

DEEL ZEVEN

Op het millennium

32 De hittegolf

*Het jaar dat Europa de hete adem
van de opwarming voelde*

In een dierentuin buiten Parijs, vlak bij Versailles, hielden de verzorgers de zevenentwintig ijsberen koel door ze ijs met een makreelsmaakje te voeren. In de Elzas richtte de elektriciteitsmaatschappij een waterkanon op het dak van een kerncentrale toen de buitentemperatuur tot 48 graden C opliep. In Rome stonden mensen in de rij om de boete te betalen voor het baden in de Trevi Fontein. Het was het geld waard, zeiden ze. Gewassen verdorden, bossen brandden, de elektriciteit viel uit toen de airconditioning op kantoren voluit werd gezet, rivieren, van de Donau tot de Po en van de Rijn tot de Rhône, waren tot recorddiepte gezakt.

Het was heus geen gewone hittegolf. In de eerste plaats overleden er minstens 35.000 mensen: 20.000 in Italië en 15.000 in Frankrijk. Ouden van dagen, veelal achtergelaten in appartementen zonder airconditioning terwijl hun familie op zomervakantie was, leden het meest. Ze droogden uit en raakten buiten adem en stierven bij duizenden in temperaturen die overdag vaak boven de 40 graden C uitkwamen en 's nachts dicht bij de 30 graden bleven. Het was de heetste zomer in Europa van minstens de afgelopen vijfhonderd jaar. Op het hoogtepunt van de hittegolf, op 13 augustus 2003, was het sterftcijfer in Parijs acht keer zo hoog als normaal. In bepaalde delen van de stad was er een wachtlijst van drie weken voor begrafenis.

En het waren niet alleen de mortuaria die records schreven. Dit was de eerste en enige klimaatgebeurtenis die de klimatologen bereid waren rechtstreeks toe te schrijven aan

door de mens veroorzaakte klimaatverandering. Daarvóór luidde de mantra altijd dat afzonderlijke klimaatgebeurtenissen toevallig konden zijn. Maar de hittegolf van 2003 was anders, zegt Myles Allen, een klimatoloog en statisticus van Oxford University. ‘De directe oorzaak, daar ben ik het mee eens, was een reeks van centra van hoge druk boven Europa. Die veroorzaken altijd een temperatuurstijging in de zomer, en we kunnen niet zeggen dat de kans daarop groter was geworden als gevolg van de klimaatverandering. Wat we echter wel kunnen zeggen is dat de klimaatverandering de gemiddelde temperaturen waarin die centra van hoge druk opereren veel hoger heeft gemaakt.’

Het lijkt geen twijfel dat de gemiddelde temperatuur al jaren sterk stijgt. In een groot deel van Europa was het zomergemiddelde aan het begin van het nieuwe millennium 0,5 tot 1 graad C hoger dan in de eerste helft van de twintigste eeuw. In de zomer van 2003 was de temperatuur gemiddeld 2,3 graden C hoger. Op basis van gemiddelden in het verleden kunnen we zeggen dat de hittegolf waarschijnlijk een gebeurtenis was die één keer in de duizend jaar voorkomt. Maar, zegt Allen, ‘kleine veranderingen in de gemiddelde temperatuur maken de kans op extreme gebeurtenissen veel groter.’

Een van de mooiste bevestigingen dat de zomer van 2003 buitensporig was komt van een studie die eind 2004 gepubliceerd werd. De Franse wiskundige Pascal Yiou van de Laboratoires des Sciences du Climat et de l’Environnement te Parijs had data van meer dan 600 jaar verzameld over het begin van de druivenoogst in Bourgondië. Er is een duidelijk verband tussen zomertemperaturen en het begin van de oogst, dus extrapoleerde hij terug in de tijd en construeerde een temperatuurcurve van het heden tot 1370. Het bleek dat hoge temperaturen zoals in de jaren 1990 zeldzaam waren, maar dat die wel verscheidene keren in apart staande jaren waren voorgekomen. ‘Maar de zomer van 2003 scheen volkomen uniek.’ De temperaturen lagen in Bourgondië dat jaar

bijna 6 graden C boven het langetermijngemiddelde. En als de formule van Yiou juist is, dan kwam de hoogste temperatuur daarvoor maar net 4 graden boven het gemiddelde. Dat gebeurde in 1523, tijdens een warm interval van de kleine ijstijd.

‘De hittegolf van 2003 viel ver buiten de grenzen van het normale klimaat,’ zegt Allen. Hij is niet onmogelijk zonder de opwarming van de aarde, maar wel heel erg onwaarschijnlijk. ‘Onze beste schatting is dat de kans op zo’n hittegolf vier tot zes keer zo groot is als gevolg van de klimaatverandering.’ De wetenschappers blijven maar discussiëren over hoe we ‘gevaarlijke’ klimaatverandering kunnen herkennen,’ zei hij, ‘maar voor de duizenden Europese slachtoffers van de zomer van 2003 is het wel duidelijk dat we die drempel hebben overschreden.’

En de grote hitte is nog maar net begonnen. Allen zegt dat tegen het midden van de eeuw, als de huidige opwarmings-trend doorzet, de extreme temperaturen die we in 2003 meemaakten in Europa wel eens om het jaar zouden kunnen terugkomen. Richard Betts van het Britse Hadley Centre zegt dat de risico’s voor de mensen die in de steden wonen zelfs nog groter zijn. Die voelen nu al de ergste effecten van de klimaatverandering, omdat ze ook last hebben van het ‘stedelijke-hitte-eilandeffect’. Tijdens hittegolven houden het beton, de bakstenen en het asfalt van de gebouwen en de straten de warmte veel beter vast dan het natuurlandschap buiten de steden. In de typische windstille, hogedruk-omstandigheden van een Europese hittegolf is het effect nog geprononceerder. De lucht blijft in de straten hangen en wordt steeds warmer. Het effect is vooral ’s nachts voelbaar, volgens medici een belangrijke tijd voor het menselijk lichaam om zich te herstellen van de hitte overdag.

Betts zegt dat de opwarming van de aarde het stedelijke-hitte-eilandeffect nog verder zal aanwakkeren. Tegelijk met de opwarming van het platteland zal de extra dosis hitte die in de steden gevoeld wordt toenemen – vooral ’s nachts.

33 De hockeystick

Waarom het nu echt anders is

Het was een verleidelijk beeld. Zo verleidelijk, dat het IPCC het op de cover zette van een rapport van duizend pagina's over klimaatverandering dat in 2001 werd gepubliceerd. Het panel hoopte dat het de tongen net zo los zou maken als de Keeling-curve. En de wetenschappers gaven het een pakkende naam: de 'hockeystick' noemden ze de curve. Omdat ik geen hockey speel, wist ik eerst niet wat ze bedoelden. Maar als je een hockeystick op de grond legt en ernaar kijkt als naar een grafiek, dan zie je een lange rechte lijn die aan het eind scherp omhoog knikt. En dat, volgens de auteurs van het IPCC-rapport, is de grafiek van de wereldtemperatuur in de afgelopen duizend jaar: bijna negenhonderd jaar van weinig of geen verandering, gevolgd door een eeuw met een korte, scherpe knik omhoog.

De samenstelling van de data achter de hockeystickgrafiek is een politieke *cause célèbre* geworden. Het begon met hooggespannen verwachtingen: het zou de eerste serieuze poging worden om een globaal beeld te krijgen van het klimaat in de afgelopen duizend jaar, gebaseerd op heel veel verschillende bronnen. In plaats van de temperatuur van het verleden af te leiden uit jaarringen, zoals tot dan toe werd gedaan, werden er ook andere indirecte indicatoren bijgehaald, zoals de informatie uit ijsboringen, groeiringen in koralen en sedimenten uit meren. Het idee was om de systematische vertekening te elimineren van jaarringen in bomen, want die informatie is meestal gebaseerd op bomen van het noordelijk halfrond, buiten de tropen dus, omdat alleen die bomen duidelijke jaarringen hebben.

De hockeystickgrafiek werd voor het eerst in 1998 opgesteld. Dat jaar bleek het warmste te zijn in de hele geschiedenis van meetapparatuur. Dus het was niet zo vergezocht te betogen dat 1998 het warmste jaar was in de warmste eeuw van het laatste millennium. Dat haalde de voorpagina's van de kranten. En dat bracht problemen met zich mee, niet in de laatste plaats voor de spraakzame, zelfverzekerde en sympathieke samensteller van de hockeystick: Mike Mann. Hoewel het IPCC ook andere data publiceerde die vrijwel hetzelfde beeld te zien gaven, werd Mann ervan beschuldigd dat hij op ondeugdelijke gronden tot de conclusie was gekomen dat de opwarming aan het eind van de twintigste eeuw uitzonderlijk was en dus waarschijnlijk het gevolg van vervuiling door de mens.

Het hielp denk ik ook niet dat Mann in die tijd medewerker was van de University of Virginia, thuisbasis van Pat Michaels, de klimaatscepticus met de grootste mond. Al gauw werd Mann tot 'oplichter van de maand' gebombardeerd op de website van de klimaatsceptici. Maar het waren niet alleen de gebruikelijke sujetten die zich roerden: ook serieuze klimatologen uitten hun twijfels over de methoden van Mann.

Toen ik Mann eindelijk ontmoette, was hij van Virginia verhuisd naar Penn State University, waar hij nu directeur is van het Earth System Science Center. Maar het spervuur achtervolgde hem. Voor een deel was dat terecht, voor een deel onterecht, er zat politieke munitie bij, voor een ander deel ging het om het normale tegenweer in het wetenschappelijke debat, en er zaten ook persoonlijke aanvallen bij – zoals de kwaadsprekerij van Wally Broecker over Mann die ik aan het begin van hoofdstuk 23 citeerde. Mann werd zelfs vervloekt in Washington, waar senator James Inhofe van Oklahoma hem ervan beschuldigde dat hij met de data had zitten knoeien, en waar Joe Barton, een lid van het House of Representatives uit Texas, hem sommeerde gedetailleerd verantwoording af te leggen over zijn werkmethoden en geld-

schieters. Sommigen noemde het een heksenvervolging à la McCarthy. Maar Mann scheen ertegen opgewassen en hij zette Inhofe te kakken als ‘de grootste oliegeldzakkenvuller in de Senaat’.

Ik zal nu een deel van de kritiek behandelen die tegen Mann is ingebracht, want die snijdt hout. Maar eerst wil ik kwijt dat ik nooit een kwaad woord heb gehoord over de wetenschappelijke integriteit, de verdiensten of de motieven van Mann. Hij heeft gewoon meer moed dat de meesten, en hij is meer dan anderen bereid de discussie in het openbaar te voeren – en om terug te meppen als er met modder wordt gegooid. (U kunt hem in actie horen op de website die hij samen met enkele collega’s heeft opgezet: www.realclimate.org). Een aantal onderzoekers heeft persoonlijke en psychische schade opgelopen van de aanvallen van de sceptici. Ik hoop dat dit niet met Mann gebeurt. Ik wou dat meer wetenschappers waren zoals hij.

Ten eerste: is de hockeystick een goede weergave van het historische temperatuurverloop? Kan de eindconclusie van Mann, dat de aarde in de afgelopen eeuw sneller en meer opgewarmd is dan in enige andere eeuw van het afgelopen millennium de toets der kritiek doorstaan?

De wereld van afgeleide trends is een statistisch mijnenveld. Dat komt gedeeltelijk omdat het fysisch materiaal waaruit we de toestand van het klimaat in het verleden afleiden met de tijd steeds minder gedetailleerde informatie bevat. Zo worden jaarringen van bomen kleiner als de boom ouder wordt, zodat de jaarlijkse, of zelfs de tienjaarlijkse, informatie verloren gaat. ‘Je verliest ruwweg 40 procent van de veranderingsamplitude,’ zegt jaarringenspecialist Gordon Jacoby van Lamont-Doherty. Maar dat is nog niet alles. Om een totaalbeeld te reconstrueren, moeten bij de analyse van een enkele dataset – zeg, de jaarringen van de bomen in een bos – de data van afzonderlijke bomen worden uitgemiddeld om een ‘signaal’ te detecteren in de ‘ruis’ van willekeurige

variatie en verandering op korte termijn. Bij de analyse die Mann als een van de eersten toepaste werden verschillende datasets samengevoegd, zodat die onafhankelijk verkregen signalen nog verder moesten worden geïntegreerd en weer samen-gevoegd, waarna de uitkomsten werden gemiddeld. Mann ging nog een stapje verder en koppelde de indirect verkregen uitkomsten op grond van die synthese aan de gemeten temperatuurwaarden.

Jacoby, onder anderen, opperde het bezwaar dat door de afgeleide gemiddelde waarden van de afgelopen eeuwen te combineren met de recentere gemeten waarden, die veel meer kortetermijntrends bevatten, de onjuiste indruk werd gewekt dat de recente verandering een anomalie was. 'Dat kun je gewoon niet maken als je zoveel van de veranderingsamplitude verliest in de rest van de data,' vertelde Jacoby me. Mann brengt daar tegenin dat hij in feite een van de eersten was op dit gebied die *error bars* (een figuur met betrouwbaarheidsintervallen) in zijn grafiek opnam. 'Die error bars geven aan hoeveel variantie er verloren gaat door het uitmiddelen,' zegt hij.

Maar de aantijging dat hij op de een of andere manier de data-analyse een bepaalde kant op heeft gewerkt blijft hem achtervolgen. De meest hardnekkige kritiek – die ook het meeste steun krijgt van de anti-IPCC-lobbyisten – komt van twee Canadezen: Stephen McIntyre, een wiskundige die consultant is van een oliemaatschappij, en Ross McKittrick, een econoom van de University of Guelph. Ze beweren een fundamentele fout te hebben gevonden in de statistische methode van Mann die de uitkomsten zodanig vertekent dat de grafiek in de vorm van een hockeystick eruit rolt.

Het is een technisch argument dat gaat over de manier waarop Mann alom aanvaarde wiskundige technieken gebruikte. McIntyre en McKittrick beweren dat de methode van Mann ertoe leidt dat ongewenste natuurlijke variaties worden afgevlakt, zodat de 'steel' van de hockeystick recht blijft en de opwarming van de twintigste eeuw geaccentueerd

wordt. Mann geeft toe dat daar iets in zit. Hij analyseerde de data in termen van hun afwijking van het twintigste-eeuwse niveau. En dat had onvermijdelijk tot gevolg dat er een groter gewicht werd gehecht aan de data die het grootste verschil toonden met die periode.

Maar de ergste beschuldiging was dat hij op de een of andere manier uit het niets die hockeystick tevoorschijn had getoverd – dat hij de data had geselecteerd op een hockeystickvormige trend, zoals zijn critici het uitdrukten. McIntyre en McKitrick kwamen met hun eigen analyse, die een stijging te zien gaf van de temperatuur in de vijftiende eeuw, toen het volgens hen net zo warm was als in de twintigste eeuw. Er zat een grote knik in de steel van hun hockeystick. Toen die in 2005 werd gepubliceerd, werd hun analyse door sommigen ontvangen als de weerlegging van de studie van Mann.

Maar niet alleen Mann stond bloot aan kritiek, dat gold ook voor McIntyre en McKitrick. Zou hun ‘weerlegging’ van Mann de toets der kritiek kunnen doorstaan? In de loop van 2005 kwamen drie verschillende onderzoeksgroepen tot de conclusie dat de bevindingen van Mann beter waren dan die van zijn critici. De laatsten hadden hun data veel subjectiever gebruikt dan hij en willekeurig gegevens buiten beschouwing gelaten om tot hun conclusie te kunnen komen. Als je al die vertekeningen corrigeerde leek hun grafiek heel erg op die van Mann – een conclusie die in 2006 nog eens werd onderstreept toen Keith Briffa, een gerespecteerde Britse jaarringenspecialist van de University of East Anglia, de meest complete analyse tot nog toe publiceerde, die aantoonde dat de twintigste eeuw de warmste is geweest in minstens 1200 jaar.

Als het criterium voor goede wetenschap is dat dezelfde uitkomsten verkregen worden door andere onderzoekers met verschillende methoden, dan wint Mann. Meer dan tien onderzoeken met verschillende indirecte datasets en verschillende analytische technieken komen allemaal met de hockeystick van Mann uit de bus. Geen identieke hockeystick, dat

niet, maar wel met hetzelfde basispatroon van 900 jaar lang opmerkelijk weinig variatie, gevolgd door een scherpe knik omhoog in de temperaturen van de laatste decennia.

De enige onverklaarde factor is de geringe evidentie in de meeste van deze onderzoeken voor de middeleeuwse warme periode en de kleine ijstijd. Maar er schijnt een oplossing voor dat raadsel te zijn. Men is het er steeds meer over eens dat de hardste bewijzen voor het bestaan van zowel een middeleeuwse warme periode als een kleine ijstijd afkomstig zijn van de noordelijke breedten. ‘Wat we weten van de kou in de kleine ijstijd is voornamelijk een Europees en Noord-Atlantisch fenomeen,’ zegt Keith Briffa. Het interessante is dat er steeds meer aanwijzingen komen van allerlei nieuwe indirecte datasets dat andere delen van de wereld klimaat-trends vertoonden die tegengesteld waren aan die in Europa. De tropische Stille Oceaan schijnt te zijn afgekoeld in de middeleeuwse warme periode en opgewarmd tijdens de kleine ijstijd. Eén ijskern van de Zuidpool toont temperaturen tijdens de middeleeuwse warme periode die 3 graden C lager liggen dan in de kleine ijstijd. Onder die omstandigheden, zegt Mann, is het niet verbazend dat zijn wereldwijde schatting van de temperaturen niet veel verschil laat zien tijdens die vroegere klimaatverschuivingen. Ze hadden ongetwijfeld een grote regionale invloed op het klimaat, maar het cumulatieve effect op de temperatuur in de hele wereld was klein.

Ik wil me met dit boek niet sterk maken voor de stelling dat het klimaat in het verleden niet veranderde. Het is duidelijk dat bepaalde delen van de aarde flink opwarmden en afkoelden tijdens de middeleeuwse warme periode en de kleine ijstijd. In andere delen vonden weer andere verschuivingen plaats. In het westen van Noord-Amerika heerste er eeuwenlang droogte tijdens de middeleeuwse warme periode. Zelfs Broecker, die stelt dat de kleine ijstijd een wereldwijd fenomeen was, geeft toe dat de bewijzen voor een middeleeuwse warme periode ‘fragmentarisch en indirect’ zijn. Wat we wel kunnen stellen is, dat in het afgelopen millennium de meeste

klimaatverandering tot aan de twintigste eeuw te maken had met de herverdeling van warmte en vocht over de aardbol, en niet met grote veranderingen in de totale gemiddelde temperatuur. Pas sinds kort is er veel warmte aan het systeem toegevoegd door de uitstoot van honderden miljarden ton broeikasgassen in de atmosfeer. De recente opwarming van de aarde zou wel eens de eerste wereldwijde opwarming kunnen zijn sinds het einde van de ijstijd.

De discussie over de hockeystick is een interessante zijlijn in het debat over de klimaatverandering. Maar het blijft een zijlijn. Het maakt op dit moment voor de aarde als geheel weinig uit of de middeleeuwse warme periode wel of niet warmer was dan nu – of dat het überhaupt wel een warme periode was. De sceptici wilden met hun aanval op de hockeystick van Mann altijd zeggen dat als de huidige opwarming niet uniek is, het argument dat de aarde opwarmt door toedoen van de mens ongeldig is. Maar dat is nonsens. Briffa is niet de enige die precies het tegendeel betoogt. Het meest verontrustende zou zijn dat de middeleeuwse warme periode in feite even warm was als de sceptici beweren, zegt hij. Waarom? Omdat 'een grotere natuurlijke variabiliteit in het klimaat op de lange termijn duidt op een grotere gevoeligheid van het klimaat voor een forcerende werking, of die nu van de zon komt of van de broeikasgassen. Dus een grotere klimaatvariatie in het verleden impliceert een grotere klimaatverandering in de toekomst.'

34 Orkaanseizoen

De stormbal hijsen na Katrina

Corky Perret verloor alles toen de orkaan Katrina toesloeg. Zijn huis aan het strand langs Highway 90 tussen Gulfport en Biloxi, Mississippi, werd aan splinters geslagen door windsnelheden van 220 kilometer per uur en weggevaagd door een vloedgolf van 10 meter hoog die op het strand en op de snelweg sloeg. 'Er was niks meer over, alles was volledig vernietigd,' vertelde hij me weken later. De zeebanken in de Golf van Mexico die ooit bescherming tegen stormen boden, waren ook bezweken. Perret wist niet of de orkanen in de toekomst nog erger zouden worden, maar zonder die zeebanken zouden de gevolgen in elk geval erger zijn.

De huizen langs Highway 90 waar Perret woonde, tezamen met de hotels en de vakantiekolonies, waren voor het merendeel tussen de jaren 1970 en 1990 gebouwd, in een tijd toen er nog weinig orkanen waren in de Golf van Mexico. Toen ze hoorden dat er in de nabije toekomst geen vermindering te verwachten is vertrok een aantal van zijn burens voorgoed. Het enige wat ze in de toekomst zagen gebeuren was nog meer orkanen en nog meer ravage. Ze vertrokken naar Jackson of Dallas of Memphis, of waar dan ook in het binnenland. Maar toen we elkaar eind 2005 spraken had Perret zijn baan nog als directeur van de zeevisindustrie van de staat Mississippi, en hij wist niet zeker wat hij ging doen. Hij wilde blijven en de boel weer opbouwen, maar was dat verstandig?

2005 was een uitzonderlijk jaar in de Atlantische Oceaan. Er woedden zoveel tropische stormen dat de weermannen voor het eerst geen namen meer voor ze hadden. Wilma werd

de krachtigste Atlantische storm ooit geregistreerd. Katrina bracht een hele Amerikaanse kust op de knieën, inclusief de grote stad New Orleans. Het was het tweede orkaanjaar op rij dat in de weerberichten ‘uitzonderlijk’ en ‘zonder precedent’ werd genoemd, en het kwam na een decennium van verhoogde orkaanactiviteit dat buiten de grenzen trad van wat voorheen als natuurlijk werd beschouwd. Wat is er aan de hand? Worden de orkanen vernietigender naarmate de aarde verder opwarmt? Staat ons nog erger te wachten? Die vragen zijn niet alleen belangrijk voor de mensen in de vuurlinie rond de Golf van Mexico en de Caribische Zee, of in de tropische zones van de Indische en Stille Oceaan, want als de olieproductie rond de Arabische Golf getroffen wordt, of als superorkanen economische megacentra zoals Sjanghai en Tokio met volle kracht treffen, dan voelen we dat allemaal.

Tot 2005 waren de meeste vooraanstaande orkaanexperts in de wereld optimistisch. De toename van het aantal orkanen in de noordelijke Atlantische Oceaan in de voorafgaande tien jaar viel binnen een normale cyclus. Er waren wel eerder krachtige orkanen geweest, van de jaren 1940 tot in de jaren 1960. Klimaatmodellen voorspelden dat zelfs een verdubbeling van de concentratie kooldioxide in de atmosfeer slechts een toename van ongeveer tien procent in de orkaanintensiteit zou betekenen. Maar in dat jaar verdampte de consensus. Een stroom artikelen verscheen waarin werd beweerd dat de orkanen door de verhoging van de temperatuur in de voorafgaande dertig jaar intenser waren geworden. Niet frequenter, maar intenser, de wind was krachtiger, ze duurden langer, de regen hield langer aan en het tracé werd minder voorspelbaar. De trend deed zich duidelijk in alle oceanen voor, zeiden ze. Van New Orleans tot Tokio, niemand was veilig.

Een van de auteurs, Kerry Emanuel van het MIT, zei: ‘Mijn uitkomsten duiden erop dat opwarming in de toekomst wel eens zou kunnen leiden tot een steeds toenemende vernietigingskracht van tropische orkanen en – gezien een steeds toenemende bevolking aan de kust – een substantiële toename

van schade direct of indirect veroorzaakt door orkanen in de eenentwintigste eeuw.' Net een week na de verwoesting van New Orleans was dat een niet mis te verstane boodschap aan Corky Perret en de mensen aan de kust van de Golf van Mexico. Opnieuw beginnen had geen zin, want de volgende superorkaan stond al weer in de startblokken. Maar de claims brachten een scheuring teweeg onder de hogepriesters van de orkaanvoorspelling. Velen, zoals veteraan-weersvoorspeller William Gray van Colorado State University, zeiden dat ze geen opwaartse trend zagen en geen invloed van de mens. Ze beschuldigden de auteurs van de jongste artikelen van eenzijdigheid of nog erger. Wie had er gelijk?

Orkanen zijn een intrinsiek deel van het klimaatstelsel. Er zijn altijd orkanen geweest. Ze beginnen als onweersclusters die worden gevormd wanneer warme, vochtige lucht van de tropische oceaan opstijgt. Met het stijgen van de lucht condenseert de waterdamp, waardoor energie vrijkomt die de lucht verwarmt, zodat die nog verder stijgt. Als er genoeg stormwolken dicht bij elkaar zitten, kunnen ze een 'zuil' vormen, zoals Emanuel het noemt, die vanaf de zeespiegel tot verscheidene kilometers in de troposfeer reikt. De lage druk onder aan de zuil zuigt nog meer lucht in, die energie oppikt in de vorm van waterdamp bij de instroom en die energie weer afgeeft als hij opstijgt. Dat verlaagt de druk nog verder.

Intussen gaat de orkaan draaien door de omwenteling van de aarde, die inwerkt op de ingaande luchtstroom. Onder de juiste omstandigheden kan een tropische storm snel in een orkaan veranderen wanneer de windsnelheid toeneemt. De kracht van die systemen is verbluffend. Chris Landsea van de National Oceanic and Atmospheric Administration in Miami heeft berekend dat een gemiddelde orkaan op één dag evenveel energie kan genereren als een miljoen Hirosjimabommen. Gelukkig voor alle betrokkenen wordt maar een fractie van die energie omgezet in wind.

Wereldwijd zijn er per jaar ongeveer vijfentachtig tropische orkanen, waarvan er ongeveer zestig orkaankracht

bereiken. Dat getal is vrij stabiel gebleven al zolang mensen orkanen hebben geteld. Maar de distributie van orkanen varieert heel erg van jaar tot jaar. In 2005, bijvoorbeeld, werd de Atlantische Oceaan gegeseld, maar bleef de Stille Oceaan betrekkelijk rustig. En die variatie schijnt grotendeels verband te houden met de temperatuur van het zeewater. De aanvankelijke zuil van vochtige lucht wordt alleen gevormd als de temperatuur van het oppervlaktewater hoger is dan 26 graden C. Bovendien schijnt de orkaan met elke graad boven die drempel krachtiger te worden. Toen Katrina in augustus 2005 overschakelde van een orkaan in de eerste categorie naar een orkaan in de vijfde categorie, was het oppervlaktewater in de Golf van Mexico rond de 30 graden C, een record voorzover we wisten. Of die recordtemperatuur van het zeewater te wijten is aan de klimaatverandering of niet (en de meesten vinden van wel), hij gaf Katrina in elk geval extra kracht toen de orkaan vanaf Florida over de Golf naar de kust van Louisiana raasde.

Naarmate het zeewater opwarmt, overschrijden steeds meer oceanen de drempel van 26 graden. Het zeewater in de tropen is nu al met 0,5 graad opgewarmd. Het simpele verband tussen de temperatuur van het oppervlaktewater en het ontstaan en de kracht van orkanen heeft de opvatting versterkt dat een warmere wereld onvermijdelijk leidt tot meer orkanen, tot sterkere orkanen en tot het ontstaan van orkanen op plaatsen waar ze tot nog toe niet voorkwamen. Maar zo eenvoudig zit de wereld niet in elkaar, zegt William Gray. Wat in feite de opwaartse stroming aandrijft die de stormwolken genereert, zegt hij, is niet de absolute temperatuur aan de zeespiegel, maar het verschil tussen de temperatuur aan de zeespiegel en de temperatuur boven in de stormzuil. De klimaatmodellen voorspellen dat door de opwarming van de aarde de lucht op grotere hoogte warmer wordt. Als hij gelijk heeft, dan zouden in de toekomst wel eens pas orkanen kunnen ontstaan als de temperatuur aan de zeespiegel 28 graden C is of zelfs meer is, tegen nu 26 graden C. Uit-

eindelijk, betoogt Gray, zou het vermogen van de tropen om orkanen te genereren wel eens gelijk kunnen blijven.

Er zijn nog andere beperkingen aan het ontstaan en de intensiteit van orkanen. Hoe warm het zeewater ook wordt, de lucht kan niet overal tegelijk opstijgen. Op sommige plaatsen moet hij dalen, welke temperatuur de oceaan ook heeft. En veel beginnende orkanen worden weggewaaid door horizontale winden die de kop eraf blazen. Volgens de klimaatmodellen zullen door de opwarming van de aarde de windsnelheden aanwakkeren tot een niveau waarop ze orkanen verstoren. Een andere verstoring is stof, dat in de jaren dat de Sahara droog is vaak over de Atlantische Oceaan waait.

Maar er zijn trends die de kans op grote stormen verhogen. De meeste tropische stormen doven uit omdat ze het contact met hun 'brandstof' verliezen, namelijk de warmte van het zeewater. Het duidelijkste geval waarin dat gebeurt is wanneer een orkaan over land passeert, maar het gebeurt ook op zee. Als de storm aan kracht wint, zweept hij de golven van de oceaan op, waardoor het warme oppervlaktewater vermengd wordt met het koelere water op grotere diepte. Het oppervlaktewater koelt af en dat kan het einde van de storm zijn. In de praktijk kan een orkaan alleen aan kracht winnen als de warmte tot tientallen meters onder de oppervlakte is doorgedrongen. En elk jaar dringt de warmte dieper in de oceanen door. Dat heeft zeker te maken met de opwarming van de aarde, en dat creëert de ideale condities voor meer krachtige onweersstormen. Ook wat dat betreft is Katrina een schoolvoorbeeld. De orkaan werd steeds sterker onderweg naar New Orleans, omdat hij over het water van de Golf van Mexico streek dat erg warm was, niet alleen aan de oppervlakte, maar wel tot op een diepte van ruim 100 meter.

Al was 2006 een betrekkelijk rustig jaar, in het afgelopen decennium is een hele rits records in de noordelijke Atlantische Oceaan gebroken. Van 1995 tot 1998 waren er meer Atlantische orkanen dan ooit tevoren in zo'n korte tijd – een record

dat pas in 2004 en 2005 gebroken werd. Het seizoen van 1998 was het eerste in honderd jaar dat er (op 25 september) vier orkanen tegelijk op de weerkaarten van de noordelijke Atlantische Oceaan prijkten. En kort daarop kwam de orkaan Mitch, de meest vernietigende op het westelijk halfrond in 200 jaar. Hij werd gevoed door buitengewoon warm water in de Caribische Zee en raasde eind oktober 1998 over Midden-Amerika, om met zijn stortregens rampspoed te brengen aan Honduras en Nicaragua – zo'n tienduizend mensen kwamen om in landverschuivingen en overstromingen.

De Atlantische Oceaan krijgt ook orkanen op plaatsen waar ze nooit eerder gesignaleerd zijn. In maart 2004 ontstond voorzover bekend de eerste orkaan in het zuiden van de Atlantische Oceaan, die Zuid-Brazilië trof. Het ontstaan van die orkaan, later Catarina genaamd, was verrassend. Het griezeligst was dat hij heel dicht bij een zone van de oceaan was ontstaan die een paar jaar eerder door klimatologen van het Britse Hadley Centre was aangewezen als mogelijke nieuwe plaats voor de vorming van orkanen in een warmere broeikaswereld. Maar zij hadden voorspeld dat het pas in 2070 kon gebeuren. Velen beschouwden Catarina als nóg een teken dat de opwarming van de aarde zich vroeger dan gedacht liet gelden in de wereld der orkanen.

De vraag van tien miljoen (letterlijk voor de verzekeringsmaatschappijen) is of er op dit moment een merkbare bijdrage is van een warmer klimaat die de frequentie en de intensiteit van de orkanen verhoogt. Kerry Emanuel betoogt dat, wat de natuurlijke variatie ook is, de 'grote toename' in orkanen in de noordelijke Atlantische Oceaan in de afgelopen tien jaar 'zonder precedent is en waarschijnlijk het gevolg van de opwarming van de aarde'. Jim Hansen gooide eind 2005 ook zijn gewicht in de schaal en stelde dat klimaatverandering de oorzaak was van een warmere tropische Atlantische Oceaan en dat 'de stelling dat het ontstaan van orkanen niets te maken heeft met de opwarming van de aarde irrationeel en onhoudbaar lijkt.'

De kwestie van orkaantrends in de noordelijke Atlantische Oceaan zal nog vele jaren de gemoederen bezighouden. Het ‘signaal’ van klimaatverandering is moeilijk te onderscheiden van de ‘ruis’ van de natuurlijke variatie. Maar het is al te makkelijk om geobsedeerd te raken door de orkanen in de noordelijke Atlantische Oceaan, terwijl ze maar een tiende uitmaken van het wereldwijde totaal – en maar een heel klein deel daarvan komt gewoonlijk aan land. De grootste bron van orkanen is, en zal waarschijnlijk blijven, de westelijke Stille Oceaan, waar ze kwetsbare en dichtbevolkte landen zoals de Filipijnen, Vietnam en China terroriseren. Dus het totale beeld is het belangrijkste, en dat zal waarschijnlijk het antwoord geven op de vraag in hoeverre de klimaatverandering van invloed is op de orkanen.

Verschillende onderzoeksgroepen hebben de gegevens over orkanen wereldwijd bekeken om te zien of er tekenen zijn van een trend sinds de opwarming van de aarde. Emanuel is tot de conclusie gekomen dat stormen gemiddeld 60 procent langer duren en windsnelheden veroorzaken die 15 procent hoger zijn dan in de jaren 1950. De schade die een orkaan aanricht is niet evenredig met de windsnelheid, maar met de windsnelheid tot de derde macht. En de uitkomsten van Emanuel wijzen erop dat de vernietigende kracht van een doorsnee orkaan met een schrikbarende 70 procent is toegenomen. ‘De wereldwijde tropische orkaanactiviteit reageert sterk op de opwarming van de aarde,’ zegt hij.

Zijn zienswijze wordt gaandeweg door anderen gedeeld. Luttele weken na het verschijnen van Emanuels artikel in de herfst van 2005 publiceerden drie andere vooraanstaande orkaandeskundigen een vrijwel gelijklopende alarmerende conclusie. Peter Webster en Judy Curry van het Georgia Institute of Technology en Greg Holland van NCAR kwamen tot de conclusie dat het aantal orkanen wereldwijd weliswaar niet was gestegen, maar dat de frequentie van de krachtigste stormen – categorie 4 en 5 – sinds het begin van de jaren 1970 bijna was verdubbeld. Ze maakten 35 procent uit van

het totaal tegen 20 procent nog maar dertig jaar daarvoor. Die trend, zeggen ze, was wereldwijd, en ze waren het met Emanuel eens dat die duidelijk verband hield met de wereldwijde stijging van de zeetemperatuur. Dat maakte het buitengewoon onwaarschijnlijk dat de oorzaak een natuurlijke cyclus was, want die spelen zich op betrekkelijk korte termijn af en blijven beperkt tot afzonderlijke oceaانبekkens. 'We kunnen met het volste vertrouwen zeggen dat de trends in de temperaturen van het oppervlaktewater in de oceanen en de intensiteit van orkanen verband houden met klimaatverandering,' verklaarde Curry.

William Gray en een aantal andere traditionele orkaanvoorspellers hebben die bevindingen aangevochten met de bewering dat een deel van de data – vooral oude schattingen van windsnelheden in de Stille Oceaan die dateren van de jaren 1970 – vol fouten zit. In steeds giftiger termen betoogde Gray dat de conclusie van die artikelen gewoon niet waar kon zijn. Emanuel en Webster geven toe dat de data niet zo goed zijn als eigenlijk zou moeten, maar 'Gray heeft mij niet op problemen met de data kunnen wijzen waar ik me niet al van bewust was,' vertelde Emanuel me enigszins geïrriteerd. Webster zegt dat Gray 'geen poot heeft om op te staan'.

Wat moeten we hiermee? Er is tot nog toe niets unieks aan de afzonderlijke orkanen in het recente verleden, hoewel Katrina, Wilma en Mitch duidelijk de grenzen van het normale overschrijden. De grootste en krachtigste orkaan ooit waargenomen, Typhoon Tip, met windsnelheden van meer dan 300 kilometer per uur, scheerde een kwarteeuw geleden, in 1979, vlak langs Japan. De storm die Galveston in 1900 trof maakte 10.000 slachtoffers, veel meer dan Katrina. Beide verbleken bij de orkaan van 1970, die misschien wel een half miljoen slachtoffers maakte in wat nu Bangladesh is.

Maar ook al maken we nog geen superorkanen mee, er verschijnt al wel iets als een menselijke 'vingerafdruk' in het toenemende aantal orkanen die krachtiger zijn en langer duren. Dat is nog geen bewijs voor een wereldwijde lange-

termijntrend die verband houdt met de opwarming van de aarde, maar de opvallende bevinding van zowel Emanuel als Webster, dat er een consistent wereldwijd verband bestaat tussen de stijging van de zeetemperatuur en de toegenomen kracht van stormen, is een sterke aanwijzing voor zo'n verband. Wat de theoretische haken en ogen ook mogen zijn, voorlopig ziet het ernaar uit dat, zoals klimatoloog Kevin Trenberth van de National Oceanic and Atmospheric Administration in Boulder, Colorado zegt: 'een hoge temperatuur van het oppervlaktewater in de oceanen voor krachtiger stormen zorgt.'

Het is een raadsel dat de wetenschappers tot nog toe niet hebben opgemerkt dat de moderne orkanen zoveel vernietigender zijn. Het lijkt geen twijfel dat orkanen door de bank genomen de afgelopen jaren veel meer schade hebben aangericht. Maar de dominante zienswijze was tot voor kort dat het een probleem is van falende planning, toenemende bevolkingsdichtheid en meer mensen die op kwetsbare plekken wonen. De vakantiekolonies langs Highway 90 en de uitgestrekte krottenwijken aan de kusten van Azië ondersteunen die zienswijze min of meer. Maar de nieuwe data wijzen erop dat er meer aan de hand is. Veel meer. En dat het grootste deel van de extra schade het gevolg is van het feit dat de stormen zelf krachtiger worden. De trend lijkt zich voort te zetten.

35 Ozongaten in de broeikas

*Waarom miljoenen bloot zullen staan
aan gevaarlijke straling*

Joe Farman is een wetenschapper van de oude school. Stompje potlood en een velletje papier. Hij rookt pijp en drinkt van dat donkere lauwe bier. Hij heeft die verre blik in zijn ogen die je vaak ziet bij mensen die een tijdje aan de Zuidpool hebben doorgebracht. Hij is nu gepensioneerd van de British Antarctic Survey (BAS), waar hij vrijwel zijn hele arbeidzame leven heeft doorgebracht in een respectabele maar bepaald niet hoge functie. Of althans dat was het geval tot 1985, toen hij een van de meest geciteerde artikelen van dat decennium schreef. Hij is de man die het ozongat boven de Zuidpool ontdekte. En hoe dat gebeurde – of liever, hoe dat bijna niet gebeurde – is onthullend.

Een kwarteeuw geleden had Farman het beheer over de Dobsonmeter van de BAS, die toen al vele jaren op de basis van de BAS aan Hally Bay, op een ijsplaat voor kust van West-Antarctica, naar de hemel gericht stond om de diepte van de ozonlaag in de stratosfeer te meten. Jarenlang hadden zijn superieuren geprobeerd een einde te maken aan de metingen en het oude instrument terug te halen. Er was immers al jaren niets interessants mee gemeten, zeiden ze, en tegen die tijd cirkelden er satellieten om de aarde die de ozonlaag continu in de gaten hielden. Metingen vanaf de grond werden als overbodig beschouwd.

Maar Farman verzette zich en zag in 1982, vlak nadat de zon na de lange poolnacht weer was opgekomen, een reeks ongebruikelijke en abrupte fluctuaties in de ozonmetingen. Het jaar daarop gebeurde het weer.

‘Ik vroeg aan de Amerikanen of ze ook zoiets hadden gezien met hun satellieten,’ vertelde hij me later. ‘Ze zeiden van niet, dus ik nam aan dat mijn oude apparaat het loodje had gelegd.’ Maar hij was nieuwsgierig genoeg om het daar niet bij te laten. Hij vond nog een andere Dobsonmeter in Cambridge, die hij in 1984 mee naar de Zuidpool nam om zijn metingen te controleren. Die mat dezelfde waarden – en nog hogere. Aan de data van Farman viel nu niet meer te twifelen. Hij zag een diep gat in de ozonlaag boven de basis ontstaan. Het bleef wekenlang bestaan, waarna het weer sloot. ‘Toen wisten we zeker dat er iets spectaculairs was gebeurd,’ zei Farman. Op sommige plaatsen verdween 90 procent van de ozonlaag als gevolg van chemisch reacties die kennelijk uiterst snel, in een paar dagen tijd, verliepen.

De ozonlaag beschermt het oppervlak van de aarde tegen gevaarlijke vormen van ultraviolette straling van de zon. Zonder die filter zouden er epidemieën uitbreken van huidkanker, staar en vele andere ziekten, en zouden ook belangrijke ecosystemen worden beschadigd. Het leven op aarde is geëvolueerd onder de beschermende ozonlaag en zou het zonder die paraplu veel moeilijker krijgen.

Al meer dan tien jaar maakten de wetenschappers zich zorgen over de ozonlaag. Ze waren bang dat door de mens vervaardigde chemische verbindingen, zoals cfk’s in spuitbussen en ijskasten, de ozonlaag dunner zouden maken. Maar niemand had ooit gedacht dat er een gat in zou vallen. En wel het minst boven de Zuidpool, die het verst van de zone af lag waar die chemicaliën gemaakt en gebruikt werden, en ze hadden zeker niet gedacht dat het in razendsnel verlopende reacties binnen een paar dagen zou gebeuren. Men dacht dat de aarde zo niet functioneerde. Farman stak zijn pijp in zijn mond en toog aan het werk. Hij had zijn data – checken bij NASA had geen zin – en hij wilde zijn resultaten zo snel mogelijk in de wetenschappelijke literatuur krijgen. Misschien voelde hij dat dit het moment was van zijn roem. Hij was zich in elk geval dood geschrokken van wat hij vond en hij

was bezorgd genoeg om alle borrels in 1984 in Cambridge over te slaan, zodat hij zijn artikel af kon maken. Het was getiteld 'Large Losses of Total Ozone in Antarctica' ('Massaal verdwijnen van de gehele ozonlaag in Antarctica') en hij stuurde het op kerstavond naar *Nature*.

De redacteuren van het tijdschrift vonden de zaak niet zo urgent als Farman. Ze deden er drie maanden over om zijn artikel goed te keuren en nog eens twee maanden om het te publiceren. Toen het eindelijk verscheen, waren de wetenschappers van NASA verbijsterd. Ze hadden nog steeds niet gemerkt dat er iets was verdwenen in de atmosfeer boven de Zuidpool. Maar ze konden de metingen van de twee Dobsonmeters, hoe oud ze ook waren, niet negeren. Ze bekeken de ruwe data van hun satellieten en kwamen tot de ontstellende ontdekking dat hun instrumenten al die tijd het ontstaan en het groter worden van het gat in de ozonlaag hadden gedetecteerd, al vóór Farman het had gezien. Maar de computers aan de grond, die de stroom getallen analyseerden, waren zodanig geprogrammeerd dat ze alle extreme metingen veronachtzaamden. En de meetgegevens van de ozonlaag vielen zeker in die categorie. Dat, zoals Farman er als de kippen bij was om te onderstrepen, was een goede les voor de high-techwetenschap. Het was ook een triomf voor de wetenschappers van de oude school en voor het onvermoeibaar vergaren van ogenschijnlijk vervelende en onnutte data over het milieu.

De bevindingen van Farman werden snel door Paul Crutzen, die de complexe chemie van de ozonlaag grotendeels ontrafeld had, gekoppeld aan specifieke chemische reacties met cfk's die elk jaar uitsluitend in de lente, in de uniek koude lucht boven de Zuidpool, plaatsvonden. Bij temperaturen lager dan ongeveer -90 graden C vormen zich wolken in de stratosfeer boven de Zuidpool. Dat worden 'polaire stratosfeerwolken' genoemd. Het blijkt dat de uiterst snelle reacties alleen plaatsvinden op het oppervlak van de bevroren deeltjes

in die wolken. Voor die reacties is zowel de lage temperatuur nodig die de wolken doet ontstaan als de zonne-energie die ze op gang houdt. En er is een kritieke periode van een paar weken waarin beide beschikbaar zijn: als de zon net opkomt en de lucht nog niet genoeg is opgewarmd om de wolken weg te branden. Daarna warmt de lucht op en herstelt de ozonlaag zich, maar die reparatie duurt een paar maanden.

De ontdekking van Farman en de analyse van Crutzen bracht de wereld uiteindelijk zover dat er harde maatregelen werden genomen tegen ozonvretende chemicaliën. Het Montreal Protocol werd in 1987 getekend. Langzaam, zeer langzaam nemen nu de concentraties cfk's en andere ozonvreters in de stratosfeer af. En de ozonlaag boven de Zuidpool geneest even langzaam, ofschoon het nog wel een eeuw kan duren voordat hij volledig hersteld is, ook als alle beloften van de onderhandelaars worden waargemaakt. Maar het was kantje boord.

En de zaken hadden nog veel erger kunnen zijn, zegt Crutzen. 'Achteraf gezien hebben we ontzettend veel geluk gehad dat de industrie in het begin van de vorige eeuw ervoor koos chloorverbindingen en geen broomverbindingen, die daar heel erg op lijken, in hun spuitbussen en ijskasten te stoppen.' Hoe dat zo? Broomverbindingen zijn even effectieve koelstoffen als hun chloorequivalenten. Maar per atoom is broom honderd keer efficiënter in de afbraak van ozon dan chloor. Het was puur geluk dat Thomas Midgley, de Amerikaanse chemicus die de cfk's ontwikkelde, niet voor de broomvariant koos. 'Je moet er niet aan denken,' zegt Crutzen, 'maar als hij broom had gekozen, dan zouden we nu iets heel wat ergers hebben gehad dan een gat in de ozonlaag boven de Zuidpool. Dan zouden we een catastrofaal ozongat hebben gehad, overal en in alle jaargetijden in de jaren 1970, voordat we zelfs maar wisten wat er aan de hand was.'

De wereld heeft heel veel geluk gehad. Of heeft tot nu toe heel veel geluk gehad. Dezelfde combinatie van lage temperatuur en accumulerende gassen die zo'n vernietigende werking

had boven de Zuidpool kan soms ook boven de Noordpool ontstaan. De omstandigheden daar zijn niet zó gunstig voor ozonafbraak, omdat de atmosfeer niet zo stabiel is en de extreem lage temperaturen er minder vaak voorkomen. Maar het kán gebeuren en het is een paar keer bijna raak geweest.

Eén keer gebeurde het in januari 2005. Anne Hormes, die aan het hoofd staat van het Duitse researchstation in Ny-Alesund op Spitsbergen, vertelde me het verhaal toen ik daar een paar maanden later op bezoek kwam. De temperatuur in de lagere stratosfeer boven Spitsbergen was een paar dagen naar -98 graden C gezakt, 8 graden onder de drempelwaarde voor de vorming van polaire stratosfeerwolken, een waarde die zelfs voor de Zuidpool zeer laag is. 'We waren bang dat er een erg groot gat in de ozonlaag zou vallen,' zei ze. 'En als de temperatuur nog een paar weken zo laag was gebleven, tot de zon opkwam om de chemische reacties aan te drijven, zou dat zeker gebeurd zijn.' Dat zou het eerste echte gat in de ozonlaag boven de Noordpool geworden zijn en een belangrijke gebeurtenis voor het milieu.

Anderen delen haar bezorgdheid. Drew Shindell, een ozonexpert van het Goddard Institute for Space Studies in New York, een onderdeel van NASA, zegt: 'De gemiddelde wintertemperaturen dalen in de stratosfeer boven de Noordpool. 2005 was een erg koud jaar. Maar een feitelijk verlies van ozon hangt van het precieze tijdstip af. Tot dusver hebben we geluk gehad.' Maar hij betwijfelt of we dat in de toekomst zullen hebben. Hoe komt dat? Hoe komt het dat het risico op een gat in de ozonlaag nog steeds toeneemt terwijl de chemicaliën die daar verantwoordelijk voor zijn in de stratosfeer afnemen?

Het probleem is dit. In de lagere atmosfeer houden de broeikasgassen warmte vast, maar in de stratosfeer hebben ze het tegengestelde effect en zorgen voor meer ontsnapping van warmte in de ruimte. Dat gebeurt wereldwijd, maar voor een deel vindt de sterkste afkoeling plaats boven gebieden met de grootste opwarming aan de oppervlakte. Zoals de

Noordpool, waar de toestand hoog in de lucht steeds meer op die van de Zuidpool gaat lijken. Naarmate de stratosfeer afkoelt, wordt het risico op de vorming van stratosfeerwolken groter en daarmee het risico op verlies van ozon.

Er is nog een andere risicofactor. De warmere troposfeer, waar sterkere convectiestromen donderwolken helemaal omhoog naar de grens met de stratosfeer stuwen, zou wel eens meer waterdamp in de stratosfeer kunnen injecteren. Voorzover we weten is de stratosfeer in het verleden altijd erg droog geweest. Extra waterdamp is dus potentieel een grote verandering. En meer waterdamp zal ook de kans op de vorming van polaire stratosfeerwolken doen toenemen. ‘Als het veel vochtiger wordt, dan wordt de afbraak van ozon erger,’ zegt Schindell. Er zijn aanwijzingen dat dit al gebeurt, hoewel de gegevens schaars zijn. ‘De concentraties waterdamp in delen van de lagere stratosfeer zijn in de afgelopen zestig jaar verdubbeld,’ zegt hij.

In de jaren 2005-2007 ontstond er geen gat in de ozonlaag boven de Noordpool omdat de zon nog niet opkwam toen de lucht op zijn koudst was. Maar in de lente van dat jaar vond aan de Noordpool wel het grootste ozonverlies plaats in veertig jaar. Ruim een derde van de ozon verdween, en op sommige plaatsen liepen de verliezen op tot 70 procent. Luchtmassa’s met deze verminderde ozonconcentraties verspreidden zich over Scandinavië en Groot-Brittannië en kwamen zelfs een paar dagen lang helemaal tot in Italië. Gauw zal er een jaar komen waarin de zon opkomt als de temperaturen nog laag genoeg zijn voor een op hol slaande ozon-destructie. En als dat gebeurt, kunnen er miljoenen mensen onder dat gat komen te zitten. Dat is een andere onverwachte consequentie van de opwarming van de aarde.

