is van bodembederf, zijn dergelijke bodems niet de gunstigste groeiplaatsen.

Tot pH 5,0 worden de zuren gebufferd door het vrijkomen van natrium-, kalium-, magnesium- en calcium-ionen uit silicaten. Daarbij worden de primaire silicaten (bijvoorbeeld veldspaten) omgezet in kleimineralen. In dit buffertraject vindt men over het algemeen geen beperking van de boomgroei door bodemchemische factoren. Voor bosbouw is deze toestand eigenlijk het ecologisch optimum. Wanneer de bodems erg veel van deze mineralen bevatten, de zogenaamde silicaatverweringsgronden, is het bufferend vermogen zeer hoog. Op de pure kleibodems is de buffercapaciteit zo hoog dat er van bodemverzuring geen sprake kan zijn.

In deze eerste twee trajecten speelt ook de natuurlijke verzuring door koolzuur, dat bij de wortelademhaling vrijkomt, een grote rol.

In het bufferbereik beneden pH 5,0 speelt het koolzuur van de wortelademhaling geen rol meer. Het door de planten gevormde kooldioxide vormt vrijwel geen koolzuur, maar verdwijnt als kooldioxidegas uit de bodem. Beneden pH 5 zijn alleen sterke zuren zoals salpeterzuur, zoutzuur en zwavelzuur van belang in de bufferreacties (Dam, 1983).

Beneden pH 5,0 bepalen aluminiumhoudende kleimineralen voor een groot deel de buffercapaciteit van de grond. Tot pH 4,2 worden waterstof-ionen uitgewisseld tegen aluminiumhydroxide-ionen en lossen zware metalen in toenemende mate op. In deze fase spoelen ook calcium-, magnesium- en kalium-ionen verder uit. In dit bufferbereik worden niet-tolerante soorten geremd door een zekere zuur- of aluminiumvergiftiging en worden kalkminnende soorten uitgesloten. Tevens vermindert het bacterieleven in de bodem en wordt het strooisel voornamelijk door bodemschimmels verteerd. De economisch belangrijke boomsoorten zoals fijnspar, den, lariks, beuk en eik horen tot de voor zuur tolerante soorten. Als de bodem niet voldoende humus bevat om aluminium en andere vrije metaal-ionen te binden, begint al in dit stadium het bodemleven uit de minerale grond te verdwijnen. Door het ontbreken van bodemwoelende organismen vormt zich een humuslaag boven op de minerale grond.

Beneden pH 4,2 worden vrije aluminium-ionen in het bodemvocht gevormd. Deze laatste zijn al in uiterst lage concentraties giftig voor de wortels van bomen en de meeste andere planten. De plantenvoedende stoffen worden in deze fase in zeer ernstige mate uitgespoeld. Fosfaat en het sporenelement molybdeen worden in voor planten zeer moeilijk bereikbare vorm vastgelegd. In dit bufferbereik worden dan ook alle planten beïnvloed door de giftigheid van aluminium en is

er zelfs een verminderde groei bij kalkmijdende soorten, inclusief beuk, eik en den.

Als ten slotte het bufferend vermogen (de buffercapaciteit) van de aluminiumhoudende kleimineralen is verbruikt (of als de buffersnelheid daarvan te laag is), beginnen ijzeroxiden (roest) een bufferende functie te krijgen. Tussen pH 3,8 en 3,0 neemt ijzer geleidelijk de functie van aluminium over. In dit stadium krijgen alle planten te maken met aluminium- en ijzervergiftiging en kunnen alleen die planten overleven die slechts in de humuslaag wortelen. Planten die zoals het gras bochtige smele op de kale bosbodems groeien nadat het bos is afgestorven, kunnen waarschijnlijk slechts overleven dank zij hun vermogen om continu hun wortels te vernieuwen. De oude wortels met het opgehoopte aluminium worden daarbij in hoog tempo afgestoten.

Het zuur slaat door

De bodem kan op twee manieren verzuren. In elk bufferbereik heeft de bodem een bepaalde buffercapaciteit en een bepaalde buffersnelheid. Als de buffersnelheid groot genoeg is om de zuurtoevoer te neutraliseren, zakt de zuurgraad pas naar een volgend traject als de hele buffercapaciteit is verbruikt. De bodem kan zich in dat geval niet spontaan van de verzuring herstellen.

Het is echter ook mogelijk dat in een bepaalde periode zoveel zuur in de bodem komt (met de zure regen of door biochemische processen) dat de buffersnelheid niet hoog genoeg is om de grote zuurtoevloed direct te neutraliseren. In dat geval daalt de zuurgraad onmiddellijk naar een lager buffertraject. De pH slaat door naar een volgend buffertraject. Deze vorm van bodemverzuring kan zich herstellen zodra de toevloed van zuur stopt. De zuurgraad van bodems met een geringe buffersnelheid kan dus tussen twee pH-waarden heen en weer slingeren. Hierdoor ontstaan de zogenaamde zure schokken, die verantwoordelijk zijn voor de periodieke wortelsterfte in veel bossen.

De metingen van Ulrich en zijn medewerkers toonden aan dat in bodems in het silicaatbufferbereik (pH 6,2-5,0) de buffersnelheid 3,5 tot 35 maal zo klein is als de gemiddelde neerslag van zure stoffen in Duitsland (0,2-2 kmol tegenover respectievelijk 7 kmol H^+ -equivalent). Het is volgens hem vanzelfsprekend dat dit moet leiden tot bodemverzuring en bossterfte. Men hoeft niet meer dan deze vergelijking te kennen om te weten dat de huidige zure neerslag tot verstrekkende veranderingen in ecosystemen moet leiden.

Verzuring slaat door van blad naar wortel

Uit het onderzoek van de Universiteit van Göttingen is gebleken dat een groot deel van het zuur door de bladeren in het kronendak wordt geneutraliseerd. Bij dit proces worden magnesium, kalium en calcium uit de naalden of bladeren gewassen. Dit kan op zichzelf leiden tot gebreksziekten, met name aantasting van het bladgroen door magnesiumgebrek. Afhankelijk van het bodemtype en de boomsoort kan de zuurbuffering in het kronendak variëren van 20 tot 50%. Dit is alleen mogelijk als de elektronenneutraliteit in het systeem wordt bewaard; dus als het in het blad gebufferde zuur direct wordt doorgegeven aan de bodem (onder uitwisseling van bijvoorbeeld calcium- of metaalionen). Zonder dat dus de hele bodem verzuurt, kan toch in en rondom de wortels een ernstige verzuring optreden met dezelfde effecten als bij verzuring van de hele bodem. Wortelonderzoek heeft uitgewezen dat aluminium en zware metalen zich relatief onafhankelijk van de chemische bodemtoestand in aanzienlijke mate in de wortels ophopen.

Het voorgaande betekent dat op het grensvlak van wortel en bodem periodiek sterke verzuring optreedt. Zolang dit kortstondige perioden blijven en de wortel nadien weer voldoende opgeloste kalk (calciumhydrocarbonaat) kan opnemen, hoeft dit slechts overkomelijke schade te veroorzaken. Het wordt echter ernstiger als ook het calcium uit de celwanden is verdwenen. Dat wil namelijk zeggen dat in de wortel zelf al een pH lager dan 4 is voorgekomen. In dat geval raken het in de wortel aangereikte aluminium en de zware metalen in oplossing en daarbij worden de wortels ernstig beschadigd.

De wortelbeschadigingen beginnen bij de mycorrhiza (schimmelwortels) of de wortelpunten. Vandaar schrijdt de schade voort doordat schadelijke stoffen en ziekteverwekkende organismen via de al aanwezige beschadigingen kunnen binnendringen.

Uiteindelijk leidt een doorwoekerende wortelbeschadiging tot het afsterven van bomen. Dit afsterven is bij de voor zuur tolerante soorten van onze produktiebossen een langdurig proces. Men kan twee gevallen onderscheiden.

In het eerste geval heeft de boom in zijn jeugdfase zijn wortelstelsel ongehinderd en ruim kunnen laten uitgroeien. Hij heeft dan een wijdvertakt en diep wortelstelsel ontwikkeld. In dat geval kan de boom een zich langzaam ontwikkelende giftige invloed vanuit de bodem tientallen jaren weerstaan. Daarbij wordt het wortelstelsel echter schoksgewijs afgebroken. Het laatste stadium van dit proces, waarbij zich vanuit de levend gebleven hoofdwortels nieuwe zijworteltjes hebben ontwikkeld, kan men aan blootgelegde wortels goed herkennen.

In het tweede geval is de wortelgroei van de boom al vanaf de jeugd-fase gestoord. Giftige bodemlagen zijn dan helemaal niet beworteld of de vertakking gaat kenmerken vertonen van een herhaald afsterven van de zijwortels. In zijn vaardigheid om zijn wortelstelsel te beperken tot de humuslaag en de door humusinfiltratie beïnvloede bovenlaag overtreft de fijnspaar alle andere boomsoorten. Ook in dit geval is aan de aard van de wortelvertakkingen te zien dat het begin van de schadeontwikkeling jaren, zelfs tientallen jaren, terug ligt. Tussen beide gevallen zijn overigens alle mogelijke overgangen te vinden.

Naarmate de boom meer stofwisselingsprodukten moet steken in onderhoud en herstel van zijn wortelstelsel, blijft er minder over voor de groei van de bovengrondse delen. Dit veroorzaakt een vermindering van de houtproduktie. Deze vermindering is in vele delen van Europa al geconstateerd ver voor er sprake was van bossterfte.

Uiteindelijk wordt ook het vermogen om de wortelschade te herstellen aangetast. Eveneens kunnen andere stressfactoren, die vroeger relatief onschuldig waren, nu schadelijk worden, zoals de directe invloeden van 'normale' niveaus van luchtverontreiniging, een droge of juist te natte zomer, een te koude of te warme winter, normaal onschuldige of symbiotische schimmels en allerlei andere ziekten en parasieten. Door de vergaande reductie van het wortelstelsel en de geringe hoeveelheid bewortelde bodem verliest het hele ecosysteem zijn elasticiteit.

Volgens Ulrich hebben de verminderde prestatie van het gereduceerde wortelstelsel en de hoeveelheid energie die gestoken moet worden in het herstel van de wortels tot gevolg dat ten slotte ook in de kroon schadesymptomen optreden aan takken, naalden en bladeren. Dit in tegenstelling tot de theorie van prof. Schütt uit München, die aanneemt dat eerst de naalden of bladeren worden aangetast door de luchtverontreiniging en dat deze aantasting leidt tot een gebrek aan bladgroen, aan produktievermogen dus, noodzakelijk voor de instandhouding en de groei van het wortelstelsel.

Bossterfte, niet door bodemverzuring alleen

Niettegenstaande de ecosysteemtheorie van Ulrich, die de bossterfte vrijwel waterdicht kan verklaren, zijn er helaas genoeg feiten die in een andere richting lijken te wijzen. De bomen blijken het ergst te worden aangetast, indien ze aan zon en wind zijn blootgesteld. Het kwetsbaarst zijn de toppen van de bomen die boven het bos uitsteken en de bomen in westelijke bosranden of in open, sterk gedunde bestanden. Het komt zeer vaak voor dat bosranden als ernstig beschadigd worden aangemerkt, terwijl de bomen een dertig meter ver-

der in het perceel nog redelijk vitaal zijn.

Bossen met een open of onregelmatige structuur lijken relatief snel te kwijnen. Ook losse groepjes bomen die na de kap of na stormschade zijn blijven staan, blijken kwetsbaar en vooral in de laatste min of meer natuurlijke bossen, die door hun onregelmatige structuur veel wind vangen, verloopt de schadeontwikkeling razendsnel.

Hoog op de bergen, waar de bossterfte begon, is de windsnelheid groter dan in de dalen. Daardoor lijkt het waarschijnlijk dat niet de verzuring van de bosbodem, hoe funest ook op de lange termijn, de acute verslechtering veroorzaakt. Ook het feit dat de schade is geconstateerd op de kleigronden in het Duitse Oostfriesland en in het Groningse en Friese kleigebied pleit niet voor de theorie dat de bossterfte uitsluitend plaatsvindt na bodemverzuring (Poortinga, 1984). In Duitsland is geconstateerd dat met name in oudere bossen in de streek bij Paderborn de schade op vruchtbare bodems groter is dan die op arme gronden. De sterfte lijkt daar in hogere mate afhankelijk van de leeftijd dan van de bodemkwaliteit (Spelsberg, 1983).

De bosschade blijkt zich vanaf de toppen van de Duitse bergen het snelst te hebben uitgebreid over de zuidwestelijke hellingen, welke zijn blootgesteld aan de overheersende winden. Dit bleek bijvoorbeeld duidelijk in het Duitse bosdistrict Kempen (Noordrijn-Westfalen). Dit gebied wordt door de kam van het Eggegebergte verdeeld in een 'winderige' westhelling en een 'luwe' oosthelling. Op de aan de overheersende westenwind blootgestelde helling bleek meer dan 60% van de fijnsparren ziek of ernstig ziek te zijn, terwijl op de beschutte helling nog geen 5% in deze categorieën viel. In andere Duitse gebieden zijn dergelijke uitgesproken verschillen eveneens geconstateerd.

Ook buiten het bos sterven bomen, in parken, langs wegen en in erfbeplantingen. Ook daar begint de sterfte bij die bomen en die delen van bomen die de meeste wind vangen. Het feit dat op vruchtbare bodems bladeren aan naar het westen gerichte takken bruin kunnen worden zonder dat de rest van de boom door schade is aangetast, lijkt evenmin te pleiten voor de theorie dat bomen pas ziek worden na verzuring van de bodem of eventueel het wortelstelsel. Wel lijkt het duidelijk dat bossen op verzuurde gronden ernstiger zijn aangetast dan bomen op goede bodems maar verder onder gelijke omstandigheden. Gemeten in jaren van ontwikkeling is het verschil in schade echter klein.

[Fotos verhuisd na pagina 271](#) Bossterfte is niet beperkt gebleven tot naaldbossen. Ook de loofbossen sterven. In de oude eikenbossen die tot op heden de pronkjuwelen van de Nederlandse natuurbescherming vormden zijn verregaande stadia van verval zichtbaar.

De kwaliteit, met name het zuurbufferend vermogen van de bosbodems in Europa, loopt sterk uiteen. Het zou meer dan toeval zijn, wanneer in alle gebieden na tientallen jaren van grote luchtverontreiniging nu plotseling de bodems terzelfder tijd verzuurd waren.

De betekenis van dit alles kan zijn dat de bomen door de wortelsterfte al op zeer grote schaal verzwakt waren, zodat enkele extreme klimatologische invloeden (die zich normaal eens in de tien tot twintig jaar voordoen) de druppels waren die de emmer deden overlopen. Het kan ook zijn dat toch tegelijkertijd meer gewicht moet worden gehecht aan andere theorieën, bijvoorbeeld de veronderstelling van prof. Schütt dat de bossterfte primair wordt veroorzaakt door beschadiging van de bovengrondse delen.

Het uitwassen van mineralen als hoofdoorzaak van bossterfte

Ook volgens de botanicus prof. Schütt wordt de bossterfte veroorzaakt door een algehele verzwakking van het bosesysteem ten gevolge van de jarenlange immissie van luchtverontreiniging. Ook hij stelde een buitensporige schade aan boomwortels vast. Het stelsel van de kleinere wortels blijkt zijn vermogen tot regeneratie te verliezen. De vorming van schimmelwortels loopt sterk terug en het produktievermogen van de bomen vermindert. Ook de zaadvorming wordt verstoord en de bomen worden gevoeliger voor ziekten. Dit zijn dezelfde verschijnselen die Ulrich en zijn medewerkers vonden. Alleen de interpretatie over de wijze van aantasting verschilt. Schütt legt meer de nadruk op de directe aantasting van het blad, niet alleen door zuren, maar ook door sulfaat, zware metalen en ozon. Door de algehele verzwakking van de boomkroon zou de boom niet genoeg suikers kunnen maken om zichzelf en zijn wortelstelsel te onderhouden. Schütt stelt dus dat eerst de bladeren ziek worden en ten gevolge daarvan de wortels en de symbiotische wortelschimmels. Doordat het bosesysteem op deze wijze wordt verzwakt, zou op den duur een relatief lichte milieustress, vorst of droogte, het bosesysteem kunnen laten instorten.

Door de Landesanstalt für Immissionsschutz (LIS) te Essen wordt nog meer de nadruk gelegd op de directe aantasting van de boomkruinen. In enkele spraakmakende publikaties heeft dit instituut niet de zuren maar de fotochemische oxidanten, met name ozon, als hoofdschuldige

[Fotos verhuisd na pagina 271](#) De meeste korstmossen zijn erg gevoelig voor luchtverontreiniging. De gevoeligste soorten zijn al uit ons land verdwenen. Door de luchtverontreiniging worden baardmossen die vroeger vele bossen een mysterieus en eerbiedwaardig aanzien gaven, hier al tientallen jaren geleden uitgestorven.

gen van de bossterfte aangewezen (LIS, 1982). Op grond van het feit dat de sterfte hoog in de bergen begon en in 1976 relatief sterk toenam, zocht men een schadelijke stof die bij dit beeld paste. Dit bleek ozon te zijn, want daarvan is de concentratie boven in de bergen hoger dan in lager gelegen gebieden en van ozon zijn in de zonnige zomer van 1976 over heel Europa zeer hoge concentraties gemeten. De buitenhuid van naalden zou door ozon bros worden en doorlaatbaar voor andere schadelijke stoffen zoals zwaveldioxide. Ook zouden pas na de ozonaantasting magnesium en kalium door de regen uit naalden en bladeren kunnen worden gewassen, waarna de bomen hun belangrijkste stof, het bladgroen, niet meer kunnen vormen. Ook in 1982, het jaar waarin volgens de Duitse inventarisaties opnieuw sprake was van een grote toeneming van de bosschade, zijn door de LIS hoge ozonconcentraties gemeten.

In een wat andere richting gaat de theorie van een aan de Universiteit van Frankfurt verbonden hoogleraar. Dit is de bodemkundige Plass, die zich normaal bezighoudt met de kartering van de bodemgeschiedenis in Hessen. Prof. Plass volgt in grote lijnen de theorie over bodemverzuring van zijn collega Ulrich. Hij wijst alleen niet aluminium aan als de hoofdoorzaak van de sterfte, maar molybdeen (Genssler, 1983). Molybdeen is een sporenelement waar planten beslist niet zonder kunnen. In de landbouw is dit bekend en wanneer een slechte groei door molybdeengebrek wordt geconstateerd, past men direct een molybdeenbemesting toe. In de bosbouw is dit net zo eenvoudig. Bij een sterke bodemverzuring wordt molybdeen in de bodem vastgelegd en dan kunnen de bomen niet meer over dit onmisbare sporenelement beschikken. Hierdoor denkt Plass alle ziekteverschijnselen, van de bergtoppen tot in de dalen, vanaf het vergelen van de naalden tot een volledig naaldverlies, te kunnen verklaren.

Een zeer conservatieve mening is die van prof. Rehfuess uit München. Hij verkondigde enkele jaren geleden nog aan de bosbouwers dat bossterfte zonder bekende oorzaak een heel oud verschijnsel is. Na droge jaren zou dat regel zijn. Er is dan eenvoudig gebrek aan water en de boom reageert daarop door een deel van zijn bladeren te laten vallen, terwijl in de uitgedroogde bodem de kleine wortels afsterven. Door de aantasting van het wortelstelsel in de droge periode heeft de boom jarenlang moeite met zijn waterverzorging en daardoor blijft hij gevoelig voor andere nadelige invloeden.

In 1981 schreef Rehfuess: 'De door Ulrich geconstateerde correlatie tussen de toegenomen concentratie opgelost aluminium en de afname van de gewichtshoeveelheid aan levende wortels in de bosbodem kan niet als het bewijs voor de vergiftigende werking van aluminium gelden. Bij nauwkeurig onderzoek van zijn (Ulrichs) grafieken valt op

te merken dat het aluminium pas begint toe te nemen als de hoeveelheid wortels al sterk is afgenomen.' Bovendien zou de wortelsterfte elk jaar precies hetzelfde verloop hebben en een soort natuurlijke ritmiek van het bodemleven zijn. Vegetatiekundige waarnemingen die op een snelle verzuring van de bodem wezen, waren hem niet bekend (Rehfuess, 1981). Door de toch ongewoon snel voortschrijdende bossterfte heeft Rehfuess zijn mening herzien. Onderzoek van zijn instituut heeft uitgewezen dat uit de sparrenaalden inderdaad magnesium, calcium, zink en mangaan lekken. Dit gebeurt naar zijn mening ten gevolge van de directe aantasting van de boomkruinen door zwaveldioxide. De gele verkleuring zou te wijten zijn aan de uitwasping van magnesium. Ook twijfelt hij er niet langer aan dat de neerslag op den langen duur de bodemvruchtbaarheid zal beïnvloeden. Toch blijft hij volhouden dat men ervan mag uitgaan dat een deel van de huidige ziekten in het bos natuurlijke oorzaken heeft (Rehfuess, 1983).

Zijn collega uit Freiburg, prof. Zöttl, bevestigt de theorie van Rehfuess. Zöttl stoelt zijn mening op een eigen onderzoek naar de concentraties van zware metalen en voedingsmineralen in plantedelen in het Zwarte Woud. Hij onderschrijft echter niet de mening van Ulrich dat het functioneren van de boomwortels door aluminiumvergiftiging wordt aangetast. Zijn opvatting is dat het gebrek aan bepaalde mineralen niets te maken heeft met een slechter functioneren van het wortelstelsel door aluminiumvergiftiging, maar met een gebrek aan calcium en magnesium in de bodem wegens de hoge verzadiging van het chemische bodemcomplex met aluminium (Zöttl, 1983).

De eerste onderzoeken naar bossterfte (in Californië) hebben zich gericht op de directe aantasting door smog. In Noord-Amerika is nog geen onderzoek verricht naar de bossterfte op continentale schaal. Waar wel schade wordt vermoed, schrijft men deze voornamelijk toe aan de werking van ozon. Momenteel is er echter een groeiende belangstelling voor de ecosysteemtheorieën, met name voor de bodemtheorie van Ulrich.

Een prominent bodemkundige in de V.S. is H. F. Bormann, hoogleraar aan de Yale Universiteit in New Haven (Connecticut). Hij heeft getracht een algemeen geldend patroon in de degradatie van het bosesysteem ten gevolge van zure regen te schetsen. Hij onderscheidt zeven hoofdstadia, te beginnen met de maagdelijke situatie waarin het niveau van de luchtvervuiling te gering is om van betekenis te zijn. In elk van de volgende stadia is sprake van een toenemende accumulatie van bepaalde stoffen. Andere stoffen, met name plantennutriënten spoelen echter uit. Bij de overgang naar elk volgend stadium is sprake van een selectie (vaak een verarming) van het erfelijk materiaal bin-

nen de groepen planten en dieren die erin slagen zich (schijnbaar ongestoord) te handhaven. Vervolgens wordt het functioneren van een steeds groter aantal soorten meer en meer gestoord. Biologische kringlopen, fotosynthese en andere functionele processen van het ecosysteem worden in toenemende mate aangetast. In de latere stadia zijn de planten steeds meer aangewezen op mechanismen om de giftigheid van het milieu te neutraliseren. In het laatste stadium stort het ecosysteem geheel in, waarbij catastrofes ontstaan, zoals ernstige insektenplagen, windworp of branden. Spontaan herstel van de vernielde ecosystemen kan tientallen tot duizenden jaren vergen (Bormann, 1983). Factoren die het herstel ernstig kunnen belemmeren zijn erosie en het uitsterven van talloze essentiële organismen.

Uit het voorgaande is duidelijk dat een ieder het verschijnsel bossterfte allereerst vanuit zijn eigen vakgebied benadert. Ook komt eigenlijk elk instituut met overtuigende bewijzen dat hetzij processen in de bodem, hetzij aantastingen van de planten direct vanuit de lucht, op langere of kortere termijn dodelijk moeten zijn voor het bos. Naarmate er meer verbindingen tussen de verschillende vakgebieden worden gelegd, groeit de erkenning van elkaars bevindingen. Er blijkt zo langzamerhand veel mis te zijn met ons milieu, en de bossen kunnen kennelijk al door afzonderlijke deeloorzaken doodgaan. In feite is het een wonder dat zoveel planten en dieren al die tegelijk voorkomende schadelijke milieufactoren tot op heden hebben kunnen doorstaan. Een halve maatregel zal daarom voor het bos niet het verschil tussen sterven of overleven betekenen.

De onbekende factor

Zolang het complexe systeem van oorzaak en gevolg met betrekking tot de bossterfte niet voor 100% waterdicht is verklaard, blijft er ruimte voor buitenissige theorieën. Sommige daarvan lijken zeer redelijk. Vaak is een nader onderzoek zinvol, niet omdat het erg waarschijnlijk is dat de bossterfte erdoor zou kunnen worden verklaard, maar omdat het inzicht kan geven in weer een schadelijke nevenwerking van onze technologische samenleving.

Er zijn ook heel wat speculaties die de bossterfte aan natuurlijke oorzaken wijten. Met een klein aantal van deze theorieën kunt u in het volgende kennis maken.

Vulkanen en bossterfte

Het is bekend dat vulkanen grote hoeveelheden zwavel uitstoten. Het is zeker niet uitgesloten dat grote vulkaanuitbarstingen het klimaat op

wereldschaal kunnen beïnvloeden. Het plotseling uitsterven van alle dinosaurussen wordt door sommige paleontologen geweten aan vulkaanuitbarstingen. De lucht zou zo bezwangerd zijn geweest met stof en gassen dat de temperatuur op aarde met enkele graden daalde. Ook omstreeks de vorige eeuwwisseling heeft men kunnen constateren dat enkele vulkaanuitbarstingen over de hele wereld zichtbare gevolgen hadden. Toen in 1883 de Krakatau in Indonesië was uitgebarsten, konden in Europa nog jaren daarna door vulkaanstof rood-omfloerste zonsondergangen worden waargenomen.

Vulkaanuitbarstingen kunnen zeker van invloed zijn op de bosschade, omdat ze voor een deel dezelfde stoffen in de atmosfeer blazen als fabrieksschoorstenen. Fabrieksschoorstenen, of eigenlijk onze hele energievoorziening met fossiele brandstoffen, vormen als het ware één grote, kunstmatige vulkaan. Stoffen, diep uit de aardkorst, worden via talloze mijnen en diepteboringen kunstmatig naar boven gehaald en ten slotte in de atmosfeer gebracht. Bij vulkanen komen weliswaar zelden organische stoffen vrij, maar wel veel zwavel, stof en as. Hoeveel zwavel er vrijkomt, is echter niet bekend en de schattingen lopen erg uiteen. Volgens gangbare berekeningen zouden vulkanen de achtergrondniveaus van zwaveldioxide of zwavelzuur in de lucht met enkele procenten verhogen.

Na de jaren zestig zijn de fabrieksschoorstenen door de politiek van de hoge schoorstenen sterk verhoogd. Sindsdien lijken ze nog meer op minivulkanen. De vaak tot 400 meter hoogte reikende schoorstenen blazen de zwavelprodukten direct in de onderste wolkenlaag. Door de aanhangers van de leer dat bossterfte een acuut gevolg is van directe invloeden is daarom het verband gelegd tussen de hoge concentratie zwavelzuur in de lage bewolking en de beginnende bossterfte hoog op de hellingen van middelgebergten. Daar zou de bossterfte veroorzaakt worden door zure nevels (Ow, 1984; Waldmann, 1984). De nevels waarin deze bergen zijn gehuld komen overeen met die welke in de geïndustrialiseerde dalen en laagvlakten worden ervaren als laaghangende wolken.

In de praktijk blijkt er echter een verschil te zijn tussen de datum waarop alle schoorstenen waren verhoogd (1974) en de datum waarop de bossterfte in alle Westeuropese landen volgens officiële berichten in alle hevigheid begon (1982-1984). Voor vulkaanuitbarstingen zou men een soortgelijke hypothese kunnen maken en dan blijkt de correlatie wél zeer groot (Sulzbach, 1984).

Ook uit vroeger tijden zijn perioden bekend met ernstige sterfte van zilver- en fijnsparren. Een van die perioden was tijdens het einde van de vorige en het eerste decennium van deze eeuw. De schadebeelden op oude foto's lijken erg op de huidige verschijnselen en er zijn

tal van parasitaire plagen beschreven die ook nu de bossterfte begeleiden.

De grootste bekende historische stof- en gaswolken waren afkomstig van de uitbraak van de Tambora, op een van de kleine Sunda-eilanden in Indonesië, in 1815. De grootste uitbarsting omstreeks de laatste eeuwwisseling was die van de Krakatau, eveneens in Indonesië. In deze eeuw bleek 1902 een jaar van grote vulkanische activiteit. Toen barstten de Santa Maria in Guatemala en de Soufrière op St.-Vincent uit, een dag later gevolgd door de Pelee op Martinique, die de grootste uitbarsting van deze eeuw te zien gaf. Na de omvangrijke uitbarsting van de Katmai in 1912 bleef het betrekkelijk rustig tot de uitbarsting van de Gunung Agung in 1963 op Bali. Uit deze periode is geen grootschalige bossterfte bekend. Wel stammen de vroegste waarnemingen over groeireductie bij zilversparren uit die tijd. In het midden van de jaren zeventig constateert men een geringe verhoging van het gehalte aan atmosferische chemicaliën door de activiteit van El Fuego. Op 18 mei 1980 ploft de St.-Helens in de staat Washington, met een even groot effect, en eveneens in 1980 wordt de Mexicaanse vulkaan El Chinon opnieuw actief. Het effect van El Chinon op het gehalte aan bepaalde stoffen in de atmosfeer is naar schatting viermaal zo hoog als dat van de St.-Helens. Wanneer men de stofuitworp van de herhaalde uitbarstingen van El Chinon optelt, is de uitbarsting in 1982 de grootste van deze eeuw; 1982 was ook het jaar waarin de bossterfte zich in Europa en Amerika op continentale schaal uitbreidde.

Sinds 1982 is de slijtage van cockpitramen van grote hoogvliegende verkeersvliegtuigen op bepaalde routes enorm toegenomen. Een dergelijke slijtage zou niet eerder zijn waargenomen. Onderzoek naar slijtage aan de ruiten van Boeing-vliegtuigen heeft uitgewezen dat de primaire oorzaak van snelle krasvorming gelegen is in de zwevende vulkanische stoffen in de stratosfeer, welke van de recente vulkaanuitbarstingen stammen. Dit materiaal bestaat uit vaste deeltjes en druppeltjes zwavelzuur, waarschijnlijk afkomstig van de vulkaan El Chinon. Nader onderzoek wees uit dat de slijtage voornamelijk optreedt bij vliegtuigen die regelmatig de noordelijke en polaire routes vliegen. Volgens gegevens van de Japanse luchtvaartmaatschappij was er ook in 1981 een korte periode waarin veel ramen vernieuwd moesten worden. In 1983 nam de aantasting van de ramen bij de Japanse vliegtuigen zelfs epidemische vormen aan.

De totale zwavelemissies van de vulkanen (voor de vergelijkbaarheid uitgedrukt als het gewicht van zwaveldioxide) werden voor 1980 op 2 à 6 miljoen ton geschat. Sedert 1981 is deze hoeveelheid gestegen tot circa 60 miljoen ton per jaar. Hoewel de verspreiding beter is, is

deze hoeveelheid niet verwaasloosbaar in verhouding tot de industriële emissies. Niet bekend is welke invloed de vulkanische emissies hebben op het algemene klimaat.

Een veelgehoorde opvatting is dat natuurlijke emissies slechts de achtergrondniveaus verhogen, welke veronderstelling wordt gesteund door de lage zwavelconcentraties in de lucht en in de boomnaalden in de Zwitserse Alpen. Toch moet niet worden uitgesloten dat in de huidige al labiele situatie een verhoogde vulkanische activiteit meetbare invloed heeft op de bossterfte. Verwijzing naar de natuurlijke emissies om de industriële emissies te bagatelliseren is echter volstrekt onlogisch. Natuurlijke emissies staan in dit geval niet synoniem met onschadelijke emissies. Integendeel. De schade ontstaat door de som van beide emissies. Een verhoging van het natuurlijke achtergrondniveau zou juist aanleiding moeten zijn om de industriële emissies des te intensiever te bestrijden.

Zonnestraling en atmosferische veranderingen

Niet alleen vulkanen hebben invloed op de samenstelling van de stratosfeer. Bekend is het gevaar van de aantasting van de ozonlaag door drijfgassen. Ook het verhoogde kooldioxidegehalte kan de warmte en de stralingsbalans in de atmosfeer verstoren. Uit het feit dat de bomen in grote steden zoals in Amsterdam, Brussel, Parijs, Londen en Berlijn ondanks de hoge verkeersintensiteit niet jaren eerder zijn afgestorven (ze lijken daarentegen helemaal niet minder gezond dan de bomen in het bos), zou men kunnen afleiden dat de directe inwerking van uitlaatgassen niet erg schadelijk is. Toch wordt de luchtvervuiling in bijvoorbeeld Zwitserland, met zijn watercentrales, vrijwel geheel veroorzaakt door het verkeer. De zwavelconcentraties in de naalden zijn er relatief laag, maar de schade aan naaldbomen ontwikkelt zich in de Alpen net zo snel als elders (Ow, 1984). Ook prof. Ulrich verklaarde desgevraagd dat dit verschijnsel hem in Berlijn was opgevallen en dat het nog niet duidelijk is hoe dit in zijn bodemtheorie past. Bosbouwers zullen zich van het grote aantal onzekerheden en mogelijkheden bewust zijn. Ze zouden zich er ook bezorgd over moeten maken dat er kennelijk geen onderzoeken worden gedaan of althans gepubliceerd aangaande de vraag welke invloed het intensieve luchtverkeer op de ijle lucht hoog in de atmosfeer heeft. Juist daar kunnen de stikstofoxiden, wegens het hoge stralingsniveau, zorgen voor een enorme ozonproductie.

Pesticiden en bossterfte

Een hypothese die al enige tijd onderwerp van discussie is, is de veronderstelling dat de bossterfte zou samenhangen met het toenemend gebruik van gewasbeschermingsmiddelen in de landbouw (Wolf, 1984). Dit zijn immers middelen die zijn gemaakt om in zeer kleine concentraties insecten, schimmels en tal van andere organismen te doden. Van deze stoffen verstuift een aanzienlijk deel, zodat de lucht over Europa en Noord-Amerika bezwangerd is met een mengsel van allerlei kwalijke stoffen. De concentraties van elke stof afzonderlijk zijn weliswaar miniem, maar het gezamenlijke effect is onbekend.

Al in het geval van de DDT en andere gechlloreerde koolwaterstoffen is bewezen dat ze door verstoring van de voedselketens een fundamentele invloed op ecosystemen kunnen hebben. Van 1966 tot 1968 begonnen in Nederland letterlijk de vogels uit de lucht te vallen. Vooral roof- en visetende vogels waren het slachtoffer. Bijna de hele populatie kleine sterns verdween in die jaren. De oude middelen zijn inmiddels vervangen door allerlei varianten en Nederland exporteert nu DDT, aldrin, dieldrin, enz. naar de Derde Wereld.

Nu, meer dan 20 jaar na Rachel Carsons beroemde boek *Silent Spring*, zingen er nog steeds vogels maar is het gifgebruik pas echt tot een duizelingwekkende hoeveelheid gestegen. In het Nederlandse openbare groen wordt op basis van de actieve stof 217 000 kilo gif per jaar gebruikt. De ramp met de verloren vaten dinoseb in de Noordzee heeft nog eens duidelijk gemaakt hoe giftig geconcentreerd gif is. Deze berg van 217 000 kilo gif is goed voor miljoenen liters spuit- en strooigif. De landbouw doet daar nog eens een flinke schep bovenop met 19991 000 kilo actieve stof. Deze hoeveelheid actief gif is slechts een factor 10-20 lager dan de emissie van verzurende stoffen in Nederland. Toch, wanneer iemand voor de keuze wordt gesteld om bijvoorbeeld een gram zwavel of een tiende gram dinoseb, lindaan of, wat in de bosbouw veel wordt toegepast, 2,4,5-T-ester te slikken, dan is ook voor de twijfelaar de keus duidelijk: liever een hapje luchtverontreiniging.

Er zijn echter veel factoren die ertegen pleiten dat de grootschalige boomsterfte door pesticiden kan worden veroorzaakt. In de eerste plaats blijken de bomen in de fruitteelt, waar al vele jaren intensief wordt gespoten, weinig zichtbare schade te ondervinden. Wel zijn in boomgaarden de schadesymptomen waar te nemen die overeenkomen met de zwaveldioxidebeschadiging bij laboratoriumproeven met o.a. populieren (Mooi, 1972). Een tweede punt is dat de bossterfte is begonnen in de traditionele bosbouwgebieden in bergachtige streken

waar weinig landbouw voorkomt. In de derde plaats is bij de huidige economische crisis het herbicidegebruik teruggelopen, terwijl de boschade is toegenomen. Ook wordt in de bosbouw steeds minder 2,4,5-T-ester gebruikt, het herbicide om bepaalde ongewenste loofbomen mee te bestrijden. In de Duitse staatsbossen is het gebruik niet toegestaan en ook in Nederland is het verboden. In de bossen van Staatsbosbeheer werd vroeger sporadisch gebruik gemaakt van herbiciden. Bijna alle herbiciden worden afgeraden; er zijn maar enkele zeer lichte die mogen worden gebruikt. Dit betreft voornamelijk middelen die niet gesproeid maar gesmeerd worden, zodat aantasting van het overige bos is uitgesloten.

Hoewel het pesticidgebruik zorgwekkend is toegenomen en er niets bekend is van de consequenties van verwaalde pesticiden voor natuurlijke ecosystemen, lijkt het vrijwel uitgesloten dat er enig verband kan worden aangetoond met bossterfte.

Kerncentrales en bossterfte

Jammer voor mensen die de bossterfte hanteren als vals klinkend argument om de bouw van kerncentrales door te zetten, is dat er ook een hypothese bestaat die juist de kerncentrales verantwoordelijk stelt voor de bossterfte. Hiernaar is ook onderzoek gedaan. Er zijn schadebeelden geïnventariseerd in de bossen rondom Duitse kerncentrales. Uit dit onderzoek bleek inderdaad een lichte correlatie tussen de ernst van de schadebeelden en de nabijheid van de centrales. Tritium, ofwel zwaar water, zou het verantwoordelijke agens zijn. Deze stof lekt altijd in bepaalde mate uit kerncentrales en lekkage is bij de huidige techniek niet te vermijden. Het tritium zou werken als een sterke katalysator bij de schadelijke reacties van andere luchtverontreinigende stoffen. Pas bij de aanwezigheid van tritium zouden vele schadelijke reacties mogelijk zijn. De stof wordt ook heel gemakkelijk in tal van organische moleculen ingebouwd. Daar vervalt tritium ten slotte tot gewone waterstof, waardoor de bouw van het molecuul wordt verstoord. Dit is niet erg als het om vervangbare of gemakkelijk te herstellen stoffen gaat. Wanneer het tritium is ingebouwd in het erfelijk materiaal, kan de schade echter verstrekende gevolgen hebben doordat de erfelijke code verandert. Dit zou tot een genetische degeneratie, onvruchtbaarheid en storingen in enzymsystemen kunnen leiden (Dieter, 1983).

Bosbouw en bossterfte

Een veelgehoord argument is dat de bosbouw zelf verantwoordelijk is

voor de bossterfte. Merkwaardig genoeg komt dit niet alleen van industriële zijde maar wordt het argument ook vaak naar voren gebracht in bosbouwkundige kringen. De gangbare bosbouwmethoden zouden de natuurlijke structuur van het bos zodanig beïnvloeden dat het zijn ecologische weerstand verliest. Vooral echter zou door de voortdurende oogst van hout een gebrek aan plantenvoedende stoffen ontstaan. Een onderneming die hierop erg hamert is Bas-F, maar omdat deze tevens een grote leverancier van kalium- en magnesiumhoudende meststoffen is, kan ze de schijn van een gemis aan objectiviteit niet vermijden.

In de landbouw is het gebruikelijk de plantenvoedende stoffen in de bodem op een hoog peil te houden. Zelfs de alternatieve landbouw is zich ervan bewust dat de voedingsmineralen zo veel mogelijk in kringloop moeten worden gehouden en dat er desondanks met de oogst een deel verdwijnt. Het verlies wordt daarom aangevuld, in de gangbare landbouw met grote hoeveelheden kunstmest, in de biologische landbouw met compost, thomasslakkenmeel, bloed- en beendermeel en koraalalgenkalk. Prof. van Diest wees er in het blad *De Boerderij* op dat in de bosbouw daarentegen alleen wordt geoogst. De bomen krijgen van het ene soort voedsel (stikstof) te veel en van het andere (kalium en magnesium) te weinig. Met het hout verdwijnen grote hoeveelheden kalium en andere mineralen. Door de verstoring van de natuurlijke bosstructuur treedt bovendien een hogere uitspoeling op. Nu blijkt bossterfte juist samen te gaan met een dodelijk gebrek aan plantenvoedende stoffen zoals magnesium, kalium, kalk en het sporenelement molybdeen. De bosbouwers zouden volgens Van Diest van de nood een deugd moeten maken. Door de bossen te bemesten met kalium en magnesium zouden nitraten en ammoniak door de bomen beter kunnen worden benut. Immers, als dit in de landbouw zo is, waarom zou dat dan in de bosbouw anders zijn? In de landbouw wordt momenteel vele malen meer stikstof, ook in de vorm van nitraat en ammoniak, gestrooid dan via de luchtverontreiniging de bossen bereikt. Meststoffen en kalk worden volgens Van Diest door Staatsbosbeheer ten onrechte als milieuvreemde stoffen gezien. Vroeger kwamen ze in grote hoeveelheden in de Nederlandse bodems voor, maar door eeuwenlange rooibouw zijn ze verdwenen. Aan dit verdwijnen zouden we de schamele groei van de Nederlandse bossen te wijten hebben. In de bosbouw is het bekalken of bemesten van bosgrond nog steeds een gevoelig taboe. Bossen zijn natuur, natuur moet je niet bemesten en daarmee basta. Ir. W. M. J. den Boer van de inspectie Staatsbosbeheer in een interview met de *Haagsche Courant*: 'Een zo gevoelig systeem als de bodem herstel je na het gooien van een bom niet door er met een kanon op te vuren. Je moet

er niet nog meer stoffen instoppen. Kalk neutraliseert het zuur wel, maar wat er op de lange termijn gebeurt, daar weet je niets van. Als je van de natuur afwijkt, kom je op een gegeven moment van een koude kermis thuis. En in het bos moet je de natuur het voor 99% laten doen. Bekalken is een uiterste noodmaatregel.'

Niet alleen in Nederland ligt dit gevoelig. In grote delen van Europa blijkt bekalken of anderszins bemesten van bossen op grote psychische weerstand van de bosbouwers te stuiten. Wel is er momenteel een groot aantal proefvlakken waar bemesting wordt toegepast, maar een extra mineralengift heeft weliswaar een positief effect, maar schijnt geen wondermiddel tegen de luchtverontreiniging te zijn.

Het is echter heel onwaarschijnlijk dat alleen mineraalgebrek oorzaak zou kunnen zijn van de wijdverspreide bossterfte. Daarvoor treedt deze catastrofe bij te zeer uiteenlopende bodemomstandigheden op. Het zou uiterst toevallig zijn als al de verschillende bodemtypen met uiteenlopende vruchtbaarheid overal en terzelfder tijd uitgeput zouden zijn door de houtoogst.

Niet iedereen is ervan overtuigd dat de bosbodems zo extreem kalkarm en uitgeput zijn. Ir. Van Goor hield in 1983, als directeur van het bosbouwkundig proefstation de Dorschkamp, in talloze dagbladinterviews de stelling staande dat in Nederland meer kalk in de bosbodem zat dan in Duitsland en dat de hoeveelheid kalk voldoende was om het effect van de zure regen te neutraliseren.

Overigens lijkt het roofofwargument ook achterhaald door het feit dat de sterfte evengoed optreedt in de laatste resten natuurlijk bos in Duitsland, waar geen sprake is van houtoogst en de daarmee gepaard gaande afvoer van kostbare plantennutriënten. De schadeontwikkeling verloopt hier zelfs sneller, doordat deze bossen door hun natuurlijke en onregelmatige structuur een beter filterend vermogen hebben. In een natuurlijk bos staan immers grote en kleine bomen in een bonte verscheidenheid door elkaar, in een houtakker daarentegen zijn alle bomen in een perceel even oud en even groot. Daardoor vormt een houtakker een tamelijk gesloten vlak, waar de wind enigszins overheen glijdt.

Parasieten

Een andere veelgehoorde veronderstelling, dat de schade slechts een interne zaak van de bosbouw zou zijn, is de hypothese dat de bossterfte uitsluitend wordt veroorzaakt door parasieten. Meestal wordt hierbij verwezen naar een virus, schimmel of bacterie als vermoedelijke oorzaak. Vooral virussen spelen in deze discussie een rol, omdat ze zeer lastig te vinden zijn.

Ir. J. van den Burg schreef hierover in *Bos- en Houtberichten* (1983, nr. 8): 'Men heeft op grond van waarnemingen in de laatste jaren omtrent ziekten en sterfte wel aangenomen, dat het Nederlandse bos acuut door luchtverontreiniging en zure depositie werd aangetast. Deze gevallen betroffen onder andere het optreden van Brunchorstiaschimmel bij Corsicaanse den in Noord-Brabant en sterfte bij o.a. beuk en berk in 1976 en 1982. Hier is aannemelijk, dat deze verschijnselen niet van doen hadden met depositie of luchtverontreiniging, maar met primaire oorzaken als gevoeligheid voor Brunchorstia en droogte.'

Volgens de Duitse deskundige prof. Schütt is de parasiethypothese voor een fytopatholoog een nonsens-argument. De evolutie van naaldbomen is zeer veel ouder dan die van loofbomen. Ziekten, dat wil zeggen virussen, bacteriën en schimmels, zijn vaak gespecialiseerd, óf op bepaalde soorten, óf op een groep verwante soorten. Het is even ondenkbaar dat er plotseling een ziekteverwekkend organisme zou ontstaan dat op deze schaal alle boomsoorten zou aantasten als dat een virus tegelijkertijd dodelijk zou zijn voor halfapen, mensen en Guinese biggetjes (Schütt, 1984, pers. med.). Wel is het zo, dat, als de bomen eenmaal door andere oorzaken ernstig verzwakt of afstervend zijn, zij hun afweermechanismen verliezen. In dat geval kunnen talrijke parasieten, die normaal zeldzaam of onschadelijk zijn voor de boom, deze alsnog aantasten. Het plotseling uitbreken van een groot aantal schimmelziekten en insektenplagen moet uitsluitend worden gezien als een gevolg, niet als een oorzaak van de bossterfte.

5. SCHADEBEELDEN

Bossterfte is voor een ieder zichtbaar

Veel mensen vragen zich verbijsterd af waarom de bosbeherende instanties niet eerder de schade door zure regen hebben geconstateerd. Er werken toch elke dag mensen in het bos en al die bosbouwers hebben toch verstand van bomen? Waarom komt dan de ontstellende omvang van de schade pas aan het licht na een apart onderzoek nadat eerst tweehonderd man in het herkennen van schadebeelden zijn onderricht.

Het zou al te zeer voor de hand liggen dit te verklaren uit de traditionele gerichtheid van de bosbouw op het opbouwen van een bedrijfsstelsel, meer dan op de directe kwaliteit van de opbrengst en het produkt. Omdat men niet zoals in de landbouw elk najaar oogst wat men in het voorjaar heeft geplant, is men kennelijk het gevoel voor de kwaliteit van het produkt kwijtgeraakt. In de bosbouw heeft men immers het spreekwoord 'Boompje groot, plantertje dood'. Als daarentegen een koe ziek wordt, merkt een boer dat dezelfde dag aan een verminderde melkproduktie.

Doordat de bossen gevoelig werden voor ziekten, droogte en stormen, leken de schadebeelden aanvankelijk geheel daardoor te kunnen worden verklaard. Uiteindelijk blijkt men ook aan het veranderen de uiterlijk van de bomen te wennen. Het is heel moeilijk zich exact voor de geest te halen hoe het bos er tien, twintig jaar geleden bij stond.

Produktieverlies als eerste waarschuwing

Het bos is heel geleidelijk gaan kwijnen. De geschiedenis van het bossterven kan men tot tientallen jaren terug volgen aan de dikte van de jaarringen. Elk jaar opnieuw vormt de boom een nieuwe laag hout om zijn stam. Hoe gezonder en produktiever de boom, hoe dikker de jaarring. Waar zieke fijnsparren in de bossen zijn omgezaagd, kan men aan het zaagvlak van veel bomen goed zien dat de bossterfte al 20 à 30 jaar geleden onopgemerkt is begonnen (Kenk, 1983).

Tot enkele decennia geleden zijn de jaarringen in de groeiende bomen zoals het hoort dikker geworden. Toen echter de naoorlogse industrialisatie goed op gang was gekomen, werden de jaarringen almaar dunner. Aan de buitenzijde van de boomstam, waar vlak onder de bast op het oog geen jaarringen meer zijn, blijkt, als men door een

loep kijkt, toch nog een aantal ringen aanwezig te zijn: het afnemen van de dikte van de groeiringen wijst op een daling van het produktievermogen. Steeds meer energie moest worden gestoken in het herstel van aangetaste takken, bladeren en wortels. Ten slotte was zoveel energie nodig voor het herstel en was het produktievermogen zo gering, dat er niets overbleef voor de groei. Er was zelfs een tekort. Op dit punt begint de boom al zijn reserves uit te putten om in leven te blijven en dan verloopt de aftakeling steeds sneller.

De meeste bomen zijn goed in staat enkele tientallen jaren verzuring te weerstaan. Het natuurlijke regeneratievermogen is zo groot dat het hele wortelstelsel telkenjare vernieuwd kan worden. Maar als ook de bladeren en naalden worden aangetast, kan herstel alleen gaan ten koste van de diktegroei. Omdat de boom het groeiproces niet geheel kan stopzetten, blijven microscopisch dunne jaarringen over. Ook de topgroei moet blijven doorgaan, maar wordt wel meetbaar kleiner. Dit effect is met het jaarringenonderzoek te volgen met behulp van doorsneden over de hele stamlengte. Het blijkt dat de lengtegroei van de bomen in de omgeving van het Duitse Paderborn (Noordrijn-Westfalen) die nu ernstig beschadigd zijn, al omstreeks 1930 (!) is afgenomen. De gemiddelde lengtegroei bedroeg de laatste jaren slechts 5,2 centimeter, wat algemeen wordt toegeschreven aan de luchtverontreiniging. Uit het onderzoek bleek ook dat bij de bomen die minder ernstig zijn aangetast de lengtegroei pas na 1940 afnam (Athari, 1983). Onderzoek van de Universiteit van Göttingen naar dit verschijnsel heeft aangetoond dat de bomen in bijvoorbeeld beukenbossen nabij Göttingen al twintig jaar niet meer dikker zijn geworden. Trouwens, overal blijkt uit de produktiestatistieken dat de produktievermindering ongeveer tien jaar eerder is begonnen dan de ontwikkeling van de uiterlijke ziektebeelden. De zogenaamde produktie in het Nederlandse bos is daarom grotendeels schijn en bestaat in toeneemende mate uit het opruimen van zieke en kwijnende bomen.

(Ook de landbouw bevindt zich momenteel in het stadium dat er ten gevolge van schade wel sprake is van een produktievermindering maar niet van ernstige ziektebeelden. In de landbouw kampt men volgens mededelingen van het ministerie van Landbouw en Visserij met een groeireductie tot gemiddeld 10%, plaatselijk zelfs oplopend tot 30 à 40%. Toch zien de landbouwgewassen er nog steeds gezond uit.)

Schadebeelden, veel variaties op hetzelfde thema

Doordat de schade door de combinatiewerking van een groot aantal stoffen wordt veroorzaakt, kunnen specifieke schadebeelden slechts

zelden, en dan nog in beperkte mate, aan bepaalde stoffen afzonderlijk worden toegeschreven. Bij de ontwikkeling van de chronische schadebeelden speelt ook het bodembederf een grote rol. Bovendien veroorzaken kleine pieken in het ozon- of zwavelgehalte in de lucht des te sneller acute schade, naarmate de bomen door de chronische aantasting meer zijn verzwakt.

De schadebeelden ontwikkelen zich bij alle boomsoorten op nagevoeg dezelfde wijze. Sommige boomsoorten lijken gevoeliger dan andere, maar voor een groot gedeelte is dat schijn. Aanvankelijk dacht men dat de zilverspar erg gevoelig was en dat de fijnspar veel weerstand tegen de verontreiniging had. Ondertussen is gebleken dat de schadeontwikkeling bij de fijnspar slechts een jaar of drie achterligt op die bij de zilverspar. Drie jaar op een boomleven van enkele eeuwen is maar een miniem verschil.

Soortgelijke minieme verschillen in gevoeligheid zijn er tussen andere boomsoorten, zoals dennen, beuken en eiken. Ze worden voor een groot deel verklaard door de maximale leeftijd van de bladeren en naalden. De naalden van een gezonde zilverspar worden het oudst, tot 14 jaar. Ze zouden dus ook 14 jaar lang weerstand moeten bieden aan de luchtverontreiniging. Het is logisch dat ze eerder afsterven dan naalden van fijnsparren, die maar 6 tot 10 jaar de vervuiling hoeven te weerstaan. Loofbomen werpen elk jaar hun blad af en lijken daarom het minst gevoelig. De vervuiling moet de bladeren van loofbomen binnen 7 maanden aantasten wil het effect zichtbaar zijn. Ondertussen heeft de vitaliteit van de loofbomen echter niet minder te lijden van de luchtverontreiniging dan naaldbomen en het blijkt, nu de bossen in Duitsland en Nederland in het eindstadium komen, dat alle boomsoorten tegelijkertijd afsterven.

Ook de dennebomen, die juist ter vervanging van de gevoelige sparren massaal zijn aangeplant in het Ruhrgebied, blijken in ijtempo te worden aangetast. Momenteel is van de dennen zelfs een groter percentage zichtbaar aangetast dan van de fijnsparren. Naarmate meer details van de schadesymptomen bekend worden, wordt het ook duidelijk dat de schade bij dennen en loofbomen niet van de laatste jaren is. De schadebeelden aan takken, bast en wortels, en de schade op celniveau, zoals beschadiging van bladgroen, verstoring van plantehormonen, verlies aan weerstand tegen ziekten, zijn voor het oog minder opvallend dan het verlies van naalden en bladeren.

De schadebeelden die door luchtverontreiniging ontstaan, zijn in slechts een ondergeschikt aantal gevallen lastig te onderscheiden van de aantasting door parasieten. De steek van een bladluis kan bijvoorbeeld een groter wordend wit plekje afgestorven weefsel op het blad veroorzaken, dat met het oog niet te onderscheiden is van een zelfde

zelden, en dan nog in beperkte mate, aan bepaalde stoffen afzonderlijk worden toegeschreven. Bij de ontwikkeling van de chronische schadebeelden speelt ook het bodembederf een grote rol. Bovendien veroorzaken kleine pieken in het ozon- of zwavelgehalte in de lucht des te sneller acute schade, naarmate de bomen door de chronische aantasting meer zijn verzwakt.

De schadebeelden ontwikkelen zich bij alle boomsoorten op nageenog dezelfde wijze. Sommige boomsoorten lijken gevoeliger dan andere, maar voor een groot gedeelte is dat schijn. Aanvankelijk dacht men dat de zilverspar erg gevoelig was en dat de fijnspar veel weerstand tegen de verontreiniging had. Ondertussen is gebleken dat de schadeontwikkeling bij de fijnspar slechts een jaar of drie achterligt op die bij de zilverspar. Drie jaar op een boomleven van enkele eeuwen is maar een miniem verschil.

Soortgelijke minieme verschillen in gevoeligheid zijn er tussen andere boomsoorten, zoals dennen, beuken en eiken. Ze worden voor een groot deel verklaard door de maximale leeftijd van de bladeren en naalden. De naalden van een gezonde zilverspar worden het oudst, tot 14 jaar. Ze zouden dus ook 14 jaar lang weerstand moeten bieden aan de luchtverontreiniging. Het is logisch dat ze eerder afsterven dan naalden van fijnsparren, die maar 6 tot 10 jaar de vervuiling hoeven te weerstaan. Loofbomen werpen elk jaar hun blad af en lijken daarom het minst gevoelig. De vervuiling moet de bladeren van loofbomen binnen 7 maanden aantasten wil het effect zichtbaar zijn. Ondertussen heeft de vitaliteit van de loofbomen echter niet minder te lijden van de luchtverontreiniging dan naaldbomen en het blijkt, nu de bossen in Duitsland en Nederland in het eindstadium komen, dat alle boomsoorten tegelijkertijd afsterven.

Ook de dennebomen, die juist ter vervanging van de gevoelige sparren massaal zijn aangeplant in het Ruhrgebied, blijken in ijtempo te worden aangetast. Momenteel is van de dennen zelfs een groter percentage zichtbaar aangetast dan van de fijnsparren. Naarmate meer details van de schadesymptomen bekend worden, wordt het ook duidelijk dat de schade bij dennen en loofbomen niet van de laatste jaren is. De schadebeelden aan takken, bast en wortels, en de schade op celniveau, zoals beschadiging van bladgroen, verstoring van plantehormonen, verlies aan weerstand tegen ziekten, zijn voor het oog minder opvallend dan het verlies van naalden en bladeren.

De schadebeelden die door luchtverontreiniging ontstaan, zijn in slechts een ondergeschikt aantal gevallen lastig te onderscheiden van de aantasting door parasieten. De steek van een bladluis kan bijvoorbeeld een groter wordend wit plekje afgestorven weefsel op het blad veroorzaken, dat met het oog niet te onderscheiden is van een zelfde

necrotisch vlekje ten gevolge van ozonaantasting. Veel parasitaire ziekten, zo is al enkele malen vermeld, zijn bovendien zelf het gevolg van een algehele verzwakking van de bomen. De meeste schadebeelden door luchtverontreiniging kenmerken zich echter door het veelal volledig ontbreken van vraatsporen, schimmels of andere typische ziektebeelden. Wanneer bijvoorbeeld denneloten afvallen door de activiteit van de dennescheerder, zijn op het breukvlak vraatsporen te zien. Wanneer de jaarloten van sparren of kortloten van eiken massaal afvallen ten gevolge van zure regen, is het breukvlak gaaf. Waarschijnlijk zorgt een verstoring in de plantehormonen ervoor dat het vroegere knoplitteken in de twijgen zich in de herfst gaat gedragen als een bladlitteken.

Een gezonde boom herkennen

Om goed de schadebeelden te onderkennen is het noodzakelijk de opbouw van een gezonde boom te kennen. Een echt gezonde boom is volgens een heel regelmatig schema gebouwd en is gaaf tot in al zijn twijgen. Bomen die last hebben van acute beschadiging zijn daarentegen te herkennen aan het plotseling afsterven of afvallen van bladeren, twijgen en takken. Bomen die lijden aan chronische schade en zich daarvan voortdurend proberen te herstellen zijn veelal te herkennen aan een groot aantal nieuw gevormde knoppen, twijgen en takken, die het normaal regelmatige patroon verstoren.

Bomen onderscheiden zich van struiken doordat ze een centrale stam hebben. Door het uitlopen van de topknop groeit de stam elk jaar een stuk. Naast de topknop lopen enkele zijknoppen uit, zodat in principe elk jaar een takkenkrans wordt gevormd. Bij de meeste loofbomen is dit systeem betrekkelijk moeilijk te herkennen, maar bij alle coniferen worden de takkenkransen tamelijk regelmatig gevormd. Doordat in de loop van het groeiseizoen ook nog zijknoppen aan de nieuwe toploot kunnen worden gevormd, gaan de takkenkransen soms geleidelijk in elkaar over.

De zijtakken die op de stam zitten heten de zijtakken van de eerste orde, de volgende zijtakken die van de tweede, derde enz. orde. De zijtakken groeien meestal enigszins schuin omhoog, behalve bij rariiteiten zoals treurwilgen, en krijgen horizontaal uitgroeiende zijtakken van de tweede orde. Dit is vooral goed te zien bij gezonde zijtakken van sparren, maar wie een beuketak goed bekijkt, kan hetzelfde waarnemen. In de praktijk is dit patroon bij een groot aantal loofbomen, in tegenstelling tot naaldbomen, moeilijk te herkennen. Dit komt doordat er bij loofbomen een groot aantal variabele factoren is die het standaardpatroon vervormen, zoals een krachtsongelijkheid in de groei

van de verschillende knoppen, onderdrukking van eindknoppen of de vorming van langloten en kortloten. Leken zullen echter nooit moeite hebben om het systeem te leren kennen aan de hand van enkele gezonde (tegenwoordig meestal jonge, nog beschermt staande) naaldbomen in de tuin of het bos.

Wie weet hoe een gezonde boom groeit, zal geschokt worden door de toestand van de zieke bomen. Plotseling lijkt het, als we zo vrij zijn een boom met een hand te vergelijken, alsof de vingers naar willekeur uit de pols, de rug of de palm spruiten. In het bijzonder bij sparren is te zien dat eensklaps overal nieuwe takken zijn ontsproten, vooral aan de bovenzijde van de grote zijtakken. De Duitsers hebben hiervoor de treffende naam 'angstloten', in het Nederlands heten ze waterloten. Een duidelijker term is 'regeneratieloten'. De boom vormt de loten namelijk om zich te herstellen.

Een zieke boom herkennen

Aan de mate waarin zich regeneratieloten hebben gevormd, is te zien hoe snel de aantasting is verlopen. Is de schade heel plotseling ontstaan door pieken in de luchtvervuiling, dan zijn geen regeneratieloten gevormd. Deze gedragen zich namelijk als gewone takken: het duurt enige tijd voor een eerste knop is gevormd en na het uitlopen van de eerste knop worden elk jaar een nieuwe topscheut en zijscheuten gevormd. Wanneer het proces net is begonnen, zijn naast de normale vertakking regeneratieloten aanwezig aan de bovenzijde van de tak. Als de aantasting chronisch is, dat wil zeggen zich over vele jaren heeft uitgestrekt, kunnen de normale zijtakken van de tweede en volgende orde grotendeels zijn afgestorven en zijn vervangen door regeneratieloten.

Omdat de regeneratieloten volgens de normale wetmatigheden groeien en zich vertakken, kan men gemakkelijk vaststellen hoeveel jaren geleden de boom al zo sterk was aangetast dat zich de eerste waterloten vormden. Hierbij blijkt duidelijk dat de schade in ons land, hoewel die pas in 1982 en 1983 is onderkend, stamt uit ten minste de jaren zeventig.

Doordat de regeneratieloten niet regelmatig uit de grote zijtakken spruiten, maar uit de meest vitale delen, hangen ze als verwarde bossen in de boomkruin. Dit geeft een heel karakteristiek beeld, waardoor deze bomen al uit de verte herkenbaar zijn. De kroon is niet een regelmatig gesloten piramide, maar een verzameling van plukken groen waartussen de blauwe hemel is te zien.

Een ander in het oog springend en aan het vorige verwant kenmerk is de schuine top. Als de topspruit is afgestorven, wordt de topfunctie

overgenomen door een van de zijtakken. De boom krijgt nu een duidelijk scheve top. Van verre zijn dergelijke aangetaste bossen herkenbaar doordat een groot deel van de toppen in willekeurige schuine richtingen wijst.

Doordat in de kleine zijtakken de aanmaak van houtstof ten gevolge van hormonale veranderingen wordt gestoord, hangen de zijtakken van de tweede en volgende orde slap naar beneden. Het lijkt of de boom net met zijn pruik onder de douche heeft gestaan. In Duitsland noemt men dit het lamettasyndroom. Lametta zijn slingers voor in de kerstboom. Van een gezonde boom zou elk blad, elke naald en elke tak zich in normale omstandigheden zo richten dat het van boven invallende licht zo veel mogelijk wordt onderschept. Door het lametta-syndroom kan de boom het zonlicht niet meer efficiënt benutten.

Kortloten

Zeer duidelijk maar van afstand minder herkenbaar is het verlies van jaarloten en kortloten. In de herfst kan men onder de fijnspaar en verscheidene andere naaldbomen een massa afgeworpen jaarloten vinden. Deze jaarloten zijn op het oog heel gezond en groen en het onbeschadigde breukvlak (de twijg breekt af op het knoplitteken) duidt erop dat de twijgen niet zijn afgebeten door insecten, maar dat het afvallen een gevolg is van een storing in de plantehormonen.

Eiken vertonen een soortgelijk verschijnsel. Bij een gezonde eik zijn de lage takken bezet met kortloten, die bladeren en bloemen of, in de herfst, eikels dragen. Door de milieubelasting kunnen de eiken een groot deel van de kortloten laten vallen en ook deze laten los op het onbeschadigde knoplitteken. Een eik moet overigens de helft tot driekwart van zijn kortloten en dus van zijn bladmassa hebben verloren, vóór de kroon doorzichtig lijkt.

De kortloten van beuken vallen niet zo gemakkelijk af, maar verliezen, net als veel sparreloten, hun rechte vorm en krullen naar boven. In de kronen van zieke beuken worden voornamelijk kortloten gevormd en nauwelijks langloten. Dit heeft tot gevolg dat de boom niet in de lengte groeit. Op de kortloten worden in de bladoksels geen knoppen meer gevormd (of de knoppen degenereren in de kiem), zodat het volgend jaar alleen de eindknop bladeren vormt. Dit verschijnsel is ook bij tal van andere boomsoorten te zien. Heel duidelijk is het bij de dikke loten van essen. De betrokken loofbomen krijgen hierdoor een krans van bladtoefjes om hun kroon en bij essen lijkt de hele kroon soms slechts uit kale twijgjes met bladtoefjes te bestaan.

Normaal hebben loofbomen een volle kroon in de vorm van een gesloten bol of zuil. Doordat de sterfte bij loofbomen verloopt van de

kortloten via de langloten naar steeds zwaardere takken en doordat de vorming van nieuwe langloten is onderdrukt, valt de instervende kroon uiteen in een aantal kroondelen rondom de hoofdtakken.

Naalden en bladeren

Een heel duidelijk kenmerk voor de gezondheid van de boom is de hoeveelheid naalden en bladeren. Dit is het belangrijkste kenmerk voor het vitaliteitsonderzoek in de Bondsrepubliek, Oostenrijk, Zwitserland, België en Nederland.

Elk jaar vormt een groeiende tak een nieuwe top met nieuwe naalden of bladeren. Bij een fijnspar blijven de naalden jarenlang gezond en groen, zodat ook de dikke takken nog met groene naalden bedekt zijn. Als de naalden minder dan zes jaar blijven zitten is de fijnspar volgens de Duitse normen ziek. Men kan dus de gezondheid van de spar eenvoudig schatten door vanaf de top vijf zijtakken of vijf littekens van winterknoppen (zichtbaar als geribbelde ringetjes rondom de tak) terug te tellen. Zijn achter de vijfde vertakking nog groene naalden aanwezig, dan is de boom zo te zien nog gezond.

Behalve het volledig verdwijnen van de oudere jaarklassen naalden, kan er een sterke uitdunning van de jongere jaargangen plaatsvinden. Men hoeft geen boomsoorten te kennen om dit zelf in het bos te controleren. Voor eigenlijk alle sparsoorten is dit verschijnsel hetzelfde. Alle bomen die op kerstbomen lijken (de fijnspar wordt als kerstboom gebruikt) moeten heel lang hun naalden houden.

Hetzelfde verschijnsel is te zien bij alle dennesoorten. De grove den, de meest aangeplante den in ons land, met naalden van vier tot zeven centimeter lang, kan zijn naalden drie tot maximaal vijf jaar houden (Schütt, 1983; Staatsbosbeheer, 1983). Op arme zandgrond is dat iets minder lang, maar enkele decennia geleden plachten de denne-naalden in ons land nog 2,5 tot 3,5 jaar oud te worden. Indien de takken gemiddeld slechts 2 jaargangen naalden bezitten, worden de bomen in Duitsland als ziek aangemerkt. In 1983 bezat 20% van de Nederlandse grove dennen slechts één volle jaargang (of twee onvolledige, die samen voor een volle golden). Begin 1984 bezaten deze bomen over het algemeen nog slechts één zeer onvolledige jaargang, vaak bestaande uit een kransje naalden vlak onder de eindknop. Later in het voorjaar werd deze aangevuld met de nieuw gevormde jaar-klasse. Ook deze laatste jaar-klasse vertoonde reeds in de loop van de zomer ernstige schade en eind juli van dat jaar bleken vooral de oudere opstanden alweer minder dan een volledige jaar-klasse naalden te bezitten.

Alle dennesoorten reageren, net als de sparren, ongeveer gelijk. De

Corsicaanse of Oostenrijkse dennen, die veel zijn aangeplant in de duinen en in het oosten van ons land, zijn herkenbaar aan hun circa 10 centimeter lange naalden. Hoewel de naalden aan deze bomen onder gunstige omstandigheden gemakkelijk vier jaar oud kunnen worden, treft men net als bij de grove den in veel bossen nog amper een kransje naalden rondom de eindknoppen aan.

Vuistregel

Door het verlies van zoveel naalden en bladeren vormen de bomen niet meer als het ware 'een dak van groen'. De kroon wordt ijl en doorzichtig. In Duitsland hanteert men de volgende vuistregel: Een zieke volwassen boom herkent men, wanneer men, eronder staand en naar boven kijkend, de blauwe lucht kan zien (Schütt, 1983). Als men deze vuistregel op de meeste bossen van de Veluwe en de oostelijke zandgronden toepast, komt men tot de zorgwekkende conclusie dat aan het grootste deel der naaldbomen nog maar een waasje groen hangt en dat de kruinen van veel loofbomen alleen bladeren hebben om de topjes of rondom de grote takken.

Misvormingen

Bij chronische beïnvloeding door luchtverontreiniging kan het voorkomen dat een groot aantal sparreloten zich dwergvormig ontwikkelt. De loten en ook de naalden zijn dan veel korter dan normaal: bij sparren vaak een derde tot de helft, bij grove dennen circa een centimeter. Dit is een verschijnsel dat niet voorkomt bij bijvoorbeeld een zeer trage groei ten gevolge van extreme bodemarmoede. In dat geval is de lengtegroei van de takken weliswaar gering, maar blijft de lengte van de naalden onbeïnvloed.

Ook bij loofbomen kan dit verschijnsel optreden. Vooral bij beschadigde beuken heeft men veelvuldig het voorkomen van dwergachtige bladeren geconstateerd.

Aan de bast zijn eveneens tal van chronische schadebeelden te zien. Op twijgen en takken ontstaan bij dennen openstaande scheurtjes van enkele centimeters in de lengterichting en uit deze wondjes loopt veel hars. Dit type wonden lijkt op schade door hagelstenen, maar een dergelijke schade zou nooit aan de onderzijde van de takken kunnen optreden. De wonden verschenen ook in tijden dat het nooit hagelde.

Aan de onderzijde van de zijtakken van naaldbomen, vaak op het laagste punt, waar waterdruppels blijven hangen, vindt men veel baststerfte. De wond is omringd door zich tijdens herstelfasen ontwikke-

lende omwallingen van wondweefsel.

Uit de bast van de stam lekt bij ernstig aangetaste dennen veel hars (voor deze fase is bereikt, zijn de bomen om redenen van boshygiëne vaak al gekapt). Ten slotte valt de bast in grote lappen af.

De bast van zieke eiken wordt rot en zacht, vooral aan de onderzijde van zijtakken, aan een schuinhangende stam en aan de wortelvoet.

De bast van beuken is normaal zilverig glad en gesloten. Bij de aangetaste bomen wordt de bast ruwer; er ontstaan openbarstende scheurtjes. Hieruit ontwikkelen zich grotere scheuren en ten slotte laten hele plakken bast los. (Het is al door onderzoek uit de eerste helft van deze eeuw bekend dat deze schade samenhangt met de giftigheid van opgelost aluminium in de bodem.) Ook deze wonden zijn bij een chronische aantasting omweld met dikke randen wondweefsel (Poortinga, 1983-5).

Op de bast van Amerikaanse eiken ontstaan grote rotte plekken waaruit vocht loopt.

De zichtbare schadebeelden aan de bast van volwassen boomstammen gaan altijd gepaard met infecties van schimmels en schorskevers, die hier een gemakkelijke voedingsbodem vinden.

Krullen en verkleuringen

Een zeer algemeen voorkomend verschijnsel is het krullen van de naalden. In gebieden met relatief onvervuilde lucht kan men nog steeds constateren dat de naalden normaal mooi recht gestrekt zijn. De netjes gerangschikte rijen rechte naalden geven de twijg een ordelijk aanzien. Steeds algemener is waar te nemen dat de naalden wanordelijk gericht lijken. Met name de lange naalden van dennessoorten zijn gekruld. Ook de bladeren van loofbomen kunnen ten gevolge van luchtverontreiniging krullen. Dit is vaak beschreven voor beuken, maar men kan dit verschijnsel ook aan andere loofbomen waarnemen. Dit symptoom, waardoor sparrebomen soms meer op een pak krulvermicelli dan op ordelijke bomen lijken, komt evengoed voor op klei- als op zandbodems en hangt kennelijk samen met een aantasting direct vanuit de lucht (Poortinga, 1984).

Niet alleen de naalden krullen. Gezonde sparreloten hebben een kaarsrechte vorm. Naarmate de bomen ernstiger zijn aangetast, treft men naast rechte loten steeds meer kromgegroeide loten aan.

Bij loofbomen kunnen de bladeren door de luchtverontreiniging vervroegd afsterven. Dit verschijnsel is vergelijkbaar met het vervroegde afsterven van dennenaalden. In de herfst treedt dan een vervroegde verkleuring van de bladeren op. Jammer voor de natuurfotograaf is dat het afsterven van de bladeren volgens een ander proces verloopt

dan de normale herfstverkleuring. In het voor de bomen moeilijke jaar 1983 waren nauwelijks herfstkleuren te zien. De bladeren van tal van boomsoorten verloren vanaf eind augustus tot november geleidelijk hun groene kleur. Het groen ging langzaam over in vaalgeel, geelbruin en ten slotte in vuilgrijze tinten.

Normaal laten de bomen binnen één tot twee weken hun blad vallen en bij dat snelle proces verdwijnt het bladgroen maar blijven de geel-oranje caroteenkleuren. De normale periode van bladafval is begin november, vlak voor Sint-Maarten (eigenlijk een oud oogst- en herfstfeest) en de eerste herfststormen. Van de Duitse beukenbossen is bekend dat de zieke bomen tegenwoordig al in juni hun nog groene bladeren beginnen te verliezen. De bosgrond raakt dan bezaaid met groene blaadjes. Ook hier is geen teken van parasitaire aantasting zichtbaar.

Niet alleen in de droge zomer van 1983 bleken tal van bladeren aan de bomen van de Nederlandse loofbossen en laanbeplantingen te verdorren, ook in de natte voorzomer van 1984 waren aan de windzijde de bladeren van vele bomen al in juli verdord. Toch was de eerste helft van 1984, met koel en vochtig weer, optimaal voor boomgroei. Vooral de iepen, karakteristiek voor het noordelijk kleiland-schap, waren al vóór augustus grotendeels verdord (onderzoek Eco-plan).

De genoemde verdorring is goed te onderscheiden van de iepziekte. Deze ziekte laat namelijk de bladeren wegens verstopping van de houtvaten aan bepaalde takken verdrogen, terwijl de rest van de kroon nog lang frisgroen blijft. De gevoeligheid voor iepziekte zal natuurlijk bevorderd worden door het verlies aan vitaliteit, zodat de verschijnselen heel goed kunnen samengaan. Overigens blijken ook struiken zoals meidoorns ernstig te zijn aangetast door de verbruining (waardoor ze vatbaar zullen zijn voor het bekende perevuur). Deze aantasting, die zich het snelst ontwikkelt aan de windzijde van percelen en boomrijen, wordt door het IPO toegeschreven aan de werking van zwaveldioxide (Mooi, 1972). Na de eerste zonnige periode in 1983 was het schadebeeld duidelijk anders en hadden de loofbomen veel last van vlekneecrose en van aantasting van de bladranden. Dit kan samenhangen met een relatief grote invloed van ozon in die periode. Toen de zonnige periode in 1983 werd gevolgd door dagenlange regenbuien traden acute vergeling en sterfte op van bladeren en naalden.

Acute schade en lange-termijnwerking

Het zal duidelijk zijn dat de meeste bladbeschadigingen ontstaan ten

gevolg van een acuut aantastingsproces. Tijdelijk verhoogde concentraties van schadelijke stoffen in de lucht tasten direct of indirect de bladeren aan. Als de vervroegde bladval in de herfst optreedt als een gevolg van een chronische verzwakking van de boom, kan ook deze bladschade tot de chronische ziektebeelden worden gerekend. Daarmee is duidelijk dat het verschil tussen acute schade en schade door lange-termijnwerking van de luchtverontreiniging vaak moeilijk is te bepalen. Dit geldt eveneens voor een aantal verkleuringen die bij verhoogde niveaus van luchtverontreiniging ontstaan. Wanneer deze verkleuringen bij verzwakte bomen ook zonder een tijdelijke piek in de luchtvervuiling optreden, krijgen ze een min of meer permanent karakter en zijn ze dus chronisch.

Door het uitwassen van kalium en magnesium uit bladeren en naalden wordt het bladgroen aangetast. Dit uitwassen wordt waarschijnlijk zowel door ozonaantasting als door de zure stoffen veroorzaakt. Ozon maakt de bladorganen lek en de zuren worden op en in het blad gebufferd met de basische mineralen. Eerst worden dan de punten van de naalden geel. Ook kunnen bepaalde loten of twijgen, zelfs hele bomen, helgeel worden (Braun, 1983). Indien de bodem nog voldoende mineralen bevat, kunnen deze stoffen weer worden aangevuld, zodat er na enige tijd opnieuw bladgroen gevormd is. Op verzuurde bodems, die nog nauwelijks mineralen bevatten, kan de vergeling permanent zijn. Vaak is in dat geval de hele boom of het hele bos aangetast. Bladeren zijn dan te licht van kleur en naaldbomen hebben hun diepgroene kleur verloren. De overheersende kleur wordt dan licht-helgroen en ten slotte geelgroen. Vooral over die delen van de boom die de meeste wind vangen, ligt dan een gele zweem.

Wanneer de omstandigheden waaronder de mineralen uitwassen lang aanhouden, sterven de vergeelde naalden en bladeren en verandert het geel snel in bruin. Hoewel de verkleuring in de Nederlandse bossen toeneemt, is het hier niet voorgekomen dat hele bomen in enkele weken van groen in geel veranderden en binnen een paar maanden leken af te sterven, zoals men in Duitsland op sommige berghellingen heeft kunnen zien.

Wortels

Door verzuring van de bodem en het wortelmilieu ontstaat zichtbare schade aan de wortels. De verzuring van de bodem is een lange-termijnproces, doch de wortelsterfte treedt acuut op tijdens de zogenaamde zure schokken in de bodem of rondom de wortels. De directe omgeving van de wortel verzuurt als de boom veel zure stoffen op de

bladeren en naalden buffert. Ook treden zure schokken in de bodem op wanneer de bosgrond na een droogteperiode weer nat wordt. Onder die omstandigheden sterven de kleine zijwortels snel af. Deze worteltjes zijn slechts één tot enkele millimeters dik en vergaan binnen circa vier weken.

De aangetaste wortels zijn heel gemakkelijk te herkennen. Graaf gerust eens met uw zakmes of kampeerschopje in de bosgrond! Het eerst wordt namelijk de verbindende laag tussen de centrale cilinder en de wortelhuid (de endodermis) aangetast. Deze laag vormt een barrière tegen tal van schadelijke stoffen en ook het giftige, opgeloste aluminium hoopt zich hier op. Doordat deze verbindende laag daarvoor kapotgaat, ligt de buitenlaag los van de centrale cilinder. De worteltjes die aan dit proces zijn doodgegaan zijn gemakkelijk te herkennen. Wie een stukje uit de grond losmaakt, kan de centrale cilinder zo maar uit de buitenlaag trekken, als een stokje uit een buisje.

Een gezond wortelstelsel is even systematisch vertakt als de bovengrondse delen van de boom. Volgens een onderzoek van voor de Tweede Wereldoorlog zou een fijnspar een wortelstelsel hebben met vertakkingen tot de zevende orde. Bij aangetaste fijnsparren zijn vaak alleen de grotere hoofdwortels aanwezig, met daarop meteen de fijne, slechts zwak verhoutte wortels die normaal de laatste vertakkingen zouden vormen. Deze vertakking is net zo min regelmatig als die in de boom!-ruin. Als laatste vertakking kunnen lange en korte wortels ontstaan (vergelijk lang- en kortloten). De korte wortels dienen voor het opnemen van vocht en mineralen, al dan niet met behulp van schimmelwortels. De lange wortels horen geleidelijk te verhouten en kunnen na verloop van tijd uitgroeien tot hoofdwortels. Waar de nog onverhoutte lange wortels keer op keer afsterven, terwijl de reeds verhoutte wortels doorgroeien, ontstaat een kloof tussen de grote en de kleine wortels wegens het ontbreken van de middenklasse.

Na het afsterven van een groot deel van de kleine wortels, vormt de boom snel nieuwe zijwortels op tamelijk willekeurige plekken vlak voor het punt waarop de sterfte is geëindigd. Analooq aan de 'angstloten' zou men hier kunnen spreken van 'angstwortels' of 'regeneratiewortels'. Dit proces kan zich op verzuurde bodems enkele malen per jaar herhalen.

Na een beschadiging van de wortels is er (tijdelijk) geen barrière meer tussen de houtvaten en het bodemvocht. Allerlei ziekteverwekkende bacteriën en schimmels kunnen dan gemakkelijk de wortels binnendringen. Zelfs de wortelschimmels waarmee een gezonde boom slechts tot zijn voordeel samenleeft kunnen dan ziekteverwekkend worden. Wanneer deze rotting door het wortelstelsel omhoogklimt, kan de stam vanaf de onderzijde inrotten. Dit merkt men pas wanneer

de boom is omgezaagd. Voor de bosbouwer die dacht ten minste het hout nog te kunnen verkopen is zo iets een tegenvaller. Door de aantasting van het wortelstelsel wordt de boom natuurlijk erg gevoelig voor droogte. In de droge zomer van 1983 bleek dit duidelijk aan de massale beukensterfte op de zure zandgronden. In dat jaar zijn ook tal van fraaie beukenlanen verdwenen. Beuken zijn namelijk erg gevoelig voor wortelaantasting. Daarbij sterven niet alleen zoals bij sparren de fijnere wortels af, maar soms hele sectoren van het wortelstelsel, inclusief de zware wortels die dienen om de bomen in de grond vast te hechten. Het versterf gaat dan door tot aan de primaire hoofdwortel.

6. HET GROTE UITSTERVEN

Het afsterven van natuurgebieden

De gevolgen van zure regen zijn voor de natuur vergelijkbaar met die van het verdwijnen van de tropische regenwouden. Oerbos is in West-Europa al meer dan duizend jaar verdwenen en in Noord-Amerika heeft men in de 18de en 19de eeuw de oorspronkelijke natuur op grote schaal in cultuur gebracht. In het zachte klimaat van Midden-Europa en Noord-Amerika heeft de aantasting van de oorspronkelijke ecosystemen in tegenstelling tot het verdwijnen van het tropisch regenwoud geen acuut uitsterven van bijna alle plant- en diersoorten tot gevolg gehad. Tal van soorten bleken goed te kunnen overleven in de licht geëxploiteerde, half natuurlijke ecosystemen.

Door de natuurbeschermingsorganisaties zijn in de loop van deze eeuw enorme kapitalen geïnvesteerd om enkele gebieden aan te kopen en te behoeden voor verdere ontginning. In die 'natuurgebieden' tracht men door een goed beheer het geleidelijk uitsterven een halt toe te roepen, maar deze investering heeft haar rendement al goeddeels verloren, want lang voor de bossterfte begon, is in de 'natuurgebieden' ongemerkt het grote uitsterven begonnen.

Niemand weet hoeveel soorten er verdwijnen

Eigenlijk weten wij maar heel weinig van de natuur om ons heen. De meeste mensen kennen slechts een paar planten en dieren bij naam. Vraagt u eens een willekeurige persoon om van enkele bomen of vogels in het park de naam te noemen. Zelfs mensen met een bosbouw- of plantkundige opleiding hebben moeite met het benoemen van de soorten, die zij door hun opleiding eigenlijk zouden moeten kennen. Allerlei kleine planten en dieren, insecten, spinnen, schimmels, mossen en korstmossen zijn vaak alleen bekend aan enkele specialisten. Nog veel meer kleine organismen worden eenmaal beschreven en vervolgens vergeten. Andere zijn nog door geen enkele onderzoeker opgemerkt. Dit ongetelde aantal soorten zou de bouwstenen moeten vormen voor het herstel van onze afgetakelde natuur. Helaas is een groot aantal van deze organismen al door de luchtverontreiniging te gronde gegaan en het grote uitsterven lijkt even snel voort te schrijden als het afsterven van de bossen.

Bij verzuring nemen het aantal exemplaren en het aantal soorten sterk af. Verzuurde wateren met een pH lager dan 5 worden gekarakterisi-

seerd door de afwezigheid van slakken, bloedzuigers en schaaldieren. Bij verzuring van de bodem verdwijnen eveneens de meeste wormen. Van sommige groepen worden slechts een of enkele voor zuur tolerante soorten waargenomen, bijvoorbeeld de platworm *Polycelis tenuis*, de haftelarve *Leptophlebia vespertina* en de larven van de kokerjuffers *Holocentropus dubius* en *Cyrnus flavidus*. Waterwantsen, waterkevers en libellelarven kunnen in zure wateren wel in grote aantallen aanwezig zijn. Dit zijn voornamelijk vleesetende soorten die kunnen leven van insecten die in het water waaien of uit overhangende bomen vallen. Plantenetende soorten ontbreken in het verzuurde water door gebrek aan voedsel (Leuven, 1983).

Het blijkt dat men een organisme heel goed moet kennen voor men kan waarnemen in welke mate het achteruitgaat. Het wetenschappelijk bewijs van die achteruitgang is echter pas na uitgebreid onderzoek te leveren. Zo betoogde een aquatisch bioloog op een symposium in Den Bosch over verzuring, dat een bepaald visje, dat vroeger in kalkarme vennen zou zijn voorgekomen, nu was verdwenen. Deze stelling werd echter door een even gerenommeerd deskundige bestreden. De laatste hield vol dat het bijzondere visje daar waarschijnlijk nooit was voorgekomen.

In Nederland en in heel Europa en Noord-Amerika zijn miljarden bomen en vele duizenden specialisten op het gebied van bos en bomen. Toch is de achteruitgang van de kwaliteit van de bomen pas opgemerkt op een moment dat het bos na een jarenlange degradatie vérgaand verziekt was. Bovendien moesten al die boomspecialisten eerst hardhandig met de neus op de feiten gedrukt worden door enkele van hun in de schade gespecialiseerde collega's.

Het voorgaande geldt voor alle soorten die alleen een Latijnse naam hebben en slechts door een enkele bioloog worden gekend, zoals tal van korstmossen, zwammetjes, vliegjes, spinnen, mijten, enz. Het is pijnlijk duidelijk dat een langzaam afsterven in de meeste gevallen pas wordt gemerkt jaren nadat de planten of dieren voorgoed zijn verdwenen.

Meinweg, voorbeeld van een degraderend natuurgebied

Illustratief voor het sluipende uitsterven is een voorbeeld waarop ik tijdens mijn werk voor het potentiële Nationale Park de Meinweg stuitte (ministerie van Landbouw en Visserij, 1984). Het natuurgebied vormt de waterscheiding tussen Nederland en Duitsland en is daardoor een van de weinige overgebleven gebieden met onbedorven beken, kwelstromen en vennen. Bijna overal elders in Nederland zijn

de wateren geëutrofeerd. Het vervuilde boezemwater stroomt ook door natuurgebieden als de Biesbosch, de Weerribben of de Oude Venen. Streken met een natuurlijke waterkwaliteit zoals de Meinweg zijn uiterst zeldzaam en worden alleen nog gevonden in enkele venen of brongebieden zoals de Veluwe sprengen.

De Meinweg heeft zijn biologische faam vrijwel uitsluitend te danken aan de talrijke nu zeldzame soorten insecten, kreeftachtigen en amfibieën in zijn onbedorven watertjes. Het terrein ligt echter onder de rook van het Ruhrgebied en vlak over de grens bevinden zich de grote Duitse bruinkoolwinningen. Omdat stroom goedkoper is te vervoeren dan bruinkolen, heeft het Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerk (RWE), de grootste elektriciteitsproducent van Duitsland, zijn centrales vlak bij de bruinkoolgroeven gebouwd. Bruinkool is per opgewekte kilowatt een van de vuilste brandstoffen en de RWE-centrales braken aan de andere zijde van de Limburgse grens jaarlijks 400 000 ton zwaveldioxide uit. Dit is evenveel als de hele Nederlandse zwavelemissie. Overigens zijn de bruinkoolcentrales niet de enige. Ten westen van Keulen staan enkele zeer grote centrales die elk per jaar meer dan 100 000 ton zwaveldioxide in de lucht blazen. In heel Noordrijn-Westfalen zijn sinds 1975 ten gevolge van de Duitse kolenprioriteitspolitiek de zwavelemissies met 110 000 ton per jaar gestegen. Behalve zwaveldioxiden stoten deze centrales stikstofdioxiden en tonnen zware metalen uit.

De luchtverontreiniging door zwavel is in de Meinweg het hoogste van Nederland. De bodems in dit gebied blijken door de eeuwenlange exploitatie al zuur en zijn daarom erg gevoelig voor verdere verzuring. In dit gebied kunnen dezelfde processen optreden als bij de verzuring van de Zweedse riviertjes en meren, vooral ook omdat de zuurdepositie hier vele malen hoger is dan in Scandinavië.

In de Meinweg worden met tussenpozen van enkele jaren excursies gehouden door de Werkgroep Beken, een werkgroep van Nederlandse specialisten voor de fauna van wateren. Deze groep deskundigen trekt dan, gewapend met zeven en fijne netten, door het Meinweggebied om kwelstroompjes, beken en poelen te bemonsteren op alles wat daarin krioelt. Voor zover dat mogelijk is, worden alle steenvliegen, vedermuggen, kriebelmuggen, kevers, libellelarven, zoetwaterkreeftjes, beekprikken, kikkers, padden en salamanders gedetermineerd en het resultaat wordt op een lijst aangetekend. Hoewel dit geen systematisch onderzoek is, levert het uiterst waardevolle gegevens op. Heel sporadisch komt het voor dat men op deze wijze en over zo'n breed spectrum periodiek inzicht krijgt in de faunistische rijkdom. Typisch voor de aantekeningen bij verschillende soorten is dat het niet zelden de laatste of een van de drie laatste vindplaatsen

van de soort in ons land betreft.

Het verontrustende van de beschreven inventarisaties is dat er in de loop van de jaren een aanzienlijke afnemng in soortenrijkdom plaatsvindt. Juist de zeldzaamste soorten, welke afhankelijk zijn van een heel nauw begrensde waterkwaliteit, worden steeds minder aangetroffen en het is waarschijnlijk dat ze bezig zijn in snel tempo uit te sterven. De inventarisaties zijn echter niet zo talrijk en omvangrijk dat van de gegevens een wetenschappelijk verantwoorde statistiek kan worden gemaakt. Zulk onderzoek om de vermoedens 'hard' te maken met cijfers zou de langdurige werkkraft van een groot aantal wetenschappers vergen en dat wordt bij de huidige prioriteiten van onze geïndustrialiseerde maatschappij onbetaalbaar geacht.

Buitenlandse onderzoeksgegevens zijn niet zonder meer toe te passen op de Nederlandse situatie. De door luchtverontreiniging verzuurde ecosystemen in Scandinavië en Noord-Amerika bevinden zich op heel andere bodemtypen. De verzuurde meren in Zweden worden gevoed door beken en bevinden zich op bodems die zijn ontstaan uit verweerd kalkarm graniet. De nog intacte Nederlandse beken ontspringen op arme zandgronden, en de Nederlandse vennen ontvangen hun water vaak uitsluitend van de regen en hebben in tegenstelling tot de Scandinavische meren geen contact met beken of grondwater.

Op deelgebieden is wel langdurig en diepgaand wetenschappelijk onderzoek verricht. De vennen in het Meinweggebied zijn bijvoorbeeld betrokken in een uitgebreid onderzoek van de Universiteit van Nijmegen naar de verzuring van de heide en de heidevennen in Zuidoost-Nederland. Dit onderzoek wees uit dat met name het kalkarme water van bepaalde vennen gevoelig is voor verzuring, met verstrekende gevolgen voor de flora en fauna. Voor de achteruitgang van de heide en de heidebebossingen is de verrijking met stikstof vanuit de lucht verantwoordelijk.

De paarse heide verdwijnt

Voor de laatste tientallen jaren treden dramatische veranderingen op in de vegetatie van heidegebieden. Op de schrale, voedselarme zandgronden groeien de karakteristieke heideplanten struikheide en dopheide. Om na te gaan of er bij de vergrassing van de heidevelden door pijpestrootje en bochtige smeke sprake is van verandering in de bodemchemie, zijn door de Nijmeegse onderzoekers een zeventigtal vergraste en niet-vergraste heidevelden onderzocht (Roelofs, 1983).

Bij het onderzoek vond men nauwelijks verschil in de zuurgraad van de bodems. Wel waren de concentraties plantenvoedende stoffen in

de bodems van vergraste heidevelden aanzienlijk hoger. Zowel het ammonium- als het nitraatgehalte van de bodem is opmerkelijk hoog op plaatsen met een dominantie van pijpestrootje en bochtige smele. Volgens de betrokken onderzoekers wordt het steeds duidelijker dat een belangrijk deel van de stikstof uit de atmosfeer komt. Zeker in streken zoals het Limburgse en het Noordbrabantse Peelgebied, waar vanuit Nijmegen veel onderzoek wordt gedaan, variëren, door de ammoniakemissies van de intensieve veehouderij, de jaarlijkse hoeveelheden stikstof in het regenwater tussen 20 en 60 kilo per hectare. Deze stikstofneerslag bestaat namelijk voor 75-90% uit ammonium. De stikstofvervuiling wordt nog aanzienlijk vergroot door de neerslag van ammoniak en stikstofoxiden vanuit de droge lucht. Vooral de nabijheid van kippenmesterijen en met drijfmest overladen maaisakkers zou funest zijn voor de heide.

Hoewel heidebodems meestal van nature zuur zijn, treffen we plaatsen aan waar zich leemkoppen bevinden of waar diep grondwater opwelt. Op die plaatsen is de bodem minder zuur en bezit hij enige buffercapaciteit tegen de zure depositie. Daar komt ook een soortenrijke vegetatie voor van planten die gebonden zijn aan alle overgangen van dit zwak gebufferde naar het zuurdere milieu. Helaas wordt het aangevoerde ammonium op plaatsen waar het minder zuur is door bepaalde bacteriën snel omgezet in salpeterzuur. Door dit zuurvormende proces verzuurt de bodem plaatselijk. Het resultaat is dat de variaties en overgangen in zuurgraad verdwijnen. Daardoor verdwijnt ook een deel van de planten en ontstaat een soortenarme vegetatie.

In een groot deel van de Peel kan een bezoeker slechts drie soorten dominerende planten aantreffen: dopheide, pijpestrootje en berk in de natte delen, struikheide, bochtige smele en berk in droge gebieden. Waar een intensief natuurbeheer wordt gevoerd zijn de meeste heideplanten te vinden en bij nauwkeurig speurwerk treft men ook nog enkele andere plantesoorten aan.

Ten behoeve van het experiment heeft men eerst met behulp van kalk enkele heidebodems kunstmatig minder zuur gemaakt. Vervolgens voegde men grote hoeveelheden ammoniak toe om het effect van jarenlange luchtvervuiling na te bootsen. Daarna bleek de zuurgraad snel te dalen, van pH 6 tot pH 4,2, niet verder. De Nijmeegse onderzoekers wijten dit aan het feit dat er in zure heidebodems beneden pH 4,2 geen bacteriën zijn die ammoniak kunnen omzetten in salpeterzuur. Ook de bodems van de vergraste heidevelden bleken precies even zuur.

De verdere neerslag van ammoniak veroorzaakt weliswaar geen verzuring, maar blijft niet zonder gevolgen. In tegenstelling tot het nitraat-

ion wordt het ammonium-ion sterk gebonden aan de humus. De toegenomen stikstofconcentratie is mogelijk verantwoordelijk voor de sterke ontwikkeling van het pijpestrootje. Uitgaande van deze veronderstelling is de kwaliteit van de heide onderzocht op een rechte lijn van twee kilometer tussen twee kippenmesterijen. Op de uiteinden van de lijn bevatte de regen jaarlijks per hectare 20 kilo zuivere stikstof in de vorm van ammoniak. Daar groeide uitsluitend pijpestrootje en was het ammoniakgehalte van de bodem hoog. Op het punt dat het verst verwijderd was van de mesterijen werd alleen struikheide aangetroffen en was het stikstofgehalte van de bodem relatief laag. Dit resultaat stemt overeen met de bevindingen van andere onderzoekers die door middel van bemestingsproeven aan toonden dat stikstofverrijking tot vergrassing van heidevelden kan leiden. Volgens de ecologische afdeling van de Universiteit van Utrecht zou de vergrassing schoksgewijs gaan. Periodieke plagen van het heidehaantje zorgen voor openheid en bevorderen de vergrassing doordat extra stikstof vrijkomt uit de afstervende heideplanten.

Bij hun onderzoek trof het de Nijmeegse onderzoekers dat bij het natuurgebied Rouwkuilen de bossen, die op voormalige heidevelden waren aangeplant, in de buurt van mesterijen in slechte conditie verkeerden. Dit werd opgemaakt uit de verminderde lengtegroei en uit het ontbreken van meerjarige naalden. Deze verzwakte bosbestanden raakten vaak geïnfecteerd met schimmels, bijvoorbeeld *brunchorstia*, waardoor de bomen op den duur zelfs afstierven.

Volgens de bevindingen van Staatsbosbeheer is hier, net als bij de vergraste heide, sprake van een duidelijk verband tussen de gezondheid van de bomen en de nabijheid van bioindustrieën. Vooral onder de wind van concentraties biobedrijven en overvloedig met drijfmest bemeste maïsakkers was de conditie van de bossen slecht. Een dertigtal bossen met Corsicaanse of Oostenrijkse den werd onderzocht op de vitaliteit van de bomen en de kwaliteit van de bodem. Evenals de vergraste en niet-vergraste heidevelden bleken de bosbodems een zuurgraad van 4,1 te hebben. Bodemverzuring als gevolg van een verhoogde neerslag van ammoniumsulfaat lijkt hier niet de oorzaak van de sterfte. Deze neerslag veroorzaakt wel een duidelijk verhoogd ammoniumgehalte van de bosbodem, wat tot verdringing van essentiële plantenvoedende stoffen zoals kalium, magnesium en calcium leidt. Het gehalte aan deze mineralen was het laagst in de bodems van de zwaar aangetaste bossen.

Stikstof bederft de heidevennen

Door de Nijmeegse universiteit is ook de invloed van waterverzuring en stikstofverrijking op de vegetaties in de kalkarme heidevennen onderzocht (Schuurkens, 1983). Tot voor kort was in ons land heel weinig bekend over de invloed van waterverzuring op het voorkomen van ondergedoken waterplanten. Alleen in de Scandinavische landen was geconstateerd dat verzuring van meren gepaard ging met het verdwijnen van bepaalde planten en het woekeren van knolrus en veenmossoorten. In Nederland blijken de laatste tientallen jaren de plantesoorten die kenmerkend zijn voor kalkarme en voedselarme wateren, heel sterk in aantal te zijn achteruitgegaan.

Karakteristiek voor voedselarme, zwak gebufferde ecosystemen is de aanwezigheid van een plantengroei bestaande uit lang levende, langzaam groeiende plantesoorten. In wateren zijn dat vooral de taaie sprieterige vertegenwoordigers van het oeverkruidverbond. De plantengemeenschap van deze wateren, het littorellion, heeft haar naam te danken aan het oeverkruid, dat de mooie Latijnse naam *Littorella uniflora* draagt. Deze plant komt in ons land nog slechts op 35 plaatsen voor. De stekelbiesvaren komt in de venen niet meer voor en soorten als waterbiesvaren en waterlobelia, die in hetzelfde milieu thuishoren, groeiden in 1983 nog maar in één heideven. Eén verkeerde beheersmaatregel en ook deze planten zijn verdwenen.

Wanneer men wordt geconfronteerd met het verdwijnen van soorten, is het proces van verzuring al geruime tijd op gang. Volgens de Nijmeegse hoogleraar Den Hartog berust het niet opmerken van de effecten van de verzuring op het feit dat men zich te eenzijdig heeft gericht op de toeneming van de voedselrijkdom (eutrofiëring) als oorzaak van de verandering (Den Hartog, 1983). Vroeger werd namelijk de achteruitgang van soorten geweten aan een toenemend fosfaatgehalte van het water ten gevolge van toerisme, vervuiling en bemesting door de talloze van afval levende meeuwen. Daarom zijn rondom veel van deze gebieden strikte reservaten ingesteld, die niet toegankelijk zijn voor toeristen. Ondanks deze strenge maatregel en een optimaal natuurbeheer bleef de achteruitgang van de zeldzame watervegetatie gewoon doorgaan.

Volgens Schuurkens en Roelofs, twee onderzoekers van de Nijmeegse universiteit, is het verwonderlijk dat men zich pas de laatste

[Fotos verhuisd na pagina 271](#) Zelden zijn we ons bewust van de omvang van ons energiegebruik. Vanuit de lucht lijken de raffinaderijen en olieopslagplaatsen in het Rijnmondgebied aparte steden te vormen. In 1984 besliste de regering dat de raffinaderijen hun zwaveldioxide-uitstoot met 45 000 ton moeten beperken. Shell denkt de uitstoot van Pernis binnen enkele jaren met 50% te kunnen beperken (Foto Aerocamera).

jaren bewust is geworden van andere vormen van verontreiniging, zoals de neerslag van zure en stikstofhoudende verbindingen uit de lucht, vooral omdat al lang bekend is dat veel van deze zwak gebufferde wateren voor hun watervoorziening geheel afhankelijk zijn van de regen. Bovendien is het de betrokken onderzoekers al vele jaren bekend dat de regen steeds zuurder wordt en dat plaatselijk de ammoniakgehalten sterk verhoogd zijn.

Tussen 1979 en 1980 werden 68 wateren onderzocht waar in 1950 plantesoorten van de oeverkruidgemeenschap groeiden met het oeverkruid als dominante soort. Het bleek dat in driekwart van deze vennen de oeverkruidvegetatie sterk achteruitgegaan of verdwenen was. Slechts in 12 wateren werd vastgesteld dat eutrofiëring van water of bodem de verandering in de plantengroei kon hebben veroorzaakt. In de overige 41 vennen met een veranderde vegetatie werd een sterke ontwikkeling van knolrus en/of veenmos waargenomen. Soms was het water helder en kwamen er geen waterplanten meer voor.

De waterkwaliteit bleek in de vennen met knolrus en veenmos sterk te verschillen van die in vennen met nog een intacte oeverkruidvegetatie. De oeverkruidvegetatie komt voor in voedselarme, niet verzuurde vennen (pH 6,5), waar het water een beetje opgelost nitraat bevat dat als stikstofbron voor de planten dient. De knolrus- en veenmosvegetaties komen voor in zure vennen (pH 3,9-3,8) met een heel hoog gehalte aan ammoniak en nagenoeg zonder opgelost nitraat. Evenals in de verzuurde Zweedse wateren, wordt hier een verhoogd aluminium- en cadmiumgehalte gevonden (Leuven, 1983). In verzuurde vennen was de hoeveelheid opgelost aluminium vijfmaal zo hoog als

Fotos verhuisd na pagina 271. Boven: Bij de goudspar, *Abies orientalis aurea*, is in het voorjaar goed te zien hoe de vertakking aangroeit. Aan de zijtak van de eerste orde zitten in het horizontale vlak, doch iets hangend, zijtakken van de tweede orde. Aan elk topje dat zich aan de rand van het vlak bevindt groeien een topscheut en enkele zijscheuten. De ogenschijnlijk gezonde tak op deze foto worden aan de bovenzijde al de eerste waterloten gevormd die uiteindelijk de regelmatige opbouw zullen verstoren. Op de foto is tevens goed te zien hoe de groene naalden vele jaren blijven zitten.

Links: Bij een gezonde spar steken de zijtakken van de eerste orde kweek omhoog. De boom heeft geen kale of dode takken en twijgen en vormt een gesloten muur van groen. De spar op de foto bezit negen jaarklassen naalden. Bij dergelijke gezonde sparren sterven in een gesloten bos alleen takken en naalden onderin de kroon waar het bijna volstrekt donker is. Dergelijke situaties komen in Nederland bijna niet meer voor.

Rechts: Bij zieke sparren vallen de naalden al na enkele jaren af. Ook sterven veel zijtakken van de tweede orde. De boom tracht zich te herstellen door de vorming van nieuwe loten op de vitaalste delen van de zijtakken. Hierdoor krijgt de kroon een plukkerig aanzien. Dit karakteristieke ziektebeeld is van verre te herkennen.

in onverzuurde vennen. Controleproeven in het laboratorium wezen echter uit dat veranderingen in het koolzuurgehalte van het water en het slib waarschijnlijk een belangrijker rol speelden in het verdwijnen van de planten dan het aluminiumgehalte.

Als het slib in het sediment kalkloos is, heeft de verzuring tot gevolg dat het koolzuurgehalte van het water daalt tot een vijftigste van het oorspronkelijke niveau. De ondergedoken waterplanten van de oeverkruidvegetatie hebben koolzuur nodig voor hun fotosynthese, zodat ze in het zure en koolzuurarme water niet kunnen leven. Zolang het slib licht kalkhoudend is, ontstaat daarin wel koolzuur. Onder die omstandigheden zien knolrus en veenmos nog tijdelijk kans om te groeien. Dit is echter een voorbijgaande fase. Indien verdere verzuring het carbonaat uit het slib verbruikt, zullen uiteindelijk ook deze planten verdwijnen en rest slechts het glasheldere water. De laagste pH in zo'n helder Nederlands ven gemeten, bedroeg 2,9.

In verzuurde vennen kwaken geen kikkers

Door het Laboratorium voor Aquatische Ecologie van de Nijmeegse universiteit werden ook de gevolgen van de verzuring van vennen voor amfibieën, kikkers, padden en salamanders, en voor een twintigtal vissoorten onderzocht (Leuven, 1983). Zesentachtig vennen in Zuidoost-Nederland werden, na de periode waarin de amfibieën hun eieren afzetten minstens driemaal met schepnetten bemonsterd. De vissen werden met allerhande soorten netten gevangen, schepnetten, fuikjes, enz., om een zo volledig mogelijke indruk van de soortensamenstelling te krijgen.

Het bleek dat de eieren van de heidekikker voornamelijk werden afgezet in water met een zuurgraad tussen pH 5,5 en 3,5. Beneden pH 5 bleek de sterfte sterk toe te nemen. Tot pH 4 groeide een groot percentage van de eieren uit tot larven. In wateren met een lagere zuurgraad werden maar enkele larven aangetroffen en bij pH 3,5 was de sterfte volledig. De eierklompen raakten onder de zuurdere omstandigheden hevig geïnfecteerd met schimmels. Hetzelfde verschijnsel is geconstateerd bij de eieren van andere kikkers en padden.

De gevolgen van verzuring voor salamandereieren waren moeilijker na te gaan, omdat deze individueel worden afgezet en lastig te vinden zijn. Uit het visonderzoek bleek dat de vissen iets minder zuur water prefereerden dan de amfibieën. Alleen de uit Noord-Amerika geïmporteerde hondsvijl blijkt in staat in extreem verzuurde wateren (tot pH 2,8) te leven. Men vond ook dat de amfibielarven weliswaar de beste overlevingskansen hadden in kalkarme, licht zure vennen, maar in het laboratorium toch beter gedijden in kalkrijker water. Dit leidde

tot de veronderstelling dat boven de zuurgraad van pH 4,5 niet de waterkwaliteit, maar de hoeveelheid roofzuchtige visjes, met name snoek en baars, belangrijk is voor de overlevingskansen van eieren en larven.

De kikkers en padden bleken dus te floreren in de smalle ecologische marge waar het water voor een aantal vissen al giftig werd, maar nog niet giftig genoeg was om de groei van kikkerdril tegen te gaan. Het wegvallen van deze ecologische marge – het grootste deel van de Westeuropese wateren is geëutrofeerd en de rest is bezig te verzuren – betekent ook voor een groot aantal amfibieën het einde van de bestaansmogelijkheid.

Kiezelwieren

Al heel lang is bekend dat de zuurgraad van water bepalend is voor de samenstelling van de macroflora van algen en wieren in meren. De oorspronkelijke macroflora verdwijnt en wordt vervangen door een eenzijdige bodembegroeiing van draadwieren. Bij verdere verzuring verdwijnen ten slotte ook deze soorten. Behalve de macroflora verandert ook de microflora. Voor de microalgen is deze verandering goed gedocumenteerd.

De skeletjes van kiezelwieren worden in de paleobotanie gebruikt als indicatoren voor de zuurgraad van het milieu. Deze indicatorsoorten zijn in Zweden gebruikt om de ontwikkeling van de verzuring sinds de ijstijd na te gaan (Rosenqvist, 1982).

Kiezelwieren zijn eencellige algen met een harde wand van kiezel. Dit kiezelskelet is versierd met allerlei goed herkenbare patronen, waaraan de soorten zijn te determineren. Hustedt deelde in 1939 deze wieren in naar hun voorkeur voor zure en minder zure milieus. Later is een index samengesteld op basis waarvan na inventarisatie van de kiezelwierenflora de pH tot op een halve eenheid nauwkeurig kan worden geschat. Kiezelwieren kunnen zich enkele malen per dag door deling vermenigvuldigen, zodat de samenstelling van de gemeenschap zich in het algemeen snel aanpast bij veranderingen in de omgeving. Diverse onderzoekers bestudeerden de kiezelskeletjes uit slibafzettingen in de meren van Noord-Amerika en Europa en constateerden een voortschrijdende verzuring.

Slibafzettingen zijn in de Nederlandse vennen in het algemeen dun of afwezig en daarom is het vergelijkend onderzoek gedaan met behulp van eerdere inventarisaties. In Nederland wordt al heel lang onderzoek verricht naar de soortensamenstelling van wieren in kalkarme en zwak gebufferde wateren (behalve kalk zijn enige andere factoren bepalend voor het bufferend vermogen). Voor een aantal vennen is

het zodoende goed mogelijk de veranderingen in de laatste zestig jaar te volgen (Dam, 1983).

Een van de eersten die de verandering van de algenflora in vennen onderzocht, was de bekende natuurbeschermer Heimans. Hij onderzocht in 1952 de microscopisch kleine sialgen van de Gerritsfles, een ven bij Kootwijk op de Veluwe, en vergeleek de gegevens met een inventarisatie van hemzelf in 1918. Uit de aard van de veranderingen leidde hij af dat dit ven tussen 1918 en 1950 moet zijn verzuurd. Bij een hernieuwde inventarisatie in 1977 door andere onderzoekers bleek deze tendens zich te hebben voortgezet.

Ook de inventarisaties die Heimans in 1925 en 1960 maakte van de sialgen in de vennen van Oisterwijk zijn vergeleken met monsters uit 1978 en ook hier bleek een sterke verarming van de algenflora te hebben plaatsgevonden, die door de onderzoekers werd toegeschreven aan zure regen. Deze verzuring werd niet gevonden in vennen die onder invloed van landbouw of recreatie waren vervuild.

Van Dam en Blokland, onderzoekers van het Rijksinstituut voor Natuurbeheer, bestudeerden de kiezelwieren uit monsters die door Heimans omstreeks 1920 in de vennen bij Oisterwijk, Kootwijk en Dwingeloo waren verzameld. Ook zij vonden in geïsoleerde vennen bij Oisterwijk een sterke toeneming van zuurminnende kiezelwieren. De zuurgraad, zo bleek uit de samenstelling, was sinds 1920 met 1,5 à 2 punten teruggelopen en de soortenrijkdom van de kiezelwieren was in elk van de verzuurde vennen afgenomen. Door de verzuring verdwenen de verschillen in de samenstelling van de kiezelwierenflora tussen de diverse vennen.

De soortenrijkdom van humusarme vennen is door de verzuring afgenomen doordat slechts enkele resistent zijn tegen de chemische veranderingen die bij verzuring optreden. De meeste vennen worden overheerst door een enkele soort, die de Latijnse naam *Eunotia exigua* draagt. Beide onderzoekers constateerden bovendien dat in de verzuurde Oisterwijkse vennen planten als grote biesvaren, oeverkruid en waterlobelia verdwenen waren.

In de vennen bij Dwingeloo bleek de samenstelling van de kiezelwierenflora sinds 1920 echter weinig te zijn veranderd. Deze vennen hebben geen zandige maar venige bodems en het water is daardoor, in tegenstelling tot de vennen bij Oisterwijk, humusrijk. Uit de samenstelling van de sialgen lijkt echter wel een geleidelijke toeneming van plantenvoedende stoffen, ofwel eutrofiëring, te kunnen worden afgeleid.

Uitsterven is voor altijd

We stuiten bij dit type onderzoek op twee wetmatigheden, die gelden voor elke diersoort en voor elke levensgemeenschap die dreigt te verdwijnen onder invloed van de verzuring. De eerste is het grensoverschrijdende karakter van de aantasting en als gevolg daarvan de definitieve aard van het uitsterven. Omdat onderzoek heeft uitgezeten dat ook de vennen in Duitsland, Denemarken en België verzuren, vindt dit proces en de daarmee samenhangende verdwijning van soorten kennelijk overal in Europa plaats (Vangenechten, 1980; Rebsdorf, 1980). Men mag daarom met een aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid veronderstellen dat soorten die in Nederland uitsterven dit ook in Duitsland en andere buurlanden doen.

Wanneer vroeger een plant of dier lokaal door een of andere oorzaak uitstierf, bleef nog altijd de mogelijkheid bestaan dat de soort na verloop van tijd elders terugkeerde. Juist de soorten van kleine en geïsoleerde milieutypen beschikken over goede verspreidingsmogelijkheden. Ze zijn vaak aangepast aan toevallige processen van lokaal uitsterven en herkoloniseren. De wetmatigheid van deze processen is goed onderzocht en vastgelegd in de theorieën over eilandbiogeografie. Nu echter overal dezelfde milieucatastrofe plaatsvindt, dreigt het uitsterven voor talloze soorten definitief te worden. Een onbekend aantal is trouwens al overal uitgestorven.

De tweede wetmatigheid is het verdwijnen van ecologische marges. We zagen dat de amfibieën waren aangewezen op een smalle marge in de zuurgraad, daar waar de eierroof door vissen gering is. Vissen hebben op hun beurt ook zulke marges. In de grotere wateren van Nederland is voor hen misschien wel meer te eten dan in bijvoorbeeld de vennen, maar daarin leven ook meer roofzuchtige vissen, waarvan de stand bovendien door de Organisatie voor de Binnenvisserij kunstmatig op een hoog peil wordt gehouden. Een feit is dat voor bepaalde vissoorten de verspreiding vrijwel uitsluitend beperkt is tot de kleine, zwak gebufferde wateren.

Van nature bestonden vroeger tal van geleidelijke overgangen in milieutypen. Dat leidde tot een bijna eindeloze variatie in levensomstandigheden. Een groot deel van deze gradiënt is in ons cultuurlandschap verdwenen en alleen in natuurgebieden tracht men de variatie aan milieutypen met veel zorg en tegen hoge kosten te behouden en te vergroten. Juist in deze milieus blijkt de luchtverontreiniging onder kalkrijke of andere bufferende omstandigheden te zorgen voor een langzame eutrofiëring door de hoge stikstofdepositie. Onder kalkarme omstandigheden blijken alle milieus geleidelijk te verzuren. Van de gradiënt blijven dus slechts de twee uiterste milieu-

typen over: de ernstig verzuurde, of de ernstig geëutrofieerde. Alle diersoorten die aan andere bijzondere omstandigheden zijn aangepast, zullen daarin onherroepelijk het veld moeten ruimen.

Van de beschermde diersoorten worden in het bijzonder de heidekikker en de grote modderkruiper bedreigd, omdat zij hun hoofdverspreiding in zwak gebufferde wateren hebben (Den Hartog, 1983). We zien bij het amfibie- en vis-onderzoek hoe het menselijk handelen het uitsterven van een groot aantal diersoorten veroorzaakt, soorten die we eerst tevergeefs een wettelijke bescherming hebben gegeven. Alle betrokken amfibieën en een aantal vissoorten in de vennen, de grote modderkruiper, de kleine modderkruiper en de bittervoorn zijn in de natuurbeschermingswet opgenomen als beschermde diersoorten. Deze dieren zullen echter nooit zelf een rechter of een advocaat opzoeken die bereid is hun belangen echt te behartigen.

De vraag is of de vennen gerestaureerd kunnen worden door bijvoorbeeld het toevoegen van kalk. Deze vraag kan momenteel niet worden beantwoord. Zonder meer kalk toevoegen heeft geen zin, aldus prof. Den Hartog (Den Hartog, 1983). Het water van verzuurde vennen is glashelder en redelijk zuurstofrijk, waardoor de zwavel en het fosfaat chemisch gebonden zijn aan het slib. Door toevoeging van kalk kan echter zwavelwaterstof (de 'rotte-eierengeur') worden gevormd en ook kan het fosfaat opnieuw beschikbaar komen, wat resulteert in waterbloei en stankoverlast. Men loopt dan het risico dat de plassen ernstig eutrofiëren. Een alternatief zou het verwijderen van de bovenste sliblaag kunnen zijn.

Bekalking is, zo heeft Zweeds onderzoek uitgewezen, een zaak van voorzichtige dosering en blijvende controle en is zeker geen permanente oplossing. Bekalking is waarschijnlijk het best als preventie toe te passen, in vennen die nog niet geheel verzuurd zijn. Wanneer we met het herstel wachten tot een groot deel van de betrokken plant- en diersoorten is verdwenen, kan de waterkwaliteit weliswaar worden hersteld, maar dan is de levensgemeenschap al voorgoed uit de schepping verdwenen. Volgens Den Hartog is fundamenteel onderzoek naar de restauratiemogelijkheden voor verzuurde vennen een dringende noodzaak. Men kan deze in natuurgebieden gelegen wateren niet zonder meer aan hun lot overlaten.

7. DUIZENDEN DODE MEREN

Vissterfte in de Scandinavische meren

De eerste noodkreten over de verzuring kwamen uit Zweden en Noorwegen. Al eerder in deze eeuw, in de jaren twintig, werd in enkele gebieden van Zuid-Noorwegen een vermindering van de visstand in de grote rivieren gerapporteerd. Recent onderzoek van dierlijke resten in sliblagen bevestigt dat de verzuring al voor de tweede helft van deze eeuw de levensgemeenschappen in kalkarme meren verstoorde en in bepaalde gevallen de vis deed verdwijnen (Brakke, 1980).

Ernstig werd de achteruitgang van de visstand in de jaren vijftig en zestig. De eerste inventarisaties van dit verschijnsel wezen erop dat het verdwijnen van de vis samenhang met een voortschrijdende verzuring van de meren. Op basis van deze hypothese werd een groot aantal onderzoeken gestart, die later werden gebundeld in het SNSF-project, een onderzoeksproject dat door de overheid jaarlijks met miljoenen kronen werd gefinancierd (Sevaldrud, 1980).

Sinds 1960 zijn de vispopulaties in de Zuidscandinavische meren buitengewoon snel achteruitgegaan en het tempo van deze achteruitgang lijkt in de jaren tachtig niet af te nemen. Wanneer de huidige trend voortzet, zal in 1990 80% van de forel in Noorwegen zijn verdwenen. Het is tegenwoordig een geaccepteerd feit dat er een wetenschappelijk onderbouwd verband bestaat tussen de chemische veranderingen in het water, ten gevolge van zure regen, en veranderingen in vispopulaties. Daardoor is het ook verantwoord om omgekeerd, bij gebrek aan chemische gegevens, de huidige visstand in vergelijking met de stand in het verleden te gebruiken als een aanwijzing voor verzuring (Muniz, 1980).

In Zuid-Noorwegen is de visstand van 5000 meren geïnventariseerd. In een gebied van 33 000 km² is de visstand aangetast en in 13 000 km² is de vis uitgestorven. Het blijkt dat de kleine meren sneller worden aangetast dan de grote. Opmerkelijk was dat al in 1980 twee derde van de meren kleiner dan 10 hectare dood was, terwijl dit 'slechts' met een derde van de meren groter dan 100 hectare het geval was, en dat hoog in de bergen de meren eerder sterven dan in het laagland. (In dit boek wordt voornamelijk ingegaan op de Noorse situatie. De processen die daar samenhangen met de verzuring verschillen in geen enkel opzicht van die bij de verzuring van de Zweedse, Schotse en Canadese meren en van de meren in het Adirondack-

gebergte in de Verenigde Staten. Al deze meren bevinden zich in gebieden waar de bodems zijn ontstaan door verwerking van kalkarm graniet en ontvangen hun water via deze bodems. Deze situatie verschilt van die van de Nederlandse, Duitse, Belgische en Deense vennen, die zich op arme zandgronden met een vrijwel van de bodem geïsoleerd waterregime bevinden. Het verschil blijkt hieruit: dezelfde vissen die in de Noorse meren sterven, zwemmen in de Nederlandse vennen nog levenslustig rond in water dat tienmaal zuurder is [op de pH-schaal een verschil van 1!] dan dat van de Noorse meren.)

Vissen verdrinken in zuur water

Het is alsof de vissen verdrinken in zuur water. Ze worden als het ware te waterig, doordat ze hun lichaamzouten verliezen en te veel water moeten opnemen om de tekorten aan te vullen. De concentratie van de lichaamzouten in vissen is hoog in vergelijking met de geringe concentraties in zoet water. Vissen kunnen daarom alleen maar in zoet water leven doordat ze actieve zouten, met name natriumchloride (keukenzout), uit het water opnemen. Dit gebeurt in de kieuwen, maar het proces wordt geremd door zuur water. Het leek waarschijnlijk dat verstoring van dit mechanisme de oorzaak zou zijn van de vissterfte in de Scandinavische meren. Een hoog calcium- en natriumgehalte van het water lijkt de door het zuur veroorzaakte stress te kunnen verminderen. In de praktijk blijken vissen eerder te sterven in wateren met een lager gehalte aan opgeloste zouten.

Om de schadelijkheid van verzuring en de effecten van zuurconcentraties op inheemse vissoorten te meten, zijn in Scandinavië proeven gedaan. Hiertoe werden in laboratoria forellen uit onverzuurde meren uitgezet in bakken waarvan het water kunstmatig zuur was gemaakt met zwavelzuur. De resultaten waren verrassend. Van een zuurgraad van pH 5, waarbij de vissen in de meren al beginnen te sterven, bleken de vissen in het leidingwater met zwavelzuur helemaal geen hinder te ondervinden. Bij pH 5 was er geen en bij pH 4,6 slechts een minimaal verlies van chloride meetbaar, ondanks het feit dat ook de concentratie van calcium en andere zouten in het water heel laag was. Pas bij pH 4,3 begonnen de vissen tekenen van stress te vertonen en bij pH 4 werd sterfte geconstateerd. Wanneer de proeven werden gedaan met water dat niet kunstmatig was verzuurd maar dat afkomstig was uit verzuurde meren, begonnen de vissen veel eerder (bij pH 4,6) te sterven. Men plaatste ook forel uit een riviertje met pH 4,9 over naar een beek met pH 4,6. Na de overplaatsing verloren de vissen snel zout en stierven na circa 11 dagen.

Uit de experimenten bleek duidelijk dat het verzuurde water in de

meren voor vissen giftiger was dan water dat in het laboratorium kunstmatig met zwavelzuur was verzuurd. Vergelijkbare verschillen werden gevonden bij zalmbroed en -eieren. In kraanwater met zwavelzuur verminderden de overlevingskansen voor broed bij pH 4,0 en voor eieren bij pH 3,0-3,6. In de natuur is alleen overleving mogelijk bij een zuurgraad van minimaal pH 5,0-5,5. Zalmeieren komen bij pH 4,5 niet meer uit. De embryo's bewegen nauwelijks, het buitenste vlies is te taai en het voor het uitkomen benodigde enzym werkt niet in verzuurd water (Peterson, 1980). Soortgelijke resultaten werden gevonden voor andere vissen.

In het vroege voorjaar van 1977, tijdens het smelten van de sneeuw in Het Adirondackgebergte constateerde de Amerikaan Schofield ernstige sterfte onder zijn experimentele groep beekforellen, toen de zuurgraad van het kleine Elandsmeer plotseling zakte van pH 7,2 naar pH 5,9. De verlaging van de zuurgraad, niet groot genoeg om de sterfte te veroorzaken, ging gepaard met een dramatische verhoging van het aluminiumgehalte. Recent onderzoek van Schofield en collega's heeft aangetoond dat de hoeveelheid opgelost aluminium op zichzelf niet verantwoordelijk is voor de giftigheid van het water, maar dat de mate van giftigheid afhankelijk is van de zuurgraad, die maximaal rondom pH 5 moet liggen. Tot ieders verrassing werd bij verdere verzuring van het water, bij pH-3 de giftigheid minder. Bij deze pH is de zuurconcentratie niet meer hinderlijk voor de vissen. Schofield concludeerde dat het aluminiumgehalte een betere indicatie voor de giftigheid is dan de zuurgraad of het kalkgehalte. Ook in Zweeds onderzoek kwam men tot dergelijke conclusies. Inventarisatie van de waterkwaliteit in meren en rivieren toonde aan dat verzuurd water altijd een hoge concentratie aluminium bevat. Het wordt door de zure neerslag opgelost uit de bodem, waarna het met aluminium verrijkte water uit de bodem lager op de hellingen in rivieren en meren stroomt.

Bij nader onderzoek bleek dat het aluminium in het water als vrij opgelost aluminium én in een aantal chemische verbindingen kan voorkomen. Aluminium kan stabiele verbindingen vormen met hydroxiden, fluoriden, sulfaat en opgeloste organische stoffen (humus) (Baker, 1980). Deze stoffen zijn evenmin giftig als het oorspronkelijke chemisch gebonden aluminium in de bodem. De mate van giftigheid van het water blijkt vrijwel uitsluitend te worden veroorzaakt door het opgeloste vrije aluminium.

Zure sneeuw

De giftigheid van juist het vrije aluminium verklaarde de pieken in

vissterfte tijdens het smelten van de sneeuw. In deze periode smelt, zoals een Zweed het voor het Europese Parlement uitdrukte, eerst de vuilste sneeuw, de sneeuw uit Engeland en het Ruhrgebied, door de smeltpuntverlaging aldaar wegens de grote concentratie verzurende stoffen. Inderdaad is de chemische gelaagdheid van de sneeuw herkenbaar. Vuile sneeuw is geen nieuw verschijnsel. Al honderd jaar geleden werd in Noorwegen de veronderstelling geopperd dat een periode van grijze sneeuw werd veroorzaakt door luchtverontreiniging vanuit Engeland.

Vanaf de winter van 1968 zijn de sneeuwpakketten in Zuid-Noorwegen onderzocht. Daarbij werd een duidelijke gelaagdheid gevonden en grijze zones bevatten altijd aanzienlijk meer zuur en grotere hoeveelheden zwavel en zware metalen dan witte zones. PH-waarden tot 3,3 en sulfaat- en loodgehalten tot respectievelijk 25,4 milligram en 98 microgram per liter werden gemeten. De chemische gelaagdheid in de sneeuw blijft intact tot de dooiperiodes (Overrein, 1980).

Een onderzoek in het voorjaar van 1978 wees uit dat in de maand mei slechts 10% van de sneeuw smolt. Met het smeltwater verdween echter 50% van alle zwavelzuur uit het sneeuwpakket (Johannessen, 1980). Het zure smeltwater zakt door de sneeuw in de grond. De buffercapaciteit is in veel bodems weliswaar groot genoeg om dit zuur te neutraliseren, maar elke chemische reactie heeft een zekere hoeveelheid tijd nodig. Wat te kort schiet is dus de buffersnelheid van de bodem. De grote massa's zuur smeltwater lossen het aluminium uit de bodem op en voor dit zich weer chemisch kan binden aan humus of bodemdeeltjes is het in beken en rivieren gestroomd. Daar veroorzaakt het smeltwater een enorme verzuring en verhoging van het aluminiumgehalte.

Na het smelten van de eerste sneeuw komt een periode van herstel. De laatst gesmolten sneeuw bevat nauwelijks meer vervuiling. Het zuur uit de volgende regenbuien wordt goed door de bodem geneutraliseerd en het zuur in de meren reageert met andere opgeloste of zwevende stoffen (vooral humus) in het water en de meerbodem. Ook het vrije aluminium neemt in humusrijke meren snel af door binding aan organische stof. De sterfte is daarom het ergst in meren waar het water weinig humus bevat.

Het grillige patroon van de vissterfte

Door het onderzoek naar het gedrag van aluminium is duidelijk geworden waarom de sterfte in de meren volgens een bijna onnavolgbaar grillig patroon verloopt. Door de gecombineerde invloed van zuurgraad, humus- en aluminiumgehalte wordt bij uiteenlopende

combinaties een schadelijke kwaliteit van het water bereikt. Dit verklaart ook het verschil in de reacties van vissen in de Scandinavische meren en de Nederlandse vennen. Het water in de vennen is wegens de grote isolatie van het grondwater bijna geheel afkomstig van de regen, die er rechtstreeks invalt. Er vindt daardoor in de verzurende vennen slechts een geringe verrijking met aluminium plaats, zodat het effect van de voorjaarsmelt hier geen wezenlijke rol speelt. Wel blijkt ook in de vennen een hoog humusgehalte een gunstige factor te zijn. We zien dan ook dat de levensgemeenschappen in de vennen nog floreren bij een zuurgraad die funest is voor de Scandinavische vissen. Snoek, baars, zeelt, karper en blankvoorn zwemmen in onze zwak gebufferde wateren nog lustig rond bij een zuurgraad lager dan 5. De hondsvij is in ons land zelfs nog aangetroffen bij pH 3,5.

In Nederland is de luchtverontreiniging weliswaar enkele malen hoger, maar ook de hoeveelheid zuur in onze zwak gebufferde wateren moet voor een gelijk effect enkele malen hoger zijn. Hierdoor is tevens verklaard, dat de sterfte in de Nederlandse vennen pas tegelijkertijd optreedt met de vissterfte in de Scandinavische meren.

Aluminium verandert het hele ecosysteem

Het vrije aluminium blijkt in zeer lage concentraties al schadelijk en oplossingen van 150 microgram aluminium per liter water zijn acuut giftig voor vissen. Behalve zoutverlies bestaan de ziektesymptomen uit de vorming van dikke, klonterende slijmlagen op de kieuwen, hyperventilatie, hoesten en een laag zuurstofgehalte in het bloed. Het uiteindelijke effect van de giftigheid van aluminium lijkt dus een combinatie van verlies aan lichaamsszouten en gebrek aan zuurstof te zijn. Verder wordt de verarming van flora en fauna veroorzaakt door de gevolgen die het vrije aluminium heeft op de hoeveelheid organische stof en fosfaat in het water. Deze stoffen worden door het aluminium uit het water neergeslagen volgens dezelfde processen als die welke voor de chemische zuivering van afvalwater worden gebruikt.

Een typerend verschijnsel in veel meren is het onvermogen van de vissen om zich voort te planten. De vissen kunnen in het water blijkbaar nog overleven, maar de eieren, hoewel succesvol afgezet, sterven af. In sommige jaren dat het water minder zuur of het aluminiumgehalte minder hoog is, kan de voortplanting na een onderbreking plotseling weer slagen. In dat geval bestaat de vispopulatie niet alleen uit oudere vissen maar uit twee of meer gescheiden leeftijdsgroepen. Soms kan het voorkomen dat de oudere vissen na het kuitschieten sterven maar dat het broed toch opgroeit. In dat geval bevat het water slechts jonge vissen. De vreemdste combinaties zijn mogelijk en

soms blijken juist de gevoelige soorten vis te overleven, lang nadat de minder gevoelige soorten zijn verdwenen (Rosseland, 1980).

De grillige praktijk spreekt een wetmatigheid van de gevonden schadelijke processen niet tegen, maar is een uiting van de mozaïekachtige variatie van het milieu onder het wateroppervlak en van het feit dat de verschillende vissoorten en ook de verschillende leeftijdsklassen niet altijd van dezelfde milieucomponenten gebruik maken. Ook het vermijdingsgedrag van vissen speelt een belangrijke rol. Er zijn veel voorbeelden bekend van forellen die zich gedurende een periodieke verzuring verzamelen op plekken met een betere waterkwaliteit. Zo iets is bijvoorbeeld mogelijk op de bodem of in uithoeken van meren waar zuur rivierwater doorheen stroomt zonder zich volledig met het water van het desbetreffende meer te mengen. In de zure Gjøv-rivier in Noorwegen werd zo'n plek gevonden: een minder zuur slootje dat een stuk landbouwgrond draineerde. Hier dromden honderden forellen bijeen in de tijd dat de sneeuw smolt. Toen men enkele van deze dieren in een leefnet wilde bewaren in de rivier waarin ze waren opgegroeid, stierven ze binnen een week.

De ecologische gevolgen van het verdwijnen van de vis en de prooidieren

In het bovenstaande is er min of meer van uitgegaan dat de sterfte onder de vis direct wordt veroorzaakt door de veranderde waterkwaliteit. In feite beïnvloedt de verzuring de hele levensgemeenschap. Dit betekent dat de voor zuur tolerante vissoorten net zo goed zouden kunnen uitsterven door de indirecte effecten van de gewijzigde waterkwaliteit, zoals het verdwijnen van hun voedsel. In bepaalde gevallen lijkt deze veronderstelling te worden bevestigd.

Verzuring bleek in de onderzochte meren samen te gaan met veranderingen in de voedselketens op elk niveau. De levensgemeenschappen van plantaardig en dierlijk plankton worden armer aan soorten, tot ten slotte slechts enkele soorten in het verzuurde water domineren (Raddum, 1980). In het water levende insekten en insektelarven verminderen bij gebrek aan vispredatie in aantal en in aantal soorten, terwijl hun gemiddelde lichaamsgrootte toeneemt (de sterkste en dikste concurreren de overige weg). Dit komt doordat vissen het eerst de dikste insekten pakken, zodat vispredatie kleine exemplaren bevoordeelt. Bij het ontbreken van vissen geeft een groot lichaamsgewicht de insekten evenwel juist bescherming tegen roof door andere insekten. Ook de dieren die op de meerbodems leven verminderen bij verzuring van het water in aantal en belangrijke groepen weekdieren en eendagsvliegen verdwijnen. De ongewervelde bodemdieren schij-

dinavië leven meer dan 20 soorten zoetwassermosselen. De meeste beginnen echter beneden pH 6 snel te verdwijnen en er zijn slechts vier soorten die een daling tot pH 5 kunnen verdragen (Økland, K. A., 1980).

De zoetwatervlo, *Asellus aquaticus*, hoofdvoedsel van kleine vissen, prefereert een zuurgraad boven pH 5,2 en komt slechts zelden voor in zuurder water tot pH 5 (Økland, J.; Økland, A. K., 1980).

Uit de gegeven voorbeelden blijkt duidelijk dat uit licht verzuurd water, dat in principe niet giftig is voor een groot aantal vissoorten, de belangrijkste prooidieren wel al verdwijnen. De verdwijning van deze prooidieren zou men moeten opvatten als het eerste ernstig te nemen signaal van verzuring. Wanneer men maatregelen wil nemen om wateren tegen verzuring te beschermen, moet men dat in dit stadium doen. Als men wacht tot het leven in een meer is afgestorven, is het veel moeilijker om een evenwichtige levensgemeenschap met een produktieve visstand terug te krijgen.

Ook vanuit economisch oogpunt is het het best om in dit stadium maatregelen te nemen. In Scandinavië is een goede visstand economisch belangrijk vanuit een oogpunt van toerisme. Het grootste deel van de duizenden meren is privé-bezit en is slechts interessant bij een goede visstand. Net als bij bomen en landbouwgewassen, heeft men tal van pogingen gedaan om vissen te selecteren op een grote tolerantie tegen verzuring en hoge aluminiumconcentraties. Incidenteel heeft men, naar verluidt, daarmee enig succes geboekt. Toch is het een volstrekt verwerpelijke maatregel. Uit het voorgaande bleek dat ook alle voedseldieren van de vis uit het water verdwijnen. Voor zover er nog dierlijk leven mogelijk is, heeft de fauna een lage reproductiesnelheid en een geringe biomassa. In verzuurd water is het daarom niet mogelijk om met vis die tegen zuur en aluminium is bestand een populatie van enige economische of ecologische betekenis op te bouwen.

8. KORSTMOSSEN

De gevoelige soorten zijn al verdwenen

Korstmossen zijn zeer gevoelig voor luchtverontreiniging. Al heel lang is bekend dat de gevoeligste soorten in ons land grotendeels zijn verdwenen. Een beperkt aantal soorten is nog bestand tegen de huidige vervuilingsniveaus en sommige soorten lijken bij gebrek aan concurrentie zelfs te 'veronkruiden'. De gebieden waar korstmossen grotendeels zijn verdwenen worden nu korstmoswoestijnen genoemd.

Het verdwijnen van de korstmossen had er een ernstige aanwijzing voor moeten zijn dat het huidige verontreinigingsniveau schadelijk is voor levende organismen. Er was eigenlijk geen reden om aan te nemen dat wat schadelijk is voor korstmossen onschadelijk zou zijn voor bomen. Kennelijk is deze waarschuwing niet goed begrepen. Korstmossen leken goede bioindicatoren voor de luchtverontreiniging. Men ging er zelfs toe over een biologisch meetnet van snuffelbomen te maken. Van een aantal bomen verspreid over het land werden de soorten en aantallen korstmossen periodiek beschreven. De soortenrijkdom zou een goede maatstaf zijn voor de zuiverheid van de lucht. Met behulp van dit biologisch meetnet zouden verspreiding en de toeneming van de luchtverontreiniging in kaart kunnen worden gebracht. Helaas blijken de bomen waarop korstmossen worden geïnventariseerd nu zelf af te sterven.

Het was waarschijnlijk verstandiger geweest het uitsterven van de korstmossen niet te zien als een aanleiding tot interessant vervolgonderzoek maar als een reden voor een krachtig optreden tegen de luchtvervuiling. Helaas hebben korstmossen, in tegenstelling tot bomen, geen direct herkenbare economische betekenis, zodat dit verschijnsel buiten wetenschappelijke kringen alleen als een op zichzelf staand feit werd gezien.

Een overweldigende soortenrijkdom

De korstmossen vormen een plantegroep met een overdadige rijkdom aan kleuren en vormen. Het zijn samenlevingsvormen van algen en schimmels. Beide levensvormen zijn zo innig met elkaar vergroeid dat we het geheel als een organisme kunnen beschouwen. Bij de meeste korstmossen liggen de algen in een laag, die aan beide kanten is bedekt met schimmelweefsel. De aanwezigheid van verontrei-

nigingen kan tot uiting komen in een verminderde fotosynthese of in een verminderde stikstofbinding (Van Dobben, 1980).

Er zijn twee oorzaken waardoor deze planten gevoelig zijn voor luchtverontreiniging en sneller reageren op de verandering van de kwaliteit van de regen dan andere planten. In de eerste plaats vormt het schimmelweefsel in tegenstelling tot hogere planten geen waterdichte buitenlaag. Omdat ze geen wortels hebben en niet op een ondergrond groeien waaruit ze het vochtverlies zouden kunnen aanvullen, zou het voor korstmossen geen zin hebben weerstand te bieden tegen uit-droging. Daarom is de buitenlaag een poreus weefsel. De planten drogen bij zonnig weer uit, raken in rusttoestand en worden weer actief als ze zich na bevochtiging opnieuw vol water kunnen zuigen. De poreuze structuur van de buitenlaag heeft helaas tot gevolg dat behalve vocht ook opgelost vuil en kleine deeltjes diep in de weefsels dringen. Met behulp van de elektronenmicroscopie heeft men kunnen waarnemen dat er in het oppervlak van de korstmossen talloze gaatjes zijn waarlangs deeltjes kunnen binnendringen. Deze deeltjes blijven steken in de minder dicht in elkaar gestrengelde schimmeldraden van de merglaag. In de tweede plaats hebben korstmossen geen wortels en betrekken en betrekken zij hun voedingselementen in tegenstelling tot in de grond wortelende planten voornamelijk uit de lucht en het regenwater. Lucht en regenwater waren tot de luchtverontreiniging nooit rijke voedingsbronnen. Daarom hebben de korstmossen het vermogen ontwikkeld stoffen uit hun omgeving snel te accumuleren door middel van een actieve opname van positief geladen ionen en de daaropvolgende passieve adsorptie van negatief geladen ionen en deeltjes. Korstmossen hebben, door de aanwezigheid van metaalbindende zones zowel op de wier- als op de schimmelcomponent, ook een grote opnamecapaciteit voor metaalionen.

Door al deze mechanismen ligt het gehalte aan zwavel en diverse metalen bij korstmossen uit stedelijke en industriegebieden hoger dan bij in landelijke gebieden groeiende exemplaren. Dat gehalte is meetbaar. Bij op graniet groeiende korstmossen uit schone gebieden is de verhouding tussen de ijzer- en de titaniumconcentratie vrij constant door het feit dat ijzer- en titaniumoxiden samen plegen uit te kristalliseren bij de gesteentevorming. Wanneer een korstmos elementen uit het onderliggende gesteente opneemt, zal de verhouding tussen beide elementen dan ook niet veel veranderen. In de buurt van industriële bedrijven die een van deze elementen uitstoten, verandert echter de concentratieverhouding en daarom kan deze verhouding als maatstaf voor de vervuiling worden gebruikt.

De waarde van korstmossen voor de bepaling van de neerslag van

luchtverontreinigende stoffen is gebleken uit vergelijking van hun gehalte aan elementen met dat wat door meetapparatuur in de vrije lucht wordt opgevangen. Wanneer het niveau van de luchtverontreiniging stijgt, kan het echter 15 maanden duren voor een nieuw evenwicht is bereikt. Aanmerkelijk verhoogde niveaus vergen evenwel minder dan de helft van die tijd. Korstmossen geven dalende verontreinigingsniveaus, door hun gebrek aan actieve uitscheidingsmechanismen, lang zo snel niet weer. De gemiddelde verblijftijd van elementen is ongeveer 4 jaar.

De gevoeligheid van korstmossen is al lang bekend

Het is al heel lang bekend dat korstmossen slecht gedijen bij luchtvervuiling. Toen Nylander in 1866 een studie maakte van op bomen groeiende korstmossen in Parijs, merkte hij op dat veel soorten die buiten de stad algemeen voorkwamen in het stadscentrum ontbraken. Hij schreef dit verschijnsel toe aan luchtverontreiniging.

In Noorwegen werd in het begin van deze eeuw onderzoek gedaan naar het voorkomen van korstmossen in industriële omgevingen. In 1930 werden twintig soorten korstmossen in Oslo en omgeving in kaart gebracht. Dergelijke karteringen zijn sindsdien voor een groot aantal steden uitgevoerd. Bij al deze studies werd duidelijk dat de rijkdom aan korstmossen in de richting van het stedelijk centrum verminderde.

Door het korstmossenonderzoek was al een beeld van de enorme verspreiding van luchtverontreiniging gekregen voordat de uitgebreide meetnetten voor de luchtkwaliteit waren opgezet. In Nederland is omstreeks 1950 door Barkman een grootscheeps onderzoek verricht naar het voorkomen van korstmossen. Aan de hand van zijn gegevens is een globale kaart van de vindplaatsen van korstmossen gemaakt. Daardoor werd duidelijk dat bepaalde gevoelige korstmossen in grote delen van ons land niet meer voorkwamen. Dit zijn de reeds genoemde korstmoswoestijnen.

In 1970 startte de Werkgroep Herkartering Epifytenwoestijnen een systematisch onderzoek met als voornaamste doelstelling de bestudering van het verband tussen op bomen groeiende korstmossen en luchtverontreiniging. Hierbij werd Nederland verdeeld in hokken van vijf bij vijf kilometer en in elk hok werd de korstmossenrijkdom op een aantal vrijstaande bomen onderzocht. Het onderzoek vond plaats op acht boomsoorten en op 15000 bomen in totaal.

Uit het onderzoek bleek dat globaal genomen het noorden van het land rijk en het zuiden arm is aan korstmossen. De schaarste aan korstmossen in het zuiden zou worden veroorzaakt door de nabijheid

van het Ruhrgebied, de industriegebieden om Antwerpen en in de Belgische Kempen en de industrieën in Zuid-Limburg. Verder waren korstmos-arme gebieden rondom Amsterdam en Rotterdam te herkennen.

Het meest kenmerkende verschil tussen de schors van de verschillende boomsoorten is, zeker in het kader van de zure regen, hun van nature zure of niet-zure karakter. De verdwenen korstmossen blijken als groep geen duidelijke voorkeur voor een bepaald milieu te hebben gehad, maar de afzonderlijke soorten waren wel tot een bepaald milieu beperkt. Dit kon óf een zure, óf een neutrale schors zijn. De weinig kieskeurige soorten van vroeger blijken nu voorkeur voor een neutrale schors te hebben. Hierdoor is duidelijk dat de specialisten onder de korstmossen zijn verdwenen en dat andere soorten beperkt zijn tot niet-zure milieus. Er is echter één soort, met de moeilijke naam *Lecanora conizaeoides*, die vroeger zeldzaam was en nu overal voorkomt. Uit het onderzoek bleek verder dat de verzuring van de schors een belangrijke factor is bij het verdwijnen van de korstmossen. Het onderzoek aan korstmossen in Nederland richt zich nu onder andere op het achterhalen van het werkingsmechanisme van de zwaveldioxide. Hiervoor wordt momenteel nagegaan in hoeverre de groeisnelheid van de soort *Parmelia sulcata* in het veld door zwaveldioxide wordt beïnvloed. Dank zij het landelijk meetnet zijn de concentraties en de deposities van SO₂ en andere belangrijke verontreinigingen nu goed bekend. Het is thans dus zover dat de korstmossen niet meer worden gebruikt voor de kartering van de luchtverontreiniging, maar, omgekeerd, dat de kartering van de nationale meetnetten wordt gebruikt voor het korstmosonderzoek.

9. PADDESTOELLEN

Als de wortelschimmels sterven, verdwijnt het bos

De meeste mensen herkennen schimmels slechts aan hun vruchtlichamen, de paddestoelen. Bijna het hele leven van schimmels speelt zich in het verborgene af. Ze trekken draderige netwerken in dood hout, in het strooisel en in de bodem, en alleen wanneer ze hun prachtige paddestoelen vormen, zijn ze zichtbaar voor de gewone voorbijganger. Schimmels zijn een heel belangrijke plantegroep, waarzonder de meeste ecosystemen niet kunnen functioneren. Hoewel niemand kan vertellen hoeveel soorten er zijn, is het bekend dat er in Nederland meer soorten paddestoelen dan bloemen voorkomen. Schimmels kunnen soms net als bomen een eerbiedwaardige leeftijd krijgen. Uit de jaarlijkse groeisnelheid en de doorsnee van heksenkringen heeft men voor enkele soorten een leeftijd van meer dan 500 jaar berekend (Arnolds, 1984-1).

In tegenstelling tot bijna alle landbouwgewassen leven bomen in symbiose met een groot aantal schimmels, vaak met een aantal soorten tegelijk. De schimmels vormen kapjes rondom wortelpunten en nemen de functie van wortels over, en de wortels laten in dat geval ook na zelf haarworteltjes te vormen. In ruil daarvoor krijgen de schimmels suikers en soms vitaminen en hormonen van de boom. Op heel vruchtbare gronden kunnen bomen het weliswaar zonder de samenleving met schimmels stellen, maar op een schrale bodem halen ze alleen een goede produktie dank zij deze schimmelwortels of mycorrhiza. De schimmelkapjes kunnen namelijk uiterst fijne schimmeldraden vormen. Deze zijn tientallen malen dunner dan de kleinste wortels en kunnen zich om elke zandkorrel winden. In arme zandgronden kan het droge zand in klonten aan elkaar hangen, gebonden door miljoenen minuscule draadjes. Met behulp van schimmelwortels kan de boom dus veel efficiënter water en mineralen opnemen dan met zijn eigen wortels. Omdat 90% van ons bosareaal op arme en veelal zure zandgronden groeit, zijn de symbiotische schimmels onmisbaar voor de bosbouw.

Een groot aantal dennesoorten, zoals de grove den, de belangrijkste boom in het Nederlandse produktiebos, maar ook de fijnspar, beuk en eik hebben mycorrhiza. Als partners dienen vele grote paddestoelen van het bos, bijvoorbeeld amanieten, russula's, melkzwammen, gordijnzwammen en boleten. Een boom herbergt meestal verscheidene schimmelpartners, soms wel zeven. Ook de schimmels kunnen veel-

al met meer dan één soort gastheerbomen samenleven. Zelden is een paddestoel gebonden aan een geslacht van bomen, zoals een bepaalde boleet en de melkzwam aan larksoorten.

Onder natuurlijke omstandigheden hangt zowel het overleven van strikt symbiotische schimmels als het overleven van bepaalde boomsoorten af van het ongestoord functioneren van de symbiose. Deze schimmels zijn namelijk zelf slecht in staat om dood hout of strooisel te verteren. Als de gastheerbomen door kap verdwijnen kunnen de schimmels vaak nog jaren, soms tientallen jaren, in de humus overleven, maar ze vormen dan geen vruchtlichamen meer. De paddestoelen verschijnen weer, als de schimmels contact hebben met nieuwe bomen. Omdat de symbiotische schimmels pas hun vruchtlichamen kunnen vormen als ook de boom zijn voorraad reservestoffen heeft aangelegd, vinden we de paddestoelen van deze schimmels vrijwel uitsluitend in de nazomer en de herfst.

Een voor de bosbouw nog onopgelost probleem is welke schimmel in combinatie met welke boomsoort en welke bodem de hoogste productie en de beste bescherming tegen infectie van de wortels geeft.

Naast de verplicht symbiotische schimmels zoals de truffel, zijn er facultatief symbiotische schimmels, bijvoorbeeld de fluweelboleet en de aardappelbovist; deze laatste beschikken ook over de vaardigheid strooisel te verteren. De reeks van de verplicht symbiotische naar de facultatief mycorrhiza vormende schimmels zet zich voort met schimmels die voornamelijk saprofytisch (van dode organische stof levend) zijn, maar bij uitzondering schimmelwortels kunnen vormen, bijvoorbeeld de grote stinkzwam en de scherpe collybia. Ook zijn er overgangen naar een parasitaire levenswijze. Bij zieke en verzwakte bomen (wat het geval is bij bossterfte) kunnen deze schimmels via het aangetaste wortelstelsel de boom infecteren.

Wanneer de echte mycorrhizaschimmels ontbreken, kunnen andere schimmels de onbeschermden wortelpunt binnendringen. Na het binnendringen van een kwaadaardige schimmel verweert de boom zich echter met chemische afweerstoffen. Daardoor wordt de vorming van wortelharen onderdrukt, omdat die de gemakkelijkste ingang zijn voor schimmels. Die afweermechanismen verhinderen helaas een normaal functioneren van de wortel. De verziekte wortel noemt men nu een pseudo-mycorrhiza. De verhouding tussen de hoeveelheid echte en pseudo-schimmelwortels is afhankelijk van de eigenschappen van de grond en de levensgemeenschap in de bodem.

Zowel uit Nederlands als uit Duits onderzoek blijkt dat de hoeveelheid symbiotische schimmels in verhouding tot de parasitaire schimmels afneemt naarmate de bodem zuurder wordt. Het aantal pseudo-mycorrhiza, ofwel mislukte wortels ten gevolge van een infectie met een

verkeerde soort, is in zure gronden heel hoog. Omdat in zure grond ook het aantal wortelpunten groot is (wegens de bodemarmoede moet de boom de mineralen overal vandaan proberen te halen), betekent dit dat een boom op zure gronden een aanzienlijk deel van zijn energie moet steken in de opbouw en het onderhoud van het wortelstelsel. Dit is des te meer het geval als de boom enkele malen per jaar wegens de zogenaamde zure schokken in de bodem een deel van het wortelstelsel moet vernieuwen. Metingen van de Universiteit van Göttingen hebben uitgewezen dat de hoeveelheid jaarlijks te vernieuwen wortels meer weegt dan 50% van de jaarlijkse loofproductie. Behalve aan de vernieuwing van zijn wortelstelsel moet de boom energie spenderen aan voeding voor de symbiotische schimmels. Het blijkt dat in verzuurde bodems de wortelschimmels slechter in staat zijn de suikerstroom van hun gastheerboom te stimuleren dan in niet verzuurde grond (Meyer, 1984).

Het ei van Columbus

Bomen en hun wortelschimmels zijn eigenlijk een twee-eenheid, net als de schimmels en algen van korstmossen. Pas samen zijn ze op ongunstiger bodemtypen een goed functionerend organisme. Hoewel dit al heel lang bekend is, is daaruit in de bosbouw nooit enige consequentie getrokken. Produktiebomen zijn geselecteerd en veredeld alsof er geen symbiotische schimmels bestonden. Alhoewel, als men de talloze perspublicaties mag geloven, heeft men in Wageningen opnieuw het ei van Columbus uitgevonden. Op de Landbouwhogeschool kwam men tot de conclusie dat schimmels de bomen op verzuurde grond zouden kunnen helpen.

Vol vuur verdedigde in 1983 de Wageningse hoogleraar in de bosbouw, prof. Oldeman, de ontdekking van een van zijn medewerkers ir. Smits dat het enten met geselecteerde schimmels de bomen beter bestand zou kunnen maken tegen moeilijke bodemomstandigheden. Smits, die proeven deed met merantistekken, die zonder hun symbiotische schimmel nauwelijks willen groeien, was in de omvangrijke literatuur over dit onderwerp gedoken. In Amerika bleek men wortels van dennen welke op steriele mijnafvalhopen worden geplant, eerst te enten met de schimmel *Pisolythus aarhyzus*. Ook enkele mijnafvalhopen in Zuid-Limburg zijn beplant met berken geënt met verfstuifzwam. De mijnafvalhopen zijn vaak zuur en bevatten ook een aantal zware metalen. De vergelijking met de verzuurde bodems ligt voor de hand. 'Je moet even op het idee komen, de gedachtensprong aandurven,' aldus Smits' hoogleraar.

Oldeman wijst erop dat in de bossen aangetaste bomen naast gezon-

de bomen staan. Hij schrijft dit onder meer toe aan de omstandigheid of een boom al dan niet een wortelschimmel heeft die is aangepast aan de verzuurde omstandigheden in de bossen. Luchtverontreiniging en stress-situaties zoals bodemverzuring zouden op een boom die met de juiste schimmelsoort samenleeft, veel minder greep hebben dan op bomen met onaangepaste wortelschimmels. 'We hebben het allemaal nog niet in de vingers,' zei prof. Oldeman, 'maar ons onderzoek is er nu op gericht meer robuuste schimmels te vinden, die de bomen kunnen redden, totdat het milieu weer schoon is.' Daarbij duidde Oldeman niet op het bestaande bos, maar uitsluitend op nog aan te planten bomen.

De reddingsactie zou moeten bestaan uit het enten van een gekweekte superschimmel op de plantkluitjes van jonge bomen. Jaarlijks wordt een tachtigste deel van het bos gekapt en opnieuw ingeplant. Dus de verspreiding van de schimmel zou 'snel' verlopen (Binnenhof, februari 1984).

Scepsis

Het buitensporig enthousiasme van de pers had een verbijsterende uitwerking op de Nederlandse opinie. Zelfs in bosbouwvakkringen werd korte tijd de mening gehoord dat de bossterfte kon worden gestopt. Dit nu was door de Wageningers, die hun schimmel propageerden als slechts een steun voor nog aan te planten bomen, nooit verkondigd, maar de schimmel leek enige tijd elk politiek debat over luchtvervuiling te overwoekeren. Toch was er ook scepsis, vooral onder ecologen. Professor Barkman, die al meer dan 20 jaar onderzoek doet naar paddestoelen in onze dennenbossen, is op dit terrein de deskundige bij uitstek in Nederland en hecht weinig geloof aan de 'wonderoplossing' tegen zure regen van zijn Wageningse collega. Barkman heeft sterke twijfels over het functioneren van bijvoorbeeld de verfstuifzwam in normale bossen. 'De omstandigheden op de mijnafvalheuvelds in Limburg zijn zo specifiek dat het heel goed denkbaar is dat Smits' oplossing helemaal niet werkt onder normale Nederlandse milieuomstandigheden.' Want in de eerste plaats, zijn de afvalheuvelds opgebouwd uit erg los materiaal, waardoor het regenwater gemakkelijk wegzakt. De zwam gedijt onder die droge omstandigheden bijzonder goed. In de tweede plaats heeft de zwam er geen enkele concurrentie van andere soorten, maar zo'n concurrentie zou hem onder in het bos waarschijnlijk fataal kunnen worden, zo gelooft Barkman. De oplossing zou daarom alleen werken in kassen, dus onder kunstmatige omstandigheden. Om het bomenbestand in de Nederlandse bossen te handhaven worden echter honderden hecta-

ren grond beplant. Als dat allemaal in kassen zou moeten gebeuren, wordt het onbetaalbaar, is zijn ironisch verwoorde overtuiging (NvhN, februari 1984).

Overigens vindt de overtuiging van Barkman een parallel in andere ecologische experimenten. Het is bijvoorbeeld bekend dat het zelden lukt cultuurgewassen in natuurterreinen te laten gedijen, al stort je tonnen zaad. Slechts sporadisch blijkt ook het bosmilieu geschikt voor uitheemse soorten. De meeste uitheemse boomsoorten zouden zich zonder het plantschopje van de bosbouwer slecht vermenigvuldigen en als ze het wel doen, loopt het uit de hand en gaan ze juist hinderlijk woekeren. Het beheer van het Nederlandse productiebos maakt dit milieu heel geschikt voor bijvoorbeeld de Amerikaanse vogelkers, die hier daarom bospest wordt genoemd.

Eveneens het uitzaaien van superproductieve klavers in biologisch beheerde weilanden, ook een Wageningen experiment, bleek niet te lukken, omdat de klavers die er al groeiden veel beter aangepast waren aan de specifieke concurrentiefactoren van deze levensgemeenschap dan de door Wageningen geïntroduceerde soorten.

Wanneer men dus bomen met een geënte schimmel plant in niet-steriele bosgrond, kan men verwachten dat de zwam hoogstwaarschijnlijk niet kan concurreren met de andere soorten, die volledig zijn aangepast aan de levensgemeenschap van de bosbodem. De 'super-schimmel' zou gewoon zelf kunnen verschimmelen of beperkt blijven tot het bolwerkje van de enkele worteltjes waarop hij is geënt. Het is immers zo dat elke nieuwe wortelpunt contact zoekt met een bodem-schimmel. Ook de reeds in de bodem aanwezige schimmels kunnen elkaar bij dit proces niet uitsluiten, zodat er verscheidene soorten tegelijk aan dezelfde boom verbonden kunnen zijn. Er is geen enkele reden om te verwachten dat een nieuweling in elk willekeurig bodemtype deze concurrentieslag zou kunnen winnen.

Het is bovendien gebleken dat de wortelschimmels die in boomkwekerijen groeien, anders zijn dan die in de bossen waar de bomen zijn uitgeplant (Meyer, 1983). Kennelijk kunnen ook de symbiotische schimmels uit de kwekerij het na overplanting in de bosgrond niet bolwerken.

Een volgende handicap van Smits' 'oplossing' is dat de schimmel alleen zou kunnen worden geënt op bomen die nog geplant moeten worden. Onderwijl gaat het bestaande bos dood. Bovendien blijken de wortelschimmels voor de door luchtverontreiniging verzwakte bomen niet meer erg heilzaam te zijn, want ze dringen via de zieke wortels de boom binnen. Zo worden ze in plaats van heilzaam ziekte-verwekkend.

De mening van Barkman wordt door zijn collega Oldeman niet be-

twist. De superschimmel is echter bedoeld voor bodems waar andere schimmels niet overleven. Daar is dus van concurrentie geen sprake. 'In Amerika,' zo zei Oldeman toen ik hem daarnaar vroeg, 'wordt deze methode veel toegepast, hoewel niet op door luchtvervuiling verzuurde bodems, en daar blijkt ze nooit te mislukken. Men zit er daar gewoon op te wachten tot ze ergens zal mislukken. Dat wijst erop dat het kan.'

Bossen onder plastic

Overigens wilde de hoogleraar de eenzijdig optimistische kijk van de pers op de methode graag nuanceren: 'Het middel moet niet een alibi zijn om op andere gebieden niets aan de zure regen te doen. De geselecteerde schimmel is slechts een middel om ervoor te zorgen dat er buiten bossen kunnen blijven bestaan. Aan de andere kant', en dat heeft Oldeman in verschillende verbanden uitdrukkelijk naar voren gebracht, 'moet ervoor gezorgd worden dat er geen soorten uitsterven.' Hij denkt zelf aan (en hoopt daarbij niet voor fantast te worden versleten) het onder glas of plastic beschermen van grote stukken bos, net zoals tegenwoordig hele tennisstadions onder plastic koe-pels worden gezet. 'Onder een opblaasbaar plastic dak zou je de lucht en het water kunnen reinigen, zodat je in elk geval vluchtplaatsen houdt waar normale soorten kunnen overleven. Een probleem is dat dit niet kan zonder het microklimaat te beïnvloeden. In gesprekken met deskundigen van het Rijksinstituut voor Natuurbeheer hierover zag men meer in een poging om soorten te behouden in stukken van Europa die meer boven de (zure) wind liggen, maar dan zit men,' zei hij, 'met het probleem dat we de soorten uit Frankrijk en dergelijke als exoten (hier niet thuishorend) beschouwen. We hebben hier nu boomen en andere organismen die geheel zijn aangepast aan het Nederlandse klimaat, die moet je niet kwijtraken. Geen enkele component van het bosesysteem zou verloren mogen gaan. Natuurlijk zouden in alle bossen de bodems zo moeten worden verbeterd dat ook daarin de normale schimmels kunnen overleven, maar als ik kijk wat daar technisch voor nodig is, dan zie ik dat niet gebeuren voor er enige tientallen jaren voorbij zijn en ondertussen zal het nog wel erger worden voordat het beter wordt.'

Het is duidelijk dat Oldeman zeer bezorgd is over het voortbestaan van de bossen en dat twee dingen voor het behoud van de biosfeer noodzakelijk zijn. Ten eerste is er de noodzaak dat het buiten groen blijft. Het bos moet zijn functies kunnen behouden. Een erosiegevoelig land als Zwitserland kan bijvoorbeeld geen vijftig jaar zonder bossen. In de tweede plaats zou geen selectie moeten plaatsvinden in die

zin dat we slechts enkele soorten of zelfs geteelde variëteiten uitkiezen om te mogen blijven bestaan. Op die manier kunnen we op langere termijn onze biosfeer zeker niet behouden. Daarom zou alles in het werk moeten worden gesteld om de genetische erosie te stoppen en het volledige erfelijke potentieel voor de toekomst te behouden. Daarin zijn alle schimmels, niet alleen de wonderschimmel, even belangrijk als alle bomen.

Cantharel

Ondertussen is uit Nederlands onderzoek gebleken dat de mycorrhizazwammen onrustbarend afnemen. Volgens dr. Arnolds, voorzitter van de Werkgroep Paddestoelenkartering Nederland, kan dit ernstige consequenties hebben voor de houtproductie en op den duur zelfs voor het voortbestaan van onze bossen. Uit de gegevens van het Nederlandse onderzoek blijkt dat de strooisel- en houtafbrekende zwammen in onze bossen als geheel geen achteruitgang vertonen en ten dele zelfs toenemen. De symbiotische wortelschimmels nemen echter in de verzurende bosbodems snel af in aantal en verscheidenheid.

Van de micorrhizafungi vertonen 55 soorten een duidelijke vermindering, terwijl geen enkele soort een toeneming te zien geeft. Het sterkst zijn die zwammen afgenomen die specifiek samenleven met naaldbomen. Daaronder zijn de fijnschubbe boleet, de slijmige gordijnzwam, de gele ringboleet, de gele ridderzwam en de pagemantel. Van de soorten die overwegend samenleven met loofbomen zijn dat onder meer de lila, de rimpelige en de vermiljoen gordijnzwam, de witte duifridderzwam, de rosse boleet en een aantal stekelzwammen. Al deze soorten komen normaal voor op droge, zure en arme zandgronden (Arnolds, 1984-2).

Ook enkele soorten zwammen van loofbossen op neutrale en kalkhoudende grond in het oosten en zuiden van ons land zijn sterk achteruitgegaan. Dat zijn bijvoorbeeld de ivoorzwam en de kleine trompetzwam. Deze groep is echter altijd schaars geweest.

Merkwaardig is dat de houtpaddestoelen een duidelijke vooruitgang vertonen. Deze toeneming is het grootst bij schimmels die parasitair op levende, zij het verzwakte, bomen groeien. Kennelijk zijn de schimmels minder gevoelig voor de luchtverontreiniging dan hun verzwakte slachtoffers. Het opvallendst is de uitbreiding van de echte tonderzwam, de berkezwam en de groene schelpzwam. Bij de zwammen die op dood hout groeien bleek weliswaar een flink aantal soorten te zijn toegenomen, maar er was ook een heel grote groep juist in aantal afgenomen.

Het ligt al te zeer voor de hand de zure regen als directe schuldige aan te wijzen. Ten gevolge van hun beschadiging kunnen de bomen kennelijk de nuttige, symbiotische zwammen niet meer voeden en worden zij een gemakkelijke voedingsbodem voor parasitaire schimmels. Naarmate er meer dood hout in de bossen komt, neemt vanzelfsprekend ook het aantal soorten schimmels dat op dood hout leeft toe. Waarschijnlijk speelt hierbij de bodemverzuring een rol. Van veel soorten is namelijk niet alleen het aantal vindplaatsen in ons land afgenomen, maar is het ook zeer duidelijk dat ze zich, zoals de lila gordijnzwam, handhaven op de kalkhoudende bodems van de duinen en zich vestigen op de kalkrijke gronden in de jonge IJsselmeerpolders. Een andere tendens is de sterkere achteruitgang in het zuiden en midden van ons land vergeleken met Drenthe en Friesland.

Een smakelijke soort, die bijna iedere Nederlander uit de schoolboekjes kent, is het eekhoorntjesbrood. Ook deze soort blijkt helaas meer en meer uit de eikenbossen te verdwijnen (Ijpelaar, 1984). Deze symbiotische soort blijkt wel stand te kunnen houden in hetzelfde vegetatietype in de oude duinen en strandwallen tussen Den Haag en Schoorl en in de kalkarme duinen ten noorden van Bergen aan Zee. Vermoedelijk speelt weer het toch hogere kalkgehalte en de hogere zuurgraad van de duinbodem hierin een rol.

Een andere eetbare paddestoel waarvan al vele jaren bekend is dat hij door de zure regen verdwijnt, is de cantharel of hanekam.

De cantharel groeit het best op zure humusarme zandgrond en leeft veelal in symbiose met bomen. Van de plekken waar de meeste cantharellen voorkomen is de pH niet lager dan 4,2. Op plaatsen waar de zuurgraad lager wordt, verdwijnen deze paddestoelen. Vanaf 1976 brengt het Rijksinstituut voor Natuurbeheer het aantal groeiplaatsen van de cantharel in kaart. Uit dit onderzoek blijkt dat er bij deze paddestoel inderdaad sprake is van een achteruitgang, zowel van het aantal groeiplaatsen als van het aantal vruchtlichamen per groeiplaats (Jansen, 1984). Het aantal meldingen was in 1979 aanzienlijk hoger dan in 1982 en 1983.

Er blijkt een sterke correlatie te zijn tussen het ruimtelijk patroon van de achteruitgang van de cantharel en de hoeveelheden zwavel- en stikstofoxiden. Ook de begeleidende vegetatie veranderde in slechts twee jaar zeer snel op de plekken waar de cantharel achteruitging. Dit kan nauwelijks het gevolg zijn geweest van natuurlijke successie. Het verdwijnen van de paddestoel zou daarom kunnen samenhangen met verzuring van de bodem. Op de beste groeiplaatsen van de cantharel ligt de pH nooit lager dan 4,2. Ook de toevoer van stikstof zou een rol kunnen spelen. In deze beide opzichten zou dus een parallel kunnen worden getrokken met de vergassing van de heide.

10. VOLKSGEZONDHEID

Een op de tien Nederlanders

Tien procent van de Nederlandse bevolking blijft klachten over de ademhaling te hebben. De klachten worden veroorzaakt door chronische bronchitis, blokkering van de longventilatie of het grote aantal symptomen dat onder de namen astma en cara bekend staat. Luchtverontreinigingsnormen zijn in Nederland gebaseerd op de bescherming van de volksgezondheid, maar niet iedereen is ervan overtuigd dat door deze normen de tien procent van de bevolking die de risicogroep vormt afdoende wordt beschermd.

Het is moeilijk om voor risicogroepen experimenteel normen vast te stellen. Voor gevaarlijke experimenten kunnen nu eenmaal geen mensen die al ziek zijn worden gebruikt.

Door recent onderzoek worden steeds meer bewijzen aangedragen dat plaatselijke verschillen in luchtverontreiniging meetbare gevolgen hebben wat het optreden van longaandoeningen betreft.

Internationaal wordt de invloed op de ademhaling van zwavel- en stikstofoxiden en metalen gerekend tot de problematiek van de zure regen. Op alle nationale en internationale bijeenkomsten over dit onderwerp worden de gezondheidsaspecten expliciet belicht. Niet echter door professor Biersteker, hoogleraar in de sociale geneeskunde aan de Landbouwhogeschool Wageningen. Desgevraagd stelde Biersteker dat de zure regen alleen betrekking heeft op de depositie van luchtvervuiling op de bodem of op de planten. Het is zijns inziens niet terecht de gevolgen van inademing van luchtverontreiniging onder te brengen onder de noemer 'zure regen'.

Het reinigingsmechanisme van de longen

Onder normale omstandigheden vormen longen een uiterst efficiënt systeem voor de uitwisseling van zuurstof en koolzuur. De ingeademde lucht wordt in neus en mond verwarmd en vochtig gemaakt. De luchtpijp vertakt zich via de bronchiën in steeds kleinere buisjes, die ten slotte uitmonden in de longblaasjes. Dank zij dit complexe vertakkingssysteem bevinden 95% van het longvolume en bijna het hele longoppervlak zich in de longblaasjes. De bronchiën, met een doorsnee van slechts 5 à 10 millimeter, eindigen na talloze vertakkingen in vele miljoenen alveolaire buisjes met een doorsnee van 0,5 à 0,2 millimeter.

Lucht wordt uitgeblazen door het samentrekken van het middenrif of de spieren in de borstkas. Het uitzetten van de longen gebeurt daarna automatisch. Het slijm in de longblaasjes heeft een heel bijzondere chemische samenstelling, waardoor de blaasjes net als zeepbellen bol willen staan. Het verlies van de oppervlaktespanning van de longvloeistof is een ernstige ziekte. De longen klappen dan dicht en gaan niet weer open. Ook verlies van elasticiteit van het longweefsel, zoals het geval is bij een zogenaamde stoflong, bemoeilijkt de ademhaling. De longen beschikken daarom over een aantal reinigingsmechanismen voor het verwijderen van stof en vuil. In de mond, maar vooral in de neus, wordt door de natte slijmvliezen een deel van het stof verwijderd. Het overige atmosferische vuil bereikt luchtpijp, bronchiën en kleinere vertakkingen.

De luchtwegen zijn tot de achttiende vertakking bedekt met trilharen, die als een levende transportband voor stofdeeltjes fungeren. De trilharen worden door klieren bedekt met een kleverige slijmlaag waarin de stofdeeltjes blijven plakken. De slijmlaag wordt met een snelheid variërend van circa 1 mm per minuut in de bronchiolen tot meer dan 1 centimeter per minuut in de luchtpijp naar boven getransporteerd. Wanneer het slijm bij de slokdarm komt, wordt het vanzelf doorgeslikt en ten slotte verlaat het vuil het lichaam met de faeces. In de longblaasjes zijn geen trilharen. Daar worden onoplosbare deeltjes, mits er niet te veel zijn, opgenomen door witte bloedlichaampjes, de zogenaamde macrofagen. Deze kunnen de onoplosbare deeltjes óf naar de lymfklieren brengen, óf naar het begin van de transportband met trilharen.

Oplosbare stoffen dringen als gas, maar vaker nog als zwevende deeltjes – de zogenaamde aërosol – de longen binnen. Het verwijderen van oplosbare stoffen kan niet met de zojuist genoemde reinigingsmechanismen gebeuren. Na oplossing kunnen deze stoffen direct in het bloed worden opgenomen. Uit experimenten met honden is gebleken dat ingeademd zwavelzuur in de bronchiën binnen enkele minuten is opgenomen. Ook stikstofoxiden, zwevende deeltjes ammoniumsulfaat en bepaalde metalen zijn in de longen goed oplosbaar. Bij een normale, rustige ademhaling wordt zwaveldioxide zeer snel door de natte oppervlakken in mond, neus en luchtwegen opgenomen. Experimenten en computermodellen tonen aan dat bij een normaal vervuilingsniveau minder dan 1% van de zwaveldioxide voorbij de luchtpijp komt. Deze hoeveelheid stijgt, indien door de mond wordt geademd en in geval van een sterker ademhaling bij zwaar werk, sport of trimmen.

Ook de afzetting van vuildeeltjes in de longen neemt toe bij sterkere ademhaling. Stofdeeltjes van tien micrometer of groter worden voor

90% gevangen in neus, mond en het bovenste deel van de luchtpijp. Dit proces is minder efficiënt voor kleinere deeltjes. Deze dringen diep in de luchtpijp, de bronchiën en de verdere vertakkingen door. Daar worden deeltjes tussen 5 en 2 micrometer voor 50-90% weggevangen. Deeltjes kleiner dan 1 micron bereiken ongehinderd de longblaasjes en slaan daar voor circa 30% neer. (De rest wordt weer uitgeademd).

Sommige deeltjes, bijvoorbeeld ammoniumsulfaat en zwavelzuur, trekken in vochtige lucht gemakkelijk water aan. Minuscule druppeltjes ammoniumsulfaat en zwavelzuur groeien derhalve in de luchtwegen snel aan. De doorsnee van de druppeltjes kan in een fractie van een seconde verviervoudigen. Door dit proces worden vocht aantrekkende deeltjes vlugger in de luchtwegen afgezet dan onoplosbare deeltjes.

Zwavelzuur verbindt zich in mond en luchtwegen bijna onmiddellijk met de ammonia die door het lichaam wordt uitgewasemd. Het is waarschijnlijk dat onder normale omstandigheden het zwavelzuur de uitademing van ammoniak verhindert, doordat het zich voor een groot deel met de ammoniakdampen verbindt tot ammoniumsulfaat, alvorens het in de longen wordt afgezet.

Bronchitis en andere longaandoeningen

Bronchitis is een term die op een groot aantal aandoeningen van de bronchiën (en andere luchtkanalen) van toepassing is. Voor de duidelijkheid moeten de symptomen in twee hoofdcategorieën worden onderscheiden: in de eerste plaats onherstelbare verstopping, gekenmerkt door verlies aan longfunctie, wat kan leiden tot het te kort schieten van de ademhaling met de dood als gevolg; in de tweede plaats een overmatige slijmafscheiding, gekenmerkt door chronische hoest en een ongewone sputumproductie. De hoge slijmafscheiding kan soms samengaan met de eerste categorie symptomen, maar is op zichzelf niet onherstelbaar en is in de meeste gevallen wel hinderlijk maar niet ernstig. Het is aangetoond dat overmatige slijmafscheiding herhaalde infecties van de luchtwegen bevordert. Belemmering van de ademwegen door een overvloed aan slijm zou vrijwel uitsluitend worden veroorzaakt door een overmatige afscheiding en niet door een gebrekkig functioneren van de transportband van trilharen. De belangrijkste oorzaak van acute verstopping, zo heeft sectie uitgewezen, wordt gevormd door ontstekingen van de bronchiolen, die leiden tot vernauwing van de luchtwegen of tot verlies van elasticiteit. Een bepaalde graad van verlies van de rek uit de longen (emfyseem) of van degeneratie van longblaasjes kan eveneens tot een toene-

mende kortademigheid leiden. Deze processen zijn uiteraard onomkeerbaar.

Een tijdelijke samentrekking van de spierwanden van de luchtwegen kan ontstaan door tal van oorzaken, variërend van hooikoorts tot luchtverontreiniging. De zenuwuiteinden in de slijmvliezen beschermen de longen tegen overmatig vuil en verstoppingen. Ze reageren direct bij bijvoorbeeld verslikken of het inademen van irriterende stoffen. Hierdoor wordt men tot hoesten aangezet of er ontstaat een activering van het slijmvlies.

Overmatige prikkeling van de zenuwen kan echter leiden tot schadelijke vernauwing van de bronchiën. De bronchiën zijn slechts dunne buisjes en een tijdelijke vernauwing daarvan geeft een grote verhoging van de ademweerstand en daardoor ademhalingsmoeilijkheden (KEMA, 1981).

De in Duitsland gesignaleerde toeneming van pseudo-kroep bij zuigelingen betreft zo'n tijdelijke vernauwing van de bronchiën. In deze gevallen schijnt de vernauwing vaak samen te gaan met chronische infecties van de bronchiën. Het feit dat deze lichte infecties voor de ouders niet of moeilijk herkenbaar zijn, zou de oorzaak zijn van het onverwachte karakter van de pseudo-kroep. Recent statistisch onderzoek zou een hoge correlatie tussen pieken in de luchtvervuiling en pieken in het voorkomen van pseudo-kroep hebben aangetoond. In ernstige gevallen kan de zuigeling door verstikking om het leven komen.

Wiegedood

Pseudo-kroep komt voor bij pasgeboren zuigelingen, tot de leeftijd van circa 14 maanden. De vatbaarheid neemt echter al na de zesde levensmaand drastisch af. Jongens zijn vatbaarder dan meisjes maar ook de laatsten lijden aan deze aanvallen van benauwdheid.

In Duitsland heeft het veelvuldig voorkomen van wiegedood tijdens perioden met verhoogde luchtverontreiniging voor grote publieke verontrusting gezorgd. Er zijn echter geen precieze cijfers hoeveel kinderen jaarlijks op deze wijze overlijden. Er is namelijk in Duitsland, in tegenstelling tot de Verenigde Staten, geen meldingsplicht voor deze gevallen. Men kan ervan uitgaan dat ongeveer elke ochtend tien ouders ergens in de Bondsrepubliek hun tevoren gezond lijkende baby plotseling dood in de wieg vinden. Prof. Helmut Althoff, chef van de afdeling gerechtelijke geneeskunde aan de technische hogeschool van Aken, schat het jaarlijks aantal gevallen van dit volkomen onverwachte sterven in de Bondsrepubliek op tweeduizend baby's. Andere deskundigen noemen het dubbele aantal. In Engeland zou dit

aantal zweven tussen de vijftienhonderd en vijfduizend baby's per jaar. In de Verenigde Staten zouden tussen de vijftien- en twintigduizend zuigelingen per jaar een plotselinge dood sterven (*de Volkskrant*, 11 april 1984).

In wezen mag men stellen dat op het gebied van wiegedood verrassend weinig onderzoek of statistiek is bedreven. Het algemene vermoeden wordt door slechts enkele onderzoeken gesteund. Een van de weinige epidemiologische onderzoeken over dit thema is in 1981 door de Amerikaanse T. Hoppenbrouwer gedaan. Zij onderzocht het verband tussen het voorkomen van wiegedood en de niveaus van luchtverontreiniging in de verschillende seizoenen. Hoppenbrouwer heeft de sterfdatum en de leeftijd van circa 700 tussen 1974 en 1977 aan wiegedood overleden baby's in Los Angeles vergeleken met de daggemiddelden van zwaveldioxide, stikstofdioxide, koolmonoxide, koolwaterstoffen, ozon en lood.

Hoppenbrouwer kwam na het onderzoek tot de volgende conclusie. Wiegedood treft kinderen overwegend in de eerste tot vierde levensmaand, de slachtoffers worden gemiddeld tweeëneenhalve maand oud. Het dodencijfer hangt sterk af van de tijd van het jaar. Er is een minimum van juli tot september en een piek in de maanden december en januari. Daarbij is het maximum maandgemiddelde dubbel zo hoog als het minimum.

De toeneming van het aantal sterfgevallen correleert met de seizoenswisselingen in de luchtvervuiling en met de temperatuur. Er zijn veel sterfgevallen op koude, weinig op warme dagen. Bovendien leefden kinderen die in maanden met weinig luchtverontreiniging waren geboren, langer dan die welke in maanden met hoge verontreinigingsniveaus waren geboren. De dood volgde over het algemeen 7 weken na de piekniveaus in de verontreiniging.

Dit onderzoek komt overeen met de waarnemingen van dr. Mersmann, een huisarts in Essen. Deze arts houdt al zeer lang een statistiek betreffende pseudo-kroep bij en ook hij vond een snelle stijging van het aantal aanvallen op koude winterdagen en onder weersomstandigheden met weinig menging met hogere luchtlagen. Bovendien stelde hij vast dat het aantal aanvallen van maandag tot vrijdag significant toeneemt. Met name op vrijdagmiddag worden de kinderen ziek.

Omdat de waarnemingen van een willekeurig huisarts niet hetzelfde politieke gewicht hebben als een universitair onderzoek, waren de resultaten van Mersmann aanvankelijk onderwerp van heftige discussie. Ondertussen heeft echter prof. H. Haupt, de geneesheer-directeur van de kinderkliniek in Duisburg, nieuwe cijfers gepubliceerd. Deze zijn gebaseerd op een grootscheeps onderzoek in de industrie-

stad Duisburg en opnieuw blijkt een duidelijk aanwijsbaar verband tussen luchtverontreiniging en pseudo-kroep, niet alleen in de kinderkliniek maar ook in de praktijken van de kinderartsen uit de omgeving. Duidelijk bleek dat gebieden waar gemiddeld meer dan 200 microgram zwaveldioxide in de lucht voorkwam, een significante stijging van het aantal slachtoffers vertoonden. Bij een gemiddelde zwaveldioxideconcentratie van 300 microgram was het aantal gevallen van pseudo-kroep tweemaal zo hoog als in minder vervuilde gebieden. Ook wiegedood wisselt in de Bondsrepubliek met de seizoensniveaus van de luchtverontreiniging, waarbij net als bij pseudo-kroep jongens vaker het slachtoffer zijn dan meisjes. Dit volgde uit een onderzoek van meer dan 600 slachtoffers van wiegedood. Daarbij is tevens gevonden dat 80% van de kinderen ten tijde van het overlijden een door de ouders niet opgemerkte infectie aan de bovenste luchtwegen had (Krems, 1984).

In Duitsland zijn nu diverse oudergroepen opgericht. Deze groepen eisen meldingsplicht voor de ziektegevallen, plannen voor beveiliging bij smogalarm en onderzoek naar de samenhang tussen luchtverontreiniging en bepaalde ziekten bij kinderen en volwassenen. In het Beierse plaatsje Hoff kreeg zo'n werkgroep binnen enkele dagen 200 leden, nadat binnen een week vier baby's zonder duidelijke oorzaak waren gestorven. In dezelfde periode ontdekte een groot aantal ouders dat hun baby's ziek waren en later bleek dat tegelijkertijd in Hoff de grootste concentratie zwaveldioxide was gemeten (1450 microgram/m³!) sinds het begin van de immissieregistratie. Deze hoge concentratie werd veroorzaakt doordat bij de heersende weersomstandigheden de schadelijke stoffen uit de industriegebieden van de DDR en Tsjechoslowakije in het dal van de rivier de Saale bleven hangen rondom de stad Hoff.

De Duitse en Amerikaanse bezorgdheid vormt een merkwaardig contrast met de afwijzende houding van de Wageningse hoogleraar Biersteker. De geruchten over het verband tussen zure regen en wiegedood noemt hij 'wilde verhalen'. De ongerustheid over pseudo-kroep en wiegedood wordt volgens hem aangewakkerd omdat men, en dat is begrijpelijk, graag een duidelijke oorzaak wil aanwijzen. De oorzaak van wiegedood is namelijk onbekend, waardoor ouders die ermee worden geconfronteerd een schuldcomplex kunnen ontwikkelen. Wiegedood zou immers enige schijn van verdachte omstandigheden hebben. In Amerika is het daarom verplicht dat op alle door wiegedood getroffen baby's sectie wordt verricht. Het ouderlijk schuldcomplex kan volgens Biersteker een van de redenen zijn dat de zure regen als zondebok wordt aangewezen. In Nederland zou wiegedood overigens weinig meer voorkomen, behalve sporadisch, in enkele

arbeiderswijken, maar het verband met zure regen zou niet terecht zijn.

'Door de hoge schoorstenen is het probleem weliswaar niet voor het milieu maar wel voor de volksgezondheid opgelost,' verklaart prof. Biersteker. In tegenstelling tot veel ecosystemen, zou voor de mens een bepaald niveau bestaan waarbeneden geen effecten zijn, het zogenaamde *no-effect level*. Door de hoge schoorstenen zouden volgens Biersteker niet de schadelijke effecten voor de natuur zijn verdwenen, maar wel die voor de mens. Overigens is Biersteker wel van mening dat schoorstenen museumstukken zijn. Hopelijk kan de bossterfte in Duitsland ertoe bijdragen om zo snel mogelijk een betere oplossing te vinden (pers. mededeling).

Ook Bierstekers Groningse collega Van der Lende komt de recente Duitse berichtgeving over een mogelijk verband tussen luchtverontreiniging en pseudo-kroep of wiegedood sterk overdreven voor (pers. med.).

Irritatie en cara

Hoewel de meeste normen voor luchtverontreiniging zijn gebaseerd op de gevaren voor de volksgezondheid, is over die gevaren eigenlijk weinig bekend. Er zijn talloze proeven gedaan met gezonde personen. Omdat die mensen hiervoor maar kort beschikbaar zijn, worden ze in de standaardexperimenten gedurende enkele uren of enkele minuten blootgesteld aan absurd hoge concentraties van bepaalde stoffen. Het bleek dat deze mensen inderdaad irritatie aan ogen en luchtwegen ondervonden bij bijvoorbeeld zwaveldioxidegehalten die 100 tot 500 maal hoger waren dan in normale buitenlucht, terwijl ze van in de buitenlucht voorkomende concentraties schijnbaar geen last hebben.

Op grond van zulke proeven zou men kunnen verwachten dat de meeste astmatische mensen ademhalingsmoeilijkheden krijgen bij 14 000 microgram/m³ lucht (tegenwoordig komen in ons land de maandgemiddelden in de vuile gebieden zelden boven de 200 microgram). Na blootstelling aan 3000 microgram/m³ gedurende 10 minuten is nog een meetbare stijging van de ademweerstand vast te stellen. Bij een blootstelling aan 1400 microgram gedurende 3 uur is dit zelden het geval. Een klein aantal astmapatiënten blijkt bij een niveau boven de 250 microgram nog een meetbare vermindering van de longfunctie te hebben.

Een ander type onderzoek betreft de vergelijking van sterftcijfers tussen perioden met en perioden zonder ernstige luchtverontreiniging. Tijdens een van de beruchte perioden van *London fog* in de-

cember 1952 waren de concentraties roet en zwaveldioxide gedurende vijf dagen heel hoog. Zowel de SO_2 - als de roetconcentraties bedroegen omstreeks 4000 microgram/ m^3 lucht. Tijdens deze periode lag het sterftcijfer driemaal zo hoog als normaal en er stierven 4000 mensen meer dan normaal. De sterfte aan bronchitis was, althans in het centrum van Londen, zelfs negenmaal zo hoog als normaal. Het sterftepatroon was niet altijd gelijk. Tijdens een *fog*-periode in januari 1956 was er alleen een toeneming in sterfte in de leeftijdsgroep boven de 70 jaar. Een *fog*-periode in december 1957 gaf een stijging van de sterfte in alle leeftijdsgroepen te zien. In New York zijn soortgelijke resultaten gevonden. Tegenwoordig komen in steden als Londen, dank zij de hoge schoorstenen in de industrie en een verbod op zwavelrijke kolen voor huishoudelijk gebruik, zulke *fog*-periodes niet meer voor.

Vlaardingen – Vlagtwedde

Steeds meer blijkt het niveau van de luchtverontreiniging overal naar dezelfde waarden te convergeren. De stad wordt schoner, plattelandslucht vervuult. De hierboven beschreven experimenten en statistische onderzoeken waren daarom helaas weinig relevant voor mensen uit de zogenaamde risicogroepen bij blootstelling aan normale, vervuilde buitenlucht. Daarom zijn er ook veel experimenten gedaan met lagere concentraties in combinatie met verschillende andere stoffen. Het waardevolst zijn echter die onderzoeken die betrekking hebben op de gezondheid van grote bevolkingsgroepen bij bepaalde bestaande niveaus van luchtvervuiling.

Zeer bekend is het onderzoek van cara door de Werkgroep Epidemiologie, een werkgroep van de medische faculteit in Groningen, en een soortgelijke werkgroep van TNO. Dit onderzoek onder leiding van professor Van der Lende had betrekking op het functioneren van de longen van de bevolkingen van het relatief vuile Vlaardingen en van het relatief schone Vlagtwedde gedurende tien jaar.

Vlagtwedde is een landelijk dorp in Groningen, ver van vervuilende industrie, dus zonder directe immissies. De concentraties zwaveldioxide en roet zijn relatief laag en wijken niet ver af van het landelijk achtergrondniveau. De luchtverontreiniging in Vlaardingen wordt daarentegen sterk beïnvloed door de nabijheid van olieraffinaderijen. Wel zijn de niveaus van zwaveldioxide gedurende de onderzoeksjaren door onder andere de bouw van hogere schoorstenen aanzienlijk gedaald, maar ze zijn nog steeds enkele malen hoger dan in Vlagtwedde. De vermindering van andere luchtverontreinigende stoffen was veel geringer.

Door het onderzoeksteam zijn vanaf 1965, met tussenpozen van drie jaar, in beide plaatsen de longfuncties van circa 2000 personen onderzocht. De proefpersonen waren verdeeld over verschillende leeftijdsgroepen, een groep tussen 15 en 25, een groep tussen 25 en 40 en een groep ouder dan 40 jaar. Deze mensen waren volgens een statistische methode uitgekozen, zodat ze een redelijke doorsnee van de bevolking vertegenwoordigden.

Bij dit omvangrijke onderzoek werd gekeken naar de prestaties van de longen, te weten hoe diep de mensen konden in- en uitademen, en naar de ademweerstand, ofwel hoe snel de mensen konden uitademen. Ook werden het bloed en het sputum onderzocht en allergieproeven gedaan en er werd opgetekend hoeveel de proefpersonen rookten en hoestten en onder welke omstandigheden ze woonden en werkten.

Normaal nemen bij jonge mensen de longprestaties toe tot de leeftijd van 25 jaar, daarna nemen ze langzaam af. Uit het onderzoek blijkt duidelijk dat dit patroon wordt beïnvloed door het verschil tussen de vervuilingsniveaus in beide plaatsen. Met name bij de groep niet rokende jongeren in Vlaardingen blijft de toeneming van de longprestaties achter. In de tweede plaats houdt de groei ver voor het 25ste levensjaar op, enkele jaren eerder dan bij de jongeren in Vlagtwedde. Dit verschil werd ook bij alle andere bevolkingsgroepen duidelijk aangetoond. Bij mensen boven de 25 jaar verliep de daling van de longprestaties in Vlaardingen enige tientallen procenten sneller dan in Vlagtwedde (Van der Lende, 1981).

Overigens blijkt dat veel mensen zichzelf het meest kwaad doen door te roken. Het verschil in longprestaties tussen rokers en niet-rokers was namelijk tweemaal zo groot als het verschil tussen de bevolking van Vlaardingen en die van Vlagtwedde. Sigaretterook is verbrandingsgas, evengoed als fabrieksrook. Het roken van tabak, doodsoorzaak nummer één, is net zo onverantwoord als inhaleren aan een auto-uitlaat. Het verschil is dat mensen de keuze hebben het roken al dan niet te laten. De buitenlucht, vervuild of niet, moeten zij blijven inademen, en die verplichting strookt niet met het rechtsgevoel.

Een merkwaardige constatering was dat tussen 1969 en 1973 de prestaties van de longen in het vuile Vlaardingen bij bijna iedereen boven de 25 jaar waren toegenomen. Normaal is, dat deze bij mensen boven de 25 jaar geleidelijk afnemen. Deze opmerkelijke tijdelijke verbetering deed de werkgroep besluiten al het statistische materiaal opnieuw te bekijken. Toen bleek dat er een groot verschil was tussen de gemiddelde longprestaties van de groepen die op de verschillende dagen van de week waren onderzocht. (De metingen namen steeds een volle werkweek in beslag.) Het bleek dat het verschil tussen de

groep van bijvoorbeeld maandag en die van de andere dagen, per week exact overeenkwam met verschillen in zwaveldioxide-, roet- en stikstofoxideconcentraties in de buitenlucht. Dit betekende dat de longprestaties op zeer korte termijn beïnvloedbaar moesten zijn door wisselingen in de dagelijkse concentraties vervuiling. Hierdoor werd de stijging van de longprestaties – de reden voor het nadere onderzoek – verklaard. De geringe longprestaties van de Vlaardingse bevolking tijdens het onderzoek in 1969 waren veroorzaakt door een piek in de luchtvervuiling; daarentegen was in de onderzoeksperiode van 1973 de luchtverontreiniging ongewoon laag.

Op elke regel is een uitzondering, zo ook hier. Er bleek een groep te zijn bij wie de longprestaties in het onderzoek in 1973 niet waren verbeterd ten opzichte van 1969. Dit was de groep die bij het onderzoek in 1972 ook al de slechtst functionerende longen had. Dat deze groep ondanks de verbeterde luchtkwaliteit zulke slecht functionerende longen had, kon volgens de statistiek niet worden toegeschreven aan roken of aan toevallige blootstelling aan extra vervuiling tijdens bijvoorbeeld het werk of ten gevolge van de woonsituatie. Het lijkt erop dat deze mensen van nature gevoelig zijn voor aantasting van de luchtwegen. Zij vormen kennelijk een echte risicogroep en luchtkwaliteitsnormen zouden zich op de bescherming van juist deze mensen moeten richten.

Verhoogde luchtvervuiling doet de longprestaties acuut afnemen. Dit effect is echter herstelbaar, in tegenstelling tot de geleidelijke achteruitgang over tientallen jaren (Van der Lende, 1975).

Het blijkt dus dat lange-termijnonderzoek bij grote bevolkingsgroepen heel andere en ook veel verontrustender resultaten geeft dan het onderzoek naar de effecten van kortdurende blootstelling van proefpersonen aan hoge concentraties van bepaalde stoffen. Hierbij zijn parallellen te trekken naar het verschil tussen laboratoriumonderzoek naar schade op planten en de praktijk van de bossterfte.

De bevindingen van Van der Lende komen overeen met ander onderzoek, speciaal dat van de Engelsman Watanaby. Deze onderzocht de gevolgen van wisselende maandgemiddelden van verontreiniging op de longprestaties van twee groepen schoolkinderen, één in een vervuilde, industriële en de andere groep in een landelijke omgeving. Watanaby vond met name een aanzienlijk verschil in de wintermaanden, overeenkomend met een verschil in luchtverontreiniging.

In 1981 bracht de KEMA, in opdracht van de gezamenlijke elektriciteitsproducenten van Europa, Noord-Amerika en Japan, een rapport uit over de gevolgen van zwaveldioxide op vegetaties en volksgezondheid. Het onderzoek van Van der Lende en zijn collega's werd hierin min of meer afgedaan met de opmerking dat de bevindingen

niet werden gesteund door resultaten van laboratoriumonderzoek naar de effecten van zulke lage concentraties. Het zou daarom moeilijk zijn de 'geringe' statistische significantie te accepteren als duidelijk bewijs voor een oorzakelijk verband. (Dit was overigens bijna de standaardkritiek op elk onderzoek, ook op het genoemde Engelse, dat in het literatuurverslag van de KEMA werd aangehaald.) Van der Lende zegt desgevraagd over het KEMA-onderzoek het volgende: 'Ik ben van mening dat men de artikelen niet zorgvuldig heeft gelezen, dat men zelfs suggesties doet die volkomen onjuist zijn, bijvoorbeeld over de invloed van beroepsfactoren, waarvan wij wel degelijk hebben gezegd dat deze factoren in onze analyse geen verstorend effect hadden op de onderzoeksuitkomsten.'

Tijdens een *hearing* voor het Europese Parlement in 1983 maakte Van der Lende de KEMA ernstige verwijten over de zijns inziens opzettelijke verdraaiing van de onderzoeksresultaten. Naar zijn zeggen hadden ook zijn buitenlandse collega's erover geklaagd dat hun onderzoek subtiel maar consequent verkeerd door de KEMA was geïnterpreteerd. Overigens geeft de KEMA in de samenvatting van zijn rapport aan, dat wetenschappelijke bewijsvoering, wegens de aard van de statistische methode, zaken nooit voor 100% bewijst (Poortinga, 1983).

Gezondheidsrisico's voor de automobilist

Een groot deel van de luchtverontreiniging is afkomstig van het verkeer. Een ritje van Groningen naar Maastricht en terug via de snelweg levert bijna drie kilo stikstofdioxiden. Het verkeer veroorzaakt 60% van de totale NO_x -uitworp. Boven snelwegen en in steden is de concentratie natuurlijk het hoogst, zowel van stikstofoxiden als van koolmonoxide*, koolwaterstoffen en lood. Het is te verwachten dat de lucht in de auto's op de snelwegen ten minste even vervuild is. Niet alleen de omwonenden, fietsers en voetgangers worden met de nadelige gevolgen van het autorijden geconfronteerd, het zijn vooral de automobilisten zelf die zijn blootgesteld aan de door het verkeer uitgestoten stoffen. Immers, de ingang van het ventilatiesysteem van de auto bevindt zich altijd achter de uitlaat van de voorganger.

Er zijn mensen die beroepshalve vele uren in hun auto op de weg zijn en die zouden daarvan zeker schadelijke gevolgen kunnen ondervinden. Omdat eigenlijk elke Nederlander dagelijks een uur of langer in het verkeer doorbrengt, is de kwaliteit van de lucht in auto, bus of tram een zaak die onze aandacht verdient. Het ministerie van VROM heeft daarom het Instituut voor Milieuhygiëne en Gezondheidstechniek van TNO de luchtkwaliteit in auto's laten onderzoeken (Tonkelaar, 1983). In totaal werd door de TNO-onderzoekers 100 000 kilometer op de

snelwegen gereden en daarbij werden 4400 luchtmonsters genomen. Als men hun meetgegevens heeft gelezen, durft men tijdens het autorijden nauwelijks nog adem te halen. De concentraties waaraan de bestuurder en de inzittenden van een auto blootstaan zijn belangrijk hoger dan die gemeten op de vaste meetstations in de buitenlucht. Dit geldt zowel in de stad als op de snelweg. De concentratie stikstofoxiden in een auto neemt, net als de emissie, bij hoge snelheden toe. De advieswaarden van zowel de Gezondheidsraad als van de Wereldgezondheidsorganisatie worden voor stikstofdioxide met gemiddeld 100% overschreden. Voor stikstofmonoxide, waarvan de concentraties in auto's tot driemaal hoger gaan dan die voor -dioxide, bestaan geen normen, zodat er ook geen overschreden kunnen worden. Deskundigen zijn namelijk, al dan niet ten onrechte, nog steeds van mening dat stikstofmonoxide in tegenstelling tot stikstofdioxide een tamelijk onschadelijke stof is.

NO_x- en NO₂-niveaus nabij wegen en straten (Hout, 1983, blz. 45)

NO_x jaargemiddelde in microgram
NO₂-eq./m³ NO₂ (microgram/m³)

I Drukke straten in grote steden	120–330	50–75
II Stille straten in grote steden	70–100	40–75
III Drukke straten in kleine steden	100–250	40–70
IV Drukke snelwegen (wegrand)	110–350	40–65
V Idem (100 meter van de weg)	50–130	25–50
adviesnorm van de Gezondheidsraad	—	50

De luchtverontreiniging door verkeer heeft in de jaren zestig algemene aandacht gekregen. Dit heeft in de jaren zeventig geleid tot de aanvaarding en de verscherping van een EG-richtlijn voor de toegestane maximumuitworp van koolmonoxide en stikstofoxiden door auto's. Deze richtlijn is een van de weinige wettelijke normen voor luchtverontreiniging in ons land. De norm is echter gericht op de gezondheid van buitenlucht in stedelijke omgeving.

Het blijkt dat de gehanteerde richtlijn niet alleen in het kader van de verzuring is achterhaald: de TNO-metingen hebben uitgewezen dat ze ook te kort schiet voor de kwaliteit van de lucht in auto's. Bovendien is door de intensivering van het verkeer de totale emissie van stikstofoxiden, en dus van de concentratie daarvan boven de snelwegen, sinds de invoering van de richtlijn sterk toegenomen.

Ook in het buitenland zijn veel onderzoeken gedaan naar de luchtkwaliteit in auto's. Aanvankelijk concentreerde het onderzoek zich op

Is de zure regen het ergst in de keuken?

Terwijl de meeste mannen in hun auto dagelijks een dosis stikstofdioxide inademen die de gezondheidsnormen ver overschrijdt, inhaleren hun vrouwen in de keuken (zo ligt de rolverdeling in onze maatschappij nog steeds!) zo mogelijk nog ernstiger vervuilde lucht. Men zou het heel gek vinden als de uitlaatpijp van een auto binnenin, onder het dashboard, uitkwam. Toch doet men de Nederlandse huisvrouw of huisman iets dergelijks aan. Vele uren per dag wordt bij het koken van water of het bereiden van eten aardgas verbrand. Er zijn nog steeds huizen waar de gasgeisers geen rookkanaal naar buiten hebben en waar de gaskachel in de kamer gebrekkig ventileert. Vroeger kookte men het eten onder een schouw, die van een heel wijde schoorsteen was voorzien. Vaak werd ook gekookt op de kachel. Hiervan was de kookplaat voorzien van uitneembare ringen en de pannen konden afsluitend op de vrijkomende gaten worden geplaatst. Zo kwamen de rookgassen niet in de keuken, maar ze verdwenen door de kachelpijp naar buiten. Omdat het verbranden van aardgas geen roet geeft en, als de branderkoppen van het fornuis nieuw zijn ook geen geur verspreidt, is valselijk de indruk gewekt dat de verbrandingsgassen schoon zijn. Niets is helaas minder waar. In 1983 werd Nederland opgeschrikt door berichten in de pers dat het aantal longklachten bij mensen die op gas koken aanmerkelijk hoger zou zijn dan bij hen die elektrisch koken. Ook de vakgroep Luchthygiëne en Luchtverontreiniging van de Landbouwhogeschool Wageningen was niet gerust op de onschadelijkheid van de verbrandingsgassen en is daarom enkele jaren geleden begonnen met een onderzoek naar de verontreiniging van de lucht door aardgas en de risico's daarvan voor de volksgezondheid. Uit het onderzoek bleek dat in alle woningen de gemiddelde NO_2 -concentratie hoger is dan de buitenluchtconcentratie (Noy, 1983) en dat in een groot aantal keukens, onafhankelijk van het woningtype, de NO_2 -concentratie eveneens hoger is dan de advieswaarde van de Gezondheidsraad (50 microgram/ m^3). In sommige huiskamers en in meer dan 60% van de keukens wordt af en toe de maximaal toegestane waarde (300 microgram/ m^3) overschreden, een waarde die volgens de Gezondheidsraad niet meer dan één uur per jaar zou mogen worden bereikt. Daarbij werden piekwaarden gemeten van 780(!) microgram/ m^3 .

In een aantal gevallen werden de gezondheidsnormen ook in de slaapkamers overschreden. Met name in het winterseizoen werden door gebrek aan ventilatie hoge concentraties gemeten. Koken op gas en tegelijkertijd vanwege de energiebesparing jagen op kieren blijkt een uiterst ongelukkige combinatie te zijn.

Gemiddelde NO_x-concentratie (microgram/m³) – tussen haakjes de spreidingsbreedte per vertrek – in vijf verschillende woningbestanden en corresponderende buitenluchtconcentratie (Noy, 1983)

<i>woningbestand</i>	<i>woonkamer</i>	<i>keuken</i>	<i>slaapkamer</i>	<i>buitenlucht</i>
Arnhem/Enschede	58 (6–346)	118 (8–472)	—	35
Ede	54 (11–222)	115 (11–721)	43 (11–201)	44
Vlaagtwedde	51 (9–240)	105 (9–493)	24 (8– 66)	31
Rotterdam I	79 (17–248)	143 (11–780)	51 (9–145)	46
Rotterdam II	73 (21–248)	143 (36–703)	64 (9–233)	—
Norm Gezondheidsraad				50

De Gezondheidsraad heeft normen geadviseerd voor de buitenlucht. Het is inmiddels duidelijk dat er ook normen horen te zijn voor binnenlucht. Voor een effectieve bescherming van de volksgezondheid moet bij normeringen rekening worden gehouden met de totale blootstelling binnen en buiten: op straat, in fabrieken en kantoren en thuis.

Mannen en vrouwen die het huishouden verzorgen, maar ook kleine kinderen, doen ongeveer 80% van de vervuiling op in het eigen huis. Voor werkenden is dit altijd nog 60%. Mensen die buitenshuis werken, zijn immers tijdens het eten koken meestal thuis of komen thuis direct na de grootste NO_x-productie. Daarbij moet worden bedacht dat de kleine kinderen thuis een heel kwetsbare bevolkingsgroep zijn en dat de huisvrouw het eten grotendeels kookt met de neus ergens boven de pan en het vuur.

In het kader van de volksgezondheid is de open gasvlam achterhaald. Het is gezonder elektrisch te koken. De rookgassen kunnen effectief gereinigd worden in de centrale en het energieverlies bij de productie van elektriciteit wordt voor een deel gecompenseerd doordat koken op elektriciteit een geringer warmteverlies geeft dan koken op gas.

11. BETONROT EN VERVAL VAN NATUURSTEEN

Sociale woningbouw en monumentenzorg

Alle bouwmaterialen hebben van nature een bepaalde levensduur. Ook het schilder- en pleisterwerk, dat constructies en muren beschermt en versiert, verouderd van nature. Het gevoeligst voor verval zijn die materialen die zich in de vrije lucht bevinden. Daar onder vinden ze behalve de verwerende werking van zonlicht, regen, vorst en hitte ook de invloed van de agressieve stoffen in de lucht. De snelheid van het verval is afhankelijk van de situatie en de klimatologische omstandigheden. Onder gunstige omstandigheden kunnen ook minder duurzame materialen heel lang intact blijven. In de droge en niet vervuilde omgeving van de Egyptische woestijn konden tal van cultuurgoederen het duizenden jaren 'ongeschonden' uithouden. Ook de kleinste details van versieringen op Griekse en Romeinse monumenten bleven tot in de negentiende eeuw bewaard en dat is in schril contrast met het snelle verval in de vervuilde lucht van onze moderne geïndustrialiseerde wereld.

Men kan ervan uitgaan dat het verouderingsproces in vroeger eeuwen, afhankelijk van de plaatselijke omstandigheden, altijd even snel verliep. Tijdens de laatste decennia is het verouderingsproces voor een groot aantal materialen echter aanzienlijk versneld. Uit de talrijke foto's van historische gebouwen en kunstwerken die sinds meer dan honderd jaar zijn gemaakt, blijkt duidelijk dat veel eeuwenoude of zelfs duizenden jaren oude monumenten en kunstwerken die nu ernstig zijn vervallen in het begin van deze eeuw nog nauwelijks waren aangetast. Het verval is sinds het begin van deze eeuw vele malen sneller verlopen dan voordien. Dit geldt voor de gebouwen van de Acropolis in Athene, maar evengoed voor onze eigen Sint-Janskerk in Den Bosch. Zo snel eroderen de beelden en versieringen aan de buitenzijde van de Sint-Jan dat de contouren van pinakels en heiligenbeelden in enkele tientallen jaren onherkenbaar zijn veranderd.

Het versnelde verval van gesteenten, specie en beton heeft waarschijnlijk alles te maken met de zure regen. De zuurgraad van de regen, van nature 5,6 is nu over grote delen van het noordelijk halfrond gezakt tot 4,5 à 4, wat wil zeggen dat de regen circa 100 tot 400 maal zo zuur is als vroeger.

Kalk, het belangrijkste bindende bestanddeel van vele soorten steen, cement en beton, blijkt in water met een zuurgraad van 4,5 veertigmaal, en bij pH 4 maar liefst 75 maal sneller op te lossen dan in water

met een pH van 5,25. Dit lijkt ook niet verwonderlijk, als we bedenken dat het verschil tussen pH 5,25 en pH 4 betekent dat de regen 175 maal zo zuur is geworden.

Monumenten, oude en nieuwe gebouwen

De achterstand in de restauratie van waardevolle gebouwen is zo hoog opgelopen dat men spreekt over het stuwmeer van achterstallig onderhoud. Veel gebouwen dreigen door de continue restauraties hun oorspronkelijkheid te verliezen. Volgens sommige critici zijn de intensief gerestaureerde monumenten eigenlijk te beschouwen als nieuwbouw of namaak. Men probeert het verlies aan oorspronkelijkheid zoveel mogelijk te beperken door dezelfde soort bouwmaterialen te gebruiken. Dit heeft echter geen zin als de voor restauratie gebruikte steensoort net zo gevoelig is voor luchtverontreiniging als de oorspronkelijke. In Italië heeft men bovendien gevonden dat het verval niet alleen de bestaande gebouwen treft maar ook de nog ongebruikte bouwmaterialen. Zo is vastgesteld dat de zandsteen in de steengroeven bij Bologna sinds het midden van de vorige eeuw een geleidelijke verslechtering in kwaliteit ondergaat. Deze aantasting is in de loop der jaren bijna exponentieel toegenomen.

Ir. W. Polman, hoofd van de gemeentelijke afdeling Monumentenzorg in Haarlem, noemt het verval van de Haarlemse monumenten schrikbarend. Haarlem telt 1300 monumenten en de restauratie is een gevecht tegen de klok. 'Je hoeft niet deskundig te zijn om de aftakeling te kunnen zien,' aldus Polman, 'de schadelijke chemische stoffen tasten de natuursteen centimeters diep aan' (Haarlems Dagblad, 4-2-'84).

Het onderzoek naar schade aan gebouwen heeft zich overal in de eerste plaats gericht op oude bouwwerken van grote (kunst-)historische waarde. De centra van de grote steden bestaan echter voor een belangrijk deel uit woonhuizen, winkels en bedrijfsgebouwen van minder hoge historische waarde. Deze veelal toch eeuwenoude bebouwing bepaalt het karakteristieke stadsbeeld. Hoewel de architectonische waarde van elk huis afzonderlijk beperkt is, vormen al de gebouwen te zamen een aanzienlijk deel van ons architectonisch erfgoed. De stad Rotterdam, die tijdens de Tweede Wereldoorlog haar architectonisch erfgoed verloor, heeft ervaren hoe moeilijk het is om met behulp van nieuwbouw een leefbare stadssfeer te scheppen. Helaas kunnen de oude stadskernen, afhankelijk van de ervoor gebruikte bouwmaterialen en het soort cement, in toenemende mate door het verval worden aangetast.

In zijn algemeenheid kan men stellen dat, indien het verval door

luchtverontreiniging altijd even groot was geweest als in de laatste decennia, in Europa geen van de bouwwerken die vóór de renaissance uit kalkachtige gesteenten werden opgetrokken, tot in de 20ste eeuw bewaard zou zijn gebleven.

Ook nieuwere gebouwen worden door luchtverontreiniging aangeast. De gevolgen van de invloed van luchtverontreiniging op mortel zijn niet goed bekend. De slechte kwaliteit van de mortel en het kalksteen van vele gebouwen van de beroemde architect Cuypers was een belangrijke reden om ze af te breken of, zoals het Rijksmuseum en de stations van Groningen en Amsterdam, te restaureren. Het herstel van deze gebouwen lijkt een steeds terugkerende noodzaak. Ieder jaar is voor het uit 1896 daterende station in Groningen ongeveer een ton beschikbaar om er een deel van de restauratie van te betalen. De zandstenen gevelblokken van het station zijn met stalen pennen in het metselwerk bevestigd en omdat deze ankeringspennen beginnen te roesten, worden ze nu vervangen door koperen pennen. Bovendien is het kwetsbare zandsteen aangetast door de zure regen (Nieuwsblad van het Noorden).

Het is volstrekt onduidelijk in welke mate de luchtverontreiniging de levensduur van het vele beton in nieuwe gebouwen beperkt. Het precieze effect van zure regen is moeilijk in guldens uit te drukken, omdat de aantasting door luchtverontreiniging zou worden overtroffen door de ernstige gevolgen van fouten die bij de productie van beton zijn gemaakt. De grootste schade zou namelijk voortkomen uit een verkeerde samenstelling van de betonmortel. Toen in de jaren vijftig en zestig het bouwvolume explosief toenam, is veel beton niet volgens goede voorschriften gemaakt. Door een overmatig gebruik van chloride (CaCl_2) als droogmiddel trachtte men de productiesnelheid op te voeren. Toevoeging tot 2% chloride moest ervoor zorgen dat het versgestorte beton de volgende dag al uit de bekisting kon worden gehaald. Nu betaalt men daarvoor de prijs, want het chloride doet het wapeningsijzer in ijf tempo roesten. Dit effect is volgens TNO-medewerker Wijbinga (pers. med.) rampzaliger dan het effect van luchtvervuiling op beton. De effecten van zure regen zouden daarmee vergeleken verwaarloosbaar zijn. Omdat de toegestane hoeveelheid droogmiddel tegenwoordig slechts een fractie is van de vroegere 2%, is bij recente gebouwen geen chlorideschade meer te verwachten.

Beton heeft een heel dichte pakking met weinig poriën te hebben en daardoor bijna ondoordringbaar voor vocht, vuil en koolzuur te zijn. Door foutieve mengverhoudingen, of door het toevoegen van te veel water, wordt beton poreus. Door een verkeerde samenstelling van het beton krijgen luchtverontreinigende stoffen de kans de poriën van het beton binnen te dringen.

Niet iedereen blijkt even terughoudend in het aanwijzen van de zure regen als de hoofdschuldige. Ing. Bassie noemt in het vakblad *PT/Bouwtechniek* de zure regen mogelijk de belangrijkste factor. Met name hoge concentraties zwaveldioxide, stikstofdioxide en kooldioxide zouden een rol spelen (Bassie, 1983).

Deskundigen redetwisten dus of dit effect – poreus beton – nu moet worden geweten aan schade door luchtverontreiniging of aan schade ten gevolge van een verkeerde samenstelling van het beton. Het antwoord op die vraag is belangrijk in verband met de aansprakelijkheid. Kan een aannemer er achteraf voor worden aangesproken dat zijn kwaliteit beton niet bestand blijkt tegen luchtverontreiniging, of moeten we juist de luchtvervuilers aanspreken voor de schade aan heel normaal beton? Moeten de extra kosten van superdicht beton ook niet worden gezien als een echte schadepost? Deze vragen zijn heel belangrijk als een koper verhaal zoekt voor schade aan zijn gebouw.

Het is lang niet duidelijk welk aandeel de luchtverontreiniging heeft in het totaal van de schade. De kosten van de schade door luchtverontreiniging zijn pas te schatten wanneer we weten in welke mate bouwfouten en normale slijtage de levensduur van een gebouw beperken of het noodzakelijk onderhoud daarvan vermeederen. De schade is alleen te meten aan de hand van de uitgevoerde onderhoudswerkzaamheden, een fractie van het eigenlijke achterstallige onderhoud.

Omdat betonrot zich voornamelijk voordoet in de sector van de sociale woningbouw (veel galerijflats zijn het eigendom van woningbouwcoöperaties), zijn door het Tweede Kamerlid De Pree (PvdA) in 1983 vragen gesteld over de financiële consequenties voor de huurders (Groetelaers, 1984). Volgens het antwoord van de staatssecretaris voor Volkshuisvesting worden geen extra financiële maatregelen naast de bestaande subsidies voor groot onderhoud overwogen. De bestrijding van betonrot behoort tot de reparaties, die voor rekening van de verhuurder zijn en waarvoor deze een reserve dient te vormen. Dus kunnen de huren ten gevolge van de noodzakelijke maatregelen niet worden verhoogd. Het nalaten van herstel vormt volgens de staatssecretaris echter geen beletsel om de normale huurverhogingen toe te passen. Dus kan bij voortschrijdend verval van de woningen alleen de huuradviescommissie een uitspraak over de redelijkheid van de huur doen.

Door de staatssecretaris is echter niet ingegaan op het feit dat in het geval van de woningbouwverenigingen de huurders, als leden van de vereniging, als het ware tevens de exploitanten van de woningen zijn. Deze corporaties kunnen, in tegenstelling tot bedrijven of institutionele beleggers, die slechts een deel van hun reserve in woningen hebben opgeslagen, zonder een compenserende huurverhoging in

ernstige financiële moeilijkheden komen. In het geval van betonrot is sprake van een onvoorziene toeneming van de effecten van luchtverontreiniging door schuld van derden. Het is nog niet te voorzien welke omvang de kosten op lange termijn zullen aannemen.

Professor Bruggeling van de TH-Delft wijst al vanaf 1969 op de noodzaak van betononderhoud (*Cobouw*, 1983-1). Als er één ding volgens hem zeker is, is dat wel de gebleken grote onwetendheid binnen en buiten de bouwwereld omtrent de oorzaken van betonschade en het herstel daarvan. Dat is des te erger omdat het om enorme bedragen zal gaan. Het is echter duidelijk dat er gerepareerd moet worden, en soms op zeer grote schaal. Reparatie vraagt evenwel om een grote deskundigheid, vandaar dat het belangrijk is goede bedrijven op dit vakgebied zo snel mogelijk in een erkenningsregeling onder te brengen. 'Er wordt nu geld aan reparaties uitgegeven dat gewoon weggegooid geld is, een gevolg van toenemende beunhazerij,' aldus Bruggeling. 'Deskundigheid is er nog maar weinig op dit vakgebied en er is vooral bij de ingenieurbureaus meer kennis over betonschade nodig.' Het opkloppen van de benodigde reparaties – door een adviesbureau is al gesproken over 13 tot 15 miljard gulden voor de komende jaren – geeft Bruggeling dan ook, begrijpelijkerwijs, het gevoel dat men hier en daar de kassa al hoort rinkelen.

Asbestcement, een sluipend gevaar

Een in de buitenlucht zeer veel toegepast produkt is asbestgolfplaat. Bij deze asbestcementplaat zijn de asbestvezels ingebed in cementmatrix. Bij de aantasting van het cementoppervlak door natuurlijke oorzaken maar vooral door luchtverontreiniging komen zeer veel asbestdeeltjes vrij. Deze kankerverwekkende deeltjes blijven lange tijd in de lucht zweven. Samen met de remschoenen en koppelingsplaten van auto's zijn ze verantwoordelijk voor een aanzienlijk deel van de asbestverontreiniging in stedelijke en geïndustrialiseerde gebieden. In Duitsland wordt dit probleem momenteel intensief onderzocht.

Een andere manier waarop de zure regen asbestgevaar oplevert is via de waterleidingen. Veel hoofdleidingen zijn gemaakt van asbestcement; te zuur grondwater kan cementmatrix aantasten, zodat de asbestvezeltjes in grote hoeveelheden in het water gaan zweven. Asbestcementbuizen mogen sinds kort niet meer worden toegepast voor nieuwe leidingen, maar ondertussen blijven wel zeer veel oude leidingen in gebruik. Deze leidingen mogen ook nog worden hersteld met stukken asbestcementbuis. Dit is merkwaardig, omdat men zou kunnen verwachten dat de oude buizen zo langzamerhand ook zonder verzuring flink gaan verweren.

Gesteente

Steenachtige bouwmaterialen kan men globaal onderverdelen in natuursteen, baksteen en allerlei soorten beton, metselspecie en pleisterwerk.

Tot nu toe heeft vooral de schade aan verschillende soorten natuursteen de aandacht getrokken. Dit komt niet alleen doordat enkele soorten natuursteen heel gevoelig blijken voor aantasting door luchtverontreiniging, maar ook omdat we willen dat de historische monumenten die uit deze steensoorten zijn opgetrokken, nog eeuwenlang behouden blijven.

De eerste schriftelijke bronnen waarin de soorten natuursteen werden geclassificeerd dateren uit de Griekse oudheid. Aristoteles meldde in de vierde eeuw voor Christus dat dit werk al vóór hem ter hand was genomen.

Natuursteen kan worden onderscheiden naar de chemische samenstelling en naar de ontstaanswijze. Beide aspecten zijn van invloed op de gevoeligheid voor aantasting.

De stenige aardkorst bestaat in hoofdzaak uit slechts acht elementen: zuurstof, silicium, aluminium, calcium, natrium, kalium en magnesium. Uit deze elementen ontstonden chemische verbindingen, de mineralen, waaruit bijna alle natuursteen is gevormd. Doordat een groot aantal verschillende chemische combinaties van deze acht elementen zijn te maken, zijn er zeer veel soorten mineralen en natuursteen. Ook kunnen nog circa tachtig andere elementen een ondergeschikte rol spelen. In totaal worden momenteel twee- à vierduizend soorten gesteentevormende mineralen onderscheiden (Schuit, 1980).

Het meest voorkomend mineraal, namelijk kwarts, kent iedereen. Kwarts is de verbinding van silicium en zuurstof, ofwel siliciumoxide (SiO_2). Zand bestaat uit korreltjes kwarts, vaak omhuld met een huidje van ijzerroest. In de natuur vinden we het zand vaak gemengd met andere bodemdeeltjes. Heel zuiver zand gebruiken we als grondstof voor het smelten van glas. Glas is ook kwarts.

Glas, en dus ook de zandkorrel, is moeilijk aan te tasten. Sommige soorten zandsteen zijn echter gevoelig voor verval, doordat niet de zandkorrel maar het bindmiddel tussen de korrels kan worden aangetaast. Daardoor verpulvert het zandsteen.

Een tweede belangrijk mineraal is kalk (calciumcarbonaat of CaCO_3). Kalk is namelijk het hoofdbestanddeel van alle soorten kalksteen. Net als in metselspecie en beton, vormt kalk vaak het bindmiddel in zandsteen. Doordat kalk gemakkelijk oplost in zuur, is kalkhoudende steen erg gevoelig voor zure regen.

Behalve de chemische samenstelling is de wijze waarop de gesteente-

ten zijn ontstaan heel belangrijk voor hun weerstand tegen luchtverontreiniging. De aardkorst is altijd in beweging. Bergen rijzen omhoog en eroderen, en het puin, gesorteerd in onder andere leem, zand en klei, hoopt zich laag na laag op in dalen en langs de randen van de continenten. In de ondiepe kustwateren langs de continenten wordt opgeloste kalk door koralen en andere organismen gebruikt om hun skeletten op te bouwen. Zo groeien langs de kusten enorme kalkbanken.

Doordat voortdurend nieuwe bergen oprijzen en eroderen, raken de oudste puinafzettingen en ook de kalkriffen bedolven onder steeds dikkere lagen grond. Honderden of duizenden meters dikke lagen oefenen een enorme druk uit. Zo komt een proces op gang waardoor de korrels in de gelaagde afzettingen aan elkaar kitten. Onder de toenemende druk slinken de lagen, het water wordt uitgedreven en het porievolume tussen de korrels wordt steeds kleiner.

Door cementering en herkristallisatie kunnen de korrels aaneengroeien. Kalkriffen rijpen tot kalksteen, zandlagen tot zandsteen en kleibanken tot leisteen. Als de gesteenten zeer diep onder de aardkorst raken, kunnen ten slotte alle poriën verdwijnen en ontstaat marmer of opnieuw het harde graniet waaruit vele bergen zijn gevormd.

Gesteenten die onder relatief kleine druk zijn gevormd hebben nog een groot porievolume. Luchtverontreiniging en vocht kunnen dan gemakkelijk diep het gesteente binnendringen. Het porievolume van steen is daarom, naast de chemische samenstelling, een belangrijke factor bij de gevoeligheid voor aantasting. Dit, én het verschil in de chemische samenstelling van het bindmiddel, vormt een verklaring voor het feit dat de ene soort zandsteen gemakkelijker door verontreiniging wordt aangetast dan de andere, en dat daarbij tevens de soort verontreiniging een rol speelt. Vooral kalk- en magnesiumhoudend zandsteen is gevoelig voor aantasting door luchtverontreiniging. Als we de ontstaansgeschiedenis van gesteenten zoals lei en zandsteen kennen, is het duidelijk waarom deze gesteenten zo gelaagd zijn. Ook nu nog wordt zand in dikke lagen afgezet door stuivende winden of waterstromen. Klei, waaruit leisteen ontstaat, wordt in heel dunne lagen afgezet in rustig water. Leisteen bestaat daardoor uit heel dunne schilfers. Doordat de korrelgrootte van de verschillende lagen niet gelijk is, is ook het porievolume in de lagen ongelijk. Bepaalde lagen blijken veel poreuzer dan andere, en vocht en luchtverontreiniging kunnen via deze lagen het gesteente binnendringen.

Marmer is een voorbeeld van een kalksteen dat onder grote druk is gevormd en dat nauwelijks poriën bevat. Het is een hoogwaardig bouw materiaal, dat al ver voor de jaartelling werd gebruikt voor het maken van indrukwekkende tempels en monumenten. Het enige na-

tuursteen dat in ons land wordt gevonden is de Zuidlimburgse mergel. Mergel staat, in tegenstelling tot marmer, bekend als een inferieur bouw materiaal en is een geologisch jong gesteente. Mergel is korrelig van structuur en bestaat voor gemiddeld 42% uit poriën. Deze steensoort kan slechts geringe druk verdragen (circa 4 kg/cm²). Toch blijkt dat in Zuid-Limburg veel oude gebouwen de tand des tijds heel goed hebben doorstaan, hoewel andere zich in slechte toestand bevinden. De manier en de plaats waar men mergel toepast zijn kennelijk bepalend voor de duurzaamheid ervan. Volgens sommigen is daarom mergel geen inferieur bouw materiaal, maar heeft men voor kwetsbare bouwmaterialen zoals mergel superieure architecten en aannemers nodig.

Beton, metselspecie, pleisterwerk en baksteen zijn op te vatten als kunstmatig gevormd gesteente. Bij mortels is het proces van verkitting nagebootst, zodat alle mortels zijn op te vatten als kalkhoudende gesteenten. Nagenoeg dezelfde chemische processen als die welke kalkhoudend natuursteen aantasten, kunnen ook kalkhoudende mortels aantasten. Bij de produktie van baksteen zijn de gloeiend hete omstandigheden uit de diepe aardkorst nagebootst om van kleien gesteente te maken. Evenals natuursteen is baksteen min of meer poreus en binnendringende sulfaat-zouten kunnen de buitenste lagen van baksteen aantasten.

Het proces van aantasting

Steen kan chemisch worden afgebroken door luchtverontreiniging. Ook in schone lucht is de chemische verwerking een natuurlijk proces. Het kooldioxide uit de lucht vormt met water koolzuur, en dit zwakke zuur reageert met belangrijke bestanddelen van natuursteen, zoals calciet (kalk), kaolinit, natrium- en kaliumveldspaat en calciummontmorilloniet. Uit kalk wordt door deze chemische reactie het oplosbare calciumbicarbonaat gevormd. Dit proces staat bekend als carbonatatie. De kalk kan op deze manier uit de steen gewassen worden. Uit de andere mineralen worden uiteindelijk minder goed oplosbare producten gemaakt, zogenaamde hydroxiden.

De aantasting door koolzuur verloopt langzaam en is een natuurlijk proces. Eeuwenoude gebouwen hebben van deze carbonatatie blijkbaar geen last gehad. Deze eeuw is het koolzuurgehalte van de atmosfeer door het enorme gebruik van fossiele brandstoffen gestegen met 14%, van 0,029% tot 0,033% (60 mg/m³). In stedelijke omgevingen, waar het verkeer grote hoeveelheden kooldioxide uitstoot, zijn de concentraties vele malen hoger. Van steden in ons land zijn daarover geen gegevens bekend. Voor Amerikaanse steden is gevonden

dat de concentraties kooldioxide gemiddeld 600 mg/m^3 bedragen, met een maximum van 2000 mg/m^3 . Tien- tot dertigmaal zo hoog als normaal. Het is lang niet zeker welke invloed het toegenomen kooldioxidegehalte heeft op de snelheid van de koolzuuraantasting. Toch is het belangrijk dat te weten. Carbonatatie is namelijk ook een belangrijk proces in beton. Voor de constructie van gewapend beton zijn met het oog op deze aantasting zelfs speciale voorschriften gemaakt. Mede door het proces van de koolzuuraantasting heeft de rage die in het begin van deze eeuw woedde: het herstellen en bevestigen van natuursteen met ijzeren verbindingsstukken (doken) onevenredig veel schade veroorzaakt. De Acropolis in Athene is er een van de meest spectaculaire voorbeelden van. Doordat roest achttienmaal zoveel volume inneemt als het oorspronkelijke ijzer, breekt de grote druk van het roestende ijzer de stenen uit elkaar. Reeds in de verre oudheid placht men daarom zulke verbindingsijzers in lood te gieten, om het roesten voor altijd te voorkomen.

Ten onrechte heeft men lang verondersteld dat de alkalische omgeving in kalkmortel, veroorzaakt door calciumhydroxide met een zuurgraad hoger dan 8,5, roestvorming voorkwam. Dat zou wel zo zijn als de zuurgraad zo hoog bleef. Het calciumcarbonaat (CaCO_3) dat door de carbonisatie wordt gevormd, bewerkstelligt echter een zuurgraad van 7,5, die veel minder bescherming biedt tegen roestvorming. Deze veelgemaakte denkfout heeft ernstige gevolgen gehad voor belangrijke monumentale gebouwen.

Ook de natuurlijke ijzerverbindingen in natuursteen kunnen door luchtverontreiniging roesten en door volumevergroting scheurvorming geven.*

Kristal, de microscopische mammoet

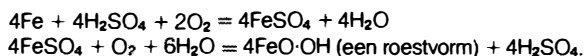
Door de luchtverontreiniging blijken microscopisch kleine kristallen

* Het ijzerspaat in natuursteen kan onder invloed van zwavelhoudende luchtverontreiniging door 'roesten' ijzervitriool vormen:

$\text{FeCO}_3 = \text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; volumetoeneming 380%.

Leien bevatten vaak pyriet (FeS_2). Door oxidatie vormt dit $\text{FeO} \cdot \text{OH}$, limoniet ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) en gips, waardoor de lei poreus wordt of gaten vertoont.

Zuiver ijzer, uit de ijzeren verbindingsstukken, kan via elektrochemische omzetting roesten, waarna in de steen hetzij verkleuring, hetzij scheurvorming door volumetoeneming kan optreden.



het gesteente met onverzettelijke mammoetkrachten uit elkaar te drukken.

Natuursteen is vanwege zijn capillaire structuur doorlaatbaar voor water en waterdamp. Ook koolzuurgas en luchtverontreiniging kunnen via de minuscule kanaaltjes in de steen dringen. Bij het verlaten van de groeve bevat de steen het zogenaamde groevewater. Dit is geen zuiver water, maar een oplossing van bepaalde minerale zouten (fosfaten of hydroxiden van ijzer, aluminium of magnesium). Wanneer natuursteen aan de lucht droogt, vormen deze minerale zouten een moeilijk doorlaatbaar laagje op de buitenkant van het gesteente, het zogenaamde patina. Dit patina blijkt beter bestand tegen de weers- en verontreinigingsinvloeden dan het eigenlijke gesteente. Bovendien wordt het gesteente door het poriën afsluitende effect van het patina enigermate tegen indringende luchtverontreiniging beschermd. De beschermende laag kan maar eenmaal worden gevormd. Wanneer luchtverontreiniging de patinalaag heeft aangetast, of als deze laag door restauratiewerkzaamheden is verdwenen, kan ze niet opnieuw worden gevormd. De luchtverontreiniging blijkt dan ook veel steensoorten na het verdwijnen van het patina snel aan te tasten. Steensoorten die met een patinalaag jarenlang geen aantasting vertoonden, bleken na verwijdering van de beschermende laag niet lang tegen de luchtverontreiniging bestand.

De sulfaten en nitraten uit de luchtverontreiniging kunnen het oppervlak van het gesteente aantasten. Via de poriën kunnen de schadelijke stoffen ook het gesteente binnendringen en bepaalde essentiële mineralen uit het gesteente oplossen. De gevormde sulfaat- en nitraatzouten kunnen zich met het vocht in het gesteente verplaatsen. Indien het water uit het gesteente verdampt, kunnen de zouten op het oppervlak uitkristalliseren. Hierdoor worden bijvoorbeeld de dikke gipskorsten (gips is calciumsulfaat, CaSO_4) op kalksteen gevormd.

Op kalkstenen gebouwen zien we de korsten zitten als dikke zwarte koeken, op plaatsen die zijn afgeschermd tegen de regen. De zwarte kleur wordt veroorzaakt door aangehecht roet en vuil. Op kalkstenen muren die aan de regen zijn blootgesteld wordt het gemakkelijk oplosbare gips door het hemelwater weggespoeld. Deze delen zijn, in tegenstelling tot de zwart aangekoekte gipskorsten, prachtig schoon. Zowel op de schoon lijkende muren als onder de gipskorsten gaat echter de aantasting onverdroten verder.

Het vocht uit het gesteente verdampt bij mooi droog weer niet aan de buitenkant ervan maar net onder het oppervlak. Op de verdampingsgrens kristalliseert het zout zich in de poriën, terwijl door toestromend vocht steeds meer zouten worden aangevoerd. Het in steeds grotere hoeveelheden uitkristalliserende zout drukt het gesteente uit elkaar.

Op de verdampingsgrens vlak onder het oppervlak ontstaan scheuren en barsten (Schuit, 1983-2). Het gesteente gaat daardoor laag na laag afschalen. Op deze manier kunnen ook gesteenten die op zichzelf ongevoelig zijn voor aantasting toch beschadigd worden. Het gipszout hoeft namelijk niet uit het gesteente zelf te komen, maar kan ook afkomstig zijn uit de mortel en na transport door de poriën van het gesteente net onder het oppervlak uitkristalliseren.

De eenmaal uitgekristalliseerde zouten kunnen, als de luchtvochtigheid toeneemt, verder uitzetten door opname van kristalwater. Nu wordt de druk in de poriën en de haarscheuren groter en daardoor kunnen nog meer vocht en verontreiniging door de verwijde poriën in het gesteente dringen. Juist de herhaling van verdamping en condensering van vocht, of daarmee samenhangend de oplossing en uitkristallisering van zouten zoals gips, en van de opname en afgifte van kristalwater is funest. Steeds wijder worden de poriën en steeds meer luchtverontreiniging wordt in het gesteente afgezet. Verontreiniging blijft na de vorming van zouten, na kristallisatie en na opname van kristalwater de steeds wijder wordende poriën met enorme druk vullen, tot de poriewanden het begeven. Dit effect wordt versterkt doordat bepaalde zouten bij oplopende temperaturen meer uitzetten dan het oorspronkelijke gesteente.

Gips zet bij temperatuurstijging viermaal zoveel uit als kalk. Doordat de zwarte gipskorsten overdag erg veel zonnewarmte opnemen, kunnen de temperaturen in de buitenste steenlaag sterk wisselen. In de eenmaal gevormde haarscheuren kan zich in de winter ijs afzetten en doordat ijs een groter volume heeft dan water, vergroot dit de druk in de scheuren. Door het oplossen en opnieuw afzetten van stoffen vlak onder de gipskorst kunnen dikke gipskorsten ten slotte afvallen.

Betonrot

Aan betonconstructies is in ons land aanzienlijke schade geconstateerd. Het is een snelgroeiend verschijnsel en haalt tegenwoordig onder de naam 'betonrot' de kranten. Betonrot is een foutieve benaming, omdat het geen biologische rotting betreft, maar een chemische aantasting waaraan geen bacteriën of schimmels te pas komen.

Niemand kan de omvang van de schade bij benadering aangeven. Tal van dragende constructies, zoals brugpijlers, worden regelmatig gecontroleerd en de schade aan betonnen galerijen en balkons van flats is door enkele instanties geraamd. Het blijkt niet alleen om oudere constructies uit de jaren vijftig en zestig te gaan; ook betonconstructies uit de jaren zeventig vertonen een toenemend verval en zijn niet zelden aan ingrijpende reparaties toe.

Het probleem wordt in zijn eindfase bepaald door het roesten van het wapeningsijzer. Roest heeft een achttmaal groter volume dan ijzer. Wanneer het ijzer gaat roesten, ontstaat door de volumevergroting een enorme druk in het beton, waardoor het gaat scheuren. Het is hetzelfde proces als dat wat beschreven is voor de ijzeren verbindingstukken (doken) in marmer en kalksteen.

Kalkcement wordt gemaakt door het branden van kalk. Boven een temperatuur van 900 °C vormt zich calciumoxide (CaO), dat bekendstaat als ongebluste kalk. Door een beperkte hoeveelheid water toe te voegen wordt de kalk 'geblust'. Uit calciumoxide ontstaat dan calciumhydroxide (Ca(OH)_2). Bij de aanmaak van de mortel wordt meer water toegevoegd, waardoor calciumcarbonaat – calciëet of kalk (CaCO_3) – ontstaat. In de (beton-)mortel blijft nog calciumhydroxide (CaOH) aanwezig. Dit is sterk alkalisch en veroorzaakt een zeer hoge zuurgraad (pH 12,5) (Schuit, 1983-3).

In gewapend beton wordt de staalwapening wegens de hoge zuurgraad door het beton zelf beschermd tegen roest. Onder de invloed van vocht en het kooldioxide uit de lucht wordt het nog aanwezige calciumhydroxide omgezet in calciumcarbonaat met een zeer veel lagere zuurgraad (pH 7,5). Deze zuurgraad biedt onvoldoende bescherming tegen roestvorming. De carbonatatie schrijdt als een scherp front van buiten naar binnen voort. Naarmate de carbonatatie dieper in het beton doordringt, verloopt het proces langzamer. Beton dat volgens de juiste voorschriften is gemaakt bevat weinig poriën. De betondekking op de wapening moet in verband met de kooldioxide-aantasting een bepaalde dikte hebben. In 1950 werd voor een vochtig milieu nog een deklaag van 10 à 15 millimeter voorgeschreven; in 1981 werd 25 à 30 millimeter als minimum beschouwd.

Kooldioxideconcentraties, en die blijken in stedelijke omgeving tienmaal zo hoog te kunnen zijn als normaal, zetten bovendien het moeilijk oplosbare calciumcarbonaat (CaCO_3) dat normaliter in beton wordt gevormd, om in het gemakkelijk oplosbare calciumbicarbonaat ($\text{Ca(HO}_3)_2$). Het beton bevat echter zoveel kalk dat het hierdoor niet merkbaar oplost. In vergelijking met de spanning door roestvorming of de kristallisatie van sulfaat-zouten is het effect van de uitspoeling van kalk te verwaarlozen. Hoge kooldioxideconcentraties zijn dan ook schadelijker in verband met een toenemende carbonatatiesnelheid.

Door de luchtverontreiniging wordt ook zwaveldioxide op het beton afgezet. Het SO_2 vormt met calciumhydroxide (Ca(OH)) of calciumcarbonaat (CaCO_3) gips (CaSO) en met aluminiumverbindingen uit het beton ettringiet (calciumaluminiumsulfaat/ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Door de enorme volumetoeneming, vooral bij de vorming van het ettringiet, kunnen haarscheuren in het beton ontstaan. Via

deze minieme scheurtjes kan verdere aantasting plaatsvinden.

Niet alleen de toeneming van het volume bij de vorming van zouten veroorzaakt schadelijke spanningen in beton of natuursteen, ook het gedrag van de zouten bij wisselende vochtigheid is oorzaak van ongewenste druk. Veel zouten die aanvankelijk in watervrije toestand zijn uitgekristalliseerd, kunnen na vochttoevoer zogenaamd kristalwater opnemen (hydraatvormende zouten). Daarbij wordt het oorspronkelijke volume sterk vergroot.

Bij misschien wel de schadelijkste van alle verweringsprocessen trekt één molecuul natriumsulfaat (glauberzout) tien moleculen water aan ($\text{Na}_2\text{SO}_4 + 10 \text{H}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Het natrium is afkomstig uit het gesteente of het beton en kan zijn aangevoerd met luchtverontreiniging, strooizout of zeewind. Het sulfaat is afkomstig van verbranding van fossiele brandstof. Door de volumevergroting kan het glauberzout in de poriën bij een temperatuur van 20 °C en een relatieve vochtigheid van 90% de enorme druk van 338 atmosfeer opbouwen. Tegen een dergelijke druk is eigenlijk geen gesteente of beton bestand.

De hydratatedruk van gips is nog veel groter dan die van glauberzout, namelijk maximaal 2190 atmosfeer (circa twee ton per cm^2 !). Een gipsmolecuul kan echter slechts twee watermoleculen binden, vijfmaal minder dan glauberzout. Het uiteindelijke effect van de uitzetting door opname van kristalwater is bij gips dus waarschijnlijk toch minder. De opname en afgifte van kristalwater worden beïnvloed door de temperatuur. Door temperatuurschommelingen rondom het evenwichts- of hydratatiepunt wordt een voortdurend wisselende druk uitgeoefend.

Mengsels van zouten kunnen de opname en afgifte van kristalwater, wat voor sommige zouten bij relatief hoge temperaturen gebeurt, bevorderen, zodat dit proces bij lagere temperaturen schadelijk wordt. Zouten met een schijnbaar ongevaarlijk omslagpunt, zoals natriumcarbonaat, kunnen bij kamertemperatuur actief worden. (Dit zout trekt per molecuul tien watermoleculen aan. Bij een temperatuurstijging tot 32 °C stoot het drie watermoleculen af en boven 34,4 °C bindt het nog slechts één watermolecuul.)

Kristallen van zouten kunnen ook zonder de genoemde vochtopname druk in de steen- of betonporiën opbouwen. Bij uitkristallisatie vanuit een verzadigde oplossing kan het volume van de gevormde kristallen plus dat van de verzadigde oplossing groter zijn dan het volume van de oorspronkelijk aanwezige oververzadigde oplossing. Zoutkristallen kunnen tegen een druk in groeien. Wanneer de poriën voldoende verzadigde zoutoplossing bevatten, kan steeds meer zout aan de groeiende zouten worden toegevoegd. Het effect hiervan is enerzijds

de opbouw van een druk in de poriën, en anderzijds de vermindering van de beschikbare ruimte voor de genoemde vochtopname in de kristalstructuur. Hierdoor kan de druk op de poriewanden maximaal worden.

Omvang van de betonschade

De Stichting voor Onderzoek, Voorschriften en Kwaliteitseisen op het gebied van Beton heeft in opdracht van het ministerie van vROM de schade aan flatwoningen door betonrot geschat. De totale oppervlakte van buitenbeton is ongeveer 14 miljoen m². Daarvan bestaat 12,6 miljoen m² uit de betonnen galerijen van flats en uit balkonvloeren. De totale schade hieraan zou 383 miljoen gulden bedragen.

De Stichting heeft de schade aan galerij- en balkonvloeren van flatwoningen met behulp van een steekproef onderzocht. In totaal zijn er in Nederland ongeveer 1,6 miljoen galerijen en balkons, waarvan ruim 1 miljoen in de Randstad. Berekend is dat circa 75% van de vloeren nog goed is, 24% is van verdachte kwaliteit en 2,3% is in slechte toestand. Op basis van de mogelijke reparatiekosten van de categorieën 'verdacht' en 'slecht' is de schade aan alle buitenbetonoppervlakken geschat op 383 miljoen gulden. Bij deze schadeberekening is de schade aan betonplaten met een buitengewoon hoog chloridegehalte niet meegerekend, zodat de raming uitsluitend de schade door invloed van de buitenlucht betreft.

Een onderzoek van de Nationale Woningraad geeft veel hogere schadedcijfers. Voorzichtige berekeningen komen volgens de Raad uit op 350 tot 400 miljoen gulden in de komende drie tot vijf jaar, alleen al voor de corporatiewoningen die na 1960 zijn gebouwd. Dit is gemiddeld 2500 gulden per woning, ofwel ruim vier maal de jaarnorm voor onderhoud. Opvallend is dat corporaties die nog niet eerder betonreparaties hebben laten uitvoeren, de kosten van toekomstige reparaties aanmerkelijk lager schatten dan de corporaties die al ervaring hebben op dit terrein.

Gegevens van grote reparatiebedrijven wijzen uit dat buiten het opdrachtenpakket dat al in uitvoering is, offerten zijn uitgebracht voor een totaalbedrag van 200 tot 250 miljoen gulden. Bovendien is bij de 128 geënquêteerde woningcorporaties van 1978 tot en met 1982 al voor 82 miljoen gulden gerepareerd. De gemaakte kosten bedroegen gemiddeld per woning 1700 gulden. Er kwamen echter ook bedragen voor tot 25000 gulden. Hierin zijn de kosten van de corporaties niet of slechts ten dele begrepen.

Al met al wijzen de gegevens van de Nationale Woningraad erop dat de totale betonschade voor het hele woningbestand veel groter is dan

uit het onderzoek van het ministerie van VROM blijkt en dat de financiële consequenties voor de woningbouwcorporaties verstrekkend kunnen zijn (Woningraad, 1983).

Omdat het ministerie van VROM ervan uitgaat dat de geconstateerde schade op korte termijn daadwerkelijk wordt hersteld, is hier zeer duidelijk sprake van een dreigende afwenteling van kosten op de consument. Dit geldt zeker voor een aanzienlijk deel van de minst draagkrachtigen in onze samenleving, die, afhankelijk van de sociale woningbouw, lid zijn van een woningbouwvereniging. De consument betaalt dan het gelag zowel voor een geringe besparing op de productie van goed beton als voor de zuivering van rookgassen. Overigens is het ministerie nog bezig met een onderzoek naar de aansprakelijkheid voor deze schade.

Betonherstel

De preventie van betonrot is een kostbare aangelegenheid. Men is geneigd een steeds dikkere deklaag voor gewapend beton voor te schrijven. Oud beton dat aan de buitenlucht is blootgesteld zou van een nieuwe deklaag kunnen worden voorzien. Hierdoor worden de constructies steeds zwaarder. Op zichzelf belemmert dit de ontwikkeling van lichte en goedkope, hanteerbare betonconstructies. Deskundigen vragen zich af of het wel de goede oplossing is om betondekkingen van steeds groter dikte toe te passen. Daarom wordt er voor gepleit het beton af te dekken met een verflaag die speciaal ondoordlatend is voor CO_2 , zodat in elk geval de carbonatatie wordt afgeremd. In theorie is dit een goede methode, maar het blijkt dat deze verfstoffen zich slecht op het beton hechten. Het is zeer moeilijk een gesloten laag op het beton te krijgen en kleine lekken zijn al erg schadelijk (Bassie, 1983).

Een tweede mogelijkheid is het toepassen van impregnering. Door de buitenste poriën te vullen met epoxy- of polyurethaanimpregneringen kunnen vocht, koolzuur en sulfaat niet meer het beton binnendringen. Een probleem hierbij is de geringe indringdiepte in het beton, met name in de met water gevulde poriën. Andere impregneermiddelen versnellen juist de aantasting. Silanen, bepaalde kunstharsen, dringen wel goed door in de poriën, maar sluiten die niet goed af. Ze vormen een waterafstotende laag op de binnenwand van de betonporiën. Het vocht wordt hierdoor goed geweerd, maar koolzuur en de gassen uit de luchtverontreiniging kunnen via de watervrije poriën juist diep in het beton doordringen. Daar is vaak weer voldoende condensvocht aanwezig om het aantastingsproces opnieuw te starten. Waarschijnlijk kan het afdichten met een combinatie van impregneermiddelen.

Van een geheel andere orde is het aanbrengen van een warmte-isolerende laag op de buitenzijde van het beton. Zo'n laag kan bestaan uit schuim of glaswol bedekt door plaatmateriaal. Zulk afgedekt beton neemt de binnentemperatuur van het huis aan en wordt daardoor droog. Omdat zonder vocht geen aantasting plaatsvindt, is deze methode afdoend. Bovendien wordt het woonklimaat sterk verbeterd en geeft isolatie een enorme energiebesparing. De methode is helaas wel kostbaar, tot 200 gulden per vierkante meter, en ze is slecht toe te passen op alle betonconstructies die buiten de gevel uitsteken. Uit de verschillende onderzoeken van onder andere het ministerie van VROM en van de Nationale Woningraad blijkt dat juist dit soort betonconstructies, bijvoorbeeld balkons en galerijen, gevoelig voor betonrot zijn.

Uiteindelijk is de beste preventie een rigoureuze vermindering van de luchtverontreiniging. Voorlopig is dit een illusie, dus zal aangetast beton gerepareerd moeten worden, zolang alle vormen van preventie niet voldoende blijken. Hiertoe moet het aangetaste beton rondom de roestige wapening worden weggekap. Daarna kan een nieuwe deklaag van beton worden aangebracht. Bij complexe constructies en moeilijk bereikbare plaatsen kan men het beton mengen met kunst-harsen. Als betonplaten eenmaal gescheurd zijn, blijft er vaak enige beweging tussen de onderdelen en moeten de scheuren met elastische middelen worden gedicht. De huidige kennis van reparatietechnieken en het effect daarvan op de levensduur van betonconstructies is overigens beperkt en wordt momenteel intensief onderzocht (Van Rooy, 1983).

12. METALEN, PAPIER EN TEXTIEL

Alle waardevolle dingen worden aangetast

Metalen roesten en in ons natte polderland weten we maar al te goed hoe groot de invloed van het klimaat op het roestingsproces kan zijn. Het roesten verloopt onder vochtige omstandigheden en onder invloed van de zoute zeewind zeer snel (Lanting, 1983). Auto's in ons land plegen al te roesten bijna zodra ze uit de showroom komen, in het zonnige Nieuw-Zeeland daarentegen rijden veel auto's na tien jaar nog vlekkeloos rond. Ook strooizout laat onze auto's in de winter hevig roesten, zodat elk krasje in de beschermende lak een voortkankerende roestvlek tot gevolg heeft.

Niet alleen ijzer roest. Edeler metalen kunnen eveneens roesten of anderszins aangetast worden. Ongepoetst zilver wordt al snel zwart. Zwavelwaterstof (H_2S) in de natuurlijke concentraties doet zilver al zwart kleuren. De huidige zwavelwaterstofconcentratie, die ook binnenshuis een belangrijk bestanddeel is van de luchtverontreiniging, is overal hoger dan ze van nature is. Daarom kan men het familiezilver tegenwoordig beter vernissen dan poetsen.

In de buitenlucht zou een metaal in het Europese klimaat overal even erg moeten roesten (alleen nabij de kust kan de zilte zeewind voor extra roestvorming zorgen). Er zijn echter heel grote verschillen tussen de stedelijke of geïndustrialiseerde gebieden en de landelijke streken (Com. EG., 1983). Dit wijst erop dat de roestvorming niet alleen wordt beïnvloed door het natuurlijke klimaat. De snelheid van de corrosie blijkt recht evenredig aan de mate van luchtvervuiling.

Om de verschillen in corrosiesnelheid in de buitenlucht te meten, heeft men op veel plaatsen in Europa windmolentjes opgesteld bestaande uit standaardplaatjes metaal. Om het verschil te meten tussen de aantasting in droge lucht en de corrosie onder invloed van de regen, bestaan deze draaimolentjes uit een boven- en een onderstuk. Het onderste deel zit onder een afdakje en het bovenste deel steekt daarbovenuit.

Sulfaatpartikeltjes blijken een grote rol te spelen bij de aantasting. Ze kunnen zelf het metaal of de beschermende laag aantasten, maar ze kunnen ook, net als strooizout, vocht aantrekken. De sulfaatdeeltjes vormen niet alleen condensatiekernen voor vocht, maar ook voor andere luchtverontreinigende stoffen.

Door de elektrochemische werking van deze deeltjes roest het oppervlak niet gelijkmatig, maar ontstaat er putcorrosie. Ook in haarscheurtjes verloopt het corrosieproces versneld.

Corrosie door SO₂

De aantasting van metalen is slechts voor een deel van de economisch belangrijke metaalsoorten onderzocht. Het meeste onderzoek is gedaan naar de aantasting door zwaveldioxide (SO₂) van zink en ijzer. Deze beide metalen worden namelijk zeer veel in de openlucht toegepast en zijn direct blootgesteld aan de luchtvervuiling. Het versnelde aantastingsproces blijkt in alle landen van Europa voor miljoenen guldens schade te zorgen. In de media verschenen onlangs berichten dat tal van spoorrails in de meest vervuilde delen van Polen zo hevig zijn verroest dat treinen niet langer veilig kunnen rijden. Ook is de corrosie onderzocht van ijzer met een beschermende verlaag of zinkcoating (Env. '82 Com). Corrosie ten gevolge van luchtverontreiniging aan andere metalen, zoals aluminium, koper, nikkel, tin, lood, zilver en goud, is veel minder onderzocht. Lang heeft men namelijk gedacht dat deze schade van weinig betekenis was. Zoals vaak berust deze veronderstelling juist op gebrek aan onderzoek. Naarmate het onderzoek namelijk vordert, blijkt steeds meer dat vele metalen kunnen worden aangetast. Hoe snel de schadeontwikkeling kan lopen toont de pas enkele jaren oude aluminiumgevel van de Koninklijke Bibliotheek in Den Haag, waaraan reeds ernstige corrosie is geconstateerd, met name langs de naden, die als verzamelpunten voor vuil en vocht werken.

Corrosie door NO_x

Niet alleen zwaveldioxide blijkt corrosief te zijn. Stikstofdioxide (NO_x) is weliswaar minder corrosief dan SO₂, maar schijnt de corroderende werking van SO₂ te versterken. Onlangs is bijvoorbeeld uit laboratoriumstudies gebleken dat carbonylsulfide (COS) de corrosie van koper bevordert in een mate die vergelijkbaar is met zwavelwaterstof (H₂S, de bekende rotte-eierenlucht). Carbonylsulfide en zwavelwaterstof komen als luchtverontreiniging binnenshuis voor. Deze stoffen kunnen door hun corrosieve werking een storende invloed hebben op fijne elektrische circuits. Hoewel hier slechts sprake is van een minime hoeveelheid beschadigd materiaal, kan toch ernstige schade ontstaan. Storingen in elektrische circuits hebben namelijk altijd een enorm effect wat het verlies aan manuren betreft, en arbeidsuren zijn in onze maatschappij heel kostbaar. In het computertijdperk zijn elektrische storingen beslist desastreus. Veel elektrische contacten worden daarom uit voorzorg al uit goud of platina gemaakt, maar ook die edele metalen kunnen de storing door vervuiling niet voor 100% voorkomen. De kosten van deze preventie moeten voor een deel

worden opgevat als schade door luchtverontreiniging.

Het roesten, ofwel de corrosie, van de metalen zink, aluminium, koper, lood en ijzer is een elektrochemisch proces. Wanneer de metalen na productie aan de lucht worden blootgesteld, vormt zich aan de oppervlakte een roestlaagje. Roest is de verbinding van het metaal met de zuurstof uit de lucht. De oxiden (een oxide is een chemische verbinding met zuurstof) die bij dit normale corrosieproces ontstaan, zijn halfgeleidende stoffen. Hierdoor wordt het elektrochemische proces beïnvloed en de elektrochemische roestvorming vertraagd; op zink en aluminium wordt de roestvorming vrijwel volledig stopgezet. Op zink ontstaat direct na de productie een heel dun laagje zinkoxide (ZnO) en zinkcarbonaat. Op aluminium vormt zich een laagje aluminiumoxide (Al_2O_3).

In vocht opgeloste zouten (bijv. gips en strooizout) en zuurvormende stoffen uit de luchtverontreiniging kunnen ook elektriciteit geleiden en zij beïnvloeden dus de roestvorming. De elektrochemische aard van het roesten heeft soms merkwaardige gevolgen. Wanneer men een bliksemafleider zonder goede aarding verbindt met een naar buiten stekend stuk staal van de betonwapening, blijkt de wapening door het geringe maar constante spanningsverschil opvallend snel te roesten. De precieze werking en de rol van zouten, gevormd door het beton en de luchtverontreiniging, zijn echter niet goed bekend.

Op nieuw zink vormt zich met de zuurstof uit de lucht snel een beschermende laag (patina) van zinkoxide. Zink bedekt met zinkoxide is uitstekend bestand tegen corrosie. Dit geldt ook voor gegalvaniseerd staal (dwz. staal waarop men elektrolitisch een laagje zink heeft aangebracht). Er kan zich met het koolzuur uit de lucht ook zinkcarbonaat vormen, dat eveneens een beschermende werking heeft. Voor deze metalen wordt daarom traditioneel geen verf of coating toegepast.

Zwavedioxide verstoort de stabiliteit van het Zn-ZnO_2 -systeem. Zinkoxide vormt met sulfaat gemakkelijk het oplosbare zinksulfaat (ZnSO_4). Ook het zinkcarbonaat wordt door zure regen afgespoeld. Hierdoor begint de vorming van zinkoxide opnieuw. Dit geeft echter geen bescherming meer, omdat ook de omzetting naar zinksulfaat een doorgaand proces is. In schone lucht heeft men in twee jaar geen gewichtsvermindering aan plaatjes ongeverfd zink kunnen meten. Bij blootstelling aan lucht met zwavedioxide was de gewichtsachteruitgang echter binnen een jaar meetbaar. Het gewichtsverlies blijkt recht evenredig te zijn aan de concentratie zwavedioxide in de lucht. Dit gegeven is in Engeland gehanteerd om de vervuiling in kaart te brengen. Omdat dezelfde aantasting plaatsvindt bij gegalvaniseerd staal, moet zowel zink als gegalvaniseerd staal voor duurzame toepassingen beschermd worden. Dit kan door middel van een zinkfosfaatcoating, met

luchtverontreiniging veel beter absorbeert dan het oorspronkelijke ongeverfde oppervlak.

In den regel is het te verven oppervlak al met sulfaat- en nitraatzouten verontreinigd en dan vormt de verf bij het opbrengen geen gesloten laag. Bij het schilderen valt dit niet op, omdat zowel de verontreiniging als de gevolgen daarvan voor de verf, niet met het blote oog zichtbaar zijn.

Zwavel dioxide heeft vooral effect op verven die aluminium- of magnesiumsilicaten bevatten. Deze verf heeft vrij lange tijd nodig om te drogen en te harden. De degradatie van de verf treedt vooral op door vocht en chloride-ionen (o.a. afkomstig van vuilverbrandingsinstallaties bij de verbranding van plastics).

De schade aan cultuurgoederen is niet te schatten

De aantasting van materialen, en daarmee de aantasting van monumentale gebouwen, oudheidkundige voorwerpen en archieven, door luchtverontreiniging is al een kleine honderd jaar bekend. Deze aantasting heeft, hoewel de schade enorm is, volgens het Instituut voor Milieuvraagstukken van de Vrije Universiteit, tot nu toe niet de aandacht gekregen die ze verdient. De bekendheid is beperkt gebleven tot een klein aantal deskundigen.

Door de meeste direct betrokkenen (architecten, monumentenverzorgers, bibliothecarissen en conservatoren) worden de effecten onder de vage noemer 'verwering' gerangschikt. Men acht de effecten van temperatuur- en vochtigheidsverschillen veel belangrijker. Hieraan werkt mee dat sommige effecten al vóór de industriële revolutie in de toen al verontreinigde steden optraden.

In hoeverre de effecten ten gevolge van de industriële revolutie zijn veranderd, is moeilijk na te gaan, want er is niemand meer die de situatie heeft zien veranderen. Men heeft deze vorm van aantasting daarom altijd normaal gevonden en in ons land is er heel weinig onderzoek naar gedaan.

Door het onthutsende gebrek aan gegevens is het heel moeilijk de omvang van de schade te schatten. Daar komt nog bij dat alleen de werkelijk gemaakte herstelkosten goed zijn te achterhalen. Het verlies van niet herstelde monumenten of museumvoorwerpen is niet goed in geld uit te drukken. Kunstzinnige of historische waarde kan nu eenmaal niet in harde guldens worden weergegeven.

Door restauraties verliezen gebouwen en historische voorwerpen onvermijdelijk iets van hun oorspronkelijkheid en ook het verlies aan oorspronkelijkheid is niet in geld uit te drukken. Ondanks de genoemde beperkingen hebben het Instituut voor Milieuvraagstukken en TNO

geprobeerd de schade in guldens te schatten door de cultuurhistorische waarde buiten beschouwing te laten.

Een goede schatting kan niet gedaan worden op basis van de werkelijk verrichte restauraties. Het bedrag daarvan is namelijk uitsluitend afhankelijk van de hoogte van de subsidie uit de rijksbegroting. Een betere aanwijzing geeft de aangemelde restauratiebehoefte. Deze bedraagt in Nederland bijna één miljard gulden en staat in geen verhouding tot het beschikbare budget. Ook hier spreekt men van 'het stuwmeer van achterstallige restauraties'.

Het is de vraag of de hoeveelheid aanmeldingen niet afneemt met het beschikbare budget. Wanneer een gemeente of een andere instantie de beperkingen van de beschikbare subsidies al kent, zal wellicht eerst gezocht worden naar oplossingen in eigen beheer. Deze oplossingen tasten vaak het historisch karakter van het monument of voorwerp aan. Het kan in het geval van een gebouw ook betekenen dat het wegens te groot verval alsnog onder de slopershamer komt.

Aantasting van textiel

Mode herhaalt zich. Nylonkousen zijn weer 'in' bij de jeugd. Dus, nylons ladderen als vanouds of er komen haaltjes aan. De ragdunne nylons zijn zeker de kledingstukken die het snelst door de zure luchtverontreiniging worden aangetast. Gelukkig hoeft niemand bang te zijn dat tijdens een smogalarm de kousen plotseling in flarden om de welgeschapen benen hangen. Hoe snel schade ontstaat is niet bekend. Door het normale gebruik zijn nylons al versleten lang voordat de aantasting door zwavel- of stikstofoxiden merkbaar is en duurzamer nylon kledingstukken door de mode achterhaald vóór de luchtverontreiniging haar funeste werk heeft gedaan.

Schade aan textiel is alleen dan van belang als sprake is van een zeer lange gebruiksduur. De katoenen windsels van farao Toetanchamon hebben dertig eeuwen doorstaan, maar na enige decennia aan de kwade dampen van onze welvaartsmaatschappij te zijn blootgesteld, dreigen deze weefsels onherroepelijk uiteen te vallen.

Uit deze twee voorbeelden is duidelijk dat we de schade aan textiel, evenals schade aan papier en leer, in de eerste plaats moeten zoeken bij de zogenaamde cultuurgoederen. Textiel dus van grote esthetische of historische waarde, dat we voor het nageslacht willen bewaren.

Veel van dit historisch textiel is door luchtverontreiniging aangetast en alleen kostbare restauraties kan het redden. Een groot deel van het aangetaste textiel kan helaas niet meer worden hersteld. Trouwens, door een te ingrijpende restauratie wordt volgens sommigen het oude

geprobeerd de schade in guldens te schatten door de cultuurhistorische waarde buiten beschouwing te laten.

Een goede schatting kan niet gedaan worden op basis van de werkelijk verrichte restauraties. Het bedrag daarvan is namelijk uitsluitend afhankelijk van de hoogte van de subsidie uit de rijksbegroting. Een betere aanwijzing geeft de aangemelde restauratiebehoefte. Deze bedraagt in Nederland bijna één miljard gulden en staat in geen verhouding tot het beschikbare budget. Ook hier spreekt men van 'het stuwmeer van achterstallige restauraties'.

Het is de vraag of de hoeveelheid aanmeldingen niet afneemt met het beschikbare budget. Wanneer een gemeente of een andere instantie de beperkingen van de beschikbare subsidies al kent, zal wellicht eerst gezocht worden naar oplossingen in eigen beheer. Deze oplossingen tasten vaak het historisch karakter van het monument of voorwerp aan. Het kan in het geval van een gebouw ook betekenen dat het wegens te groot verval alsnog onder de slopershamer komt.

Aantasting van textiel

Mode herhaalt zich. Nylonkousen zijn weer 'in' bij de jeugd. Dus, nylons ladderen als vanouds of er komen haaltjes aan. De ragdunne nylons zijn zeker de kledingstukken die het snelst door de zure luchtverontreiniging worden aangetast. Gelukkig hoeft niemand bang te zijn dat tijdens een smogalarm de kousen plotseling in flarden om de welgeschapen benen hangen. Hoe snel schade ontstaat is niet bekend. Door het normale gebruik zijn nylons al versleten lang voordat de aantasting door zwavel- of stikstofoxiden merkbaar is en duurzamer nylon kledingstukken door de mode achterhaald vóór de luchtverontreiniging haar funeste werk heeft gedaan.

Schade aan textiel is alleen dan van belang als sprake is van een zeer lange gebruiksduur. De katoenen windsels van farao Toetanchamon hebben dertig eeuwen doorstaan, maar na enige decennia aan de kwade dampen van onze welvaartsmaatschappij te zijn blootgesteld, dreigen deze weefsels onherroepelijk uiteen te vallen.

Uit deze twee voorbeelden is duidelijk dat we de schade aan textiel, evenals schade aan papier en leer, in de eerste plaats moeten zoeken bij de zogenaamde cultuurgoederen. Textiel dus van grote esthetische of historische waarde, dat we voor het nageslacht willen bewaren.

Veel van dit historisch textiel is door luchtverontreiniging aangetast en alleen kostbare restauraties kan het redden. Een groot deel van het aangetaste textiel kan helaas niet meer worden hersteld. Trouwens, door een te ingrijpende restauratie wordt volgens sommigen het oude

textiel gewoon door nieuw vervangen. Het gerestaureerde stuk is eigenlijk niet meer het origineel maar een reproductie.

Het meeste onderzoek naar het effect van luchtverontreiniging op textiel heeft betrekking op zogenaamd gebruikstextiel, maar er zijn geen harde uitspraken te formuleren over de omvang van de schade. In onze consumptiemaatschappij worden de meeste kleren afgedankt lang voordat ze versleten zijn. Hoewel luchtverontreiniging het verouderingsproces versnelt, is dit alleen als schade aan te merken voor textiel dat langdurig wordt gebruikt.

De invloed van luchtverontreiniging op gebruikstextiel is in verontreinigde gebieden goed waargenomen aan gordijnen. De gordijnen voor open vensters fungeren als filters voor de binnenkomende lucht. De gordijnstof is met name doorlatend op de vouwen en hier dringen de zure stoffen diep door in de weefsels. Het karakteristieke effect is daarom: scheuren op de vouw.

Vezels vallen uiteen

Natuurlijke textielvezels kunnen in twee grote groepen worden onderscheiden: cellulosevezels, zoals katoen en linnen, en eiwitvezels, zoals wol en zijde. Veel kunstvezels vertonen chemisch verwantschap met de laatste groep. Ze bestaan vaak uit polyamiden, dat wil zeggen kunstmatige ketens van aminozuren. Aminozuren zijn ook de bouwstenen van eiwit en dus van natuurlijke eiwitvezels. Cellulosehoudende textielvezels, zoals katoen, vertonen chemisch overeenkomst met papier. Immers papier van goede kwaliteit bestaat

Fotos verhuisd na pagina 271 Boven: Als het bos bijna gestorven is wordt het gekapt, wellicht voor de laatste maal. Dan blijft een grasvlakte bedekt met enkele zuurtolerante grassen over. Het hout wordt geoogst voordat er allerlei houtkevers en schimmels in komen. Daarom wordt het schadebeeld in de bossen nooit erger. Alle aangetaste bomen worden immers in tempo weggezaagd. Herplant is waarschijnlijk weinig zinvol.

Links: Uit de jaarringen kan men de geschiedenis van de gezondheid aflezen. Als een boom ouder dan 15 jaar is hoort de dikte van de jaarringen vrijwel constant te blijven. In 'grote delen van West-Europa nam tot de Tweede Wereldoorlog de dikte geleidelijk af. Toen de Europese industrie zo goed als vernietigd werd nam de dikte weer toe. In de jaren zestig en zeventig nam de dikte drastisch af en de laatste jaarringen zijn slecht met een microscoop terug te vinden.

Rechts: Een onderzoeksofstelling van de Universiteit van Göttingen in de beukenbos-sen van de Solling. Al sinds de jaren zestig worden metingen verricht naar de samenstelling van het regenwater. Daarbij wordt nagegaan hoe de zuurgraad en de ionenbalansen van het water veranderen bij de tocht door het kronendak en de bodem. Op grond van deze metingen kwam men al lang geleden tot de conclusie dat bossterfte onvermijdelijk was.

bijna geheel uit cellulosevezels. Dit is de reden dat in vroeger eeuwen papier van textiel werd gemaakt. In de papiermolens verwerkte men lompen tot papier. Van de losgeklopte en gebleekte textielvezels werd een waterige pap gemaakt. Deze vezelige brij goot men egaal uit over een vlakke zeef. Nadat het water uit de pap gelekt was, bleef een vezelige laag over. Deze laag werd gedroogd tot papier. Toen het drukwerk gemeengoed werd, ontstond een groot tekort aan lompen. Het leek wel of men liever boeken dan nieuwe kleren kocht. Het tekort aan afgedankte kleren nam in de vorige eeuw zulke proporties aan dat het in Engeland ongepast was om overledenen in hun kleren te begraven. Om in het tekort aan grondstof voor de papierindustrie te voorzien, werden zelfs de windsels van Egyptische mummies met scheepsladingen tegelijk naar Engeland verscheept.

Omdat papier, linnen en katoen cellulosevezels bevatten, is het voor de hand liggend dat ook deze stoffen door luchtverontreiniging kunnen worden aangetast. Er zijn twee mogelijke processen waardoor zure lucht cellulosevezels kan aantasten. In de eerste plaats bevordert licht de aantasting van cellulosevezels door zuurstof. Men noemt dit fotochemische afbraak. Verontreiniging kan dit oxidatieproces bevorderen. In de tweede plaats bestaan cellulosevezels uit lange ketens moleculen. De zure luchtverontreiniging kan de chemische verbindingen tussen deze moleculen verbreken. Door deze zogenaamde hydrolyse vallen de celluloseketens in brokstukken uiteen. De vezels verliezen hun treksterkte. In het normale spraakgebruik zegt men dat het textiel 'gaar' wordt en het papier 'bros'. In welke mate deze beide processen een rol spelen is een wetenschappelijk omstreken zaak, maar ongeacht het mechanisme wordt zwaveldioxide

Fotos verhuisd na pagina 271 Boven: De gezondheid van bomen uit zich vaak in de hoeveelheid bladgroen. Verschillende groentinten zijn voor het blote oog echter lastig te schatten. Met behulp van infrarood fotografie kan men gemakkelijk de kleine verschillen in groentinten vertalen in willekeurige contrastrijke kleuren. Met behulp van dergelijke luchtfoto's kan de gezondheid van hele boscomplexen in een oogopslag bepaald worden. Op deze foto van het IPO neemt de gezondheid af in de volgorde donkergroen, lichtgroen, oranje en rood.

Links: Een groot aantal verkleuringen zijn wel direct zichtbaar. De gele kleur van deze dennetak ontstaat door uitspoeling van kalium en magnesium. Wanneer de aantasting te ver gaat sterven de naalden en worden bruin. Onder gunstige omstandigheden kunnen de naalden na enige tijd weer groen worden doordat via de wortels weer het nodige kalium en magnesium wordt opgenomen.

Rechts: De bast van een gezonde beuk is zilverig glad. De aangetaste beuk vertoont openbarstende putjes en barstjes, tenslotte gaat de bast scheuren. Waar de bast is verdwenen tracht de boom deze te overwallen met wondweefsel. Wanneer dit niet lukt kan schimmel de stam gemakkelijk aantasten. Het is al heel lang bekend dat de chronische aantasting samenhangt met een hoog aluminiumgehalte in de bodem.

algemeen als een belangrijke factor beschouwd.

Het Laboratorium voor Textieltechnologie van de Technische Hogeschool in Delft heeft de invloed van zwaveldioxide, stikstofoxiden en ozon op de veroudering van katoen, linnen en wol onderzocht. Men kwam echter tot de conclusie dat de afbraaksnelheid van textiel, zelfs onder bekende omstandigheden, nauwelijks valt te voorspellen. De invloed van luchtverontreiniging was wel meetbaar maar veel kleiner dan de invloed van licht op de veroudering van textiel.

Bij de veroudering van textiel door zwaveldioxide en stikstofoxiden bleek de afbraak van celluloseketens te resulteren in oplosbare afbraakprodukten. Dit proces heeft van nature altijd plaatsgevonden maar lijkt tegenwoordig versneld. Katoen en linnen van 50 tot 3000 jaar bleken voor 2% tot 15% (gewichtspcenten) te bestaan uit oplosbare afbraakprodukten. Omdat deze afbraakprodukten bij het wassen meteen zouden oplossen, moet men historisch textiel niet wassen, tenzij er een heel goede reden voor bestaat. Het is dus belangrijk om te voorkomen dat dit soort textiel vuil wordt en dat stelt weer eisen aan de wijze van bewaring.

Verkleuring van textiel

Jarenlang hebben wasmiddelenfabrikanten hun produkten trachten te slijten door te wijzen op de zogenaamde vergeler in het wasmiddel van de concurrent.

De meeste vergeling wordt veroorzaakt door chemische reactie tussen luchtverontreiniging en witmakers en wasverzachters. Bij hoge luchtvochtigheid ontstaan gele nitroverbindingen. Ook nylon en elastische polyurethaanvezels vergelen op deze wijze en wol verliest bij hoge stikstofdioxideconcentraties (1 ppm) circa 10% van zijn witheid. Stikstofdioxide kan ook kleurstoffen doen verbleken. Dit proces wordt eveneens veroorzaakt doordat veel kleurstoffen eiwitachtige verbindingen bevatten, zogenaamde aminogroepen. Deze verbindingen kunnen, net als de aminoketens in wol en leer, door stikstofdioxide worden aangetast. De aantasting is alleen van belang voor een beperkte hoeveelheid voornamelijk historisch textiel. Modern textiel wordt namelijk geleverd met kleuren die niet op deze wijze zijn aan te tasten.

Wanneer bepaalde blauwe kleurstoffen reageren met stikstofdioxide, ontstaat een kleuromslag naar rood. Dit probleem heeft zich heel lang voorgedaan doordat synthetische vezels zoals rayon (celluloseacetaat) en polyester zich zeer goed met deze stoffen lieten verven. Bovendien blijken rayon, katoen en nylon in sterke mate NO_x te adsorberen, waardoor de verkleuring in verhevigde mate optreedt. Voor

Nederland zijn hiervoor geen schadecijfers bekend, maar in de Verenigde Staten werd de schade door deze verkleuringen in 1970 geschat op 122 miljoen dollar.

De verkleuring treedt reeds op bij een concentratie van 90 microgram NO_2/m^3 . Behalve de luchtvochtigheid had ook de zwaveldioxideconcentratie een versterkende invloed. Door vernieuwing van de textielkleurstoffen hoort dit verkleuringsprobleem goeddeels tot het verleden.

Een lastig probleem voor de handel is de vergeling van textiel tijdens het transport. Katoen en andere cellulosevezels nemen tijdens het transport en de opslag bepaalde fenolverbindingen op uit het karton of het hout van de verpakking. Stikstofdioxide reageert daarmee onder vorming van helgele nitrosofenolverbindingen. Het helpt niet als de kleren apart in plastic worden verpakt. De helgele nitrosofenol kan ook in de verpakking ontstaan en dringt door het plastic heen. Zo verkleuren de textielvezels alsnog. De vergeling treedt het snelst op in opslagruimten aan drukke verkeerswegen en tijdens smogperiodes (de meeste winkels liggen aan drukke straten); (Lanting, 1983).

Voor de consument is deze vergeling eigenlijk niet hinderlijk. De gele kleurstof lost in water snel op en verdwijnt dus bij de eerste wasbeurt. De bestrijding van het probleem wordt gezocht in het gebruik van fenolvrij verpakkingsmateriaal.

De papieren maatschappij

In onze gecomputeriseerde maatschappij wordt steeds meer informatie bewaard in magnetische geheugens, op schijven of banden. In verhouding tot de informatie die op papier wordt bewaard, is de rol van de magneetgeheugens nog gering. De zogenaamde informatie-maatschappij bestaat nog steeds bij de gratie van het op papier geschreven woord. Miljoenen documenten en boeken worden tientallen, soms honderden jaren bewaard in overvolle archieven.

De houdbaarheid van papier is helaas niet groot. De houdbaarheid van perkament, waarop in zeer vroege tijden de documenten werden geschreven, was in vergelijking tot papier beter. Door de ontwikkeling van de industriële papierproductie op basis van houtpulp nam de kwaliteit van het papier erg af. Alleen door het papier schoon en droog op te slaan bleef het mogelijk kostbare informatie langdurig te bewaren. Tegelijk nam na de industriële revolutie, door het gebruik van fossiele brandstoffen, de luchtverontreiniging toe. Helaas is sindsdien voor papier droog bewaren alleen niet meer voldoende, omdat de vervuiling zich ook in droge lucht tot in alle hoeken en kieren blijkt te verspreiden.

'Het is dweilen met de kraan open,' zegt de heer De Vries, hoofd van de afdeling externe dienstverlening van het Rijksarchief in Friesland. 'We proberen voortdurend de achterstand in de restauratie van archiefstukken weg te werken, maar wat we ook doen, de problemen worden eigenlijk alleen maar groter.' In de droge archiefruimten van het Rijksgebouw in Leeuwarden vergaan langzaam maar zeker honderden meters onvervangbare archiefstukken tot stof. Vooral het unieke archief van de Nedergerechten in Friesland, met stukken uit de periode 1500 tot 1811, is er slecht aan toe. Het cynische is, dat deze stukken, die de eeuwen ongeschonden hebben doorstaan, juist in de laatste twintig, dertig jaar in verval zijn geraakt.

Niet alleen het bijzondere archief van de Nedergerechten, dat maandelijks gemiddeld duizend keer wordt geraadpleegd (er bestaat geen kopie van!), ook andere waardevolle stukken in het Rijksarchief zijn er slecht aan toe (Leeuwarder Courant, 12 juli 1984). Hoewel aanvankelijk werd gedacht aan vocht als oorzaak van het verval, betreft het hier het karakteristieke beeld van aantasting door verzuring, namelijk het bros worden van de pagina's door aantasting van de cellulosevezels. De boeken lijken in de ergste gevallen in schilfers en stof uiteen te vallen.

De organisatie van Fabrikanten van Grafische Eindprodukten (FGE) heeft met bezorgdheid vastgesteld dat er op de planken van archieven, musea en bibliotheken kilometers boeken staan die een opknapbeurt nodig hebben. Volgens de FGE gaat het in ons land om een rij van 200 kilometer boeken. Zestig procent ervan kan volgens deze organisatie als verloren worden beschouwd en de restauratieachterstand wordt steeds groter.

De aantasting van papier is grotendeels een kwestie van verzuring door zwavel- en stikstofdioxiden. Papier kan, afhankelijk van de wijze van produktie, toch al min of meer zuur zijn. Door natuurlijke afbraakprocessen wordt het papier langzaam zuurder. De absorptie van zwaveloxiden en stikstofdioxiden uit de lucht heeft een extra verzuring tot gevolg.

In 1936 werd al geconcludeerd dat papier beneden een zuurgraad van pH 5 ernstig kan worden aangetast. Onderzoekers concludeerden in de jaren zestig dat de zuurgraad van papier niet lager mag zijn dan 6. De schadelijke effecten zijn het eerst waarneembaar aan de randen van de bladzijden, omdat de verzuring van een boek van buiten naar binnen verloopt.

In Nederland is wel de restauratiebehoefte door de FGE geschat, maar tot nu toe is er geen onderzoek naar de gevolgen van luchtverontreinigende stoffen op papier gedaan. De schadelijke werking van deze stoffen wordt echter wel door de Koninklijke Bibliotheek en het Cen-

traal Laboratorium onderkend. Adviezen van het Centraal Laboratorium om de nieuwe gebouwen van het Rijksarchief en de Koninklijke Bibliotheek te voorzien van airconditioning met speciale filters zijn niet opgevolgd. In Engeland zijn deze preventieve maatregelen voor de British Library wel genomen.

Verpulverend leer

Luchtverontreiniging doet leer verpulveren. Dit verschijnsel wordt 'rode rot' genoemd, een even foutieve benaming als 'betonrot', omdat er geen bacteriën of schimmels aan te pas komen. Onder invloed van de zure zwavel- en stikstofverbindingen worden de eiwitvezels in het leer afgebroken. Het leer verliest zijn soepelheid, waardoor scheuren ontstaan. Bij voortgaande aantasting verpulvert het leer. Het verschijnsel werd al in het midden van de vorige eeuw toegeschreven aan zwaveloxiden die vrijkwamen door het verbranden van gas voor de verlichting van de gebouwen. Uit verder onderzoek is gebleken dat de wijze waarop het leer gelooid is in belangrijke mate de schade beïnvloedt. De met metaalzouten gelooide leersoorten vertonen veel minder aantasting dan leer dat met zwavelzuur of plantaardige looimiddelen is bewerkt. Het verval van leer door rode rot kan men, evenals het verval van papier, voorkomen door tijdige ontzuring van het leer.

In vroeger tijden werd een boek als een kostbaar bezit gezien. De waardevolle boeken werden daarom algemeen ingebonden in degelijke leren banden. Voor de min of meer kostbare exemplaren heeft deze mode zich tot ver in de 20ste eeuw gehandhaafd. De aantasting van leer verloopt vrij langzaam en de schade beperkt zich voornamelijk tot leren boekbanden. Er zijn echter heel veel leren boekbanden, alleen al in de musea bijna 11 000. Hoeveel er in totaal in particulier bezit zijn is volledig onbekend. De restauratie of vernieuwing van deze banden vergt een kostbaar vakmanschap en als men het nodig zou vinden alle aangetaste banden te restaureren, zouden de kosten aanzienlijk zijn. Niemand heeft echter een schatting van de schade durven maken.

Behalve leren boekbanden zijn in de musea en in het particuliere antiekbezit nog duizenden andere leren goederen, van leren behang en stoelbekledingen tot oude schoenen.

Schatting van de schade aan historische voorwerpen is alleen mogelijk voor het bezit van musea. Dit is gezien de levendige handel in antiquiteiten maar een fractie van het totaal. Doordat veel kostbare antieke en kunsthistorische voorwerpen geliefde objecten zijn voor de belegging van zwart geld, is de totale omvang van dit

culturele erfgoed niet in een goede statistiek te vangen.

Kosten van herstel en preventie

Op basis van buitenlands onderzoek is de mogelijke schade voor de Nederlandse musea geschat. Voor de cultuurhistorische musea bedroeg de geschatte behoefte aan conserverende behandeling voor textiel 1400 arbeidsjaren en voor papier 2500 arbeidsjaren. De conservering van papier in de overheids- en openbare archieven zou 26000 manjaar vergen, de restauratie 49000. In deze schatting zijn niet de bibliotheken betrokken, hoewel het papierbestand in bibliotheken ongeveer even groot is als in de archieven.

Volgens de Vrije Universiteit zou men ervan kunnen uitgaan dat de schade aan textiel voor 40% en aan papier voor 20% moet worden toegeschreven aan luchtverontreiniging. De totale schade door luchtverontreiniging kan alleen al voor de directe arbeidskosten voor herstel worden becijferd op 640 miljoen gulden. Zonder beperking van de luchtverontreiniging kan na een aantal jaren weer een dergelijke behandeling noodzakelijk zijn.

De kosten van schadepreventie voor leer, boeken en archieven zijn te schatten op basis van de kosten van ontzuring. Deze schatting laat zich wel maken voor overheidsarchieven, bibliotheken en musea, maar niet voor het particuliere boekenbezit.

Onderzoekingen in de Verenigde Staten hebben geleid tot twee methoden waarmee op grote schaal papier met behulp van begassing kan worden ontzuurd. De ene methode maakt gebruik van diëthylzink, de andere van morfoline. De methode met morfoline is snel en relatief goedkoop. De behandeling duurt twee uur en kost volgens berekeningen van het Centraal Laboratorium voor Onderzoek van Voorwerpen van Kunst en Wetenschap f 5,70 per boek en f 200,— per strekkende meter archiefmateriaal. Daarbij komen nog btw en licentie-, organisatie- en transportkosten, die ongeveer 30% van de totale kosten uitmaken.

De diëthylzinkmethode heeft een permanent effect. De behandeling vergt echter drie dagen, waardoor het een zeer dure methode is. De methode verkeert nog in het ontwikkelingsstadium.

Het totale papierbestand in musea, archieven en bibliotheken (Koninklijke Bibliotheek, Universiteits- en HBO-bibliotheken en enkele speciale bibliotheken) bedraagt circa 30 miljoen boeken en 200000 strekkende meter archiefmateriaal. De totale kosten van de preventieve ontzuring bedragen zonder de genoemde extra kosten van transport en dergelijke 210 miljoen gulden. De behandeling met morfoline zou bij het huidige niveau van de luchtverontreiniging elke 30 jaar moeten

worden herhaald. Inclusief de bijkomende kosten bedragen de preventiekosten dan 10 miljoen gulden per jaar (Feenstra, 1982).

Aantasting van kerkklokken en beiaarden

Kerkklokken hebben voor de Nederlander een grote belevingswaarde. De sfeer van een grote stad als Amsterdam komt pas echt tot zijn recht, als een van de vele carillons zijn heldere klanken laat horen. Een van de mooiste en bekendste carillons is de Hemony-beiaard van het paleis op de Dam. Een zondag krijgt pas echt zijn zondagssfeer als in de stille ochtend de talloze luidklokken hun diepe en rustige tonen over stad en platteland galmen. Bij doop en begrafenis kondigt klokgelui het begin en het einde van het leven aan.

Sommige onderzoekers beginnen te twifelen aan de duurzaamheid van de klokken. De tonen werden de laatste tientallen jaren snel lager en vaak vals. Zure regen bleek de klokken te hebben aangetast. Wat Amerikanen, op zoek naar hun wortels in Europa, horen bij het paleis op de Dam is niet meer het carillon dat in het geheugen van de eerste Hollandse kolonisten bleef natingelen. Die klokken liggen al veilig in de kelder en zijn vervangen door namaak.

In Nederland zijn veertig carillons van uitzonderlijke historische waarde. Hieronder zijn drieëntwintig min of meer volledige Hemony-beiaarden uit de 17de eeuw. De beiaarden van François en Pieter Hemony zijn beroemd om hun zuivere stemming en klankrijkdom. Tot in onze eeuw zijn klokkengieters zelden in staat geweest deze perfectie te evenaren. Bij de vele carillons van mindere kwaliteit valt enige achteruitgang in muzikale zuiverheid niet op. De waargenomen onzuiverheid en de afnemende muzikale kwaliteit van de Hemony-beiaarden in de laatste zeventig jaar zijn echter aanleiding geweest voor een onderzoek (Feenstra, 1982).

Het blijkt dat de ongelijkmatige corrosielaag op de klokken een heel andere samenstelling (koper 41%, tin 12%, chloor 6%, verder zwavel, roet en vuil) en structuur heeft dan het klokkebrons (koper 79%, tin 19% en 2% andere metalen zoals zink en lood). De corrosielaag laat de trilling van de klokwand vroegtijdig dempen.

Als een gevolg van het trillen van de klokwand verliest de corrosielaag de hechting met het brons. Er kan zich daardoor niet zoals bij andere bronzen voorwerpen een min of meer beschermende laag, het patina, vormen, maar door het loslaten van delen van het patina gaat de corrosie verder. De gewichtsvermindering ten gevolge van het loslaten van stukken patina leidt logischerwijze tot vermindering van de wanddikte van de klok. Hierdoor daalt de toon. Doordat de wanddikte procentueel het snelst afneemt bij kleine klokken, dalen die het meest

in toon. Voor een beiaard heeft dit niet alleen tot gevolg dat alle tonen lager worden, maar ook dat de toonintervallen groter worden.

In 1951 en in 1974 zijn uitgebreide klankanalyses uitgevoerd aan de Hemony-beiaard in de Utrechtse Domtoren. De klankanalyses van 1951 laten een nog vrijwel ongeschonden beeld zien. Gedurende drie eeuwen is er geen aanwijsbare verandering opgetreden bij de uit 1664 stammende beiaard. In 1974 bestaat er echter tussen de bas-octaaf en het middenregister een gemiddelde octaafverkorting van vier cents en tussen het middenregister en de discant van acht cents. De waargenomen corrosie moet dus grotendeels in de tussenliggende kwart eeuw hebben plaatsgevonden.

Bij de beiaard in de 'Olle Grieze', de Martinitoren in de stad Groningen, is een zelfde verschijnsel aangetoond. Hier wezen analyses van metingen in 1962 en 1982 uit dat corrosie de klanken van deze klokken pas de laatste decennia heeft aangetast. Na een kostbare restauratie (377 000 gulden) waarvoor het geld voor een belangrijk deel door Groningens bevolking was bijeengebracht, zijn de 43 klokken in augustus 1984 weer in gebruik genomen (NvhN, 1983).

Er zijn ook enkele toevallige kleine aanwijzingen dat de aantasting pas in deze eeuw ernstig is geworden. Bij het schoonmaken van de beiaard uit de toren in Oudewater, gegoten in 1601 door Gerrit Both, bleek onder de witte verf van een in 1849 aangebrachte naam de klokwand nog gaaf te zijn. Ook dit wijst erop dat de aantasting in de laatste eeuw groter is geweest dan in de drie eeuwen daarvoor.

Door het uitdraaien van de binnenwand kunnen klokken opnieuw worden gestemd. Dit is een kostbaar karwei en het kan maar enkele (hoogstens vier) malen gebeuren. Daarna wordt de wand te dun. Het herstemmen van de klokken heeft daarom alleen zin als de luchtverontreiniging effectief wordt bestreden, of als de klokken worden beschermd tegen verdere aantasting. Immers, als het herstemmen elke 25 jaar moet gebeuren, kan dat voor de laatste maal in 2050. Daarna is dit culturele erfgoed voorgoed bedorven. Uit voorzorg zijn enkele beroemde beiaarden, bijvoorbeeld de Hemony-beiaard van de Nieuwe Kerk te Delft, opgeslagen en vervangen door kopieën.

De klokken kunnen tegenwoordig worden beschermd met een middel dat voor 66% bestaat uit paraffines, voor 30% uit naftenen en voor 4% uit aromaten.

De kosten verbonden aan de restauratie van beiaarden kunnen sterk verschillen. Grote klokken zijn zeer moeilijk van hun plaats te halen, zodat alleen al het vervoer een omvangrijk en kostbaar karwei is. Als grof geschat gemiddelde voor een totale restauratie van een klokken-spel kan 200 000 gulden worden aangehouden. Voor grote klokken-spelen, zo is gebleken, zal dit bedrag moeten worden verdubbeld.

Men schat dat de helft van deze kosten moet worden toegeschreven aan de gevolgen van luchtverontreiniging. Elk jaar worden er twee à drie beiaarden gerestaureerd. Bij de gerestaureerde, maar ook bij de overige beiaarden kan verdere aantasting worden vertraagd door een jaarlijkse of halfjaarlijkse onderhoudsbeurt met het beschermende middel op paraffinebasis.

Gebrandschilderde ramen

De schoonheid van veel kerken wordt voor een groot deel bepaald door de rijkdom aan gebrandschilderde ramen. In het buitenland, met name in Frankrijk, Duitsland en Engeland, heeft de aantasting van gebrandschilderd glas veel aandacht gekregen. Bij de restauraties van de cultuurhistorisch waardevolle gebrandschilderde ramen van York (Engeland), Chartres (Frankrijk) en Augsburg (Duitsland) is geconstateerd dat deze kunstvoorwerpen de laatste 30 tot 50 jaar versneld zijn gecorrodeerd.

In Nederland blijkt de schade aan gebrandschilderd glas kleiner dan in het buitenland, niet doordat de luchtverontreiniging hier minder is toegenomen, maar omdat er in ons land bijna geen ramen uit de 15de eeuw of eerder zijn.

Het meeste oude glaswerk bevindt zich in de Sint-Janskerk te Gouda. Het ontbreken van kennis op dit gebied en de waargenomen aantasting van de 2000 m² Goudse glazen waren voor het Centraal Laboratorium voor Onderzoek van Voorwerpen van Kunst en Wetenschap en de Rijksdienst voor Monumentenzorg aanleiding om een internationaal congres over dit onderwerp te organiseren. Hierdoor trachtte men de kennisachterstand in te halen, met het doel onherstelbare schade zoals die in het buitenland reeds was geconstateerd te voorkomen.

Het middeleeuwse glas was van een andere samenstelling als het glas uit de 16de eeuw of later. Glas bestaat namelijk niet alleen uit gesmolten kwarts; voor de produktie van glas worden aan het zuivere kwartzand verschillende stoffen toegevoegd, al naar gelang van het soort glas dat men wil produceren.

Het middeleeuwse glas blijkt bij luchtverontreiniging gevoeliger te zijn voor putcorrosie en vergipsing dan het latere glas, wat leidt tot een witte aanslag op het glas. Bij de aantasting blijft wel de kleur van het glas, maar de tekening (de grisaille) erop verdwijnt. Uit de gezichten van de uitgebeelde heiligen verdwijnt op den duur alle tekening van mond, ogen, neus en andere gelaatstreken. Dergelijke hoofden heeft men de bijnaam 'ballonhoofden' gegeven.

Het middeleeuwse glas bestaat uit siliciumdioxide (kwarts) en ver-

schillende metaaloxiden. Door het smelten van het kwarts worden de bestanddelen samengevoegd, waardoor na afkoeling en stolling het glas ontstaat. Dit glas is opgebouwd uit een onregelmatig netwerk van silicium-zuurstofverbindingen. De metaal-ionen zijn in de holten van dit netwerk geperst en verhinderen de herkristallisatie van het silicium (door kristallisatie zou het glas namelijk zeer bros en kwetsbaar worden).

De metaaloxiden veranderen het smeltpunt en geven ook kleur aan het glas. Toevoeging van loodoxide (PbO) verlaagt het smeltpunt en verhoogt de lichtbreking (om wille van deze fraaie lichtbreking bevatten kristallen drinkglazen een zeer hoog percentage lood). Cobalt-oxide (CoO) kleurt het glas blauw, koperoxide (CuO) groen, mangaandioxide (MnO_2) en ijzeroxide (Fe_2O_3) kleuren het geel. Ook bevat het glas bepaalde percentages oxiden van alkalimetalen, calciumoxide (CaO), dinatriumoxide (Na_2O) en dikaliumoxide (K_2O). Dit glas werd bedekt met brandverf (grisaille) en emailverf.

Doordat gebrandschilderd glas uit verschillende lagen glas en schildering in diverse kleuren bestaat, maken de verschillen in materiaalspanning en in uitzetting door temperatuurwisselingen het glas enigszins instabiel. Op den langen duur ontstaan er kleine haarscheurtjes, die zich verbreden en vergroten en een aangrijpingspunt vormen voor corrosieve aantasting.

De chemische aantasting vindt alleen plaats als er water aanwezig is op het glas. Dit kan zowel regenwater als condens zijn. De metaal-ionen en alkalimetaal-ionen zijn niet met sterke chemische bindingen aan een kristalrooster gebonden en kunnen gemakkelijk uit het glas worden losgemaakt. De meeste onderzoekers zijn het erover eens dat door de etsende werking van de zuurvormende stoffen ionen van de alkalimetalen naar buiten diffunderen, waarbij, om de elektrische neutraliteit te handhaven, waterstof-ionen het glas naar binnen diffunderen. Met behulp van een microscoop is een scherpe grens te zien tussen het onaangetaste glas en het verwaterde glas. Het sulfaat vormt met de naar buiten gediffundeerde natrium-, kalium- en calcium-ionen een gipsachtige aanslag op de ramen. De gevoeligheid van het glas voor de aantasting is sterk afhankelijk van het percentage oxiden van alkalimetalen. Bij een hoog alkaligehalte is de gevoeligheid voor aantasting groter dan bij een laag alkaligehalte. Met name het middeleeuwse glas is gevoelig.

Door de Rijksdienst voor Monumentenzorg is een inventarisatie gemaakt van de gebrandschilderde glazen in Nederland, daterend van voor 1800. De totale oppervlakte bedraagt circa 4400 m², waarvan 2000 m² in de Sint-Jan te Gouda.

Bio-erosie en zure regen

Bij bio-erosie spelen bacteriën en schimmels een belangrijke rol. Deze micro-organismen kunnen agressieve zuren produceren en het oppervlak van schilderwerk en gesteenten binnendringen. Hierdoor wordt het materiaal poreus, waarna het des te kwetsbaarder is voor verdere aantasting.

Luchtverontreiniging tast niet alleen direct materialen aan maar ook indirect door het bevorderen van de bio-erosie. Luchtverontreiniging bevat namelijk tal van stoffen die als meststof of als bron van energie, als voedsel, kunnen dienen voor gespecialiseerde bacteriën.

De afzetting van verontreinigende stoffen wordt bevorderd door de stofwisseling van bepaalde groepen micro-organismen. Deze organismen gebruiken de stoffen uit de luchtverontreiniging als voedingsbodem en tijdens hun ontwikkeling tasten ze het materiaal aan dat hun als ondergrond dient. In dit geval kunnen metalen oppervlakken gaan roesten en in steenachtig materiaal kunnen scheurvorming en erosie optreden. Dit procédé is complex en kan worden gescheiden in bio-chemische en mechanische werking.

Het door micro-organismen veroorzaakte biochemische proces van aantasting is lang niet zo goed bekend als de chemische aantasting. Het bestaan van de biochemische aantasting is wel al tientallen jaren wetenschappelijk aangetoond, maar het is nog niet mogelijk precieze uitspraken te doen in welke mate micro-organismen bijdragen aan de totale schade. Naarmate het onderzoek vordert, lijkt het duidelijker dat de rol van micro-organismen op de aantasting van tal van materialen ernstig wordt onderschat.

In de eerste plaats kunnen behalve luchtverontreinigende stoffen ook chemische bestanddelen uit de aangetaste materialen zelf als voedingsbodem voor micro-organismen dienen. In dit geval worden de stoffen door zogenaamde autotrofe bacteriën afgebroken. Deze micro-organismen zijn in staat zich ook te ontwikkelen in een donkere omgeving waar geen organische stoffen te verteren zijn. IJzerbacteriën kunnen bijvoorbeeld het in gesteenten aanwezige pyriet (een zwavel-ijzerverbinding) verbranden en zo aan voldoende energie voor hun groei komen. Zonder de bemestende werking van de luchtverontreiniging zouden deze bacteriën door gebrek aan essentiële mineralen minder snel kunnen groeien.

In de tweede plaats kunnen bestanddelen van de luchtverontreiniging als voedingsbodem dienen. Mineralen uit het gesteente of de verf van de ondergrond dienen dan als aanvullende meststoffen. Het materiaal wordt aangetast door de zure stofwisselingsprodukten van de bacteriën. Een grote verspreiding hebben bijvoorbeeld de thiobacillen, die

hun energie halen uit de verbranding van zwavelwaterstof (H_2S) of SO_2 . Daarbij ontstaat zwavelzuur, een zeer agressief zuur, dat metalen, cement en gesteenten aantast.

Op de aangetaste materialen bevinden zich vaak ook bacteriën die hun energie halen uit de stikstofkringloop. De nitraatvormende bacteriën scheiden als stofwisselingsprodukt salpeter uit, dat een zeer schadelijke werking op de materialen heeft. De ammoniakvormende bacteriën geven ammoniak af aan hun omgeving, waardoor in oude schilderijen het malachietgroen in blauw verandert.

Bio-erosie kan ook op mechanische wijze werken. Wanneer bepaalde schimmels, myceten en actinomyceten, zich op steen, pleisterwerk en muurschilderingen ontwikkelen, dringen ze met hun draden door in het materiaal en maken dat kapot. Omdat deze schimmels heterotroof zijn, dat wil zeggen dat ze hun energie niet halen uit zonlicht of uit anorganische stoffen zoals pyriet, maar zich voeden met organische stof, kunnen ze alleen leven indien door de luchtverontreiniging ook organische stoffen worden aangevoerd, of in combinatie met de besproken autotrofe micro-organismen. In dit geval kan men spreken van een levensgemeenschap die zich onder invloed van de luchtverontreiniging heeft ontwikkeld.

Bio-erosie heeft al veel schade veroorzaakt. Talloze beroemde Italiaanse fresco's, muurschilderingen, hebben in oude steden zoals Rome en Florence de eeuwen ongeschonden overleefd. In deze eeuw zijn de schilderijen begonnen te verbleken en vaak bladderen ze in hoog tempo af. Binnen in kerken en oude gebouwen kondigt het verval zich aan door het blauw worden van alle groene tinten (Sorlini, 1983).

Ook in ons land, hoewel niet zo rijk gezegend met muurschilderingen als Rome, is de aantasting van fresco's waar te nemen. De historische schildering in het koor van de kerk in het Friese Bozum is in 1984 ernstig begonnen af te bladderen. De afbeelding in het oostelijke halfronde deel van de kerk is een 'Majestas Domini'. Deze stamt, naar men aanneemt, uit het begin van de dertiende eeuw en toont binnen een omlijsting een baardloze Christusfiguur op zijn troon. Vier evangelische symbolen completeren de schildering, die werd ontdekt tijdens de restauratie in de jaren veertig. Dit kunstwerk, dat vele honderden jaren ongeschonden bewaard bleef, vertoont, blijkt nu, 35 jaar na het blootstellen aan de tegenwoordige lucht, verval. Op de afbeelding ziet men witte vlekken, waar het pleisterwerk heeft losgelaten. De lijnen zijn al vrij vaag en doordat alleen de witte en okergele tinten bewaard zijn gebleven, krijgt de voorstelling een nadrukkelijk broos en contrastloos voorkomen. 'Het is rampzalig,' zei een woordvoerder van Monumentenzorg in Friesland, 'zo ver had het nooit mogen ko-

men.' Als een van de mogelijke oorzaken noemde hij een veranderde zuurgraad in de lucht. 'De lucht is nu eenmaal niet meer dezelfde als driehonderd jaar geleden' (Leeuwarder Courant, 10 mei 1984).

Zwavelbacteriën veroorzaken ook belangrijke economische schade. Waarschijnlijk speelt bio-erosie een belangrijke rol bij het instorten van koeltorens. Uit een onderzoek dat wordt betaald door het Duitse ministerie voor Onderzoek en Technologie, blijkt dat de betonnen oppervlakken aan de binnenzijde van koeltorens door de hoge temperatuur en de grote hoeveelheden zwaveldioxide een ideaal milieu vormen voor zwavelreducerende bacteriën. Dit zijn dezelfde organismen die voorkomen bij hete zwavelhoudende waterbronnen van vulkanische oorsprong. De bacteriën hechten zich des te beter aan het beton naarmate de binnenwand ruwer is en produceren grote hoeveelheden zuur, dat het beton aantast. In Duitsland is men ertoe overgegaan deze binnenvlakken met een laag kunststof af te werken. Ook in Engeland wordt onderzoek gedaan naar het instorten van koeltorens. Het vermoeden bestaat dat bijvoorbeeld het instorten van de 125 meter hoge koeltoren van de elektriciteitscentrale in Fiddler Ferry in het noordwesten van Engeland, in januari 1984, geweten moet worden aan bio-erosie. De leider van het Engelse onderzoek, dr. Tony Bravery, sluit echter andere oorzaken niet uit.

Instorting van koeltorens kwam in 1965 voor het eerst in het nieuws, toen bij Ferrybridge drie koeltorens bij sterke wind in elkaar stortten. Sindsdien worden de wanden van de Engelse koeltorens volgens de nieuwe voorschriften 12 à 20 centimeter dikker gemaakt. Een groot deel van de oude koeltorens is versterkt met een extra laag gewapend beton. Ook de ingestorte toren van Fiddler Ferry was reeds met een extra laag versterkt (*de Volkskrant*, 23 juni 1984).

13. AMMONIAK, MEST EN ZURE REGEN

Kunstmest en krachtvoer scheppen drijfmestzeeën

De ammoniakemissie is een echt Nederlands probleem. Nederland produceert onnatuurlijk grote bergen dierlijke mest, waaruit door bio-chemische processen vele duizenden tonnen ammoniak ontstaan. Ammoniak is een eenvoudige stikstofverbinding. Een molecuul ervan bestaat uit een atoom stikstof en drie atomen waterstof (NH_3). Het is een erg agressieve stof, die ook in staat is het menselijk lichaam aan te tasten. Niet alleen boeren weten dit – doordat soms collega's in de gierkelder door ammoniakverstikking omkomen – ook elke moeder, en dat mag tegenwoordig eveneens gelden voor de vader, weet dat de ammoniak in een vuile luier binnen enkele uren de babyhuid tot bloedens toe kan verwonden.

De ammoniakconcentratie is het hoogst bij diarree. Al ons mestvee heeft diarree – door gebrek aan vezels in het voer en door opzettelijke verstoring van de darmflora door toevoeging van giftig koper aan krachtvoer.

Ammoniak is in grote concentraties in de buitenlucht direct schadelijk voor gewassen. In de bodem levert het net als stikstofoxiden een bijdrage aan de bodemverzuring door een chemische omzetting in salpeterzuur.

De ammoniakdampen uit de drijfmestzeeën vormen een kwart van het zuur dat, onder de noemer 'zure regen', verwoestend werkt op bossen en natuurgebieden, schadelijk is voor de volksgezondheid en allerlei materialen aantast. De bodemvruchtbaarheid wordt door de continue mestdump bedreigd, niet alleen in bossen maar ook in landbouwgebieden.

Bergen, bergen mest

Elke Nederlandse melkkoe produceert behalve duizenden liters gezonde melk ook tienduizend kilo mest per jaar, de keerzijde van de medaille. Vijftig miljoen ton dierlijke mest wordt ieder jaar in Nederland geproduceerd. Honderd miljoen dieren produceren een mestberg van een kilometer in omtrek en achthonderd meter hoog. In Nederland zijn meer dan vijf miljoen koeien, tien miljoen varkens en tachtig miljoen kippen. Hoewel bio-industrie vaak uitsluitend wordt geassocieerd met de varkenshouderij, is dat niet juist. De koeien produceren het leeuwedeel van de mestberg, 68%, varkens 29% en het pluim-

vee 3% (gegevens CBS).

Ooit was mest gezond voor het land, en in de juiste hoeveelheid toegepast verhoogt mest nog altijd de bodemvruchtbaarheid. Mest bevat plantenvoedende stoffen zoals stikstof en fosfaat, waarzonder het gewas niet wil groeien. Men probeerde deze plantenvoedende stoffen zoveel mogelijk in kringloop te brengen door de mest zorgvuldig over het land te verspreiden. Op zandgronden, waar de bodem arm aan plantenvoedende stoffen is, hield men schapen, uitsluitend om mest te krijgen voor de akkers. Hiervoor was het potstalsysteem ontworpen. Door de schaapskudde op de hei te laten grazen en in de potstal te laten schijten, oogstte men mest van de heide. Kennelijk loonde het de moeite om op deze omslachtige manier wat dierlijke mest te verzamelen. Dierlijke mest was voor de uitvinding van de kunstmest erg kostbaar.

Overschotten

Tegenwoordig kampt agrarisch Nederland met mestoverschotten. De geforceerde mestspreading op de Nederlandse zandgronden heeft meer het karakter van een grootschalige afvallozing dan van een verantwoorde bemesting. De huidige mestdump heeft weinig te maken met het zorgvuldig in stand houden van een mineralenkringloop. Door de voortdurende import van stikstof- en fosfaatkunstmest en van stikstof- en fosfaathoudend veevoer is er sprake van overbemesting. De bodem wordt als een verzadigde spons, die na oververzadiging plotseling aan alle zijden gaat lekken, met als gevolg lucht-, bodem- en watervervuiling.

In de zogenaamde overschotgebieden in Nederland, de provincies Gelderland, Brabant en Limburg, was in 1980 al een mestoverschot van 4,1 miljoen kubieke meter. Men noemt een landbouwstreek een overschotgebied als er meer mest gestrooid wordt dan noodzakelijk is. Het overschot van 4,1 miljoen kubieke meter is berekend op basis van de bekende stikstofbehoefte van de landbouwgewassen (volgens het Consulentenschap voor de Landbouw, 100 tot 330 kilo per hectare, afhankelijk van gewas en grondsoort).

Te veel stikstof bevordert volgens het Consulentenschap schimmelziekten zoals meeldauw en roest in granen. Aardappelen krijgen door te veel stikstof groeischeuren en afwijkende groeivormen. Alleen snijmaïs schijnt zelfs bij ernstige overbemesting ongehinderd te groeien en ontvangt in de praktijk van de mestdump soms meer dan 1000 kilo stikstof per hectare.

Wanneer de fosfaatbehoefte van de gewassen, die veel geringer is dan de stikstofbehoefte, als norm wordt genomen, zijn de overschot-

ten dubbel zo groot. Landbouwbodems die al heel lang zulke enorme hoeveelheden drijfmest krijgen, blijken met fosfaat verzadigd te raken. De bodem neemt geen extra fosfaat meer op en het teveel aan fosfaat vervuult het (grond-)water.

De vorming van ammoniak

De jaarlijkse mestberg bevat 278000 ton stikstof. Dit is geen stikstof in zuivere vorm, maar gebonden in voornamelijk eiwitten, ureum en ammoniak. Ammoniak ontstaat door chemische en bacteriologische omzetting van ureum en organische stikstofverbindingen. Ammoniak is vluchtig en levert uiteindelijk na verdamping uit de mest, een grote bijdrage aan de luchtvervuiling. Bij de huidige wijze van mestopslag en mestverwerking verdampt een derde deel van de stikstof uit de mest in de vorm van ammoniak. De totale hoeveelheid die in ons land jaarlijks uit de mest verdampt, wordt geschat tussen 115000 (Buijsman, 1984) en 140000 ton (Van Aalst, 1983).

De emissies van stikstofoxiden en zwaveldioxide zijn enkele malen hoger. De verzurende werking van de ammoniakemissie is echter even hoog. Doordat zuurstofatomen zestienmaal zo zwaar zijn als waterstofatomen, is het ammoniakmolecuul (NH_3) bijna driemaal lichter dan het stikstofdioxidemolecuul (NO_2). Eén gram ammoniak bevat daarom bijna driemaal zoveel moleculen als één gram stikstofdioxide en kan dus ook driemaal zoveel moleculen salpeterzuur vormen. Dit is de reden dat de invloed van de totale Nederlandse emissie van circa 130 000 ton ammoniak op de verzuring even groot is als die van de totale hoeveelheid van 500 000 ton stikstofoxiden.

De mate waarin ammoniakproductie plaatsvindt is afhankelijk van de kwaliteit van het veevoer, de aard van de mestopslag en de wijze van verspreiding. Door de dieren eiwitrijk krachtvoer (eiwit is een stikstofverbinding) te geven, stijgt uiteraard het stikstofgehalte in de mest. De wijze van opslag en spreiding bepaalt de mate waarin de ammoniak gelegenheid krijgt te verdampen. Bij een gesloten opslag en bodeminjectie of bij onderploegen van drijfmest of gier verdampt relatief weinig ammoniak.

Drijfmest is een mengsel van uitwerpselen, urine en spoelwater, dat wordt verzameld in de mestkelders onder de stallen. Daarin komen de uitwerpselen bovendrijven en deze vormen een min of meer afsluitende laag, waardoor er weinig ammoniak uit de gier kan verdampen. Doordat de afsluitende laag ook de toetreding van zuurstof verhindert, wordt de vorming van ammoniak vertraagd. Dit neemt niet weg dat toch 20% van de ammoniakemissies uit de gierkelders afkomstig is, wat voor heel Nederland een ammoniakemissie van 24 300 ton per

jaar betekent. Bij spreiding over grasland verdampt 32% van de anorganische stikstof in de vorm van ammoniak en in de zomer kan dit zelfs oplopen tot 50%. Een groot deel van de ammoniak is afkomstig van de mest van vee dat in de wei loopt. De hoeveelheid is slechts bij benadering te schatten. Wanneer de mest over het bouwland wordt verspreid, vervluchtigt 20% van de aanwezige anorganische stikstof als ammoniak. In totaal bedraagt de ammoniakemissie vanaf landbouwgronden bijna 90 000 ton.

Verreweg de grootste ammoniakvervuiling vindt plaats in de provincies Noord-Brabant (20 250 ton), Gelderland (18 250 ton) en Overijssel (13 500 ton). Een treurige bijkomstigheid is dat juist de zandgronden in deze provincies het gevoeligst zijn voor bodemverzuring en immissieschade.

Gemeten in kilogrammen stikstof per jaar is de emissie van stikstof-oxiden, afkomstig van verkeer, huishoudens en industrie, in ons land groter dan die van ammoniak. De ammoniak wordt echter niet over zulke grote afstanden verspreid. Daardoor is in eigen land regionaal de depositie van ammoniak groter dan van stikstofoxiden. Bovendien zijn er regionaal heel grote verschillen. De depositie van ammoniak is in het noorden van Groningen en Friesland minder dan 10 kg/ha, op de Veluwe of in de Peel daarentegen kan deze depositie meer dan 100 kg/ha zijn.

De gestoorde stikstofkringloop

De landbouw blijkt dus met ten minste 115 000 ton per jaar te zorgen voor ruim 87% van de totale ammoniakemissie. Bij de huidige bemestingsnorm is dit een stikstofverlies voor de landbouw, dat gedeeltelijk wordt aangevuld met kunstmest.

In Nederland is het gebruik van kunstmest, vooral van stikstofmest, het hoogst ter wereld. Hierdoor is de landbouwproductie sinds 1945 enorm toegenomen. De stikstof wordt voor een groot deel vastgelegd in de organische stof (bijvoorbeeld in eiwitten), maar komt uiteindelijk deels weer vrij en raakt deels in kringloop. Stikstof komt bij verbranding van landbouwafval vrij als stikstofgas en stikstofoxiden en wordt via organische bemesting soms opnieuw door landbouwgewassen gebruikt. Een deel van de landbouwproductie wordt door mensen geconsumeerd, waarna de stikstof vrijkomt in de rioolzuiveringsinstallaties. Een groot deel van de landbouwproductie is gras en ander veevoer en wordt gegeten door vee. De stikstof in het voer wordt voor een deel door de dieren opgenomen voor hun groei. Een heel groot deel komt echter in de mest terecht. Ongeveer 50% van de totale hoeveelheid stikstof daarin blijkt onder bepaalde condities te kunnen

bijdragen aan de vorming van ammoniak.

Hoewel de overvloedige stikstofimporten de produktiviteit van akker-
gewassen en grassen hebben doen stijgen, is de eigen landbouw-
produktie lang niet voldoende om de miljoenen koeien, varkens en
kippen in ons land te voeren. Daarom staan tegenover elke Neder-
landse hectare bestemd voor veevoer ten minste nog vijf hectaren
tapioca, soja en granen in de Derde Wereld en Amerika waarvan de
opbrengsten worden gebruikt als krachtvoer voor de Nederlandse
veestapel. Ook met dit krachtvoer wordt veel stikstof, in eiwitverbin-
dingen, geïmporteerd en ook hierdoor heeft onze mestberg, of liever,
onze drijfmestzee, een onnatuurlijke omvang. Hoewel ammoniak be-
slist geen natuurvreemde stof is, werkt de huidige ammoniakemissie
door de bio-industrie verstikkend op natuur en bosbouw.

Er is geen sprake meer van een kringloop. Steeds meer stikstofver-
bindingen worden aangevoerd. De gewassen kunnen deze aanvoer
niet zo snel verwerken. Van het teveel aan stikstof verdwijnt een deel
na omzetting in stikstofgas (N_2) in onschadelijke vorm in de lucht. De
rest veroorzaakt na uitlekken van nitraten en andere stikstofverbin-
dingen eutrofiëring van het oppervlaktewater. De inziging in de bodem
veroorzaakt een steeds diepere verzuring van het grondwater en door
de vorming van ammoniak ontstaat luchtvervuiling.

Stikstof: meer, meer, meer

Er is, behalve in de biologische landbouw, nauwelijks sprake van een
vrijwillige beperking van het stikstofgebruik. Stikstof is een belangrijke
meststof. Door de luchtverontreiniging daalt per hectare gemiddeld
46 kg stikstof per jaar op Nederland neer. Op het eerste gezicht lijkt
dat vanuit bemestingsoogpunt heel gunstig. Het is immers evenveel
als een ouderwetse kunstmestgift. Deze stikstof lijkt dus een gave uit
de hemel.

In 1950 werd in de vorm van kunstmest per hectare 67 kg stikstof (N)
gegeven. In 1975/1976 is deze stikstofgift al gestegen tot 208 kg/ha.
De stikstofdepositie uit de lucht voegt hier nu een kwart aan toe en de
kunstmestgiften worden soms nog aangevuld met honderden kilo's
stikstof uit dierlijke mest. In de landbouw lijkt men nog nooit van een
teveel aan stikstof gehoord te hebben. Er wordt zelfs voor gepleit de
kunstmest-N-gift op grasland van zand- en kleigronden op te voeren
tot maximaal 450 kg/ha. Ten gevolge van zo'n stikstofgift kan de
produktie van grasland t.o.v. de vooroorlogse jaren verdubbelen (Van
der Molen, 1978). Stikstof is dus goed voor de produktiviteit van de
landbouwgewassen.

Bij het bovenstaande zijn twee kanttekeningen te maken. In de eerste

plaats vormt niet de aanwezigheid van veel stikstof op zichzelf in de bouwvoor van landbouwgronden een milieuprobleem, maar wel veroorzaken de verspreiding van de stikstof in de vorm van ammoniak naar natuurgebieden welke hun waarde te danken hebben aan hun relatieve stikstofarmoede, alsmede het doorsijpelen van de stikstof in de vorm van nitraten naar het grond- en het oppervlaktewater problemen.

In de tweede plaats zijn het niet de plantenvoedende maar de bodemverzurende eigenschappen van de stikstofverbindingen die op lange termijn schadelijk voor de bodemvruchtbaarheid blijken te zijn.

Ook dit laatste is alleen belangrijk buiten de landbouwgronden. Het Consulentenschap voor Bodemaangelegenheden in de Landbouw kwalificeert op zand-, veen- en veenkoloniale gronden een zuurgraad van de bodem als 'goed' bij een pH tussen 4,6 en 5,7. De zuurgraad wordt daarom door de boeren, met behulp van onderhoudsbekalkingen, op dit niveau gehandhaafd. Dit is overigens een waarde waarbij verschillende zware metalen al snel oplosbaar worden.

Een gestoorde kringloop

Stikstof is een onmisbare bouwsteen voor eiwitten. Ze is volop aanwezig. Immers, 70% van de lucht is puur stikstofgas (N_2). Stikstofgas kan helaas niet door hogere planten worden opgenomen. Wel door bepaalde micro-organismen, zoals sommige blauwwieren en bacteriën. Bekend zijn de stikstofbindende bacteriën die in de wortelknolletjes van elzen en vlinderbloemigen leven. Hogere planten, die niet in symbiose met stikstofbindende micro-organismen leven, hongeren te midden van overvloed. Zij moeten teren op de stikstof die in andere chemische verbindingen in de bodem aanwezig is. Hoezeer een tekort aan deze gebonden stikstof de groei remt, wordt duidelijk gedemonstreerd in de landbouw. Daar is door kunstmatige stikstofbemesting de produktiviteit van de gewassen omhooggeschoten.

Stikstof kan zowel in de vorm van ammonium (NH_4^+) als in de vorm van nitraat (NO_3^-) door de plant worden opgenomen. Beide stoffen kunnen in de bodem ontstaan onder meer door stikstofbindende micro-organismen en door vertering van organisch materiaal. Het laatste vormt een voor de landbouw aantrekkelijke stikstofkringloop. De kringloop is echter altijd een beetje lek. (Dit lek wordt in ongestoorde natuurlijke ecosystemen opgevangen door de stikstofbinding van de genoemde organismen.) Er is sprake van evenwicht, wanneer de verdamping van ammoniak en de uitspoeling van nitraten gelijk zijn aan de stikstofinvoer door stikstofbinding uit de atmosfeer. Het evenwicht is in de natuurgebieden als op landbouwgronden verbroken.

In de natuurgebieden, waar de kringloop goed functioneert, is door de zure regen sprake van een voortdurende aanvoer van stikstofverbindingen. De kringloop moet steeds grotere hoeveelheden stikstof verwerken. Dit lukt niet. De kringloop raakt verzadigd en er vormen zich in de bodem steeds meer nitraten, waardoor de bodem verzuurt.

Opname van ammoniak, als positief geladen ammonia-ion (NH_4^+), door plantewortels gebeurt onder gelijktijdige afgifte van een positief geladen waterstof-ion, het zuur-ion dus, om de elektrische balans in evenwicht te houden. Bij opname van een nitraat-ion wordt daarentegen een waterstof-ion opgenomen. Wanneer de plant evenveel ammoniak als nitraat voor zijn stikstofbehoefte zou gebruiken, is het netto-effect nul. Wanneer de aanvoer van stikstofverbindingen groter is dan de behoefte van de planten, wordt uiteindelijk het teveel aan ammonia, waarschijnlijk door micro-organismen, omgezet in nitraat. Netto rest er ten slotte alleen nog nitraat (in de vorm van salpeterzuur of, na reactie van het zure ion, als nitratzout). Bij een doorgaande toevoer van ammoniak en nitraten zakt het verzuringsfront steeds dieper de bodem en het grondwater in.

Niet alleen in bos en natuur, ook in de landbouw is de stikstofkringloop verbroken. Enerzijds is hier sprake van een grote afvoer van stikstof door de oogst. Anderzijds wordt zeer veel stikstof toegevoerd om dit verlies te compenseren. Door de luchtverontreiniging worden vanuit de lucht evenveel stikstofverbindingen per hectare gedeponeerd als voor de laatste wereldoorlog als normale landbouwbemesting werden gegeven, gemiddeld 46 kg/ha. Het stikstofgehalte van landbouwbodems wordt dus voortdurend op een kunstmatig hoog peil gehouden. Er is minder sprake van een kringloop dan van een doorstroming. Als kunstmest in de vorm van ureum, salpeter of ammoniak (met behulp van bodeminjectie) zou worden gegeven, zou dit ernstig bodemverzurend werken. In ons land wordt kunstmest voornamelijk gegeven in de vorm van het minder verzurende kalkammonsalpeter. Door de bemesting met de basische stoffen kalk en magnesium wordt de verzurende werking van kunstmest, luchtverontreiniging, gier, natuurlijke processen en oogst in de bouwvoor gedeels gecompenseerd.

Voor de landbouwgronden heeft de verzurende werking van nitraten daarom weinig schadelijke gevolgen. De schadelijke effecten worden echter wel gevonden buiten de landbouwsfeer, in de natuurgebieden en de diepe ondergrond.

De mest, en dat geldt zeker voor de dump van drijfmest, wordt meestal gedurende een korte periode van het jaar gegeven. Vaak is het bouwland dan nog kaal. Na de verspreiding van de mest is het gewas niet in staat snel alle stikstof (dwz. ammoniak en nitraat) op te slurpen.

Gier wordt vaak in de winter over het grasland uitgereden, niet omdat het gras dan groeit (het groeiseizoen begint maanden later), maar omdat het bevroren land dan te berijden is.

De plotselinge overmaat aan stikstofverbindingen wordt niet meer door het bodemchemische complex gebonden. (Bij chemische bindingen is altijd sprake van een evenwicht: een deel is gebonden aan bodemdeeltjes en een deel is opgelost in bodemvocht. Bij oververzadiging is een relatief groot deel niet gebonden.) Overigens worden nitraat-ionen nauwelijks aan bodemdeeltjes gebonden; nitraat lost goed op in het bodemvocht en is daardoor mobiel.

Wanneer we spreken over nitraten, gaat het ook over salpeterzuur. In water splitst een molecuul salpeterzuur (HNO_3) zich in een nitraat-ion (NO_3^-) en een waterstof-ion (H^+). Het H^+ -ion is het zure ion. Dit zure ion is chemisch reactief en bindt zich sterk aan bodemdeeltjes. Daarbij wordt het waterstof-ion uitgewisseld tegen een ander positief geladen ion, bijvoorbeeld een calcium- (Ca^+ , uit bijvoorbeeld kalk of calciumveldspaat), magnesium-, of, in meer verzuurde bodems, aluminium-ion (uit kleimineralen).

Een ander deel van de stikstof is gebonden in ammoniak in de mest aanwezig. Ammoniak kan door planten worden opgenomen, maar hiervoor geldt dezelfde redenering als voor het nitraat. Doordat de mestgift niet gelijkelijk over het hele jaar, maar op een bepaald moment, wordt gegeven, kunnen de gewassen de ammoniak niet goed verwerken.

Ammoniak vervluchtigt snel. Daardoor leidt mestdump tot luchtvervuiling in andere gebieden. In de lucht vormen de ammoniakdampen een verbinding met de zwaveldioxide, afkomstig van elektriciteitscentrales en industrie. Het gevormde ammoniumsulfaat bereikt door de filterende werking van bomen voor een groot deel de bosbodems. In bossen blijkt dikwijls achtmaal zoveel ammoniumsulfaat neer te slaan als op naastgelegen akkers of heidevelden. Uiteindelijk worden door biologische en bodemchemische processen uit het ammoniumsulfaat weer salpeter- en zwavelzuur gevormd ($\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 = \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$). In de periode dat de bodem oververzadigd is met nitraat en ammoniak kan een deel van de stikstof als nitraatzouten of direct als salpeterzuur naar het oppervlaktewater en het grondwater weglekken. Een ander deel verdampt als ammoniak. Zo worden niet de landbouwgronden; maar de diepere bodem en het grondwater aangetast. Tegen de verzuring van het diepe grondwater helpt strooien van kalk niet. Kalk dringt niet verder in de bodem door dan de diepte van de ploegvoor. Bovendien zouden door toevoeging van kalk de nitraten toch niet uit het grondwater verdwijnen.

Ernstige gevolgen, marginale oplossingen

De overbemesting heeft nu reeds ernstige gevolgen. De stikstofoverschotten blijken al lang zowel oppervlaktewateren als diep grondwater te hebben vervuild. De nitraatgehalten in het grondwater zijn op sommige plaatsen zo hoog geworden dat de gezondheidsnormen vele malen worden overschreden. Op de Veluwe is de verzuring al voortgeschreden tot een diepte van circa 15 meter (Appelo, C. A. J., 1982). De overbemesting is daarom een ernstige bedreiging voor de drinkwatervoorziening (zie ook het hoofdstuk over drinkwater). De hoge nitraatgehalten in voedsel en drinkwater storen het functioneren van de hemoglobine (de kleurstof van de rode bloedlichaampjes) en dit leidt tot bloedarmoede. Behalve hoge nitraatconcentraties bevat dit verzuurd grondwater ook aanzienlijke concentraties opgelost aluminium, en ook dat is ongezond voor mens en dier.

Voor het ammoniak- en nitraatprobleem bestaat theoretisch slechts een beperkt aantal oplossingen. Het komt er globaal op neer dat men een periodieke oververzadiging van de grond met ammoniak en nitraten moet vermijden en de stikstofkringloop moet optimaliseren door de stikstof in ongeveer hetzelfde tempo aan te voeren als de gewassen het kunnen opnemen. De uitwerking hiervan is in de praktijk complex. De stikstofbehoefte van het gewas is afhankelijk van het soort gewas, de leeftijd, de bodemkwaliteit, het weer en andere factoren. Omdat dit voor elk perceel en in elk jaar anders is, is het een goede zaak dat de computer zijn intrede bij het agrarisch bedrijf heeft gedaan.

In de praktijk komt het er eenvoudig op neer dat men het land minder zwaar moet bemesten. Alvorens de mestberg te spreiden, moet men ervoor zorgen dat een deel van de stikstofverbindingen uit de drijfmest al is omgezet in het onschadelijke stikstofgas. Ook kan men ervoor zorgen dat de bemesting meer over het jaar wordt gespreid. De gewassen kunnen dan de stikstofgift beter opnemen. Bij kunstmest wordt de truc van de slecht oplosbare korrels toegepast. Bij drijfmest zou men door biogisting en voorcompostering een groot deel van de stikstof in bacteriologisch celmateriaal kunnen binden. Dit heeft een bepaalde tijd nodig om te verteren. Vergisting gebeurt in een afgesloten tank. Bij afgesloten opslag van de mest kunnen de gevormde ammoniakdampen worden afgezogen en ter plekke chemisch of in een biofilter worden gebonden. Ook de resterende ammoniak zou op een of andere wijze chemisch zodanig kunnen worden gebonden dat de stikstof geleidelijk ter beschikking van de gewassen komt. Op die manier wordt een nutteloze afwisseling van overbemesting en onderbemesting vermeden. De concentratie verzurende stikstofverbindingen in de bodem wordt dan geringer, de beschikbaar-

heid voor de gewassen gedurende het seizoen wordt constanter, en de stikstof raakt zo beter in kringloop dan thans het geval is.

Stikstof in meststoffen

In 1969 bevatte de jaarlijks in Nederland geproduceerde berg stalmest 150 000 ton stikstof. In 1980 was deze hoeveelheid al opgelopen tot 278 000 ton.

Aan kunstmest werd in 1960 224 000 ton toegepast en in 1980 486 000 ton (als zuivere N).

Aangezien de stikstof in stalmest in verhouding tot de stikstof in kunstmest voor slechts 60% effectief voor het gewas beschikbaar is (de rest verdwijnt, doordat het bijvoorbeeld door bacteriën wordt omgezet in stikstofgas), is de totale hoeveelheid beschikbare N voor de Nederlandse landbouwgrond ca. 653 000 ton. Dit is 324 kg/ha effectief beschikbare stikstof; dat wil zeggen dat de stikstof ook wordt opgenomen door een normaal groeiend gewas.

(N-)Stikstof in miljoenen kg	1960	1980
dierlijke mest	150	278
kunstmest	224	486
totaal effectief beschikbaar	314	653
totaal effectief beschikbaar per ha, in kg	134	324

Stikstofbehoefte onverzadigbaar?

In Nederland werd in 1975 in de vorm van kunstmest gemiddeld 208 kg stikstof per hectare gestrooid. Ruim tweederde van de stikstof gaat naar het weidebedrijf, dat in Nederland zeer intensief is. Dit betekent dat per hectare grasland in 1975 tweemaal zoveel stikstof werd gestrooid als in Denemarken, het land dat in de EG Nederland het dichtst benadert.

Het verbruik van kunstmest in 1973/1974 in kg/ha als puur NPK

	Ned.	Belg.	BRD	Fr.	It.	Den.	Ierl.	UK	USA
N	196	114	81	55	38	127	27	52	19
P	52	111	68	66	27	53	40	24	11
K	59	128	86	55	15	73	38	23	11

Op proefbedrijven is aangetoond dat de stikstofbemesting op veengrond kan worden opgevoerd tot 250 à 300 kg/ha en op klei- en zandgrond tot 400 à 450 kg/ha. Voor stikstof is er dus vanuit het oogpunt van landbouwproductie geen sprake van een overschot. (Het bezwaar geldt het milieu: men houdt al die stikstof niet in kringloop, want ze lekt weg naar de omgeving.)

Mestprobleem, meer dan stikstof

Door het accent op de ammoniak te leggen lijkt het mestprobleem opgelost als het stikstofprobleem is opgelost. Dit is allerm minst waar. Ook de overmaat aan andere elementen uit de drijfmest is schadelijk. Een te hoge kaliumgift is schadelijk voor gewassen. Een te hoog kaliumgehalte van de grond beperkt namelijk de opname van magnesium door de plant. Dit leidt tot magnesiumgebrek bij planten en tot kopziekte bij runderen (Jansen, 1982).

De totale vraag naar de meststof fosfaat is kleiner dan het aanbod van fosfaat uit dierlijke mest en zuiveringsslib. Door het gewas wordt circa 60 kg/ha opgenomen, maar op sommige percelen wordt meer dan 950 kg per jaar gedumpt. Zelfs als er geen fosfaatkunstmest meer zou worden gestrooid (momenteel ca. 84 kg/ha) en de mest gelijkmatig over heel Nederland zou worden verspreid, is er een overschot van circa 9,4%, als de vraag in Nederland is afgestemd op een optimale gift voor het gewas. (Het bestemmingsadvies van het Consulentenschap voor Bodemaangelegenheden in de Landbouw is maximaal 140 kg P_2O_5 per hectare per jaar voor weiland en voor granen, 220 kg voor bieten en 240 kg voor aardappelen. Naarmate de bodem een grotere fosfaatvoorraad heeft, wordt geadviseerd minder te strooien. Door overbemesting met fosfaat raakt het bodemcomplex verzadigd. Het fosfaat kan dan gedeeltelijk weglekken. Volgens de Wageningse hoogleraar De Haan zijn er in Nederland tien zandgebieden aan te wijzen waar de situatie binnen tien jaar volledig uit de hand loopt (*de Volkskrant*, 21 april 1983).

Fosfaat in miljoenen kg in mest in Nederland per jaar

1960 1980

dierlijke mest	87	172
kunstmest	112	84
totaal	199	256
per hectare	85	128 kg/ha

Het aandeel van de landbouw in de stikstof- en fosfaatverontreiniging van het oppervlaktewater wordt op dit moment geschat op 16,7% respectievelijk 3,3%. Plaatselijk kan dit veel groter zijn en naarmate meer land met fosfaat verzadigd raakt, kan fosfaat een groter aandeel in de verontreiniging hebben. Momenteel wordt ongeveer 180 kg P_2O_5 per hectare per jaar overbemest. Berekeningen met betrekking tot adsorberend vermogen van zandgronden wijzen uit dat hiermee op zandgronden nog ca. 20 jaar kan worden doorgegaan, waarna het bodemcomplex voor de volle 100% verzadigd is (en vervolgens alles doorspoelt).

Koper

Nederlandse luchtverontreinigende emissies van koper omvatten enige honderdduizenden kilo's. Dit koper zal uiteindelijk op alle bodems neerdalen. De jaarproductie van dierlijke mest voegt daar circa 955 000 kilo koper (1979/1980) aan toe. Vooral varkensmest bevat er veel van.

Koper remt de darmflora, zodat niet de bacteriën maar het varken de eiwitten uit het voer kan opnemen. Volgens een richtlijn van de EG is in 1982 het toegestane kopergehalte in varkensvoer van 200 naar 125 mg/kg verlaagd. De Europese Commissie kan de landen jaarlijks een machtiging geven om het kopergehalte te verhogen tot 200 mg/kg. Hiervan maken vijf landen gebruik. In 1984 was deze machtiging in het parlement nog onderwerp van discussie.

De eigenlijke behoefte aan koper is bij varkens lager dan 5 à 10 mg/kg voer. Verhoging van deze hoeveelheid tot 250 mg/kg voer doet de groei van varkens met 8 à 9% toenemen en de dieren hebben dan circa 4% minder voer nodig.

Het optimale kopergehalte in bouwland en weiland is circa 5 mg/kg luchtdroge grond. Volgens het Consulentenschap voor Bodemaangelegenheden in de Landbouw moet meer dan 20 mg/kg grond worden aangemerkt als gevaarlijk voor schapen. De marge tussen het optimum en schadelijke concentraties is dus smal.

Gebruik van koperhoudende varkensmest in giften van bijvoorbeeld 20 ton/ha kan na circa 150 jaar het kopergehalte vanuit het oogpunt van gewasproductie te hoog doen oplopen. Opname van koper via gras en bodemdeeltjes door vee kan vergiftigingsverschijnselen veroorzaken. Vooral schapen zijn zeer gevoelig voor koper. Voor deze dieren is grasland dat gedurende 8 à 10 jaar met koperhoudende varkensmest is behandeld al gevaarlijk.

Koper is ook schadelijk voor regenwormen. Hun graafactiviteiten dragen bij tot de instandhouding van een goede bodemstructuur en zij

spelen een belangrijke rol bij de afbraak van dood materiaal. (Hierdoor wordt bijv. voorkomen dat op de grond van grasland een verstikkende viltlaag ontstaat. Wanneer zo'n viltlaag zich eenmaal heeft gevormd, kan de zode gemakkelijk worden losgetrapt.) Onder gunstige omstandigheden zijn regenwormen in staat de bovenste bouwvoor van 20 cm in circa 20 jaar om te woelen.

Regenwormen vormen het bulkvoer voor tal van weidevogels, die via de wormen een aanzienlijke hoeveelheid koper opnemen.

Bij een kopergehalte van 15 mg/kg mest is op zandgrond bij een mestgift variërend van 20 tot 100 ton per ha per jaar de eerste drempelwaarde na 3,7 respectievelijk 0,7 jaar bereikt, dwz. dan treden de eerste moeilijkheden in de schapenhouderij op. De gevoeligheid van regenwormen is, twee- tot zesmaal (afhankelijk van grondsoort en soort worm) kleiner. Voor regenwormen is de drempelwaarde bij een gift van 20 ton per ha per jaar bereikt na 7,2 tot 21 jaar en bij een gift van 100 ton per ha per jaar na 1,4 tot 4,2 jaar. Op veel plaatsen, met name op de zandgronden in zogenaamde overschotgebieden (Gelderland, Limburg, Brabant), is deze drempel al bereikt.

Koper wordt aan het varkensmeel toegevoegd ter verbetering van de voedselbenutting. Het koper remt de darmflora en is in de drijfmest natuurlijk net zo goed dodelijk voor het bodemleven. Op lange termijn vormt koper daarom een ernstige bedreiging voor de landbouw. In de bodem is koper vrij onbeweeglijk. Een hoge of langdurige dosering van varkensmest kan aanleiding geven tot kopervergiftiging van de bodem. Gronden met een hoog kopergehalte blijven jarenlang ongeschikt voor het telen van gewassen.

Niet alleen het bodemleven ondervindt schade. De kopervergiftiging doorloopt de hele voedselketen. Planten nemen het koper op en vormen zo vergiftigd voedsel voor het vee. Schapen zijn er, net als regenwormen, uiterst gevoelig voor en sterven bij een teveel aan koper.

Op dit koperprobleem is zo uitvoerig ingegaan omdat het een bestrijding van de ammoniak- en mestproblematiek met behulp van biogisting in de weg staat. Er valt hierbij een parallel te trekken met het lood in de benzine. Ook het lood in de benzine staat een elegante oplossing van het zure-regenprobleem in de weg. Het is echter onzin om te zoeken naar oplossingen waarbij het gebruik van beide metalen kan worden gecontinueerd, omdat het gebruik op zichzelf al onaanvaardbare milieuconsequenties heeft.

Ammoniakemissies bij voorrang bestrijden

Een belangrijk argument om in Nederland en binnen de Europese

Gemeenschap de ammoniakemissies bij voorrang te bestrijden is het grensoverschrijdende karakter van deze luchtverontreiniging. Wanneer na een reductie van 25% van de NO_x -emissies op Europese schaal, een concentratievermindering van 25% voor NO_x en volgroepen optreedt, zal de depositie van stikstof uit de lucht met circa 10% verminderen.

Verlaging met 25% van de NH_3 -emissies op Europese schaal zou kunnen leiden tot een reductie van de gemiddelde stikstofdepositie in Nederland met 15%. Onderdrukking van alle ammoniakemissies, als dat mogelijk was, zou zelfs een vermindering van 60% van de stikstofdepositie geven. Bestrijding van ammoniakemissies is dus effectiever dan bestrijding van de NO_x -emissies. Uiteraard blijft ook de bestrijding van NO_x -emissies hoogst noodzakelijk.

Het ontoereikend overheidsbeleid

In de notitie over verzuring aan de Tweede Kamer wijst de minister erop dat een emissievermindering van ammoniak met een factor 3 à 4 noodzakelijk is. Technisch zou echter niet meer mogelijk zijn dan een verlaging met een factor 2 (Tweede Kamer, 18225 nrs. 1-2).

In het Indicatief Meerjarenprogramma Lucht (IMP; 1985-1989; concept) wordt ammoniak voor circa 30% van de verzuring verantwoordelijk geacht. Daarom is voor deze stof een nieuw bestrijdingsbeleid geformuleerd. Dit betekent volgens het IMP dat uitbreiding van de intensieve veehouderij zo veel mogelijk gepaard moet gaan met toepassing van emissiebeperkende technieken. (Elk oplettend lezertje heeft al opgemerkt dat dus voor de betrokken emissies van de bestaande bedrijven geen beleid wordt voorgesteld.) De overheid ziet voor ammoniakbestrijding mogelijkheden in de gesloten opslag van de mest en de filtrering van de ventilatielucht door compostfilters, waarbij een rendement van 95% mogelijk is. Door toepassing van mestinjecties in de bodem zou, op het land een vermindering van de ammoniakverdamping volgens het IMP met 80 à 90% bereikbaar zijn.

Omdat nader onderzoek volgens het IMP zal moeten uitwijzen welke emissiebeperkende maatregelen het effectiefst kunnen worden toegepast, zal in de eerstkomende jaren het accent liggen op organisatorische maatregelen teneinde de geproduceerde mest over Nederland te verdelen. De nieuwe meststoffenwet zou daarbij een rol spelen. In het IMP geeft de minister toe dat de toeneming van het mesttransport, als gevolg van die wet, de totale ammoniakemissie naar de lucht niet direct zal doen dalen, maar de emissie wel zal beperken in gebieden waar deze momenteel het hoogst is. Dit nieuwe overheidsbeleid is in grote trekken vergelijkbaar met 'de politiek van de hoge schoor-

stenen' uit de jaren zeventig. In principe wordt er niets opgelost, maar wordt het effect uitgesmeerd. Dit is een zeer ernstige zaak, omdat nu ook de relatief onbelaste gebieden, die dienen als laatste refugia voor kwetsbare organismen, worden bedreigd. De geringe ontlasting van gebieden met hoge ammoniakemissies weegt, wegens een dreigend onomkeerbaar verlies van genenbronnen, niet op tegen dit effect.

De emissiebeperkende technieken bij het uitrijden van mest worden in het IMP slechts genoemd. Voor het verplicht stellen van deze technieken, die in bepaalde landen om wille van de efficiëntie van de bemesting al lang worden toegepast, wil het IMP nog geen datum stellen. Eerst zou onderzoek betere technieken moeten opleveren.

Bestrijding van de ammoniakemissies van de industrie is mogelijk met behulp van affakkelen en verbranden (waarbij NO_x wordt geëmitteerd) en met loogwassing of biofiltratie. Wegens het geringe aantal bronnen en de beperkte industriële uitworp wordt in het IMP geen emissienorm voorgesteld.

Resumerend kan worden gesteld dat er geen concreet emissiebeperkend beleid is geformuleerd. Alleen de groei van de emissies door uitbreiding van de intensieve veehouderij met nieuwe bedrijven zou enigszins worden afgeremd. Er is ook geen enkele termijn gesteld waarbinnen een bepaald beleid geëffectueerd zou moeten zijn.

In de eerder genoemde notitie over verzuring aan de Tweede Kamer werd echter wel gesteld dat een emissievermindering met de bovengenoemde maatregelen werd nagestreefd. Elke suggestie die de regering in dit opzicht heeft gedaan kan daarom alleen gezien worden als misleiding van het parlement. Gezien de enorme schade door verzuring, waarvoor ammoniak volgens diezelfde overheid voor circa 30% verantwoordelijk is, en gezien de zorg die de overheid uitdrukkelijk op zich heeft genomen om schadelijke emissies te verminderen en te voorkomen, mag gebrek aan daadkracht volgens sommige juristen worden opgevat als 'een handelen in strijd met hetgeen volgens het ongeschreven recht in het maatschappelijk verkeer betaamt' (Nieuw Burgerlijk Wetboek art. 6.3.1.1.). Dit kan ernstige consequenties hebben, zoals blijkt uit het juridisch hoofdstuk in dit boek.

14. BESTRIJDING VAN STALLUCHT

Biogas en mestspreading, de boer kan het niet betalen

Biogasinstallaties zijn veel genoemd als de sleutel tot de bestrijding van ammoniakemissies. Nu is het zo dat in deze installaties geen stikstofverbindingen in het niets verdwijnen. Bij een verkeerde behandeling van het vergistingsafval gaat de verdamping van ammoniak bijna onverminderd verder. Toch kunnen biogasinstallaties een belangrijke rol spelen.

In biogasinstallaties bevindt de mest zich in een afgesloten vergistingstank. Het voordeel daarvan is dat de gevormde ammoniakdampen samen met het methaangas afgezogen en daarna geneutraliseerd of verbrand kunnen worden. Wanneer ook het residu in een gesloten tank wordt opgeslagen, kan daarin de ammoniak worden afgefilterd en met bijvoorbeeld biofilters worden geneutraliseerd.

Een tweede voordeel is dat een deel van de stikstofverbindingen door de methaanvormende bacteriën wordt benut voor de vorming van bacterieel eiwit. In dit opzicht kan de kwaliteit van het gistingresidu nog worden verbeterd door nacompostering van de droge fractie. Het bacterieel eiwit wordt na spreading van de mest over het land relatief langzaam afgebroken tot nitraat of ammonium. Zo kunnen biogasinstallaties de stikstofrecycling in de landbouw helpen verbeteren. Dit vermindert niet alleen de luchtvervuiling, maar geeft ook een besparing van kunstmeststikstof later in het groeiseizoen.

Een derde voordeel is dat biogas theoretisch 1 à 2% besparing van het landelijk energiegebruik kan geven. Dit is in dezelfde orde van grootte als de hoeveelheid kernenergie die momenteel in ons land wordt opgewekt. De emissies door fossiele brandstoffen worden door biogas dus sterk beperkt. Ruime toepassing van biogasinstallaties past volstrekt in een lange-termijnstrategie waarin moet worden geprobeerd alle conventionele energieproductie te vervangen door duurzame energiebronnen.

Mest is kostbare zonne-energie

In mest is een aanzienlijke hoeveelheid energie opgeslagen. Het betreft hier in principe zonne-energie, die door de groene planten tijdens hun groei is vastgelegd. Bij de vertering van voedergewassen wordt door de dieren slechts een deel van de in de planten vastgelegde zonne-energie benut. De moeilijk afbreekbare stoffen komen in de

mest terecht en bevatten nog veel energie. In de Sahellanden, waar de mest van het vee snel droogt in de zon, wordt de mest bij gebrek aan hout als brandstof gebruikt. In Nederland werd dit vroeger ook gedaan. Op de waddeneilanden met hun drogende winden en relatief veel zonneshijns placht men koeievladen te keren, zodat ze los van de vochtige ondergrond kwamen. Wanneer de vladen aan beide zijden kurkdroog waren, werden ze in grote manden uit het veld gehaald. Ook de boeren in Friesland maakten turven van mest. Dit zou tegenwoordig niet meer mogelijk zijn. Het moderne gras bevat te weinig vezels en te veel vocht. De koeievladen zijn nu dunne, structuurloze grammofoonplaten, te vochtig om te keren of te drogen. Het drogen van stalmest is al helemaal onmogelijk. Stalmest bevat de urine van het vee, alsmede het spoelwater dat is gebruikt bij het schoonspuiten van het vee of de stallen. Hoewel mest erg veel energie bevat, zou het kunstmatig drogen van drijfmest meer energie kosten dan erin aanwezig is. De enige manier om de energie eruit te halen is met behulp van methaanvormende bacteriën. Door zuurstofloze vergisting van de mest kan het vrijkomende methaan als biogas worden opgevangen en gebruikt voor verwarming of ter vervanging van benzine.

Nu wordt na spreiding van de mest op het land de erin aanwezige energie alleen maar benut door allerlei bacteriën, schimmels en insecten. Voor de boer, die ten behoeve van zijn bedrijf dure elektriciteit en benzine moet kopen, is dit eigenlijk verkwisting. De mest bevat meer energie dan het bedrijf nodig heeft, maar de kosten om die energie eruit te halen zijn in de praktijk tot nu toe groter dan de opbrengsten. Moderne veehouderijbedrijven hebben veel elektriciteit nodig voor de dagelijkse bedrijfsvoering, voor de verwarming van spoelwater, enz. Het is jammer dat de energie-inhoud van de mest slechts in een beperkt aantal proefprojecten wordt benut. Door de mest van het bedrijf in een biogasinstallatie te vergisten, krijgt men, in de vorm van het brandbare methaangas, de beschikking over een groot deel van de energie-inhoud. Na reiniging is dit gas in principe voor dezelfde toepassingen geschikt als aardgas, benzine of LPG.

Men kan het gebruiken voor verwarmingsdoeleinden, voor de opwekking van elektriciteit met behulp van een generator, of ter vervanging van LPG, benzine, kerosine of dieselolie. Tot nu toe is in de veeteelt slechts op beperkte schaal gebruik gemaakt van biogas. Dit heeft als oorzaak dat de benodigde techniek duur is en (nog) nauwelijks bedrijfszeker, in groot contrast staat met de conventionele energie, die altijd bedrijfszeker is en relatief goedkoop wordt geleverd door de elektriciteitsproducenten en de benzinemaatschappijen. Voor een particulier is mestvergisting financieel riskant. Dit geldt echter niet voor de

totale Nederlandse samenleving. Immers, de voordelen van een schone lucht en verbetering van de bodemkwaliteit in natuur en landbouw zijn tot nu toe in geen enkele rendementsberekening meegenomen. Het wordt over het algemeen niet bestreden dat de produktie van biogas op mammoetveebedrijven in theorie rendabel is. Op middelgrote en kleinere bedrijven zou biovergisting alleen rendabel zijn bij een goedkope en gestandaardiseerde produktie van installaties. De techniek geeft nog moeilijkheden, maar als biovergisting op grote schaal wordt toegepast, rechtvaardigen de milieuvoordelen een overheidsstimulering in ruime mate.

Op het ogenblik blijken biogasinstallaties op boerenbedrijven nog een permanente bron van ellende te vormen. De 25 boeren die het hebben gewaagd een biogasinstallatie neer te zetten, hebben erg te kampen gehad met tegenvallende bouwkosten, teleurstellende gasopbrengsten en onvoorziene pech. Alleen met veel geluk en het niet tellen van de eigen arbeidsuren kwamen de kosten eruit. Theoretisch hadden de installaties wel rendabel kunnen zijn, maar de praktijk is samen te vatten als: bouwkosten die dubbel zo hoog waren als was voorzien, herhaalde technische mankementen en een halvering van het theoretisch rendement. Aangezien het hierbij gaat om bouwkosten in de orde van grootte van honderdduizend gulden, bedraagt het jaarlijks verlies vaak enkele tienduizenden guldens.

De eigenaars hebben zich gebundeld in de Werkgroep Biogasboeren en zich tot de overheid gewend voor verdere ondersteuning. Treurig is dat enkele fabrikanten van biogasinstallaties het bijltje erbij hebben neergelegd omdat de kosten niet in verhouding staan tot de baten. De fabrikanten die hun activiteiten wel willen continueren, worden belemmerd door de groeiende negatieve stemming over mestvergisting.

Het besteedbaar gezinsinkomen in weidebedrijven bedroeg over 1981/1982 volgens het Landbouw-Economisch Instituut 63 700 gulden per jaar en voor gemengde bedrijven met intensieve veehouderij 72 000 gulden per jaar (Landbouw-Economisch Instituut, 1983). Enige tienduizenden guldens van dit gezinsinkomen moeten worden gebruikt voor het opbouwen van het bedrijfskapitaal. Een groot deel van de boeren verdient aanmerkelijk minder dan het genoemde gemiddelde en door de superheffing op de melk zullen de inkomsten in de weidebedrijven dit jaar nog verder zakken. Het is daarom overduidelijk dat van de boer niet kan worden gevraagd enkele tienduizenden guldens verlies op de exploitatie van een biogasinstallatie te accepteren. Natuurlijk geldt ook hier het principe dat de vervuiler de kosten van de bestrijding moet betalen, maar dit principe zou in dit geval leiden tot een groot aantal faillissementen en dus tot grotere kosten

voor de samenleving. Het lijkt dan ook verstandiger nu gelden ter beschikking te stellen voor een gratis verzekering voor boeren tegen verlies op de exploitatie van een biogasinstallatie. Het is ook verstandig te aanvaarden dat de biogastechniek nog niet volmaakt is, dat de kosten van vervolmaking door de hele samenleving moeten worden gedragen, en dat tijdens de overgangsperiode het exploitatierisico niet uitsluitend op de individuele ondernemer mag drukken. Niet elke vorm van subsidiëring blijkt daarvoor geschikt. Het huidige subsidie-systeem is voornamelijk gebaseerd op een bepaald percentage (circa 50) van de begrote bouwkosten.

Nederland en de biogastechnologie

Biogas hoort tot de 'vernieuwbare' energiebronnen en vormt een van de mogelijkheden om biomassa als energiebron te benutten.

Terwijl in de ontwikkelingslanden 63% van de energiebehoefte wordt gedekt door de verbranding van biomassa (voornamelijk hout en mest) is dit in de ontwikkelde landen slechts 1%. Aangezien de agrarische en bosbouwkundige produktie juist in de ontwikkelde landen hoog is, is het duidelijk dat in deze landen biomassa een veel grotere rol zou kunnen spelen in de energievoorziening dan nu het geval is.

Al tweemaal organiseerde de Europese Commissie een internationaal symposium over energie uit biomassa, namelijk in november 1980 en in september 1982 (Chartier, 1983). Hierbij werd veel aandacht geschonken aan de mogelijkheden van de produktie van biogas uit landbouwafval en dierlijke mest. Biogas is een van de duurzame energiebronnen die op Europees niveau voor subsidiëring in aanmerking komen. Omdat biogas uit afval kan worden gemaakt, is dit niet ver-

Fotos verhuisd na pagina 271 Boven: Al in de augustusmaand verliezen populieren het merendeel van hun bladeren. Slechts een gering aantal bladeren, alleen de jongste aan de toppen van de takken, halen de reguliere tijd van de bladval van eind oktober tot begin november. Al vele jaren wordt dit verschijnsel door het Instituut voor Plantenziektkundig Onderzoek geweten aan hoge ozonconcentraties.

Links: Het verdwijnen van de iepen uit het Friese en Groninger landschap lijkt momenteel niet meer in hoofdzaak te wijten aan de iepziekte maar aan zure regen. Er worden niet voldoende bladeren gevormd. Verzwakking maakt de bomen gevoeliger voor iepziekte, maar ook zonder dat de symptomen van de iepziekte optreden verdorren de bomen in augustus en september massaal. Vaak gaat dit gepaard met een pathologisch natte kern in de boomstam.

Rechts: Evenals de iep en andere loofbomen vormt de aangetaste beuk in het voorjaar te weinig bladeren. Veel kortloten blijven kaal en alleen aan de toppen dragen de kortloten bladeren.

wonderlijk. De produktie van biogas legt immers geen beslag op het in dichtbevolkte landen als Nederland en andere EG-landen schaarse produktiemiddel grond.

Op dit moment zou het reeds mogelijk zijn op basis van oogstresten, mest en houtafval te voorzien in 4 à 7% van de geschatte energiebehoefte van de EG in 1985 (= 1250 mtoe; 1 mtoe is het equivalent van een miljoen ton olie). In de EG heeft biomassa de potentie om tegen het jaar 2000 een aandeel te hebben in de energievoorziening van 90 mtoe, dat is circa 7% van de geschatte energiebehoefte in de EG-landen in 1985. Een deel hiervan kan worden opgewekt door verbranding van energieplantages, dwz. oogsten die speciaal bestemd zijn voor de energiewinning. Dit kunnen bijvoorbeeld zijn maïs en aardappelen voor alcohol, of houtplantages met korte omloop. Volledige exploitatie van de biomassa (residuen, mest, energiecrops, enz.) als energiebron zou in de EG volgens sommige deskundigen 500000 banen kunnen scheppen (Hall, 1982). De helft van de bio-energie, nl. 45 mtoe, kan worden opgewekt op basis van oogstafval en mest. Sommige schattingen komen tot het veel hogere cijfer van 75 mtoe. Dat is bijna 6% van de geraamde EG-behoefte in 1985 (Chartier, 1980). Slechts 12% van de potentiële energie uit biomassa zou dus zijn op te wekken door de vergisting van mest.

Afval van akkerbouwgewassen in onbewerkte toestand is slechts tegen een hoge kostprijs te vergisten; stro en ander vezelig materiaal verstopt gemakkelijk de apparatuur en moet daarom eerst worden gehakseld. Ook zonder vergisting is de verwerking van dit soort afval problematisch. Vaak moet het zelfs tegen betaling worden gestort en stro wordt in grote delen van Europa gewoon op het veld verbrand. Onvergist is het namelijk moeilijk als meststof op het land te spreiden. Het produkt dat door de vergisting ontstaat is nog steeds een hoogwaardige meststof en is gemakkelijk te spreiden zonder hinder voor de verdere bewerking van het land of voor het groeiende gewas.

De Nederlandse situatie biedt door de vele veehouderijbedrijven een

Fotos verhuisd na pagina 271 Boven: Wervelbedinstallaties lijken de technisch perfecte oplossing voor het zure regen probleem. Ze hebben een groter rendement dan de conventionele verbrandingsinstallaties en de emissies van NO_x en zware metalen zijn gering. SO₂ kan voor 100% met behulp van kalk in de as gebonden worden. Omdat alle giftige stoffen in de as raken is hergebruik van het afval eigenlijk niet mogelijk. Zolang dit probleem niet is opgelost vreest de Stichting Natuur en Milieu voor een nieuw afvalprobleem bij grootschalig gebruik van dit systeem. (Foto Shell.)

Onder: Alleen al aan de balkons en galerijen van flats moet voor 300 miljoen tot 500 miljoen gulden hersteld worden. Betonrot wordt bevorderd door fabricagefouten in combinatie met verzurende eigenschappen van lucht en regen. Foto Nationale Woningraad.

goede uitgangssituatie voor het opzetten van een biogasindustrie. Biogas uit mest zou in de meeste EG-landen 0,5 à 1% van de energiebehoefte kunnen dekken (White, 1980). In Nederland zou dit percentage tweemaal zo hoog zijn (White, 1980), doordat de melkveehouderij hier op zeer intensieve wijze wordt bedreven en Nederland een zeer omvangrijke, niet grondgebonden veehouderij heeft.

De potentiële produktie van energie uit biogas is in Nederland in dezelfde orde van grootte als het huidige kernenergiepotentieel. Aan de produktie en het gebruik van biogas kleven echter geen onoplosbare milieuproblemen zoals aan kernafval. Dit zou voor Nederland een extra aansporing moeten zijn om bij de ontwikkeling van het biogaspotentieel het voortouw te nemen.

De energierijkdom van mest

De bacteriële verteerbaarheid van mest verschilt per diersoort. Het belangrijkste verschil is dat tussen mest van dieren die wel, en mest van dieren die geen celstof (cellulose) kunnen verteren. Varkens en pluimvee kunnen geen cellulose verteren; runderen, schapen en paarden kunnen dat wel, met behulp van de bacteriënfloora in de pens (bij herkauwers) of in de dikke en blindedarm (bij paarden). De door de darmflora verteerde cellulose is niet meer beschikbaar voor gasproduktie bij biogisting.

Er is nog een verschil dat de kwaliteit van de mest bepaalt. Paarden en runderen hebben, in tegenstelling tot varkens en pluimvee, een dieet met een hoog gehalte aan voor bacteriën moeilijk verteerbare vezels. Vaak zijn de verteerbare delen van de vezels ingebed in onverteerbaar houtstof (lignine). De mest bevat dan veel van deze door bacteriën slecht te verteren vezels.

Vezels die niet door de pensflora zijn aan te tasten blijken evenmin door de methaanvormende bacteriën van de biogasinstallatie te verteren. De gasopbrengst van mest van melkvee is dan ook klein, vergeleken met die van varkens, pluimvee of kalveren. Op theoretische gronden komen sommige onderzoekers daarom tot de conclusie dat de vergisting van varkensmest eerder rendabel zou zijn dan die van rundermest. Dit blijkt in de praktijk echter onjuist (Chartier, 1980; Instituut voor Mechanisatie, Arbeid en Gebouwen – IMAG –, Wageningen, 1982).

Particuliere initiatieven of overheidsstimulering

Ook sommige particuliere ondernemingen hebben zich de vraag gesteld hoe men een produkt dat meer en meer als ballast wordt er-

varen, kan omzetten in een produkt dat positief wordt gewaardeerd. Of, om het heel concreet te houden: wat te doen met een mestoverschot dat wel voor verontreiniging zorgt, maar niet op milieuvriendelijke wijze rendabel is te verwerken door het individuele bedrijf? Om een antwoord op die vraag te vinden hebben acht grote bedrijven en een organisatie van kleinere gespecialiseerde bedrijven in 1982 een stichting in het leven geroepen: de Stichting Verwerking Organische Stoffen.

De stichting heeft als doel te stimuleren dat organische stoffen zoals mest worden verzameld, verwerkt, bewerkt, verrijkt en daarna weer gedistribueerd door gespecialiseerde bedrijven. Men noemt deze gespecialiseerde bedrijven 'agrotechnische bedrijven'.

De aangesloten ondernemingen denken dat een centrale biogasproductie en mestspread wel degelijk rendabel kunnen zijn. In elk geval heeft deze werkwijze het voordeel dat de individuele ondernemer niet wordt opgezadeld met nieuwe bedrijfsrisico's. Door aparte bedrijven op te richten wordt het boekhoudkundig heel gemakkelijk na te gaan of, in welke mate en waarom de verwerking eventueel onrendabel zou zijn. Bij de individuele boer hebben nieuwe activiteiten een storende invloed op de overige bedrijfsvoering en bij hem is een eventuele toegenomen inefficiëntie boekhoudkundig niet hard te maken. Bij centrale verwerking in gespecialiseerde bedrijven is daarentegen elk nuttig én elk verloren arbeidsuur direct toe te rekenen aan de mestverwerking. Het wordt bij gespecialiseerde bedrijven onmiddellijk duidelijk of en in welke mate de overheid financieel moet bijspringen. Als deze overheidssteun wordt gefinancierd uit een heffing op het totale agrarische produkt, komen de kosten meteen daar waar ze horen te liggen, namelijk bij de consument. Centrale verwerking van de mest lijkt daarom maatschappelijk eerder haalbaar dan verwerking op de boerderij.

De rentabiliteit van biogas

De economische rentabiliteit van een installatie is voor de particuliere ondernemer in de eerste plaats sterk afhankelijk van de prijs van de conventionele energie – elektriciteit, aardgas, olie en benzine – en in de tweede plaats van de schaal van de installatie.

De elektriciteitsprijzen in de EG maken elektriciteitsopwekking met behulp van biogas pas concurrerend bij een veestapel groter dan 100 tot 200 stuks melkvee. Volgens gegevens van het IMAG zijn biogasinstallaties op mesterijen echter pas rendabel voor bedrijven met duizenden varkens.

De netto energieproductie van de installatie hangt af van verschillende

factoren: het type mest (naar diersoort en vochtgehalte), de temperatuur van de mest en het type, de grootte en de werkwijze van de installatie.

Met de grootte van de installatie neemt tot een zeker maximum ook de rentabiliteit van de installatie toe. Als goedkoop conventionele energie beschikbaar is, zijn kleine installaties wegens de hoge kapitaalskosten niet rendabel. Bij volumens boven 200 kubieke meter maken de investeringskosten van de installatie een relatief gering deel uit van de kosten van het biogas.

Recente economische analyses wijzen uit dat ten behoeve van een minimum netto energieproductie de mesofiele gisting zou moeten worden uitgevoerd bij een temperatuur van 5 à 10 °C beneden de optimumtemperatuur (het optimum voor de snelheid van de groei van de bacteriën en de gasproductie, nl. 35 °C; (Lettinga, 1980). Het warm houden van de mest kost immers ook energie.

Een belangrijke factor in de bouwkosten van vergistingsinstallaties is of er een grote of een kleine vraag bestaat naar de levering van voorgefabriceerde eenheden.

Volgens berekeningen van het IMAG is zelfs met 40% subsidie op de investeringen een biogistingsinstallatie op weinig bedrijven rendabel. Op melkveebedrijven tot en met 150 melkkoeien kan bij de aangenomen bouwkosten nergens een positief saldo worden behaald, zelfs niet met 40% subsidie en afschrijving op basis van de ongesubsidieerde restsom. Vanwege de schaafeffecten ligt het omkeerpunt bij ongeveer 175 melkkoeien. Bij een maximale subsidie kunnen mestereien met 2000 of meer varkens een klein voordeel behalen. Bedrijven die zeugen houden en biggen grootbrengen hebben echter een grotere behoefte aan verwarming. Deze bedrijven hebben al voordeel van een installatie bij een veestapel van 1400 dieren. Ook hier moet de afschrijving niet gebeuren op basis van vervangingswaarde, maar op basis van het niet-gesubsidieerde deel van de bouwkosten. Alleen bij kippenmesterijen is de situatie gunstiger. Er zijn veel grote bedrijven en voor bedrijven met meer dan 25000 kippen is een biogasinstallatie rendabel. Volgens andere onderzoekers (Dijkhuizen, 1982) is evenwel een ongesubsidieerde biogasinstallatie bij de huidige prijzen zelfs voor mesterijen met 60000 kippen nog niet rendabel.

In de berekeningen van het IMAG zijn niet opgenomen de al dan niet te voorziene technische mankementen, die de investerings- of onderhoudskosten kunnen doen stijgen. Bij een zo nieuwe techniek, dat hebben de twintig bestaande biogasinstallaties bij boeren overduidelijk bewezen, zijn altijd kinderziekten. Men mag er dus gerust van uitgaan dat volgens de berekeningen van het IMAG en met inachtneming van onvoorziene risico's het voor de individuele ondernemer

onrendabel of althans hachelijk is een biogasinstallatie aan te schaffen. Het wachten is dus op stijgende energieprijzen, verbeterde en goedkopere technieken, samenwerkingsverbanden of vergaande overheidsinitiatieven. Het is te voorzien dat de technieken in de toekomst goedkoper zullen worden, maar dat geldt ook voor de conventionele technieken van energieopwekking en de winning van fossiele brandstoffen. Het is bij de huidige grote aantasting van het milieu door ammoniak en het gebruik van conventionele energie in de landbouw echter geen goede zaak om te wachten tot de mechanismen van de vrije markt de problemen oplossen. De nadelen van de huidige situatie rechtvaardigen vergaande regulering op basis van de nieuwe meststoffenwet, met vermindering van een grote economische ontwrichting van de agrarische sector. Dit heeft tot logisch gevolg dat de overheid de financiële consequenties van de nieuwe mestwetgeving moet dragen, voor zover dit niet redelijkerwijs door de landbouwbedrijven zelf kan worden gedaan.

Door het IMAG is berekend dat er in Nederland eigenlijk geen zelfstandige veebedrijven bestaan die groot genoeg zijn om een biogasinstallatie rendabel te maken. Dit geldt het sterkst voor melkveebedrijven. Daarom is door het Milieukundig Studiecentrum van de Rijksuniversiteit in Groningen onderzocht of er bedrijfscombinaties zijn te maken waarvoor een gezamenlijke biogasinstallatie wel rendabel is (Offermans, 1982). Bij biogasproductie op bedrijfscombinaties ontstaan veel extra kosten door het transport van de mest en van het geproduceerde gas of de elektriciteit. Melkveehouderijen zouden wegens een energieoverschot eigenlijk nog een andere afnemer in de buurt moeten hebben voor het overschot. Alleen de combinatie van een melkveehouderij en een varkensmesterij bleek er bij dit onderzoek gunstig uit te springen, mits de afstand tussen de bedrijven niet groter dan 500 meter zou zijn.

De berekende ondergrens lag bij een combinatie van een bedrijf met 76 stuks melkvee en een bedrijf met 675 varkens. Ook bleek een combinatie van twee bedrijven met elk 656 varkens net een rendabele biogasinstallatie mogelijk te maken. Hoe groter de afstand tussen de samenwerkende bedrijven, hoe sterker de kosten stijgen. Alleen een elektriciteitsleiding van 500 meter tussen twee bedrijven kost bijvoorbeeld al 3000 gulden, en een gasleiding 5000 gulden. In totaal zouden er in Nederland maar met 8 à 9% van de veehouderijbedrijven rendabele combinaties te maken zijn. Ook voor combinaties blijft het voordeel evenwel zo marginaal dat dit niet opweegt tegen de bedrijfsrisico's.

Het Centrum voor Energiebesparing te Delft heeft zich eveneens aan rentabiliteitsberekeningen gewaagd. Daar komen de onderzoekers tot

de conclusie dat de economische haalbaarheid van mestvergisting bij de huidige stand van de techniek wordt bereikt bij melkveebedrijven met 135 koeien. In dat geval komen circa 1000 bedrijven in aanmerking. De potentiële gasopbrengst bedraagt ongeveer 9 miljoen m³ aardgas-equivalenten. Het Centrum voor Energiebesparing verwacht niet dat de veehouders veel interesse zullen tonen zolang er weinig aan de mestvergisting te verdienen valt en zolang de risico's voor het bedrijf groot zijn. Immers, van de 25 biogasinstallaties die sinds 1979 in Nederland in bedrijf zijn, functioneert slechts een kwart naar tevredenheid. Toch is men bij het Centrum van mening dat de technische problemen kunnen worden opgelost en dat het ontwikkelen van een biogasindustrie in Nederland een impuls voor de werkgelegenheid zou betekenen. Voorwaarde daarbij is echter een actief stimulerend overheidsbeleid, omdat het in deze ontwikkelingsfase onjuist is te kijken naar de economische haalbaarheid (De Boks, 1983).

De provincie Noord-Brabant heeft in augustus 1983 de Stichting Verwerking Organische Stoffen de opdracht gegeven een grootschaliger oplossing te zoeken. Inmiddels is een verkennende studie gemaakt en de eerste conclusies zijn hoopgevend. Het plan dat door de Stichting is berekend behelst de bouw van acht tot tien biogasinstallaties, verspreid over de provincie Noord-Brabant.

Alle mest uit het gebied moet dan worden verzameld en naar deze biogasfabrieken gebracht. Voor wat de energiebesparing betreft, komt de Stichting tot dezelfde conclusie als die enkele jaren eerder al door de Europese Commissie voor alle EG-landen te zamen was getrokken: de biogasproductie kan in de provincie voor ten minste 1% in de energiebehoefte voorzien. Volgens directeur Dekker zijn de berekeningen van de Stichting beslist reëel, omdat niet is geprobeerd nieuwe dingen uit te vinden. Er is uitgegaan van bestaande en beproefde apparatuur. Het enige probleem bij de technieken die al in ons land worden toegepast is dat de schaal te klein is.

De Stichting heeft daarom de rentabiliteit van heel grote buitenlandse installaties bekeken. De installaties op mammoetbedrijven met vele duizenden varkens blijken heel rendabel te zijn. Men kwam tot dezelfde conclusie als het Centrum voor Energiebesparing, het IMAG en het Milieukundig Studiecentrum te Groningen, namelijk dat de bedrijven in Nederland te klein zijn voor een eigen biogasinstallatie. Dit heeft voor de Stichting Verwerking Organische Stoffen de consequentie dat de vergisting centraal bij gespecialiseerde, zeer grootschalige bedrijven moet gebeuren. Gedacht wordt aan gigantische vergistingsinstallaties, gevestigd op strategische punten die een soepele aan- en afvoer van mest en vergistingsresiduen waarborgen.

De strontrace door Nederland

Het probleem van de mestoverschotten is deels een probleem van de kosten van spreading. De drijfmest en ook het vergistingsresidu van een biogasinstallatie zijn door centrifugering te scheiden in een vloeibare en een vaste component. De vaste component bevat in verhouding tot zijn volume een aanzienlijke hoeveelheid nutriënten en is een hoogwaardige meststof. Het volume kan door nacompostering nog worden verkleind.

Door een gedifferentieerd spreidingsbeleid voor de vloeibare en de vaste componenten kunnen de kosten van spreading in de hand worden gehouden. De vloeibare component, die wegens zijn gewicht en volume alleen tegen hoge kosten kan worden getransporteerd, kan in de overschotregio worden verspreid; de vaste component kan goedkoop over lange afstanden worden vervoerd. De Grontmij heeft zelfs plannen gemaakt om de vloeibare mest via pijpleidingen van de overschotgebieden naar de veenkoloniën te transporteren. (Hierbij mag erop worden gewezen dat een van de plaatsen waar het grondwater al is verzuurd bij het Groningse Sellingen ligt.)

Er bestaat ook de mogelijkheid de dierlijke mest direct te verrijken met die plantenvoedende stoffen die er eigenlijk te weinig in zitten. Op deze wijze worden de kosten van een afzonderlijke verspreiding van kunstmeststoffen over het land bespaard.

De vervuiling door ammoniak is het hoogst in de provincies met een mestoverschot. Velen zien de oplossing voor het ammoniakprobleem uitsluitend in een betere spreading van de mest over heel Nederland. Dit heeft als nevenvoordelen dat de overbemesting door fosfaat wordt beperkt en dat in gebieden met te weinig mest minder kunstmest hoeft te worden aangeschaft.

Spreading van de mest geeft misschien wel een energiebesparing omdat minder kunstmest hoeft te worden geproduceerd, maar spreading kost ook benzine. Het Milieukundig Studiecentrum van de Rijksuniversiteit te Groningen heeft onder de titel *Een nieuwe strontrace door Nederland* alle voor- en nadelen eens op een rij gezet (Bruins, 1983). De milieuvoordelen in verband met overbemesting bleken positief en het totale energieverbruik zou dalen met ongeveer 8 000 000 000 000 gigajoule. Per saldo zou er door het toegenomen vervoer vooral een stijging zijn van de uitwerp van stikstofoxiden, maar een daling van de luchtvervuiling door de verminderde kunstmestproductie. Mestspreading zou verder 500 arbeidsplaatsen scheppen. De totale kosten om de mest kwijt te raken zouden door een betere spreading nauwelijks worden beïnvloed. De financiële besparing op kunstmest wordt tenietgedaan door de hogere vervoerskosten.

15. DRINKWATER

Natuurlijk water is niet langer drinkbaar

Elke dag komt er een stroom fris en goedkoop water uit de kraan. Die stroom lijkt onuitputtelijk, maar dat dreigt te veranderen. Iedereen weet dat het Rijn- en Maaswater alleen met technische hoogstandjes in slecht smakend kraanwater is te veranderen. De dreigende aantasting van het grondwater is evenwel nog niet algemeen bekend.

Grondwater wordt bij de tegenwoordige bemestingspraktijk onbruikbaar voor menselijke consumptie, stellen onderzoekers van de Vrije Universiteit te Amsterdam (Appelo, 1982). Het grondwater op de Veluwe is al tot op tientallen meters diep verzuurd. Het bevat te veel opgelost aluminium en de nitraatgehalten zijn enkele malen hoger dan de toegestane gezondheidsnormen. Het verzuringsfront dringt met grote snelheid dieper de grond in en bederft binnenkort de totale onderliggende voorraad drinkwater.

In ons land is een neerslagoverschot van 30 à 37 cm per jaar. De pakketten grondwater zijn vaak honderden meters diep en stromen met een snelheid van slechts 10 à 100 meter per jaar. Daarom moet er rekening mee worden gehouden dat het tientallen of honderden jaren duurt voordat het grondwater weer schoon is. Een heel lage zuurgraad kan bij het stoppen van verdere zuurtoevoer wel in kortere tijd minder zuur worden. Bepaalde zuurbufferende chemische processen, zoals de silicaatbuffering, verlopen bij heel zure omstandigheden zo traag dat hier eerder de buffersnelheid dan de totale buffercapaciteit te kort schiet. Bij het stopzetten van de zuurtoevoer kan dit proces zijn achterstand als het ware inhalen. Alleen de traagheid van deze processen in verhouding tot de grootte van de zuurtoevoer is de reden dat het verzuringsfront na het verbruiken van het totale bufferende vermogen van de kalk plotseling diep in de grond schiet.

De kringloop van het water

Het water bevindt zich op de wereld in een grote kringloop. Het verdampt en regent vervolgens weer op de aarde neer. Als de regen op het vasteland valt, vloeit een deel via het aardoppervlak en de rivieren naar de zee. De rest zakt weg tussen de bodemdeeltjes en stroomt heel langzaam door de grond. Tientallen jaren of eeuwen later komt het in lager gelegen gebieden weer naar boven. Gebieden waar het regenwater in de bodem naar beneden kan zakken noemen we

infiltratiegebieden. In kwelgebieden komt het water weer naar boven. Het centrale plateau van de Veluwe en het Drents plateau bijvoorbeeld zijn infiltratiegebieden. De randen van deze plateaus, langs het IJsselmeer en in het lage midden van Friesland, zijn kwelgebieden. Voor zover de kwelgebieden al niet in de zee liggen, stroomt het water vanuit de kwel via beken en rivieren naar zee (Colebrander, 1983). Tussen infiltratie- en kwelgebied wordt in ons land tegenwoordig door de waterwinbedrijven de maximale hoeveelheid water afgetapt.

De watervoorraad in de grond is heel groot. De grond bevat ongeveer 25% van de zoetwatervoorraad in de wereld. Sinds lang is ontdekt dat het grondwater een goede bron is voor drink- en industriewater. Vroeger werd dit water uit tal van privé-putten gehaald. Elk erf had zijn eigen waterput of pomp. In dunbevolkte delen van Europa is dat nog steeds zo. In een dichtbevolkt land zoals Nederland is het gevaar van verontreiniging van de privé-putten groot. Omdat bovendien de distributiekosten in ons land klein zijn, is de waterwinning centraal ter hand genomen. Nederlands grote dorst wordt door de waterleidingbedrijven gelest met 1 miljard kubieke meter per jaar. Tachtig procent van het drink- en industriewater, 800 miljoen kubieke meter, is afkomstig uit het grondwater. Grondwater leek een eeuwige bron voor drinkwater van goede kwaliteit. Hoewel er in het noorden en westen van het land, door de nabijheid van de zee, altijd enige problemen zijn geweest door verzilting van het grondwater en plaatselijk het grondwater al is vervuild door de talloze gifbelten, leek het grondwaterpakket in de hooggelegen en diepe zandgronden onbetwist een blijvende stroom zuiver water te leveren. Deze droom is echter voorbij.

Omdat alle grondwater ooit als regen is gevallen, voert het alle luchtverontreiniging mee. De zure regen heeft in veel landen reeds hier en daar het grondwater verzuurd. Het uit de bodem opgeloste aluminium en het uit de leidingen opgeloste koper en lood maken het water gevaarlijk voor de gezondheid. Met name het opgeloste aluminium is schadelijk voor de nieren.

In Nederland wordt de verzuringsproblematiek niet alleen veroorzaakt door de luchtverontreiniging. Juist op de zandgronden, waaruit het Nederlandse drinkwater wordt gewonnen, zorgt het overvloedig gebruik van mest voor verzuring. De meststoffen worden slechts voor een klein deel door de gewassen opgenomen. De rest spoelt als verontreiniging met het infiltrerende regenwater naar diepere bodemlagen.

Ir. R. Dorfmeijer van de Gelderse dienst Milieuhygiëne noemt deze problematiek voor zijn provincie 'tamelijk ernstig'. In Gelderland produceert het vee jaarlijks vijf miljoen ton mest en die produktie is

geconcentreerd in een beperkt aantal gemeenten. Mestbanken, opgericht om mestoverschotten uit mestrijke gebieden over te brengen naar mestarme gebieden, helpen volgens Dorfmeijer wel, maar onvoldoende. Ondanks de mestbanken heeft Gelderland een miljoen ton mest te veel. Dorfmeijer komt tot de conclusie dat nu al bij ettelijke particuliere en gemeentelijke waterwinningen zorgelijke situaties bestaan, waarbij sprake is van concentraties stikstof en fosfaat tot soms vele malen boven de toch al ruime Nederlandse normen. Bestrijding van excessen en hard optreden tegen personen of bedrijven die zich schuldig maken aan extreme overbemesting, noemt hij dringend noodzakelijk (*de Volkskrant*, 21 april 1983).

Onderzoek

In juli 1978 hebben het Rijksinstituut voor de Drinkwatervoorziening (RID) en de Vereniging van Exploitanten van Waterleidingbedrijven in Nederland (VEWIN) samen een meetnet ingericht om informatie te krijgen over de belasting van het grondwater met verontreinigingen uit de neerslag in gebieden die van belang zijn voor de drinkwatervoorziening. Het RID-meetnet voor de grondwaterkwaliteit is opgericht in opdracht van het toenmalige ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne. Via dit meetnet wordt een groot aantal gegevens verzameld over het grondwater in de provincies Groningen, Drenthe, Overijssel, Gelderland, Utrecht, Noord-Brabant en Limburg. De grondwaterkwaliteit wordt op 10, 15 en 30 meter diepte gemeten.

Bij het genoemde onderzoek is geconstateerd dat bij verzuring het koolzuur(HCO_3)gehalte in het grondwater daalt en het calciumgehalte stijgt. Is voor koolzuur, dat als zwak zuur een bufferende werking heeft, het nulpunt bereikt, dan daalt de zuurgraad snel en zullen de in de bodem aanwezige metalen uitlogen. Uit de meetgegevens van de KNMI-rapportage valt af te leiden dat in de periode 1978-1980 de pH van de neerslag schommelde tussen 4,08 en 4,96; zeer lage waarden dus.

Omdat de meetgegevens pas enkele jaren zijn verzameld, is het nog moeilijk een trend in de verandering van de grondwaterkwaliteit aan te geven. Volgens directeur Venhuizen van de WAPROG is echter gebleken dat ook in Noord-Brabant gebieden zijn aan te wijzen waar de koolzuurgehalten zo laag zijn dat een begin van verzuring aannemelijk is. Zo is nabij het pompstation Schijf van de Waterleiding Noordwest-Brabant op 25 meter diepte een pH gemeten van 3,6, een waarde waarbij het aluminium uit de bodem sterk oplost. Ook in Groningen, waar bij het pompstation Sellingen een ondergrond is van kalkarme zanden, lijkt de invloed van verzuring tot op enkele tientallen meters

diepte meetbaar (Venhuizen, 1983).

Volgens de WAPROG zullen de drinkwaterbedrijven in de toekomst te maken krijgen met een dalende pH van het grondwater (verzurend grondwater) en een stijging van het gehalte aan zware metalen. Daarbij zullen de bedrijven die hun water winnen uit diepe kalkloze zandgronden koploper zijn. Omdat de wenselijke zuurgraad van drinkwater 8,0 à 8,3 is, zijn extra kunstgrepen nodig om het water op deze kwaliteit te brengen. De zware metalen zullen de waterleidingbedrijven dwingen een nieuwe zuiveringstrap in te voeren. Het trieste daarbij is, volgens de WAPROG, dat de eenmaal op gang zijnde veranderingen in de kwaliteit van het grondwater niet meer kunnen worden omgekeerd. Directeur Venhuizen spreekt zich daarom uit voor een ander energiebeleid, met voorrang voor duurzame energiebronnen zoals zonne-energie, windenergie en aardwarmte.

In opdracht van het ministerie van VROM heeft de Vrije Universiteit onder leiding van dr. C. A. J. Appelo een onderzoek gedaan naar de verzuring van het grondwater op de Noordwest-Veluwe. Al enige jaren wordt onderkend dat vooral de uitspoeling van nitraat in gebieden met een zware bemesting een reële bedreiging vormt voor de kwaliteit van het grondwater. De betrekkelijke onbekendheid met dit onderwerp leidde in 1978 nog tot het advies om de beïnvloeding van diep grondwater niet te betrekken in de reglementering van het mestgebruik, een advies dat door de uitkomsten van het onderzoek van de Vrije Universiteit niet meer houdbaar is (Appelo, 1982).

Er is de laatste jaren bij enkele pompstations een verhoging van het nitraatgehalte geconstateerd. De nitraatconcentratie kan in vervuild grondwater tot meer dan tien maal zo hoog zijn als in schoon Veluwewater. (Schoon Veluwewater is water dat vele tientallen jaren geleden aan het grondoppervlak is geïnfilterd en dat zich nu op grote diepte bevindt.) In sommige gevallen kan alleen door het mengen van water uit de verschillende winningsputten nog een acceptabele concentratie van het nitraat worden verkregen.

In enkele pompputten van het station 'Krachtighuizen' van de Waterleiding-Maatschappij Gelderland nam het nitraatgehalte in de jaren zeventig met 400% toe tot de maximale hoeveelheid die de Wereldgezondheidsorganisatie toelaatbaar acht (0,8 millimol NO_3/l , dat is 50 mg/l). De toegenomen stikstofgift in de landbouw leidt de laatste tijd tot nitraatconcentraties van gemiddeld $2,1 \pm 1$ mmol NO_3/l (= 133 ± 63 mg NO_3/l). Dit is vele malen hoger dan wat maximaal aanvaardbaar is.

In het verzurende grondwater onder een bos bij Kootwijk vonden de onderzoekers van de Vrije Universiteit dat op 4 meter beneden het maaiveld het grondwater tussen 1977 en 1981 25 maal zo zuur was

geworden. De pH daalde van 5,8 naar 4,4. Daarbij werd de hoeveelheid opgelost aluminium zestigmaal hoger. De aluminiumconcentratie steeg van 2 naar 120 micromol/l.

Het verzuringsfront is op veel plaatsen 15 meter diep in de ondergrond doorgedrongen. Bij de plaatsen Garderen en Koudhoorn werd, tijdens boringen, tot 72 meter diepte onder het maaiveld vervuild water aangetroffen.

De gevonden verzuring lijkt verklaarbaar door de zure regen in combinatie met het hoge mestgebruik. In de door de vu onderzochte streek is het stikstofgebruik het hoogst van ons land, zo niet het hoogst ter wereld. Het gebied kent een goed ontwikkelde bioindustrie en er is nauwelijks sprake van mestafvoer naar andere landstreken. In enkele gemeenten op de Noordwest-Veluwe wordt zelfs mest van elders aangevoerd. Intensieve veehouderijen uit andere gemeenten pachten soms stukken grond in Garderen voor het uitrijden van hun mest. Dit uitrijden zonder bemestingsdoel is ook in andere gemeenten geconstateerd.

De produktie van stikstof in de dierlijke mest is per hectare cultuurland in de gemeenten Putten, Ermelo en Barneveld vanaf 1960 tot 1982 met 150 à 300% gestegen. Per hectare cultuurgrond is de stikstofproduktie 400 à 500 kg/ha. Aan kunstmeststikstof wordt hier op bouwland nog 50 à 70 kg/ha bijgestrooid en op grasland 300 à 350 kg/ha. Dit brengt het totaal aan stikstof op meer dan 500 à 850 kg/ha. Omdat een groot deel van de drijfmest op maisakkers wordt gedumpt, ontvangen deze delen van het bouwland jaarlijks wel duizenden kilo's stikstof per hectare. Ter vergelijking is het goed te memoreren dat in bijna alle EG-landen gemiddeld slechts 50 kg kunstmeststikstof per hectare wordt gestrooid, en in de Verenigde Staten 19 kg.

De bodem is door de ongekend grote stikstofgift in Nederland geworden tot een stortkoker, waardoor het teveel aan stikstof regelrecht in het diepste grondwater wordt gedumpt. Uit balansberekeningen is gebleken dat de inbreng van stikstof in het grondwater vanuit de landbouw in 1978 twintigmaal zo hoog was als vanuit de luchtvervuiling. Vijfentwintig procent van alle stikstof lekt direct door naar het grondwater en zorgt daar zowel voor verzuring als voor ongezond hoge nitraatconcentraties.

De chemisch arme zandgrond van de Noordwest-Veluwe bestaat voor ongeveer 95% uit zuiver kwartszand. Het meeste zand is kalkarm, maar er zijn enkele kalkhoudende lagen. Omdat de grondlagen weinig slib en geen organisch materiaal bevatten, vinden, met uitzondering van het oplossen van kalk, geen chemische reacties plaats in het grondwaterpakket. De samenstelling van het Veluwewater is alleen afhankelijk van de kwaliteit van de regen en van de stoffen die

door de regen uit de bouwvoor worden gewassen. Door het indampingseffect verdampt de helft van het regenwater en wordt de vervuiling nog ingedikt. In de bodem zullen ook, onder invloed van de vegetatie en het bodemleven, zuurvormende en zuurconsumerende processen plaatsvinden. Zonder rekening te houden met deze processen, kan worden gesteld dat reeds voor 1940 de zuurgraad van het infiltrerende regenwater door indamping kan dalen tot een waarde in de buurt van pH 3,5. Bij de huidige hoge verontreiniging met zuurvormende stoffen daalt de pH van het infiltrerende water zelfs beneden 3.

Een snelle daling van de zuurgraad komt niet onverwacht, maar kondigt zich aan door een verlaging van het koolzuurgehalte van het grondwater. Het is van belang te weten dat de verzuring van het grondwater wordt geneutraliseerd zodra het water in contact komt met kalk. De hoeveelheid zuur is slechts gering en de oplosbaarheid van kalk is groot. Het water blijft zuur in zones waar geen kalk voorkomt. Veel zanden van de bodemformaties op de Veluwe en ook elders in Nederland zijn kalkloos. De enige aanwezige kalk is die welke al in het grondwater is opgelost vanuit de kalkbemesting van de bouwvoor. De kalk is daarbij, onder invloed van de grote productie van koolzuur in de bouwvoor, opgelost tot calciumcarbonaat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) en in die vorm wordt deze stof met het grondwater naar diepere bodemlagen getransporteerd. Niet verzuurd grondwater bevat tweemaal zoveel carbonaat-ionen (koolzuur) als calcium-ionen. Deze verhouding blijkt in het Veluwewater verstoord: het bevat te weinig carbonaat-ionen.

In ernstig verzuurd grondwater kan de carbonaatconcentratie zelfs tot nul dalen. In dit geval buffert koolzuur als zwak zuur niet langer de zuurgraad. De zuurgraad daalt, nitraat lijkt het carbonaat te vervangen en het water verzuurt snel. Het nitraat ontstaat door nitrificatie van ammoniak in de grond ($\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 + \text{CaCO}_3 = \text{Ca}_2^+ + \text{NO}_3^- + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$). Het koolzuur wordt daarbij omgezet in kooldioxide, dat als gas uit de grond ontsnapt. Het kleiner worden van de hoeveelheid opgelost carbonaat in verhouding tot de hoeveelheid opgelost calcium lijkt een goede en duidelijk meetbare aanwijzing dat het grondwater bezig is te verzuren. Wanneer het carbonaatgehalte het nul-niveau nadert, daalt de zuurgraad zeer plotseling. Het verzuringsfront tekent zich daarom scherp af in het grondwater. Op enkele meters diepte in een meetput van de vu werd geconstateerd dat de verzuringsgrens voorbij het meetpunt schoof.

Zoals de resultaten van elk onderzoek naar de schadelijke gevolgen van zure regen, zijn ook de conclusies van het onderzoek van de Vrije Universiteit onderhevig aan forse kritiek (Hoeks, 1983). Door dr. J. Hoeks van het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding te

Wageningen wordt de juistheid van de conclusie van Appelo, dat het effect van zure regen tot op 15 meter diepte merkbaar is, in twijfel getrokken. De buffercapaciteit van alle bodems, ook van extreem kalkarme gronden, zou zo groot zijn dat het verzuringsfront hoogstens met centimeters per jaar kan voortschrijden.

De gegevens van Appelo wijzen erop dat de bodem van de Veluwe tot op circa 25 meter diepte ontkalkt is; beneden dat niveau is het grondwater niet zuur. Dit ontkalkingsproces vindt ook plaats als het regenwater alleen iets zuur is door het van nature opgeloste atmosferische koolzuur. Dit proces is al aan de gang sinds de afzetting van de sedimenten en daarmee heeft de recente verzuring van de regen in feite niets te maken. Alleen het nog zuurdere grondwater in de bovenste vijf meter zou volgens Hoeks kunnen zijn veroorzaakt door de zure regen. In dat geval is de verzuring niet in de laatste jaren ontstaan, maar moet ze al vijftig jaar bezig zijn. Indien een pH lager dan 5 (het niveau net na ontkalking) als maat wordt aangehouden voor effecten van zure regen, blijkt in de kwetsbaarste gebieden, volgens Hoeks, de verzuring tot pH 4 te zijn doorgedrongen tot 5 à 10 meter diepte. Verdergaande verzuring tot pH 3 of lager is alleen geconstateerd in de bovengrond tot maximaal 50 centimeter diepte. De effecten daarvan zouden alleen zijn te constateren in bossen op hooggelegen humusarme zandgrond. Het grondwater in landbouwgebieden zou daarentegen weinig kwetsbaar zijn, omdat daar de pH van de grond op peil wordt gehouden door een onderhoudsbekalking. De zure regen vergt een extra onderhoudsbekalking van 125 à 200 kilo kalk per jaar.

Regentonnen en waterputten

In ons land wordt nauwelijks meer gebruik gemaakt van water uit regenbakken of eigen waterputten. In het buitenland zijn dergelijke systemen echter voor grote groepen mensen de enige watervoorzieningen. Bij deze kleine particuliere waterbronnen of bij het gebruik van regentonnen is er natuurlijk geen sprake van enige controle op en zeker niet van enige kunstmatige verbetering van de waterkwaliteit. Het water uit putten en tonnen kan een ernstige bedreiging voor de volksgezondheid betekenen. In Zweden maken bijvoorbeeld 1,1 miljoen mensen gebruik van eigen waterbronnen en 400 000 van hen wonen in gebieden waarin de waterkwaliteit aangetast kan zijn door verzuring (Environment, 1982 Com.). Er zijn in Europa en Noord-Amerika ook miljoenen mensen die het regenwater in voorraadtanks verzamelen.

In Noord-Amerika wordt erg veel gebruik gemaakt van regenwater-

bakken. In de staat Ohio zijn er naar schatting al 67 000. Bij deze moderne variant op de regenton loopt het regenwater van het dak meestal in een ondergrondse betonnen bak. Omdat het daarin verzamelde water over het algemeen zonder enige reiniging wordt gebruikt, is de kwaliteit van het drinkwater in dit gebied rechtstreeks afhankelijk van die van de regen en van de droge depositie op de daken.

De waterkwaliteit wordt echter ook beïnvloed door de materialen van de daken, de voorraadtanks en de leidingen. Metalen zoals koper en lood zijn al in tamelijk grote hoeveelheden in de neerslag aanwezig, maar kunnen ook vanuit het soldeer in het drinkwater raken, of er door corrosie van de loden slabben op het dak of van de koperen of loden leidingen in terechtkomen.

Amerikaans onderzoek in Pennsylvania bracht aan het licht dat de bezinksels in de bakken vaak een ophoping van lood en cadmium bevatten. Het bezinksel komt gedeeltelijk in het drinkwater zodra de inhoud van de bak opgewelpt, bijvoorbeeld als tijdens een regenbui de bak volstroomt. Vaak is het water in de bakken, ten gevolge van het oplossen van de kalk uit het beton, minder zuur dan het regenwater.

Bij dit onderzoek bleek ook dat de lood- en koperconcentraties vooral hoog waren in water dat een nacht in de leidingen had gestaan. Daarbij werden in ten minste een kwart van de gevallen de Amerikaanse gezondheidsnormen voor koper overschreden. Dit houdt in dat men 's ochtends geen thee zou moeten zetten van het eerste water uit de kraan. Men zou eerst een emmervol moeten aftappen en laten weglopen. (Ook in Nederland wordt dit aangeraden, met name in oude huizen waar nog veel loden leidingen zijn. Dit geldt eveneens voor het eerste water uit geisers, dat vanwege de waakvlam altijd lauw en dus extra corrosief is.)

Lood kan overigens ook afkomstig zijn van plastic pijpen, omdat loodstearaat wordt gebruikt als stabilisator bij de productie van polyvinyl plastics.

Bij het gebruik van zuur grond- of oppervlaktewater bestaat, net als bij het gebruik van regenwater, het gevaar dat lood en koper uit de leidingen oplossen. Dit water kan, zoals bekend, ook veel opgelost aluminium bevatten. In Amerika is gerapporteerd dat het water van enkele beken die dienen om een drinkwaterbassin te vullen meer aluminium bevat dan volgens de gezondheidsnormen toelaatbaar wordt geacht. Enig aluminium in het drinkwater lijkt niet direct giftig voor gezonde mensen, maar het is wel funest voor nierpatiënten. Bij dialysepatiënten raakt het aluminium onmiddellijk in het bloed en kan het waarschijnlijk hersenbeschadiging veroorzaken. Dit verschijnsel staat bekend als 'dialysedementie'. In het Adirondackgebied van de

staat New York zijn ten gevolge van de zure regen aluminiumconcentraties tot 800 microgram per liter water gemeten, terwijl een concentratie van 50 microgram al als gevaarlijk voor dialysepatiënten wordt beschouwd (E.P.A., 1983). In de EEG zijn ca. 60 000 dialysepatiënten. De commissie van de EEG heeft voorgesteld 30 microgram aluminium per liter als het maximaal toelaatbare gehalte voor het dialysespoelwater toe te staan vanaf 1 januari 1986. Vanaf 1 januari 1988 mag dit niet meer zijn dan 10 microgram per liter.

16. ZWAVELDIOXIDE

Ontstaan en bestrijding

Zwavel is een natuurlijk bestanddeel van de bodem en een belangrijke plantenvoedende stof. Zwaveldioxide is echter een van de hoofdbestanddelen van de luchtverontreiniging. Jaarlijks wordt daarvan in ons land 375 000 ton de lucht in geblazen. Zwaveldioxide wordt gevormd door de verbranding van zwavel of zwavelverbindingen.

Alle fossiele brandstoffen bevatten een bepaalde hoeveelheid zwavel. Bij verbranding van kolen en olie wordt de zwavel voor het grootste deel verbrand tot zwaveldioxide. Slechts een klein deel blijft in de as achter. Bij de verbranding van kolen en olie wordt meer dan 95% van de aanwezige zwavel geëmitteerd als zwaveldioxide, 1 à 2% als zwaveltrioxide. Minder dan 2% wordt gebonden aan asdeeltjes (Lier, 1982). Bij de verbranding van gas zou alle zwavel worden geëmitteerd als dioxide. Het in Nederland gebruikte aardgas en LPG bevatten echter nauwelijks zwavel.

Wanneer we een juiste indruk willen krijgen van de milieuconsequenties van ons energiegebruik, kunnen we de zwavelemissies het best uitdrukken in kilo's per energie-eenheid. De zwavelemissies bij het stoken van kolen bedragen dan circa 0,65 kilo SO_2 per gigajoule (1 kg kolen = 29,3 megajoule = 7000 kilocalorieën en bij het stoken van olie en gas respectievelijk 0,47 en 0,0005 kg/gj. Deze getallen zijn weinig sprekend. Ze betekenen echter dat elke Nederlander zijn milieu vervuult met 26 kilo zwaveldioxide per jaar.

Het achtergrondniveau

Van nature bevat de lucht een kleine hoeveelheid zwavelverbindingen. Die zijn afkomstig van verstuivend zeewater, vulkaanuitbarstingen en de biologische zwavelkringloop. Ook de zwavelverbindingen van vulkanische en organische herkomst kunnen oxideren tot zwavelzuur. Iedereen kent de doordringende lucht van rotte eieren. Die slechte geur wordt veroorzaakt door zwavelwaterstof (H_2S), een vluchtige stof, die ook wordt gevormd door rotting van organische stof onder zuurstofloze omstandigheden. Men kan dit ruiken in moerasvegetaties en op de slikken en kwelders van de Waddenzee.

Natuurlijke zwavelconcentraties vormen een stadium in de natuurlijke zwavelkringlopen. Dit zijn de geologische zwavelkringloop en de biologische zwavelkringloop. Deze kringlopen, waarbij sprake is van een

evenwicht tussen aan- en afvoer van de zwavel in lucht en bodem, bestonden al lang voor de mens op aarde verscheen. De natuurlijke zwavelconcentratie in de lucht bedraagt waarschijnlijk slechts enkele procenten van de huidige zwavelconcentraties boven Nederland.

Verontreiniging door de mens

Het gebruik van kolen en olie begon in de 13de eeuw en sindsdien speelt zwavel een belangrijke rol in de luchtverontreiniging (Grennfelt, 1981). Daardoor verscheen in Engeland al in 1273 de eerste wet op de luchtverontreiniging (Com-EG, 1984).

Door de voortdurende toevoer van zwavel, die we met de fossiele brandstoffen in grote hoeveelheden uit de aardkorst omhoogbrengen, is er geen sprake meer van een zwavelkringloop – hoogstens van een zwavelophoping, en ten slotte van een zwaveldoorstroming.

De evenwichtsconcentratie van zwavelverbindingen in de atmosfeer wordt nog steeds bepaald door aanvoer (emissie) en afvoer (depositie), maar het evenwicht stabiliseert zich nu op een hoog en schadelijk niveau. In de bodem vormen zich eveneens hoge concentraties, die in chemisch arme gronden zorgen voor bodemverzuring. De verzuuring veroorzaakt verstoring van de kringloop van andere plantenvoedende stoffen. De voortdurende stroom zuur lost bijvoorbeeld magnesium en kali in de bodem op en die elementen spoelen vervolgens als sulfaat-zouten de bodem uit.

Toen het verschijnsel van verzuuring bekendheid kreeg, beweerden veel critici dat de natuurlijke zwavelkringloop veel groter is dan de industriële emissies. Recente berekeningen tonen evenwel aan dat de natuurlijke en industriële emissies op wereldschaal ongeveer even groot zijn, namelijk 80000 ton zuivere zwavel (zwaveldioxide weegt ongeveer het dubbele). De natuurlijke emissies worden gelijkmatig over de wereld verspreid. De door de mens veroorzaakte emissies vinden echter hoofdzakelijk plaats boven de geïndustrialiseerde landen van West- en Oost-Europa en Noord-Amerika, die maar een paar procent van het wereldoppervlak beslaan. In deze landen zijn de concentraties derhalve tientallen malen hoger dan van nature het geval zou zijn.

In de eerste helft van deze eeuw zijn de zwavelemissies slechts met 25 à 30% toegenomen. In de volgende twintig jaar, tussen 1950 en 1970, verdubbelden de emissies, waardoor de totale uitwerp in Europa steeg van 25 à 30 naar 60 miljoen ton per jaar. Tussen 1970 en 1980 groeiden de emissies niet verder.

De totale emissies van de landen verschillen nogal. West- en Noord-Europa emitteren jaarlijks circa 15 miljoen ton zwaveldioxide, het

Oostblok circa 37 miljoen ton. In Noord-Amerika zijn de Verenigde Staten verantwoordelijk voor 24 miljoen ton en Canada voor 4,7 miljoen ton. Opmerkelijk is dat Canada ongeveer 1% van de totale zwavelvervuiling in de wereld emitteert via één enkele schoorsteen, die van de ertssmelter bij Sudbury. Rusland is in Europa absoluut de grootste vervuiler, met 25 miljoen ton zwaveldioxide, gevolgd door de DDR met 4 miljoen ton (Wetstone, 1983).

Omdat ook de omvang van de bevolking van de landen nogal van elkaar verschilt, is het eerlijker te kijken naar de emissie per persoon. Men zou verwachten dat het inkomensniveau, het energieverbruik en ook de vervuiling recht evenredig met elkaar zouden overeenkomen. Dat is niet het geval. In de DDR is de SO_2 -emissie per hoofd 118 kg per jaar tegen 29 kg in de veel rijkere Bondsrepubliek. De emissies zijn door het gebruik van zeer zwavelrijke brandstoffen in het Oostblok hoger dan in het Westen.

In de Westeuropese landen is de emissie per hoofd wel enigermate in verband te brengen met het welvaartsniveau. Nederland was altijd een van de welvarendste landen en de Nederlander was tot 1965 met circa 75 kg per man per jaar dan ook een heel grote vervuiler. Sedert de ontdekking van de enorme voorraad zwavelarm aardgas vormen de Nederlanders binnen Europa een uitzondering, maar vóór die tijd was de groei van de Nederlandse zwavelemissies vergelijkbaar met die in de rest van Europa. Tussen 1965 en 1984 is de zwaveluitwerp in ons land, dank zij de uitgebreide toepassing van aardgas, echter gehalveerd.

De toptien van Nederland

De totale zwaveldioxide-emissie in Europa bedraagt circa 60 miljoen ton, en dat is de helft van het wereldtotaal. In Nederland bedroeg de zwavelemissie in 1983 375000 ton (Fransen, 1984); 52% daarvan was afkomstig van elektriciteitscentrales, 36% van raffinaderijen en 5,5% van de overige industrie (Indicatief Meerjarenplan Lucht, 1984).

De Stichting Natuur en Milieu heeft een toptien van de grootste vervuilers opgesteld. Hieruit blijkt dat de tien supervervuilers samen 60% van de Nederlandse SO_2 -uitstoot veroorzaken, een kwart miljoen ton. De Stichting Natuur en Milieu vindt het daarom noodzakelijk dat deze toptien het eerst worden gedwongen hun rookgassen te zuiveren.

De Stichting is verder van mening dat de toepassing van aardgas niet moet worden verminderd. Veel op gas gestookte elektriciteitscentrales zouden ook op olie kunnen werken. In 1983 gebruikten ze nauwelijks olie. Als deze centrales ten gevolge van een ander brandstofbeleid zouden overschakelen op olie, zou de SO_2 -emissie in Nederland met

ongeveer 200 000 ton per jaar toenemen. Het is niet waarschijnlijk dat het beleid wordt gewijzigd, maar het is ook niet uitgesloten. In het laatste geval zouden de centrales in Maastricht, Zwolle en Flevoland tot de eerste vijf van de toptien verzuurders gaan behoren.

De allergrootste verzuurder in Nederland is de Shell-raffinaderij in Rijnmond. Deze emitteert een zesde deel van de hele Nederlandse SO_2 -uitworp: 70 000 ton per jaar. Shell lijkt volgens Jan Fransen van de Stichting Natuur en Milieu weinig te doen om deze uitworp te beperken. Het bedrijf buit daarentegen, in vergelijking met alle andere raffinaderijen, de wettelijk toegestane ruimte voor SO_2 -uitstoot het best uit.

Volgens de Stichting Natuur en Milieu is het beschamend dat de minister afzag van een vermindering van de toegestane emissie bij de vernieuwing van de vergunning in 1983, zogenaamd omdat Shell anders zijn raffinaderij naar het buitenland dreigde te verplaatsen. Niet alleen is zo'n verplaatsing in verhouding tot de geringe extra kosten van ontzwaveling volstrekt onrealistisch, maar bovendien heeft het bedrijf een zogenaamd herenakkoord met de regering gesloten om een aanmerkelijk deel van de winst in Nederland te investeren. Welnu, rookgasreiniging lijkt een zeer juiste binnenlandse investering. Daarbij moet worden bedacht dat Shell bepaald geen last van de economische crisis heeft. Shell zag alleen al in het tweede kwartaal van 1984 zijn winst met 25% stijgen in vergelijking met dezelfde periode in 1983. De netto winst bedroeg in de eerste helft van 1983 7,55 miljard gulden en in de eerste helft van 1984 4,84 miljard gulden. In augustus '84 zegt Shell echter dat ze de zwaveluitstoot van de raffinaderij Pernis binnen vijf jaar wil verminderen van 11 000 kilo naar 2500 kilo per uur.

Nummer twee van de verzurings-toptien is de Amercentrale aan de Moerdijk, met 50 000 ton zwaveldioxide per jaar. Het is de belangrijkste elektriciteitscentrale in Noord-Brabant, overigens de provincie met het laagste elektriciteitstarief van Nederland. Er wordt voornamelijk met steenkool gestookt, zonder dat er enige reiniging plaatsvindt.

Na nummer twee volgt op enige afstand de Centrale Nijmegen met circa 30 000 ton SO_2 . Daarna komen DSM, BP-raffinaderij, Maascentrale en Esso-raffinaderij, elk met circa 20 000 ton SO_2 , en het tiental wordt vervolgd door Hoogovens, raffinaderij Kuwait en Dow Chemical, met elk om en nabij 10 000 ton SO_2 .

In 1984 is het kabinet, nadat de Tweede Kamer zich had uitgesproken voor ontzwaveling van de centrales die tot na 1995 in bedrijf zijn, nog verdeeld over wie de kosten van het ontzwavelen moet betalen. Het kabinet besluit dat de centrales voor 1990 ontzwaveld moeten zijn en dat de zwaveluitstoot van de raffinaderijen met 45 000 ton moet ver-

minderen. De SEP (Samenwerkende Elektriciteitsproducenten) zou de ontzwaveling liever over een langere periode uitgesmeerd willen zien en betaald door de overheid. De tegenstribbelende houding van de SEP is merkwaardig als men bedenkt dat de SEP nagenoeg een overheidsbedrijf is met veel vertegenwoordigers uit de politiek in zijn bestuur. Kennelijk zien sommige politici hun verantwoordelijkheid in de vergaderruimten van de SEP anders dan in de Tweede Kamer of de Provinciale Staten. Het snijden in eigen vlees blijkt ook voor politici moeilijk.

Ontzwaveling*

Bij de huidige stand der techniek is het mogelijk en financieel haalbaar om de zwavelemissies te verminderen tot 5% van de zwavelinhoud van de brandstof. Daarvoor bestaan reeds talloze goed beproefde technieken, terwijl andere veelbelovende technieken, zoals de wervelbedverbranding, momenteel operationeel beginnen te worden.

Het duurt meestal enkele tientallen jaren voor zulke industriële technieken de hele ontwikkeling hebben doorgemaakt van tekenkamer, via prototypen tot standaardprodukt. Een relatief schone en energiebesparende techniek als de wervelbedverbranding is al circa 20 jaar in ontwikkeling. Op het ogenblik zijn de eerste experimentele installaties in bedrijf bij Shell, Akzo, ECN en TNO. Het ketelbouwbedrijf Stork, dat een voorsprong in deze techniek op het buitenland zegt te hebben, stelt dat het ten minste tot 1990 duurt voordat grote commerciële wervelbedketels beschikbaar zijn. Voorlopig zal daarom ook gebruik moeten worden gemaakt van beproefde technieken zoals rookgasreiniging.

Behalve door energiebesparing, kunnen de zwavelemissies op drie manieren worden beperkt: door het aanwenden van laagzwavelige of gereinigde brandstof, door het bestrijden van de zwavelemissie in de vuurhaard en door het reinigen van de rookgassen.

Zwavelarme brandstof is wegens zijn schaarste nu al relatief duur en door een toenemend gebruik van zwavelarme brandstof kunnen de prijzen daarvan snel stijgen. Tevens bestaat het gevaar van export van het probleem, doordat de derde-wereldlanden dan zijn aangewezen op goedkope maar vervuilende brandstof. Het prijsverschil is nu al circa 75 gulden per ton.

De bewezen reserves van laagzwavelige olie omvatten ongeveer

*) Ondanks het feit dat we honderdduizenden tonnen zwavel als afval de lucht inblazen, is Nederland tegelijkertijd een zwavel importerend land. Zwavel en zwavelzuur zijn namelijk belangrijke grondstoffen in de industrie.

20% van de totale reserves. Van de olie die tegenwoordig gewonnen wordt is ongeveer 30% laagzwavelig. De ruwe olie wordt door raffinage gescheiden in *a.* een fractie benzine en lichte soorten olie met een zwavelgehalte van 0,2 tot 0,7% en *b.* zware soorten olie met 3 tot 5,5% zwavel. Na deze scheiding is ongeveer 80% van de totale hoeveelheid zwavel aanwezig in de zware olie. Het zwavelgehalte in deze olie kan met moderne raffinageprocessen met circa 87% worden teruggebracht. Volgens bepaalde berekeningen is de bestrijding van zwavel bij de raffinage althans in grote installaties minder duur dan rookgasontzwaveling. Het blijkt dat de kosten van het ontzwavelen van olie in dezelfde orde van grootte liggen als het prijsverschil tussen lichte en zware olie. Momenteel zijn deze kosten nog hoger, maar ook hier ontwikkelt de techniek zich snel. De meeste reinigingstechnieken van brandstof kosten veel energie. Het ontzwavelen van olie kost 4 à 8% van de energie van de hoeveelheid gereinigde olie.

Over het ontzwavelen van gas kunnen we kort zijn. Dit is een vrij goedkope techniek die de NAM op grote schaal gaat toepassen in de gasontzwavelingsinstallatie bij Emmen.

In kolen is een deel van de zwavel aanwezig in organische verbindingen, en een deel in de vorm van pyriet (ijzersulfide). De ijzersulfide kan voor een groot deel worden uitgewassen. Hiertoe moeten de kolen worden vernalen. Bij het wassen bezinken de pyrietdeeltjes door hun grotere gewicht eerder dan de kooldeeltjes. Nu al wordt een groot deel van de kolen direct bij de mijn gewassen. Door zand, klei en andere onzuiverheden te verwijderen krijgt men namelijk een aantrekkelijke brandstof met een laag asgehalte. Met deze methode kan in gunstige gevallen tot 50% van de zwavel verwijderd worden. Het betreft een relatief goedkope methode (3 à 9 gulden per ton), in tegenstelling tot de technieken die in staat zijn het organisch gebonden zwavel en de pyrietresten te verwijderen. Bij deze technieken moeten de kolen in principe onder een dermate hoge hitte en druk worden behandeld dat ze bijna vloeibaar of gasvormig worden. Dit is een duur (circa 60 gulden per ton) en energieverwendend proces.

Het werkelijk vloeibaar maken of vergassen van kolen is ook een methode om zwavelarme brandstof te maken, maar deze techniek is nog veel duurder (Environment 82 Com.). Een groot nadeel van de technieken die in staat zijn de organisch gebonden zwavel te verwijderen is het grote energieverlies. Bij deze processen gaat namelijk 30 à 50% van de oorspronkelijke energie-inhoud van de brandstof verloren. Alleen het wassen van kolen lijkt voorlopig een nuttige aanvulling op andere bestrijdingstechnieken.

In de vuurhaard kunnen zwaveloxiden gebonden worden met kalk onder vorming van gips. Dit is echter alleen mogelijk bij lage verbran-

dingstemperaturen (max. 850 à 900 °C.). Men moet dus gebruik maken van speciale branders of van de wervelbedtechniek. (De technieken om lage brandertemperaturen te bereiken worden kort toege- licht bij de technieken die de produktie van stikstofdioxiden tegengaan.) Met behulp van aangepaste branders kan de emissiereductie 50 à 70% bedragen. De kosten van deze techniek zijn laag, zodat de methode aantrekkelijk is voor installaties met een (nog) beperkte le- vensduur. Bij wervelbedverbranding wordt meer dan 95% van de zwavel als gips in de as gebonden. Deze techniek is al in een groot aantal kleinere installaties beproefd en de toepassing ervan in grote elektriciteitscentrales is volop in ontwikkeling. De techniek lijkt in de toekomst de goedkoopste en efficiëntste oplossing voor emissiebe- perking van zwavel- en stikstofdioxiden te worden.

Ook kunnen zwavelemissies worden verminderd door rookgasreini- ging. In Japan is deze methode nu algemeen en daar zijn sinds de instelling van strenge emissienormen meer dan 1000 rookgasont- zwavelingsinstallaties in gebruik, gebaseerd op 15 verschillende pro- cessen (Muntingh, 1983). Een groot aantal is gebouwd bij industriële installaties en ertssmelterijen. De installaties die bij grote elektriciteits- centrales zijn gebouwd, hebben een bewezen rendement variërend tussen 90 en 95%. Het moet worden opgemerkt dat deze installaties geen nieuw afvalprobleem hebben geschapen. Alle gebruikte syste- men produceren goed verkoopbare grondstoffen zoals gips, elemen- taire zwavel, zwavelzuur en natriumsulfaat. Ondertussen blijkt de markt in Japan voor deze produkten verzadigd, zodat uitbreiding van de ontzwavelingscapaciteit wel een afvalprobleem kan scheppen. De totale investering van circa 12 miljard gulden werd niet ervaren als een buitengewone last voor de industrie (de Japanse economie groeide in de periode dat de meeste installaties zijn gebouwd met 10% per jaar; Wetstone, 1984).

Globaal zijn de meeste processen gebaseerd op *scrubbing*, wassen, met natte oplossingen of loog. Kalk (CaO of CaCO_3) is het meest gebruikte middel en in reactie met zwaveldioxide wordt gips gevormd. Bij de zogenaamde dubbel-alkali-(loog)-methoden wordt een na- triumsulfietoplossing gebruikt als wasmedium. Dit medium wordt later behandeld met kalk om het natriumsulfiet terug te winnen. Het eind- produkt van dit proces is dus ook gips. De efficiëntie van deze pro- cessen reikt tot 95%.

Een proces waarbij zowel stof als zwaveldioxide wordt verwijderd is het *spray-drying* proces. Hierbij wordt een waterige suspensie van kalk in de gasstroom gespoten. De hete gasen doen het water ver- dampen en de stofdeeltjes bestaande uit droge gipszouten worden, bij voorkeur in een filter, opgevangen. De efficiëntie van dit proces is

hoog, 90% of meer, en de kosten zijn 40 à 50% lager dan die van de traditionele natte methoden (Rosby, 1982). De methode is vooral goedkoop doordat bijna alle centrales al zijn uitgerust met stoffilters om de vliegase weg te vangen.

Er zijn ook processen waarbij de zure produkten met behulp van as worden geneutraliseerd. Deze processen leveren echter een moeilijker te benutten afval.

17. STIKSTOFOXIDEN

Ontstaan, bestrijding en automotoren

Voordat fossiele brandstoffen werden gebruikt, bedroeg de NO_x -emissie van natuurlijke verbrandingsprocessen hoogstens enkele procenten van de huidige uitwerp. In 1900 bedroeg de NO_x -uitwerp in Europa circa 4 miljoen ton per jaar, slechts een kwart van de tegenwoordige uitwerp. In Nederland werden in het begin van deze eeuw nog weinig stikstofoxiden geëmitteerd, slechts een paar procent van de huidige uitwerp. Tachtig jaar later bedroeg de emissie echter een half miljoen ton en bij een ongewijzigd beleid zal de emissie in het jaar 2000 zijn toegenomen tot 676000 ton (min. van vROM, 1983).

De groei van de emissie is voor een groot deel veroorzaakt door de opkomst van het wegverkeer. Automotoren produceren door hun hoge verbrandingstemperaturen enorm veel stikstofoxiden. Het verkeer is verantwoordelijk voor 56% van de NO_x -emissie. Andere grote categorieën vervuilers zijn centrales (16%), raffinaderijen (4%), industrie (19%) en huishoudens (6%).

Volgens de Notitie *Verzuring* aan de Tweede Kamer zal de NO_x -uitwerp bij een ongewijzigd beleid in 2000 met 30% zijn toegenomen. Deze groei zou vooral worden veroorzaakt door de groei van de uitwerp van stationaire bronnen. De toeneming bij centrales is grotendeels het gevolg van groei van het gebruik van steenkool. De OESO heeft hierover reeds zijn bezorgdheid uitgesproken in een rapport over de noodzakelijke milieumaatregelen in de Europese landen.

Achtergrondniveau

Door natuurlijke processen worden nauwelijks stikstofoxiden geproduceerd. Bodemactiviteiten, oxidatie van ammoniak, en bliksems zouden op wereldschaal respectievelijk 10, 1 en 3 à 4 miljoen ton stikstof per jaar produceren in de vorm van stikstofoxiden (Veldt, 1983). Voor Nederland zou dit, volgens een zeer ruwe schatting, een hoeveelheid stikstofoxiden opleveren van respectievelijk 10, 1 en 3 à 4 duizend ton per jaar. Bosbranden zouden gemiddeld 76 kilo NO_x per hectare veroorzaken. Met een gemiddelde hoeveelheid verbrand bos van 260 hectare per jaar, leveren bosbranden een bijdrage van slechts 20 ton NO_x per jaar. De natuurlijke processen zouden samen slechts 2% van de totale emissies vormen. Het is opmerkelijk dat de

technische adviescommissie van het ministerie van VROM, een commissie waarin vertegenwoordigers van de elektriciteitsbedrijven en de industrie zitting hebben, ervan uitgaat dat de natuurlijke emissie het twintigvoudige bedraagt (min. van VROM, 1983, 8).

Het ontstaan van stikstofoxiden

De atmosfeer bevat voor 70% stikstofgas (N_2). De lucht die ten behoeve van de verbranding in de verbrandingskamers toegelaten wordt, bevat natuurlijk ook die hoeveelheid stikstofgas. De meeste stikstofoxiden, de zogenaamde thermische NO_x , ontstaan doordat bij de hoge verbrandingstemperaturen een deel van het stikstofgas mee verbrandt. Een ander deel van de stikstofoxiden, de zogenaamde brandstof NO_x , ontstaat door verbranding van organische stikstofverbindingen in de brandstof.

De omvang van de thermische NO_x -vorming hangt af van de hoeveelheid zuurstof, van de hoogte van de verbrandingstemperatuur en van de lengte van de tijd waarin de reactie kan plaatsvinden, de zogenaamde verblijfstijd. Hoge temperaturen, een overmaat aan zuurstof en langere verblijfstijden bevorderen de NO_x -productie.

De vorming van brandstof- NO_x is afhankelijk van de hoeveelheid stikstofverbindingen in de brandstof en ook van de hoeveelheid zuurstof in de vlam. Vooral kolen en zware stookolie bevatten een hoeveelheid stikstof variërend van 0,1 tot 2%. Lichtere oliën, zoals petroleum en benzine, bevatten weinig tot geen stikstof. Ook aardgas bevat geen stikstof. Uit het voorgaande is duidelijk dat bij de verbranding van steenkool de geëmitteerde NO_x voornamelijk bestaat uit brandstof- NO_x . Kolen worden immers vooral verbrand in grote installaties met relatief lage temperaturen. Bij het stoken van gas en benzine ontstaat voornamelijk thermische NO_x .

De NO_x -emissie is hoofdzakelijk afkomstig van kleine bronnen (particuliere krachtinstallaties, verwarmingen en motoren). Bij metingen van de NO_x -emissies van kleine bronnen is de indruk ontstaan dat regelmatig slordig, dat wil zeggen met een grote overmaat aan lucht, wordt gestookt. Dit brengt niet alleen een extra NO_x -vorming mee, maar is ook oneconomisch.

Bij het stoken van aardgas in elektriciteitscentrales zijn de NO_x -emissies ca. 3-4 maal zo laag als bij het stoken van kolen, en ca. 2,5 maal lager dan bij het stoken van zware stookolie. Daarom is de huidige toepassing van aardgas heel gunstig voor de emissies in Nederland. Net als bij de SO_2 -uitwerp, blijkt hieruit dat de Nederlanders zonder de gelukkige vondst van het aardgas tot de grootste vervuilers van Europa zouden behoren.

Ook de procesemissies van de industrie vervuilen de lucht met stikstofoxiden. De belangrijkste ontstaan bij de produktie van salpeterzuur. In Nederland is voorts de procesemissie bij de produktie van caprolactam, een grondstof voor nylons, en ammioniumsulfaat (kunstmest) van belang.

Het gedrag van stikstofoxiden in de lucht

Na een verblijftijd van enkele uren tot dagen in de atmosfeer verdwijnt NO_x door verdere chemische reactie of door depositie. Uiteindelijk kan de NO_x worden omgezet in salpeterzuur, nitraten en peroxi-acylnitraat (PAN). Verder speelt NO_x een belangrijke rol bij de fotochemische vorming van ozon.

Bij de emissie bestaat de NO_x voor circa 95% uit stikstofmonoxide. Na emissie in de lucht kan de stikstofmonoxide een chemische reactie aangaan met ozon, waardoor stikstofdioxide wordt gevormd ($\text{NO} + \text{O}_3 = \text{NO}_2 + \text{O}_2$). Deze reactie verloopt binnen seconden tot minuten en kan onder invloed van ultraviolet licht ook omgekeerd verlopen. Dientengevolge verdwijnt de NO door de omzetting niet geheel en zijn de jaargemiddelde concentraties in Nederland voor beide stoffen even hoog. De reactietijd is korter naarmate de lucht meer ozon bevat (de omvorming kan ook met zuurstof, O_2 , gebeuren, maar de invloed van dit proces is alleen bij hoge concentraties van belang).

Omdat de ozonconcentratie in de lucht van dezelfde orde van grootte is als die van stikstofmonoxide, kan op enige afstand van de bron een groot deel van de NO zijn omgezet in NO_2 . Bij hoge NO_x -concentraties zou een tekort aan ozon een verdere omzetting beperken. Met name 's nachts is dit het geval, omdat er dan door het ontbreken van zonlicht geen ozonvorming is.

Het vervelende van dit proces is dat een vermindering van de NO_x -uitworp niet meteen leidt tot een even grote vermindering van de giftige NO_2 (NO heet niet giftig te zijn), voor het geval dat niet de hoeveelheid NO maar de hoeveelheid ozon beperkend is voor de vorming van NO_2 . Een reductie van de uitworp van stikstofoxiden die wel een grote vermindering van de NO_2 tot gevolg heeft, doet de ozonconsumptie navenant afnemen. De reductie heeft dan onbedoeld een stijging van het ozongehalte in de lucht tot gevolg. Door deze complexe interacties bleken de Japanse maatregelen tegen stikstofoxiden en ozon uit het begin van de jaren zeventig niet in die mate effectief als men had verwacht. Daarom werden in 1978 de emissienormen van de Japanse auto's aanzienlijk verscherpt.

Overschrijdingen van de adviesnormen

De adviesnormen voor de NO_2 -concentratie van de Gezondheidsraad worden, ten aanzien van de volksgezondheid, in grote steden als Rotterdam en Amsterdam in den regel overschreden. Het blijkt namelijk dat in stille straten van grote steden de niveaus die vrijwel gelijk zijn aan de stedelijke achtergrondniveaus, dicht bij de advieswaarden liggen. Een vrij geringe verkeersdruk kan daarom al voldoende zijn om de concentraties boven de advieswaarde te brengen.

In landelijke gebieden worden de adviesnormen ten aanzien van de gezondheid zelden overschreden. Wel worden daar de geadviseerde niveaus voor de bescherming van gewassen enigermate overschreden. Ook zijn er bepaalde plaatsen waar de gemiddelde concentraties zeer veel hoger zijn dan volgens de gezondheidsnormen toelaatbaar is, en dat zijn juist de plaatsen waar zich altijd veel mensen bevinden. Dit is namelijk het geval langs wegen, in auto's en in woningen.

Bestrijding van NO_x -emissies in de vlam

Uit de wijze van ontstaan kunnen ook de bestrijdingsmogelijkheden van stikstofoxiden worden afgeleid. In principe zijn er twee manieren om de produktie direct in de vuurhaard te verminderen: in de eerste plaats een verlaging van de verbrandingstemperatuur en in de tweede plaats een verkleining van de overmaat aan lucht. Het alternatief is het reinigen van de rookgassen. In de praktijk blijkt een combinatie van deze methoden heel efficiënt.

Het verlagen van de overmaat aan lucht, teneinde in de eindfase van de verbranding een zuurstofloos milieu te krijgen, schept nieuwe problemen. Koolmonoxide en roet wil men graag verder verbranden tot het onschadelijke kooldioxide. Stikstofoxiden wil men juist reduceren door het in een zuurstofarme omgeving van zijn zuurstofmolecuul te beroven. Om de produktie van roet en koolmonoxide tegen te gaan, stookt men daarom bij voorkeur met een grotere overmaat aan lucht dan noodzakelijk is. Bestrijding van de NO_x door een verlaging van die overmaat zou onvermijdelijk een verhoging van de roet- en koolmonoxide-uitworp betekenen. Omdat bij het toelaten van meer lucht ook een groter deel van de warmte onbenut met de rookgassen verdwijnt, stookt men in de grotere installaties toch al met een kleinere lucht-overmaat dan uit het oogpunt van roet- en koolmonoxidebestrijding wenselijk is.

Nu is de uitworp van koolmonoxide uit hoge schoorstenen wegens de snelle omzetting in het onschadelijke kooldioxide minder ernstig dan de uitworp op grondniveau (leefniveau) door bijvoorbeeld auto's. De

Rookgasreiniging

Het alternatief voor beperking van de NO_x -productie in de vuurhaard is rookgasreiniging. Een veelgebruikte techniek, die in Japan algemeen wordt toegepast, is de selectieve katalytische reductie (Brugghen, 1983). Dit is een methode waarbij door middel van een katalysator de stikstofoxiden bij 300 à 400 °C met ammoniak worden gereduceerd tot stikstofgas.*

Katalytische reductie in een zuurstofarme omgeving kan ook zonder ammoniak en bij lage temperaturen plaatsvinden. Deze techniek vindt toepassing op gasgeneratoren en is ook geschikt voor heel kleine verbrandingsinstallaties. Ze vindt vooral toepassing in auto's.

De industriële procesemissies zijn in grote lijnen met dezelfde technieken te bestrijden als de stikstofoxiden in de rookgassen van verbrandingsinstallaties. Geschikt zijn bijvoorbeeld de katalytische reductie met ammoniak, of de verschillende reinigingstechnieken van de rookgassen. Beide methoden worden al op beperkte schaal in Nederland toegepast.

Wervelbedverbranding

Alle technieken voor de vermindering van de zwavelemissies hebben als nadeel dat ze ook zelf energie kosten. Er is echter één methode, wervelbedverbranding, die dat nadeel niet heeft. Wervelbedverbranding is niet ontwikkeld omdat het een milieuhygiënische, maar omdat het een zeer economische wijze van verbranding is.

Bij wervelbedverbranding wordt een bed van asdeeltjes in turbulentie gehouden door een luchtstroom die er vanonderaf inblaast. Het bed van as bevat slechts één tot enkele procenten brandstof, die zonder zichtbare vlam verbrandt. Eigenlijk is hier sprake van een sterk verdunde vlam, zodat de verbrandingstemperatuur heel laag is, tussen 750 en 850, met een maximum van 950 °C. Omdat het brandstofgehalte van het bed zo laag is, kan men het niet zomaar met een vlammetje aansteken. Eerst moet het bed met aparte gasbranders op temperatuur gebracht worden. Bij de bovengenoemde temperaturen vormt de brandstof geen slakken. De asdeeltjes koeken daardoor niet aan elkaar vast en de wervelende massa gedraagt zich min of meer als een vloeistof waarin men naar believen warmtewisselaars kan hangen.

Met behulp van een wervelbed kan men nagenoeg alle typen kolen en andere vaste brandstoffen verbranden; bij andere systemen daarentegen moeten de branders heel precies gemaakt zijn voor één be-

* $4\text{NH}_3 + 4\text{NO} + \text{O}_2 + 4\text{N}_2 = 6\text{H}_2\text{O}$; $4\text{NH}_3 + 2\text{NO}_2 + \text{O}_2 = 3\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$.

paald type brandstof. Als een brandstof niet genoeg as bevat om inerte deeltjes voor het wervelbed te vormen, kan het bed ook met ballast gevoed worden. Bovendien is het voor een wervelbedinstallatie niet nodig de kolen tot poeder te malen zoals voor de conventionele branders. Het is voldoende de kolen tot kleine brokjes te malen. In principe wordt steeds evenveel van de inhoud van het bed afgevoerd als er as wordt gevormd. Zo blijft het volume constant. De afvoer bestaat natuurlijk net als het bed uit circa 90% ballast en 1% brandstof (dwz. de koolstofverbindingen uit de kolen). Dit betekent dat in vergelijking met andere technieken de verbranding in het wervelbed heel efficiënt is. Bij de verbranding van zwavelhoudende kolen kan men behalve de brandstof enkele procenten kalk aan het bed toevoegen. In dat geval wordt in het bed gips gevormd.

De reden dat wervelbedverbranding zo milieuvriendelijk is, is uitsluitend de lage verbrandingstemperatuur. De meeste schadelijke emissies vinden plaats doordat de schadelijke stoffen bij hoge verbrandingstemperaturen verdampen. Bij hoge temperaturen wordt bovendien veel stikstofdioxide gevormd.

Bij wervelbedverbranding is de temperatuur zo laag dat het gevormde gips (en dus de nu aan de kalk gebonden zwaveldioxide) voor 100% in de as kan achterblijven (pers. med. Feuring-Stork). Rookgasontzwaveling is bij dit systeem overbodig en vormt dus geen extra kostenpost. Een voordeel van de lage verbrandingstemperatuur is voorts de geringe vorming van stikstofdioxiden. De vorming zal des te geringer zijn wegens het lage zuurstofgehalte van de verbrandingslucht. De verbrandingsgassen moeten namelijk grotendeels worden teruggevoerd om het bed te laten wervelen. Bij de conventionele verbrandingstechnieken is zonder buitensporige kosten een NO_x -emissie van 260 g/gj haalbaar. Bij wervelbedverbranding is dit ongeveer 150 g/gj. Ten slotte verdampen er bij deze lage temperatuur veel minder metalen dan bij hoge temperaturen. Ook de metalen blijven achter in de as (niet in de vliegash).

Volgens Stork (Hengelo), die ketels voor wervelbedverbranding produceert, is dit systeem nu al even rendabel als een met poederkool gestookt systeem. Wanneer de kosten van milieuhygiënische maatregelen in de berekening worden betrokken, is wervelbedverbranding veruit superieur. Er zijn echter twee beperkingen aan het systeem. Hoewel er installaties gemaakt kunnen worden die groot genoeg zijn voor industriële doeleinden, is de techniek nog niet zover dat al installaties groot genoeg voor elektriciteitscentrales kunnen worden geleverd. Dat is de eerste beperking. De tweede is dat kolen met een zeer hoog zwavelgehalte technische problemen geven. Het is echter waarschijnlijk dat de techniek in deze opzichten spoedig zal worden aan-

gepast. Wanneer ook het afvalprobleem is opgelost, is wervelbedverbranding de techniek van de toekomst. Immers, wanneer men bedenkt dat de ontwikkeling van dergelijke technieken van tekentafel tot standaardprodukt meer dan twintig jaar vergt, zijn er voorlopig geen andere revolutionaire verbrandingstechnieken te verwachten.

NO_x-uitworp van auto's

Het feit dat er twee bestrijdingsmogelijkheden zijn, reductie bij de verbranding en reductie in de uitlaatgassen, is door de automobiel-fabrikanten meteen aangegrepen om, door een heftige discussie over de voor- en nadelen van beide systemen, noodzakelijke maatregelen op de lange baan te schuiven.

De mate van vervuiling is afhankelijk van het type brandstof. Benzine bestaat uit een mengsel van vluchtige koolwaterstoffen (paraffinen, olefinen en aromaten) met maximaal 0,4 gram lood per liter om de klopvastheid te verbeteren. Bij de verbranding ontstaan, behalve koolzuur en waterdamp, veel onverbrande en gedeeltelijk verbrande producten (te zamen koolwaterstoffen genoemd). Door de hoge temperatuur in de motor worden uit zuurstof en stikstof – lucht bestaat voor 70% uit stikstof – stikstofoxiden gevormd. Daarbij is de NO_x-emissie van automotoren in verhouding tot het brandstofgebruik 10 tot 20 (!) maal hoger dan van de verbrandingsketels van industrie en elektriciteitsbedrijven. De emissies van zware dieselmotoren zijn het hoogst. Van motoren die op LPG lopen zijn de emissies enkele tientallen procenten lager dan die van benzinemotoren. Kleine dieselmotoren emitteren ongeveer half zoveel stikstofoxiden als benzinemotoren.

Benzinemotoren veroorzaken naar verhouding tot het brandstofgebruik ook veel koolmonoxide, koolwaterstoffen en lood. In de uitlaatgassen van LPG bevinden zich doorgaans kleinere hoeveelheden koolmonoxide en koolwaterstoffen, en uiteraard geen lood. Dieselmotoren geven relatief weinig koolmonoxide, stikstofoxiden en koolwaterstoffen, maar daar staat de uitworp van roet, polycyclische aromaten en zwaveldioxide tegenover.

De emissies van stikstofoxiden nemen sterk toe met de snelheid. Die van koolmonoxide en koolwaterstoffen nemen daarentegen sterk af bij hogere snelheden. De emissies veranderen dus bij toenemende motortemperatuur op dezelfde wijze als in de ketels van grote verbrandingsinstallaties. De lucht in steden, waar het verkeer langzaam is, bevat daarom relatief meer koolmonoxide en koolwaterstoffen, de lucht bij snelwegen echter relatief meer stikstofoxiden.

De hoogte van de emissies is eveneens sterk afhankelijk van het motortype. Van invloed zijn de compressieverhouding, de vormgeving

Nieuwe motortechnieken

Er is een groot aantal mogelijkheden om de NO_x -emissies van auto's te beperken. De snelste beperking, die met een klein beetje bestuurlijke wil morgen kan zijn ingevoerd, is een effectieve controle op de maximumsnelheden. Momenteel is de normale snelheid op snelwegen 120 km per uur en op secundaire wegen tussen 90 en 100 km per uur. Toch hebben we nog steeds de wettelijke maximumsnelheden van 100 en 80 kilometer per uur, maar het is een door de overheid getolereerd gegeven dat deze niet worden gehandhaafd. In juli 1984 heeft de politie daarom gepleit voor het optrekken van de officiële maximumsnelheid. De Tweede Kamer peinsde er niet over de maximumsnelheid te verhogen, maar heeft tot nu toe ook niet gevraagd om een daadwerkelijke controle. Wanneer we bedenken dat de NO_x -emissie tussen 80 en 90 kilometer de helft is van die bij snelheden rondom 120 kilometer en wanneer we dan ook bedenken dat het ministerie van Landbouw en Visserij heeft gewaarschuwd voor een totaal verlies van onze bossen, een schade van tien miljard gulden, kan het niet anders dan een grof schandaal worden genoemd dat de wettelijke maximumsnelheden niet worden gehandhaafd.

De mogelijkheden tot verbetering van de normale technieken, bijvoorbeeld een betere ontsteking en brandstoftoevoer, zijn gering. De technologie heeft in dat opzicht haar grenzen al bereikt. In Zweden wordt bij de bestaande motortechniek het systeem van uitlaatgas-recirculatie toegepast. Net als in grote vuurhaarden wordt hier dus de vlam verdund, met als gevolg een lagere NO_x -productie. In combinatie met luchtinjectie zou het Zweedse systeem een reductie van 25% geven. Een soortgelijk systeem is als inbouwset door de Duitse firma Doduco in 1984 op de markt gebracht en kost inclusief inbouw tussen 400-500 D mark. Met dit systeem wordt 15% van de uitlaatgassen gerecirculeerd, waardoor gemiddeld de NO_x -emissie met 50% vermindert (Lehringer, 1984).

Op langere termijn is het echter mogelijk een ander motortype voor personenauto's te ontwikkelen. Het betreft de 'hogedruk/verdund-mengsel-motor'. Dit type motor staat in de belangstelling, omdat het een laag brandstofgebruik paart aan lage NO_x - en CO-emissies. Met deze motor zou 50% emissiereductie haalbaar zijn.

Bij de verdund-mengsel-motoren wordt een grote overmaat aan lucht bij het brandstofmengsel gevoegd. Ook kan een deel van de uitlaatgassen, als inert gas, ter verdunding worden teruggevoerd in het brandstofmengsel. De eerste methode met de zogenaamde arm-mengsel-motor is aantrekkelijk vanwege het hoge energetische rendement. Met de arm-mengsel-motor worden de NO_x -emissies terug-

gebracht tot ongeveer de helft van het huidige niveau. Door bovendien uitlaatgasrecirculatie toe te passen worden de NO_x -emissies met nog eens 20% teruggedrongen.

De schattingen over de meerkosten voor verdund-mengsel-motoren lopen uiteen van 1050 tot 1750 gulden. Een nadeel van deze methode is dat dit type motoren voor personenauto's nog moet worden ontwikkeld. De kortst mogelijke ontwikkeltijd bedraagt ongeveer tien jaar. Er moet bovendien, wegens de talloze autotypen met uiteenlopende eisen, een groot aantal van elkaar verschillende motortypen worden ontworpen. Het is een statistische zekerheid dat, mocht deze motor voor personenauto's worden ontwikkeld, een bepaald aantal modellen te kampen krijgt met stagnering of handicaps in de ontwikkeling. Dit zal uiteindelijk ook de prijs beïnvloeden. Gezien de ervaring met soortgelijke technische ontwikkelingen, wordt het gokken op de invoering van de verdund-mengsel-motor een soort Russische roulette met het milieu. Volgens optimistische schattingen duurt het na de ontwikkeling van de verdund-mengsel-motor nog ten minste tien jaar voor het hele wagenpark is vervangen door auto's met dit type motor. Gezien de trend om auto's zo te fabriceren dat hun levensduur langer wordt dan thans het geval is, is die tien jaar een zeer optimistische schatting.

Het argument dat dit een wenselijke ontwikkeling zou zijn omdat dan geen relatief dure loodvrije benzine zou behoeven te worden geïntroduceerd, getuigt van een beperkt gevoel voor wat er gaande is. Loodvrije benzine komt er toch. In Engeland is deze keuze in principe al gemaakt. Niet vanwege de bestrijding van stikstofoxiden, maar vanwege de gevaren van het lood voor de volksgezondheid. Het is zeer waarschijnlijk dat vele andere landen zullen volgen. Wanneer daarvoor de exportmarkt voor auto's die loodhoudende benzine moeten gebruiken, wegvalt, is de produktie van zulke auto's voor de Duitse of Franse fabrikant niet meer interessant.

Het Environmental Policy Agency in de Verenigde Staten (waar 50% van de benzine al loodvrij is) heeft zich eveneens uitgesproken voor vermindering van het loodgehalte tot een fractie van het huidige niveau en door de EG-ministerraad zijn toezeggingen gedaan om tot een snelle vermindering van het loodgehalte in de benzine te komen. Volgens een vergelijking van de geschatte kosten per ton verwijderde stikstofoxiden bij 70% reductie door middel van verschillende technieken, blijkt het nieuwe motortype met de geschatte kosten van 2300 gulden driemaal zo goedkoop als de drierwegkatalysator. Volvo Car schat de kosten voor beide systemen echter al bijna een derde lager. De prijs blijkt dus een uiterst onzekere factor. Wel duidelijk is de noodzaak om niet vijftientwintig jaar op een nieuwe techniek te wacht-

ten. Het bos gaat nu dood en daarom kunnen voorlopig beter die maatregelen worden genomen die nu toepasbaar zijn.

Katalytische uitlaatgasreiniging

De meest doeltreffende aanpak is benzineauto's te voorzien van apparatuur voor katalytische uitlaatgasreiniging. Het effectiefst bij de huidige techniek is de driewegkatalysator in combinatie met de lambda-sonde (Johnson, 1983). Het betreft een technisch hoogstandje, dat ervoor zorgt dat de stikstofoxiden worden gereduceerd en tegelijkertijd de koolmonoxide en de koolwaterstoffen worden geoxideerd. Deze katalytische reductie is een van de weinige technieken waarbij afval echt verdwijnt. Men houdt geen bergen zwavelzuur of gips over, zoals bij het wassen van zwavelhoudende rookgassen, en men hoeft geen toevoegsels te produceren (wat ook het milieu belast), zoals bij de katalytische reductie van stikstofoxiden. Het belangrijkste is het hoge rendement van deze methode.

De lambda-sonde heeft als functie het zuurstofgehalte in de uitlaatgassen te meten, zodat bij een verkeerde verhouding het brandstofmengsel kan worden bijgesteld. Het mengsel moet zo arm zijn dat na verbranding maar heel weinig zuurstof in de uitlaatgassen aanwezig is. Bij de gehandhaafde lage zuurstofspanning kunnen de stikstofoxiden bij aanwezigheid van een katalysator spontaan reduceren tot stikstofgas en vrije zuurstof. Hiertoe worden de uitlaatgassen door een fijne raat gevoerd, zodat ze in intensief contact komen met de katalyserende stof op de wanden van de kanaaltjes. Een beetje platina, palladium en rhodium op de wanden van de kanaaltjes dient als katalysator.

Het voordeel van een katalyserende stof is dat deze wel een reactie op gang kan brengen, maar zelf niet wordt verbruikt. De huidige generatie katalysatoren gaat zonder onderhoud meer dan honderdduizend kilometer mee. Helaas heeft de aanwezigheid van lood in de uitlaatgassen wél tot gevolg dat de katalysator binnen tienduizend kilometer te gronde gaat. Loodvrije benzine is daarom een voorwaarde voor een duurzame werking van de katalysator. Een niet te onderschatten voordeel van de driewegkatalysator is dat ook de emissies van koolmonoxide en koolwaterstoffen tot heel lage waarden worden teruggebracht door katalytische oxidatie tot koolzuur en water. Dit is bij alle andere technieken in mindere mate het geval.

De maatregel is op heel korte termijn uit te voeren. Het systeem is in Japan sinds 1978 verplicht en ook in de Verenigde Staten wordt het al jaren toegepast. Europese auto's die naar deze landen worden geëxporteerd zijn al van dit systeem voorzien. De maatregel kan daarom

zeer snel voor nieuwe auto's verplicht worden gesteld zonder dat de autoproduktie wordt gestagneerd. Het duurt op deze wijze minimaal 10 jaar voor bijna alle auto's zijn voorzien van een katalysator. Het kan echter ook sneller. De apparatuur is eenvoudig in bestaande auto's in te bouwen. Men zou kunnen voorstellen dit systeem, desnoods gesubsidieerd, in te bouwen in alle auto's jonger dan vier jaar. Op die wijze kan het grootste deel van het wagenpark binnen korte tijd van katalysatoren worden voorzien. De enorme milieuschade, die voor ons land nu al in de miljarden dreigt te lopen, rechtvaardigt zo'n investering zeker. Als het voorkómen van milieuschade zou worden ingecalculeerd als een positief resultaat, is er op dit moment en op Europees niveau eigenlijk geen rendabeler investering denkbaar.

Bij bestaande modellen is het systeem beter toe te passen op de overwegend zware Duitse en Scandinavische wagens dan op de kleinere Franse en Italiaanse. De motoren van de kleine auto's hebben een compressieverhouding die benzine met een heel hoog octaangehalte, of een compenserende doping van lood vereist. (*Der Spiegel*, 1983.) Overschakelen op loodvrije benzine kan ongewenste trillingen tot gevolg hebben en loodvrije benzine met het noodzakelijke octaangehalte is relatief duur.

Omdat de Franse en Italiaanse autofabrikanten veel meer dan hun collega's in de EG mikken op de koper met de smalle beurs, ervaart men de kosten van de katalysator bij voorbaat als bezwaarlijk. Zo'n 600 tot 1000 gulden wordt naar verhouding veel minder gevoeld bij de aanschaf van een dure Volvo, BMW of Mercedes dan bij een Renault 4 of een Fiat Panda. De schattingen over de prijs van katalysatoren lopen overigens nogal uiteen. Er is echter een duidelijke trend dat de schattingen de laatste jaren drastisch dalen. Volgens mededelingen van het IVM in juni 1983 zou de meerprijs van een auto voor de consument 2100 gulden bedragen. Een vertegenwoordiger van de Duitse regering meldde echter in september 1983 dat een Japanse firma had aangeboden zijn land deze systemen voor 600 mark te leveren. Kennelijk kunnen de Japanners ook dit goedkoper dan wij. Een kostenfactor is ook dat het rendement van de brandstof door de gefixeerde benzine/luchtverhouding met enkele procenten zou afnemen. Dit kan echter momenteel ruimschoots worden gecompenseerd door de ontwikkeling van steeds zuiniger auto's. Proeven met de auto's van de stad München, waarvan de uitlaatgassen met katalysatoren tot 90% werden gereinigd, gaven echter helemaal geen verhoogd brandstofgebruik. Alleen de merken Audi en BMW verbruiken 1 à 2% meer benzine (Lehringer, 1984).

Een veelgehoord argument tegen invoering van de katalysator is de mogelijkheid dat het reizen naar het buitenland beperkt wordt, als niet

alle landen loodvrije benzine verschaffen. Mijns inziens is dit technisch gezien het zwakste argument. Als er één onderdeel gemakkelijk aan een auto te verwisselen is, is dat wel de uitlaat. Nog eenvoudiger is het de katalysator te ontwerpen als een met klemmen vastgezet tussenstuk in de uitlaat, dat met een eenvoudige 'klik', gevolgd door een 'klak', bij de grens kan worden verwisseld voor een bijbehorende loze buis.

Dieselmotoren

Voor dieselmotoren zijn wel katalysatoren voor de bestrijding van koolmonoxide en koolwaterstoffen. Ook zijn er roetfilters beschikbaar. Katalytische reductie van stikstofoxiden is echter niet mogelijk, omdat een dieselmotor altijd met een overmaat aan lucht werkt. De meest directe en effectieve aanpak ter vermindering van de emissies van zware dieselmotoren is een wijziging van het tijdstip van brandstofinjectie. Dit gaat echter ten koste van het brandstofverbruik. Bij een beperkte vermindering van de emissies, circa 35%, is het wel mogelijk om door aanpassing van de gebruikte motortechniek (onder andere de compressieverhouding en de inlaattemperatuur van de lucht) een verhoogd brandstofverbruik te vermijden. Een reductie van de emissies met 50% is nog mogelijk bij een extra brandstofverbruik van slechts 1 à 2%. Aanpassing van alle zware dieselmotoren verloopt echter traag. Wegens de lange levensduur van zware vrachtauto's vérgt het vervangen van verouderde motoren meer dan 20 jaar. In de scheepvaart duurt deze aanpassing nog veel langer.

Helaas heeft de Duitse regering, bekomen van de eerste schrik, de verplichte toepassing van katalysatoren voor nieuwe auto's verschoven van 1986 naar 1989. Winsemius heeft in Nederland de benzine-maatschappijen slechts aanbevolen vanaf 1986 op vrijwillige basis de noodzakelijke loodvrije benzine te introduceren. Ook kondigde Winsemius prijsreducties en belastingfaciliteiten aan voor de gebruikers van loodvrije benzine.

18. FOTOCHEMISCHE OXIDANTEN

Natuurlijke ozonconcentraties zijn schadelijk

Fotochemische luchtverontreiniging wordt niet direct geëmitteerd maar ontstaat indirect ten gevolge van andere luchtvervuiling. Het wordt vooral gevormd onder invloed van ultraviolet licht uit zuurstof, stikstofoxiden en koolwaterstoffen. De belangrijkste fotochemische produkten zijn ozon, peroxi-acetylnitraat (PAN), aldehyden, salpeterzuur, mierzuur, waterstofperoxide en allerlei zogenaamde radicalen: chemisch zeer actieve stoffen.

Ozon en andere fotochemische oxidanten zijn op zichzelf natuurlijke bestanddelen van de atmosfeer. De meeste ozon bevindt zich in de stratosfeer, waar ze ontstaat onder invloed van het zonlicht. Deze ozonlaag beschermt het leven op aarde tegen de dodelijke werking van het ultraviolette licht.

Fotochemische oxidanten worden ook in de onderste luchtlagen, de zogenaamde troposfeer, aangetroffen. De natuurlijke concentratie ozon in de troposfeer wordt veroorzaakt door lekkage uit de stratosfeer en door fotochemische reacties van de natuurlijke concentratie stikstofoxiden en vluchtige organische stoffen. Omdat deze reacties plaatsvinden onder invloed van ultraviolet zonlicht, stijgen de concentraties overdag en nemen ze 's nachts snel af. De grootte van de natuurlijke hoeveelheden ozon ligt tussen 20 en 100 microgram per kubieke meter lucht. De schatting van de maximale natuurlijke concentratie is circa 130 microgram/m³ (Mooi, 1982-1). Volgens Van Aalst van TNO kunnen boven de zee nog veel hogere ozonniveaus ontstaan. De hoogste ozonconcentraties in Nederland komen derhalve langs de zee voor. Het merkwaardige is dat deze waarschijnlijk natuurlijke ozonconcentraties hoger zijn dan de concentraties die door een aantal Duitse deskundigen verantwoordelijk worden geacht voor de bossterfte. De meeste voorstellen voor luchtkwaliteitsnormen liggen daar met 100 tot 200 microgram/m³ maar net boven. Onder omstandigheden met fotochemische smog kunnen de concentraties over grote gebieden toenemen tot 200 à 400 microgram/m³.

Het belang van ozon

Ozon speelt vermoedelijk een belangrijke rol in de natuurlijke kringloop van bepaalde bestanddelen door de afbraak van organische stoffen in de atmosfeer (Grennfelt, 1984). Naar deze zuiverende werking

wordt verwezen in advertenties voor de Duitse Luftkurorte, de gezondheids- en vakantiecentra in de Duitse middelgebergten. 'U proeft de tintelfrisse ozongeur in de lucht', zo staat nog steeds in een advertentie in de *Autokampioen*, die u oproept uw vakantie gezond door te brengen in de Harz. Het is dan ook wrang dat de Harz momenteel bekendheid geniet wegens de enorme bossterfte, waarbij ozon, naast de andere luchtverontreiniging, een essentiële rol zou spelen.

Ozon wordt ook gemaakt en afgebroken als gevolg van door de mens veroorzaakte emissies van stikstofoxiden en koolwaterstoffen. De concentraties hoeven maar weinig boven het natuurlijke niveau te stijgen of ozon verandert van een zuiverend bestanddeel van de lucht in een luchtvervuilende stof, schadelijk voor plant, mens en dier. Zelfs van nature kunnen ozonconcentraties optreden die schadelijk worden geacht. De marge tussen de natuurlijke achtergrondconcentratie en het schadelijke niveau is waarschijnlijk voor geen van de luchtverontreinigende stoffen zo klein als voor ozon.

Los Angeles is een stad die al in de jaren veertig van deze eeuw berucht was om haar fotochemische smog. In 1950 bewees de Amerikaan Haagen-Smit dat dezelfde oxidanten die in de smog van Los Angeles waren gevonden, in het laboratorium konden worden gemaakt door stikstofdioxide en koolwaterstoffen met ultraviolet licht te beschijnen. Hij toonde aan dat dit ook lukte met behulp van ultraviolet licht en uitlaatgassen van auto's. In de jaren zestig werd de belangrijke rol van PAN onderkend. Na 1970 groeide in Europa de belangstelling voor fotochemische oxidanten en in het najaar van 1970 werd de eerste episode met grensoverschrijdende fotochemische smog in Nederland waargenomen. Momenteel zijn er zowel in Europa als in Amerika meetnetten voor de bestudering van grensoverschrijdende fotochemische oxidanten.

De vorming van fotochemische oxidanten is een zeer ingewikkeld chemisch proces. Er blijken honderden elementaire chemische reacties bij betrokken te zijn. De gebeurtenissen bij smogvorming zijn alleen met behulp van computers in schema te brengen. De meeste modellen omtrent smogvorming beperken zich daarom tot de belangrijkste reactieketens. De ozonconcentratie in de buitenlucht varieert in de loop van het jaar en vertoont een maximum in het voorjaar en een minimum in de herfst.

De ozonconcentratie neemt toe als de fotochemische vorming sneller verloopt dan de afbraak. Ozon wordt gevormd uit NO_2 onder invloed van ultraviolet licht of, bij de snelle omzetting van NO in NO_2 , door zogenaamde peroxi-radicalen. De afbraak gebeurt onder andere door reactie met bepaalde koolwaterstoffen en met NO onder de vorming van NO_2 .

Hoewel de hoogste concentraties koolwaterstoffen en stikstofoxiden in steden worden gevonden, is dat niet met ozon het geval. In de steden wordt ozon snel geconsumeerd bij de omzettingsreactie van stikstofmonoxide in stikstofdioxide. Pas op enkele tientallen kilometers van de steden overheerst de ozonproducerende werking van de verontreiniging de ozonconsumerende werking. Daar worden dus de hoogste concentraties gevonden.

Schade

Fotochemische oxidanten kunnen schadelijk zijn voor de gezondheid van mensen, planten en dieren. Ook kunnen ze het zicht verminderen en schade veroorzaken aan materialen. Verschillende onderzoeken hebben aangetoond dat irritatie van ogen en luchtwegen kan ontstaan bij concentraties tussen 200 en 400 microgram/m³. Deze concentraties zouden ook astma en kortademigheid veroorzaken. Schade aan vegetaties is al bij lagere concentraties geconstateerd. Verscheidene Duitse wetenschappers wijten zelfs de bossterfte nagenoeg volledig aan fotochemische oxidanten. In feite lijkt het waarschijnlijk dat ook natuurlijke ozonconcentraties door de combinatie met zwavel- en stikstofoxiden schade aan bossen en gewassen kunnen veroorzaken. Ozon tast eveneens rubbers en verschillende synthetische polymeren (plastics) aan; deze stoffen worden daardoor bros. Verder is het bekend dat ozon textielvezels, verfstoffen en lak aantast.

In Zuid-Californië, waar smog sinds het midden van de jaren vijftig een probleem is, ging 70% van de oogst van een bepaalde druive-soort verloren, voornamelijk door hoge concentraties oxidanten. Deze soort wordt daar nu niet meer geteeld. In Californië's Central Valley is de luchtvervuiling verantwoordelijk voor een vermindering van de fruit- en groenteoogsten van 10 tot 20%. Verder is aangetoond dat dennen in het gebergte van San Bernardino nabij Los Angeles door oxidanten werden aangetast. Deze schade kwam tot uiting in een terugval van de bosproductiviteit met 84% en een ernstig verlies van weerstand tegen insectenplagen en pathogene wortelschimmels (Skärby, 1984).

Ozon is een chemisch erg reactieve stof. Het oxideert met name tal van organische stoffen.

De buitenkant van gezonde bladeren is bedekt met cutine en was (de cuticula). Deze stoffen hebben een chemische structuur waarop ozon moeilijk vat heeft. Ozon kan echter wel de open huidmondjes binnendringen. Wanneer de ozon eenmaal de plant is binnengedrongen, kan deze stof schade veroorzaken aan het celmateriaal en aan het functioneren van de stofwisseling. Om schade door oxidanten te voorko-

men, wordt in Californië de boeren en tuinders geadviseerd tijdens smogperiodes weinig te sproeien, zodat de huidmondjes van de bladeren zich sluiten.

Er is geconstateerd dat ozon de doorlaatbaarheid van celmembranen vergroot, wat leidt tot het weglekken van ionen. Ozon beschadigt enzymen, die nodig zijn voor de fotosynthese en de stofwisseling, en ozon stimuleert de ethyleenproductie. Dit laatste is een reactie die in veel planten wordt opgeroepen door een hele scala van stress veroorzakende omstandigheden.

De zichtbare symptomen van deze aantasting bestaan uit kleine witte of dode vlekken op het blad, die zich in de loop van de tijd uitbreiden tot grotere vlekken. Bij loofbomen is het pleksgewijs afsterven aanvankelijk alleen aan de bovenzijde van het blad te zien. Vaak wordt aan de onderzijde een glans waargenomen. Ook is dwerggroei van bladeren of andere plantedenen geconstateerd. Wil men deze beschadigingen goed kunnen identificeren, dan moeten de planten geen last hebben van luizen, spint of ander stekend gedierte. De zuigplekjes van luizen lijken veel op de spikkelaantasting die door ozon veroorzaakt wordt.

Het komt voor dat bladeren die in het laboratorium met ozon behandeld zijn, aanvankelijk geen beschadiging vertonen, maar na enkele dagen verbleken, vroegtijdig verouderen en afvallen (Mooi, 1982).

De niet zichtbare beschadigingen aan cellen, enzymsystemen of fotosynthesecapaciteit uiteten zich in een verminderde weerstand tegen ziekten, vorst en droogte, en bij land- en tuinbouwgewassen uiteindelijk in een verminderde kwaliteit en oogstopbrengst.

Omdat ozon een stof is die ook van nature in tamelijk hoge concentraties voorkomt, hebben planten een zekere resistentie tegen de aantasting. Daarom treedt er geen beschadiging op zolang de ozonopname door de huidmondjes laag is en de plant de ozon kan ontgiften of de schade herstellen (Tingey, 1983). Het tolerantieniveau van de individuele planten binnen een bepaalde soort kan erg verschillen. Waarschijnlijk heeft in de landbouw sinds het voorkomen van fotochemische luchtvervuiling onbewust al een zekere selectie op ozonresistentie plaatsgevonden. Ook binnen bepaalde boomsoorten is de variatie in tolerantie groot.

In de Verenigde Staten zijn niet zonder succes uitgebreide programma's opgezet om landbouwgewassen te selecteren op ozonresistentie. Door de om zich heen grijpende luchtverontreiniging, waaronder de toeneming van zwavel- en stikstofoxiden, lijken de grenzen van ozonresistentie nu bereikt. Gevreesd moet ook worden dat selectieprogramma's hebben geleid tot het verlies van andere, wel nuttige eigenschappen. Een dergelijke selectie lijkt daarom op korte noch op

lange termijn zinvol zonder een daadwerkelijke aanpak van de oorzaak.

Om een beter inzicht te krijgen in de oogstverliezen is in 1980 in de Verenigde Staten door het Environmental Policy Agency het National Crop Loss Assessment Network opgezet. Met behulp van dit netwerk wordt getracht de oogstverliezen van tal van economisch belangrijke gewassen voor de verschillende klimaatgebieden van de Verenigde Staten te schatten. Bij deze studie wordt veel gebruik gemaakt van *open top*-kamers. Dit zijn kassen die van boven geheel open zijn, zodat zonneschijn en regen niet worden beïnvloed. Doordat continu aan de onderzijde lucht wordt toegevoerd, kan er van bovenaf geen met ozon bezwangerde lucht bij het gewas komen. De toegevoerde lucht wordt met behulp van actiefkoolfilters gefilterd en vervolgens kunstmatig voorzien van een afgemeten hoeveelheid ozon. Een controlekas krijgt alleen gefilterde lucht toegevoerd.

De kassen met ongefïlterde lucht hebben vaak een groeireductie van circa 10% bij een ozonconcentratie van 80 tot 100 microgram/m³. Een concentratie van 200 microgram zou een oogstverlies van tussen 10 en 50% veroorzaken, afhankelijk van de gevoeligheid van het gewas. Soortgelijke proeven met gefïlterde en ongefïlterde lucht gaven in Nederland in het Westland een groeireductie tot 40% te zien, zonder dat er sprake is van zichtbare ziekteverschijnselen. Dit verlies komt redelijk overeen met de Amerikaanse gegevens en werd ook voor een groot deel aan ozon geweten. Daarbij moet echter worden opgemerkt dat bij proeven met gefïlterde en ongefïlterde lucht het effect van alle verontreiniging, dus ook van SO₂ en NO_x, wordt gemeten.

Omdat het ozononderzoek in Amerika is begonnen, zit men in Nederland met de erfenis van een Amerikaanse onderzoekstraditie. Ook de onderzochte planten, zoals bepaalde tabaksvariëteiten, zijn Amerikaanse planten. Over de ozongevoeligheid van inheemse Nederlandse planten bestaat een schrijnend gebrek aan kennis. Nadat in ons land in 1981 duidelijke schade aan peulvruchten was geconstateerd, heeft men de gevoeligheid van verschillende rassen getest. Dit onderzoek heeft uitgewezen dat ten minste twaalf Nederlandse bonerassen nog gevoeliger zijn dan de al overgevoelige Canadese soort die voor experimenten werd gebruikt.

In 1965 werd voor het eerst in Nederland schade door ozon aan planten geconstateerd (Tonneijck, 1983). Dat dit pas toen werd gezien wil overigens allermïnst zeggen dat er niet eerder schade was. Het was in die tijd uit experimenten met de kleine brandnetel en tabaksplanten voor een aantal onderzoekers wel al duidelijk geworden wat de ziektesymptomen zijn.

Sinds 1976 heeft het Instituut voor Planteziektenkundig Onderzoek (IPO) een biologisch meetnet met veertig lokaties, verspreid over Nederland. Het doel van dit biologisch meetnet is, de aanwezigheid van oxidanten en andere luchtverontreiniging en de effecten daarvan op planten, in kaart te brengen. Teneinde de gevolgen van ozon te meten, wordt een tabaksvariëteit gebruikt waarvan de gevoeligheid voor ozon bekend is. De acute effecten van ozon worden bepaald aan de hand van de percentages beschadigd bladoppervlak door bijvoorbeeld vlekneecrose. De grootte van de schade wordt wekelijks opgenomen, waarna de planten worden vervangen door versgekweekte, gave exemplaren.

In 1979 en 1981 werd de grootste schade gevonden in het westen van ons land. De ozonmetingen toonden aan dat de zomerconcentraties in Nederland hoog genoeg zijn om aan enkele gevoelige boomsoorten en aan land- en tuinbouwgewassen schade te veroorzaken. Dit betreft met name aardappelen, spinazie, bonen en populieren. Populieren vertonen in ons land vaak een vervroegde bladval, wat tot een aanzienlijke groeireductie leidt.

De hoogste ozonconcentraties worden aangetroffen in Zeeland, op de Waddeneilanden en in het noorden van Noord-Holland, Friesland en Groningen. De gemiddelde oxidantniveaus ($\text{NO}_2 + \text{O}_3$) blijken het hoogst in Noord- en Zuid-Holland en Noord-Groningen. Tijdens perioden van grensoverschrijdende fotochemische smog bevinden de grootste concentraties oxidant zich in Zuid-Nederland. Bij westenwind worden de maxima gemeten in Limburg en bij oostenwind in Zeeland. Ook kunstmatige begassing is door het IPO uitgevoerd. Daarbij is aangetoond dat al bij heel lage concentraties sterke effecten kunnen optreden. Bepaalde populieren vertoonden reeds een produktieverlies van 25% bij een ozonconcentratie van 60 microgram/ m^3 gedurende 12 uur per dag. Dit is een concentratie die tijdens het groeiseizoen vrijwel dagelijks in de buitenlucht gemeten wordt. Op grond hiervan waarschuwde het IPO in 1982 dat in grote gebieden van Nederland effecten van ozon zijn te verwachten.

Luchtkwaliteitsnormen

De eerste luchtkwaliteitsnormen voor ozon werden in 1971 in de Verenigde Staten ingesteld, terwijl in internationaal verband advieswaarden werden geformuleerd door de Wereldgezondheidsorganisatie. In de Verenigde Staten wordt 240 microgram per kubieke meter lucht als grenswaarde gehanteerd voor het uurgemiddelde. Deze norm zou op niet meer dan één dag per jaar overschreden mogen worden. Bij een niveau van 196 microgram zou volgens het Environ-

mental Protection Agency schade aan cultuurgewassen meetbaar zijn. De Wereldgezondheidsorganisatie geeft strengere normen. Voor de bescherming van de volksgezondheid zouden de ozon-uurgemiddelden de 100 à 200 microgram/m³ niet mogen overschrijden. Ook de Nederlandse Gezondheidsraad geeft strengere normen. Ter bescherming van de mens stelt deze Raad een advieswaarde voor van 200 microgram als uurgemiddelde, een waarde die maximaal eenmaal per jaar mag worden overschreden. Ter bescherming van planten stelt de Raad de volgende grenswaarden voor: 200 microgram gedurende één uur, maximaal eenmaal per jaar; 65 microgram gedurende één dag; 60 microgram gedurende tien dagen.

In Nederland is van 1978 tot 1982 onderzocht hoe vaak er sprake was van overschrijding van deze grenswaarden (Van Aalst, 1983). Overschrijdingen van ozonniveaus blijken vooral 's zomers voor te komen. De Amerikaanse norm van 240 microgram werd in Zuid-Nederland gemiddeld per zomer 221 maal overschreden. Tijdens een normale zomer worden daar verhoudingsgewijs vaak te hoge niveaus waargenomen; het aantal overschrijdingen in Noordoost-Nederland is daarentegen gering. Tijdens een normale zomer zijn de concentraties over het algemeen gedurende vijf tot tien dagen hoger dan 200 microgram; het aantal overschrijdingen van dit niveau in Noordoost-Nederland is gering.

Op sommige dagen van het jaar zijn de uurgemiddelde concentraties hoger dan 240 microgram. Tijdens een warme zomer zoals in 1982 was het aantal overschrijdingen buitengewoon groot. In het hele land werd het niveau van 200 microgram gedurende enkele tientallen dagen overschreden en de concentratie was op tien tot twintig dagen hoger dan 240 microgram/m³. De zomer is overigens de kwetsbaarste periode, omdat de mensen zich dan veel buiten bevinden en de gewassen op het land staan.

Het is duidelijk dat de norm van de Gezondheidsraad buiten de steden dikwijls wordt overschreden. Een krachtige bestrijding van de NO_x-emissies van auto's kan tot een groei van de ozonconcentraties, ook in de steden, leiden. Immers, de lage ozonconcentraties in de steden worden veroorzaakt door de reactie met NO tot NO₂. Een eventuele norm ter bestrijding van luchtverontreiniging zou zich in dit geval niet moeten richten op de hoeveelheid O₃ of NO₂, maar op de hoeveelheid oxidant (O₃ + NO₂). Verlaging van de hoeveelheid oxidant heeft een evenredige verlaging van volgprodukten zoals PAN, nitraat en salpeterzuur tot gevolg. De maximale landelijke niveaus van ozon of oxidant blijken volgens rekenmodellen slechts marginaal door eenzijdige maatregelen van Nederland te beïnvloeden.

Het Indicatief Meerjarenprogramma Lucht (IMP Lucht 1985, concept

1984/1985) onderkent het feit dat kortdurende blootstelling aan te veel ozon beschadigingen van het longweefsel en aantasting van de longfunctie kan veroorzaken. Ook zouden de optredende schade aan de bossen en de opbrengstreductie in de landbouw voor een deel worden veroorzaakt door ozon. Het IMP onderkent eveneens, door verwijzing naar het vorige Meerjarenprogramma, dat chronische effecten in de vorm van groeireductie zonder zichtbare bladbeschadiging bij veel lagere concentraties ontstaan. Het IMP onderschrijft dat er in heel Europa zeer aanmerkelijke emissiereducties van stikstof-oxiden en koolwaterstoffen nodig zijn om de advieswaarden van de Gezondheidsraad te bereiken. Omdat het IMP deze advieswaarden niet afwijst, is het vreemd dat in dit opzicht geen beleid wordt geformuleerd. De in het IMP voorgestelde emissiereducties voor NO_x zijn uitsluitend gebaseerd op berekeningen van wat nodig is om de verzuring, en niet de ozon, te bestrijden.

Volgens de motivering van de minister zou de ozonreductie, nodig voor een volledige bescherming van de mens, technisch nog niet haalbaar zijn. Als interimgrenswaarde wordt daarom, overeenkomstig de Amerikaanse luchtkwaliteitsnorm, een uurgemiddeld niveau van 240 microgram/ m^3 gehanteerd. Dit niveau, dat in 1986 een wettelijke norm zou moeten zijn, mag echter, anders dan in de Verenigde Staten, maximaal op vijf dagen per jaar worden overschreden (in de Verenigde Staten één uur per jaar!). Het uurgemiddeld niveau van 200 microgram/ m^3 wordt voorlopig als streefwaarde gehanteerd. Deze zou bereikt moeten worden door maatregelen op Europees niveau.

Het is ook in dit geval weinig geruststellend, zo niet onverantwoord, dat de wettelijke norm wordt vastgelegd op het bestaande, beslist schadelijke niveau. Niet alleen voor bomen zijn deze concentraties schadelijk. Proeven met bijvoorbeeld klavers, die op vijf dagen per week gedurende zes uur werden begast met een concentratie van 200 microgram ozon/ m^3 (de streefnorm), geven een groeireductie van 20% te zien (Tingey, 1983).

Mijns inziens hebben we voor zo'n weinig doortastend beleid helemaal geen wettelijke norm nodig.

PAN

Een fotochemisch gevormde stof die steeds meer bekendheid geniet is peroxi-acetylnitraat (PAN). Deze stof wordt tegenwoordig in bijna elke publikatie over bosschade in één adem genoemd met ozon. Het dagverloop van de PAN-concentraties is bijna identiek aan dat van de ozonconcentraties.

Door het Instituut voor Planteziektenkundig Onderzoek is onderzocht bij welke concentraties van PAN onherstelbare schade bij planten optreedt. Deze kwamen slechts voor een deel overeen met de waarden die door het Amerikaanse Environmental Policy Agency waren gevonden. Het EPA stelde de grenswaarden vast op 1000 microgram/m³ gedurende een halfuur, 500 microgram gedurende één uur en 175 microgram gedurende vier uur. Net als bij ozon, bleken bij het Nederlandse onderzoek bepaalde soorten planten al bij lagere concentraties zichtbaar beschadigd te worden.

Door kortdurende begassing met schadelijke concentraties ontstonden geelbruine verkleuringen aan de onderzijde van bladeren. Jonge bladeren verkleurden aan de top, oudere aan de bladbasis. De ernstigste symptomen ontstonden alleen bij voldoende licht. Van de lange-termijneffecten van lage concentraties op bijvoorbeeld bomen is minder bekend.

PAN-concentraties worden in ons land sinds 1973 in de buitenlucht gemeten. In Nederland zijn geen overschrijdingen van de schadelijke niveaus geconstateerd. Overschrijdingen van deze waarden zijn ook niet te verwachten, omdat de huidige concentraties gemiddeld een factor twintig beneden het schadelijke niveau liggen. Dit wil niet zeggen dat de tegenwoordige hoeveelheid onschadelijk is. In de buitenlucht is de stof niet, zoals in laboratoriumomstandigheden, geïsoleerd van andere stoffen, maar moet ze waarschijnlijk ook qua effect worden opgeteld bij de andere vervuiling.

Ozon en het klimaat

Het is bekend dat een toenemend gehalte kooldioxide in de lucht een broeikaseffect heeft. Ook andere gassen beïnvloeden de instraling of de reflectie van zonnewarmte of geaccumuleerde warmte. Iedereen merkt direct dat bij vochtige lucht de dagen minder warm en de nachten minder koud zijn. Ons huidige klimaat danken we aan een subtiel evenwicht tussen de verschillende temperatuurbeïnvloedende factoren. Ook de ozonconcentratie in de lucht blijkt door de absorptie van infrarode straling belangrijk voor de warmtebalans te zijn. Er zijn schattingen dat de verhoogde ozonconcentraties op het noordelijk halfrond het klimaat gemiddeld 0,2 °C warmer zouden hebben gemaakt. De werkelijke temperatuurstijging is echter een resultante van alle invloeden, onder andere de stijging van het kooldioxidegehalte, de vervuiling door zwavel- en stikstofverbindingen en koolwaterstoffen, en de mondiale verwoestijning en ontbossing.

19. ZURE REGEN EN RECHTS- BESCHERMING

Wie betaalt de schade?

We leven in een rechtsstaat. Het elementaire recht op bescherming van gezondheid en eigendom, twee belangrijke fundamenten van onze vrije samenleving, lijkt echter in verband met de zure regen verder weg dan ooit tevoren. Bij het zoeken naar rechtsbescherming gaat het niet om een fundamenteel wantrouwen tegenover de industrie. Ook als men er van overtuigd is dat de industrie correct handelt binnen de haar toegestane vrijheidsgrenzen, kunnen de toegestane privileges tot vervuiling indruisen tegen het gangbare rechtsgevoel. Dit is het geval wanneer iemands eigendom zonder schade-loosstelling wordt aangetast, wanneer een bepaald percentage van de bevolking het recht op een optimale gezondheid wordt ontzegd, maar vooral wanneer de toegestane vervuiling het instandhouden van de fysische omgeving en daarom indirect de menselijke samenleving bedreigt.

De regering blijkt eigener beweging niet voor een effectieve bescherming te kunnen of te willen zorgen. Zelfs nu de bossen doodgaan in de lucht die wij en onze kinderen inademen, is rookgasontzwaveling en bestrijding van stikstofuitwerp nog niet algemeen verplicht gesteld. Dit geldt niet alleen voor ons land; ook bij onze Westduitse burens dreigde midden 1984 nog een regeringscrisis wegens het niet verplicht stellen van rookgasontzwaveling voor de nieuwe kolencentrale Buschhaus bij Helmstedt. Uiteindelijk werd daarbij de ontzwaveling niet door de Bondsdag voorgeschreven. Ook de leden van de Tweede Kamer blijken in ons progressieve Nederland niet in staat om deze rechtsbescherming effectief af te dwingen. In de praktijk worden in een belangenafweging de fundamentele rechten van de individuele burger opgeofferd en blijkt het natuurlijke milieu in het recht een verwaarloosde plaats te hebben.

Soms worden afspraken gemaakt. Bijvoorbeeld de in het eerste hoofdstuk van dit boek genoemde overeenkomst van Ottawa. Ook op de grote internationale conferentie van de OESO in München onder voorzitterschap van de Nederlandse minister Winsemius wilde een aantal landen overeenkomen de zwaveluitstoot met 30% te verminderen. Uiteindelijk kwamen ze slechts overeen om het grensoverschrijdende deel van de verontreiniging met 30% te verminderen. Grote landen als de Verenigde Staten en Groot-Brittannië distantieerden zich echter van zo'n besluit. Een teleurstellende zaak. Erger is dat

het principe van 30% weliswaar heel redelijk lijkt, maar bij nader inzien bijzonder schriel afsteekt tegen de 75% reductie van alle verzurende stoffen die het Europese Parlement en veel milieubeschermingsorganisaties als een minimum beschouwen. Wat soms door politici als een internationale doorbraak wordt geprezen, is vaker pas het prille begin (Natuurbehoud, 1984; Meinders, 1984). Wanneer men het wetenschappelijke uitgangspunt hanteert, dat de kunstmatige emissies de natuurlijke achtergrondconcentraties slechts marginaal zouden mogen beïnvloeden (Adema, 1983) is zelfs een reductie van 75% ontoereikend. De reductie die er de laatste jaren bereikt is is het gevolg van de economische recessie geweest (Adema, 1983). De verwachting is dat door de opleving van de economische activiteit in 1984 het brandstofverbruik in de EG-landen (en dus de luchtvervuiling) opnieuw met 6% zal toenemen. Wordt niet snel veel fors ingegrepen, dan gaat het wat betreft de gevolgen van zure regen in Europa en elders gewoon in sneltreinvaart bergafwaarts.

Moeten, nu duidelijk is dat de regeringen, zowel in de Oosteuropese Volksdemocratieën als in het Vrije Westen de bestaande wantoestanden slechts marginaal corrigeren, de burgers daarin berusten?

Boseigenaren zien hun, vaak over generaties instandgehouden bezit verloren gaan. Astmapatiënten hebben het dank zij de bescherming van de concurrentiepositie van de industrie dag na dag benauwd. Woningbouwverenigingen zien de onderhoudskosten tot onaanvaardbare hoogte stijgen. Museumbesturen moeten met lede ogen toezien, hoe hun historische boekenbestand verkruint. Natuurbeschermingsverenigingen weten dat hun eigendommen en driekwart eeuw investering in natuurbehoud verloederen. Maar wat kunnen ze doen om hun rechten te handhaven? Is het nog verstandig om welwillend te wachten tot het politieke proces uitkomst biedt? Of is het wellicht beter om met behulp van de bestaande wetgeving rechtsbescherming tegen de overheid af te dwingen via de justitiële weg? Aan aanknopingspunten op dit terrein ontbreekt het niet.

De ruimte op de wereld is schaars en het milieu heeft een beperkt incasseringsvermogen. En het handelen van de een heeft snel een onevenredige hinder voor de ander tot gevolg. Het gaat immers niet alleen om het verkrijgen van rechten, het gaat ook niet alleen om het verdelen van de schaarste aan ruimte en milieu. Het gaat vooral om het in stand houden van een leefbare wereld. Deze controverse heeft al eeuwenlang de milieuwetgeving beheerst. Door de verschillende krachtsverhoudingen in de maatschappij lijkt het uitgesloten dat de trage politieke meningsvorming tijdig een halt kan toeroepen aan de vervuiling en daardoor aan de aftakeling van de biosfeer. De rechterlijke macht zou door haar relatief onafhankelijke positie wel kunnen

bijdragen aan een snelle doorbreking van de impasse. In dat geval moeten er echter wel instanties of personen zijn die hun recht zoeken. Die zullen er binnenkort voldoende komen. In Nederland kan de boseigenaar, hoewel volgens Duitse normen toch 90% van de naaldbossen ziek is, nog maar moeilijk wennen aan het idee dat zijn bos elk produktievermogen heeft verloren. In Duitsland zijn de boseigenaren al massaal wakker geworden en de eerste processen al gevoerd. Ook in Nederland lijkt het voor de benadeelde eigenaren of voor mensen met een kwetsbare gezondheid een goede zaak om uit te zoeken wat hun rechten zijn en in hoeverre de hinder en schade door zure regen volgens de gangbare rechtsopvatting geduld zal moeten worden, of niet dan met schadevergoeding geduld zal moeten worden, of in het geheel niet geduld hoeft te worden.

Toen ik Den Uyl, als oppositieleider en ex-ministerpresident deze vraag voorlegde, stelde hij: 'Er is een situatie denkbaar waarin een burger in verweer komt tegen de regering op basis van de wet. Soms zijn dit soort procedures zeer vruchtbaar'. In het geval van zure regen zou Den Uyl een dergelijke actie toejuichen.

In Duitsland is door Burghard Krems, jurist en hoogleraar in de bestuurskunde, en door zijn echtgenote Bettina Krems-Hemesath, eveneens jurist, een werkgroep voor juristen opgericht om de meningsvorming hierover te stimuleren. Krems is van mening dat, nu de staat slechts bezig is het stervensleed van het bos te verzachten, juist juristen zich op hun verantwoordelijkheid moeten bezinnen. Vooral de juristen die de belangen van het bedrijfsleven behartigen zouden zich tevens moeten bezinnen op hun maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Luchtverontreiniging als onrechtmatige daad

Degene die de schade ondervindt kan een vordering instellen op grond van artikel 1401 van het burgerlijk wetboek (art. 6.1.1.1 e.v. NBW). Dit betreft dus een onrechtmatige daadsactie. Het hebben van een vergunning betekent niet, dat men niet aansprakelijk gesteld kan worden voor aan anderen toegebrachte schade. De Hoge Raad heeft namelijk uitdrukkelijk uitgesproken, dat een verkregen vergunning niet belet, dat hinder een onrechtmatige inbreuk vormt en tot schadevergoeding aanleiding kan geven (Krul-arrest 30 jan. 1914 N.J., 1914, nr. 497). Een civiele actie blijft dus mogelijk. Dit is ook logisch wanneer men bedenkt, dat het doel van de Hinderwet en de wet op de luchtverontreiniging niet het legitimeren maar het voorkomen en verminderen van schade is. Daarbij is aan de overheid de taak toebedeeld met behulp van o.a. een vergunningenbeleid zodanig regule-

rend op te treden dat hinder en schade onder normaal gecontroleerde omstandigheden worden voorkomen. Als er wel schade ontstaat, stuiten we op de schuldvraag. Bewezen moet worden dat juist dit bedrijf de schade heeft veroorzaakt.

Een bedrijf lijkt zich gemakkelijk te kunnen verweren door te stellen dat hij niet de enige veroorzaker is, en dat het juist de andere bedrijven zijn die uiteindelijk de schade veroorzaakt hebben. Een tweede moeilijkheid is welk deel van de schade toegerekend moet worden aan het bedrijf. Het is niet zoals niet-juristen soms denken, logisch dat de afzonderlijke bedrijven zich zouden kunnen verschuilen achter het feit dat nooit bewezen kan worden voor welk percentage hun luchtvervuiling verantwoordelijk is voor de schade in een bepaald gebied. Men kan evengoed verantwoordelijk worden gesteld voor een percentage van de schade ter hoogte van als zijn aandeel in de vervuiling.

Het moet mogelijk worden geacht dat in het kader van de vervuiling nieuwe juridische concepten ontstaan. In de Wet Luchtverontreiniging is het causale verband tussen de vervuiler en de door hem veroorzaakte schade losgelaten. Men zou zich kunnen voorstellen dat naar analogie daarvan de causaliteit in het civiele vlak zou kunnen worden verbreed. Bijvoorbeeld door het concept 'conditionele aansprakelijkheid' in te voeren, waarbij het oorzakelijk verband wordt aangenomen als de vervuiler aan zekere voorwaarden voldoet, waardoor redelijkerwijs mag worden aangenomen dat hij een bepaald aandeel heeft in de totale vervuiling. Men zou een dergelijke aansprakelijkheid kunnen koppelen aan de mogelijkheid tot preventie van vermijdbare schade. In de Nederlandse wetgeving is dit min of meer uitgewerkt in het Fonds Luchtverontreiniging.

De positie van de eiser in de civiele procedure blijft in de praktijk echter zwak en het gevolg is dat de vervuiler kan doorgaan, omdat het bewijs moeilijk te leveren is en hij zelfs bij twijfel nog goede kans heeft om te winnen. De vervuiler heeft immers het aureool van legitimiteit. De rechter kan zonder wettelijke regeling de bewijslast niet bij de vervuiler leggen (Leenen, 1973).

De rechter heeft echter al lang geleden de bewijsmoeilijkheden verlicht door de juridische causaliteit van de natuurwetenschappelijke causaliteit te ontkoppelen (Langelaar, 1974).

Een veehouder te Vlaardingen hield namelijk in 1965 voor de fluorvergiftiging van zijn beesten een in de omgeving van zijn weiland gevestigde kunstmestfabriek aansprakelijk. Door het Hof werd het verweer van de fabriek dat ook andere in de omgeving gevestigde industrieën de lucht met fluorideverbindingen bezwangerden gepasseerd. Het is dus in dezen niet langer relevant wat de exacte

herkomst van de afzonderlijke vervuilende moleculen is.

Er is ook gepleit voor invoering van het begrip 'collectieve aansprakelijkheid'. Daarbij is elk individu aansprakelijk voor zijn aandeel, ook al gaat dat schuil in het geheel van de collectieve vervuiling (Leenen, 1973).

In het onlangs afgesloten 'Rijnproces', waarin Westlandse tuinders aan de Franse Kalimijnen een evenredige schadevergoeding vroegen voor hun aandeel in de zoutbelasting van het Rijnwater, is deze aansprakelijkheid ook erkend. Zo zou men de top-tien vervuilers en de SEP kunnen aanspreken voor een deel van de totale schade naar ratio van hun aandeel in de totale luchtvervuiling. (Voor de Shell raffinaderij in Pernis zou dit uitkomen op circa 1 à 2 miljard van de te verwachten bosschade. Daarbij maakt het wegens het evenwicht tussen im- en export van de zure regen niet uit of de bosschade per land of internationaal vergoed wordt.)

Er is eigenlijk keuze tussen twee mogelijkheden: of alle vervuilers zijn verantwoordelijk voor het totaal, of een ieder is verantwoordelijk voor ten minste eenzelfde percentage als zijn aandeel in de totale vervuiling. Een ander twistpunt kan dan nog zijn of men bij de grensoverschrijdende luchtverontreiniging rekening moet houden met de im- en export. Dit is in het genoemde Rijnproces wel gebeurd. Dat maakt de situatie erg complex, een situatie die alleen via instellingen als het Fonds Luchtverontreiniging en internationale afspraken vereenvoudigd kan worden.

Burger en overheid

De begrippen eigendom en schade alleen voldoen niet meer zodra men in ecologische termen denkt. Ze gaan nog te veel uit van de afzondering van het eigendom in het ecologische geheel. Ecologische schade, zoals het uitsterven van plante- en diersoorten is niet in financiële termen te vangen. De gevolgen op lange termijn zijn bovendien volstrekt onduidelijk. Veel schade is bovendien immaterieel. Daarbij komt dat het bij luchtvervuiling niet alleen gaat om conflicten tussen private (rechts)personen, maar in toenemende mate ook tussen de overheid en burgers of groepen van burgers. De burger gaat naast het opkomen voor zijn individuele belangen in toenemende mate optreden als behartiger van het algemeen belang. De stichting Natuur en Milieu en de Waddenzeevereniging zijn in dezen bekende voorbeelden van burgerlijke organisaties. De behartiging van het algemeen belang is geen overheidsmonopolie. Toch zal de overheid een belangrijke regulerende rol blijven spelen.

Wetgeving, zoals de Hinderwet, de Wet Luchtverontreiniging en het

wetsontwerp Bodembescherming en de Meststoffenwet zijn primair bedoeld om de overheid een wettelijke basis te verschaffen voor regelgeving ter voorkoming van hinder en schade. Dit houdt in dat, als er desondanks toch schade optreedt, alsnog met behulp van art. 1401 BW (art. 6.3.1.1 NBW) een beroep op de rechter gedaan moet worden. Omdat in het geval van schade door de luchtverontreiniging zo duidelijk sprake is van omstandigheden die het voor de gedupeerde erg lastig maken om verhaal te krijgen via een beroep op de rechter is ter aanvulling van dit artikel een beroep op het Fonds Luchtverontreiniging mogelijk.

Schadevergoeding uit het Fonds Luchtverontreiniging

Men zou dus voor geleden schade rechtstreeks de vervuilers aansprakelijk kunnen stellen. Het traditionele privaatrecht schiet hier zoals gezegd te kort. Men moet een individuele dader, resp. daders, aanwijzen en de causaliteit bewijzen en de omvang van de schade die aan deze dader, resp. daders, toegerekend kan worden. Dit stuit op moeilijkheden. Bovendien is in het geval van zure regen sprake van een zeer uitgebreide groep vervuilers. Wegens het autogebruik en de vervuiling door koken en verwarming zou men eigenlijk elke Nederlander verantwoordelijk moeten stellen voor de schade. Zou men daarentegen elke vervuiler willen aanspreken dan is het zeer moeilijk om een duidelijke groep veroorzakers af te grenzen.

De Wet inzake de Luchtverontreiniging blijkt echter heel duidelijk in deze moeilijkheid te voorzien voor wat betreft de schadevergoeding. Artikel 64 lid 1 van deze wet zegt: 'Er is een Fonds Luchtverontreiniging, ten laste waarvan aan een ieder die ten gevolge van boven Nederlands grondgebied optredende luchtverontreiniging schade heeft geleden, welke redelijkerwijs niet te zijn laste hoort te blijven, op zijn verzoek een naar billijkheid te bepalen schadevergoeding kan worden toegekend voorzover niet uit anderen hoofde in een redelijke tegemoetkoming kan worden voorzien'. Het fonds schept, aldus de minister van Volksgezondheid en Milieuhygiëne in 1976, in principe de mogelijkheid van verhaal op de collectiviteit van veroorzakers van schade (K.B. 15 sept. 1980). Dit geldt dus ook voor schade door zure regen, bijvoorbeeld bosschade.

Men zou nog kunnen opwerpen, dat het niet duidelijk is wat de oorzaak van de bossterfte is. Dit lijkt allerm minst een probleem. Weliswaar wordt er in wetenschappelijke kringen gestreden over de vraag welke rol ozon, zwaveldioxide, ammoniak en dergelijke in het geheel spelen, maar het verband tussen de luchtvervuiling door het verbranden

van fossiele brandstof en zaken als bossterfte is algemeen geaccepteerd. De minister (die volgens de wet het Fonds beheert) kan dit argument tenminste niet hanteren daar deze in zijn eigen rapportage aan de Tweede Kamer de zure regen als oorzaak noemt en in zijn persberichten tegenover elke Nederlander heeft uitgesproken dat de zure regen bij voortgaande bossterfte voor tien miljard gulden schade veroorzaken zal.

Men kan zich afvragen of daarom de schade niet eerst via de gewone rechter op de vervuiler verhaald moet worden vanwege de zinsnede 'voorzover niet uit anderen hoofde...' Volgens het tweede lid van artikel 64 is dit niet altijd nodig. Hier wordt namelijk gezegd, dat, indien van tevoren moeilijk is vast te stellen of dit zou leiden tot een onredelijke vertraging of tot van de belanghebbende niet te vergen kosten, dat dan een zodanige schadevergoeding kan worden toegekend uit het Fonds. Daarbij gaan de verhaalsrechten over op het Fonds.

Interessant is in dit geval dat de Kroon (= regering) in 1980 impliciet de moeilijkheden van de wetenschappelijke bewijsvoering als beroepsgrond ontvankelijk verklaarde (KB 15 sept. 1980 Nr. 13).

De gemeente Vlaardingen had een schadevergoeding geëist van de Windmill Holland B.V. voor schade aan gemeentelijke beplantingen ten gevolge van stofuitworp in 1972 en 1973. De gemeente wilde de kosten vergoed zien van het onderzoek, van vervangend plantgoed en van de groeiremming van een half jaar, waardoor een ongunstiger beeld gedurende enkele jaren optrad en intensiever onderhoud nodig was. Toen de gemeente hiervoor een beroep deed op het Fonds Luchtverontreiniging bepaalde de minister dat geen beroep op het Fonds gedaan kon worden omdat niet bleek dat een civielrechtelijke procedure op grond van artikel 1401 onmogelijk was. Dit werd onder meer beargumenteerd met de aanwezigheid van een onderzoek van het Instituut voor Planteziektenkundig Onderzoek. De gemeente ging tegen de beslissing van de minister in beroep bij de Kroon. De regering was een andere mening toegedaan. Zij oordeelde dat noch uit het IPO-rapport noch op andere gronden bleek dat Windmill Holland B.V. 'in ieder geval' mede-oorzaak was van de gestelde schade. Zij vernietigde het besluit van de minister. (KB 15 sept. 1980, AB 1981 nr. 73.)

In hoofdstuk VII van de Wet Luchtverontreiniging is volgens de Memorie van Toelichting zo de basis gelegd voor een regeling van de vergoeding van schade door luchtverontreiniging welke niet op de veroorzakers kan worden verhaald en evenmin redelijkerwijs ten laste kan blijven van diegene die de schade heeft geleden. De schade kan onverhaalbaar zijn, volgens de bewindsman, omdat de veroorzaker in het geheel niet bekend is, of omdat de veroorzakers zulk een grote

anonieme groep vormen dat zij zich voor verhaal niet lenen, hetzij omdat het leveren van een bewijs dat een bepaalde bron van verontreiniging schadeoorzaak was op grote moeilijkheden stuit. Zonder dat thans een uitgewerkte regeling voor deze gevallen kan worden gegeven, zo vervolgt de memorie, legt art. 64 de basis voor de instelling door de overheid van een Fonds dat in de hier gesignaleerde behoefte zal gaan voorzien.

Het beginsel 'de vervuiler betaalt' dat bij het Fonds Luchtverontreiniging toegepast is zou opgevat kunnen worden als voortkomend uit artikel 1401. Voor een vergoeding uit het Fonds hoeft echter geen sprake te zijn van een onrechtmatige daad. Volgens het antwoord van staatssecretaris Kruizinga op vragen van de Eerste Kamer kan bijvoorbeeld ook een schadevergoeding worden toegekend aan automobilisten die in het kader van een smogalarm een rijverbod hebben gekregen.

Het feit dat het Fonds gezien wordt als een voortzetting van art. 1401 doet wel vermoeden dat een billijke schadevergoeding in het geval van onrechtmatige daad even hoog is als geëist kan worden in een civielrechtelijke procedure. Door het geval van de genoemde door het Fonds betaalde claim van de gemeente Vlaarding en is dit min of meer expliciet erkend. Deze gelijkheid moet er ook wel zijn omdat het Fonds de rechten op grond van artikel 1401 van de gedupeerde tegenover derden overneemt. In het geval van een schadevergoeding aan de automobilisten uit het door de minister genoemde voorbeeld ligt dit anders.

Bij de behandeling van het wetsontwerp in de Tweede Kamer toonde het lid A. P. Oele (PvdA) zich geen voorstander van een integrale schadevergoeding en hij wenste het woord tegemoetkoming uit het ontwerp niet vervangen te zien door schadevergoeding, al was het slechts, omdat het denkbaar is dat de schade wordt berokkend door luchtverontreiniging die uit het buitenland afkomstig is (Langelaar, 1974). Staatssecretaris Kruizinga deelde uiteindelijk zijn mening niet en had evenmin bezwaar tegen de restrictie 'naar billijkheid', noch tegen het weglaten van die beperking en liet de beslissing over aan de Tweede Kamer (Polak, 1971).

Voor welk soort schade kan een beroep worden gedaan op het Fonds? Niet iedereen is er van overtuigd dat het Fonds Luchtverontreiniging de sleutel is tot schadevergoeding voor alle schade. Het Tweede Kamerlid Rie de Boois zei hierover in de uitgebreide commissievergadering over het Indicatief Meerjarenprogramma Lucht 1984-1988: 'Degenen die menen dat het Fonds Luchtverontreiniging uitkomst biedt zijn dromers. Dat Fonds is er voor incidenten met spinazie en autolak, niet voor de steeds meer doorknagende schade

aan van alles en nog wat. Mijn fractie is het er bijvoorbeeld nog steeds niet mee eens dat uit het Fonds Luchtverontreiniging niet de schade door luchtverontreiniging aan monumenten wordt vergoed, die heel duidelijk te bepalen zou zijn geweest'. De door De Boois geconstateerde terughoudendheid van het Fonds kan echter evengoed veroorzaakt zijn door het ontbreken van een beroep op dit Fonds of door het niet benutten van de juridische mogelijkheden om de aanspraak rechtsgeldig te laten worden. Immers artikel 64 spreekt niet over incidenten maar over schade ten gevolge van luchtverontreiniging en het artikel bepaalt dat de schade alleen op verzoek van de benadeelde vergoed wordt. Invulling van de mogelijkheden van het Fonds gebeurt ook door het soort schadegevallen waarvoor vergoeding geclaimd wordt.

In zijn verslag aan de voorzitters van de Eerste en Tweede Kamer schrijft de minister: 'Er moet analoog aan het verzekeringsrecht, een evenement, dat wil zeggen een bepaald voorval (hieronder wordt ook begrepen een zich regelmatig herhalend voorval) met een van buiten komende werking hebben plaatsgevonden, wil men voor schadevergoeding uit het Fonds in aanmerking komen'. Bosbouw is een bedrijf dat zich door de hoge leeftijd van de bomen over vele jaren uitstrekt. In dit kader is ook honderd jaar luchtverontreiniging als een evenement te beschouwen. Het betreft hier niet een permanente onderdrukking van het groeivermogen zoals bij natuurlijke bodemarmoede, natuurlijke ozonconcentraties of de zoutstress van de zeewind. Het betreft een eenmalig afsterven van bossen en ecosystemen ten gevolge van een periode met verhoogde luchtverontreiniging. Ook het feit dat de minister wees op het repeterende karakter van het evenement wijst in die richting. De minister wees er in dit verband derhalve op dat schade die het gevolg is van een blijvende situatie als natuurlijke luchtverontreiniging, hoewel die valt onder de definitie die de Wet van luchtverontreiniging geeft, niet uit het Fonds kan worden vergoed. Ook wees hij er op dat de mogelijkheid van uitkering op grond van immateriële schade niet bij voorbaat is uitgesloten (Stroink, 1974).

De toegang tot het Fonds is dus heel ruim. In de memorie van toelichting op het wetsontwerp voor wijziging van de Wet op de Luchtverontreiniging die Winsemius in juni 1983 aan de Tweede Kamer aanbood wordt als klap op de vuurpijl naast de schade aan gezondheid van mens, plant en dier de schade aan monumenten uitdrukkelijk genoemd. 'Voor wat betreft schade door luchtverontreiniging aan materialen', zo luidt de tekst, 'is vooral de aantasting van onvervangbare monumenten en kunstwerken van groot belang. Vooral metalen en kalksteen (waaronder marmer) worden sterk aangetast door SO₂, NO_x

en volgprodukten. Hetzelfde geldt voor textiel, documenten en boeken'. Over betonrot zegt de memorie nog niets, maar het rapport van het ministerie van VROM, waarin onderkend wordt dat deze schade vele honderden miljoenen bedraagt verscheen pas een half jaar later. Er is geen duidelijke reden waarom voor deze schade niet hetzelfde recht zou gelden als voor monumenten (Tweede Kamer, zitting 1982-1983, 17965, nrs. 1-3).

Weliswaar kunnen op grond van het zesde lid van art. 64 regelingen gesteld worden omtrent de indiening en behandeling van en de beslissing op verzoeken om schadevergoeding maar hiermee lijkt uitsluitend geduid te worden op de regels van de procedure.

Hoewel vergoeding van immateriële schade mogelijk is, lijkt artikel 64 bij uitstek van toepassing op bosschade en andere in geld uit te drukken schade door luchtverontreiniging. Weliswaar was in 1970 de bossterfte in een dergelijke omvang niet voorzien maar de aard van de relatie tussen luchtverontreiniging en optredende schade aan mens, plant en dier was er niet anders om. Ook het feit dat de luchtverontreiniging deze schade veroorzaakt, wordt door de beheerder van het Fonds, in 1984 de minister van Volksgezondheid, Ruimtelijke Ordening en Milieuhygiëne, niet bestreden. Immers nu de regering in haar nota aan de Tweede Kamer heeft erkend dat bepaalde schade door boven Nederland optredende luchtverontreiniging wordt veroorzaakt, is er na het instellen van een verzoek om schadevergoeding voor de minister of, bij afwijzing van het verzoek, voor de rechter geen reden om anders te oordelen. De regering heeft van bepaalde vormen van schade bovendien een duidelijke financiële schatting gemaakt. De bosschade zal bij een totaal verlies van de bossen tien miljard gulden bedragen. Omdat volgens de inventarisatie van Staatsbosbeheer in combinatie met de Duitse normen 100% van de bossen ziek is, is de rentabiliteit van de bossen verdwenen. De kosten overtreffen de baten in hoge mate. Omdat bosgrond volgens de Boswet niet op andere wijze dan via houtproductie productief gemaakt mag worden, komt dit voor de eigenaar neer op een verlies van de totale economische waarde van het bos. Als kapitaalgoed is een stervend bos ook niet te gelde te maken. Al met al betekent dit een schadepost van circa 5 miljard voor de particuliere bosbouw. Wanneer de bos-eigenaar derhalve afhankelijk van de oorspronkelijke kwaliteit van zijn bos en bosgrond een schadevergoeding eist ten bedrage van 31 000 gulden per hectare kan dit moeilijk worden aangemerkt als een onbillijke eis.

Men zou kunnen tegenwerpen dat uit onderzoek is gebleken dat het hier een grensoverschrijdende luchtverontreiniging betreft. Een aan-

zienlijk deel van de verontreiniging is afkomstig uit het buitenland. Echter de im- en export is bij benadering even groot, zodat we netto onze eigen luchtverontreiniging veroorzaken. In andere gevallen zou de overheid (het Fonds) haar verhaal moeten zoeken bij de buitenlandse vervuilers via internationale procedures. (Dit is bij de grensoverschrijdende vervuiling van de Rijn de Westlandse tuinders ook gelukt tegen de Franse Kalimijnen.) Volgens de letter van de wet is dit argument overigens niet relevant. In artikel 64 wordt gesproken over 'schade ten gevolge van boven Nederland OPTREDENDE luchtverontreiniging' en niet over ten gevolge van boven Nederland 'VEROORZAAKTE' luchtverontreiniging. Uit het vorige bleek dat dit probleem al bij de parlementaire behandeling is geconstateerd en uiteindelijk niet bezwaarlijk is gevonden.

Samengevat komt het er op neer dat de wet een instrument heeft geschapen waarmee schade door het Fonds Luchtverontreiniging wordt vergoed, terwijl dit Fonds haar te allen tijde op de vervuilers kan verhalen via de rechter of als dat niet mogelijk is via door de minister op te leggen heffingen. Minister Winsemius heeft in 1984 aangekondigd een heffing te willen instellen op brandstoffen om het milieu-beleid en -onderzoek te bekostigen. Ook de bodemsanering zou hieruit bekostigd moeten worden. De heffing zou 250-275 miljoen gulden moeten opbrengen (Ned. Staatscourant, 24 juli 1984). Wanneer niet spoedig een wonder de bossen zal genezen, kan de industrie vast enige miljarden reserveren voor een verhoging van deze heffing. Bij het indienen van het wetsvoorstel sprak de minister in de memorie van toelichting al van een verdeling van de heffingenlast over verkeer, ruimteverwarming en industrie via het brandstofgebruik. Toentertijd werd een verdeelsleutel naar rato van het aandeel van deze sectoren, toen ieder ongeveer een derde, redelijk geacht. Het Fonds komt echter nooit te kort. De overheid springt bij, omdat ze belast is met het beheer van de stichting. In de memorie van toelichting is nauwelijks ingegaan op de feitelijke behoefte aan een Fonds Luchtverontreiniging, noch wordt er aandacht besteed aan de omvang van de door luchtverontreiniging veroorzaakte schade. Komt men in enig jaar te kort, dan zullen het jaar daarop de door de industrie op te brengen heffingen verhoogd dienen te worden (Stroink, 1974).

We mogen dus concluderen dat de gedupeerden met het Fonds Luchtverontreiniging uit de voeten kunnen. Indien de overheid, gezien de omvang van de kosten, meent dat het Fonds financieel niet langer in stand te houden is en daarom maatregelen treft, zoals ze gedaan heeft toen na Lekkerkerk de ware omvang van de bodemvervuiling onderkend werd, dan zal moeten worden teruggегреpen op de algemene leerstukken van de onrechtmatige daad van de particulier

(lastig, want moeilijk bewijsbaar), of van de onrechtmatige overheidsdaad.

Onevenredige schade door luchtverontreiniging

Iedereen loopt risico's maar bij luchtverontreiniging is het duidelijk dat bepaalde groepen onevenredig getroffen worden. Nog afgezien van de vraag hoever de overheid een gedoogplicht in het algemeen mag opleggen, de industrie begunstigend, worden hier bepaalde groepen in strijd met het gelijkheidsbeginsel onevenredig getroffen. Er is weliswaar een voorziening in het Fonds Luchtverontreiniging, maar toch blijft de vraag hoever de overheid mag gaan bij het achterwege laten van normen. Op een gegeven moment moet er toch gesproken kunnen worden van verzaking van een beheersplicht. Deze beheersplicht zou enige verwantschap hebben met de beheersplicht van de overheid met betrekking tot het onderhoud van openbare wegen.

Allereerst kunnen we nog wijzen op de juridische positie van de lucht. De internationaal bekende 17de-eeuwse rechtsgeleerde Hugo de Groot stelde in zijn Inleidinge tot de Hollandsche Rechtsgeleerdheid (B.II.D.I. par. 17): 'Allen menschen komt toe in 't gemeen de zee en de lucht, als zijnde vanwegen haer onbegrijpelijkheid ende van wegen den dienst die sy in 't gemeen schuldig zijn, ongedeelt gebleven onder den menschen'. De lucht is dus van iedereen, dat geldt nog steeds. De Groot kon natuurlijk de huidige problemen van de luchtverontreiniging niet voorzien, maar voortbordurend op zijn uitgangspunt kunnen we stellen dat, wanneer er schaarsteproblemen met de lucht ontstaan, het de taak en de plicht van de overheid is om die problemen het hoofd te bieden. De overheid heeft in dezen een beheersplicht. Wanneer de overheid ernstig tekortschiet, moet het mogelijk zijn om bij de rechter een voorziening te krijgen.

We kunnen in dit kader nog wijzen op artikel 21 lid 1 van de Grondwet: 'De zorg van de overheid is gericht op de bewoonbaarheid van het land en de bescherming en verbetering van het leefmilieu' en art. 22 lid 1: 'De overheid treft maatregelen ter bevordering van de volksgezondheid'. Deze bepalingen zijn opgenomen in de catalogus van grondrechten. Weliswaar karakteriseert de literatuur deze grondrechten als een sociaal grondrecht, d.w.z. dat de overheid de zorg heeft voor het milieu, en niet als een door de burgers van de overheid afdwingbare garantieplicht (Tilborghs, 1982). Toch lijkt het mogelijk dat deze zorgtaak van de overheid, gezien het hierboven gezegde over de beheersplicht met betrekking tot de lucht, onder bepaalde omstandigheden en in combinatie met het algemene gelijkheidsbeginsel (dat overigens in de grondwet van 1983 ook in art. 1 tot grond-

recht is verheven), een afdwingbare plicht wordt. Het blijkt immers, dat de overheid bij de emissienormen (eigenlijk de verdeling van het inmiddels schaars geworden goed lucht) bepaalde personen en groepen onevenredig benadeelt in vergelijking met de rest.

Wanneer de industrie binnen de emissienormen blijft, en er niettemin een aanzienlijke schade ontstaat bij bepaalde burgers of groepen van personen, kan moeilijk gezegd worden dat de industrie opzettelijk heeft gehandeld in strijd met het recht. De schuld ligt dan bij de overheid. Haar treft het verwijt dat ze niet voldoende strenge normen heeft gesteld, zodat het kan gebeuren dat burgers of groepen van burgers (of volgens de moderne opvattingen over het milieurecht planten, dieren of ecosystemen) onevenredig groot nadeel ondervinden. Kan men hiertegen rechtsbescherming tegen de overheid ontvangen? Gezien de erkenning dat het totale Nederlandse bos ziek is en dat de produktievermindering in de landbouw tot 10% kan bedragen, is er nog steeds sprake van een relevante schade waarvoor de bos- of landbouwer bescherming verdient en waarbij de toetsing aan het economische criterium geen reden kan zijn af te zien van de noodzakelijke maatregelen volgens de beschikbare techniek (in welk geval mogelijk slechts recht zou bestaan op een billijke vergoeding en geen recht op het wegnemen van de schadeoorzaak).

In het algemeen kan men zeggen dat rechtsbescherming tegen overheidshandelingen alleen plaatsvindt als het concreet-individuele besluiten betreft, en niet, zoals in ons geval, tegen algemene (emissie)-normen. Het is in principe mogelijk, dat ook tegen wetgeving (algemene normen) kan worden geageerd, maar doorgaans betreft dat strafrechtelijke normen. Normen die aan de burgers een bepaalde plicht opleggen en overtreding met straf bedreigen. De rechter kan dergelijke bepalingen onverbindend verklaren, wanneer ze strijden met hogere normen of met rechtsbeginselen. In ons geval is er geen sprake van een strafrechtnorm. Men kan dan eerder spreken van een gedoogplicht. Overheidsnormen moeten immers gedoogd worden, ook al levert dat enig nadeel, zelfs geldelijk nadeel, op.

Hier is dus sprake van een moeilijke zaak. Toch blijft er iets zeer onbevredigends. Er is nog de mogelijkheid aan te knopen bij de recente jurisprudentie van de Afdeling Rechtspraak Raad van State (AROB-rechter), op het gebied van verwaarlozing van een publiekrechtelijke plicht. Het is dan wel nodig, dat zo'n plicht aanwijsbaar is. In dat geval zou men kunnen stellen dat de overheid verplicht is om genoegzame normen te stellen in het kader van de luchtverontreiniging.

We moeten constateren dat er geen jurisprudentie bestaat op het gebied van vorderingen tegen de overheid aangaande luchtverontrei-

niging. Het is dus uiteindelijk de rechter die in de toekomst zal moeten bepalen hoever de beheersplicht van de overheid met betrekking tot de lucht zich zal uitstrekken.

Onrechtmatige overheidsdaad

Volgens het Indicatief Meerjarenprogramma-lucht 1984-1985 wordt als norm alleen nog het gezondheidscriterium gehanteerd, conform een advies gehanteerd van de Gezondheidsraad en de Raad voor de Milieuhygiëne. Deze norm houdt echter geen rekening met het feit dat de bevolking kwetsbare groeperingen omvat. Diverse onderzoeken, zoals het vergelijkend onderzoek naar de reactie van Amsterdamse schoolkinderen van verschillende wijken, schoolkinderen uit het Westland en Zuid-Beveland of tussen de bevolking van Vlaardingen en Vlagtwedde op verschillen in luchtverontreiniging, hebben uitgewezen dat de effecten bij het hanteren van de juiste onderzoekscriteria wel eens bij een ieder meetbaar kunnen zijn. In elk geval is het zo, verklaarde professor Van der Lende voor het Europese Parlement, dat circa 10% van de bevolking tot een of andere risicogroep behoort. Zijn deze mensen nu verplicht om in het algemeen belang af te zien van hun individuele recht op gezondheid? Zeker niet.

In de Memorie van Antwoord bij de Wet Luchtverontreiniging stelt de minister, dat van luchtverontreiniging in de zin van de wet al kan worden gesproken, indien de verontreinigende stoffen in de buitenlucht aanwezig zijn in zulk een geringe mate dat hun potentie tot schadelijkheid of hinder in geen enkel opzicht wordt gerealiseerd. Dit zou impliceren, aldus de bewindsman, dat bij een alleen voor mensen met een bepaalde ziekte of afwijking schadelijk peil van luchtverontreiniging zeker gesproken mag worden van luchtverontreiniging in de zin van de wet.

Toch is het de regering bekend dat, gezien de huidige concentraties van luchtverontreiniging, de volksgezondheid niet voldoende wordt gewaarborgd. Hiertoe verwees ze in 1980 in het SO₂-beleidskaderplan al naar het boven genoemde onderzoek. De norm werd niet lager gesteld dan die concentraties waarbij de effecten werden gemeten en dus zeker niet een factor tien tot honderd lager, zoals wel algemeen gebruikelijk is bij het toelatingsbeleid van bijvoorbeeld medicijnen en gewasbeschermingsmiddelen.

In het eerste hoofdstuk van dit boek is beschreven hoe de overheid in het SO₂-beleidskaderplan beargumenteerde, dat de gezondheid van bomen ook gevaar kon lopen bij een gemiddelde zwaveldioxideconcentratie die drie maal lager was dan de beleidsnorm. De norm werd tenslotte gesteld op 75 microgram/m³ lucht, terwijl het geen-effect-

Gezonde lucht als grondrecht

De lucht kan worden gezien als een goed dat eigendom is van iedereen. Dit wil niet zeggen dat iedereen met de lucht kan doen wat hem goeddunkt. Men dient rekening te houden met het gebruik dat ook andere mensen van deze lucht moeten maken en met het onaangestast laten van de functies die de lucht heeft voor het in stand houden van de bio-sfeer.

Niemand kan de lucht bezitten en deze is daarom openbaar. De overheid heeft zoals een aantal zaken van algemeen belang het beheer van de lucht uitdrukkelijk aan zich getrokken via de Hinderwet en de Wet op de Luchtverontreiniging. Ook zonder dat zou het vanzelfsprekend zijn dat de overheid de geschreven en ongeschreven grondrechten van de burgers met betrekking tot de lucht zou beschermen tegen aantasting door derden.

In de Grondwet komt zo bleek in het bovenstaande de zorgplicht van de overheid voor het milieubelang tot uitdrukking in artikel 21 en 22. Omdat het eigenlijk een instructienorm aan de overheid is kan dit door de individuele burger niet worden afgedwongen via de rechter (Tilborgs, 1982).

Het hangt dus van de politieke wil van de wetgever en anderen af hoe snel de gestelde doelen worden verwezenlijkt. Het opnemen van dit artikel in de grondwet kan zijn gebeurd om de regels van het ongeschreven recht en de bestaande reeds omvangrijke hoeveelheid wetgeving op milieugebied een grondwettelijke basis te verschaffen. Vanuit de Eerste Kamer is de vraag gesteld of onder het leefmilieu alleen het leefmilieu van de mens moet worden begrepen, of ook het leefmilieu van plant en dier. Volgens de minister gaat het inderdaad om het fysische milieu waarin wij leven (Memorie van Antwoord 76/77).

Dit grondrecht is niet een typisch Nederlands recht, maar bestaat in tal van andere landen. Overigens was dit grondrecht ook al vastgelegd in verschillende door Nederland ondertekende verdragen. Het Europees Sociaal Handvest bevat een artikel (art. 11), waarin de landen zich verplichten om een onbelemmerde uitoefening van het recht op gezondheid te waarborgen (ESH, Turijn, 18 okt. 1961). Volgens de beginselverklaring aangaande de bestrijding van de luchtverontreiniging van de Raad van Europa (waaraan ook Nederland deelneemt) moet ieder die bijdraagt tot het verontreinigen van de lucht, zelfs wanneer er geen schade (of geen bewijs van schade) is, deze verontreiniging zoveel mogelijk beperken. Hij moet dus in ieder geval de best bruikbare middelen toepassen tot dit doel, ook als de norm nog lang niet is overschreden. Ook volgens het Internationale Verdrag

inzake economische, sociale en culturele rechten dat in 1966 in het kader van de Verenigde Naties tot stand kwam was de overheid al verplicht te zorgen voor de verbetering van alle aspecten betreffende hygiëne en het gewone milieu van de mens.

Er is dus een uitgebreide nationale en internationale juridische basis voor de regering om maatregelen te treffen. Volgens de Memorie van Antwoord is de Wet op de Luchtverontreiniging in het leven geroepen om zich er van te kunnen verzekeren dat de nieuwe en betere technieken die in ontwikkeling waren ter voorkoming van luchtvervuiling, inderdaad zouden worden toegepast. De minister wist zich hierin gesteund door de verklaringen hieromtrent in de partij- en verkiezingsprogramma's van vrijwel alle politieke partijen. Overigens kan de minister zich nog steeds door de politieke partijen gesteund weten in de strijd tegen luchtverontreiniging. Ook tijdens de verkiezingscampagne voor de Europese verkiezingen in 1984 bezwoeren alle partijen van de VVD tot de CPN om de zure regen aan te pakken.

Een belangrijk verschil met de Hinderwet is, dat op grond van de Wet inzake Luchtverontreiniging de verleende vergunningen wel kunnen worden ingetrokken en dat de wet ook van toepassing is op emissiebronnen die geen vergunning behoeven, zoals het verkeer en verwarmingsinstallaties. Belangrijk is dat in deze wet ook de mogelijkheid is geschapen om op te treden in noodsituaties. (De zure regen zou in dit verband kunnen worden aangemerkt als een noodsituatie.)

Als algemeen uitgangspunt stelt de minister in de Memorie van Toelichting, overeenkomstig de beginselverklaring van de Raad van Europa, 'dat een ieder zoveel mogelijk dient te vermijden, dat hij luchtverontreiniging veroorzaakt. 'Indien het veroorzaken van luchtverontreiniging onvermijdelijk is, moet hij alle redelijk uitvoerbare maatregelen nemen om deze luchtverontreiniging tot een minimum te beperken. Het moet als een normale zaak beschouwd gaan worden dat in beginsel niemand het recht heeft het biofysisch leefmilieu, in evenwicht waarmee mens, plant en dier zijn ontstaan en geëvolueerd, en waarop zij, zoals wij hoe langer hoe meer beseffen, zijn afgestemd, te verstoren en te verslechteren. Evenzeer moet het als een normale zaak beschouwd gaan worden dat de kosten van het voorkomen van vervuiling en tegengaan van deze verstoring of verslechtering in beginsel voor de veroorzakers ervan komen. Waar het nodig is, ervan verzekerd te zijn dat de juiste aan de actuele stand der techniek aangepaste maatregelen ook inderdaad worden genomen, kunnen wettelijke verplichtingen in het leven worden geroepen'. De Wet op de Luchtverontreiniging is dus gestoeld op twee principes: 'zo weinig mogelijk luchtvervuiling. en 'de vervuiler betaalt'.

Laten we het nog eens vanuit het standpunt van de gedupeerde

bekijken: de vraag is of de eigenaar van een perceel landbouwgrond, bos of natuurterrein volgens artikel 6.3.1.5b en 5.4.0 NBW (op een eerder tijdstip zou dit gemotiveerd zijn met het vervallen artikel 5.1.2 NBW) moet gedogen dat zijn land wordt gebruikt als zinkput voor een bepaalde hoeveelheid industrieel chemisch afval (de depositie van zwaveldioxide en dergelijke per hectare is vrij nauwkeurig bepaald). Dit is zeker het geval als het uitspreiden van dat afval alleen op maatschappelijk-economische gronden gebeurt (technisch is een totale zuivering mogelijk). (Wanneer het afval via een zuiveringsinstallatie op een hoop was gebracht zou men het alleszins redelijk vinden dat bij stort op iemands grond, bijvoorbeeld een gemeentelijke stortplaats, ook een prijs werd betaald.) Nu is bekend dat deze wijze van afvalverwerking ten koste gaat van het normale gebruik van de grond middels een opbrengstderiving of het verlies van vruchtbaarheid of ecologische functies. Wellicht kan daarom de zorgplicht van de overheid uit art. 14 van de grondwet ook gekoppeld worden aan de bevoegdheden uit de Wet op de Luchtverontreiniging en artikel 5.1.3 NBW. In dit laatste artikel wordt namelijk bepaald dat de eigenaar niet hoeft te dulden dat een ander op enige wijze van de zaak gebruik maakt, tenzij deze daartoe krachtens de wet, een hem toekomend recht of rechtvaardigingsgrond bevoegd is.

Toetsing aan economische criteria wordt in zijn algemeenheid normaal geacht. Dit moet men echter volgens de Memorie van Toelichting opvatten in die zin, dat het onredelijk zou zijn een maatregel te eisen, indien de betekenis van de door zijn toepassing bereikte vermindering van de luchtverontreiniging in geen enkele verhouding zou staan tot de economische opofferingen die dit met zich mee zou brengen. Er hoeft dus niet getoetst te worden aan het winststreven of zoiets als de internationale concurrentiepositie van het bedrijfsleven. In 1970 stelde de minister bovendien, dat de toetsing van de voor te schrijven maatregelen aan de stand der techniek niet zo beperkend hoefde te zijn dat van de voorschriften geen prikkel tot innovatie uitgaat.

In de huidige situatie, waarin de schade de kosten van algehele rookgasontzwaveling overtreft en waarin sprake is van een zodanige bedreiging van het bio-fysische milieu, dat de consequenties niet te overzien zijn, is het economische principe noch bij minutieuze afweging van reinigingskosten en te voorkomen schade noch bij marginale toetsing een grond om af te zien van het nemen van alle technische maatregelen die bij de huidige stand der techniek mogelijk zijn.

Het verwijt van de verschillende Tweede Kamerfracties bij de indiening van het voorstel voor een wijziging van de Wet inzake Luchtverontreiniging, dat de wet 13 jaar na de invoering nog geen concreet

resultaat heeft gehad, wordt waarschijnlijk ten onrechte de regering in de schoenen geschoven. De wet is modern en beschermt niet alleen de volksgezondheid, maar ook plant en dier. De wet geeft bovendien niet alleen bescherming tegen 100% bewijsbare schadelijke luchtverontreiniging maar ook tegen die luchtverontreiniging die schade KAN veroorzaken (art. 1). In de praktijk blijkt echter dat het lang duurt voordat de burgers van een dergelijk nieuwe wet volop gebruik maken. Het duurt daardoor ook lang voordat er door het ontstaan van jurisprudentie een nieuwe rechtstraditie ontstaat.

Boswet

De Boswet legt de boseigenaar een groot aantal beperkingen en verplichtingen op. De belangrijkste beperking is een verbod om grond, waarop eenmaal bos is aangeplant, na de houtoogst te bestemmen voor andere landbouwkundige doeleinden. Deze beperking is daarom in de Boswet aangevuld met een herplantplicht. Deze plicht houdt in dat de bosgrond na het kappen van een houtopstand binnen drie jaar weer met bomen moet zijn beplant. De herplantplicht geldt niet alleen na reguliere eindkap maar ook als het bos na onherstelbare beschadiging door bosbrand of luchtverontreiniging is gekapt. Voorlopig zou men de herplantplicht kunnen uitstellen door af te zien van vervroegde eindkap van het aftakelende bos. In dat geval komt men echter in conflict met andere voorschriften volgens welke het niet toegestaan is meer dan een bepaalde hoeveelheid dode bomen per hectare, die kunnen dienen als broedplaats voor insecten, te laten staan.

Omdat het bosbedrijf nooit een erg rendabele vorm van grondgebruik is geweest, beïnvloedt dit de waarde van de grond. Wanneer iemand landbouwgrond zou inplanten met bos en de grond daardoor voor altijd bos moet blijven dragen, daalt de waarde van de grond drastisch. In de Memorie van Toelichting van de uit 1961 stammende wet werd bovendien gesteld, dat de verantwoordelijke bewindslieden zich er van bewust waren dat de herplantplicht vrij diep ingrijpt in de private rechtssfeer door het opleggen van een zekere bestedingsdwang doordat de opbrengst van het gevelde hout althans gedeeltelijk op een door de overheid voorgeschreven wijze zou moeten worden besteed. De ondertekenaars meenden evenwel, dat de bezwaren, die zij geenszins ontveinsden moesten wijken voor de grote volksbelangen, die geen achteruitgang van ons bosareaal gedogen.

Uit het feit dat in de Memorie van Toelichting wordt gerept van een bestedingsdwang van een deel van de opbrengst blijkt impliciet dat het nooit in de bedoeling van de wetgever heeft gelegen om de

eigenaar van de bosgrond zover te beperken dat hij in wezen wordt verplicht tot een onrendabele vorm van exploitatie. Expliciet blijkt dit laatste uit artikel 9 waarin de mogelijkheid wordt geopend ten tijde dat herplant een onrendabele aangelegenheid is hiervoor renteloze leningen of een financiële bijdrage te verstrekken. Ook nu wordt er reeds een gedeeltelijke bijdrage in de kosten van herplant en andere werkzaamheden gegeven. Tenslotte blijkt dit uit de regeling in artikel 13 lid 4 voor een schadevergoeding bij een kapverbod ten behoeve van het behoud van natuur- en landschapsschoon.

In dat kader is het interessant dat in de beschouwingen van de Tweede Kamer omtrent de vergoeding bij kapverbod de discussie zich toespitste op de vraag of dit moest worden gezien als een door de overheid verleende gunst of als een recht van de door het kapverbod getroffenene op een geldelijke prestatie van de overheid. Daarbij vroeg de Tweede Kamer zich af, of de getroffenene steeds een recht op een volledige schadevergoeding behoorden te krijgen. Volgens het antwoord van de staatssecretaris kon het opleggen van een kapverbod niet worden gezien als een onteigening van enig bestanddeel van het eigendomsrecht, omdat er geen sprake van is, dat er een verandering van rechtssubjecten optreedt; het verbod beperkt de eigenaar slechts in zijn gebruik.

Volgens art. 14 van de herziene grondwet is de vergoeding inmiddels een grondrecht. Omdat artikel 14 tegelijk de onteigening als de beperking van het eigendomsrecht behandelt lijkt er ook sprake te zijn van een verwante problematiek, die echter wel wordt onderscheiden van onteigening (Geppard, 1983). Het derde lid bepaalt namelijk dat bij beperking van de uitoefening van het eigendomsrecht recht door het bevoegd gezag bestaat op een schadeloosstelling of tegemoetkoming in de schade. Daarbij mag de beperking alleen plaatsvinden in het algemeen belang.

Op grond van de genoemde redenering beperkte de regering in de boswet de vergoeding volgens de onduidelijke maatstaf die in het bijvoegsel 'naar billijkheid' ligt besloten. Daardoor wordt de schijn gewekt dat kan worden volstaan met een tegemoetkoming en dat er niet sprake hoeft te zijn van een volledige vergoeding zoals van een door de burgerlijke rechter objectief bepaalde volledige schadevergoeding bij onrechtmatige daad. Ook elders in de wet wordt ten aanzien van vergoedingen de restrictie 'naar billijkheid' gehanteerd. De toenmalige staatssecretaris van Onderwijs, Kunsten en Wetenschappen wees er op, dat het eigendomsrecht niet meer "inviolable et sacre" is. Algemeen zou zijn aanvaard, dat de overheid in het algemeen belang de uitoefening van het eigendomsrecht mag beperken. Zou uit iedere overheidsmaatregel die zodanige beperking met zich

meebrengt, een recht op volledige schadevergoeding ontstaan, dan zou eigendom zijn risicodragend karakter verliezen. Men zou dan ook het omgekeerde in de wet moeten introduceren, namelijk de verplichting om door een overheidsmaatregel ontstane voordelen af te staan aan de publieke kas (dit laatste is inderdaad zo geregeld in de Delta-wet).

Uiteindelijk is in de wet de formulering opgenomen, dat de gebruiker of eigenaar die wegens een kapverbod schade lijdt, 'welke redelijkerwijze niet of niet geheel te zijnen laste behoort te blijven'... op zijn verzoek 'een naar billijkheid te bepalen schadevergoeding' uit 's Lands kas wordt toegekend.

Men zou echter kunnen veronderstellen, dat de luchtverontreiniging tegenwoordig een normaal klimatologisch gegeven is dat net zo zeer hoort tot het door de staatssecretaris aangehaalde 'normale ondernemersrisico' als strenge winters en droge zomers. Luchtverontreiniging komt echter niet zomaar over ons. De overheid heeft via de Wet luchtverontreiniging zelf het beheer van de lucht(kwaliteit) aan zich getrokken.

Omdat in het Indicatief Meerjarenprogramma-lucht 1984-1988 wordt gesteld dat luchtkwaliteitsnormen waarbij sprake is van bescherming van planten eerst op langere termijn zullen worden opgesteld en gerealiseerd, is hier geen sprake meer van een ondernemersrisico maar van de zekerheid van een negatief rendement. De overheid verplicht de boscigenaar momenteel, en elk redelijk denkend bosbouwer heeft dat al begrepen, tot een herplant waarvan vaststaat dat deze binnen enkele jaren te gronde gaat. Het rendement van deze verplichte herplant is nul. Dit geldt overigens voor elke beheersmaatregel in het afstervende bos die niet is gericht op bodemverbetering. De wetgever kan nooit de bedoeling hebben gehad, dat de herplantplicht in de boswet in een situatie als de huidige zou gelden zonder volle of tenminste billijke vergoeding. De eigenaar zou dan verplicht worden de kosten van een failliet bosbeheer te dragen. De herstelkosten van het huidige bos zijn zo groot dat de bosbouw ook zeer moeilijk weer rendabel te maken is als de luchtvervuiling effectief is bestreden.

Een feit is daarbij dat de Boswet onder de huidige omstandigheden ook niet meer de instandhouding van het volledige bosareaal, voor welk doel de wet in het leven is geroepen, kan garanderen. Het bos gaat ondanks de Boswet te gronde. Of in feite is het volgens de laatste inventarisaties van Staatsbosbeheer al te gronde gegaan (dit ondanks de uiterst behoedzame presentatie naar buiten). Dit pleit er voor om voor de herplantplicht tijdelijk een algehele vrijstelling te geven tot de luchtverontreiniging effectief bestreden is. De grond zou

ondertussen, waar het niet gaat om natuurbos, voor rendabele vormen van exploitatie kunnen worden gebruikt.

Artikel 6 van de Boswet biedt de mogelijkheid om ontheffing te verlenen van zowel de meldingsplicht voor de velling als voor de herplantplicht. In het geval van een algehele ontheffing kan de minister van Landbouw en Visserij dat doen middels een aankondiging in de Staatscourant. Indien de minister ook onder de huidige omstandigheden (bij kap wegens sterfte door zure regen) blijft vasthouden aan de herplantplicht kan beroep worden ingesteld wegens strijd met algemene beginselen van behoorlijk bestuur en wegens strijd met de wet en wel de strekking van de wet. Geen enkele wet, dus ook niet de Boswet mag zodanige beperkingen aan het eigendomsrecht opleggen dat de eigenaar er geld op toe moet leggen wil hij aan die wettelijke plicht voldoen, tenzij de overheid in een schadevergoeding voorziet. Dat is ook voor andere gevallen geregeld in de Wet inzake de Luchtverontreiniging, de Deltawet, de Deltaschadewet en de Oesterschadewet. (Hierbij gaat men er niet eens van uit dat er sprake is van een negatief resultaat wat bij zure regen wel het geval is.) Dit is nog met talloze voorbeelden aan te vullen.

De laatste drie wetten regelen de financiële gevolgen van de Deltawerken. Volgens artikel 7 van de Deltawet vindt er een verrekening plaats tussen het Rijk en de Rechthebbende. De rechthebbende is gehouden een waardevermeerdering die het gevolg is van Deltawerken aan het Rijk terug te betalen, terwijl het Rijk een waardevermindering vergoedt. De Oesterschadewet kent een tegemoetkoming van de schade toe aan oesterkwekerijen en aanverwante bedrijven voor bedrijfsschade ten gevolge van de Deltawerken. (Hierbij is op te merken dat een parallel te trekken is tussen de oesterverwerkende en de houtverwerkende bedrijven!) De Deltaschadewet ten slotte regelt de schadevergoeding voor de daarvoor in aanmerking komende burgers. De genoemde regelingen berusten op het bestuurlijke gelijkheidsbeginsel. De regering mag bij het treffen van maatregelen niet de ene burger veel meer nadeel toebrengen dan andere burgers. Het betreft dus overheidsbesluiten die in beginsel rechtmatig zijn, maar onrechtmatig kunnen worden wanneer de overheid nalaat om burgers die door deze maatregelen onevenredig grote offers moeten brengen een schadeloosstelling toe te kennen. Het gaat hier dus niet om 'normale' schade, maar om abnormale.

Juridische basis is naast het bestuurlijke gelijkheids- het zorgvuldigheidsbeginsel. Wetten ter uitvoering van het bovengenoemde grondrechtsartikel over schadevergoeding bij beperking van de uitoefening van het eigendomsrecht geven uitvoering aan die beginselen. Heeft lid 3 alleen betrekking op die gevallen waarin de overheid actief op-

treedt en daarmee actief ingrijpt in de maatschappelijke verhoudingen? Of heeft het ook betrekking op gevallen, zoals in verband met de Wet Luchtverontreiniging, waarbij de overheid ten behoeve van het bedrijfsleven bewust geen strenge maatregelen treft, wel wetende dat bepaalde groepen burgers hiervan schade ondervinden, schade die onevenredig groot genoemd kan worden, zoals bij boscigenaren? Mij lijkt ook het laatste geval juist. In elk geval zien we dat de wetgever in de Wet Luchtverontreiniging een uitwerking geeft aan bovengenoemde beginselen.

Ten slotte biedt artikel 9 de mogelijkheid tot het verlenen van financiële faciliteiten. Daarin wordt namelijk gesteld, dat, als de rentabiliteit in de bosbouw daartoe volgens de minister aanleiding geeft, voor de herplant een al dan niet rentedragend krediet kan worden verleend. Dit krediet hoeft, indien de rentabiliteit van de bosbouw of houtteelt daartoe aanleiding geeft, niet te worden afgelost maar kan worden omgezet in een subsidie.

Een apart probleem vormen de verordeningen van het Boschap betreffende schadelijke dieren. Volgens deze verordening is de boscigenaar verplicht om bepaalde maatregelen te nemen om zekere schadelijke insecten zoals de dennenscheerder te vangen en is het hem verboden om geheel of gedeeltelijk ontwortelde of gebroken houtopstand van veel boomsoorten, onder andere alle soorten den en sparren, aanwezig te hebben. Omdat de bossterfte gepaard gaat met enorme insectenplagen worden de boscigenaren zo tot veel extra werk verplicht dat vanwege de kwaliteit en de leeftijd van de betrokken bomen zelden rendabel is. Bovendien lijkt deze bestrijding, gezien de algehele en toenemende zwakte van de bomen en de populatiedynamica van de betrokken insecten, dweilen met de kraan open. Sommigen zullen zich afvragen of de maatregelen in de huidige situatie überhaupt nog zin hebben en of van deze verplichtingen niet eveneens ontheffing moet worden gegeven.

REFERENTIES

- Aalst, R. M. van, H. S. M. A. Diederer, J. C. T. Hollander, K. D. van den Hout, F. A. A. de Leeuw, J. Stellingwerf, Stikstofoxiden in de Nederlandse buitenlucht, Fotochemische luchtverontreiniging; Publicatiereeks Lucht van het ministerie van VROM no. 16, 1983.
- Adema, E. H., schriftelijke beantwoording van vragen van het Europe Parlement inzake zure regen, Landbouwhogeschool Wageningen, 1983.
- Appelo, C. A. J., G. J. W. Kraaijenbrink, C. C. D. F. van Ree, L. Vasak, Beïnvloeding van de grondwaterkwaliteit in het infiltratiegebied van de noordwestelijke Veluwe; Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne, rap. BO-11, 1982.
- Appelo, C. A. J., Verzuuring van het grondwater op de Veluwe, H2O (15) nr. 18, 1982 pgn. 464-468.
- Arnolds, E., J. Frenken, E. Jansen, J. Wisman, Veranderingen in de Nederlandse mycoflora op grond van excursieverslagen en verspreidingspatronen van enkele soorten; in: Veranderingen in de Nederlandse mycoflora; proc. symp. Ned. Myc. Ver., 1984, pgn. 5-11.
- Arnolds, E., Typen van veranderingen in de Nederlandse mycoflora en methoden om deze te onderzoeken; in: Veranderingen in de Nederlandse mycoflora; proc. symp. Ned. Myc. Ver., 1984, pgn. 3-4.
- Athari, S., Zuwachsvergleich von Fichten mit unterschiedlich starken Schadenssymptomen; AFZ Nr. 26/27, 1983, pgn. 653-655.
- Baker, J. P., C. L. Schofield, Aluminium toxicity to fish as related to acid precipitation and Arondidack surface water quality; in: D. Drablos, A. Tolan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 292-293.
- Bassie, W., Het onderhoud van betonconstructies in de woningbouw; PT-Bouwtechniek 38/5, 1983, pgn. 23-26.
- Bauer, F., Vom Stand der Luftschadstoffbelastung in Österreichs Wäldern und von den Abhilfemassnahmen; AFZ Nr. 20, 1984, pgn. 510-513.
- Binns, W. O., Immissionsschäden in Grossbritannien; AFZ Nr. 26/27, 1983, pgn. 701-702.
- Blom, J., Zure regen vormt geen bedreiging voor bossen; Groene vacaturegids nr. 9, 1983.
- Boks, P. A. de, W. J. van Nes, De haalbaarheid van een rendabele biogasinstallatie voor de middelgrote melkveehouderij; Centrum voor Energiebesparing Delft, 1983.
- Bombosch, S., Mercuri-accumulation in game; in: B. Ulrich, J. Pankrath (eds.), Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems, Dordrecht, 1983, pgn. 271-284.
- Bormann, F. H., Factors confounding evaluation of air pollution in forest eco-

- systems; in: H. Ott, H. Stangl (eds.), Acid deposition a challenge for Europe, proc. EEG-symp. Karlsruhe, Brussel, 1983, pgn. 147-166.
- Bosbouwvoorlichting 22 no. 1, Groei en conditie van populieren langs snelwegen in West-Nederland, 1983.
- Bosker, B., Mestoverschotten rendabel maken door biogaswinning; Landbouwkundig tijdschrift 96 nr. 1, 1984, pgn. 9-12.
- Brakke, D. F., Atmospheric deposition in Norway during the last 300 years as recorded in SNSF lake sediments III. Cladoceran community structure and stratigraphy; in: D. Drablos, A. Tollan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 272-274.
- Braun, H. J., Unterschiedliche Symptome des Waldsterbens im Schwarzwald – mögliche Kausalketten und Basisursachen; AFZ Nr. 26/27, 1983, pgn. 656-660.
- Breemen, N. van, P. A. Burrough, E. J. Velthorst, H. F. van Dobben, T. de Wit, T. B. Ridder, H. F. R. Reijnders, Soil acidification from atmospheric ammonium sulphate in forest canopy throughfall; Nature, vol. 299, 1982, pgn. 548-550.
- Breemen, N. van, G. J. W. C. Peek, G. Poortinga, W. van der Westeringh, Oriënterend onderzoek naar de rol van bodemverzuring bij bosschade in Friesland; publicatiereeks Lucht van het ministerie van VROM no. 23, 1984.
- Breemen, N. van, J. Mulder, C. D. Driscoll, Acidification and alkalisation of Soils; Plant and Soil 75, 1983, pgn. 283-308.
- Breemen, N. van, C. D. Driscoll, J. Mulder, Acid deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters; Nature, vol. 307, 1984, pgn. 599-604.
- Bruggen, F. W. van der, J. G. A. Graas, J. B. A. M. Pijnenburg, H. J. Toussaint, W. L. C. Weier, Rookgasdenitrificatie in Japan; Publicatiereeks Lucht van het ministerie van VROM nr. 6, 1983.
- Bruins, P., H. Droogsmma, R. Jongbloed, T. van Valen, F. Viersen, Een nieuwe strontrace door Nederland, een berekening van de sociaal-economische gevolgen van een betere verdeling van de organische mest in Nederland; Milieukundig Studiecentrum rap. 35, RUG, Groningen, 1983.
- Brümmer, G., U. Herms, Influence of soil reaction and organic matter on the solubility of heavy metals in soils; in: B. Ulrich, J. Pankrath (eds.), Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems; Dordrecht, 1983, pgn. 233-246.
- Bundesminister für Forschung und Technologie, Bericht zum Stand der Erforschung der Waldschäden; Dok. 157/1983.
- Burg, J. van der, De betekenis van zure depositie en luchtverontreiniging voor bos en hout in Nederland; Bos en Hout Berichten nr. 8, 1983.
- Buijsman, E., Emissie van ammoniak in Nederland; Publicatiereeks Lucht van het ministerie van VROM, 1984.
- CBS, Algemene milieustatistiek 1979-1982; 's-Gravenhage, 1983.
- Cobouw (red), Wij zullen nog vele jaren met betonschade te kampen hebben, 1983.
- Colenbrander, R. J., Grondwater: zijn natuurlijke betekenis en socio-econo-

- mische betekenis; TNO-project nr. 9, 1983, pgn. 265-268.
 Commissie van de Europese Gemeenschappen, Tien jaar communautair milieubeleid, 1984.
 Commission of the European Communities, Acid rain, a review of the phenomenon in the EEC and Europe; Brussel, 1983.
 Coolman, H., Schimmels geen afdoende oplossing bij zure regen; Persoverzicht Staatsbosbeheer nr. 6, 1983.
 Cowly, E. B., Acid precipitation in historical perspective; Env. Sci. Techn. vol. 16 no. 2, 1982.
- Dam, H. van, K. Beljaars, Historische veranderingen in microflora en chemie van vennen in relatie tot zure neerslag; in: E. H. Adema, J. van Ham (eds.), Zure regen, oorzaken, effecten en beleid, proc. symp.; Wageningen 1984, pgn. 156-161.
 Dam, H. van, G. Suurmond, C. ter Braak, Impact of acid precipitation on diatoms and chemistry of Dutch moorland pools; in: D. Drablos, A. Tollan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 298-299.
 Dam, J. van, Invloed van de Nederlandse luchtverontreiniging op de Nederlandse flora en op de verzuring van de bodem; RIN-rapport no. 11, 1983.
 Dieter, H., in: reactie Freudenstadt-Knibis ten behoeve van de hearing van het Europe Parlement 19-20 april 1984.
 Dobben, H. F. van, E. Nieboer, D. H. S. Richardson, Korstmossen; Natuur en Techniek, 50/11 1981, pgn. 870-889.
 Driel, W. van, B. J. van Goor, D. Wiersma, Cadmium in Nederlandse cultuurgronden; Bedrijfsontwikkeling nr. 14, 1983.
 Dijkhuizen, R., M. Verhek, Biogas als nieuwe energiebron; Milieukundig Studiecentrum rap. 25, RUG, Groningen, 1982.
- Ecoplan, Grontmij, Copeijn, Ennemaborg – beheersplan; Groninger Borgenstichting, 1982.
 EEG, Besluit met betrekking tot de sluiting van het verdrag betreffende grensoverschrijdende luchtverontreiniging over lange afstand; PB L 171, 27.06. 1981.
 Environment '82 Committee, Acidification today and tomorrow; Swedish Ministry of Agriculture, Stockholm, 1982.
 EPA, The Acidic Deposition and its Effects; Public Review Draft, Washington, 1983.
- Feenstra, J. F., Cultuurgoederen en luchtverontreiniging; ministerie van VROM; Publicatiereeks Lucht no. 1, 1982.
 Fowler, D., J. N. Cape, I. A. Nicolson, J. W. Kinnaird, I. S. Paterson, The influence of a polluted atmosphere on cuticula degradation in Scots pine (*Pinus sylvestris*); in: D. Drablos, A. Tollan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 146-147.
 Fransen, J., De top-tien van de vaderlandse verzuurders; Natuur en Milieu nr. 3, 1984, pgn. 9-11.

- Genssler, H., Jeder dritte Baum im Land zeigt Krankheitssymptome; LÖLF-Mitteilungen no. 4, 1983, pgn. 4-14.
- Genssler, H., Viele Theorien über die Ursachen des Waldsterbens; LÖLF-Mitteilungen nr. 4, 1983, pgn. 38-41.
- Georgii, H. W., E. Rohbock, C. Perseke, Investigation of the wet and dry Deposition of acidic and heavy-metal components; in: H. Ott, H. Stangl (eds.), Acid deposition a challenge for Europe; (proc. EEG-symp. Karlsruhe), Brussel, 1983, pgn. 82-101.
- Graupe, F., Österreichs gefährdetste Gebiete, een serie artikelen (onbekend dagblad), 1983.
- Grennfelt, P., Sources and distribution of acidifying compounds; in: Report of the European conference on acid rain, Göteborg Sweden, 1981, pgn. 31-48.
- Grennfelt, P., J. Schjoldager, Photochemical oxidants in the troposphere; Ambio 13 no. 2, 1983.
- Groetelaers, P., A. L. M. Hoenderdos, A. W. C. Metselaar, H. Primus, M. B. A. Roetgering, Exploitatieproblemen naoorlogse woningen; TH-Delft/NIROV, 1984.
- Hartog, C. den, J. F. M. Geelen, J. A. A. R. Schuurkes, E. H. Adema, J. van Ham (eds.), Zure neerslag, een sluipend kwaad voor onze gebufferde wateren; in: E. H. Adema, J. van Ham (eds.), Zure regen, oorzaken, effecten en beleid, proc. symp.; Wageningen, 1984, pgn. 162-164.
- Hoeks, J. Verzuring van bodem en grondwater als gevolg van atmosferische depositie; Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding Wageningen, nota 1480, 1983.
- Hoppenbrouwer, T., Seasonal relationship of sudden infant death syndrome and environmental pollutants; in Journal of Epidemiology 1981.
- Hout, K. D., C. Huygen, W. A. M. den Tonkelaar, N. D. van Egmond, Stikstof-oxiden in de Nederlandse Buitenlucht; Publicatiereeks Lucht van het ministerie van VROM no. 15, 1983.
- IMAG, Biogas op veebedrijven – toepassingsmogelijkheden en perspectieven; Publicatie 176, 1982.
- Indicatief Meerjarenprogramma 1985-1989 ter bestrijding van Luchtverontreiniging; ministerie van VROM, le concept april 1984.
- Instituut voor Milieuvraagstukken, mozaïek van de milieuproblematiek; 10 jaar onderzoek, Amsterdam, Vrije Universiteit, 1982.
- Jansen, E., Veranderingen in de verspreiding van cantharel; in: Veranderingen in de Nederlandse mycoflora, proc. symp. Ned. Myc. Ver., 1984, pgn. 14-17.
- Janssen, Th. W., Intensieve veehouderij in relatie tot ruimte en milieu; Staatsbosbeheer rap. 23, 1982.
- Johannessen, M., A. Skartveit, R. F. Wright, Streamwater chemistry before, during and after snowmelt; in: D. Drablos, A. Tollan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 224-226.

Johnson Matthey Chemicals, Written statement to the public hearing on acid deposition by the European Parliament Committee on the Environment, Public Health and Consumer Protection, 19th and 20th April 1983.

Kasteleijn, C., J. Regts, Voormalige vuilstortplaatsen en hun landbouwkundige bruikbaarheid; Rapport Milieukundig Studiecentrum nr. 12, Groningen, Rijksuniversiteit, 1979.

Kema, Effects of SO₂ and its derivatives on health and ecology, report, 1981.

Kenk, G., Zuwachsuntersuchungen in geschädigten Tannen-Beständen in Baden-Württemberg, AFZ Nr. 26/27, 1983, pgn. 650-652.

Koninklijk Besluit, 15 sept. 1980; in: NJ/AB, 1981 nr. 72-73.

Krems-Hemesath, B., Juristen gegen Wald- und Menschensiegtum, Neunkirchen, 1984.

Labuda, J., Overview of oil desulfurization; concept, proc. of the Stockholm Conf. on acidification of the environment, 1982.

Lammel, R., Endgültige Ergebnisse und bundesweite Kartierung der Waldschädenserhebung 1983; AFZ 14/15, 1984, pgn. 340-344.

Landbouw-economisch Instituut, Van bedrijfsuitkomsten tot financiële positie; samenvattend overzicht van bedrijfsuitkomsten, inkomensvorming en financiële positie op landbouwbedrijven in 1981/82 t.o.v. voorgaande jaren; publicatie no. 3.128, 1983.

Langelaar, K., Het Fonds Luchtverontreiniging; Milieu en recht nr. 3, 1974, pgn. 69-80.

Lanting, R. W., De aantasting van materialen door NO_x; Publicatiereeks Lucht van het ministerie van VROM no. 12, 1983.

Lanting R. W./TNO, Aantasting materialen door luchtverontreiniging; concept PAO-cursus, 1984.

Leenen, H. J., Inleiding tot het milieuhygiënerecht; Alphen aan de Rijn, 1973.

Lehringer, S., Neuartige Waldschäden in europäischen Ländern; AFZ Nr. 3, 1984, pgn. 35-36.

Lehringer, S., Zum Stand der Diskussion um das umweltfreundliche Auto; AFZ Nr. 33/34, 1984, pgn. 845.

Lehringer, S., Weniger Stickstoffoxide aus Automotoren durch neues Abgasreinigungssystem; AFZ Nr. 33/34, 1984, pgn. 8116.

Lende, R. van der, T. J. Kok, R. Peset Reig, Ph. H. Quanjer, J. P. Schouten, N. G. M. Orie, Decreases in VC and FEC with time: indicators for effects of smoking and air pollution; Bull. Europ. Physiopath. Resp. nr. 17, 1981.

Lende, R. van der, C. Huygen, E. J. Jansen-Koster, S. Knijpstra, R. Peset, B. F. Visser, E. H. E. Wolfs, N. G. M. Orie, A temporary decrease in the ventilatory function of an urban population during an acute increase in air pollution; Bull. Europ. Physiopath. Resp. nr. 11, 1975.

Leuven, R. S. E. W., C. den Hartog, J. F. M. Geelen, Th. C. M. Brock, Effecten van zure neerslag op de waterkwaliteit, flora en fauna van zwakgebufferde wateren in Nederland; in: E. H. Adema, J. van Ham (eds.), Zure Regen, oorzaken, effecten en beleid, proc. symp.; Wageningen, 1984, pgn. 141-146.

- Leuven, R. S. E. W., C. den Hartog, M. M. C. Christiaans, F. G. F. Oyen, Effects of acid precipitation on amphibians and fish, in: E. H. Adema, J. van Ham (eds.), *Zure Regen, oorzaken, effecten en beleid*, proc. symp.; Wageningen, 1984, pgn. 184-186.
- Lier, J. van, P. den Boer, *Rapport Luchtverontreiniging Eindhoven; concept TH-Eindhoven*, 1982.
- LIS, *Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland*; LIS-Berichte Nr. 28, 1982.
- Lock, R. A. C., *Kwik in het milieu; Natuur en techniek*, 49 nr. 2, 1981.
- Mayer, R., Interaction of forest canopies with atmospheric constituents: aluminium and heavy metals; in: B. Ulrich, J. Pankrath (eds.), *Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems*, Dordrecht, 1983, pgn. 47-56.
- Meiners, H., G. Poortinga, *Das Europäische Parlament zur Luftbelastung*; AFZ Nr. 8, 1984 pgn. 170-171.
- Menting, B., *Biogasininstallaties geven te weinig gas en te veel problemen*; Boerderij 68 nr. 49, 1983, pgn. 11.
- Meyer, F. H., *Mycologische Beobachtungen zum Baumsterben*; AFZ Nr. 9/10, 1984, pgn. 212-228.
- Ministerie L+V, *Ontwikkelings- en beheersvisie voor het Meinweggebied; concept van bureau Ecoplan* 1983.
- Ministerie van Landbouw en Visserij, *Adviesbasis voor bemesting van landbouwgronden*; Consulentenschap voor bodemaangelegenheden in de landbouw, Wageningen, 1983.
- Ministerie van VROM, *Technologische gegevens voor het NO_x-beleid*; Publicatiereeks Lucht no. 8, Ministerie VROM, 1984.
- Ministerie van VROM, *Betonschade in de woningbouw*, 1984.
- Molen, H. van der, *Omstreden landbouw*; Amsterdam, 1978.
- Mooi, J., *Onderzoek naar de gevoeligheid van houtige gewassen voor SO₂ en HF*; publ. no. 8 van de werkgroep bos in stedelijke gebieden, 1972.
- Mooi, J., *Influence of Ozone on Growth of Two Poplar Cultivars*; Plant Disease 64, 1984, pgn. 772-773.
- Mooi, J., *Beschadiging door luchtverontreiniging*; in: *Bosbescherming*, Wageningen, 1982.
- Mooi, J., *Responses of some species to mixtures of SO₂, NO_x and O₃*; Aquilo Ser. Bot. 19, 1983, pgn. 189-196.
- Mooi, J., H. G. Wolting, *Effecten van luchtverontreiniging (mengsels van NO₂, O₃, SO₂) op populier en grote weegbree*; in: E. H. Adema, J. van Ham (eds.), *Zure regen, oorzaken, effecten en beleid*, proc. symp.; Wageningen 1984, pgn. 147-151.
- Muniz, I. P., H. Leivestad, *Acidification – effects on freshwater fish*; in: D. Drabløs, A. Tollan (eds.), *Ecological impact of acid precipitation – SNSF project*; Oslo, 1980, pgn. 84-92.
- Muntingh, H. J., *Verslag namens de Commissie voor milieubeheer, volksgezondheid en consumentenbescherming over de bestrijding van zure regen*; PE 83.241/def., 1983.
- Natuurbehoud* nr. 3 (red.), *Vitaliteitsonderzoek bossen*, 1984, pgn. 80.

- Niemeyer, H., Der Solling als Areal forstwirtschaftlicher Forschung; AFZ Nr. 40, 1983, pgn. 1061-1063.
- Noy, D., E. Lebrecht, Stikstofoxiden in Nederlandse woningen; Publicatiereeks Lucht van de minister van VROM no. 9, 1983.
- Offermans, H., B. Tuin, H. de Vries, U. de Vries, De mogelijkheden van biogas in de landbouw; Milieukundig Studiecentrum rap. 26, RUG, Groningen, 1982.
- Økland, J., Environment and snails (Gastropoda): Studies of 1000 lakes in Norway; in: D. Drabløs, A. Tøllan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 322-323.
- Økland, J., A. K. Økland, pH level and food organisms for fish: Studies of 1000 lakes in Norway; in: D. Drabløs, A. Tøllan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 326-327.
- Økland, K. A., Mussels and crustaceans: Studies of 1000 lakes in Norway; in: D. Drabløs, A. Tøllan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 324-325.
- Overrein, L. N., H. M. Seip, A. Tøllan, Acid precipitation – effects on forest and fish; Final report of the SNSF project 1972-1980; Oslo, 1981.
- Ow, L., Zum Waldsterben im Alpenraum und in Mittelgebirgen; AFZ nr. 1/2, 1984, pgn. 10.
- Palz, W., P. Chartier, D. O. Hall (eds.) Energy from biomass – proc. van het 1e EG-symposium; Londen, 1980.
- Peterson, R. H., P. G. Daye, J. L. Metcalfe, The effects of low pH on hatching of Atlantic salmon eggs; in: D. Drabløs, A. Tøllan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 328-329.
- Polak, J. M., Vergoeding van schade door luchtverontreiniging; in: Met eerbiedigende werking, Deventer, 1971.
- Poortinga, G., De toekomst van de houtvoorziening in gevaar; Houtwereld 35/21, 1982, pgn. 23-27.
- Poortinga, G., Zure regen: bewust wanbeleid door financiële korte-termijnbelangen?; Recreatie en toerisme nr. 2, 1983, pgn. 61.
- Poortinga, G., Bodemverzuring en schadebeelden aan eiken en fijnsparren in twee bossen in Friesland; in: E. H. Adema, J. van Ham (eds.), Zure regen, oorzaken, effecten en beleid, proc. symp., Wageningen, 1984, pgn. 164-167.
- Poortinga, G., Y. Poortinga, 1984, Waldschäden durch Bodenversauerung in den Niederlanden; AFZ Nr. 3, 1984, pgn. 37-38.
- Poortinga, G., Zure Regen, Notities over Milieu en Energie nr. 1, FWME-PvdA, 1984.
- Poortinga, G., Duitse deskundigen inspecteren Drentse bossen; Houtwereld 37/3, 1984, pgn. 7.
- Poortinga, G., 1984-2, Het vitaliteitsonderzoek in het Nederlandse bos – een tussenbalans; Houtwereld 37/3, 1984, pgn. 14-15.
- Poortinga, G. Topoverleg zure regen; Houtwereld nr. 8, 1984, pgn. 27.
- Protokoll der öffentlichen Anhörung des Ausschusses für Umweltfragen,

- Raddum, G. G., Comparison of benthic invertebrates in lakes with different acidity; in: D. Drablos, A. Tollan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 330-331.
- Raddum, G. G., A. Hobaek, E. R. Lømsland, T. Johnson, Phytoplankton and zooplankton in acidified lakes in South Norway; in: D. Drablos, A. Tollan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 332-334.
- Rebsdorf, Aa, Acidification of Danish soft-water lakes; in: D. Drablos, A. Tollan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 238-239.
- Rehfuess, K. E., Über die Wirkungen der sauren Niederschläge in Waldökosystemen; Forstwiss. Zentralblatt 100 nr. 6, 1981, pgn. 363-381.
- Rehfuess, K. E., Walderkrankungen und Immissionen eine Zwischenbilanz; AFZ Nr. 26/27, 1983, pgn. 640.
- Reijnders, L., Cadmium, een groeiende bedreiging voor het milieu; Stichting Natuur en Milieu, Utrecht, 1983.
- Roelofs, J. G. M., L. G. M. Clasquin, J. M. C. Driessen, A. J. Kempers, De gevolgen van zwavel- en stikstofhoudende neerslag op de vegetatie in heide en heidevennen; in: E. H. Adema, J. van Ham (eds.), Zure regen, oorzaken, effecten en beleid, proc. symp., Wageningen, 1984, pgn. 134-140.
- Rooy, J. van, Reparatie van betonconstructies; Eisma's Schildersblad no. 12, 1983.
- Rosby, S., Dry scrubbing – a new method for SO₂ removal at coal fired powerplants; Stockholm 1982.
- Rosenqvist, I. Th., In een schrijven aan de Commissie voor Milieubeheer, Volksgezondheid en Consumentenbelangen van het Europese Parlement; Institut For Geologi; Oslo, 1983.
- Rosenqvist, I. Th., P. Jørgenson, H. Rueslatten, The importance of natural H⁺ production for acidity in soil and water; in: D. Drablos, A. Tollan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 240-241.
- Rosseland, B. O., I. Sevaldrud, D. Salvastog, I. P. Muniz, Studies on freshwater fish populations – effects of acidification on reproduction, population-structure, growth and food selection; in: D. Drablos, A. Tollan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 238-239.
- Scheffold, K., In een schrijven aan de Commissie voor Milieubeheer, Volksgezondheid en Consumentenbelangen van het Europese Parlement; Staatl. Forstamt Alpirsbach, 1983.
- Schmidt, A., Immissionsbelastungen von Waldökosystemen, LÖLF-Mitteilungen; Sonderheft, 1983, pgn. 1-2.
- Schuit, P. K. van der, De aantasting van natuursteen en pleisterwerk 1, PT-Bouwtechniek 38/3, 1983, pgn. 31-38.

- Schuit, P. K. van der, De aantasting van natuursteen en pleisterwerk 2, PT-Bouwtechniek 38/4, 1983, pgn. 7-16.
- Schuit, P. K. van der, De aantasting van natuursteen en pleisterwerk 3, PT-Bouwtechniek 38/5, 1983, pgn. 27-32.
- Schütt, P., W. Koch, H. Blaschke, K. J. Lang, H. J. Schuck, H. Summerer, So stirbt der Wald; München 1983.
- Schuurkens, J. A. A. R., J. G. M. Roelofs, De invloed van waterverzuuring en stikstofrijkdom op waterplantengemeenschappen in zwakgebufferde wateren; in: E. H. Adema, J. van Ham (eds.), Zure regen, oorzaken, effecten en beleid, proc. symp., Wageningen, 1984, pgn. 177-179.
- Scoulikidis, Th. N., Effects of primary and secondary air pollutants and acid depositions on buildings and monuments; in: H. Ott, H. Stangl (eds.), Acid deposition a challenge for Europe; (proc. EEG-symp. Karlsruhe), Brussel, 1983, pgn. 193-228.
- Sevaldrud, I. H., I. P. Muniz, S. Kalvenes, Loss of fish populations in Southern Norway, dynamics and magnitude of the problem; in: D. Drablos, A. Tollan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 350-351.
- Skårby, L., G. Sellden, The Effects of Ozone on Crops and Forests; Ambio 13 no. 2, 1984.
- Slob, A., Luchtverontreiniging door aerosolen uit kolen- en oliegestookte elektriciteitscentrales; Rapport Milieukundig Studiecentrum; Groningen, Rijksuniversiteit, 1980.
- Smilde, K. W., W. Luit, The effect of phosphate-fertilizer-cadmium on cadmium in soils and crops; rapport 6-83 Inst. voor Bodemvruchtbaarheid Haren, 1983.
- Sorauner, P., Handbuch der Pflanzenkrankheiten dl. I; Berlin, 1909.
- Sorlini, C., in een schrijven aan de Commissie voor Milieubeheer, Volksgezondheid en Consumentenbelangen van het Europese Parlement; Instituto Microbiologia agraria e tecnica Milano, Italia, 1983.
- Spelsberg, G., Bodensubstrat offenbar nicht entscheidend für akute Waldschäden; LÖLF-Mitteilungen Nr. 4, 1983, pgn. 35-37.
- Spiegel, der, Nr. 34, Die Deutsche sind opferbereit, 1983.
- Staatsbosbeheer, Voorlopige rapportage van het vitaliteitsonderzoek; concept, 1983.
- Stichting Verwerking Organische Stoffen, Er uit halen wat er in zit; ongedateerde brochure.
- Stroink, F. A. M., Nogmaals het Fonds Luchtverontreiniging; Milieu en recht nr. 4, 1974, pgn. 121-124.
- Strub, A., P. Chartier, G. Schleser (eds.), Energy from biomass – proc. van het 2e EG-symposium; Londen, 1982.
- Sulzbach-Laufen, P. J., Gibt es einen Zusammenhang zwischen Vulkanexplosionen und Walderkrankungen?; AFZ Nr. 28, 1984, pgn. 727-729.
- Thomas, R., J. B. Vos, J. P. Hettelingh, L. Hordijk, H. M. A. Jansen, A. A. Olsthoorn, Uitworp van stikstofoxiden in Nederland in het jaar 2000; Publicatiereeks Lucht van het ministerie van VROM nr. 7, 1983.

- Tilborghs, Bewoonbaarheid en milieu; in: Grondrechten, Ars Equi Libri, Nijmegen, 1982, pgn. 403-412.
- Tingey, D. T., The effects of ozone on plants in the United States; Env. Prot. Agency, 1983.
- Tonkelaar, W. A. M. den, J. van der Tuin, Luchtverontreiniging in auto's; Publicatiereeks Lucht van het ministerie van VROM no. 4, 1984.
- Tonneijck, A. E. G., Effects of Peroxyacetylnitrate and ozone in some plant species, 1983.
- Traaen, T. S., Effects of acidity on decomposition of organic matter in aquatic environments; D. Drabløs, A. Tollan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 340-341.
- Ulrich, B., Stabilität von Waldökosystemen unter dem Einfluss des sauren Regens; AFZ Nr. 26/27, 1983, pgn. 670-677.
- Vangenechten, J. H. D., O. L. J. Vanderborcht, Acidification of Belgian moor-pools by acid sulfuric rainwater; in: SNSF-project, D. Drabløs, A. Tollan (eds.), Ecological impact of acid precipitation – SNSF project; Oslo, 1980, pgn. 342-343.
- Veen, N. G. van der, e.a., Gehalten aan cadmium in Nederlandse Land- en tuinbouwgewassen; Bedrijfsontwikkeling nr. 14, 1983.
- Veldt, C., Stikstofoxiden in de Nederlandse buitenlucht; Publicatiereeks Lucht van het ministerie van VROM no. 14, 1983.
- Venhuizen, K. D., Verzuurt ook ons grondwater?, H₂O (16) nr. 19, 1983, pgn. 439-445.
- VROM, Technische gegevens voor het NO_x-beleid; Publicatiereeks Lucht nr. 8, 1983.
- Waldmann, G., Saurer Nebel als Ursache der neuartigen Waldschäden?; AFZ Nr. 12, 1984, pgn. 290-291.
- Wetstone, G. S., A. Rosencranz, Acid rain in Europe and North America; Environmental Law Institute, 1983, Washington.
- White, L. P., L. G. Plasket, Biomass as fuel; Londen, 1981.
- Woningraad no. 16, Betonschade bedraagt vele miljoenen, 1984.
- Wulf, A., Können Pflanzenschutzmittel für die neuartigen Walderkrankungen mitverantwortlich gemacht werden?; AFZ Nr. 3, 1984, pgn. 44.
- Wunder, W., Zum Stand der neuartigen Waldschäden in Schweden; AFZ Nr. 3, 1984, pgn. 36.
- Ijpelaar, P., Veranderingen in de mycoflora van eikenbossen op arme zandgrond; in: Veranderingen in de Nederlandse mycoflora, proc. symp. Ned. Myc. Ver., 1984, pgn. 18-21.
- Zöttl, H. W., Wirkungen von Luftschadstoffen auf Waldökosysteme; AFZ Nr. 50, 1983, pgn. 1360.
- Zumr, V., M. Landa, Zu den Auswirkungen der Immissionsschäden in der CSSR, AFZ Nr. 14/15, 1984, pgn. 364-365.











