

DEEL VIER

Gedachten over opwarming

17 Wat is watt?

De verstoring van de energiebalans van de aarde

Jim Hansen kent de atmosfeer van haver tot gort. Hij begon zijn loopbaan als atmosferisch fysicus, hij studeerde bij James van Allen, naar wie de Van Allen-gordels in de hogere atmosfeer zijn genoemd. Hij publiceerde eerst artikelen over de atmosfeer van Venus, waarna hij overstapte op onze eigen atmosfeer. Dus als Hansen ophoudt met praten over graden temperatuur en begint te tellen hoeveel watt energie de aard-atmosfeer bereikt en hoeveel er weer uit gaat, begrijp ik dat we zijn afgedaald naar de essentie van wat de thermostaat van de aarde afregelt.

Ik weet wat watt is. Ik heb een lamp van 60 watt boven mijn bureau. Op school, bijna veertig jaar geleden, had mijn natuurkundeleraar een vaste riedel bij elke les over elektriciteit. 'Het zijn de watts die er toe doen,' zei hij. Als Hansen zegt dat het zonlicht dat het aardoppervlak in de afgelopen eeuwen heeft bereikt ongeveer 240 watt per vierkante meter is, dan kan ik me daar iets bij voorstellen. Dat zijn vier lampen van 60 watt die op mijn bureau schijnen. Dat getal verandert altijd maar een klein beetje, omdat de zon zelf haast niet verandert. Als de zon sterker wordt, dan bereikt meer straling de aarde en warmen we op. Maar alleen tot op zekere hoogte. Een verwarmd oppervlak geeft ook meer energie af, dus zou uiteindelijk een nieuw evenwicht worden bereikt. Ook als extra broeikasgassen meer zonne-energie vasthouden, dan warmt de aarde op tot een nieuw evenwicht is bereikt, waarbij er evenveel energie inkomt als eruit gaat. Anders gezegd, de temperatuur van de aarde is precies die

welke vereist is om dezelfde hoeveelheid energie als de planeet absorbeert terug de ruimte in te stralen.

Wat gebeurt er nu tegenwoordig? Dankzij onze toevoeging van broeikasgassen aan de atmosfeer lijdt de aarde onder wat Hansen noemt 'een grote en groeiende verstoring van de energiebalans' die 'zijn weerga niet kent'. De aarde warmt op, maar heeft nog geen nieuw evenwicht gevonden.

Het netto opwarmingseffect van vervuiling door de mens is op dit moment ongeveer 1,8 watt per vierkante meter. Het meeste daarvan gaat in de opwarming van de lagere atmosfeer of van de oceanen zitten. Het oppervlak van de oceaan en de atmosfeer wisselen vrij gemakkelijk warmte uit, ze wisselen constant energie uit. Omdat de oceanen een grotere warmtecapaciteit hebben dan de atmosfeer, nemen zij het leeuwendeel van de extra energie voor hun rekening. Maar er zit een vertraging in het systeem van uitwisseling. Het duurt enige tijd om de oceanen tot op volle diepte op te warmen. De opwarming van de afgelopen decennia heeft voor een warmtepuls gezorgd die tot dusver op sommige plaatsen tot 750 meter diep in de oceaan is doorgedrongen. Naarmate die puls doorzet, onttrekken de oceanen meer warmte aan de atmosfeer dan het geval zal zijn wanneer de oceanen en de atmosfeer naar een evenwicht op lange termijn terugkeren. Het is vergelijkbaar met het opwarmen van een huis met centrale verwarming. We moeten al het water in alle radiators opwarmen voordat het opwarmen van de lucht in huis volledig effect krijgt. Net zo zal de aardatmosfeer pas het volledige effect van de opwarming te verwerken krijgen wanneer de oceanen zijn opgewarmd.

De beste schatting is dat op dit moment ongeveer 0,6 graden C – het equivalent van ongeveer 0,8 watt per vierkante meter – van de opwarming van de atmosfeer afgaat door het opwarmen van de oceanen. Dat is opwarming die 'in de pijplijn' zit, zegt Hansen. Als we er nu in slagen de broeikasgassen in de atmosfeer te stabiliseren, dan moeten we nog steeds rekenen op die extra 0,6 graden die eraan komt. De

helft daarvan, denkt Hansen, zal dertig tot veertig jaar na de stabilisering zijn beslag krijgen en de rest in de decennia, of misschien wel eeuwen, daarna.

De meeste extra warmte die door de broeikasgassen wordt vastgehouden wordt op dit moment gebruikt voor het opwarmen van de oceanen en de atmosfeer, maar er is nog een derde uitlaat – de energie die nodig is om ijs te smelten. Op dit moment wordt daarvoor maar 2 procent gebruikt, maar Hansen denkt dat dit percentage hoogstwaarschijnlijk sterk gaat stijgen. Recente snelstromende gletsjers en brekende ijsplateaus in Groenland en aan de Zuidpool wijzen erop dat het proces misschien al op gang gekomen is. Het smelten zou in de toekomst wel eens ‘explosief snel’ kunnen verlopen, zegt Hansen, vooral als ijsbergen in steeds groteren getale in zee storten.

Op korte termijn heeft dat zijn nut. De extra energie die nodig is voor het smelten van het ijs zou de zeespiegel sneller doen stijgen, maar minder energie overlaten voor het verhogen van de temperatuur. Op de lange termijn zou dat echter niets uithalen. Want naarmate meer ijs smelt, komt er meer zeewater, toendra of bos. Die donkerder oppervlakken kunnen meer zonne-energie absorberen dan het ijs waarvoor ze in de plaats zijn gekomen. Dus we zouden een versnelde smelting van het ijs kunnen krijgen, *plus* meer opwarming.

De sleutelterm hier is ‘albedo’, de maat voor reflectiviteit van het aardoppervlak. Alles wat het albedo van de aarde verandert – of het nu het smelten van het ijs is of meer bewolking of vervuiling – is evenzeer als de verandering in de concentraties broeikasgassen van invloed op het vermogen van de aarde om zonne-energie vast te houden. Gemiddeld is het albedo van de aarde 30 procent – dat wil zeggen dat 30 procent van het zonlicht dat de aarde bereikt terug de ruimte in wordt gekaatst en dat 70 procent geabsorbeerd wordt. Maar dat is slechts een gemiddelde. In de poolstreken

kan het albedo tot boven de 90 procent stijgen, terwijl het bij onbewolkte hemel boven de oceanen minder dan 20 procent kan bedragen.

In de laatste ijstijd, toen een derde van het noordelijk halfrond met ijskappen bedekt was, waren de uitgestrekte witte vlakten voldoende om het albedo van de aarde van 30 naar 33 op te krikken. Daarmee werd de opwarming van de aarde door de zon met gemiddeld 4 watt per vierkante meter verminderd, en die vermindering was verantwoordelijk voor twee derde van de afkoeling die de ijstijd zelf veroorzaakte. En net zoals toen meer ijs het planetaire albedo verhoogde en de aarde afkoelde, zo zal ook nu minder ijs het albedo verminderen en de aarde opwarmen.

Albedo-expert Veerabhadran Ramanathan van het Scripps Institution of Oceanography in San Diego in California zegt: 'Als het albedo van de aarde maar een tiende van het huidige niveau daalt, tot 27 procent, dan zal dat een effect geven gelijk aan een vijfvoudige toename van de concentraties kooldioxide in de atmosfeer.' Om het belang van de kwestie te onderstrepen organiseert Ramanathan een Global Albedo Project om het veranderende albedo van de aarde te onderzoeken. Lichtgewicht robotische vliegtuigjes begonnen vanaf maart 2006 vluchten te maken vanuit de Maldiven in de Indische Oceaan. Er zijn tot op heden nog geen resultaten gepubliceerd, maar het project zou uiteindelijk wel eens even belangrijk kunnen zijn als Charles Keeling's metingen van kooldioxide in de lucht.

De vooruitzichten voor het albedo zijn onvermijdelijk slecht. We hebben al gezien dat het verdwijnen van het zeeijs aan de Noordpool voor een op hol geslagen lokale opwarming zorgt, met als resultaat nóg meer ijsverlies dat de opwarming van de aarde alleen maar kan versterken. Hetzelfde gebeurt op het land. Rondom de Noordpool treedt de lente vroeger in. En de feedbacks van de opwarming zijn zo krachtig, dat de lente steeds vroeger komt. Met het open kraken van de meren komen rivieren weer tot leven, en het ijs en

de sneeuw verdwijnen, het landschap is plotseling in staat warmte te absorberen. De 'koudeval' van het reflectieve witte ijs is onklaar gemaakt en de temperaturen kunnen in één dag 10 graden C stijgen. Zodra de sneeuwpakken uitgaan staan de reizigers te zweten in hun hemdsmouwen.

Stuart Chapin van het Institute of Arctic Biology in Fairbanks zegt dat de extra ijsvrije dagen van een doorsnee zomer in Alaska tot nog toe voldoende zijn geweest om 3 watt per vierkante meter aan de gemiddelde opwarming ter plaatse toe te voegen. Het gevolg is, zegt hij, dat de Noordpool nu al drie keer zoveel extra warmte absorbeert als het merendeel van de rest van de aarde. En er zijn andere positieve feedbacks werkzaam in de noordelijke toendra. Op veel plaatsen rukken bomen en struiken noordwaarts op, gebruikmakend van de warmere lucht en de minder ijzige bodem. Bomen zijn weer donkerder dan toendraplantten, en omdat de sneeuw meestal snel van hun takken valt, bieden ze de zon sneller een donker oppervlak dan de boomloze toendra. Chapin schat dat op de plaatsen waar bomen in de plaats van toendra komen, ze ongeveer 5 watt per vierkante meter extra absorberen en aan de atmosfeer doorgeven.

Dat schept trouwens een verrassend probleem voor de beleidsmakers die de klimaatverandering willen tegengaan. Volgens het Kyoto Protocol zijn er bonussen voor landen die bomen planten om kooldioxide uit de lucht te halen. Daar kunnen ze *carbon credits* mee verdienen, al naargelang de hoeveelheid koolstof die de bomen tijdens hun groei absorberen, en die *credits* kunnen ze dan weer in mindering brengen op hun emissies van krachtcentrales, auto's, enzovoort. Het idee is om kosteneffectieve manieren te promoten om de broeikasgassen uit de atmosfeer te halen, met de bedoeling dat daardoor de aarde zal afkoelen. Maar in de poolstreek is het effect meestal omgekeerd, omdat jonge bomen weliswaar kooldioxide absorberen, maar ook de aarde opwarmen door meer zonnestraling te absorberen dan de toendra waarvoor ze in de plaats zijn gekomen.

De afkoeling en de opwarming zijn zonder meer twee kanten van dezelfde medaille. Maar Richard Betts van het Britse Hadley Centre zegt dat de opwarming het nu in de meeste plaatsen aan de Noordpool wint. In Noord-Canada, schat hij, zal het opwarmingseffect van een donkerder landschap meer dan twee keer zo groot zijn als het afkoelingseffect door de absorptie van kooldioxide. En in de ijswoestijnen van Oost-Siberië, waar bomen nog langzamer groeien, zal het opwarmingseffect vijf keer zo groot zijn. Elke boom die geplant wordt zal de lente verhaasten en de dooi verhaasten en de opwarming van de aarde verhaasten.

18 *Clouds from both sides*

Tekortkomingen in de klimaatmodellen

De grafiek verscheen maar een paar seconden op het scherm, maar de alarmbellen rinkelden. Had ik het goed gezien? Het was op een workshop over klimaatverandering, medio 2004 in Exeter georganiseerd door het Britse Hadley Centre for Climate Prediction. De zaal zat vol klimatologen van over de hele wereld. Zelfs zij trokken collectief hun wenkbrauwen op toen de grafiek tot ze doordrong. Als de hoeveelheid kooldioxide in de atmosfeer twee keer zo groot werd als vóór de Industriële Revolutie, stelde de grafiek, dan zou de opwarming van de aarde ver uitstijgen boven de algemeen geaccepteerde voorspelling van 1,5 tot 4,5 graad C. De werkelijke opwarming kon wel 10 graden C bedragen of zelfs meer. Dat was toch een vergissing? Te veel gedronken bij de lunch, soms? Dit kon niet waar zijn.

Tot nog toe hebben opstellers van klimaatmodellen hun grafieken van het te verwachten effect van een dubbele hoeveelheid kooldioxide in de atmosfeer altijd getekend in de vorm van een zogenaamde 'gausse-kromme', ook wel 'klokvormige curve' genoemd. Zoals de naam al zegt heeft die de vorm van een (kerk)klok, met de beste schatting van ongeveer 3 graden in het midden en met kansen op hogere en lagere waarden die symmetrisch naar beide kanten toe afnemen. Dus de kans dat bijvoorbeeld de reële opwarming 4,5 graad is, is even groot als de kans dat hij 1,5 graad is. Maar de grafiek van de verwachte opwarming die James Murphy van het Hadley Centre die ochtend met een overhead projector toonde zag er heel anders uit. Het middelste punt van de voorspelling was wel ongeveer hetzelfde als de andere, maar zijn grafiek was

niet symmetrisch en klokvormig, maar erg scheef, met een lange 'staart' aan de bovenkant van het temperatuurbereik. De grafiek liet een heel reële kans zien dat als gevolg van een verdubbeling van de hoeveelheid kooldioxide de temperatuur met 6, 8, 10 of zelfs 12 graden C zou stijgen.

Algemeen wordt aangenomen dat de hoeveelheid kooldioxide in de lucht binnen een eeuw het dubbele wordt van vóór de Industriële Revolutie als we doorgaan met kolen en olie te verstoken volgens een 'business-as-usual-scenario', zoals economen dat noemen. Maar niemand heeft ooit serieus geprobeerd te becijferen wat 10 graden extra opwarming voor de aarde of voor de menselijke beschaving zou betekenen. Het zou zeker op een ramp uitlopen.

Laten we duidelijk zijn. Murphy voorspelde niet met zekerheid een klimatologisch Armageddon. Maar dit was ook geen Hollywoodfilm. De hoge temperaturen in de grafiek, zei hij, 'zijn misschien niet de meest waarschijnlijke, maar ze kunnen niet worden uitgesloten'. En Murphy was ook niet de enige die een grafiek met een staart produceerde. Op de workshop zagen we ook een projectie van David Stainforth van de universiteit van Oxford, met een plausibele opwarming van 12 graden C. Een halfjaar later verschenen die enge nieuwe kansverdelingen in de wetenschappelijke tijdschriften. Deze cijfers zijn waarschijnlijk terug te vinden in het komende IPCC-rapport, maar zijn niet opgenomen in de reeds gepubliceerde samenvatting.

Wat is er aan de hand? Ten eerste hebben de klimatologen hun modellen voor het eerst systematisch getest op alle onzekerheden met betrekking tot de gevoeligheid van het klimaatstelsel voor feedbacks die door de broeikasgassen in werking kunnen worden gesteld. De evaluatie van dat werk voor het IPCC was de belangrijkste taak van de workshop in Exeter. En wat daaruit naar voren kwam was dat wolken, die altijd als een van de zwakste schakels in de modellen werden beschouwd, een veel onzekerder factor vormden dan iemand ooit had gedacht. De vroegere veronderstelling, dat er niet

veel verandert aan de bewolking als de aarde warmer wordt, werd op zijn kop gezet. Er kan meer bewolking komen. Of minder. En de invloed daarvan op het klimaat kan veranderen. Het is bij lange na niet duidelijk of meer bewolking het broeikas effect dempt, zoals eerder werd aangenomen, of juist verergert. De klimatologen in Exeter, die voor het merendeel de leeftijd hadden dat ze zich Joni Mitchells song uit de jaren 1970 nog konden herinneren, constateerden tijdens de koffiepauze *that they had looked at clouds from both sides now*. En ze vonden het niet leuk wat ze zagen.

De gevoeligheid bepalen van de wereldtemperatuur voor forcerende invloeden van buitenaf – bijvoorbeeld veranderingen in de zonnestraling of toevoeging van broeikasgassen – is al sinds de tijd dat Svante Arrhenius in de jaren 1890 met zijn berekeningen begon, een sleutelfactor in het opstellen van klimaatmodellen geweest. En dat houdt voornamelijk in het ontrafelen van de belangrijkste feedbacks.

Al sinds de dagen van Arrhenius zijn de belangrijkste feedbacks in de klimaatmodellen ijs, waterdamp en wolken. We hebben al gezien wat de feedback van smeltend ijs op de reflectiviteit van het aardoppervlak is. Die verklaart waarom de Noordpool sneller opwarmt dan de rest van de aarde én een extra impuls aan de wereldwijde opwarming geeft. Waterdamp is net als kooldioxide een krachtig broeikasgas – zonder waterdamp zou onze planeet bevrozen. Wat er met waterdamp gebeurt is niet zo duidelijk. Op een warmere aarde zal ongetwijfeld meer water uit de bodem en de oceanen verdampen. Dat proces vermeerderd nu al de hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer en jaagt de opwarming op. In de standaard klimaatmodellen betekent de extra waterdamp in de lucht minstens een verdubbeling van het opwarmingseffect van kooldioxide. Maar pas als we bij bewolking komen worden de berekeningen ingewikkeld.

Als er veel waterdamp in de lucht zit, krijgen we onherroepelijk wolken. Op het eerste gezicht zou je daarom zeggen

dat wolken het omgekeerde effect hebben van waterdamp en zonnestrallen afschermen, waardoor de luchttemperatuur laag blijft. Dat doen ze natuurlijk alleen op een zomerdag. Maar 's nachts houden ze ons in het algemeen warm, ze fungeren als een deken die de warmte vasthoudt. Wereldwijd gezien zijn die twee effecten – of liever gezegd het ontbreken ervan – het meest geprononceerd in woestijnen. Waar bewolking ontbreekt is het overdag snikheet, maar kan het 's nachts bitter koud worden, zelfs in de tropen.

De invloed van wolken op de temperatuur blijkt ook afhankelijk van de aard van de wolken. Eigenschappen zoals hoogte, diepte, kleur en dichtheid kunnen doorslaggevend zijn, omdat verschillende wolken verschillende optische parameters hebben. De plukkerige cirruswolken die zich boven in de atmosfeer vormen warmen de atmosfeer daaronder op, omdat ze veel zonnestraling absorberen en de warmte doorstralen naar beneden, terwijl de lage, platte stratuswolken van een sombere zomerdag de wereld daaronder koel houden.

De wetenschap weet nog verrassend weinig over hoeveel en wat voor soort wolken we boven ons hoofd hebben. Het is bijvoorbeeld pas recent duidelijk geworden dat er misschien veel meer cirruswolken zijn dan iemand ooit had gedacht. Veel daarvan zijn onzichtbaar voor het blote oog, maar kenelijk heel effectief in het vasthouden van warmte. Sommige studies wijzen uit dat wereldwijd gezien de afkoelings- en opwarmingseffecten van wolken elkaar op dit moment grotendeels opheffen, met misschien een globaal koelingseffect. Maar niemand weet het zeker. En zelfs kleine verschillen in bewolking kunnen het planetaire albedo aanzienlijk beïnvloeden. Als het zo is dat een warmere wereld voor een omslagpunt zorgt, waarbij bewolking een grotere opwarming veroorzaakt, dan zouden de gevolgen wel eens aanzienlijk kunnen zijn.

Dus wat is de prognose? Wederom ziet het er op het eerste gezicht naar uit dat extra verdamping voor meer bewolking zorgt, omdat een groot deel van de waterdamp uiteindelijk

eindigt als wolkendruppels. Maar misschien is zelfs dat niet zo eenvoudig. Verdamping brengt niet alleen waterdamp in de lucht voor de vorming van meer wolken, maar brandt wolken ook weg en zorgt voor een blauwe lucht. En een grotere verdamping kan ook voor een snellere wolkenvorming zorgen, zodat ze zich sneller met vocht vullen, sneller regen-druppels maken en zich sneller ontlasten. Dus in een broeikaswereld zouden de wollige cumuluswolken die we elke dag door de lucht zien razen wel eens kunnen samepakken tot kolkende cumulus-nimbuswolken die leeg regenen, waardoor er meer onbewolkte luchten komen.

Bruce Wielicki heeft geprobeerd een antwoord te vinden op die vragen tijdens zijn ruim twintigjarige loopbaan als wolkdeskundige van het Langley Research Center in Hampton, Virginia, een onderdeel van NASA. Hij zegt dat satelliet-data erop wijzen dat wolken nog steeds globaal een afkoelend effect op de aarde kunnen hebben, maar vooral in de tropen is er een ontwikkeling naar steeds meer onbewolkte luchten. Sinds het midden van de jaren 1980 zijn de grote tropische convectieprocessen, die de lucht doen opstijgen op plaatsen waar de zon het hardst schijnt, in intensiteit toegenomen. Het gevolg is dat zich in de gebieden met een opwaartse luchtstroom sneller stormwolken ontwikkelen die ook sneller groeien. Daardoor kunnen de tropische orkanen in kracht toenemen. Minder voor de hand liggend is zijn ontdekking dat de stormwolken zich niet alleen sneller vormen, maar ook sneller leeg regenen. Daardoor worden de tropen over het geheel droger en minder bewolkt.

Veel wetenschappers beschouwen deze ontdekking van onbewolktere luchten in de tropen als een sterke aanwijzing voor een onverwachte positieve feedback aan de opwarming van de aarde. Maar Wielicki is voorzichtig. We moeten het weten, want in de tropen verdampt naar schatting tweederde van het vocht dat in de atmosfeer zit – een belangrijk element in de thermostaat van de aarde. ‘Aangezien wolken beschouwd worden als de zwakste schakel in het voorspel-

len van klimaatverandering, zijn die nieuwe uitkomsten verontrustend – de modellen zouden wel eens veel onzekerder kunnen zijn dan we gedacht hadden,’ zegt Wielicki. Zijn eigen gok is dat bewolking tussen de twee en vier keer zo belangrijk is in de bepaling van de temperatuur op aarde als voorheen werd aangenomen.

En daarmee zijn we terug bij de grafieken die in Exeter werden getoond. Voor de constructie van zijn grafiek nam Murphy een standaard klimaatmodel en voerde daar de nieuwe onzekerheden in met betrekking tot het wolkendek, zoals de duur en de dikte. Zijn model gaf daarop als uitkomst een veel hogere kans op een groter-dan-verwachte opwarming. ‘Variaties in feedback van de wolken spelen een grote rol in de voorspelling van hogere temperaturen,’ zei hij. Susan Solomon, voorzitter van de wetenschappelijke werkgroep van het IPCC en degene die uiteindelijk besliste over wat er in het (op het moment van schrijven nog ongepubliceerde) rapport van 2007 over klimaatverandering kwam, was het daarmee eens. Het grootste verschil tussen modellen die een hoge schatting geven van de opwarming van de aarde en die welke lagere voorspellingen doen is de manier waarop ze de feedback van wolken meerekenen.

Wie heeft gelijk? Is de vrees voor een krachtige positieve feedback van wolken gerechtvaardigd of niet? Een manier om daarachter te komen is de verschillende modellen te testen op hun vermogen om de wereld van vandaag weer te geven. Het IPCC past deze benadering nu op grotere schaal toe om de slechte modellen uit zijn analyse te weren. Murphy twijfelt er niet aan wat de uitkomst zal zijn. Hij zegt dat de modellen die een geringe opwarming voorspellen ‘een veelal onrealistische representatie van bewolking hebben. Als die eruit gewied wordt, komen er hogere temperaturen uit de bus rollen.’ Dat is nog geen bewijs, maar het grijpt je wel aan.

Uiteindelijk nam de werkgroep van het IPCC een omzichtig standpunt in ten aanzien van de realiteit van de enge

scenario's en stelde zulke krappe uitersten aan de mogelijke opwarming in de toekomst dat ze op gespannen voet staan met veel van het nieuwe bewijs over de zwakte van de modellen; maar de werkgroep waarschuwde wel dat 'waarden aanzienlijk hoger dan 4,5 graad C opwarming niet kunnen worden uitgesloten.'

Wolken zijn niet de enige verschijnselen die de reflectiviteit van de aardatmosfeer veranderen. Onze planeet wordt heijger, de blauwe verten zijn niet zo blauw meer. Het probleem is de vervuiling die zich over het hele noordelijk halfrond en een groot deel van Azië verspreidt en daar de zon verduistert. Het is niet alleen een esthetische kwestie. Of een medische, hoewel miljoenen mensen elk jaar overlijden aan de giftige effecten van deze vervuiling. Het is ook een klimaatkwestie. In sommige delen van de wereld zijn de temperaturen sterk gestegen, maar in een aantal van de dichtstbevolkte landen zijn de temperaturen juist gedaald. Klimatologen die jarenlang gewaarschuwd hebben voor de opwarming van de aarde komen nu tot de conclusie dat we misschien net zo bezorgd moeten zijn over de effecten van deze plaatselijke afkoeling.

De vervuilende stoffen waar het om gaat worden gewoonlijk aangeduid met de verzamelnaam 'aerosols', maar er zijn veel verschillende soorten en ze stammen uit verschillende bronnen. De boosdoeners lopen uiteen van krachtcentrales in Europa tot boeren die stoppelvelden afbranden in Afrika of stukken bos platbranden in het Amazonegebied, van staalfabrieken in India tot miljoenen vrouwen die overal in de tropen miljoenen maaltijden koken op open vuren. De meeste van die activiteiten produceren broeikasgassen, maar ze produceren ook aerosols in de vorm van rook, roet, stof, deeltjes van half verbrande vegetatie en veel kleinere, maar hoogst reflectieve zwaveldeeltjes. Afhankelijk van hun eigenschappen reflecteren of absorberen die deeltjes zonlicht. Eigenlijk doen de meeste allebei in uiteenlopende mate. Maar met één

belangrijke uitzondering waar we straks op terugkomen is de overheersende uitwerking van die aerosols afkoeling. Het gevolg is dat sommige delen van de aarde, van Midden-Europa tot de vlakten van India, en van het Amazone-oerwoud tot Oost-China, ofwel nooit, of alleen in sommige jaargetijden last hebben van de opwarming van de aarde.

Een afkoeling van de hele aarde als tegenwicht tegen de opwarming van de hele aarde, dat lijkt een goed idee. Maar jammer genoeg zijn de zaken niet zo simpel. De tegengestelde krachten trekken het klimaatsysteem in twee verschillende richtingen die elkaar niet zozeer kunnen opheffen als wel versterken. In elk geval introduceren ze een nieuw element van onzekerheid in de atmosferische processen. Veel landen doen hun best – om zeer goede redenen van volksgezondheid – om hun emissies van aerosols (want die veroorzaken smog) te verminderen, maar dan wordt wel de ‘vervuilingsparasol’ boven die landen weggenomen, en dat heeft waarschijnlijk binnen een paar dagen na de schoonmaak een abrupte opwarming tot gevolg.

Daarvan zien we al tekenen in Midden-Europa. Rond 1990 nog stonk het in landen als Polen, Tsjechoslowakije en Oost-Duitsland naar de bruinkool die in de ouderwetse industrieën van Sovjetrussische makelij werd gestookt. Schoorstenen braakten rook uit en overal hing een deken van smog. De regio waar die drie landen samenkwamen stond bekend als de ‘zwarte driehoek’. Die luchtvervuiling had een lokaal afkoelingseffect dat twee keer zo groot was als het opwarmingseffect van de broeikasgassen. Sinds de val van de Muur zijn de meeste van die oude vervuilende industrieën ontmanteld en is de lucht schoner geworden. Er dringt nu meer zonnestraling door tot het landschap dat vroeger onder de smog lag, en Midden-Europa is dan ook opgewarmd. In de afgelopen vijftien jaar is de temperatuur daar met drie keer het wereldgemiddelde gestegen.

Dit experiment in de reële wereld toont duidelijk het vermogen aan van aerosols om het aardoppervlak af te koelen.

En dat roept ook een andere vraag op voor de toekomst: hoeveel opwarming wordt wereldwijd door aerosols geabsorbeerd? We hebben te maken met een gespannen veer, waarbij de temperaturen laag worden gehouden door de aerosols,' zegt Susan Solomon, hoofd van de wetenschappelijke staf van het IPCC. 'Als je de aerosols weghaalt, zal de temperatuur zeer snel stijgen, maar we weten niet precies hoeveel, want we weten niet hoe strak de veer gespannen is.' De beste schatting tot voor kort was dat aerosols een kwart van de opwarming tegenhouden, ofwel ongeveer 0,2 graden C. Met andere woorden, de opwarming van 0,8 graden als gevolg van broeikasgassen sinds de Industriële Revolutie is dankzij de aerosols tot de huidige opwarming van 0,6 graden beperkt gebleven. Maar critici zeggen dat die berekening weinig meer is dan een gok, en de eerste pogingen om directe metingen te verrichten van veranderingen in de straling wijzen erop dat de veer wel eens veel gespannener zou kunnen staan.

Ik was aanwezig bij een van de eerste bijeenkomsten waar die ideeën in detail werden besproken. Dat was in 2003, op een workshop van klimatologen in Dahlem, een stille buitenwijk van Berlijn. Het onderwerp van discussie was 'aardstyeemanalyse', en de man die de kwestie ter tafel bracht was de vooraanstaande Nederlandse atmosferisch chemicus Paul Crutzen, een briljante, creatieve geest die als eerste vermoedde wat de chemische oorzaak was van de vernietiging van de ozonlaag. In de jaren 1980 was Crutzen op het idee gestuit dat er tijdens een atoomoorlog zoveel branden zouden ontstaan dat het overdag donker bleef door de rook, 'en de temperaturen zouden kelderen'. Dat effect werd 'nucleaire winter' genoemd, en het inzicht had geleid tot een voortdurende analyse van de rol van rook en andere aerosols in het klimaat. Crutzen betoogde nu in Dahlem dat aerosols niet voor een kwart, maar ergens tussen de helft en driekwart van de versluiering van het huidige broeikaseffect voor hun rekening nemen. 'Ze geven ons een vals gevoel van veiligheid,'

zei hij. Het koelingseffect van aerosols, zei hij, was in het verleden berekend als het verschil tussen de feitelijke opwarming en de opwarming voorspeld door de klimaatmodellen. Het koelingseffect van de aerosols werd beschouwd als de opwarming die 'ontbrak'. Maar zoals de klimatoloog Stephen Schwartz van het Brookhaven National Laboratory bij een andere gelegenheid stelde: 'die benadering gaat ervan uit dat het klimaatmodel accuraat is, wat natuurlijk juist getest moet worden.'

Na het diner – met een paar Heinekens, als ik me goed herinner – voerde Peter Cox, een doordenkende en door-drinkende klimatoloog die destijds bij het Met Office in Engeland werkte, wat berekeningen op de achterkant van een bierviltje uit om te zien wat de hypothese van Crutzen voor het toekomstige klimaat zou kunnen betekenen. Hij werd al gauw helemaal door zijn berekeningen in beslag genomen. Een paar flessen bier later was hij tot de conclusie gekomen dat, als Crutzen gelijk had, het werkelijke opwarmingseffect van een dubbele concentratie kooldioxide in de atmosfeer, wel eens meer dan twee keer zo groot zou kunnen zijn als de bestaande schattingen, namelijk tussen de 7 en de 10 graden C. De volgende ochtend betuigden zijn wat nuchterder collega's hun instemming. Ik ging naar huis en schreef een artikel voor de *New Scientist* waarin ik de cijfers van Cox noemde en de conclusie van de workshop dat de uitkomsten 'dramatische consequenties hadden voor de prognoses van het toekomstig klimaat'. Ik was er nogal opgewonden over, maar het artikel trok nergens aandacht.

Later gingen Cox en Chris Jones, zijn collega van het Hadley Centre, plus Meinrat Andreae van het Max-Planck Institut für Chemie in Mainz, die prognoses gedetailleerd testen, en ze kwamen tot dezelfde conclusie als Cox met zijn bierviltje. Ze lieten klimaatmodellen draaien met twee verschillende parameters: een geringe opwarming door broeikasgassen getemperd door een lichte koeling van aerosols, of een grote opwarming door broeikasgassen die werd tegen-

gehouden door een grotere aerosolkoeling. Ze schreven in *Nature* dat de *best fit* een opwarming als gevolg van de verdubbeling van broeikasgassen was die zonder de matigende werking van aerosols 'groter dan 6 graden zou zijn' en 'misschien wel 10 graden'.

'Zo'n enorme toename in de temperatuur zou groter zijn dan de temperatuurveranderingen van de laatste ijstijd tot op heden,' zei Andreae. 'Dat ligt zo ver buiten de grenzen van onze ervaring en onze wetenschappelijke kennis dat we niet met enig vertrouwen de gevolgen voor de aarde kunnen voorspellen.'

Nog steeds nam de wereld er geen notitie van. Ik vroeg Andreae wat hij vond van die rare onverschilligheid. 'Het is altijd verbazend,' e-mailde hij me, 'dat zoveel mensen niet inzien hoe belangrijk dit is voor de toekomstige ontwikkeling van het klimaatstelsel.' De discussies op de workshop in Dahlem hadden zijn kijk op de wereld veranderd, zei hij. 'Vóór Dahlem geloofde ik het wel met het klimaat, in de zin dat ik wel wist dat de aarde opwarmde, maar dat het maar een paar graden zou zijn en dat we het wel aankonden. Ik had ook het gevoel dat de aerosols ons een goede dienst bewezen door de opwarming af te remmen en te verminderen. Maar daarna beseftte ik dat de aerosolrem van de opwarming wordt afgehaald en ook dat de aerosolkoeling een grote onzekerheid in de gevoeligheid van het klimaat introduceert. Ik ben nu zo ver dat ik als mens hoop dat ik als wetenschapper ongelijk heb. Als we gelijk hebben met onze huidige theorieën, dan komen er echt moeilijke tijden.'

Modellen zijn natuurlijk maar modellen. Maar wat de precieze omvang ook is van het huidige aerosoleffect, het zou heel verkeerd zijn te denken dat het ons zal blijven behoeden voor het ergste als de opwarming van de aarde accelereert. Dat komt omdat aerosols en broeikasgassen een heel verschillende levensduur hebben in de atmosfeer. Aerosols blijven maar een paar dagen in de lucht, waarna ze door regen naar de grond worden gespoeld. Kooldioxide daarentegen

heeft een levensduur van een eeuw of langer. Als we, laten we zeggen, doorgaan met het huidige emissieniveau van zowel aerosols als kooldioxide, dan zal het aerosolgehalte van de atmosfeer gelijk blijven. Er zal niets meer bijkomen en het koelingeffect zal niet toenemen. Maar het kooldioxidegehalte zal blijven stijgen en een steeds grotere opwarming veroorzaken.

Waarschijnlijk. De moeilijkheid is dat de wetenschappelijke kennis over aerosols zo mogelijk nog poverder is dan die over het effect van bewolking. Stephen Schwartz zegt: 'Er zijn veel verschillende soorten aerosols, veel onderlinge wisselwerkingen en er zijn onopgehelderde kwesties met de microfysica van wolken – allemaal zaken waarover nog meer kennis vergaard moet worden. Dit zijn hele moeilijke vraagstukken waar vrees ik nog niemand vat op heeft gekregen.' Het lijkt geen twijfel dat sommige aerosols, zoals sulfaatdeeltjes van kolengestookte krachtcentrales, hoofdzakelijk het zonlicht verstrooien en terugkaatsen in de ruimte. Ze verhogen het albedo en koelen de aarde zeker af. Maar andere verstrooien én absorberen zonlicht, waarna ze het terugstralen en daarmee de atmosfeer om zich heen opwarmen. En met die deeltjes is het moeilijker te bepalen waar de balans tussen de twee effecten ligt.

De grootste zorg in dit verband betreft roet, de zwarte kooldeeltjes afkomstig van een onvolledige verbranding van steenkool, biomassa of diesel. Over de rol van roet is veel wetenschappelijke literatuur, zoals een snelle zoektocht door de wetenschappelijke tijdschriften duidelijk maakt. In maart 2000 stond in een artikel in *Science* dat roet de 'opwarming van de aarde maskeerde'. Elf maanden later stond in een ander artikel in het concurrerende *Nature* dat roet 'de opwarming veroorzaakte'. Tien maanden later, op de conferentie van de American Geophysical Union, werd het nu eens een 'koelmiddel' genoemd en dan weer 'de grootste aanjager van de opwarming van de aarde na kooldioxide'.

Het schijnt zo te zitten. Een wolk roetdeeltjes – of ze nu afkomstig zijn van een bosbrand, een kookkachel of een industriële stookketel – schermt de aarde af voor de straling van de zon en koelt de grond daaronder dus af. Maar hij absorbeert ook een deel van die straling en zendt die weer uit naar de omringende lucht. Dus roet koelt de grond af maar warmt de lucht op. De grond beweegt niet, maar de lucht wel, dus het koelingeffect, ofschoon intens, blijft merendeels beperkt tot het gebied van uitstoot, terwijl het opwarmings-effect, ofschoon minder intens, zich veel verder uitstrekt.

Er is nog steeds grote onzekerheid over de precieze rol van roet in het wereldklimaat. Jim Hansen denkt dat het wel eens verantwoordelijk zou kunnen zijn voor een kwart van de opwarming op het noordelijk halfrond. Hij gelooft dat roet de op twee na belangrijkste door de mens geproduceerde veroorzaker van het broeikas-effect is, na kooldioxide en methaan, en dat de controle daarop een van de goedkoopste, meest effectieve en snelle manieren is om de opwarming van de aarde aan banden te leggen. Maar goed, op de plaatsen waar het in grote hoeveelheden geproduceerd wordt, koelt het zonder meer het land af. Die plaatsen liggen voor het merendeel in Azië. En nu is er een nieuwe reden tot bezorgdheid. Zou het kunnen dat aerosol-emissies in India en China de Aziatische moesson uitschakelen?

19 Een miljard vuren

Hoe een bruine mist de moesson kan uitschakelen

Ik kom nu al twintig jaar in India. Niet regelmatig, maar vaak genoeg om te zien dat de lucht er elke keer smeriger wordt en dichter komt te zitten met zwarte rook en damp. In de steden is het grootste deel daarvan afkomstig van de uitlaten van de miljoenen slecht onderhouden bussen met dieselmotoren en de tweetakt riksja's die hun weg zoeken door de overvolle straten. In de smog zitten natuurlijk ook zeezout en stofdeeltjes van mineralen, een aanzienlijke hoeveelheid vlieg-as en zwaveldioxide van de Indiase kolencentrales, plus enorme hoeveelheden organisch materiaal en roet van het platteland. Want in de miljoenen dorpen van India, waar het grootste deel van de miljard Indiërs nog steeds woont, is de lucht vaak nauwelijks beter dan in de steden, met rokende vuren van honderden kookkachels die allemaal hout, gedroogde koeienmest en plantenresten verstoppen.

Die rook is bezig een zeer belangrijke klimatologische factor te worden. Hij komt samen in één gigantische wolk die door de klimatologen de 'bruine mist' van India wordt genoemd. Het midden ervan ligt boven de Noord-Indiase vlakte, een van de dichtstbevolkte gebieden ter wereld, die in de winter vrijwel permanent last heeft van smog. Die smog is een reusachtige versie van de oude 'erwtensoepe' die over Londen hing in de tijd dat de stad nog verwarmd werd met kolenvuren. Ten tijde van het voltooien van dit hoofdstuk was de mist in Delhi naar verluidt erger dan ooit, zo dik dat er geen vliegtuigen konden landen of opstijgen. Maar de mist breidt zich uit en bedekt heel India en gebieden daarbuiten.

De term ‘bruine mist’ werd door wetenschappers bedacht die het verschijnsel als eersten bestudeerden. In 1999 kwamen tweehonderd onderzoekers die deelnamen aan het Indian Ocean Experiment (INDOEX) op de Maldiven bij elkaar voor een blitz van drie maanden, waarbij ze in vliegtuigen en op schepen de lucht boven India en de Indische Oceaan onderzochten. De resultaten waren ook voor de organisatoren een verrassing. Elke winter, van november tot april, lag er een smogdeken van 2 kilometer dik boven een uitgestrekt gebied ten zuiden van de Himalaya, over Nepal, India en Pakistan en verder boven de Arabische Zee en de Golf van Bengalen – en zelfs tot voorbij de evenaar, de Seychellen en de Chagos Eilanden. Het gebied was 10 miljoen vierkante kilometer groot, zeven keer zo groot als India.

‘Dat we dikke bruine smog op een hoogte van 4000 meter in de Himalaya en boven de koraaleilanden in de Maldiven vonden, dat was een schok,’ zegt Paul Crutzen, een van de geestelijke vaders van het project. Crutzen, die vijftien jaar eerder een dramatische verdunning van de ozonlaag had voorspeld, zei dat de mist voor India en de gebieden eromheen hetzelfde gevaar van een ‘onwelkome verrassing voor het milieu’ in zich borg. Die mist, zei hij, zou wel eens ‘ernstige consequenties’ kunnen hebben voor de atmosfeer.

De bevindingen van het INDOEX vielen niet goed in India, dat nu het gevoel had dat het als enige onder vuur lag. Waarom moeten jullie ons hebben? Wetenschappers in dienst van de Indiase overheid publiceerden een gedetailleerde ‘repliek’ die grotendeels nergens op sloeg. De onderzoekers van INDOEX haastten zich om de term ‘Indiase bruine mist’ te vervangen door ‘Aziatische bruine mist’ – en terecht, want de mist is een verschijnsel in heel Azië. Maar toen ik medio 2005 die term in India gebruikte, werd ik op boegeroep onthaald. Zelfs de term ‘Aziatische mist’ wordt tegenwoordig als politiek incorrect beschouwd. Waarom de pik op Azië? vragen ze. Het antagonisme is nu zelfs zo groot geworden dat Indiase wetenschappers weigeren over de kwestie met

buitenlanders zoals ik te praten, omdat ze bang zijn in gevaarlijk politiek vaarwater te komen.

India is in het centrum van de belangstelling komen te staan omdat de aerosolvervuiling van het land echt belangrijk is voor de hele wereld. Dorothy Koch van Columbia University in New York schat dat een derde van het roet dat de Noordpool bereikt, en dat de vervuilingmeters van Mount Zeppelin op Spitsbergen tot aan Noord-Canada doet uitslaan, uit Zuid-Azië komt. Het roet slaat neer op de sneeuw en het ijs, waardoor het witte oppervlak donkerder wordt en begint te smelten. Toen ze haar bevindingen in april 2005 publiceerde kopte een krant: 'Kookvuren in India zorgen mede voor smelting van het Noordpoolijs aan de andere kant van de aardbol'. Geen wonder dat de Indiërs zenuwachtig werden. Ineens werd een land met zo ongeveer de laagste uitstoot van broeikasgassen per hoofd van de bevolking in de wereld met de vinger nagewezen als de belangrijkste schuldlige aan de klimaatverandering.

Maar hoe voorzichtig ze in het openbaar ook zijn, de Indiase wetenschappers zijn wel degelijk aan het werk getogen om te zien waar al die vervuiling vandaan komt. Aanvankelijk namen ze aan dat die het product was van de snel groeiende en ongetwijfeld vervuilende industrie van het land. Maar bij het Indian Institute of Technology in Mumbai hebben ze modellen gebouwd van de keukens op het platteland om de uitstoot van het soort kookkachels te meten die overal in India buiten de grote steden worden gebruikt. Ze stookten de vuren met hout, plantenresten en gedroogde koeienmest, en op de vuren kookten ze water en bereidden ze zelfs eten. Ze kwamen tot de conclusie dat rookemissies van huishoudelijke kookvuren tussen de 1 en 2 miljoen ton aerosols per jaar produceren, waaronder een kwart miljoen ton roet. Daarmee nemen ze 40 procent van de totale aerosolemissie in India voor hun rekening.

De discussie over de klimaatimpact van de Aziatische bruine mist is een statistisch mijnenveld geworden. Het – veel

geciteerde – globale cijfer is dat de mist de hoeveelheid zonnestraling die in India in de winter het aardoppervlak bereikt met ongeveer 22 watt per vierkante meter vermindert. Dat is een vermindering van ongeveer een tiende, en dat zou voldoende moeten zijn om een sterke afkoeling te veroorzaken. Het getal is juist, maar het is maar een deel van het verhaal. Want slechts ongeveer 7 watt van die straling gaat geheel en al verloren en wordt verstrooid en teruggekaatst in de ruimte. De overige 15 watt worden geabsorbeerd door het roet in de aerosols en teruggestraald in de atmosfeer, zodat die opwarmt. Dus hoewel de hoeveelheid straling sterk wordt aangetast, is het afkoelingseffect veel minder dan het onder andere omstandigheden zou zijn. Maar toch is het in de winter voldoende om zowel de opwarming tegen te gaan als om de lucht boven het grootste deel van India gemiddeld met ongeveer 0,5 graad C af te koelen. In de zomer, wanneer de luchtvervuiling met de moessonregens naar beneden komt en de lucht helderder is, is de temperatuur de afgelopen decennia ongeveer 0,5 graad C gestegen, gelijk met het mondiale gemiddelde.

Daar houden de gevolgen niet mee op, zegt Veerabhadran Ramanathan, de Indiase wetenschapper die samen met Crutzen bij het Scripps Institution of Oceanography in San Diego, California, het INDOEX bedacht. Vooral de afkoelende werking van de mist boven het landoppervlak van India vertraagt de opwarming van het land die de vorming van de moessonwinden stimuleert. Daarmee wordt de levensader van India bedreigd: de moesson.

Er schijnt onder de wetenschappers nogal wat verwarring te heersen over de Indiase moesson. De onderzoekers die aan de bruine mist werken beweren allemaal dat de moesson in de afgelopen decennia zwakker is geworden, en ze denken dat dit waarschijnlijk het gevolg is van de smog. Maar de onderzoekers die zich bezighouden met de opwarming van de aarde zijn er al even zeker van dat de intensiteit van de moesson is toegenomen in het traditioneel nattere zuiden van

India, waar de smog minder erg is, terwijl hij zwakker is geworden in het noorden, waar de bruine mist het dikst is. Hoe die ontwikkeling verder gaat is natuurlijk heel belangrijk voor een land dat geheel en al afhankelijk is van slechts honderd dagen regen per jaar om de gewassen te bevloeien die een miljard mensen moeten voeden. Als de moesson in Zuid-Azië stopt, dan zou dat een wereldramp van ongeken- de omvang zijn.

En Zuid-Azië staat misschien niet alleen. Oost-Azië zou wel eens in hetzelfde schuitje kunnen zitten – een situatie die de voedselproductie bedreigt van het land met de meeste inwoners ter wereld: China. Ten noorden van de Himalaya hangt een soortgelijke dikke bruine wintermist, hoewel die niet zozeer uit rook van de verbranding van koeienmest bestaat als wel uit zwaveldioxide en andere dampen afkomstig van de verbranding van Chinese steenkool. En die houdt de zonnestraling tegen. Toen Yun Qian en Dale Kaiser van het Amerikaanse National Laboratory in Richmond, Washington, het aantal gemeten zonne-uren in China van de afgelopen vijftig jaar bestudeerden, vonden ze een recente afname van zonneshijn in het meest vervuilde zuiden en oosten van het land van 5 tot 6 procent sinds 1980.

Daardoor dalen de temperaturen. Terwijl de opwarming van de aarde in het grootse deel van China merkbaar is, zijn de dagtemperaturen in de sterkst vervuilde gebieden met ongeveer 0,6 graad C gedaald. Dat op zijn beurt lijkt de regenval de beïnvloeden. In het zuiden van het land worden de moessonregens sterker, waarbij de grote zuidelijke rivier, de Jangtse, herhaaldelijk overstroomt, terwijl er verder noordwaarts, in het stroomgebied van de Gele Rivier, nu minder regen valt. De Chinese meteorologische gegevens, die tot de best opgetekende van de wereld behoren, wijzen erop dat deze verschuiving de grootste verandering in het regenpatroon is geweest in duizend jaar. Tot op zekere hoogte berust het verband tussen de trends in de regenval en de toegenomen bruine mist op gissingen. Maar als een dikke Aziatische

bruine mist in de klimaatmodellen wordt gestopt, geven ze als uitkomst allemaal extra regenval in Zuid-China, tezamen met haast permanente droogtes in het noorden. Dus als de modellen kloppen, zetten die grote rampen door zolang de mist voortduurt.

Meinrat Andreae schat dat elk jaar ongeveer 7 miljard ton biomassa in de tropen wordt verbrand – ongeveer een ton voor elke aardbewoner. Allemaal brengen ze aerosols in de lucht.

De Aziatische landen met hun enorme bevolking hebben de ergste smogs. Maar ook delen van Afrika en het Braziliaanse Amazonegebied komen onder een sluier te liggen wanneer de boeren landbouwgrond winnen door bossen en graslanden te verbranden. In het Braziliaanse Amazonegebied branden elk jaar honderdduizenden vuren, die het gebied bedekken met dichte wolken rook. In de weken van de branden daalt de hoeveelheid zonneschijn die de grond bereikt gemiddeld met 16 procent. In Zambia vermindert volgens studies het zonlicht met 22 procent als de savanne brandt.

Die veranderingen ‘brengen velerlei schade toe aan de atmosferische circulatie’, zegt Dale Kaiser, auteur van de studie over het Amazonegebied. In de Amazone, zegt hij, veroorzaakt de rook afkoeling en remt de vorming van regendruppels. Daardoor wordt de regenval verminderd en blijven de aerosols langer in de lucht. Intussen zorgt de opbouw van waterdamp ervoor dat de bovenste lagen van de atmosfeer natter worden, zegt Daniel Rosenfeld van de Hebreeuwse Universiteit in Jeruzalem, die met vliegtuigen vol meetapparatuur door de rook boven het Amazonegebied is gevlogen. Uiteindelijk komen er een paar zware onweersbuien, die in het vak *hot towers* worden genoemd en die hagelstormen veroorzaken. Hagel valt in de Amazone alleen als er branden zijn geweest.

Sommige van die veranderingen zouden wel eens invloed kunnen hebben op gebieden ver van de plek waar de rook wordt gevormd. Door condensatie in de Amazonische *hot*

towers komen grote hoeveelheden warmte in de bovenste atmosfeer vrij, die de straalstromen en andere windpatronen boven de tropen en andere delen van de aarde beïnvloeden. En er zou meer waterdamp in de stratosfeer kunnen komen, waar het de afbraak van ozon doet toenemen. Andere klimaatmodelstudies onder supervisie van Jim Hansen wijzen erop dat roetuitstoot boven India en China droogte kan veroorzaken in de Afrikaanse Sahel, en zelfs opwarming in West-Canada – maar hoe dat precies in zijn werk gaat is nog niet duidelijk.

Die invloeden zijn natuurlijk alleen nog maar de uitkomsten van klimaatmodellen. Het valt moeilijk te bewijzen of ze gebeurtenissen in de reële wereld beschrijven. Maar de modellen zijn wel gebaseerd op reële fysische processen in de atmosfeer. Dus op zijn minst wijzen ze op een potentieel wereldwijd klimaateffect van aerosolemissies in de tropen. Het schijnt dat kookkachels in India wereldwijde consequenties kunnen hebben.

20 Hydroxylvakantie

*De dag dat de schoonmaker van de aarde
niet kwam opdagen*

Ons laatste uur zou wel eens kunnen slaan als de schoonmaakdienst van de atmosfeer het plotseling laat afweten. Want een van de meest onrustbarende geheimen van de aardse stofwisseling is dat er precies één substantie is die de taak op zich neemt de vervuiling in de atmosfeer op te ruimen. Als die stof maar één dag vrijaf nam, zouden we al in ernstige moeilijkheden komen – de smogs zouden zich ongecontroleerd over de hele planeet verspreiden.

De stof waar het om gaat is hydroxyl. Een molecule hydroxyl bestaat uit één atoom zuurstof en één atoom waterstof. Het wordt gevormd wanneer gassen zoals ozon en waterdamp met ultraviolette straling worden gebombardeerd. Hydroxyl is ook de meest vluchtige van alle chemische verbindingen. Vrijwel meteen na de vorming reageert het molecule met een ander molecule, meestal een vervuilende stof, en is weer weg. Het heeft een gemiddelde levensduur van ongeveer een seconde. Omdat het zo snel komt en gaat, is het ook vrij zeldzaam: de gemiddelde concentratie in de atmosfeer is minder dan één deel per biljoen. Je kunt ze allemaal, tot aan het laatste molecule toe, in de Grote Piramide van Egypte stoppen, en dan hou je nog ruimte over voor de hydroxyls van nog twee atmosferen.

De stof is echter cruciaal voor het leven op aarde. Want hydroxyl is letterlijk – min of meer – het waspoeder van de atmosfeer. Het zet allerlei soorten gasvormige vervuilers om, zodat ze oplosbaar worden in water en met de regen uit de atmosfeer worden gespoeld. Dat proces heet ‘oxidatie’. Zo

zet hydroxyl zwaveldioxide, dat anders maandenlang de lucht zou verstikken, om in zure regen, die al snel naar de grond valt. Vrijwel hetzelfde gebeurt met koolmonoxide en methaan, die allebei tot kooldioxide worden geoxideerd, en met stikstofdioxide en vele andere stoffen. De enige grote vervuiler die het niet neutraliseert is kooldioxide, dat, gedeeltelijk om die reden, een veel langere levensduur heeft in de atmosfeer dan de meeste andere vervuilers.

De concentraties hydroxyl zijn over het algemeen hoger in de warme lucht boven de tropen, waar de ultraviolette straling het sterkst is, terwijl ze vrijwel nul zijn in de poolstreek, waar ondanks gaten in de ozonlaag meestal weinig ultraviolette straling doordringt om hydroxyl te maken. Het gevolg is dat ‘giftige stoffen die in de tropen maar een paar dagen in de atmosfeer blijven, in de poolstreek een jaar of zelfs langer blijven hangen,’ zegt Frank Wania van de University of Toronto. Dat is een van de redenen, zegt hij, waarom luchtverontreinigers zoals zure mist en pesticiden zich in de poolstreek ophopen en ijsberen en allerlei andere organismen vergiftigen.

Hydroxyl kan maar nauwelijks de vervuiling die wij veroorzaken bijbenen, vooral omdat de stof tijdens het oxidatieproces verdwijnt. De vrees dat deze amanuensis van de atmosfeer overwerkt is en het moeilijk heeft bestaat al een paar jaar. Maar omdat de stof zo vluchtig en zeldzaam is, is het vrijwel onmogelijk om de hydroxylconcentraties direct te meten. Alle schattingen zijn indirect en gebaseerd op metingen van stoffen waarmee het reageert. Dus toen Joel Levine, een chemicus van NASA, in de jaren 1980 het idee opperde dat de hoeveelheid hydroxyl in de lucht wel eens met 25 procent kon zijn verminderd, vond hij weinig weerklank, omdat hij het niet kon bewijzen. Het was onmogelijk om iets substantieels zoals de Keeling-curve voor kooldioxide te laten zien.

Grotendeels hetzelfde lot onderging een voorspelling in het IPCC-rapport van 2001, waarin werd gezegd dat de hydroxylconcentraties in 2100 mogelijk met 20 procent waren

gedaald omdat er door de toenemende luchtverontreiniging een steeds groter beroep op de stof werd gedaan. Idem dito een rapport uit hetzelfde jaar van Ronald Prinn, een voor-
aanstaand atmosferisch chemicus van het MIT, die een mogelijke afname van de concentraties hydroxyl in de jaren 1990 meldde. Maar er is wel degelijk reden tot bezorgdheid.

Er is één stof waarbij het oxidatieproces door middel van hydroxyl langere tijd in beslag neemt dan bij alle andere. Die stof is koolmonoxide. Koolmonoxide in de atmosfeer is over het algemeen afkomstig van bosbranden, van het verstoffen van olie, gas en steenkool en van kleine kookkachels, en is lange tijd de Assepoester onder de luchtverontreinigers geweest. De stof is gevaarlijk voor mensen in afgesloten ruimtes, maar is als milieuverontreiniger grotendeels over het hoofd gezien. Waar men zich tot nog toe het meest zorgen over maakte was dat de stof door oxidatie in kooldioxide wordt omgezet. Maar de concentraties koolmonoxide in de lucht zijn in de twintigste eeuw verdrievoudigd. Dat wijst op een bottleneck die wel eens de voorbode zou kunnen zijn van een wijder verbreide aftakeling van de schoonmaakdienst.

Bij ontbreken van goede data over hydroxyl en zijn werking moeten we ons wel verlaten op modellen om te zien of er zich in de toekomst een probleem kan voordoen. Sasha Madronich van het National Center for Atmospheric Research in Boulder, Colorado, is een van de weinige wetenschappers die geprobeerd hebben een model op te stellen van de mogelijke reactie van hydroxyl op een verschillend verontreinigingsniveau. Hij zegt dat de atmosferische schoonmaakdienst wel eens een breekpunt zou kunnen hebben. 'Bij een hoge mate van vervuiling wordt de chemie van de atmosfeer chaotisch en uiterst onvoorspelbaar. Boven bepaalde drempelwaarden kan de afname van hydroxyl catastrofale vormen aannemen,' zegt hij. Veel stedelijke centra, zegt hij, 'zijn nu al zo erg vervuild dat de hydroxylconcentratie plaatselijk nul worden'. Dat komt gedeeltelijk omdat de geweldige hoeveelheid vervuilende stoffen alle beschikbare hydroxyl

opslokken, maar ook omdat de smog zelf de ultraviolette straling tegenhoudt die noodzakelijk is voor de vorming van meer hydroxyl.

‘Het oxidatieproces dat de lucht moet schoonvegen stopte in smogsteden als Athene en Mexico-Stad,’ zegt hij. Alleen met frisse lucht van het platteland komen ze er weer bovenop. ‘Als in de toekomst grote delen van de atmosfeer net zo vervuild raken als die steden nu, dan kunnen we een algehele instorting van hydroxyl op aarde verwachten.’ Nu grote delen van Azië elk jaar onder een wolk van ‘bruine mist’ liggen zou de atmosfeer wel eens voor zo’n crisis kunnen staan. Niemand weet het.

Het zou kunnen dat er nog een extra element nodig is voor het doemscenario. Als het schoonmaakmiddel onder druk komt te staan van te veel vervuiling, dan is een hydroxyltekort het ergste wat kan gebeuren. Dus de hamvraag is: wat is het dat de productie van hydroxyl door de atmosfeer kan vertragen? Het is duidelijk dat smog een probleem is omdat die de ultraviolette straling in de lagere atmosfeer tegenhoudt. Maar een dikkere ozonlaag, het beschermende filter van de natuur tegen ultraviolette straling, kan hetzelfde effect hebben. En op dit moment is de wereld hard bezig om de beschadigde ozonlaag te repareren en hem dikker te maken. Dat schept een ongewenst dilemma.

De zorg is dat we pakweg in de afgelopen dertig jaar met de kwestie hydroxyl uitstel van executie hebben gekregen. We hebben de ozonlaag dunner gemaakt en dus meer ultraviolette straling in de lagere atmosfeer toegelaten. Dat is weliswaar slecht voor de mariene ecosystemen en het veroorzaakt waarschijnlijk meer huidkanker, maar het heeft wel gezorgd voor een extra aanmaak van hydroxyl die veel vervuilende stoffen uit de lucht verwijderde. Het valt te verdedigen dat dit de aarde mede geholpen heeft de toegenomen luchtverontreiniging te bestrijden. In de komende halve eeuw zullen we er waarschijnlijk in slagen de ozonlaag weer gezond te maken. Daar zijn goede ecologische en klimatologische redenen

voor en het is ook goed voor de volksgezondheid. Maar het zou ook een nadelig effect kunnen hebben.

Dus dat is het doemscenario. Als we de ozonlaag repareren, brengen we de productie van hydroxyl terug tot het niveau van het midden van de twintigste eeuw. Maar dat doen we op een moment dat de behoefte aan hydroxyl veel groter is dan in het midden van de twintigste eeuw. Dat zou wel eens het moment kunnen zijn dat de drempel van Madronich wordt overschreden en de oxidatieprocessen in de atmosfeer sterk achteruit gaan. Ik heb geen data, geen modellen en geen wetenschappelijke artikelen om dit scenario te rechtvaardigen. Het is niet meer dan dat: een scenario, en geen voorspelling. Maar het is een plausibele speculatie. Het zou heel goed kunnen gebeuren.

