



ZURE REGEN. ONZE EIGEN SCHULD. ONZE EIGEN ZORG.

---

# Populair zuur

---

Een korte analyse  
van presentaties  
van het probleem  
van de zure regen  
op internet

---

Ed Buijsman

---



Populair zuur.

Een korte analyse van presentaties van het probleem van de zure regen op internet

LUV0 reeks nummer 5

2010 © Uitgeverij Tinsentiep, Houten

Bij de voorpagina

Een beeld uit de voorlichtingscampagne die de Nederlandse overheid in de jaren tachtig voerde onder de titel 'Gisteren, vandaag, morgen'. De campagne was bedoeld om mensen bewust te maken van het probleem van de zure regen en van hun eigen betrokkenheid bij dat probleem. Bron: VROM (1985)

Eerder zijn in deze reeks verschenen:

1. Er zij een meetnet, 2003.
2. Een ernstig geval van industriële overlast, 2007
3. Een boekje open over fijn stof, 2007
4. Een kleine geschiedenis van het chemische neerslagonderzoek in Nederland, 2008

De Luvo reeks behandelt onderwerpen over luchtverontreiniging in de breedste zin van het woord.

Een kritische blik is het kenmerk van de reeks. Vanzelfsprekendheden zal de lezer hier niet tegenkomen.

'Pollution monitoring is an expensive business and it should not be undertaken lightly. In a world of limited resources, any monitoring programme will probably have taken priority over some other socially useful exercise'. Citaat van D.J. Moore uit 1986. Moore was in leven onder andere editor van het wetenschappelijke tijdschrift Atmospheric Environment.

Uitgeverij Tinsentiep is een niet bestaande uitgeverij die niettemin met uitgaven komt. Tinsentiep is in 2001 bedacht om ruimte te geven aan gedachten en uitingen die niet vanzelfsprekend zijn. Tinsentiep beoogt te informeren daar waar dat hoognodig blijkt.

Het logo van Tinsentiep symboliseert de klassieke straatlantaarn die een zacht maar niet opdringerig licht verspreidt, zodat we onze weg kunnen vinden.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

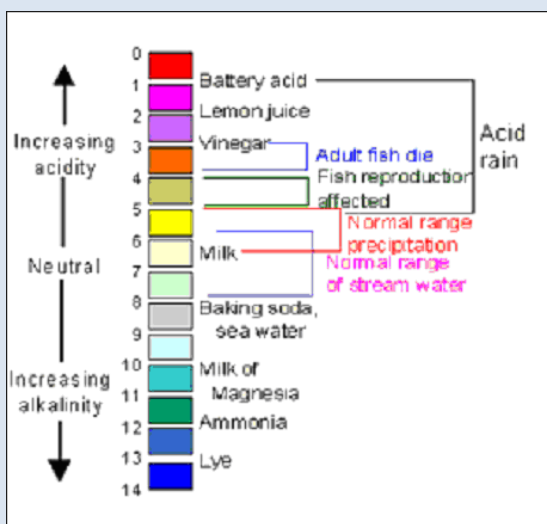
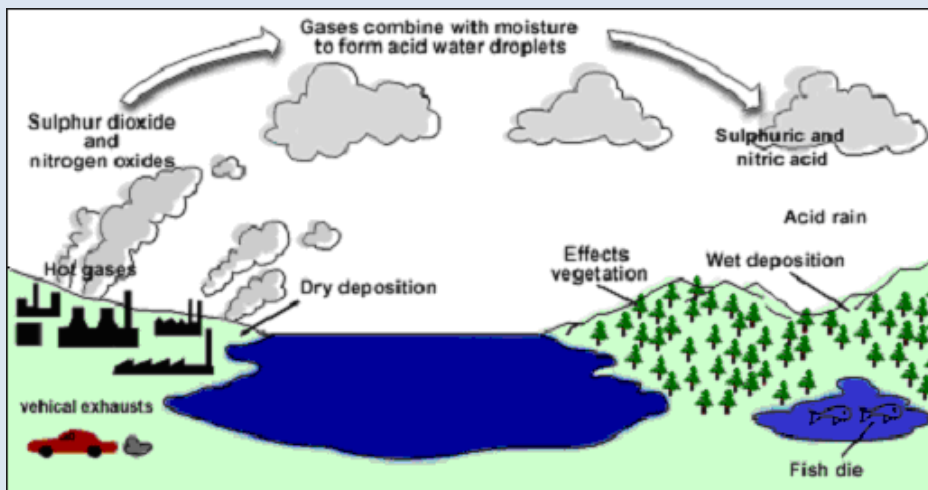
Voor zover het maken van kopieën uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16b Auteurswet 1912j het Besluit van 20 juni 1974, Staatsblad 351, zoals gewijzigd bij Besluit van 23 augustus 1985, Staatsblad 471 en artikel 17 Auteurswet 1912, dient men de daarvoor wettelijk verschuldigde vergoedingen te voldoen aan de Stichting Reprorecht (postbus 882, 1180 AW Amstelveen).

Voor het overnemen van gedeelten uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken dient u zich te richten tot: E. Buijsman, p/a Uitgeverij Tinsentiep, Bovencamp 57, 3992 RX Houten. Uitgeverij Tinsentiep is telefonisch niet bereikbaar.



Europa werd aan het eind van de jaren zeventig opgeschrikt door een ernstig milieuprobleem: de zure regen. Zure regen werd verantwoordelijk gehouden voor onder andere het verdwijnen van vissen in meren in Scandinavië. Later werd gesuggereerd dat de zure regen ook grootschalige bossterfte in Europa zou veroorzaken. De bossen in Nederland zouden eveneens groot gevaar lopen. Iedereen dacht te begrijpen waar het om ging. Immers, 'regen' is water dat uit de atmosfeer valt en 'zuur' daar kon men zich dus wel wat bij voorstellen. Zure regen veroorzaakte in de jaren tachtig veel ophef, maar raakte daarna op de achtergrond. We horen al jaren niet zo veel meer over de zure regen. Er zijn mensen die beweren dat de zure regen een hype was. Daarom zouden we er niets meer over horen (Rozendaal, 2009). Wetenschappers hebben een andere opinie: de zure regen is helemaal niet verdwenen. Er is nog steeds sprake van voortgaande verzuring, zij het dat het tempo is afgenomen. Maar er is nog iets anders: het probleem van de overmatige toevoer van stikstof vanuit de atmosfeer wordt tegenwoordig als ernstiger beschouwd (De Vries, 2007; Buijsman, 2009).

Dit artikel gaat niet over oorzaken en effecten van zure regen, maar over de presentatie van het verschijnsel zure regen op internet. Zure regen dateert al van de jaren zeventig en tachtig van de twintigste eeuw. Zure regen krijgt in de klassieke media tegenwoordig niet veel aandacht meer. Toch heeft zure regen moeiteloos zijn weg naar het internet gevonden. Dit artikel presenteert een korte analyse van de visuele presentaties van het probleem van de zure regen op internet.



Afbeelding 1. Prototypes van illustraties om het probleem van de zure regen uit te leggen. Boven een afbeelding met bronnen van luchtverontreiniging, verzurende componenten, transport van luchtverontreiniging en neerslag. Onder een voorbeeld van de pH-schaal zoals die vaak wordt gebruikt om de ernst van het zuur zijn van de zure regen uit te leggen.

## Hoofdpijnen van presentaties van zure regen

Internet is een medium voor een groot en breed publiek. Publicaties die over zure regen gaan, proberen daarom het probleem van de zure regen op een toegankelijke manier te presenteren. Dit betekent dat een aantal vragen op een basaal niveau moeten worden behandeld, zoals:

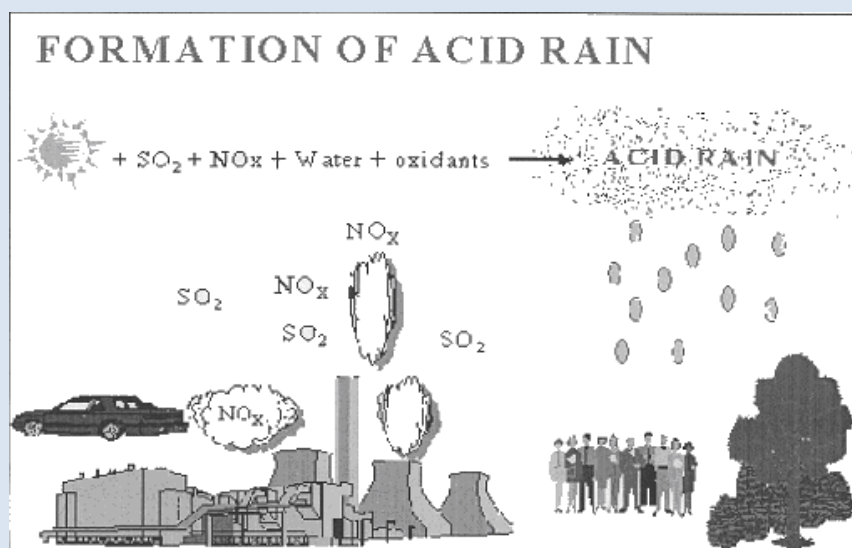
- Wat is zuur?
- Hoe drukken we het 'zuur zijn' uit?
- Welke stoffen spelen een rol bij de zure regen en waar komen ze vandaan?
- Hoe komt het van luchtverontreiniging tot zure regen?
- En op welke geografisch schaal moeten we ons het probleem voorstellen?

Deze ogenschijnlijk eenvoudige vragen leveren bij een begin van de beantwoording meteen al de nodige problemen op. Zo is het onvermijdelijk dat het probleem gekwantificeerd wordt om de ernst ervan te duiden. De introductie van het chemische begrip 'pH' is dan nodig. Daarnaast moet toch ook iets over atmosferisch-chemische processen verteld worden. Een onderdeel daarvan is dat de mensen tot het begrip gebracht moeten worden dat zure regen niet per se nat hoeft te zijn.

De meeste publicaties op internet proberen de hiervoor geformuleerde vragen te behandelen. De verschillende aspecten en de problemen die daarbij opdoemen, zullen in dit artikel successievelijk besproken worden. Speciale aandacht zal worden besteed aan de pogingen om te komen tot een 'vereenvoudigde' voorstelling van zaken. Na alle kritische woorden is het gepast om tot slot nog enige woorden te wijden aan hoe het anders - misschien beter - zou kunnen.

## Gemeenschappelijke kenmerken in de presentatie

De meeste populaire presentaties proberen het verschijnsel van de zure regen in de vorm van een afbeelding en zo eenvoudig mogelijk te presenteren (*afbeelding 1*). Hierin wordt gepoogd om de bronnen van de stoffen die zure regen veroorzaken, weer te geven. Ook de verantwoordelijke stoffen worden genoemd. De stoffen waar het om gaat, reageren in de atmosfeer, ze worden erin getransporteerd en ze worden er vervolgens weer uit verwijderd. Deze afbeelding toont de essentiële elementen: stoffen, bronnen, chemische reacties, atmosferisch transport en verwijdering uit de atmosfeer.



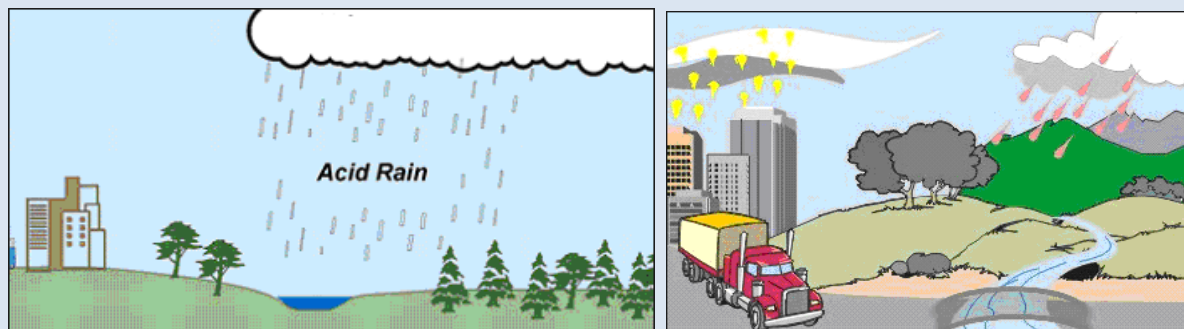
Afbeelding 2. De vorming van zure regen. De afbeelding toont de bronnen (links), noemt de stoffen  $NO_x$ ,  $SO_2$ , er gebeurt iets chemisch in de atmosfeer en het regent. Wat de mensen hier doen - ze worden ook beregend - is niet duidelijk. Een deel van de originele tekst luidt: 'Acid rain can affect lakes, forests, materials such as buildings and cars and human health'. Bron: Health Canada.

Een analyse leert dat veelal nogal losjes met één of meerdere van deze elementen wordt omgesprongen (zie voor een overzicht tabel 1). De meeste presentaties tonen zwaveldioxide (SO<sub>2</sub>) en stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) als de stoffen waar het om gaat. Dat is echter onvolledig, want het weerspiegelt het kennisniveau van 30 jaar geleden. Slechts in 15% van de gevallen wordt ook de derde stof die bijdraagt aan de zure regen, namelijk ammoniak (NH<sub>3</sub>), genoemd. Verkeer wordt in 80% van de gevallen als bron genoemd. Industrie wordt ook in 80% van de gevallen vermeld. Een enkele website laat ons over de bronnen volledig in duister tasten. De verantwoordelijke stoffen bevinden zich hier 'opeens' in de atmosfeer. Er is ook maar één website die – terecht – meldt dat de stoffen die zure regen veroorzaken, ook door natuurlijke processen in de atmosfeer kunnen belanden. Slechts de helft van de websites laat iets zien van chemische omzettingen in de atmosfeer. Naar de afstanden die verzurende stoffen in de atmosfeer afleggen, voordat ze worden verwijderd, moeten we maar gissen. Wel suggereren de meeste afbeeldingen door een duidelijke scheiding van de plaats van de bronnen en de plaats van de zure regen dat er enige afstand is (afbeelding 3). De term zure regen suggereert dat zure regen nat is. Alle presentaties laten dan ook op de een of andere manier zure regen zien. Toch is dit een onvolledige manier van presentatie. Stoffen kunnen ook verwijderd worden door het proces van de droge depositie (waarover straks meer). De helft van de websites maakt melding van dit proces. Een aardig detail is dat de vrijwel alle afbeeldingen 'gelezen' moeten worden van links naar rechts. Dit betekent dat het begin van het proces, de uitstoot, links staat en dat de zure regen uiteindelijk rechts valt.

Tabel 1 Voorkomen van een aantal elementen in presentaties over het proces van de zure regen. Het aantal onderzochte presentaties is 16.

Element	Correct genoemd % van de gevallen
Bronnen, een van de	80
Bronnen, twee	69
Verantwoordelijke stoffen	13 (88 <sup>a</sup> )
Chemische reacties	50
Transport in de atmosfeer	81
Verwijderingsmechanismen	50
Volgtijdelijke richting links <input type="checkbox"/> rechts	94

<sup>a</sup>Tussen haakjes het percentage presentaties dat wel SO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> noemt maar niet NH<sub>3</sub>.



Afbeelding 3. Beeldelementen die afstand tussen de locatie van bronnen van luchtverontreiniging en de plaats waar de zure regen valt, suggereren.

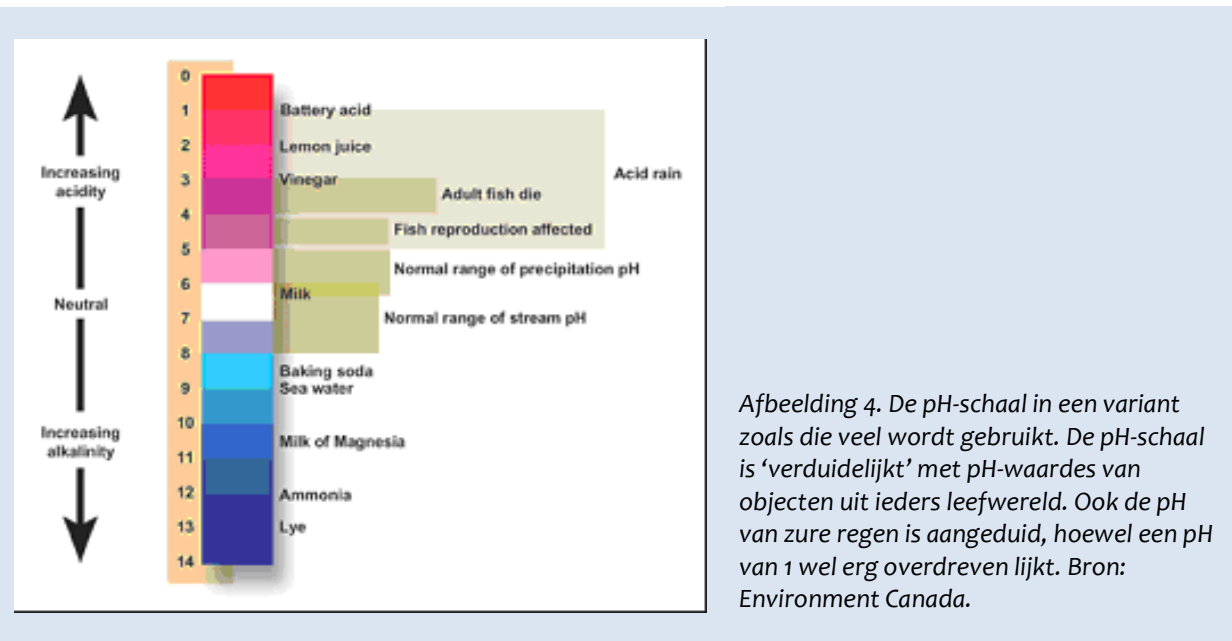
Een ander essentieel element bij bespreking van de zure regen is de zuurgraad van de neerslag. De chemische maat hiervoor is de pH-waarde. De pH-schaal lijkt vooral gevisualiseerd te worden om op eenvoudige wijze de zuurgraad van de zure regen te kunnen vergelijken met huis-tuin-en-keukenmaterialen (afbeelding 4, tabel 2). Een meerderheid kiest bij de presentatie voor een verticale pH-schaal. Een minderheid neemt ook de moeite om in dezelfde pH-schaal aan te geven bij welke pH-waarden van ecosystemen effecten kunnen optreden. Merkwaardig is dat niet iedereen in de pH-schaal ook een

aanwijzing over de zuurgraad van zure regen geeft. Juist de pH-schaal lijkt hiervoor een uitgelezen instrument.

De meeste publicaties geven zwaveldioxide en stikstofoxiden de schuld van de zure regen. Industriële processen en verkeer worden als de belangrijkste boosdoeners gepresenteerd. Deze eenvoudige - maar slechts deels juiste voorstelling van zaken - heeft een groot voordeel. Zwaveldioxide en stikstofoxiden worden in de atmosfeer omgezet in zuren. Deze zuren komen in de neerslag terecht die daardoor zuurder wordt met uiteindelijk zure regen als resultaat. Iedereen doorziet in dit gedachtenschema onmiddellijk dat meer emissie van verzurende stoffen zou moeten leiden tot zuurdere neerslag. De oplossing is ook duidelijk: minder emissie van de verzurende stoffen zwaveldioxide en stikstofoxiden heeft als resultaat dat de neerslag minder zuur zal worden.

### Lastig: een logaritmische grootte met een minteken

Hoe zuur regen is, zal door een chemicus worden aangegeven met de pH-waarde. De grootte pH is echter voor leken lastig te hanteren. In de eerste plaats is het een logaritmische grootte, dus een verandering van de pH met één eenheid betekent een concentratieverandering met een factor tien. En dan is er nog het probleem van het minteken. Een hogere zuurconcentratie betekent een lagere pH-waarde. Of in termen van zure regen: hoe zuurder de regen, hoe lager de pH-waarde. Voor een chemicus is dat allemaal gesneden koek, maar voor wie dit niet gewoon is, blijft het lastig.



Afbeelding 4. De pH-schaal in een variant zoals die veel wordt gebruikt. De pH-schaal is 'verduidelijkt' met pH-waarden van objecten uit ieders leefwereld. Ook de pH van zure regen is aangeduid, hoewel een pH van 1 wel erg overdreven lijkt. Bron: Environment Canada.

Tabel 2 Voorkomen van een aantal elementen in presentaties van de pH-schaal. Het aantal onderzochte presentaties is 12.

Element	Correct genoemd % van de gevallen
pH-schaal van 0 tot en met 14	75
pH-schaal verticaal	58
Aanduiding traject 'zure regen'	83
Vergelijking met huis-tuin-en-keukenmaterialen	100
Effect-pH voor ecosystemen	42

Het is dan ook niet verwonderlijk dat bij populaire artikelen over zure regen al snel naar illustratiemateriaal wordt gegrepen om de relatie tussen zuurgraad, pH en zure regen toe te lichten. Bovendien wordt dan meestal de kans aangegrepen om de zure regen in een context te plaatsen. Dat wil zeggen dat de zuurgraad van zure regen *geplaatst wordt naast de zuurgraad van voor leken herkenbare huis-tuin-en-keukenproducten (afbeelding 5)*.<sup>1</sup> Het was lange tijd gebruikelijk om ook nog extrema in de zuurgraad van de neerslag te vermelden, zodat de lezer zich een goed beeld van de ernst van de situatie kon vormen. Toppunt was vaak de vermelding van een regenbui met een pH-waarde van 2,4, die in april 1974 in Pitlochry, Schotland, gevallen zou zijn. Verdacht hieraan was steevast dat de verwijzing naar de herkomst van dit gegeven altijd ontbrak.<sup>2</sup>

En dan is er nog een praktisch punt: hoe plaatsen we de pH-schaal? Van links (lage pH) naar rechts (hoge pH) of andersom? Van boven (lage pH) naar beneden (hoge pH) of andersom? Het meest voorkomend is die van lage pH boven naar hoge pH beneden. In dit opzicht is afbeelding 3 dus atypisch. Interessant is ook om te zien welk traject de 'zure regen' omvat. Afbeelding 3 suggereert dat het om een traject van 2 tot 5 gaat. Anderen houden het op 3 tot 5, maar 1 tot 5 komt ook voor. Blijkbaar is er geen eensluidende opinie. Bovendien is in de afbeeldingen vrijwel nooit duidelijk om welke tijdschaal het gaat. Hebben de opmerkingen over de pH van zure regen betrekking op jaargemiddeldes of doelt men op andere tijdschalen? Of presenteert men gegevens in een figuur met een verschillende tijdsbasis? Het laatste is zeer wel denkbaar, omdat zoiets als neerslag met een jaargemiddelde pH van 4,0 wel goed voorstelbaar is, maar met een pH van 3,0 - laat staan 2,0 - daarentegen in het geheel niet.

Veel presentaties tonen een pH-schaal die loopt van 0 tot 14 (zie ook tabel 3). Begeleidende teksten stellen vaak zelfs dat de pH-schaal gedefinieerd is van 0 tot 14. Nu is de pH gedefinieerd als de negatieve logaritme van de H<sup>+</sup>-ionenconcentratie of in formule  $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$ . De definitie rept niet van een minimum of een maximum. De pH kan dus onder de 0 of boven de 14 liggen. Het zou daarom beter zijn om een schaal te presenteren die ergens boven 0, bijvoorbeeld bij 2, begint en die onder 14, bijvoorbeeld bij 12, eindigt.

### Niet-zure regen?

De ontdekking van de zure regen leidde al snel tot de vraag naar een referentiepunt. Dat wil zeggen: wat zou de pH van natuurlijke, niet-verontreinigde neerslag zijn? Het antwoord dat altijd gegeven wordt, is: 5,6.<sup>3</sup> De waarde van 5,6 is gebaseerd op de redenering dat natuurlijke neerslag een beetje zuur moet zijn door uit de lucht afkomstig opgelost kooldioxide (CO<sub>2</sub>) dat licht zure eigenschappen heeft.<sup>4</sup> In de jaren zestig was echter al beredeneerd dat de pH-waarde van natuurlijk regenwater binnen een groot traject kon vallen (Junge, 1963), omdat in de atmosfeer van nature ook kleine (en wisselende) hoeveelheden ammoniak en zwaveldioxide kunnen voorkomen. Ook deze stoffen hebben, net zoals kooldioxide, invloed op de pH-waarde van regenwater. Andere onderzoekers deden de rekensom twintig jaar daarna nog eens over. Zij berekenden dat de pH-waarde van natuurlijke neerslag, afhankelijk van de omstandigheden, ergens in het pH-traject 4-8 kon liggen (Charlson & Rodhe, 1982).

Hiermee was dus (opnieuw) aangetoond dat er zoiets als een exacte referentiewaarde van 5,6 voor de zuurgraad van natuurlijke neerslag eigenlijk niet bestond. De conclusie moest daarom ook zijn dat een lage pH-waarde van de neerslag niet noodzakelijkerwijs hoeft te wijzen op invloeden van menselijk handelen. Anderzijds kan neerslag die op basis van de pH-waarde, als niet zuur bestempeld wordt, wel degelijk zure regen zijn. Dit alles betekent dan ook dat alleen een beschouwing van de pH van de neerslag nooit een afdoend antwoord kan geven op de vraag of er antropogene invloeden aanwezig zijn. Er zal dus altijd aanvullende informatie, bijvoorbeeld in de vorm van concentraties van opgeloste stoffen in de neerslag moeten zijn om een onderbouwde uitspraak over de kwaliteit van de neerslag en over de al of niet verzurende werking ervan te kunnen doen.

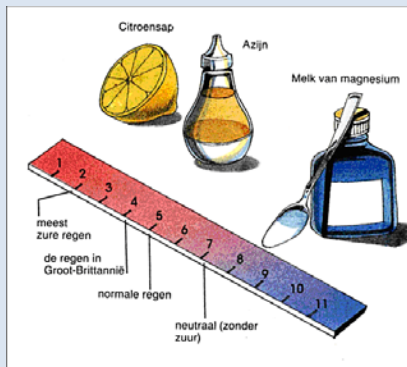
---

<sup>1</sup> Hoewel? Weet iedereen wel wat 'melk van magnesium' is?

<sup>2</sup> Ook nu is nog steeds niet duidelijk wie dit gegeven dit wereld in heeft geholpen en onder welke omstandigheden deze neerslag zou zijn gevallen.

<sup>3</sup> Dit is overigens niet voorbehouden aan hen die wetenschap proberen te populariseren. Ook wetenschappers vervallen veelal in deze fout.

<sup>4</sup>  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ . Met een  $K_2$ -waarde van  $4,4 \cdot 10^{-7}$ , een atmosferische CO<sub>2</sub>-concentratie van 383 ppm (waarde in 2007) en een Henryconstante van 0,8317 ( $c_{\text{aq}}/c_{\text{gas}}$ ) levert dit na enig rekenwerk een pH-waarde van 5,62.



Afbeelding 5. Uitleg van de pH-schaal met aansprekende voorbeelden. Toevoegingen als 'meest zure regen', 'de zuurste regen ooit waargenomen' en dergelijke waren zeer gebruikelijk. Bron: Bright, 1991.

### De oorsprong van de term 'zure regen'

De Engelsman Robert Angus Smith wordt meestal als de uitvinder van het begrip 'zure regen' opgevoerd onder verwijzing naar zijn publicatie *Air and rain* uit 1872 (Smith, 1872). Daar is echter wel het een en ander op af te dingen. In de eerste plaats bestond het fenomeen zure regen toen nog niet in de betekenis die het later zou krijgen. De constatering van Smith waren zuiver chemisch van aard; de regen is soms zuur. Hij stelde verder vast dat er soms meer zwaveldioxide dan ammoniak in de atmosfeer zat. Zwaveldioxide in neerslag kan worden teruggevonden als zwavelzuur, maar ammoniak neutraliseert het zuur. Is er te weinig ammoniak dan blijft er zuur over. Smith merkte dan ook op: 'I do not mean to say that all the rain is acid; it is often found with so much ammonia in it as to overcome the acidity; but in general, I think, the acid prevails in the town.'<sup>5</sup> Dit was overigens een uitspraak die hij 20 jaar eerder al had gedaan (Smith, 1852). En nog eerder meldde Smith op basis van onderzoek in grote steden dat 'the water is often alkaline' en 'the air is often acid' (Smith, 1847).

Het waren echter de Duitser Lampadius en de Fransman Ducros die al eerder dan Smith hadden gewezen op de verzuring van de neerslag. Lampadius had zure regen vastgesteld in de nabijheid van metallurgische bedrijven in het Ertsgebergte (Lampadius, 1834). De verzuring van de neerslag schreef Lampadius toe aan de invloed van luchtverontreiniging en dan vooral aan die van zwaveldioxide (SO<sub>2</sub>). Ducros was de eerste die de term 'pluie acide' gebruikte (Ducros, 1845) en dat was dus nog voordat Smith met de uitdrukking 'acid rain' kwam.

Het begin van de hernieuwde (wetenschappelijke) aandacht voor het fenomeen van de zure regen lag in de jaren zestig en zeventig van de twintigste eeuw. De Zweedse onderzoeker Svante Odèn was de eerste die het publiek en de wetenschappelijke gemeenschap alarmeerde over de gevolgen van grootschalige grensoverschrijdende luchtverontreiniging en de daarmee samenhangende verzuring van de neerslag (Odèn, 1967, 1968). Halverwege de zeventiger jaren kwam na uitgebreid onderzoek op Europese schaal vast te staan dat verzuring van oppervlaktewateren in Zweden en Noorwegen de oorzaak was van vissterfte. Onderzoekers hielden de zure regen daarvoor verantwoordelijk. Bovendien kon de zure regen in Scandinavië herleid worden tot emissies van verzurende stoffen in noordwest Europa (Odèn, 1976; Brække, 1976; Overrein, 1976; zie ook afbeelding 6).

Zure regen zou zich vervolgens in de jaren tachtig van de twintigste eeuw tot het grootste milieuprobleem ontwikkelen. Zure regen werd destijds verantwoordelijk gehouden voor de grootschalige aantasting van bossen in Europa. Ook in Nederland bestond de vrees dat de gezondheid van de bossen ernstig in gevaar was.

### Hoe zure regen ontstaat

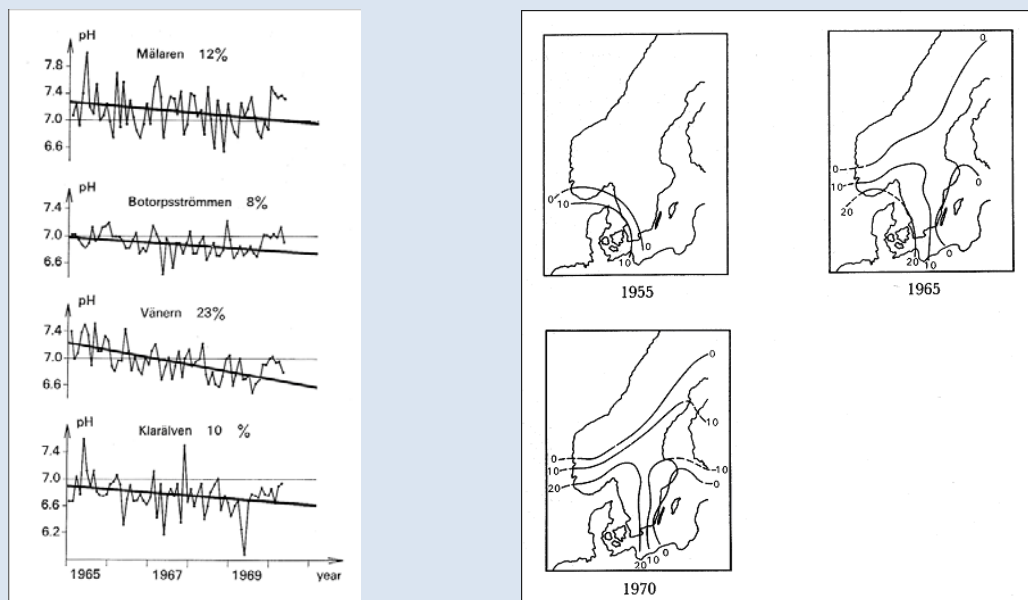
<sup>5</sup> Smith (1872), pp. 227.



Zure regen ontstaat door de wisselwerking van drie stoffen in de atmosfeer: ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), stikstofoxiden ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ) en zwaveldioxide ( $\text{SO}_2$ ). Deze stoffen worden grotendeels in de atmosfeer gebracht door menselijk handelen. Ammoniak komt vooral vrij bij de ontleding van dierlijke mest. Stikstofoxiden ontstaan bij alle verbrandingsprocessen. Zo is bijvoorbeeld het verkeer een belangrijke bron van stikstofoxiden. Zwaveldioxide ontstaat bij de verbranding van zwavelhoudende fossiele brandstof. Kolen- en oliegestookte elektriciteitscentrales vormden vroeger een belangrijke bron van zwaveldioxide. Voor Nederland was de situatie in 2005 als volgt (MNC, 2007): 1) 90% van de ammoniakemissie kwam uit de landbouw; 2) 62% van de emissie van stikstofoxiden kon worden toegeschreven aan verkeer en vervoer; 3) 88% van de emissie van zwaveldioxide was afkomstig van de industrie.

Zure regen is het gevolg van een aantal chemische reacties in de atmosfeer van de stoffen ammoniak, stikstofoxiden en zwaveldioxide. Kort gezegd komt het erop neer dat stikstofoxiden in de lucht via een aantal reacties kunnen worden omgezet in salpeterzuur ( $\text{HNO}_3$ ) en zwaveldioxide in zwavelzuur ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). De ontstane zuren reageren op hun beurt in de atmosfeer met ammoniak. Ammoniak werkt daarbij zuurneutraliserend. In hoeverre na de reacties uiteindelijk zuur overblijft of niet, wordt bepaald door de concentraties van de aan de reacties deelnemende stoffen. Neerslag wast de stoffen uit de lucht en transporteert ze naar het aardoppervlak. Als er verhoudingsgewijs weinig ammoniak in de lucht voorkomt, maar wel veel zwaveldioxide en/of stikstofoxiden, dan zal de neerslag zuur zijn. Dit was het geval in Europa rond 1980. Daarna zijn vooral de emissies van zwaveldioxide sterk teruggedrongen. Het 'aanbod' van (zwavel)zuur in de atmosfeer is daardoor ook sterk afgenomen. Bijgevolg is de neerslag dan ook minder zuur geworden.

Nu is dit een sterk vereenvoudigde weergave van de werkelijkheid. Zo nemen bijvoorbeeld omzettingen in de atmosfeer enige tijd in beslag; bovendien gaan niet alle omzettingen even snel. Dit leidt ertoe dat de zure bestanddelen op een andere plaats - en soms op afstanden van duizenden kilometers - neerkomen dan waar de stoffen oorspronkelijk in de atmosfeer zijn gebracht. Dit heeft mede bijgedragen aan de geografische uitgestrektheid van het verschijnsel zure regen.

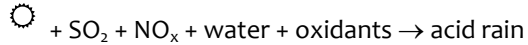


Afbeelding 6. Een tweetal afbeeldingen uit de Zweedse publicatie 'Air pollution across national boundaries : the impact on the environment of sulfur in air and precipitation; Sweden's case study for the United Nations conference on the human environment. Sulfur in air and precipitation' (Bolin, 1971) Hiermee werd de verzuring in de Zweedse meren in brede kring bekend.

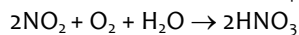
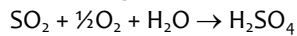
Links Ontwikkeling van de zuurgraad (pH) van een aantal meren in het zuiden van Zweden. De boodschap is duidelijk: de Zweedse meren verzuren. Rechts Depositie van zuur in neerslag (in  $\text{mg H}^+/\text{m}^2$ ), 1955-1970 (Bolin, 1971). Het zuurfront, zoals het vaak werd genoemd, breidt zich steeds verder over Scandinavië uit.

## De chemie van zure regen

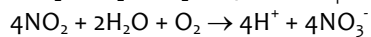
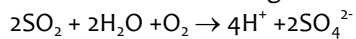
Zijn eenmaal de voor zure regen verantwoordelijke stoffen genoemd dan zal ook 'even' uitgelegd moeten worden hoe het dan tot zuren komt. De atmosferisch-chemische processen die tot de vorming van de zuren zwavelzuur ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) en salpeterzuur ( $\text{HNO}_3$ ) leiden, zijn binnen de atmosferisch-chemische context niet bijzonder ingewikkeld. Het vervelende is echter dat er componenten verschijnen, waaronder het hydroxylradicaal ( $\text{OH}\cdot$ ), die buiten de reguliere middelbareschoolscheikunde vallen. Gevolg: niemand waagt zich eraan en velen nemen noodgedwongen zijn toevlucht tot schematische of exotische reacties, zoals:



Ook aardig is:

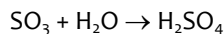
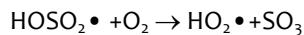
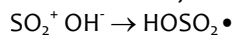


Het door velen serieus genomen (Nederlandstalige) Wikipedia <sup>6</sup> wil ons het volgende doen geloven:

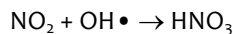


Sommigen zwijgen over de reacties en vermelden slechts beginproducten ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) en eindproducten ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ). Soms ook verschijnen stoffen die met de chemie van zure regen niet veel of zelfs helemaal niets van doen hebben. Zo troffen we - zonder verdere uitleg - aan: 'particulates', kwik (Hg), 'hydrocarbons' en VOC.

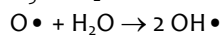
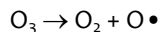
Voor de duidelijkheid volgen hier de juiste reacties zijn, in enigszins vereenvoudigde vorm:



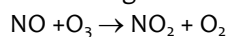
en



waarbij de benodigde hydroxylradicalen ( $\text{OH}\cdot$ ) komen uit:



Wie nu nog NO uit stikstofoxiden mist:



Gevolgd door de reactie van  $\text{NO}_2$  hierboven.

## Zure regen is niet alleen nat

Aanvankelijk was zure regen synoniem met zure neerslag. Maar in de jaren zeventig bleek er ook een bijdrage van zoiets als droge neerslag of, in meer wetenschappelijk termen, droge depositie te zijn. Stoffen in de lucht kunnen zich namelijk ook direct op bodem en water afzetten. Dezelfde stoffen die de regen zuur maken, kunnen daardoor ook op directe wijze bijdragen aan het milieuprobleem dat eerst alleen aan de regen was toegeschreven. Het bleek zelfs zo te zijn dat in onze streken, dat is noordwest Europa, van de flux van verzurende stoffen veel meer aan deze droge depositie kon worden toegekend dan aan de natte depositie. Het betekent dus dat niet alleen naar de ontwikkeling in de verontreiniging van de regen gekeken moest worden. Ook de ontwikkeling in de verontreiniging van de lucht - die samenhang met de omvang van de droge depositie - moet dus bekeken worden. Alhoewel het al in de jaren tachtig duidelijk was dat het om natte én droge neerslag ging, bleef (en blijft) ontbrekend in veel presentaties de aandacht alleen op regen gericht. In Nederland bijvoorbeeld bleef het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke

---

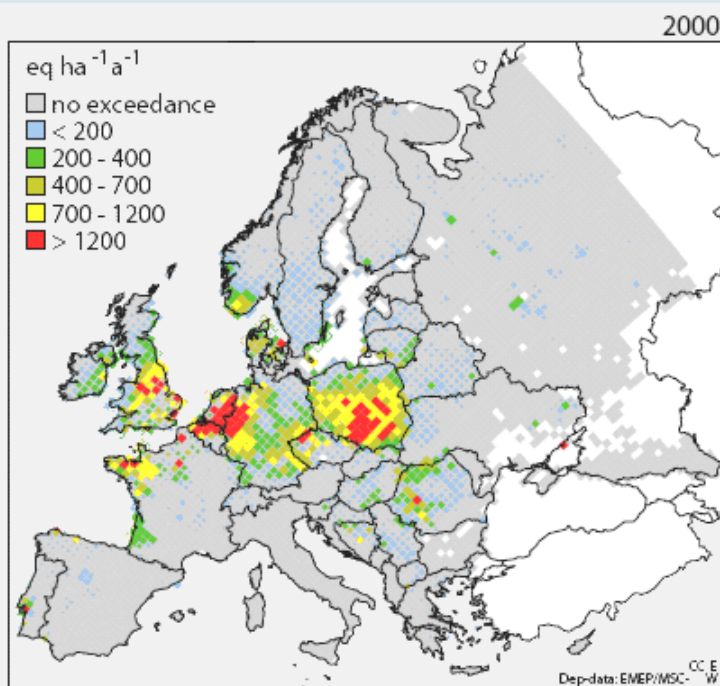
<sup>6</sup> De Engelstalige Wikipedia geeft wel de juiste reacties. De Duitse Wikipedia maakt er echter ook een potje van met:  $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{SO}_3$  gevolgd door - het correcte -  $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$ . En ook  $2\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HNO}_2 + \text{HNO}_3$  en  $\text{N}_2\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HNO}_2 + \text{HNO}_3$ .

Ordering en Milieubeheer in de jaren tachtig van de vorige eeuw in zijn voorlichting stelselmatig over 'zure regen' praten. De enige reden hiervoor was dat mensen dan 'begrepen waar het om ging', zo luidde de uitleg. Dat is wel merkwaardig, want in publicaties van datzelfde ministerie gebruikte men wel al de juiste terminologie (VROM, 1985).

Nu is een nuancering wel op zijn plaats. Zure regen is op te vatten als de som van de natte én droge depositie van zure – of beter verzurende – stoffen. De verhouding tussen de natte en de droge depositie is echter niet constant. De verhouding hangt onder andere af van de afstand tot brongebieden. Vlakbij bronnen is er verhoudingsgewijs meer droge depositie; op grotere afstanden is er verhoudingsgewijs meer depositie in de vorm van natte depositie. In absolute termen is de totale depositie in de nabijheid van bronnen groter dan ver weg van bronnen. Dit verklaart ook grotendeels het depositiepatroon over een gebied als Europa. De hoogste deposities zijn te vinden in gebieden met veel industrie en verkeer. Hoe verder weg van deze gebieden hoe lager de depositie. Dit alles neemt echter niet weg dat door de transportafstanden van luchtverontreiniging in de atmosfeer ook in gebieden ver weg nog te hoge deposities gevonden kunnen worden. Dit verklaart ook dat in de jaren zestig en zeventig effecten van zure regen in Scandinavië werden gevonden.

En kon in de begintijd van de zure regen - lees: jaren zeventig van de twintigste eeuw - de pH van de neerslag een adequaat hulpmiddel lijken om de ernst van de situatie te duiden, nu is dat eigenlijk onverantwoord. In de eerste plaats is - zoals we nog zullen bespreken - de pH een inadequate maat. In de tweede plaats bestaat zure regen niet alleen uit neerslag en is dus een beoordeling van de ernst van het probleem alleen op basis van neerslageigenschappen niet altijd gepast.

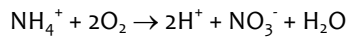
Er heeft zich in de wetenschappelijke en de beleidswereld in de loop van de tijd een ontwikkeling in de terminologie voorgedaan. In plaats van het begrip zure regen uit de begintijd is later het betere begrip zure depositie in zwang gekomen. Immers niet al het zuur bleek in de vorm van neerslag neer te komen. En nog weer later ontstond het begrip verzurende depositie. Nu, omdat depositie niet per se zuur hoeft te zijn om toch verzurend te kunnen werken. Deze verandering in terminologie weerspiegelt tevens een toename in de kennis over de bij verzuring betrokken processen.



Afbeelding 7. Informatie over de hoeveelheid verzurende depositie is tegenwoordig niet meer zo interessant. Het is van meer belang om te weten hoe de depositie vanuit de atmosfeer zich verhoudt tot de hoeveelheden die ecosystemen kunnen verdragen zonder schade te leiden. Hiervoor is het begrip 'critical load' (CL; kritische belasting) geïntroduceerd. De kaart geeft aan in hoeverre critical loads in Europa worden overschreden. Nederland behoort nog steeds tot de probleemgebieden

## Zuur in de lucht en zuur in de bodem

Een verwarrend element in de discussie over zure regen en verzuring blijkt nog steeds de rol van ammoniak. De middelbareschoolscheikunde leert dat ammoniak een base is, dus zuurneutraliserend. Hoe kan ammoniak dan verzurend werken? De verwarring ontstaat, doordat ammoniak zich in de atmosfeer anders gedraagt dan in de bodem. Ammoniak werkt in de atmosfeer zuurneutraliserend en zal de neerslag dus minder zuur maken. In de bodem kan ammoniak – of beter het omzettingsproduct ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) - echter wel degelijk verzurend werken, omdat het omgezet kan worden in salpeterzuur volgens:

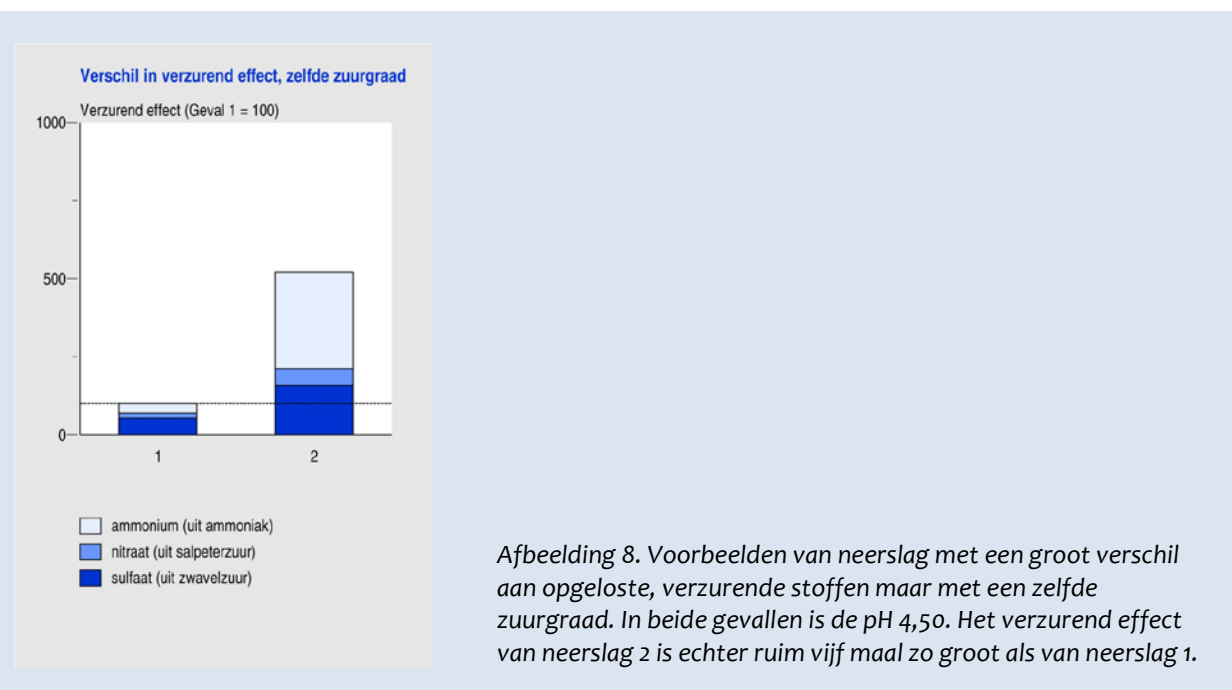


Deze vergelijking leert dat niet alleen het geneutraliseerde zuur (de  $\text{H}^+$  uit  $\text{NH}_4^+$ ) weer vrijkomt, maar dat er ook nog extra zuur ( $\text{H}^+$ ) wordt gevormd. Dit alles tot de constatering dat neerslag die veel ammonium bevat, waarschijnlijk niet zo zuur zal zijn. Immers een deel van het zuur is geneutraliseerd en dat leidt tot een hogere pH. Vervolgens is de ogenschijnlijke verwarrende constatering dat deze niet zo zure regen juist in de bodem veel verzuring kan veroorzaken, omdat deze veel verzurende stoffen, waaronder ammonium, bevat. Dit is overigens een situatie die zich juist in Nederland voordoet.

## De pH is een slechte indicator voor zure regen en voor de verzurende werking

In het voorgaande is al besproken dat de term zure regen al lang niet meer de lading dekt. Het gaat om meer dan nat en zuur. Bovendien is de pH van neerslag sowieso een slechte indicator voor zure regen. Dit blijkt uit twee voorbeelden van neerslag met een groot verschil aan opgeloste, verzurende stoffen maar met een zelfde zuurgraad (afbeelding 5). Geval 1 is regenwater met weinig opgeloste stoffen. Geval 2 is regenwater met veel opgeloste stoffen. De totale hoeveelheden verzurende stoffen, die iets zeggen over het verzurend effect, komen overeen met de totale hoogte van de kolom. Deze loopt in deze twee gevallen sterk uiteen.

De zuurgraad van de neerslag is het resultaat van de bijdragen van de zuren zwavelzuur ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) en salpeterzuur ( $\text{HNO}_3$ ) en van het zuurneutraliserende ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). De zuurgraad kan dan bij benadering berekend worden uit: hoeveelheid zuur = 2 x sulfaat + nitraat - ammonium. De 2 bij sulfaat is om er rekening te houden dat zwavelzuur (dat het sulfaat levert) per eenheid tweemaal zoveel zuur levert als salpeterzuur (dat het nitraat levert). In beide voorbeelden is de zuurgraad hetzelfde. De zuurgraad van de neerslag zegt dus niet veel over het verzurend effect.



## Het langeafstandstransport

Onderzoek leerde al in de jaren zeventig dat luchtverontreiniging over grote afstanden verplaatst kon worden. Met 'grote afstanden' wordt hier duizend kilometer of meer bedoeld. Dat lijkt heel wat, maar een windkracht 4 betekent al een transportafstand van 550 kilometer in een dag. En een harde wind, dat is windkracht 7, is goed voor 1300 km op een dag. Nu kunnen stoffen tijdens transport in de atmosfeer ook verwijderd worden, door neerslag en door droge depositie. Stoffen gedragen zich daarin verschillend. Een maat om het gedrag van stoffen in de atmosfeer te beoordelen is de zogenoemde verblijftijd.

De verblijftijd van zwaveldioxide en van stikstofoxiden is in de orde van een dag. Deze stoffen kunnen dus over grote afstanden verplaatst worden. De verblijftijd van ammoniak is korter en veel ammoniak zal dus op kortere afstanden van brongebieden al weer uit de atmosfeer verwijderd zijn. Dit verklaart waarom verzuring op grote afstand van brongebieden van verzurende stoffen vooral door zwaveldioxide en stikstofoxiden (en hun atmosferische reactieproducten) wordt veroorzaakt. Dichterbij brongebieden is de relatieve bijdrage van ammoniak echter groter; een situatie die zich bijvoorbeeld in Nederland voordoet.

Hiermee kan waarschijnlijk ook verklaard worden waarom in sommige presentaties de rol van ammoniak niet aan de orde komt. Wie zich maar ver genoeg van brongebieden bevindt, zal grotendeels te maken hebben met verzuring door zwaveldioxide en/of stikstofoxiden. Een vereenvoudiging is dan verdedigbaar.

## Maar hoe dan wel?

De meeste presentaties op internet zijn in één of meerdere opzichten onvolledig, slordig of onzorgvuldig. Het gaat om een materie die niet zo zeer ingewikkeld is als wel een die veel aspecten kent. Maar zoals in zo veel gevallen, geldt ook hier: eenvoud loont. Advies daarom: beperk de informatie tot het hoog nodige.

Bronnen: elektriciteitscentrales, industrieën, verkeer, agrarische activiteiten.

Stoffen: ammoniak, stikstofoxiden, zwaveldioxide (geen formules)

Duiding van atmosferisch transport

Droge depositie

Natte depositie

Er dient op de een of andere manier een notie van langeafstandstransport te worden overgebracht. Ingewikkelde toestanden met de bedoeling om atmosferisch-chemische processen uit te leggen, voegen weinig toe. Bovendien zal bij aanwezigheid van ammoniak zuur geneutraliseerd worden. Dus rechttoe rechtaan werkt dan sowieso niet. Iets als een pH kan maar beter niet vermeld worden, omdat verzuring niet alleen door neerslag wordt veroorzaakt. Verder is de pH in lang niet alle gevallen een adequate maat voor het verzurend effect van neerslag. De term 'zure regen' kan overigens maar beter vermeden worden. Hoogstens in een introducerende tekst kan de verbinding tussen verleden (zure regen) en heden (verzurende depositie) gelegd worden. De presentatie van een pH-schaal dient vermeden te worden.

Er zijn situaties denkbaar waar de zaken eenvoudiger liggen. Speelt bijvoorbeeld ammoniak geen rol dan kan volstaan worden met een vereenvoudigde afbeelding. Maar ook dan is gemompel over de pH van neerslag niet op zijn plaats.

## Literatuur

- Bolin, B. (1971) Air pollution across national boundaries : the impact on the environment of sulfur in air and precipitation; Sweden's case study for the United Nations conference on the human environment. Sulfur in air and precipitation. Royal Ministry for Foreign Affairs & Royal Ministry of Agriculture, Stockholm.
- Brække, F. H., ed. (1976) Impact of acid precipitation on forest and freshwater ecosystems in Norway: summary report on the research results from the phase I (1972-2975) of the SNSF-project. Fagrapport 6, SNSF (Sur nedbørs virkning på skog og fisk, Acid precipitation - Effects on forest and fish), Oslo.
- Bright, M. (1991) Zure regen. La Rivière & Voorhoeve, Kampen.
- Buijsman, E. (2009) Gisteren, vandaag, morgen. Een terugblik op het probleem van de zure regen. Studium 4. In druk.
- Charlson, R.J., Rodhe, H., 1982. Factors controlling the acidity of natural rainwater. *Nature* 295, 683-685.
- De Vries, W. (2007) Verzuring: oorzaken, effecten, kritische belastingen en monitoring van de gevolgen van ingezet beleid. In: Leidraad Bodembescherming, deel 5300, Verzuring, pp. 1-80.
- Ducros, M. (1845) Observation d'une pluie acide. *Journal de Pharmacie et de Chimie, Troisième serie, Tome septième*, 273-277.
- Junge, C.E., (1963) Air chemistry and radioactivity. Academic Press, New York.
- Lampadius, W.A. (1834) Ueber die Quellwasser des sächsischen Erzgebirges, so wie über die atmosphärischen Wasser. *Journal für praktische Chemie* 1, 100-111.
- Odén, S. (1967) Stockholm newspaper, Dagens Nyheter, October 24, 1967.
- Odén, S. (1968) Nederbörens och luftens försurning, dess orsaker, förlopp och verkan i olika miljöer. [De verzuring van lucht en neerslag en de gevolgen ervan voor het milieu. Alleen in het Zweeds]. Statens naturvetenskapliga forskningsråd. Bulletin no 1, Ekologikommittén, Stockholm.
- Odén, S. (1976) The acidity problem – an outline of concepts. *Water, Air, and Soil Pollution* 6, 137-166.
- Overrein, L. (1976) A presentation of the Norwegian project 'Acid precipitation – Effects on forests and fish'. *Water, Air, and Soil Pollution* 6, 167-172.
- Rozendaal, S. (2009) Relatie tussen opwarming en luchtvervuiling?  
<http://www.elsevier.nl/web/10220451/Simon-Rozendaal/Relatie-tussen-opwarming-en-luchtvervuiling.htm>. Geraadpleegd op 18 februari 2009.
- Smith, R.A., (1847) Some remarks on the air and water of towns. *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 30, 478-482.
- Smith, R.A., (1852) On the air and rain of Manchester. *Memoirs of the Manchester Literary and Philosophical Society* 10, 207-217.
- Smith, R.A., (1872) Air and rain. The beginnings of a chemical climatology. London, Longmans Green and Co.
- VROM (1985) Zure regen. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Den Haag.
- VROM (1994) Zure regen. Oorzaken en oplossingen. Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Den Haag.