

De verzuring van de regen

door J. van Zelle

Regenwater bevat van nature nauwelijks zuren. Gedurende de laatste tientallen jaren echter blijkt dat op het noordelijk halfrond het gehalte aan zuren in de neerslag 10 tot 10.000 maal groter is dan natuurlijkerwijze mogelijk zou zijn. De verzuring wordt veroorzaakt door de aanwezigheid in de atmosfeer van zwavelverbindingen (sulfaten) en stikstofverbindingen (nitraten), waarvan de bron is gelegen in de uitworp van zwaveldioxyde en stikstofoxyden, die vrijkomen bij de verbranding van fossiele brandstoffen. De zure regen heeft tot gevolg, dat in een groot aantal eertijds visrijke meren en rivieren in Noorwegen, Zweden, Noord-Oost Amerika en Canada de vis is verdwenen.

Ook de plantenwereld aldaar wordt aangetast: macrofyten*) zoals de waterlobelia (*Lobelia dortmanna*) hebben in sommige meren plaats moeten maken voor dichte massa's algen en mossen (6). Het aantal soorten ongewervelden neemt in het algemeen af met toeneming van de verzuring. Bij de

afbrekers of reducenten vindt verschuiving van bacteriën naar schimmels plaats, waardoor organische afvalstoffen minder snel worden afgebroken. Ook in Nederland zijn de gevolgen van de verzuring merkbaar in beken en vennen op de pleistocene zandgronden (4) (7).

De z.g. epifyten woestijnen in ons land zijn sinds 1950 aanzienlijk in omvang toegenomen als gevolg van de sterke toename van zwaveldioxyde in de lucht en mogelijk door de daarmee gepaard gaande verzuring van de regen. Maar ook kunstwerken en monumenten in binnen- en buitenland hebben te lijden van de zure regen, b.v. de gebrandschilderde ramen daterend van de middeleeuwen te Keulen, Freiburg en Augsburg. Het carillon van de dom in Utrecht vertoont ernstige corrosieverschijnselen (2).

De situatie is zorgwekkend. President Carter besteedde in augustus 1979 in zijn tweede milieuboodschap aan het congres aandacht aan de verzuring van de regen en deed voorstellen ter oplossing van deze problematiek (1).

Nederland heeft zijn 'SO₂-Beleidskaderplan' van oktober 1979 (2). Daarin wordt bij de uitgangspunten opgemerkt, dat 'de mens op dit moment in beginsel in staat is de voortbrengselen van de evolutie (die zich over miljarden jaren heeft afgespeeld) in een tijdsbestek van enkele honderden jaren grotendeels te vernietigen. Ethisch gezien heeft de mens niet het recht andere soorten organismen en de daaruit opgebouwde ecosystemen voor een belangrijk deel uit te roeien.'

Verderop in de nota wordt onder uitgangspunten vermeld, dat 'de samenleving de plicht heeft het natuurlijk milieu in stand te houden'. Om daaraan te kunnen meewerken is nodig te weten, wat er zich afspeelt in het milieu en wat onze bijdrage kan zijn om het natuurlijk milieu voor verdere achteruitgang te bewaren. Doel van dit artikel is de kennis omtrent de verzuring van de neerslag en zijn gevolgen te verbreden en te verdiepen.



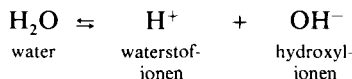
Gebrandschilderde glazen lopen gevaar. De ontvangst van de Koningin van Sheba door koning Salomo.

Wouter Crabeth; st. Jan te Gouda, 1561.
Uit: De glorie van Nederland.

*) Zie voor de verklaring van de gebruikte termen blz. 333.

Wat heet zuur?

Zuren worden gekarakteriseerd door hun eigenschap waterstofionen uit water af te splitsen. Zuiver water is in geringe mate gesplitst in ionen volgens de formule



Het produkt van H^+ en OH^- is bij constante temperatuur constant en heeft bij 25°C de waarde 10^{-14} . Nu is de zuurgraad, aangeduid met pH, gedefinieerd als:

$$\text{pH} = -\log(\text{H}^+).$$

In zuiver water is de concentratie aan H^+ -ionen gelijk aan de OH^- -concentratie; er zijn derhalve 10^{-7} H^+ -ionen.

De negatieve logaritme hieruit is 7 ofwel de $\text{pH} = 7$ en we noemen de vloeistof neutraal. De minimum-waarde van de $\text{pH} = 0$, de maximumwaarde 14 mits men met sterk verdunde oplossingen werkt. Is de pH kleiner dan 7 dan spreken we van zuur; is de pH groter dan 7 van basisch.

Daar de pH een logarithmische grootheid is, betekent een verschil van één pH -eenheid een toename of afname met een factor 10. Daalt de pH van een vloeistof van 7 naar 6, dan betekent dit, dat deze 10-maal zo zuur is. Regenwater bevat normaliter nauwelijks enig zuur. In theorie zou de pH daarom rond de neutrale waarde 7, ofwel tussen 6 en 8 moeten liggen.

Nu bevat de atmosfeer van nature kooldioxyde, dat in regenwater kan oplossen onder vorming van koolzuur. Is regenwater verzadigd met koolzuur, dan is de pH ongeveer 5,5 à 5,6. In Nederland vond Leeftang (3) in de periode 1932-1937 pH -waarden tussen 5 en 7, die hij als betrekkelijk laag beschreef. Is de pH kleiner dan 5, dan wordt deze waarde volledig bepaald door de vrije H^+ -ionen van sterke anorganische zuren zoals zwavelzuur en salpeterzuur (4).

Sterke zuren worden gekenmerkt door de volledige afsplitsing van H^+ -ionen. Lost men b.v. zwaveltrioxyde in water op dan zullen *alle* aanwezige moleculen eerst één H^+ -ion afstaan volgens $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}^+ + \text{HSO}_4^-$ en daardoor reageren als een zeer sterk zuur.

Aangezien ook HSO_3^- nog een sterk zuur is zullen alle aanwezige ionen HSO_4^- nogmaals een H^+ afstaan volgens $\text{HSO}_4^- \rightarrow \text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$.

Bij zwakke zuren, zoals koolzuur, splitsen de H^+ -ionen slechts gedeeltelijk af. Lost men b.v. kooldioxyde in water op dan zal slechts een gedeelte der aanwezige CO_2 moleculen reageren volgens $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$; de overige blijven gewoon als CO_2 opgelost. Aangezien HCO_3^- een

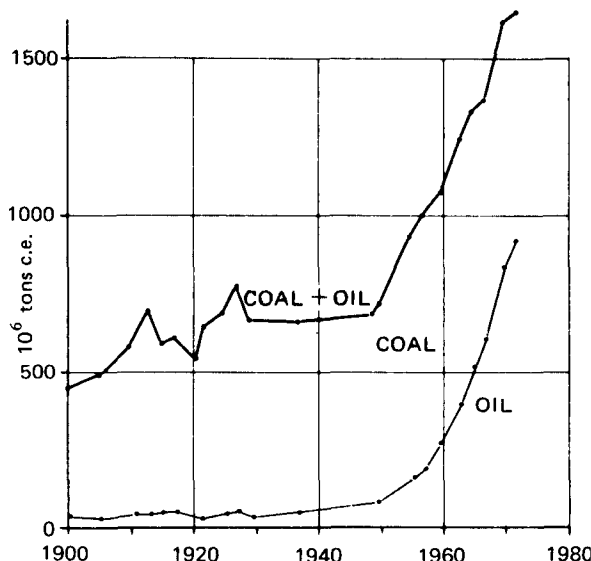


Fig. 1. Jaarlijks gebruik van fossiele brandstoffen (c.e. = coal equivalenten) in Europa gedurende de periode 1900-1972.

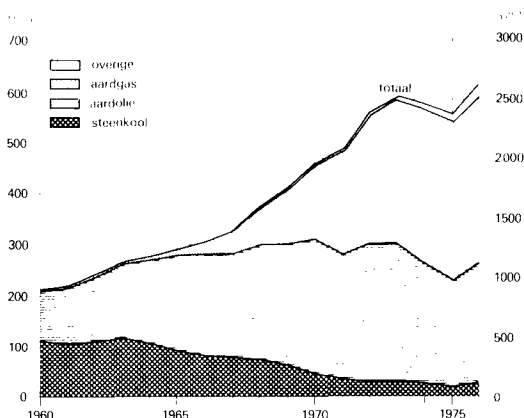


Fig. 2. Totaal binnenlands energiegebruik naar type brandstof.

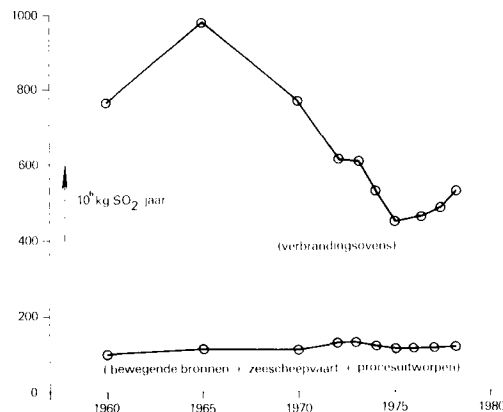


Fig. 3. Totale SO_2 -uitwerp in Nederland in mln kg/jaar.

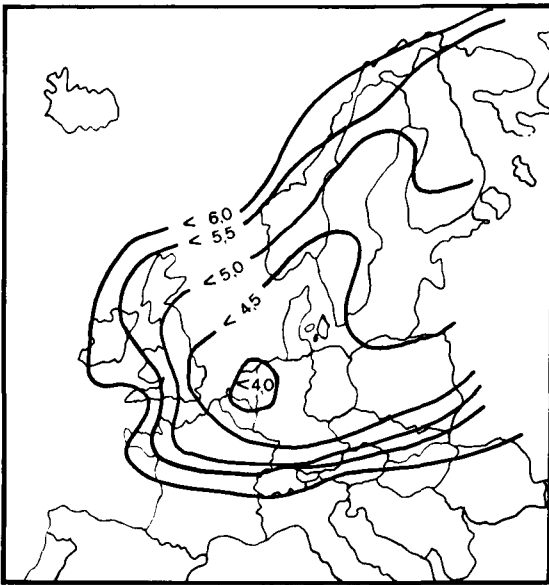


Fig. 4. Het verzuringspatroon in Europa in de jaren rond 1966.

nog veel zwakker zuur is zal slechts een onmeetbaar klein percentage der aanwezige HCO_3^- -ionen nog een H^+ afstaan volgens $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$, alle overige blijven gewoon HCO_3^- . Er komen in totaal dus veel minder H^+ -ionen bij oplossing van CO_2 dan bij oplossing van een vergelijkbare hoeveelheid SO_3 .

In grote delen van het westelijk halfrond kan de neerslag nu worden beschouwd als een verdunde oplossing van een sterk zuur!

Luchtverontreiniging in Europa

In 1952 werd op initiatief van Zweden een uitgebreid Europees meetnet voor regenwateronderzoek opgericht, dat binnen enkele jaren 150 stations telde. In Nederland maken de meetstations in de Bilt, Witteveen (Dr.) en Den Helder deel uit van dit net. De coördinatie vindt plaats door het International Meteorological Institute in Stockholm (IMI) (4).

Het industriegebied langs de Nieuwe waterweg. Een voorbeeld van luchtverontreiniging. (foto: KLM Aerocarto)



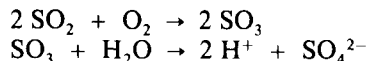
Uit de metingen is gebleken, dat gedurende een periode van 15 tot 20 jaar de pH van de neerslag op veel stations van het IMI-meetnet daalde van 6 naar 4, wat een toename van de zuurconcentratie betekent met een factor 100. In Nederland daalde in deze periode de pH (op jaarbasis) tot onder de waarde 4.

Deze aanzienlijk daling van de pH in West-Europa viel samen met de enorme industriële expansie en de exponentiële stijging van het gebruik van energie in West-Europa waardoor de uitworp van SO_2 (zwaveldioxyde) en NO_x (= $\text{NO} + \text{NO}_2$) (stikstofoxyde en stikstofdioxyde) enorm toenam. Figuur 1 geeft het verloop van het verbruik van fossiele brandstoffen in Europa van 1900-1972 weer. De stijging van het gebruik aan kolen en olie gaat gepaard met de uitworp van zwaveldioxyde (SO_2). Van 1910-1950 was deze emissie tamelijk constant rond 25 miljoen ton per jaar (9). Voor 1973 wordt geschat dat in Europa 60 miljoen ton SO_2 in de atmosfeer werd uitgeworpen. In Nederland bedroeg de SO_2 -emissie in 1946 ca. 200.000 ton per jaar, in 1956 400.000-500.000 ton, in 1967 ca. 1.000.000 ton (2). Dankzij de komst van aardgas (zie fig. 2) is de totale uitworp aan SO_2 sinds 1965 gedaald; maar sedert 1975, nu we verplicht worden op steenkolen over te schakelen, is de concentratie gestegen (zie fig. 3).

De zwavelverbindingen worden op twee manieren uit de atmosfeer verwijderd nl. door:

- droge neerslag, inclusief de absorptie van SO_2 aan deeltjes, die op de aarde terecht komen;
- natte neerslag, waarbij zwavelverbindingen met regen een zure neerslag vormen.

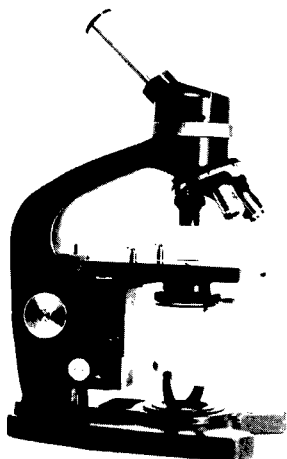
Door oxydatie wordt uit zwaveldioxyde en water zwavelzuur gevormd volgens de volgende chemische reactie:



Een belangrijk deel van de in West-Europa geproduceerde luchtverontreiniging wordt in NO-richting naar Scandinavië getransporteerd. Bij een gemiddelde windsnelheid kunnen afstanden van 1000 km in twee tot vier dagen worden overbrugd (4). Het patroon van de verzuring in Europa in 1966 wordt aangegeven op het kaartje van fig. 4 waarop lijnen van gelijke pH zijn getrokken; Noord- en Midden-Europa zijn zure streken. De Ierse westkust b.v. is een beter oord.

Ecologische effecten

In Europa zijn de meest dramatische effecten van de verzuring van de regen waarneembaar in Zweden en Noorwegen. Dit wordt veroorzaakt door de omstandigheid, dat de oppervlaktewateren in die gebieden zich bevinden in rotsachtige gebieden bestaande uit graniet met een grote weerstand tegen chemische verwerking. Hierop bevindt zich een dunne glaciale afzetting van overeenkomstige minerale samenstelling die arm is aan calcium (Ca) en magnesium (Mg) mineralen. Dit heeft tot gevolg dat de wateren een lage concentratie van de belangrijkste ionen en derhalve een zeer geringe buffercapaciteit hebben. We zullen enkele effecten van de verzuring van het oppervlaktewater op de daarin levende organismen nagaan.



euromex
microscopen

- * hoge optische kwaliteit
- * relatief zeer lage prijs
- * levenslange garantie

GRATIS CATALOGUS OP
AANVRAGE

EUROMEX B.V.

Utrechtseweg 250
Postbus 736
6800 AS ARNHEM tel. 085-42 12 51

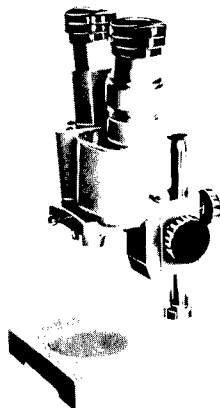




Fig. 5a. Grootte der epifytenwoestijnen omstreeks 1950.

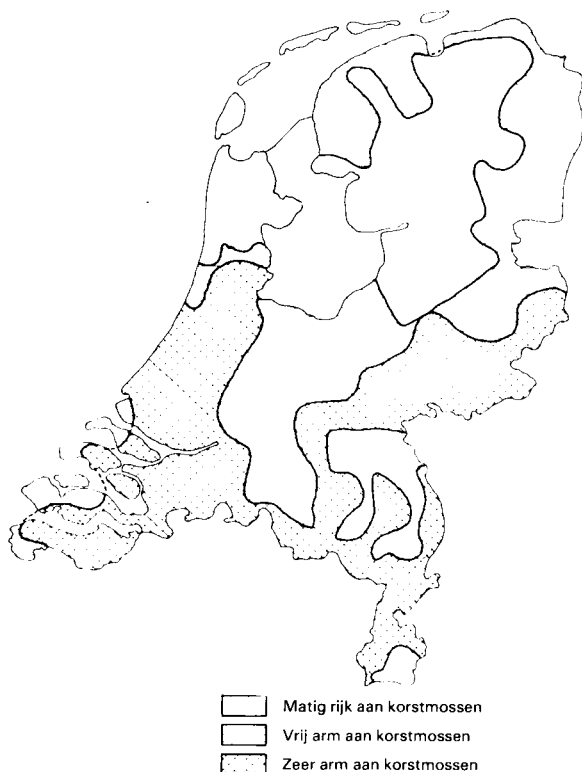


Fig. 5b. Grootte van de epifytenwoestijnen omstreeks 1974.

Zoetwaterorganismen

Primaire producenten

De primaire produktie, dat is de synthese van levend materiaal uit anorganische elementen, wordt in zoet water uitgevoerd door macrofyten, fytoplankton (waartoe algen behoren) benthische en epifytische algen en mossen. Gebleken is, dat het aantal soorten fytoplankton afneemt bij dalende pH.

Perifytische diatomeeën worden eveneens door zure neerslag beïnvloed. Uit onderzoek in Noorse meren bleek, dat er verschuiving plaats vindt in de soorten-samenstelling van diatomeeën naar meer zuur-tolerante soorten. Gebleken is voorts, dat de ontwikkeling van *Lobelia* gehinderd wordt door lage pH. Nu is bekend, dat aan de wortels van aquatische macrofyten zuurstof uittreedt en in het omringende sediment terechtkomt. Achteruitgang van de *Lobelia* betekent dus dat er voor de afbrekers van organisch materiaal minder zuurstof beschikbaar komt (6).

Afbraakprocessen

In kleine oligotrofe meren en in waterlopen is allichtoon organisch afval, zoals bladeren, twijgen, een belangrijke bron van energie voor benthische invertebraten. Dit bodemsediment wordt afgebroken door de gecombineerde werking van microbiologische processen en bodemgrazers. De toenemende accumulatie van organisch bodemsediment in sommige verzuurde meren, wijst er op dat de afbraakprocessen in zuur water worden vertraagd.

Voorts bleek, dat met dalende pH het aantal ciliaten afnam en de afbraak en nitrificatie werd gereduceerd bij een pH kleiner dan 5. Bij een pH van 4 en lager nam het aantal fungi toe. Ook laboratoriumproeven bevestigden dat een lage pH leidt tot verschuiving in de dominantie van organismen van bacteriën naar fungi. De snelheid waarmee berkenblad wordt afgebroken is bij drie verschillende pH-niveaus bestudeerd. Hierbij bleek, dat het gewichtsverlies van dit blad in zure beken minder was dan in water met een hogere pH. Ook hieruit worden sterke aanwijzingen gevonden, dat de microbiologische afbraak in zure beken is gereduceerd (6).

Ongewervelden

Uit onderzoekingen in Engeland, Zweden en Canada is gebleken dat verzuring van zoet water invloed heeft op invertebraten. Bij een onderzoek in 832 meren in Noorwegen, werd geconstateerd dat bij een pH kleiner dan 5,2 geen slakken werden aangetroffen. Ook crustaceeën hebben te

lijden van verzuurde meren. Het belangrijke visvoedsel, *Gammarus lacustris*, werd in Noorse meren met een pH lager dan 6 niet gevonden; oligochaeten waren zeldzaam in zure meren. In de onderzochte zure meren was geen vis, derhalve ontbraken daarmee de predatoren voor de bodemfauna. Dat deze fauna toch sterk is achteruitgegaan accentueert het effect van de lage pH (6).

Vissen

De invloed van de daling van de pH wordt duidelijk gedemonstreerd door het feit, dat van de 266 eens visrijke meren in Zuid-Noorwegen er in 1975, 175 geen vis meer bevatten. In Zweden spreekt men van de 'regen des doods'. Veel meren zijn al dood en duizenden zijn 'stervende' aldus een folder van de Zweedse Vereniging voor Natuurbeheer. In 'Vier stappen naar de dood van een meer', aldus nogmaals de folder, wordt aangegeven hoe de samenhang tussen de daling van de pH van 7 naar 4 en het visleven is. Bij een pH = 5 zijn de meeste vissoorten verdwenen. Alleen baars, snoek en aal blijven over maar slechts een deel van hun broed komt uit. Daalt de pH tot 4 dan blijft slechts de paling over. Dieren die vis eten zoals otter en visarend, zijn eveneens verdwenen.

Er is verschil in tolerantie: in volgorde van gevoeligheid voor de pH: regenboogforel, zalm, bruine

forel en beekforel. Verder blijkt, dat oudere vissen een betere overlevingskans hebben dan jonge. Lage pH-waarden leiden tot het falen van de lichaamszoutregeling (6). Alle zoutwatervissen hebben hogere zoutconcentraties in hun weefsels dan het water dat hen omringt. Dit leidt tot een opname van water d.m.v. osmose. Uitscheidingsorganen zoals de nier van een vis, scheiden het surplus aan water uit, maar dit heeft onvermijdelijk zoutverliezen tot gevolg. Dit verlies moet worden opgevangen door de opname van zout uit de zeer verdunde zoutoplossing in zoet water. Is het water te zuur, d.w.z. bevat het te veel H^+ -ionen, dan wordt de opname van zouten daardoor geremd. Verder worden in zuur water de viseieren en de jonge vissen aangetast.

Nederland

De vraag is natuurlijk, wat de invloed van de zure neerslag op de aquatische ecosystemen in Nederland is. Bepalend hierbij is, dat de geologische situatie totaal anders is dan in Scandinavië. Nederlandse wateren zijn van nature rijk aan kalk, hebben dus een grote buffercapaciteit. Anders is het met een klein aantal nog niet verstoorde vennen, die van nature matig zuur en kalkarm zijn. Zo is de pH van de Oisterwijkse vennen sinds 1920 gedaald van 6 naar ca. 3,5 à 4 (7).

Ven in kroondomein Veluwe bij Hoog Soeren.



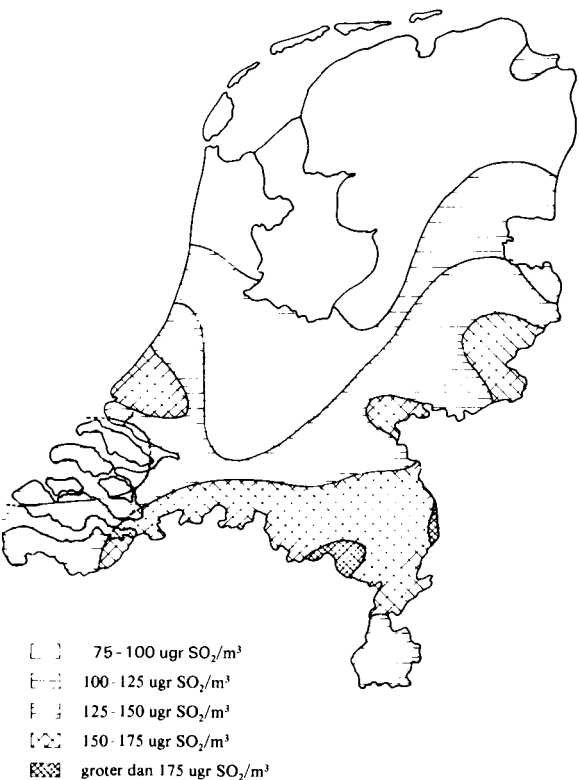


Fig. 6. Meetresultaten van het nationale meetnet voor de luchtverontreiniging. Percentiel-waarden SO_2 : 98 percentiel, 1975-1976.

In het Witven is het aantal soorten diatomeeën van 1920 tot 1975 afgenomen van 29 tot 18. In het Schaapsven te Berkel-Enschot is door verzuring het aantal soorten diatomeeën verminderd van 10 in 1920 tot 3 in 1975 (7).

Duidelijk is de verschuiving in de soorten bryofyten of mosplanten. In het Fazantenbos bij De Steeg (Gelderland) onderzochten Hovenkamp en van Schaik de bryofytenvegetatie op de stammen van de es (4). Vergelijking van de resultaten met die van onderzoeken van de laatste 25 jaren toonden een duidelijke toename van zuurminnende mossen, de acidofyten en een afname van de neutrofyten en alkalifyten. Bekend is de toename van de grootte der epifytenwoestijnen sinds 1950 (fig. 5).

De relatie met luchtverontreiniging door SO_2 wordt duidelijk uit vergelijking met fig. 6 waarop de meetresultaten van het nationale meetnet voor de luchtverontreiniging zijn aangegeven. In het noordelijk deel van Nederland waar nog sprake is van matige rijkdom aan korstmossen bedroeg het 98 percentiel van de SO_2 – dat is de waarde die in 98% van de waarnemingen niet of juist wordt bereikt – 75-100 $\mu\text{gr SO}_2/\text{m}^3$ (8).

Voor de bescherming van de korstmossen zou de SO_2 -concentratie lager dan 30 $\mu\text{gr}/\text{m}^3$ moeten zijn. Of korstmossen nu worden aangetast door SO_2 in de lucht of ook of misschien wel uitsluitend door zure regen, die een gevolg is van de hoge SO_2 -concentraties, is nog niet duidelijk (9).

Wat te doen?

Luchtverontreiniging door zwaveldioxyde heeft ernstige gevolgen voor het milieu. Zwavelemissies in het Rijnmondegebied, Ruhrgebied, industriegebieden van Midden-Engeland leiden tot verzuring van regen en daardoor ontstellende aantasting van het aquatisch milieu in Scandinavië, waar, samenhangend met geologische factoren, de opvangcapaciteit voor zure regen gering is. Maar ook in Nederland, dat in het algemeen meer bufferend vermogen heeft in bodem- en oppervlaktewater zijn effecten van zure regen aangetoond, zoals wijziging in biocoenose van vennen, verdwijnen van korstmossen en de verschuiving in vegetatiesoorten.

Hoewel erg laat gestart, wordt nu intensief gezocht naar technieken die ten doel hebben de uitworp van SO_2 te verminderen, zoals ontzwaveling van olie, andere verbrandingstechnieken (wervelbedovens en vergassing van kolen), rookgasreiniging e.d. Van groot belang is in hoeverre wij bereid zijn te bezuinigen op aardgasverbruik, zodat we er langer mee kunnen doen en daardoor meer tijd hebben de hiervoor genoemde technieken praktisch uitvoerbaar te maken. Zijn we ook bereid een geringere economische groei te accepteren?

De bekende vraag: 'Wat is de natuur ons waard?' wordt dan wederom indringend gesteld. 'Wat kunnen we doen?' zo luidt ook de vraag in de eerdergenoemde folders van de Zweedse Vereniging voor Natuurbescherming.

Het antwoord dat zij geven luidt: 'Help ons de kennis over de oorzaken van de verzuring van de regen te verspreiden. Vertel uw vrienden wat u weet. Treed in contact met de massamedia, de overheid en de politici in uw land. Wij moeten allen helpen. Veel succes.'

Dat dit artikel daartoe een bijdrage moge leveren.

Adres van de schrijver:

VERKLARING VAN GEBRUIKTE TERMEN

allochtoon: op een andere plaats ontstaan

benthische: op de bodem levend

biocoenose: levensgemeenschap

bryofyten: mosplanten

ciliaten: trilhaardiertjes

crustaceeën: kreeftachtigen

diatomeeën: microscopische, eencellige waterplanten
met een uit siliciumverbindingen bestaand uitwendig
skelet

emissie: uitworp, lozing

epifyten: planten groeiend op andere planten

fungi: schimmels

ion: elektrisch geladen atoom of atoomgroep

macrofyten: met blote oog zichtbare planten

oligotroof: met weinig voedingsstoffen en/of weinig
specifieke planktonontwikkeling

oligochaeten: wormen

perifyten: zich op plantenstengels bevindende planten

fytoplankton: passief of vrijwel passief zich in het

water bewegende plantaardige organismen

pleistoceen: aardlaag gevormd in begin van het
kwartaair

SO₂: zwaveldioxyde

Verantwoording der illustraties

Fig. 1: literatuur (6)

Fig. 2: literatuur (2)

Fig. 3: literatuur (2)

Fig. 4: literatuur (4)

Fig. 5: literatuur (8)

Fig. 6: literatuur (8)

GERAADPLEEGDE LITERATUUR

1. ANONYM. 'Carter Presents Second Environmental Message', 'Highlight', Volume 16, no. 10, Okt. 1979.
2. L. GINJAAR, Minister van Volksgezondheid en Milieuhygiëne. SO₂-beleidscodeplan, Tweede Kamer, zitting 1979-1980, 15.384, nrs. 1-2.
3. K. W. H. LEEFLANG. 'De chemische samenstelling van de neerslag in Nederland', Chemisch Weekblad 35 (1938).
4. A. J. VERMEULEN. 'Acid precipitation in the Netherlands' Provincie Noord-Holland, afd. Milieuhygiëne, Haarlem 1979.
5. Report from the International conference on the effects of acid precipitation, Telemark, Norway, juni 1976.
6. FINN. H. BRAEKKE e.a. Impact of acid precipitation on forest and freshwater ecosystems in Norway. Research report 6/76, Oslo, maart 1976.
7. H. VAN DAM. 'Hydrobiologische gevolgen van luchtverontreiniging', Natuur en Milieu 78/7-8.
8. PROVINCIALE WATERSTAAT DRENTE. 'Korstmossen in Drente', Uitg. Prov. Waterstaat Drente, zonder jaartal, ca. 1978.
9. NRC/HANDELSBLAD 30 april 1979. 'Achteruitgang korstmossen kan ook door 'zure regen' komen.' (Interview met dr. A. Messelink-Beltman).



Ook in onze vennen is de verzuring merkbaar. (foto: R. Wellner)

Doe mee



met de K.N.N.V.