

## *Eén graad*

### Amerika's sluimerende woestijn

Je zou ze zo voorbij lopen. Wandelaars komen hier niet veel, en een enkeling die wel opduikt zal zich niet gauw afvragen wat die paar oude boomstronken daar in die rivierbedding doen. In elk geval is deze verlaten plek, waar de kloof van de West Walker River op zijn smalst is en zich langs de oostelijke flanken van de Californische Sierra Nevada naar beneden stort, geen oord om lang te blijven; de streek is berucht om zijn onverwachte stortbuien en plotselinge hoogwater.

Maar deze boomstronken vertellen een verhaal. Op een bepaalde manier kunnen dode bomen praten. Een opmerkelijke wandelaar of een oplettende sportvisser zou zich op het hoofd krabben; wat doen ze in die rivierbedding, op een plek waar verder geen bomen groeien omdat er permanent water stroomt? Toen de boomstronken begin jaren negentig onderzocht werden, bleken het Jeffrey-dennen te zijn – een soort die in de omgeving veel voorkomt, maar normaal gesproken beslist niet in rivieren wortelt. En bovendien, deze bomen waren oud. Heel oud. Weefselmonsters lieten zien dat de stronken dateren uit twee specifieke periodes in de middeleeuwen, rond de jaren 1112 en 1350.

Het mysterie werd groter toen men eenzelfde soort stronken ontdekte in Mono Lake, een groot zoutwatermeer op een paar honderd kilometer ten zuiden van Walker River, dichtbij de staatsgrens met Nevada. Het is een spectaculaire plek, beroemd om zijn uitgestrekte uitspansels en zonsondergangen, met behalve een paar uitgewerkte vulkanen niets dat het zacht golvende, droge landschap onderbreekt. De boomstronken in Mono Lake waren niet alleen van dennen, maar

ook van andere inheemse soorten als populier en alsem; alle waren zij ver beneden het huidige natuurlijke waterniveau van het meer geworteld, en doken slechts op dankzij projecten die het verre Los Angeles van water moesten gaan voorzien. Koolstofdatering bracht dezelfde twee periodes aan het licht als bij de bomen in Walker River. Er was in de middeleeuwen duidelijk iets opmerkelijks gebeurd.

Nog meer aanwijzingen kwamen van dieper in de bergen, verborgen op twee plekken die tegenwoordig beroemd zijn om hun wouden met reuzensequoia's – de nationale parken Yosemite en Giant Sequoia. Deze enorme bomen, die in termen van hun houtvolume te boek staan als de grootste levende organismen op aarde, behoren ook tot de alleroudste. Sommige levende bomen zijn wel 3.000 jaar oud. En omdat elke jaarlijkse groeicyclus een duidelijke jaarring achterlaat, vormen deze monumentale planten tevens een uitstekend archief van het klimaat in het verleden. Meer dan tien jaar geleden onderzochten wetenschappers houtmonsters van dode reuzensequoia's, en daarin kwamen ze aan de rand van sommige jaarringen oude brandplekken tegen. Die littekens kwamen met name vaak voor in dezelfde middeleeuwse periode – tussen het jaar 1000 en 1300 – als waarin de oude bomen in West Walker River en Mono Lake groeiden. In beide nationale parken hadden bosbranden twee keer zo vaak huisgehouden als vóór die tijd, en daar is maar één plausibele verklaring voor: de bossen waren kurkdroog.

Uitslaande bosbranden, droge rivieren en meren – de puzzelstukjes begonnen in elkaar te vallen. Het gebied dat we nu Californië noemen werd in de middeleeuwen getroffen door een enorme droogte, die binnen verschillende periodes meerdere decennia aanhield en zowel het landschap als de ecosystemen veranderde op een schaal die de huidige droogteperiodes volledig in de schaduw stelt. Maar hoe wijd verspreid was dat gebeuren nu precies? Aanwijzingen vanuit een ander meer, ver weg op de Great Plains van Noord-Dakota, verschaften een deel van het antwoord.

Moon Lake is net als Mono Lake in Californië een gesloten bekken, en het water is er daardoor zout. Het zoutgehalte gaat er met het klimaat op en neer. Na een aantal natte jaren komt er meer vers water in het meer terecht en zakt het zoutgehalte. Het omgekeerde is ook waar; in droge jaren verdamt er meer water, en blijft er geconcentreerd, pekelachtig zout water achter. Canadese wetenschappers hebben nu het zoutgehalte van Moon Lake over een lange periode gereconstrueerd, door uit oude sedimenten de overblijfselen te bemonsteren van piepkleine algen, kiezelwieren genaamd, waarvan het type en het aantal fluctueren met het zoutgehalte. En ja hoor, vóór het jaar 1200 trok er een serie intense droogteperiodes over de Great Plains, waarvan de terugkeer vandaag de dag – daar waren de wetenschappers het over eens – ‘verwoestend’ zou zijn.

Inzicht in die verwoestende aard van zo’n droogte werd opgedaan door een team biologen dat actief was in het noorden van Yellowstone National Park, een goede 1.500 kilometer ten zuidwesten van Moon Lake, in Wyoming. Daar boorden zij in sedimenten die door rivieren waren neergelegd, en ontdekten zo een piek in de stroom van modderig puin – het product van overstromingen – zo’n 750 jaar terug. Deze modderstromen zijn naar beneden gekomen langs berghellingen die door frequente bosbranden kaal waren komen te staan. Vreemd genoeg vormen deze modderstromen dus eigenlijk een klassiek teken van droogte. En zoals bleek, werd het hele westen van de vs daardoor op hetzelfde moment getroffen.

Het effect op de inheemse bevolking in dit pre-Columbiaanse tijdperk was inderdaad verwoestend. Hele beschavingen stortten in, te beginnen in de Chaco Canyon in het huidige New Mexico. Als één van de meest geavanceerde samenlevingen op het continent trokken de pueblo-indianen van Chaco Canyon het grootste stenen gebouw op dat ooit in het Noord-Amerika van vóór de Europese invasie heeft bestaan: een ‘groot huis’ van vier verdiepingen, met meer

dan 600 individuele kamers, dat vandaag de dag nog voor een groot deel overeind staat. Maar toen in 1130 de grote droogte toesloeg, was men kwetsbaar. De bevolkingsgroei had de ecologische basis van de samenleving al uitgehold door roofbouw op de bossen en landbouwgronden. De meeste mensen verhongerden, waarna de overlevenden een bestaan bij elkaar wisten te schrapen op gemakkelijk te verdedigen plekken, hoog op de steile rotshellingen. Op meerdere plekken zijn aanwijzingen voor gewelddadige conflicten gevonden – schedels met snijplekken van scalperingen, skeletten met pijlpunten in de lichaamsholte en beetsporen van kannibalisme.

Feitelijk maakte de hele wereld in de middeleeuwen een klimaatverandering mee. Dit tijdperk wordt doorgaans de ‘warme middeleeuwse periode’ genoemd, en was de tijd waarin – volgens het bekende verhaal – de Vikingen Groenland koloniseerden en wijngaarden welig tierden in het noorden van Engeland. De temperaturen in de binnenlanden van Noord-Amerika mogen dan 1 of 2 graden warmer dan nu zijn geweest, maar het idee van een aanzienlijk warmere wereld in de middeleeuwen klopt in feite niet. Recent onderzoek, waarin indirecte meetgegevens van koralen, ijskernen en jaarringen vanuit het hele noordelijke halfrond bij elkaar werden gelegd, laat een veel gecompliceerder beeld zien, waarin de tropen zelfs iets koeler waren dan nu, en verschillende gebieden op verschillende momenten opwarmden en weer afkoelden. Hoe klein de mondiale verschuiving daarmee ook geweest is, er zijn nu meer dan voldoende aanwijzingen dat het westen van de Verenigde Staten in die periode niet te maken had met een kortstondig neerslagtekort, maar met een grootschalige, intense droogteperiode, die minstens enige tientallen jaren aanhield. Kort geleden nog, in 2007, deden wetenschappers verslag van onderzoek aan jaarringen, waarin zij de middeleeuwse stromingen in de rivier de Colorado bij Lees Ferry in Arizona reconstrueerden. Hieruit bleek dat de rivier tijdens een grote droogte in het midden

van de 12e eeuw 15 procent minder water voerde. Zestig jaar achter elkaar was het uitsluitend laagwater in de rivier; het hoge water dat normaal gesproken de Colorado af komt stromen, verbrak de ban van de droogte al die tijd geen enkele keer. En de opmerkelijke overeenstemming van deze tijdstippen met aanwijzingen vanuit New Mexico suggereert dat dit inderdaad dezelfde droogte was, die de indianen in Chaco Canyon de das omdeed.

Om te zien wat zelfs zo'n kleine klimaatverandering kan aanrichten, richten we ons even op één van de minst dramatische plekken die er bestaat – Nebraska. Bepaald geen staat die hoog op het toeristische verlanglijstje staat. “Verdomd, ik dacht dat ik ook dood was. Bleek ik gewoon in Nebraska te zijn”, zegt Gene Hackman in de film *Unforgiven*. Een vreugdeloos uitspannel van onmogelijk platte vlaktes – het enige opzienbarende aan Nebraska is dat het de enige Amerikaanse staat is met een wetgevende macht van slechts één kamer. Nebraska blijkt ook de plek te zijn waar het oude Westen begint – volgens de plaatselijke overlevering in de hoofdstad Lincoln begint het Westen precies op de kruising van de 13e en de O-sstraat, op een plek die gemarkeerd is met een ster van rode klinkers.

Maar wellicht is het belangrijkste feit over Nebraska dat het middenin één van de meest productieve landbouwsystemen op aarde ligt. Rundvlees en maïs beheersen de economie, en het gebied van de Sand Hills in centraal Nebraska herbergt een aantal van de meest succesvolle veehouderijgebieden van de hele Verenigde Staten.

Voor de toevallige voorbijganger zien de Sand Hills er groen en grazig uit, en in pre-Europese tijden voorzagen ze enorme kuddes bizons van voedsel; vandaar ook hun hoge productiviteit voor het hedendaagse rundvlees. Maar zoals hun naam al aangeeft, peuter een paar centimeter de grond in en vanonder de ondiepe bodem komt er iets onheilspellends bloot te liggen: zand. Deze onschuldig uitzienende heuvels vormden ooit een woestijn en maakten deel uit van

een immens systeem van zandduinen, dat zich uitspreidde over duizenden kilometers van de Great Plains, van Texas en Oklahoma in het zuiden, dwars door Kansas, Colorado, Wyoming, Noord- en Zuid-Dakota, tot in de Canadese prairie-staten Saskatchewan en Manitoba in het noorden. Tegenwoordig zijn deze zandduinsystemen ‘gestabiliseerd’: bedekt met een beschermende laag vegetatie, zodat zelfs de hardste wind ze niet van hun plaats krijgt. Maar tijdens de warme middeleeuwse periode, toen de temperatuur in het gebied van de Great Plains maar iets hoger dan nu zal zijn geweest, kwamen deze woestijnen tot leven; ze gingen aan de wandel door een vruchtbaar landschap, dat vandaag de dag een graanschuur is waar de mensheid niet buiten kan. Deze historische sporen geven duidelijk aan dat zelfs minieme temperatuurveranderingen dit hele gebied zouden kunnen terugwerpen in een gortdroge toestand.

Diegenen die zich de Dust Bowls van de jaren '30 van de vorige eeuw kunnen herinneren, denken misschien dat zij de ergste soort droogte hebben gezien die de natuur te bieden heeft. In de heftigste Dust Bowl-jaren, tussen 1934 en 1940, werden in kolossale stofstormen miljoenen hectaren bovengrond van de Great Plains weggeblazen. Eén daarvan, in mei 1934, bereikte zelfs Chicago, en strooide rode sneeuw over New England uit. Honderdduizenden mensen, waaronder 85 procent van de hele bevolking van Oklahoma, gaf hun land op en trok naar het westen. Voor dit alles was gemiddeld slechts een kwart minder neerslag nodig – voldoende om het geploegde akkerland te zien wegblazen, terwijl de reusachtige duinen op hun plek bleven. Wat deze duinen bijna duizend jaar geleden deed ontwaken uit hun lange sluimering, was een droogte op een volstrekt andere schaal – één die dramatisch veel minder neerslag bracht, en die niet een paar jaar aanhield, maar tientallen jaren achter elkaar.

In een wereld die in zijn geheel minder dan één graad warmer is, kan het westen van de Verenigde Staten opnieuw door langdurige droogtes worden geteisterd. Daarbij wordt

de landbouw van de kaart geveegd en raken menselijke inwoners op een veel grotere schaal op drift dan tijdens de rampspoed in de jaren '30. Hoewel meer irrigatie het allerergste een poos op de lange baan zou kunnen schuiven, worden veel van de grootste watervoerende bodemlagen nu al te intensief gebruikt door de geïndustrialiseerde landbouw en hebben zodoende hun langste tijd gehad. Wanneer de dagen nachten worden, doordat zware stof- en zandstormen over duizenden kilometers vroegere prairie jagen, zullen boerderijen, wegen en zelfs hele steden onder het verwaaiende zand bedolven raken. Er zullen nieuwe duinen verrijzen op plekken waar ooit koeien graasden en maïsvelden groeiden. Voor boeren zal er waarschijnlijk weinig te kiezen zijn; op miljoenen vierkante kilometers van wat eens hoogproductieve landbouwgrond was, zullen zij de landbouw volledig moeten opgeven. Internationaal zullen de voedselprijzen stijgen, zeker als gelijktijdig ook andere gebieden door ernstige droogte worden getroffen. En hoewel de zuidelijke delen van de vs door een intensere Amerikaanse moesson naar verwachting natter zullen worden, zit de bevolking daar misschien niet te wachten op een instroom van miljoenen nieuwkomers.

Verder naar het oosten zou de landbouw echter wel eens kunnen profiteren van hogere temperaturen en meer neerslag. Zoals Californië tijdens de Dust Bowl als het ware een toevluchtsoord was voor verdreven 'Okies', zullen het Middenwesten en de Grote Meren werk en levensonderhoud moeten bieden aan hen, die niet langer een bestaan bij elkaar kunnen schrapen uit de zandige heuvels in het verre westen wanneer eenmaal de regen uitblijft en de woestijnwind begint te waaien.

## Nu al overmorgen?

Terwijl de boeren op de hoogvlaktes van Noord-Amerika hun akkers en weilanden in de verzengende hitte zien wegwaaien, worstelen hun verwanten aan de andere kant van de Atlantische Oceaan misschien wel met een ander probleem: extreme kou. Een van de minst voorstelbare effecten van wereldwijde opwarming is de mogelijke instorting van de temperatuur in heel Noordwest-Europa doordat de warme Atlantische stroming – algemeen bekend als de Golfstroom – gaat haperen en afzwakt. Dat is het scenario dat met enige overdrijving in verhaalvorm werd gegoten voor de Hollywood-rampfilm *The Day After Tomorrow*. Daarin luidt het in elkaar klappen van de Atlantische stroming een nieuwe ijstijd in, en bevroren New York en Londen als bij toverslag (hoewel de goeie vent het meisje nog wel krijgt). Wetenschappers in de echte wereld vielen meteen over de film heen omdat deze de wetten van de thermodynamica aan zijn laars lapte. Evengoed gaven ze toe dat de werkelijkheid van een afzwakkende stroming in het noorden van de Atlantische Oceaan bepaald beangstigend kan zijn, zeker voor diegenen die leven in een deel van de wereld met een zacht zeeklimaat, dat op zich niet strookt met zijn hoge noorderbreedte.

Een kort technisch terzijde is hier op zijn plaats. Eigenlijk is slechts een klein deel van de grote stroom die warm water de noordelijke Atlantische Oceaan in brengt de werkelijke Golfstroom. Zoals zijn naam al aangeeft, gaat het om een stroom warm, subtropisch water; vanuit de Golf van Mexico koerst dit naar het noordoosten, en wordt uiteindelijk deel van een veel groter stroomstelsel, dat onder wetenschappers bekend staat als de Atlantische Meridionale Omslaande Circulatie. Deze MOC wordt deels aangedreven door het afkoelende en zinkende water op hoge breedtegraden voor de kust van Groenland en Noorwegen. Daar brengt koude polaire lucht de temperatuur van het zeewater omlaag, en perst er zoet water in de vorm van zeeijs uit, zodat er zwaar,

pekelig water overblijft dat snel naar de bodem van de oceaan zakt. Van daaraf beweegt het zich terug naar het zuiden, om uiteindelijk – 1.200 jaar later – in de Stille Oceaan weer aan de oppervlakte te komen. Wetenschappers zijn lange tijd bang geweest dat meer zoet en warm water in de zee bij Noorwegen en Groenland – door meer neerslag, meer smeltwater van gletsjers en het verdwijnen van zeeijs – de daling van dit water zou kunnen stilleggen en zo deze grote, oceanische lopende band uit bedrijf zou halen. Vandaar de beroemde ‘Einde van de Golfstroom’-scenario’s die we kennen van krantenkoppen en van de Hollywood-film.

Al lijkt het idee vergezocht, het vastlopen van de Atlantische circulatie is altijd meer dan puur theorie geweest. Het is al eerder voorgekomen. Aan het einde van de laatste ijstijd, twaalfduizend jaar geleden, toen de wereld net weer wat warmer begon te worden, daalde de temperatuur plotseling opnieuw en bleef daarop meer dan duizend jaar laag. Gletsjers groeiden weer aan en nieuwe bossen maakten opnieuw plaats voor kille toendra’s. Deze periode wordt het ‘Jonge Dryas’ genoemd, naar een arctisch-alpiene plant, *Dryas octopetala* of zilverkruid, waarvan het stuifmeel volop aanwezig is in sedimentaire veenlagen uit die tijd. In Noorwegen was de temperatuur 7-9°C lager dan nu, en zelfs Zuid-Europa kreeg een terugval te verduren tot bijna-glaciale omstandigheden. Ook aan de andere kant van de Atlantische Oceaan koelde het af, en er zijn aanwijzingen voor snelle klimaatverandering op verafgelegen plekken als Zuid-Amerika en Nieuw-Zeeland.

De boosdoener lijkt de plotselinge lamlegging van de Atlantische circulatie te zijn geweest, veroorzaakt door het springen van een natuurlijke dam in Lake Agassiz, een gigantisch zoetwatermeer dat was volgelopen achter de terugtrekkende Noord-Amerikaanse ijsvlaktes. De inhoud van het meer bedroeg zeven keer die van de huidige Grote Meren samen, en men denkt dat toen de dam sprong, er een enorme golf water door de Hudsonbaai de Atlantische Oceaan in is

gestroomd. Deze plas zoetwater verdunde de Noord-Atlantische zeeën en voorkwam dat het water er zout genoeg was om te zinken. Dat onderbrak de diepe oceaanstroming en zorgde zo wereldwijd voor klimaatverstoring.

Vandaag de dag liggen er duidelijk geen gigantische ijsmeren te wachten om de Atlantische Oceaan in te stromen, maar de mondiale opwarming zou de vorming van water dat zinkt wel degelijk kunnen onderbreken door smeltend zeeijs en hogere afvoer van zoetwater door Siberische rivieren. Ondanks de snel smeltende ijskap was er echter jarenlang geen bewijs dat er zich inderdaad veranderingen voordeden in de Atlantische moc en veel oceanografen begonnen de theorie in de wind te slaan. Dat was voordat de rss *Discovery*, een onderzoeksschip van de Britse overheid, in 2004 aan een routine-tocht over de Atlantische Oceaan begon. Aan boord stelde het onderzoeksteam zich tot taak om het zeewater op verschillende dieptes te bemonsteren langs de lijn tussen de Canarische eilanden in het oosten en Florida in het westen, en daarmee vergelijkbare metingen uit 1957, 1981, 1992 en 1998 te herhalen. Ze hadden niet verwacht iets te vinden dat voor enige opwinding zou kunnen zorgen. Teamleider professor Harry Bryden vertrouwde een journalist zelfs nog toe: “In 1998 zagen we alleen hele kleine veranderingen. Ik had het er bijna bij laten zitten.”

Maar in 2004 was het anders. Bryden en zijn collega's ontdekten dat er aan de oppervlakte minder warm water naar het noorden stroomde en in de diepte minder koud water naar het zuiden. Over de hele linie was de Atlantische circulatie met 30 procent afgenomen, wat neerkomt op 6 miljoen ton minder stromend water per *seconde*. Geen wonder dat professor Bryden bekende “verrast” te zijn. Plotseling was de vertraging in het grote Atlantische stromingssysteem niet langer gewoon een hypothese voor de verre toekomst. Het was al zover.

De media reageerden onmiddellijk. “Stroming die Europa verwarmt zwakt af”, waarschuwde CNN. De NPR-show

*All Things Considered* kwam met “Warmtemotor Atlantische Oceaan koelt af”. In Europa werd vanzelfsprekend bezorgd gereageerd. “Alarm om dramatische verzwakking Golfstroom” kopte de Britse *Guardian* op 1 december 2005. “Opwarming aarde zorgt voor koeler klimaat in GB” luidde de visie van de *Telegraph* op hetzelfde verhaal. Een paar alinea’s verderop liet de krant een deskundige bevestigen dat “een gemiddelde temperatuurdaling van één of twee graden binnen enkele decennia strengere winters zou inluiden”.

Oudere lezers zouden hebben gehuiverd bij de gedachte aan een terugkeer naar winters zoals die van ’62-’63, toen het Verenigd Koninkrijk drie maanden lang onder een pak sneeuw lag en de temperatuur in het zuiden van Engeland daalde tot 16°C onder nul. Hier en daar bevroor de zee en bij Tower Bridge in Londen kwamen ijsschotsen de Thames afdrijven. Die winter was zo’n 2,7°C kouder dan gemiddeld – vrijwel precies de temperatuurdaling die voor Londen was voorspeld in een modelstudie waarin men het mogelijke effect onderzocht van een halvering van de warme Atlantische stroming. Stond Europa’s nieuwe ijstijd voor de deur?

Blijkbaar niet. Bijna precies een jaar later, en met veel minder omhaal, meldde het tijdschrift *Science* dat “nadere beschouwing van de stroming in de Atlantische Oceaan had bevestigd wat veel oceanografen al die tijd al vermoedden: niets wijst erop dat de warme ‘transportband’ van de oceaan wordt afgeremd.” In plaats van enkel de momentopnames vanaf een klein aantal onregelmatige boottochten, kwamen er nu gegevens van negentien permanente sensoren, tjokvol instrumenten, verspreid over de Atlantische Oceaan tussen West-Afrika en de Bahama’s, en daaruit viel een veel consistentere beeld op te maken. Een jaar van onafgebroken metingen, zo rapporteerde Harry Bryden nu aan een conferentie in Birmingham, liet zien dat zijn oorspronkelijke terugloop van 30 procent achteraf gezien gewoon onderdeel was van de natuurlijke veranderlijkheid, iets wat zich van jaar tot jaar voortdurend voordoet.

Die uitslag betekende een triomf voor de modellenmakers, van wie de meesten de Europese ijstijd-theorie al jaren koud liet. Zij waren het erover eens dat er enorme hoeveelheden zoetwater het noorden van de Atlantische Oceaan zouden moeten instromen om de Golfstroom af te remmen – veel meer dan er op dit moment vrijkomt door smeltend ijs op Groenland of meer neerslag in Siberië. In plaats van plotseling in te zakken zou de oceanische circulatie kunnen teruglopen met een niet onaanzienlijke 25 tot 30 procent, maar dan wel pas na minstens 100 jaar van voortdurende uitstoot van broeikasgassen. En zelfs dan zou dat Europa niet in de kou zetten – het zou alleen de overigens snelle temperatuurstijging afremmen.

Zoals het IPCC in 2007 concludeerde: “het is... erg onwaarschijnlijk dat de MOC (Atlantische Meridionale Omslaande Circulatie) in de loop van de 21e eeuw een grote, abrupte verandering zal ondergaan”. Hoewel zij allemaal tegen het jaar 2100 een zekere afzwakking lieten zien, ondersteunde geen van de modellen die door het IPCC werden geëvalueerd het scenario van de totale ineenstorting. En zelfs met een afremmende MOC meldde het IPCC dat “de oppervlaktetemperatuur rond de Noord-Atlantische Oceaan en Europa zal blijven stijgen vanwege de veel grotere invloed van de toename van broeikasgassen”. Het oordeel van het IPCC was definitief: Europa krijgt geen nieuwe ijstijd.

### **Afrika's schitterende berg**

Amateur-avonturier Dr. Vince Keipper had jaren op deze dag gewacht. Dicht onder de top van de Kilimanjaro, het hoogste punt van het Afrikaanse continent, verheugde Keipper zich met zijn groep op de panoramische uitzichten over de omliggende Keniaanse en Tanzaniaanse vlaktes. Ze waren door de steile en verraderlijke Western Breach geklommen en daarna langs de torenhoge ijswand van de Furtwängler Gletsjer. Het

weer was perfect, met enkel ver beneden wat wolken. Toen, niet ver van de 5.895 meter hoge top, bracht een luid gedreun achter hen de groep plotseling tot stilstand. “We keken om en zagen de ijsmassa met een enorm geraas in elkaar zakken” herinnerde Keipper zich. “In het midden brokkelde een deel van de gletsjer af, en stukken ijs zo groot als hele kamers stortten op de bodem van de krater.”

Keipper en zijn groep beseften dat ze mazzel hadden gehad: als de zaak een paar uur eerder was ingestort, hadden ze eronder begraven kunnen worden. Daarnaast beseften ze dat de gebeurtenis waarvan ze net getuige waren geweest, een aanzienlijke symbolische betekenis had: recht voor hun neus was de hoogste top van Afrika aan het smelten.

Kilimanjaro is een soort symbool geworden van de internationale campagne tegen klimaatverandering. De Swahili woorden *kilima* en *njaro* laten zich vertalen als ‘schitterende berg’; dat onderstreept hoezeer deze enorme vulkaan door de eeuwen heen ontzag bij haar toeschouwers wist op te wekken. Een recente luchtfoto van de krater, waarop langs de donkere flanken nog maar een dun korstje ijs te zien is, vormde de blikvanger van een reizende fototentoonstelling over wereldwijde opwarming in 2005, die werd gesponsord door de British Council. Tijdens de VN-conferentie over klimaatverandering in 2001 in het Marokkaanse Marrakesh, stuurde Greenpeace een team naar de Kilimanjaro om daar een persconferentie met video-link te houden vanaf één van de verdwijnende gletsjers. Vanuit haar status van internationale beroemdheid heeft de Kilimanjaro ook de aandacht getrokken van de ontkenners van klimaatverandering. Zij suggereren dat de ontbossing op de lagere hellingen van de berg meer bijdraagt aan het krimpen van de gletsjers dan de mondiale opwarming.

Wie echter met zulke tegendraadse betogen aankomt bij Lonnie Thompson – glacioloog aan Ohio State University en terecht één van Amerika’s meest gevierde wetenschappers – begeeft zich, om zo te zeggen, op glad ijs. Thompson

was de eerste die in ontoegankelijke berggebieden ijskernen ging uitboren. Hij kwam terug met ijs van tienduizenden jaren oud uit vergletsjerde toppen die zo ver uit elkaar lagen als de Nevado Huascarán in Peru en de Dasuopu in Tibet, en dat hij slechts had weten te verzamelen door het uiterste van zichzelf te eisen. In 1993 kampeerden Thompson en zijn boorteam 53 dagen lang op 6.000 meter hoogte tussen de twee toppen van de Huascarán, waarbij zij wellicht het wereldrecord op-hoogte-leven vestigden. (Ik heb daar in 2002 één nacht doorgebracht – één van de koudste, winderigste en ellendigste nachten van mijn leven.) Op een gegeven moment blies een storm Thompson's tent, met hem erin, op een afgrond af – totdat hij zijn ijsbijl door de bodem ramde. “Ik begrijp niet”, merkte hij ooit op, “waarom iemand voor de lol een berg zou willen beklimmen.”

Thompson zag als één van de eersten in, dat dit bergijs een uniek bestand aan gegevens bevat over klimaatveranderingen door de eeuwen heen – bewaard in lagen stof, zuurstof-isotopen en piepkleine gasbelletjes die binnenin de lagen bevroren water gevangen zitten. Eenmaal omlaag gesjouwd in vrieskisten en geanalyseerd in het laboratorium leggen deze ijzige handtekeningen alles bloot, van droogtes tot en met vulkaanuitbarstingen, van tientallen en honderden jaren geleden. Bovendien vertellen ze een verhaal over veranderingen in de temperatuur. De twee isotopen van zuurstof,  $^{16}\text{O}$  en  $^{18}\text{O}$ , verschillen in atoomgewicht door de aanwezigheid van twee extra neutronen in de kern van de laatste, en komen afhankelijk van de watertemperatuur minder vaak of vaker voor. Zodoende is hun onderlinge verhouding in ijskernen een goede, indirecte indicatie voor historische klimaten.

Thompson en zijn team boorden eveneens in drie van de overgebleven ijsvelden van Kilimanjaro en concludeerden in oktober 2002 dat 80 procent van het ijs op de berg in de afgelopen eeuw al gesmolten was. Het nieuws haalde wereldwijd de krantenkoppen, net als Thompson's voorspelling dat

de rest van het ijs tussen 2015 en 2020 verdwenen zou zijn. Daarbij gaf hij grif toe dat deze voorspelling niet op ingewikkelde computermodellen of andere geavanceerde technieken gebaseerd was. “In 1912 lag er 12,1 km<sup>2</sup> ijs op de berg”, vertelde hij journalisten van CNN. “Toen we de berg in februari 2000 fotografeerden, lag er nog maar 2,2 km<sup>2</sup>. Als je kijkt naar de oppervlakte, zie je dat die lineair afneemt. Projecteer je dat gewoon naar de toekomst, dan is zo rond 2015 al het ijs van de Kilimanjaro verdwenen.”

Als er iets van urgentie in Thompson's stem doorklonk, dan was dat omdat hij wist dat het unieke bestand aan historische klimaatgegevens dat in Kilimanjaro's gletsjers bewaard was gebleven, door het recente afsmelten inmiddels al werd aangetast. In de analyse van stoflagen in het ijs vond het wetenschappelijk team duidelijke aanwijzingen voor een 300 jaar durende droogte, zo'n 4.000 jaar geleden; een droogte die zo ernstig was dat deze in verband is gebracht met de ineensstorting van diverse beschavingen in de Oude Wereld, van Noord-Afrika tot het Midden-Oosten. Het ijs wees daarnaast op veel nattere omstandigheden van nog langer geleden, toen enorme meren zich uitstrekten over wat nu de droge Afrikaanse Sahel is. Net onder het oppervlak ontdekte Thompson's team ijs met een laagje van de radioactieve isotoop chloor-36, neerslag van de Amerikaanse kernproef met de waterstofbom op het atol Eniwetok in 1952. Uit deze precieze tijdsmeting konden de wetenschappers afleiden dat het ijs waarin de gegevens over klimaatwisselingen sinds de jaren '60 vastlagen, inmiddels al gesmolten was.

Bovendien bleek het oudste ijs onderin de ijskernen meer dan 11.000 jaar oud te zijn. Dat toonde aan dat de top van de Kilimanjaro sinds de laatste ijstijd op geen enkel moment ijsvrij geweest is. Deze ontdekking maakte Thompson's ijskernen nog eens extra waardevol, om de simpele reden dat de tot ronde plakken verzaagde kernen in de inloop-vriesruimte van Ohio State University binnen een kleine tien jaar het enige overgebleven Kilimanjaro-ijz ter wereld zal zijn. Dit

indachtig hebben Thompson en zijn team al besloten om een deel van het ijs intact te laten, om het door toekomstige generaties wetenschappers met nieuwe technologieën te laten ontleden. Mogelijk zullen zij zo klimatologische geheimen weten te ontsluiten waarvan wij vandaag de dag nog niet eens kunnen dromen.

De ontkenner van klimaatverandering doen grote moeite om het verdwijnen van de gletsjers op de Kilimanjaro als iets bijzonders te presenteren. Deze pogingen worden echter teniet gedaan door vergelijkbare veranderingen, die zich voordoen in berggebieden over de hele wereld, niet in het minst in het Ruwenzori-gebergte in Oeganda, een kleine duizend kilometer naar het noordwesten. In dit afgelegen gebied, waar Oeganda grenst aan de Democratische Republiek Congo, liggen de legendarische ‘Bergen van de Maan’, die de voornaamste bron van de rivier de Nijl vormen. Deze bergen zorgen voor zulke zware neerslag (zo’n 5 meter per jaar), dat de door wolken versluierde pieken slechts een paar dagen per jaar zichtbaar zijn. Bovenop de hoogste berg, de 5.109 meter hoge Mount Stanley (genoemd naar de ontdekkingsreiziger die er in 1887 langskwam), blijft de piek door ijs en sneeuw – behalve voor de allertaaiste bergbeklimmers – voor iedereen verborgen. Toch heeft het ijs zich, net als op de Kilimanjaro, in de Ruwenzori al flink teruggetrokken. De drie hoogste toppen zijn sinds 1987 de helft van hun ijsvelden kwijtgeraakt, en van alle gletsjers wordt verwacht dat ze binnen twintig jaar verdwenen zijn.

Elders in de wereld vormen verdwijnende gletsjers een serieuze bedreiging voor de watervoorziening benedenstrooms. Maar de ijskap van de Kilimanjaro is zo klein, dat het voor de twee grootste rivieren die aan zijn flanken ontspringen – de Pangani en de Galana – weinig verschil zal maken als hij uiteindelijk helemaal van het toneel verdwijnt. Op de Kilimanjaro vormen niet de gletsjers, maar juist de bossen de cruciale schakel voor de watervoorziening. De gordel van montaan bos tussen de 1.600 en 3.100 meter hoogte levert

96 procent van het water dat van de berg afkomt. Niet alleen slurpt deze weelderige wirwar van bomen, varens en struiken als een reusachtige spons de stortregens van de Kilimanjaro op, maar bovendien vangt hij vocht op uit de wolken, die zich vrijwel onafgebroken rond de hellingen halverwege de berg hebben gedrapeerd. Een groot deel van dit water vloeit ondergronds af door de poreuze vulkanische as en lava, om op de savannes ver daar vandaan in poelen weer boven te komen. Daar is het van vitaal belang voor zowel de lokale bevolking als in het wild levende dieren.

Is de Kilimanjaro als bron voor de watervoorziening daarom veilig voor de wereldwijde opwarming? Niet helemaal. Stijgende temperaturen en afnemende neerslag verhogen het risico op bosbranden en deze zijn al begonnen de hogere stukken montaan bos aan te tasten. Tegen de tijd dat de gletsjers verdwenen zijn, zijn de hoger gelegen bossen dat daarom ook, en dat scheelt, volgens een schatting, elk jaar 15 miljoen kuub water die niet van de berg de rivieren inloopt. Ter vergelijking zal de terugloop van het smeltwater jaarlijks waarschijnlijk nog geen miljoen kuub bedragen: behoorlijk, maar niet rampzalig. De teruglopende watervoorziening zal zich overal doen gelden: van de visstand tot de opwekking van waterkracht benedenstrooms in het straatarme Tanzania. Ook de wereldberoemde biodiversiteit – de Kilimanjaro herbergt alleen al 24 verschillende soorten antilopen – zal door de weersveranderingen voor een groot deel in het nauw komen.

In navolging van de sneeuw zal een groot deel van de wildstand verdwijnen, net als van de weelderig groene bossen waar toeristen nu nog doorheen trekken op hun steile tocht naar de dak van het Afrikaanse continent.

### Spookrivieren van de Sahara

Een heel eind ten noorden van de Kilimanjaro, in de Sahel, ervaart een andere kurkdroke streek tegen die tijd misschien

wel iets van een zegenrijke verlossing. De Sahel-regio in Noord-Afrika is lange tijd synoniem geweest met klimaat-rampen. In de jaren '70 en '80 werd het gebied geteisterd door zulke ernstige hongersnoden dat zij gigantische hulpacties als *Band Aid* en *Live Aid* op gang brachten. Vanuit Ethiopische vluchtelingenkampen sprak verslaggever Michael Buerk van de BBC van een "bijbelse hongersnood", terwijl de camera langzaam over de doden en stervenden scheerde. Eerder waren in de jaren '70 meer dan 300.000 mensen van honger omgekomen.

De Sahel is een immens gebied dat zich in een brede gordel van oost naar west uitstrekt over Noord-Afrika, van Senegal aan de Atlantische kust tot Somalië aan de Indische Oceaan. Het grotendeels met savanne en doornstruiken bedekte gebied vormt een klimatologische overgangszone tussen de extreem droge Sahara in het noorden en de weelderige tropische wouden die in het zuiden tot bij de evenaar groeien. Vanwege de wisselende neerslag vormde de nomadische veehouderij lange tijd de belangrijkste leefwijze, waarbij mensen aan de hand van de seizoenen enorme afstanden aflegden om hun vee te kunnen laten grazen. Vaak neemt men aan dat de wereldwijde opwarming de Sahel verder zal uitdrogen, waardoor de Saharaanse duinen naar het zuiden zullen oprukken, Nigeria en Ghana in, en al doende miljoenen mensen op drift zullen raken. Hoewel de voorspellingen nog voorlopig en onzeker zijn, geven zowel paleontologische studies als computermodellen de indruk dat het omgekeerde wel eens waar zou kunnen zijn. Zou de Sahel als toevluchtsoord kunnen eindigen, terwijl andere delen van Afrika verschrompelen in de hitte?

Om in te kunnen schatten hoe het klimaat in dit gebied kan gaan veranderen, moeten we ons naar het noorden wenden, de Sahara in. Hier heeft de grootste woestijn ter wereld ook de hoogste temperatuur op aarde laten noteren: een bepaald gloeiende 58°C. De Sahara strekt zich uit over zo'n groot gebied dat het hele, aaneengesloten gebied van de Verenigde Staten er gemakkelijk in zou passen. In deze woestijn

liggen niet zomaar wat duinen, maar hele bergen van zand, waarvan sommige tot bijna 400 meter hoog zijn. Hij is zo volstrekt onbewoonbaar dat niet meer dan een handjevol mensen het er weet te redden in een paar kwijnende oases en aan de rand van de woestijn.

Maar verspreid over dit eindeloze gebied zijn duidelijke aanwijzingen te vinden dat er vele duizenden jaren geleden sprake was van een heel andere Sahara. Rotsschilderingen en -gravures uit de jonge steentijd zijn aangetroffen op plekken waar menselijke bewoning vandaag de dag volstrekt uitgesloten is. Op deze oude voorstellingen staan olifanten, neushoorns, giraffes, gazelles en zelfs buffels – allemaal dieren die tegenwoordig pas honderden kilometers verder naar het zuiden rondlopen. In de kurkdroge Westelijke Woestijn van Egypte, waar per jaar gemiddeld minder dan 5 mm regen valt, hebben archeologen pijlpunten en vuurstenen messen opgegraven die werden gebruikt voor de jacht op en de slacht van grootwild. Op één plek in het zuidwesten van Libië hebben archeologen zelfs kleine vishaakjes van vuursteen ontdekt – alweer in een gebied waar nu zelfs geen spoor van oppervlaktewater te vinden is.

Er zijn wel meer aanwijzingen dat het verleden natter is geweest. Wie vandaag de dag per kameel de droge Safsaf Oase in Egypte oversteekt, ziet weinig meer dan rotsen en duinen. Maar radarbeelden die in 1994 vanuit het ruimteveer Endeavour zijn gemaakt, laten duidelijk zien dat onder het zand hele rivierbeddingen begraven liggen. Sommige van deze spookrivieren, lang geleden drooggevallen en nu vergeten onder het zand, stroomden zelfs vanuit het hedendaagse Soedan als grote zijrivieren in de Nijl. In het zuiden van Algerije vormden zich ooit enorme, ondiepe meren, waar volop vis, vogels en zelfs Nijlkrokodillen leefden. Koolstofdatering van zoetwaterslakken en ontwaterde vegetatie die in deze oude meerbeddingen bewaard zijn gebleven, laten zien dat de rand van de woestijn zich tussen de vijf- en tienduizend jaar geleden vijfhonderd kilometer verder naar het noorden

terugtrok en op verschillende momenten vrijwel helemaal verdween.

Aan de grenzen van wat tegenwoordig Tsjaad, Nigeria en Kameroen is, strekte zich over de zuidelijke Sahara een gigantisch meer uit, met een oppervlakte van meer dan 350.000 km<sup>2</sup>. Bijgenaamd het Mega-Tsjaadmeer, naar het hedendaagse overblijfsel ervan, het Tsjaadmeer, vormde deze reusachtige binnenzee het grootste zoetwaterbekken dat Afrika de afgelopen 2,5 miljoen jaar heeft gekend. Het zou maar iets kleiner zijn geweest dan de Kaspische Zee, het grootste meer van nu. Vreemde zandruggen die er vandaag de dag diep in de woestijn eenzaam bij liggen, brengen de oevers van het oude meer aan het licht, net als de schelpen van lang geleden gestorven weekdieren die ooit welig tierden in het warme, ondiepe water. Het vlakke landschap tussen de wandelende duinen getuigt van de eroderende kracht van de golven die hier lang geleden deinden.

Ons gezonde verstand zegt dat een gigantisch meer in zo'n droog gebied alleen door veel meer neerslag gevoed heeft kunnen worden, en lange-termijn-gegevens laten inderdaad zien dat de Sahara in een tijdsbestek van vele duizenden jaren herhaaldelijk natte en droge periodes heeft gekend. De koudste periodes in de ijstijd vormden in de Sahara doorgaans de droogste, terwijl de warme interglacialen er voor regen zorgden en het leven er weer terugbrachten. Tijdens het vroege Holoceen, 9.000 tot 6.000 jaar geleden, was de zon op het noordelijk halfrond iets sterker dan nu, dankzij een kleine cyclische verschuiving in de baan van de aarde om de zon. De extra hitte verwarmde de enorme Noord-Afrikaanse landmassa zozeer dat deze een moesson veroorzaakte, net zoals de moesson die vandaag de dag op het Indiase subcontinent elk jaar voor zomerregens zorgt.

Moessons zijn gebaseerd op het principe dat landoppervlakken 's zomers sneller opwarmen dan de oceanen eromheen. Omdat de hete lucht opstijgt in het binnenland, ontstaat daar een lagedrukgebied dat vanaf de omringende zee

koele, vochtige lucht aanzuigt. Deze wind brengt regen mee en in een moessonklimaat als dat van India, waar de landbouwkalender volgens deze jaarlijkse cyclus verloopt, zorgt deze 's zomers voor enorme hoosbuien. De Afrikaanse zomer-moesson is zwakker en wordt minder algemeen erkend, maar is intussen wel de enige betrouwbare bron van neerslag voor de Sahel. Klimaatmodellen voorspellen dat landoppervlakken in de 21e eeuw veel sneller zullen opwarmen dan de oceanen, en dat zou de zomer-moessons kunnen versterken. Met één graad wereldwijde opwarming zou deze moesson daarom aan kracht kunnen winnen, opnieuw tot ver in het Afrikaanse continent kunnen doordringen en de Sahara groen maken.

Maar gaat dat echt gebeuren? Voordat we plannen maken om de grootschalige voedselproductie te verplaatsen naar het hart van de Sahara is een kanttekening op zijn plaats. Tijdens het vroege Holoceen vormde het verschil in verdeling van de zonnewarmte tussen het noordelijk en het zuidelijk halfrond een extra motor voor de moesson. Dit keer wordt echter de hele aarde warmer en daarom vormt het verleden geen volmaakte analogie voor de toekomst. Bovendien zou het een vergissing zijn om te denken dat een vochtiger Sahara een weelderig soort wonderland zou zijn. De totale neerslag bedroeg meestal niet meer dan 100 mm, net genoeg om de schraalste savanne-achtige vegetatie in stand te houden, en bovendien moeten nattere periodes zijn afgewisseld door langdurige droogtes. Toch kunnen computermodellen helpen om een pad te banen door de tegenstrijdige mogelijkheden en een antwoord te geven dat vergaande consequenties zal hebben voor alle inwoners van Noord-Afrika.

De weg daarvoor wordt bereid door Martin Hoerling en twee andere klimaatwetenschappers die in Boulder, Colorado, zijn gevestigd. Zij lieten zestig verschillende modellen draaien om bevestigd te krijgen dat, terwijl zuidelijk Afrika door de wereldwijde opwarming zal opdrogen, het noorden van Afrika inderdaad natter zal gaan worden. De aanhou-

dende trend van uitdroging, die in de tweede helft van de 20e eeuw voor zoveel ellende en verwoesting zorgde, zal (met een opwarming van één graad of minder) rond 2020 helemaal omslaan, zodat de Sahel zich qua neerslag op de lange termijn zal kunnen herstellen. Tegen het jaar 2050 zal dat herstel echt hebben doorgezet, met 10 procent meer regen in het hele gebied ten zuiden van de Sahara.

Deze conclusie wordt gestaafd door een tweede onderzoek, dat zwaardere regenval voorspelt voor zowel de West-Afrikaanse kust als de Sahel, omdat een warmere tropische Atlantische Oceaan enorme hoeveelheden waterdamp levert waaruit regenwolken ontstaan. Met substantieel meer regen kan de landbouwproductie mogelijk omhoog. Dat zal de daling elders kunnen goedmaken, als we er tenminste vanuit gaan dat de mensen die hier ooit omkwamen van de honger dan niet aan de hitte zullen bezwijken.

Een team van programmeurs in Princeton, New Jersey, kwam echter met hele andere lange termijnvoorspellingen op de proppen. Hun computermodel simuleert nauwkeurig de verschrikkelijke droogte van de jaren '70 en '80, maar na een kort tussenspel van meer neerslag voorspelt het zelfs nog drogere omstandigheden voor de Sahel in de tweede helft van de 21e eeuw.

Waarom lopen die verschillende modellen van de teams uit Princeton en Boulder nou zo uiteen? De Princeton-onderzoekers geven toe dat zij in verlegenheid zijn gebracht. "Totdat we beter begrijpen welke aspecten van de modellen deze uiteenlopende resultaten voor dit gebied veroorzaken", zo waarschuwen zij, "adviseren wij om schattingen over toekomstige klimaatveranderingen niet uitsluitend op één van deze modellen te baseren." Desondanks zeggen ze er duidelijk bij dat "een dramatische droogte-trend in de 21e eeuw serieus als een mogelijk toekomstscenario moet worden beschouwd".

Deze laatste conclusie stemt overeen met mondiale studies die aangeven, dat met het opwarmen van de aarde steeds

grotere gebieden met ernstige droogte te maken krijgen. Een van de meest omvattende analyses is uitgevoerd door Eleanor Burke en haar collega's aan het Hadley Centre van het Britse Meteorological Office. Zij gebruikten een maatstaf die bekend staat als de 'Palmer Drought Severity Index' om de waarschijnlijkheid van droogtes in de loop van de komende eeuw te voorspellen. De uitkomsten waren uiterst zorgwekkend. Tegen het jaar 2100 zou het optreden van matige droogtes verdubbeld zijn. Maar het ergste is nog dat het cijfer voor extreme droogtes, dat momenteel 3 procent van het landoppervlak op aarde betreft, op 30 procent zou komen te liggen. In wezen zou daarmee eenderde van het totale landoppervlak geen zoetwater meer hebben, en zodoende voor mensen niet meer bewoonbaar zijn.

Hoewel deze cijfers zijn gebaseerd op snelheden van wereldwijde opwarming van meer dan één graad rond 2100, geven ze wel de vermoedelijke richting van de verandering aan. Wanneer het landoppervlak opgewarmd raakt, verdroogt het door de snellere verdamping. De vegetatie verschrompelt, en als er dan zware regen komt, spoelt de rest van de bodem gewoon weg. Het lijkt misschien vreemd dat overstromingen en droogtes dezelfde gebieden zouden treffen, maar wanneer een groter deel van de neerslag in zwaardere buien valt, zal het land in de tussentijd langere droogteperiodes te verduren krijgen. De meest waarschijnlijke voorspelling voor de Sahel luidt dan ook als volgt: terwijl de totale hoeveelheid neerslag inderdaad zal kunnen stijgen, zullen deze toenames zich vooral aandienen in de vorm van zware stortbuien, afgewisseld door periodes van snikhete droogtes.

Volgens sommige historici vormde de groenere Sahara van 6.000 jaar geleden de geografische basis voor de mythische Hof van Eden, en werden de oorspronkelijke bewoners niet verjaagd door God omdat zij zich misdroegen, maar door de verwoestende uitdroging van het klimaat. Terwijl wetenschappers blijven debatteren over details van de vermoedelijke klimatologische toekomst van Sahara en Sahel, lijkt één

ding duidelijk: de mensheid zal voorlopig nog niet naar Eden kunnen terugkeren.

### De Arctische afsmelting begint

Een paar jaar geleden maakte een nieuwe uitdrukking haar entree in het wetenschappelijke woordenboek: ‘het omslagpunt’. Oorspronkelijk in zwang geraakt sinds de bestseller van Malcolm Gladwell met de gelijkkluidende titel, is daarbij het inzicht dat sociale of natuurlijke systemen niet-lineair kunnen zijn van cruciaal belang. Een vaak gebruikte analogie is die van een kano op een meer: als je die een beetje heen en weer schommelt, kan de stabiliteit weer intreden terwijl de boot nog overeind ligt. Maar als je daar te ver in gaat, en wel voorbij het ‘omslagpunt’, dan kapseist de boot en treedt er een nieuwe stabiele situatie in – alleen dit keer ondersteboven, met een onfortuinlijke kanovaarder die eronder hangt te spartelen.

Wetenschappers zijn steeds meer gaan beseffen dat het klimaat op aarde een goed voorbeeld is van een niet-lineair systeem: door de eeuwen heen heeft het zich in veel verschillende toestanden gestabiliseerd, waarvan sommige heter of kouder waren dan vandaag de dag. In de ijstijd bijvoorbeeld lagen de temperaturen tienduizenden jaren lang wereldwijd gemiddeld 5°C lager dan nu. Bovendien kan het klimaatstelsel verrassend snel van de ene toestand in de andere ‘kantelen’. Ingebed in de laatste ijstijd lagen periodes van plotselinge opwarming, die de temperatuur in Groenland binnen enkele tientallen jaren 16°C omhoog lieten schieten. De redenen waarom het klimaat zo snel omsloeg zijn nog niet helemaal opgehelderd, maar het is wel duidelijk dat ook hele kleine ‘gedwongen’ veranderingen – door broeikasgasen of zonnewarmte – in het verleden dramatische reacties in het klimaatstelsel hebben opgewekt. In tegenstelling daarmee is ons relatief stabiele klimaat hoogst ongebruikelijk; de

periode van het Holoceen, waarin de hele menselijke beschaving tot stand is gekomen, heeft nauwelijks temperatuursveranderingen gekend. Tot nu toe.

Boven alle twijfel verheven staat inmiddels wetenschappelijk vast dat de huidige periode van wereldwijde opwarming van ongeveer  $0,7^{\circ}\text{C}$  in de loop van de vorige eeuw de temperaturen op aarde heeft opgevoerd tot op een hoogte die in de recente geschiedenis nog niet eerder gehaald is. Het IPCC-rapport uit 2007 bevestigde dat uit indirecte metingen van de temperatuur – aan jaarringen, ijskernen, koraalgroei of andere bronnen – nergens in de afgelopen 1.300 jaar iets blijkt van een periode die zo warm was als nu. Gegevens vanuit de diepzee suggereren zelfs dat de huidige temperaturen minder dan een graad onder het hoogste niveau van de afgelopen miljoen jaar liggen.

Het deel van de planeet dat het meest kwetsbaar is voor deze plotselinge opwarming, en het deel dat waarschijnlijk over het eerste ‘omslagpunt’ heen kantelt, is het Noordpoolgebied. Op dit moment stijgt de temperatuur er twee keer zo snel als het wereldwijde gemiddelde. Met name Alaska en Siberië raken snel verhit; in deze regionen is het kwik over de afgelopen 50 jaar al 2 tot  $3^{\circ}\text{C}$  gestegen.

De gevolgen van deze verandering grijpen nu al diep in. In Barrow, Alaska, begint de sneeuw nu al tien dagen eerder te smelten dan in de jaren '50 en zijn er struiken gaan groeien op de kale, bemoste toendra. Wetenschappers in Fairbanks, Alaska, hebben vastgesteld dat ondergrondse ijswiggen op de normaal gesproken koude North Slope plotseling zijn gaan ontdooien, waardoor het landschap nu is bezaaid met nieuwe plassen smeltwater. Deze ijsmassa's zijn al minstens 3.000 jaar onafgebroken bevroren geweest, wat wel aantoont hoe ver de huidige opwarming zich buiten de eerdere historische variabiliteit is gaan begeven.

In andere delen van de staat lopen hele meren leeg in barsten in de grond, omdat de ondoordringbare laag permafrost eronder aan het ontdooien is. De afgelopen halve eeuw zijn

er meer dan 10.000 meren kleiner geworden of zelfs helemaal verdwenen. Hierdoor komt een alarmerende terugval van de waterstand in deze staat in beeld. In 2007 gaven Canadese onderzoekers te kennen dat op Ellesmere Island, Nunavut, poelen van duizenden jaren oud nu maar korte tijd bestaan, omdat het water er 's zomers uit verdampst. Als gevolg daarvan worden soorten die afhankelijk zijn van water, van insectenlarven en zoetwatergarnalen tot nestelende vogels, van de kaart geveegd. De vegetatie die ooit op deze ondiepe, waterige bodem groeide, staat nu zo droog dat zij gemakkelijk in brand vliegt.

Ook de gletsjers op de Noordpool reageren. Op het schiereiland Seward in Alaska trekt de Grand Union Glacier zich zo snel terug dat men verwacht dat hij tegen het jaar 2035 volledig verdwenen zal zijn. Andere, veel grotere gletsjers elders in Alaska worden ook snel dunner. In de tien jaar voorafgaand aan 2001 zijn de gletsjers in Alaska volgens schattingen 96 km<sup>3</sup> kwijtgeraakt, waardoor het zeewaterpeil wereldwijd bijna 3 mm is gestegen. In het hele Noordpoolgebied zijn gletsjers en ijskappen de afgelopen 40 jaar 400 km<sup>3</sup> kleiner geworden.

Maar vermoedelijk klinkt het alarm over deze veranderingen het luidst op zee. Sinds ongeveer 1980 is de ijskap op de Noordpool steeds kleiner geworden, waarbij er elke volgende zomer meer en meer van het ooit permanente ijs verdween. Elk jaar komt er gemiddeld 100.000 km<sup>2</sup> aan open oceaan bij, omdat het ijs dat er ooit op lag aan het smelten is. Alleen in september 2005 verdween er al een oppervlakte noordpoolijs ter grootte van Alaska, zonder een spoor na te laten. En zelfs tijdens de stikdonkere wintermaanden neemt het ijsdek op zee af – in zowel 2005 als 2006 daalde het zeeijs in oppervlakte tot ver onder het gemiddelde.

En hier komt het omslagpunt om de hoek kijken. Terwijl helder wit ijs dat met sneeuw is bedekt meer dan 80 procent van de invallende zonnewarmte reflecteert, absorbeert de donkere open oceaan tot 95 procent van de zonnestra-

ling. Met andere woorden, wanneer zeeijs eenmaal begint te smelten gaat het proces zichzelf al gauw versterken: er komt meer oceaanoppervlak bloot te liggen, er wordt meer zonnewarmte geabsorbeerd, de temperatuur loopt op, en dat maakt het moeilijker om de volgende winter weer ijs terug te krijgen. Klimaatmodellen lopen uiteen over waar het omslagpunt voor het zeeijs op de Noordpool precies zou liggen, maar ze zijn het er vrijwel allemaal over eens dat wanneer we eenmaal over een bepaalde drempel van opwarming heen zijn, het verdwijnen van de hele noordelijke ijskap zo goed als onvermijdelijk is.

Deze modellen suggereren dat we dat kritieke omslagpunt nog niet bereikt hebben – maar erg ver weg zal het niet meer liggen. Eén model voorspelt dat het ijsdek op zee na 2024 plotseling in elkaar zal klappen, waarbij er in de tien jaar daarna 4 miljoen km<sup>2</sup> ijs zal smelten. In deze simulatie, die wordt gemeld door een Amerikaans team onder leiding van Marika Holland van het National Centre for Atmospheric Research in Boulder, Colorado, wordt tegen het jaar 2040 de hele oceaan 's zomers zo goed als ijsvrij. Terwijl andere modellen die hetzelfde team bekeken heeft, het omslagpunt niet vóór 2030 of 2040 bereiken, simuleert er ook één een terugval in de aanmaak van zeeijs die al in 2012 zou beginnen.

Desondanks blijft het team van Holland benadrukken dat “door verlaging van de toekomstige uitstoot van broeikasgassen zowel de kans op, als de ernst van zulke gevolgen afneemt” – met anderen woorden, alles is nog niet verloren. Een ander team, geleid door Jim Hansen van NASA, komt tot een vergelijkbare conclusie. Ondanks aanzienlijke veranderingen die het systeem al zijn binnengedrongen, schrijven Hansen en zijn mede-auteurs dat “het nog steeds mogelijk zou zijn om de Noordpool te behoeden voor het verloren gaan van al zijn ijs” – maar dan alleen als met kooldioxide ook andere vervuulende stoffen in de atmosfeer worden teruggedrongen, zoals roet, dat het ijsoppervlak donkerder maakt en het afsmelten versnelt. Voer een rigoureuus programma van uitstootvermin-

dering in, en dan, zo concludeert het team, “zouden we net een kans kunnen maken om rampzalige klimaatsverandering te voorkomen”. Echter, veel tijd hebben we misschien niet meer: voor 2007 werd er voor de Noordpool al weer een nieuw dieptepunt in de hoeveelheid zeeijs bekend gemaakt. Het staande laagterecord, opgetekend in 2005, werd ‘verpulverd’. En 2008 benaderde eind augustus dat dieptepunt van 2007 opnieuw. Volgens het National Snow and Ice Data Center is het kleinste jaarlijkse ijsoppervlak nu eenderde kleiner dan het gemiddelde oppervlak voor de jaren 1979-2000. Het is met name zorgwekkend dat er vanuit alle sectoren van het Arctische Bekken een dramatische terugloop van het ijsdek wordt gemeld, terwijl in eerdere jaren alleen bepaalde delen werden getroffen. Misschien is dat hoe een omslagpunt eruit ziet.

Maar waarom is het zeeijs op de Noordpool zo belangrijk? Zoals het volgende hoofdstuk laat zien zijn symbolische soorten als de ijsbeer en de zeehond zonder dat ijs gedoemd om uit te sterven. Maar de gevolgen zullen ook dichterbij huis toeslaan, ver weg van het ooit bevroren noorden. Zoals Ted Scambos, hoofdonderzoeker van het Amerikaanse National Snow and Ice Data Center in Colorado verklaart: “Zonder het ijsdek over de Noordelijke IJszee staan ons grote veranderingen in het weer op aarde te wachten.”

Deze grote veranderingen zijn onvermijdelijk door de manier waarop het klimaat werkt. Ons weer op de gematigde breedtegraad wordt grotendeels bepaald door het contrast tussen de kou aan de Noordpool en de hitte rond de evenaar. De reden waarom Groot-Brittannië het hele jaar door regen krijgt, is dat het ligt op de onstabiele grens tussen deze concurrerende luchtmassa's, het zogeheten ‘polaire front’. Ook de noordoosterstormen die 's winters op de Amerikaanse oostkust beuken worden door dit temperatuurverschil veroorzaakt. Maar door het opwarmen van de Noordpool zal dit verschil kleiner worden, en zal de zone waarin dat optreedt zich naar het noorden verplaatsen, omdat de stijgende

temperaturen de klimaatgordels op aarde in de richting van de polen trekken. In Groot-Brittannië kan het in streken als Cornwall en Wales, die het meest te lijden hebben van stormachtig winterweer, straks wel eens weken en maanden achter elkaar windstil zijn, in een klimaat dat over het geheel veel droger is. Alleen Schotland blijft waarschijnlijk voor onbepaalde tijd natter weer houden. En zoals hoofdstuk 3 laat zien is het resultaat in het westen van de Verenigde Staten waarschijnlijk ook droogte – maar dan op een schaal die we in de menselijke geschiedenis nog niet hebben meegeemaakt.\*

Evenmin zijn deze voorspelde veranderingen slechts gissingen: ze zitten er al aan te komen. Satellietmetingen van de laatste 30 jaar laten duidelijk zien dat de straalstromen op beide halfronden in de richting van de polen 1 breedtegraad smaller zijn geworden. Deze hoog gelegen windgordels vormen smalle corridors van snel bewegende lucht bovenin de troposfeer, en markeren de grenzen tussen de verschillende luchtmassa's. Hun geleidelijke verschuiving laat zien dat de typische klimaatzones op aarde zich als reactie op de wereldwijd stijgende temperaturen al zijn gaan verplaatsen.

Toch, alles waar we tot nu toe getuige van zijn geweest, is nog maar het begin. Zoals één groep wetenschappers onlangs waarschuwde: "Het Arctische systeem beweegt zich naar een nieuwe toestand, die buiten het kader van de recente geschie-

---

\* Nvdv: Het KNMI bracht half augustus 2008 het nieuwe *Klimaatrapport* uit. Daaruit blijkt dat Nederland twee keer zo snel opwarmt als het wereldgemiddelde. De oorzaak daarvan is niet duidelijk. Over te verwachten extreme neerslag is met dit rapport geen uitsluitsel te geven. Zoals het KNMI het uitdrukt: 'de trend klinkt nog niet door de ruis heen'. Oftewel de grilligheid van de neerslag is zo groot dat een trend moeilijk is vast te stellen. Intussen is ook het *rapport van de Deltacommissie* verschenen dat de zwakke plekken aanwijst die ons bij extreme scenario's fataal kunnen worden. Later komt de regering nog met een *Nationaal Waterplan*.

denis van de aarde valt.” Zoals de komende hoofdstukken laten zien, zullen zich op deze nieuwe, ijsvrije Noordpool extreme warmteniveaus voordoen, niet te vergelijken met wat de noordelijke poolgebieden de afgelopen miljoenen jaren hebben meegemaakt.

### **Gevaar in de Alpen**

Toen de Engelsen Craig Higgins en Victor Saunders op 15 juli 2003 om 4 uur 's middags de Hörnli-hut verlieten, hadden ze geen idee dat ze aan het eind van de dag deel zouden zijn van de grootste reddingsoperatie die er ooit op het icoon van Zwitserland, de Matternhorn, heeft plaatsgevonden. De bestijging begon eenvoudig; de twee klimmers werkten zich langs drie rotswanden naar boven, waarna steile platte stenen hen omhoog leidden naar een klein bivak halverwege de Hörnli-kam. Om 6 uur waren Higgins en Saunders net bij de tweede hut aangekomen, toen een enorme steenlawine de oosthelling van de berg kwam afdenderen. Terwijl de stenen hen om de oren vlogen, zochten ze dekking achter het gebouw. Als ze verstandig waren geweest hadden de twee klimmers op dat moment rechtsomkeert gemaakt, en waren ze zo snel mogelijk weer afgedaald. Maar bergen doen iets raars met mensen en de beide Britten zetten door.

Drie uur later stond de berg opnieuw te schudden; een zelfde soort gigantische puinregen kletterde naar beneden, dit keer vanaf de noordhelling. Kort daarna was het voor de derde keer raak, en dit keer was het de Hörnli-kam zelf die het begaf. Een Zwitserse berggids ontsnapte op een haar na, toen de grond vlak voor hem begon af te brokkelen. Hij had geen enkele hoop dat hij de gevaarlijk onstabiele zone zou kunnen oversteken, en riep via de radio om hulp. Daarop waren twee helikopters van Air Zermatt vier uur lang bezig om gestrande klimmers van de kam af te plukken en terug te vliegen naar de basishut. “We klommen langzaam naar

beneden”, wist Saunders zich te herinneren, “en al die tijd zagen we aan de rookpluim van stof en aan de terugkomende helikopters dat er een enorme reddingsoperatie aan de gang was.” De twee Britse klimmers beseften dat ook zij in de val zaten, en sloten zich aan bij de rij wachtenden die voor de terugkeer naar veiliger oorden was ontstaan.

Die dag werden er negentig mensen gered, en het is een wonder dat er geen doden of gewonden bij zijn gevallen – een eerbetoon aan de professionaliteit van de Zwitserse bergguides en hulpdiensten. De berg bleef daarna nog dagenlang afgesloten, terwijl experts probeerden vast te stellen hoe groot de kans was dat er nog meer steenlawines zouden komen. In feite waren vallende stenen niet het enige gevaar in het gebied. Op dezelfde dag dat het Matterhorn-drama zich afspeelde braken er enorme brokken ijs af van een gletsjer boven het nabijgelegen vakantieoord Grindelwald. Toen die vervolgens in een rivier stortten, ontstond er golf van twee meter hoog die de berg af kwam zetten. De politie kwam direct in actie en slaagde erin het toeristengebied af te zetten, net voordat de massa rots en modder langs kwam donderen.

Toen hij over de twee bijna-rampen hoorde twijfelde de glacioloog Wilfried Häberli geen moment over de oorzaak. “De Matterhorn wordt door permafrost bij elkaar gehouden”, liet de wetenschapper aan de Universiteit van Zürich aan verslaggevers weten. Maar Zwitserland had zojuist zijn warmste hittegolf ooit beleefd. Die zomer was door de intense hitte alle winterse sneeuw al veel eerder weggesmolten dan normaal, en zodoende begonnen de permafrost en de gletsjers zelf af te smelten. Wanneer dat proces eenmaal inzet, waarschuwde Häberli, “gaat er water stromen, en beginnen er grote stukken rots van de berg af te breken”.

In de Alpen blijft de meeste grond boven zo’n 3.000 meter het hele jaar rond bevroren, en, zo zegt Häberli, door de permafrost wordt deze op zijn plaats gehouden. Maar in de zomer van 2003 kwam de smeltzone op maar liefst 4.600 meter hoogte te liggen – hoger dan de top van de Matter-

horn, en bijna zo hoog als de top van de Mont Blanc, de hoogste berg van West-Europa. En terwijl de klimmers op de Matterhorn die 15e juli met geluk veilig beneden kwamen, waren er die snikhete zomer minstens vijftig andere klimmers minder fortuinlijk; de meesten kwamen door vallend gesteente om het leven.

Häberli, een expert met wereldfaam op het gebied van permafrost, schreef met een aantal anderen vervolgens een wetenschappelijk artikel over de gevolgen voor de Alpen van de hete zomer van 2003. Met zijn collega's rekende hij uit dat de dooi, die tijdens die hittegolf was opgetreden, alles overtrof wat de bergen in de recente geschiedenis ooit meegemaakt hadden, en dat daarom de meeste steenlawines plaatvonden in de heetste maanden, namelijk in juni, juli en augustus. Ze constateerden tevens dat de dooi van 2003 tot een halve meter verder in het gesteente was doorgedrongen dan enige dooiperiode in de afgelopen twintig jaar.

Verrassend genoeg deden de ergste steenlawines zich niet voor op zonnige hellingen waar de directe hitte het grootst was, maar op noordhellingen in de schaduw, waar de hoge luchttemperatuur de berg binnendrong. De studie concludeert veelzeggend dat het bij een verdere wereldwijde opwarming van één graad onvermijdelijk is dat de permafrost in de Alpen nog meer achteruitgaat. "Wijd verspreide steenlawines en geotechnische belastingen van de menselijke infrastructuur zijn waarschijnlijk terugkerende consequenties van opwarmende permafrost in rotswanden, die wordt veroorzaakt door voorspelde klimatologische veranderingen," zo waarschuwen Häberli en zijn collega's. "De extreme zomer van 2003 en het effect daarvan op de permafrost in de bergen zijn te beschouwen als een eerste manifestatie van deze voorspellingen".

Wanneer berghellingen ontdooien en achteruitgaan, lopen hele steden en dorpen in de Alpen en andere bergstreken het risico om vernietigd te worden. Sommige steden, zoals Pontresina in het oosten van Zwitserland, zijn al begonnen

met het bouwen van aarden bolwerken om zich te beschermen tegen dodelijke aardverschuivingen vanaf de smeltende hellingen erboven. Maar veel andere plaatsen zullen onbeschermd en onvoorbereid blijven – totdat het ergst denkbare werkelijkheid wordt, en de dood met een daverende klap van boven af toeslaat, plotseling en zonder waarschuwing. In een warmer wordende wereld gaan er van gebergtes overigens nog meer gevaren uit. In de hierop volgende hoofdstukken is te zien dat er net zo serieus een einde dreigt te komen aan de kostbaarste hulpbron in het leven – water.

### De kikkers van Queensland aan de kook

Niemand kan de Australische autoriteiten ervan beschuldigen dat zij hun verantwoordelijkheid om het regenwoud in de Queensland Wet Tropics te beschermen niet serieus nemen. Bezoekers moeten op ieder moment op de wandelpaden blijven. Brandstof voor kooktoestellen moet van buitenaf worden ingebracht, omdat kampvuren de delicate kringloop van voedingsstoffen in het bos zouden kunnen verstoren. Ieder plukje mos, blad of twijgje is beschermd: het verwijderen van levende materialen vormt een misdrijf. Honden en katten zijn verboden, net als zeep, tandpasta en zonnebrandcrème, voor het geval dat deze chemische stoffen in het water terecht komen en daar het waterleven aantasten. En het is beslist *niet* toegestaan om aan lianen door de bomen te slingeren.

Er zijn goede gronden voor deze intensieve aandacht voor natuurbescherming. De plek wordt sinds 1988 erkend als UNESCO World Heritage Site en herbergt zeventienhonderd plantensoorten die nergens anders op aarde te vinden zijn. In het ecosysteem van de Wet Tropics leven vele soorten die unieke overblijfselen vormen van de oeroude regenwouden die ooit, 120 miljoen jaar geleden, op het supercontinent Gondwana groeiden. Veel van de varensorten die hier nu

nog worden aangetroffen werden ooit afgegraasd door dinosaurussen. Wonderbaarlijke vleesetende planten – zoals de bekerplant, of zonedauwsoorten – steken uit de bodem. Pythons slingeren in de takken, terwijl skinken en gekko's over rotsblokken rennen en langs boomstammen omhoog klauteren. Dertien zoogdiersoorten, waaronder boomkangoeroes en ringstaartopossums, zijn eveneens uniek in dit Wet Tropics-gebied. Alles bij elkaar vinden een kwart van de kikkers, eenderde van de zoetwatervissen en bijna de helft van de vogels van Australië hier hun habitat – en dat alles op 1 procent van het continent.

Er is echter één bedreiging waarover de Australische autoriteiten geen macht hebben, en die zij zelfs éénstemmig en actief hebben genegeerd. Deze komt niet van wilde varkens of reuzenpadden, en zelfs niet van duizend slingerende, rotzooi makende, tandenpoetsende mensen. Deze bedreiging speelt mee nu het klimaat dat het bos in stand houdt – met op sommige plekken een jaarlijkse neerslag van een verbijsterende 8 meter – langzaam aan het opwarmen is. Het blijkt dat het Queensland Wet Tropics regenwoud een van de plekken op aarde is die het gevoeligst zijn voor klimaatverandering. Een opwarming van slechts één graad zal verwoestende gevolgen hebben voor de diversiteit en het leefgebied van soorten.

De reden daarvoor zit hem in de ongewone topografie van het Wet Tropics-gebied. Anders dan het Amazonewoud, dat een enorm, vlak bekken bedekt tot waar het tegen de oostelijke flanken van de Andes oploopt, groeit het regenwoud in Queensland op heuvelachtig terrein. Deze ondergrond strekt zich uit vanaf het witte strand dat de oceaan omzoomt, tot op hoogtes van 1.500 meter, en soms meer. Veel van de soorten die uniek zijn voor dit gebied komen alleen boven bepaalde hoogtes voor. Zo bestaat er een ringstaartopossum die alleen boven 800 meter hoogte aan te treffen is, en leven veel vogels, reptielen en kikkers uitsluitend bovenin de bergen. Met het opwarmen van het klimaat schuiven de temperatuurzones steeds verder de hellingen op. Daardoor worden deze

soorten in steeds kleinere habitat-eilandjes geduwd, totdat zij uiteindelijk helemaal nergens meer kunnen leven. Net als de soorten op de Noordpool zullen zij letterlijk van de planeet af worden gedrukt.

Dr. Steve Williams van de School of Tropical Biology aan de James Cook University waarschuwt al jaren voor de gevaren voor het Wet Tropics regenwoud van zelfs kleine veranderingen in het klimaat. Op zijn onderzoeksreizen leidt Williams teams van Earthwatch-vrijwilligers, en zo heeft hij 652 tellingen van vogels gedaan, 546 van reptielen en 342 van kikkers; daarnaast heeft hij op verschillende momenten zo'n 50.000 vallen gezet om 's nachts kleine zoogdieren in te vangen. Gewapend met stapels gegevens hierover draaide hij een computerweergave van het gebied in een veranderend klimaat, en bekeek hij de resultaten om te zien wat er zou gebeuren. Zelfs met maar één graad temperatuurstijging waren de gevolgen al dramatisch. In het bijzonder zouden 63 van de 65 soorten die in het model gestopt waren eenderde van hun cruciale leefgebied kwijtraken. Eén soort smalbekkikker, die zich niet voortplant via donderkopjes maar eitjes legt in de vochtige bodem, zal volgens de voorspelling volledig uitsterven. En wanneer de opwarming nog verder doorzet, lopen de snelheden waarmee de biodiversiteit wordt uitgehold dramatisch op. In William's woorden zorgt dat bij elkaar voor "een milieuramp van mondiaal belang".

Overigens zijn het niet alleen diersoorten die hier de gevolgen van zullen ondervinden. Een vergelijkbaar onderzoek door David Hilbert van CSIRO Tropical Forest Research Centre gaf aan dat één graad opwarming de oppervlakte hooglandregenwoud zou halveren, en daarmee het leefgebied van vele van de bovengenoemde zeldzame soorten van de kaart zou vegen. Zolang de regio veel regen blijft krijgen, zullen de regenwouden als zodanig niet uit Queensland verdwijnen, maar zonder deze kostbare relictten van een oeroud supercontinent zal de wereld van vandaag onmetelijk veel armer zijn. Bovendien zal de Australische overheid, die meer

dan tien jaar heeft geweigerd om de wereldwijde opwarming serieus te nemen, hebben gefaald in haar internationale plicht om een UNESCO World Heritage Site te beschermen.

Op slechts een paar kilometer van het schitterend witte strand aan de kust van Queensland ligt nog een bedreigde World Heritage Site: het Great Barrier Reef. Dit is het grootste en meest ongerepte koraalrif van de hele wereld, een enorme onderzeese muur van koraal, die met zijn 2.300 strekkende kilometers langs de noord-oostkust van Australië het grootste natuurlijke object op aarde vormt. Als één van de meest spectaculaire en diverse ecosystemen op de planeet vormt het rif het leefgebied voor 1.500 soorten vis, 359 soorten hard koraal, 175 soorten vogels en meer dan 30 soorten zoogdieren. Het is één van de laatste toevluchtsoorden voor de dugong (zeekoe) en herbergt zes van de zeven soorten bedreigde zeeschildpadden ter wereld.

Maar de oceanen rond het Great Barrier Reef zijn aan het opwarmen, zoals overal op de planeet, en dat dreigt dit unieke ecosysteem op een spoor van aftakeling te zetten waarvan het niet meer zal kunnen herstellen. Koraalriffen zijn in feite de uitwendige skeletten die door miljarden piepkleine koraalpoliepjes worden aangemaakt, wanneer zij calciumcarbonaat uitscheiden in de vorm van takken, waaiers en bollen. Deze onderdelen groeien dan in de loop van duizenden jaren aan elkaar tot een rif. Op elke poliep groeien algen, hele kleine plantjes die in symbiose leven met hun dierlijke gastheer. Beide partijen varen daar wel bij; het koraal krijgt de suikers die de algen aanmaken door licht via fotosynthese in energie om te zetten, terwijl de algen voedingsstoffen halen uit de afvalproducten van de poliep. Maar deze knusse relatie kan alleen bestaan onder de juiste aquatische omstandigheden. Boven de drempelwaarde van 30°C waarop het koraal nog warmte verdraagt worden de algen verjaagd, en sterft het 'verbleekte' koraal snel af, tenzij er snel weer kouder water bijkomt.

Koraalverbleking is zonder twijfel een recent fenomeen, dat in oceanen over de hele wereld pas sinds 1980 waargenomen is. Wetenschappers hebben diep in koraalriffen geboord en geen enkele aanwijzing gevonden dat zulke periodes zich de afgelopen millennia al eerder hebben voorgedaan. Maar sinds het door mensen veroorzaakte broeikaseffect de oceanen warmer is gaan maken, worden de koraalriffen op aarde met steeds grotere regelmaat getroffen door periodes van verbleking – met verwoestende gevolgen. In 1998 deed zich de eerste massale koraalverbleking op het Great Barrier Reef voor. Sindsdien is de situatie steeds verder verslechterd. In 2002 trad er opnieuw grootschalige verbleking op. Dit keer was 60 tot 95 procent van alle onderzochte riffen in het hele mariene park in zekere mate verbleekt. Van een klein aantal riffen, vooral dichtbij het strand, in het heetste water, was vrijwel niets meer over.

Ik had het geluk dat ik in de zomer van 2002 op het Great Barrier Reef was, op bezoek bij het onderzoeksstation van de University of Queensland op Heron Island. Het was een angstaanjagend efficiënt instituut. Ik was nog maar een paar minuten van boord van de catamaran uit Grahamstown of ik kon een witkapnoddy-stern en een dunbekpijlstormvogel uit elkaar houden. Ik ontdekte ook dat de naam Heron Island niet helemaal klopte; de witte vogel in kwestie is om precies te zijn een oostelijke rifeiger. Het was er oogverblindend mooi: “een volière met daaromheen een aquarium”, zoals een van de onderzoekers het treffend wist uit te drukken. Geelbandrallen scharrelden als tamme kippen in het rond, de onderzoekshutten in en uit. (Twee studentes hadden er één geadopteerd en Sheryl genoemd.) Al snel kreeg ik de man in het oog voor wie ik werkelijk gekomen was; doelgericht beende hij over het terrein, met zijn duikpak tot aan zijn middel afgepeld. Ove Hoegh-Guldberg was duidelijk iemand die net zo lief in als uit het water was. Een van zijn favoriete verhalen ging over de keer dat zijn vinger klem kwam te zitten in de kaken van een reusachtige mossel, en hij het beest los

van de ondergrond moest rukken om niet zelf te verdrinken in het opkomende tij. Bij terugkeer werd hij vervolgens door een parkwachter uitgescholden omdat hij een beschermde soort beschadigd had.

Hoegh-Guldberg schreef in 1999 een artikel waarin hij voor het eerst wereldwijd onder de aandacht bracht dat het voortbestaan van koraalriffen door verbleking wordt bedreigd; het werd een mijlpaal. Nadat hij in verschillende delen van de wereld de tolerantiegrens van koraal voor warmte had bepaald, paste hij die toe in een model voor de stijging van zeewatertemperaturen in de loop van de 21e eeuw. De uitkomsten vielen zelfs hem rauw op zijn dak. Hij ontdekte dat met minder dan één graad wereldwijde opwarming in de atmosfeer de zeeën rond 2020 zoveel warmer zullen zijn geworden, dat 1998 met zijn massale verblekingen op het Great Barrier Reef een ‘normaal’ jaar zal zijn. Aangezien een ernstig verbleekt koraalrif zo’n 30 jaar nodig heeft om te herstellen, zullen jaarlijkse verblekingsrondes het ecosysteem verwoesten. “Het Great Barrier Reef”, zo schreef Hoegh-Guldberg in zijn artikel, “zal daardoor veranderen in een levensgemeenschap die wordt gedomineerd door andere organismes, zoals zeevieren, niet door rif-vormende koralen”. Andere koraalrif-ecosystemen, van de Cariben tot Thailand, zouden dan op dezelfde manier veranderd zijn. Wanneer de koraalriffen aan hun einde komen, zal het met één van ’s werelds grootste schatkisten van biodiversiteit voorgoed gedaan zijn.

Met dit barre scenario in ons hoofd gingen we diezelfde middag dat ik op Heron Island aankwam samen ergens snorkelen. Plassend door het ondiepe water verstoorden we een enorme school pelsers, die zich *en masse* omdraaiden en verder richting strand schoten. Wat verderop lagen een stuk of zes grote pijlstaartroggen lui te wapperen, daar waar de hardere wind voor genoeg golfslag zorgde om van het snorkelen een riskante onderneming te maken. Om de zoveel tijd sloeg er een golf over de luchtpijp van m’n snorkel heen, zodat ik ineens een slok zout water binnenkreeg. Ove was er niet van

onder de indruk, en we lagen een poosje te watertrappen terwijl hij koraal aanwees dat was aangetast.

“Zie je dat felle rood en blauw? Dat is dus verbleekt. Het is ironisch dat je de mooiste kleuren krijgt als het verbleekt is.” Het vertakkende koraal was er vaak het slechtst aan toe; hele gebieden waren spierwit gebleekt. Op sommige plekken waren alleen de toppen van de onderwater-geweien verbleekt, terwijl elders de hele structuur was aangetast. Maar slechts een minderheid had de gezonde bruinige kleur die aangaf dat de symbiotische algen er hun werk nog deden.

“Hoe groot is de kans dat het weer herstelt?”, proestte ik terwijl ik weer een golf binnenkeeg.

“Wanneer het van nu af aan koud blijft zal het meeste zich waarschijnlijk wel herstellen”, antwoordde hij. “Maar een deel ook niet. En als de temperatuur binnenkort weer omhoog gaat, zal veel hiervan vermoedelijk afsterven.”

Het werk van Hoegh-Guldberg is aangevuld door een recenter onderzoek dat een iets optimistischer voorspelling doet. Het werk in de Caraïbische en Indische oceaan door Andrew Baker en zijn collega's, dat later in *Nature* is gepubliceerd, geeft aan dat koralen zich wellicht beter kunnen aanpassen dan eerst werd gedacht. Daarmee zouden zij zich dus ook minder makkelijk volledig laten uitroeien. De onderzoekers bestudeerden koraalgemeenschappen die in 1998 verbleekt waren, om te zien in hoeverre zij zich hadden weten te herstellen. Tot hun verrassing bleek dat op alle door hen onderzochte plekken het type symbiotische algen in het koraal was vervangen door een versie die beter tegen warmte kan. Met een hogere drempel voor warmte-stress kunnen aangetaste riffen in de toekomst misschien warmere zeeën overleven zonder volledig af te sterven, zo suggereerden de wetenschappers.

Maar Ove Hoegh-Guldberg is het daar niet mee eens. Zelfs met een grotere warmtetolerantie van andere algen, zo stelt hij, wordt de oceaantemperatuur voor de meeste koralen nog steeds te hoog om in te overleven. Met zijn mede-auteurs

gebruikte hij de laatste computermodellen en rif-analyses om de frequentie van verbleking over de komende tientallen jaren opnieuw te voorspellen. En hun uitkomsten bevestigden de eerdere, pessimistische analyse. Tegen het jaar 2030 zullen de meeste koraalriffen ter wereld elke 3 tot 5 jaar met ernstige verbleking te maken krijgen, en tegen het jaar 2050 zal het om het jaar raak zijn.

Een recentere golf van verbleking, die in 2003 toesloeg in de Caraïbische Zee, lijkt dat te onderstrepen. Die zomer werden er in dat gebied hogere watertemperaturen geregistreerd dan wat er in 20 jaar aan satellietgegevens ooit gemeten is. Dat waren trouwens dezelfde temperaturen die het orkaanseizoen van 2005 zo dodelijk maakten; de orkaan Katrina trof New Orleans in 2005, na over deze zelfde, ongewoon warme oceanen te zijn getrokken. En het waren temperaturen die in een atmosfeer zonder de huidige lading broeikasgassen vrijwel uitgesloten zouden zijn. De uitwerking daarvan op het Caraïbische koraal was rampzalig. Volgens onderzoek door duikers was van het koraal bij de Britse Maagdeneilanden 90 procent verbleekt, bij de Amerikaanse Maagdeneilanden 80 procent, bij de Nederlandse Antillen 85 procent, bij Trinidad en Tobago 66 procent en bij de Franse Antillen 52 procent. Sommige riffen kunnen zich de komende jaren misschien nog wel herstellen, maar voorspellingsmodellen geven aan dat rond het midden van de eeuw ook in dit gebied om het jaar verbleking van die orde van grootte op zal treden. De Amerikaanse National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) publiceerde in de zomer van 2008 het eerste wereldwijde verblekingsoverzicht.

In elk geval zijn er maar heel weinig koraalriffen op de wereld in zo'n conditie dat zij de uitdaging van klimaatverandering kunnen aangaan. Directe menselijke invloeden – door rioolozingen, overbevissing en uitspoeling vanuit landbouwgronden – hebben koraalriffen over de hele wereld al gereduceerd tot schaduwen van hun eerdere ongereptheid. In totaal is ongeveer 70 procent van de koraalriffen ter wereld dood,

dan wel stervende. Voor de mondiale biodiversiteit is dat een ramp op een haast onvoorstelbare schaal. In termen van de levendigheid en de diversiteit die zij herbergen, worden zij alleen door de regenwouden overtroffen; wereldwijd verschaffen koraalriffen beschutting en voedsel aan eenderde van al het leven in de oceanen, waaronder 4.000 soorten vissen.

Intussen worden niet alleen de riffen als zodanig bedreigd maar ook de organismen die ze bouwen. Een artikel van de mariene bioloog Kent Carpenter met zijn collega's gepubliceerd in *Science* in juli 2008 concludeert dat tenminste eenderde van de zoöxathellate rifbouwende koraalsoorten dreigt uit te sterven vanwege koraalverbleking, ziektes die horen bij heter water en directe verstoring door de mens.

Het rif van Heron's Island mag misschien goed beheerd worden, datzelfde kan niet gezegd worden van koraalriffen elders in de Stille Oceaan. Op dezelfde reis waarop ik Ove Hoegh-Guldberg opzocht snorkelde ik ook langs de zogeheten Koraalkust van Fiji, in één van de weinige openingen die ik kon vinden tussen de 5-sterren hotels en luxe vakantieoordens die inmiddels het hele gebied hebben overwoekerd. In plaats van levendig gekleurde riffen die ritselen van de papegaaivissen en tandbaarzen, trof ik hopen puin aan: de uit elkaar gevallen overblijfselen van koraal die somber opdoemden in de drabbige oceaan. Het leek de hordes zonnebaders op het strand niets te kunnen schelen, maar voor mij was de ervaring een deprimerende *reality check*. De Koraalkust van Fiji is onkwetsbaar voor klimaatverandering, zo moest ik concluderen, want hij is al dood.

Een andere plek van biodiversiteit – en eveneens een World Heritage Site die wordt bedreigd door wereldwijde opwarming – is de Cape Floristic Region in Zuid-Afrika. Dit gebied bestrijkt een enorme boog langs de kust rond Kaapstad, en buiten de tropische regenwouden om herbergt het de grootste concentratie hogere plantensoorten ter wereld. Op de onheilspellend rotsige bodems en in het droge mediterrane klimaat

groeien er 9.000 verschillende planten, waarvan er meer dan 6.000 nergens anders ter wereld voorkomen. De meest symbolische planten in het gebied zijn de protea's of suikerboscies. De Koningsprotea, met zijn enorme zonnebloemachtige hoofd, heeft zijn titel van Zuid-Afrika's nationale bloem zonder meer verdiend. Het gebied is overigens allerminst ongerept. Ooit zwierven er leeuwen en neushoorns door dit heuvelland, waar nu wijngaarden en rooibosthee-plantages de laatste wilde stukken binnendringen.

Volgens een onderzoeksteam van het Zuidafrikaanse National Biodiversity Institute zouden ook kleine veranderingen in het klimaat een verwoestende uitwerking hebben op de nog bestaande kerngebieden van protea's en andere inheemse soorten. Het wetenschapsteam gebruikte het model van het Britse Hadley Center om klimaatveranderingen in de regio tot 2020 te simuleren, en stelde vast dat eenderde van de protea-soorten bedreigd zou zijn, terwijl er vier volledig zouden uitsterven.

Ook in Noord-Amerika zou één graad klimaatverandering een bedreigde diersoort over de rand naar uitsterving kunnen duwen; een die schattig, en aibaar is. Volgens het Wereldnatuurfonds zijn fluithazen – kleine, hamsterachtige diertjes met ronde oortjes en lange snorharen – de eerste zoogdieren die door klimaatverandering in gevaar komen. Fluithazen leven in rotsspleten hoog in de bergen in het westen van de Verenigde Staten en Zuidwest-Canada. Ze zijn niet alleen bekend omdat ze zo schattig en aibaar zijn, maar vanwege hun agrarische activiteiten. Deze kleine verwanten van het gewone konijn maaien gras, leggen het in de zon te drogen en slaan het dan voor de winter op in typische 'hooibergen' bovenop de rots. (Als charismatische diersoort hebben fluithazen zelfs hun eigen cult-achtige aanhangers: kijk op [www.pikaworks.com](http://www.pikaworks.com) voor alles van fluithaasmuziek tot fluithaasmuismatten.)

Fluithazen zijn schuwe bestjes die nooit meer dan een kilometer van hun nest afdwalen. Met het opwarmen van

het klimaat beginnen zij steeds verder geïsoleerd te raken, op steeds kleinere geografische eilanden, omdat de temperatuurzones omhoog schuiven, richting de bergtoppen. Er staan al plekken in de Verenigde Staten te boek waar ze lokaal zijn uitgestorven. Zoals ecooloog en fluithaas-enthousiasteling Dr. Erik Beaver stelt: “We zijn getuige van de eerste voorbeelden in onze tijd, waarin de wereldwijde opwarming er blijkbaar aan bijdraagt dat een Amerikaans zoogdier lokaal uitsterft, op plekken die dwars door een hele ecoregio liggen.”

Het is al een cliché om het te hebben over de ‘kanarie in de kolennijn’ wanneer het gaat over gevolgen van het klimaat voor de natuur. Maar één diergroep illustreert dit punt beter dan alle andere: de amfibieën. Met hun vochtige huid en hun eerste levensfasen in het water zijn kikkers, salamanders en padden extra kwetsbaar voor veranderingen in hun omgeving. En het is dan ook een amfibie – de gouden pad uit Costa Rica – die vaak wordt genoemd als het eerste bekende geval van uitsterving door klimaatverandering.

Volgens de onderzoeker en schrijver Tim Flannery was hij ooit het ‘kroonjuweel’ van het Monteverde Cloud Forest in Costa Rica. In 1987 werd deze lichtgevende, oranje amfibie er nog met honderden tegelijk waargenomen, verzameld rond poelen in het bos, klaar om te paren. Maar er waren toen al signalen dat er gevaar dreigde: de herpetoloog Marty Crump, die getuige was van deze laatste wilde paringsdans van gouden padden, zag ook hoe de eitjes die daar het gevolg van waren, achterbleven in de opdrogende poelen. Slechts 29 donderkopjes haalden het eind van de eerste week, terwijl er 43.500 eitjes lagen te verdrogen en te rotten. Het jaar daarop vond Crump niet meer dan één enkel, solitair mannetje, en een jaar later, in 1989, dook datzelfde mannetje opnieuw op. Die dag, 15 mei 1989, was de laatste keer dat iemand een gouden pad zag. Uiteindelijk werd hij in 2004 bijgeschreven op de lijst van uitgestorven soorten. De doodsoorzaak lijkt te zijn geweest dat de mist die het bos voedt met kleine druppel-

tjes uit de vochtige wolken, in zijn geheel is opgetrokken. Met de opwarming van de lucht in de bergen kwam de onderkant van de wolken domweg boven het bos te liggen, zodat de broedpoelen van de gouden pad daaronder droogvielen.

Dit gedenkwaardige dier mag dan de eerste zijn geweest, maar het is al niet meer de enige amfibie die door de stijgende temperatuur is uitgestorven. Overal in de tropen zijn de kikkerpopulaties in elkaar geklapt. Van de 110 tropische Amerikaanse soorten boomkikkers zijn er meer dan 100 verdwenen, zelfs in schijnbaar ongerepte bossen die ver van de directe menselijke verstoring af liggen. Niemand weet precies waarom. Sommige biologen wijten het aan zogeheten schijn-schimmels, die in nieuwe gebieden beginnen op te komen en populaties plotseling zouden kunnen uitdunnen. Anderen schuiven het op mysterieuze ziektes, die vooralsnog onontdekt en ongeïdentificeerd zijn gebleven. Maar over één ding zijn de experts het in grote lijnen eens. Stijgende temperaturen spelen een centrale rol in de epidemische uitsterving, hetzij door nieuwe ziektes te helpen zich te verspreiden, hetzij door amfibieënpopulaties onder druk te zetten en vatbaarder voor uitsterving te maken. In deze specifieke moordzaak mag het wapen dan nog ter discussie staan, maar wie de dader is, is duidelijk.

Nergens lijkt het veilig te zijn. Eén graad opwarming zal ernstige gevolgen hebben voor sommige van de meest unieke ecosystemen ter wereld. Dat verzwaart de biodiversiteitscrisis, die om hele andere redenen dan de klimaatverandering inmiddels een heel eind op weg is. Door de alsmaar uitdijende zones van menselijke invloeden worden kwetsbare wilde soorten naar de marges geduwd en geïsoleerd in steeds kleinere stukjes van hun natuurlijke leefgebied. Door weg te trekken of hun gedrag te veranderen zullen zij zich nooit snel genoeg kunnen aanpassen aan de veranderende temperaturen.

Terwijl koraalriffen een cruciale rol spelen als bescherming van de kust tegen stormen en als bakermat van de visserij, kan niemand hard maken dat fluithazen, suikerbossies

en boomkijkers van wezenlijk belang zijn voor het welvaren van de wereldeconomie. Hun waarde is intrinsiek, niet financieel. Maar de wereld wordt er een stuk armer op als zij er eenmaal niet meer zullen zijn.

### Orkaanwaarschuwing in het zuiden van de Atlantische Oceaan

Met alle krantenkoppen over tropische orkanen die de Verenigde Staten treffen is er één storm geweest die als geen enkele andere de wetenschappelijke wereld overrompelde.\* Het was niet Katrina, die New Orleans verwoestte en meer dan duizend mensen het leven kostte. Het was niet Rita, nog een monster van de 5e categorie, die delen van de stad opnieuw onder water zette, amper een maand nadat Katrina toesloeg, of Gustav, die in september 2008 de autoriteiten deed besluiten de bevolking van New Orleans te evacueren. Het was ook niet de orkaan Wilma, die binnen één enkele dag van een onbeduidende tropische storm uitgroeide tot de zwaarste wervelstorm die er ooit in het Atlantische bekken genoteerd is. Nee, de storm die de voorspellers werkelijk op hun hoofd liet krabben deed zich een jaar eerder voor, in 2004. En zij sloeg toe in een deel van de wereld waar geen orkanen voor zouden moeten komen. Zij heette Catarina, en trof de oostkust van Brazilië.

Als standaard wetenschappelijke wijsheid geldt dat tropische orkanen zich alleen kunnen formeren bij een zeewatertemperatuur boven de 26,5°C. En behalve warme oceanen moet voor de vorming van tropische stormen ook de ‘windschering’ laag zijn. Anders kan deze zijwind op grote

---

\* Nvdv: Een tropische orkaan heet in Amerika hurricane, in Azië taifoon en hier ook wel cycloon. Zo'n wervelstorm kan honderden kilometers in doorsnee zijn. In een tropische orkaan ontstaan de wervelingen van onderaf, in tegenstelling tot de tornado.

hoogte de maalstroom van een aangroeiende storm horizontaal onthoofden. Zoals elke weerman ons kan vertellen komen deze omstandigheden alleen voor in de tropen in de Noord-Atlantische Oceaan. Nog nooit is er een orkaan in de Zuid-Atlantische Oceaan geregistreerd – tenminste, vóór maart 2004. Waarachtig, toen er op 20 maart 2004 voor de Braziliaanse kust een vreemde draaikolk van wolken ontstond, konden lokale meteorologen hun ogen niet geloven. Een orkaan in de Zuid-Atlantische oceaan was zo onvoorstelbaar dat velen van hen nog altijd weigerden om de term ‘orkaan’ in de mond te nemen toen Catarina – compleet met stortregens en windsnelheden van 150 km per uur – vlakbij de stad Torres aan land kwam, 30.000 huizen vernielde en een aantal mensen doodde. Veel van de slachtoffers hadden nagelaten om een schuilplaats te zoeken toen de storm al op de kust kwam afdenderen, omdat ook zij weigerden te geloven dat orkanen in Brazilië mogelijk waren.

In het onvermijdelijke meteorologische post-mortem leek het er inderdaad op dat de storm een buitenissigheid was, iets wat hen die eronder geleden hadden maar één keer in hun leven kon overkomen. Vreemd eraan was dat de zeewatertemperatuur niet ongewoon hoog was geweest toen hij aan kracht begon te winnen. In plaats daarvan kreeg Catarina in feite een opsteker van een zeldzame combinatie van andere atmosferische factoren. Die zorgden ervoor dat de werveling in de storm heel weinig meekreeg van de dodelijke windschering, die in de Zuid-Atlantische Oceaan normaal gesproken verhindert dat er cyclonen ontstaan. Het beeld is complex, maar roept overduidelijk een vraag op: zal de wereldwijde opwarming behalve door het opwarmen van de zee en daarmee het vergroten van de kans op het ontstaan van wervelstormen, ook vaker de omstandigheden scheppen die tropische orkanen in nieuwe gebieden aan kracht laten winnen, zoals in de Zuid-Atlantische Oceaan?

Over deze vraag bogen zich vanuit Australië twee meteorologen, Alexandre Bernardes Pezza en Ian Simmonds, toen

zij Catarina forensisch fileerden, en daarover in augustus 2005 publiceerden in het tijdschrift *Geophysical Research Letters*. Zij trokken een voorzichtige conclusie, die niettemin een alarmerend vooruitzicht inhield: het leek er inderdaad op dat de warmer wordende atmosfeer eerder voor het soort omstandigheden zorgt waaronder Catarina op zo'n ongebruikelijke plek kon ontstaan. "Daarom", schreven zij, "zijn er aanwijzingen dat Catarina in verband staat met verandering in de luchtcirculatie op het zuidelijk halfrond, en dat zich in de toekomst, onder warmere mondiale omstandigheden, vaker cyclonen in de Zuid-Atlantische Oceaan zouden kunnen voordoen."

Als zich met een wereldwijde opwarming van tot nu toe slechts 0,8°C al een orkaan heeft kunnen formeren, kan een extra graad opwarming de kans op wervelstormen in dit kwetsbare gebied in de toekomst wel eens flink vergroten. Niet alleen zullen de Brazilianen vaker de luiken moeten sluiten, en misschien grote stukken van hun dicht bevolkte kust evacueren, maar ook zullen de diensten die orkanen voorspellen naar een heel nieuw oceaانبekken moeten worden uitgebreid.

Het orkaanseizoen van het jaar daarop, 2005, bracht eveneens een verrassing, die suggereert dat Brazilië niet het enige gebied is dat in onze wereldwijd opgewarmde toekomst tropische cyclonen in het oog moet houden. Op 9 oktober 2005 verscheen er een nieuwe tropische storm op 800 kilometer ten zuidoosten van de Azoren, in het oostelijke deel van de Atlantische Oceaan, die snel aan kracht won en de status van orkaan bereikte terwijl hij voorbij het Portugese eiland Madeira raasde. Orkaan Vince zwakte gelukkig af voordat hij bij het Spaanse Huelva aan land kwam, maar schreef wel geschiedenis als de eerste tropische cycloon waar Europa ooit mee te maken heeft gehad.

Zoals gezegd kunnen tropische stormen zich volgens de conventionele wijsheid alleen formeren boven het warmere water duizenden kilometers ten zuidwesten van het Iberische

schiereiland. Op het moment van schrijven zijn de meteorologen nog bezig om uit te zoeken welke combinatie van omstandigheden voor Vince verantwoordelijk is geweest, maar zoals gezegd is het duidelijk wat dit kan betekenen: met een steeds snellere wereldwijde opwarming vormt de bestaande deskundigheid over de kraamkamers van orkanen niet noodzakelijkerwijs een goede leidraad voor de toekomst. Er zouden zich nog wel eens veel meer orkaanexperts op het hoofd kunnen krabben voordat zij uiteindelijk toegeven dat niet alleen Brazilië, maar nu ook Europa kwetsbaar is voor deze vervaarlijke stormen.

Inmiddels zijn er zelfs al aanwijzingen hoe dit zich zou kunnen voordoen. Spaanse en Duitse klimatologen die gesimuleerde stormen observeerden in een computermodel, publiceerden in 2007 een artikel, waarin zij opperden dat het hele Middellandse Zee-gebied binnenkort in de vuurlinie kan komen te liggen, aangezien de watertemperatuur er oploopt tot een niveau waarop waarachtige tropische cyclonen worden ontketend – in een regio waar zij zich nog nooit hebben vertoond. Het grootste aantal virtuele cyclonen deed zich voor op het heetste stuk van de Middellandse Zee, tussen Italië en Libië, en wanneer zij zich eenmaal hadden geformeerd, hielden deze krachtige stormen een week aan, of nog langer. Een van de computer-orkanen ontstond in het oostelijk deel van de Middellandse Zee, en bewoog zich toen naar het westen, helemaal tot aan de zuidkust van Frankrijk – dit tot de verbijstering van de toekijkende onderzoekers. Een andere storm vormde een smal, symmetrisch oog met hevige stortregens, net zoals tropische cyclonen dat doen. De ooit zo vredige kusten van Spanje tot aan Cyprus worden in een wereldwijd opgewarmde toekomst bedreigd door cyclonen die aan land komen. Dat idee moet één van de meest opmerkelijke voorspellingen zijn die ooit uit de wereld van de klimaatmodellen is komen rollen.

Maar inmiddels komen er ook uit de echte wereld aanwijzingen dat de kenmerken van orkanen aan het veranderen

zijn nu de oceanen overal ter wereld warmer worden. Eén van de grootvaders van de natuurkunde van tropische cyclonen, Kerry Emanuel van het Massachusetts Institute of Technology, publiceerde kort geleden een artikel in *Nature* dat zijn eigen academische storm ontketende. De gebruikelijke visie houdt in dat de wereldwijde opwarming vooralsnog te klein is om een meetbaar effect op tropische cyclonen te hebben. Emanuel bekeek de gegevens opnieuw en concludeerde, in tegenspraak daarmee, dat wervelstormen wel degelijk al heviger aan het worden zijn, en ook langer duren, en dat dit grotendeels te danken is aan watertemperaturen die oplopen door de wereldwijde opwarming. De index voor stormintensiteit was de laatste 30 jaar ook niet zomaar een paar procent omhoog gegaan, maar is feitelijk verdubbeld: een veel grotere stijging dan door zowel theorie als modelstudies was voorspeld.

Sindsdien zijn Emanuel's gegevens en methodes weliswaar betwist – in een academische discussie die te technisch is om hier te analyseren – maar het is vermeldenswaard dat zijn conclusies worden gestaafd door een tweede publicatie, dit keer in *Science*, door een team experts van het Georgia Institute of Technology in Atlanta. Zij analyseerden veel van dezelfde orkaangegevens, die de afgelopen dertig jaar door vliegtuigen, satellieten en schepen zijn verzameld. Dit onderzoeksteam kwam een aanzienlijke stijging op het spoor van zowel het aantal als het percentage wervelstormen van de zwaarste categorieën 4 en 5, en dat ondanks een algemene daling van het aantal cyclonen.

Net als Emanuel bekeek dit team gegevens van zowel de Stille als de Atlantische Oceaan, om zo een mondiaal beeld op te kunnen bouwen. En hoewel zij een andere statistische maatstaf hanteerden, constateerden zij net als hij dat de zwaarste stormen zich tussen 1970 en 2004 in aantal bijna verdubbeld hadden. Het team uit Georgia concludeerde hieruit dat het onwaarschijnlijk is dat de toename van het aantal orkanen in categorie 4 en 5 voortkomt uit natuurlijke kli-

maatcyclussen, maar juist samenhangt met de temperatuurstijgingen in de tropische oceanen.

Het orkaanseizoen van 2005 brak alle Atlantische records, en schreef duizend doden, 1 miljoen daklozen en 200 miljard dollar schade op zijn conto. Een jaar later probeerden twee gezaghebbende klimatologen het pleit te beslechten of de wereldwijde opwarming nu wel of niet had bijgedragen aan de serie rampzalige wervelstormen. Zonder twijfel hadden de hoge temperaturen van het zeewater – de hoogste ooit gemeten – dat jaar bijgedragen aan de hevigheid van Katrina, Wilma, Rita en de andere orkanen in 2005. Maar Kevin Trenberth en Dennis Shea zetten complexe wiskunde in om erachter te komen hoeveel van het Atlantische warmte-alarm aan wereldwijde opwarming toe te schrijven is, en hoeveel aan natuurlijke cyclussen. Hun conclusie zou ons wakker moeten schudden: meer dan de helft van de extra warmte was het gevolg van menselijke invloeden. Zoals velen destijds al vermoedden was Katrina slechts voor een deel een natuurramp.

### Zinkende atollen

Ik vind het vreselijk om het zo botweg te stellen, maar het Stille Zuidzee-eiland Tuvalu is hoogstwaarschijnlijk niet meer te redden. Het oceaanstelsel lijkt op een fluitketel die langzaam aan de kook raakt; wanneer de omstandigheden veranderen vertoont het een hele lange reactietijd, zodat de zeespiegel nog eeuwen lang gestaag zal blijven stijgen, zelfs als alle uitstoot van broeikasgassen morgen zou stoppen. Zoals ik in *Het nieuwe weer* al heb opgetekend, heeft Tuvalu nu al regelmatig te maken met overstromingen die het gevolg zijn van eerdere stijgingen van de zeespiegel. Die extra stijging in alle oceanen op aarde zal de doodslok luiden voor deze fascinerende, levendige eilandsamenleving.

Tuvalu is met zijn luttele 9.000 inwoners in feite één van de kleinste van de vijf atolstaten die binnenkort niet meer zullen

bestaan. De andere zijn de grote zuster van Tuvalu, de atolgroep Kiribati, met een bevolking van 78.000, de Marshall-eilanden met 58.000 mensen, het piepkleine Tokelau (2.000 inwoners; een afhankelijk gebiedsdeel van Nieuw-Zeeland) en de Malediven, de grootste en dichtst bevolkte van alle eilandgroepen, met 269.000 inwoners. Samen met de mensen die worden verjaagd uit de kustgebieden van andere eilanden die geen atol zijn, zitten we zo al op een half miljoen mensen die plotseling van hun cultuur en oorsprong gescheiden zullen worden, en een nieuw thuis moeten zien te vinden. Nieuw Zeeland heeft aarzelend aangeboden om een klein aantal bewoners van Tuvalu op te nemen, maar andere landen hebben zichzelf nog niet als vluchtplaats opgeworpen, laat staan al die rijke landen die om te beginnen het grootste deel van het probleem veroorzaakt hebben.

Alleen als zich een reusachtige orkaan of vloedgolf zou voordoen, zullen de atolstaten een radicaal en dramatisch einde kennen; anders niet. Anders wordt het een dood door duizend wondjes, door een steeds verder uitgehold vermogen van elke staat om zichzelf in stand te houden, waarbij jonge mensen het vertrouwen in de toekomst kwijtraken en oude mensen terugvallen in troostrijke dromen over het verleden. Elk stukje strand dat verloren gaat, elke moestuin die door zout water wordt overspoeld, elke kokospalm die ondergraven wordt en in de golven tuimelt zal het onvermijdelijke tolgeld verhogen. Tientallen jaren voordat het laatste stukje koraal onder water verdwijnt zal de sociale dienstverlening afbrokkelen, zullen kinderen emigreren, scholen sluiten, en zal het weefsel van een land uit elkaar beginnen te vallen.

Het wordt nauwelijks onderkend en grotendeels over het hoofd gezien. Bedenk, wanneer de hierna volgende hoofdstukken in dit boek zich ontvouwen, dat de atolstaten, beetje bij beetje, steeds verder onder water komen te staan.