

## *Drie graden*

### Alle Botswanezen willen hetzelfde

Botswanezen hebben een grote nationale obsessie. Het is niet dansen: de nogal kleurloze hoofdstad Gaborone staat niet bekend om zijn wilde feesten of nachtleven. Het is ook geen sport. In voetbal noch atletiek munt Botswana uit, en vaderlandminnende burgers klagen er vaak over dat het Botswanese volkslied nog nooit ten gehore is gebracht tijdens een huldigingsceremonie van welke belangrijke sportwedstrijd dan ook. Die nationale obsessie kent een lange geschiedenis en was ooit een cruciaal element in de pre-Christelijke religie. Overal in het land duikt zij nog altijd op in alledaagse gesprekken en in de gewoonte van veel mensen om op de heetste zomerdagen in januari en februari verlangend naar de horizon te staren. Het is een obsessie die de vlag zijn blauwe kleur gaf en de nationale munteenheid zijn naam. Het is regen.

Botswanezen houden, in tegenstelling tot Nederlanders en Engelsen, zielsveel van regen (voor de Engelsen kan daar verandering in komen). De Setswana-groet *pula* vraagt letterlijk om regen, op dezelfde manier als de Hebreeuwse groet Shalom om vrede vraagt. In hun hete, stoffige en grotendeels vlakke land kijken de Botswanezen reikhalzend uit naar het moment waarop zwarte wolken zich samenvakken, de hemel openbreekt en dikke regendruppels uiteen spatten op de door de zon verschroeide aarde. Toen Botswana (voorheen Bechuanaland) in 1966 onafhankelijk van Engeland werd, hief de eerste en nog alom gevierde president Sir Seretse Khama zijn hand en schreeuwde: "Laat er regen komen!" Zelden zal iemand de nationale wens zo duidelijk tot uiting hebben gebracht.

Hoewel Botswana voor Afrika best een succesverhaal is, bevindt het land zich aan de rand van het bestaan. Officieel is minder dan 1 procent van het landoppervlak bewerkbaar verklaard en de Kalahariwoestijn domineert het zuiden en het westen van het land. De rivier de Okavango ontspringt niet in Botswana, maar kwijnt er onder de hete zon langzaam weg in een vlak deltagebied met zoutpannen en wetlands vol wild. Diamanten vormen samen met toerisme de hoofdmoot van de economie, maar vee blijft essentieel voor de landbouw en het culturele leven. Het bezit van tienduizend stuks vee maakt op een Botswanees veel meer indruk dan van een chique appartement aan 5th Avenue in New York.

Jammer genoeg voor Botswana geven de lange termijnvoorspellingen niet veel kans op regen. Tegen de tijd dat de wereldwijde opwarming van de aarde drie graden bereikt, zal de droogte in dit land en het grootste deel van zuidelijk Afrika al permanent zijn. Terwijl de gebieden in de tropen en die in de hogere gematigde breedtegraden door overstromingen verdrinken, zullen de subtropen simpelweg doodgaan van de hitte. De zondebok is niet, zoals je zou verwachten, het verschroeide land. Het is de zee. De Indische Oceaan in het oosten warmt in rap tempo op en is medeschuldig aan de droogte die zuidelijk Afrika de laatste jaren heeft getroffen. Het probleem zit hem hierin: boven de warme oceaan ontstaan regenwolken en in plaats van landinwaarts te drijven om de zomerse ellende van Botswana en haar buurlanden te verlichten, storten ze hun wolkbreuken weer vruchteloos in diezelfde oceaan terug. In plaats van de broodnodige regen, krijgt zuidelijk Afrika het bijproduct: neerwaartse winden die tijdens onweersbuien boven de Indische Oceaan zijn opgestegen en waar het vocht al geheel is uitgeperst.

Dit mechanisme wordt bevestigd door computermodellen die huidige en waarschijnlijke klimaatomstandigheden in de toekomst beschrijven. Een team onder leiding van Martin Hoerling van het US National Oceanic and Atmospheric Administration constateerde dat Afrika door de wereldwijde

opwarming letterlijk in tweeën wordt gesplitst. De noordelijke helft zal waarschijnlijk een opleving in de neerslag te zien krijgen, terwijl de zuidelijke helft steeds droger wordt. Hoerling's team gebruikte niet slechts één computermodel om tot dit resultaat te komen: hetzelfde mechanisme herhaalde zich in zestig verschillende simulaties, waarbij vijf verschillende modellen werden gebruikt. Wetenschappelijk gesproken zijn hun voorspellingen daardoor zeer betrouwbaar. Volgens de voorspellingen zal zuidelijk Afrika al tegen het jaar 2010 permanent droog zijn, om uiteindelijk 10 tot 20 procent van haar neerslag kwijt te raken. Bepaald een sombere voorspelling.

Cynici mogen dan beweren dat Afrikanen ten zuiden van de Sahara zich goed aan droogte hebben aangepast. Maar de gegevens wijzen erop dat de verdroging in de drie-gradenwereld het menselijke aanpassingsvermogen te boven gaat. En voor mensen die toch al op het randje van overleven zitten, laat het resultaat zich samenvatten in één woord: hongersnood.

Hoe en waar deze ramp zich precies zal voltrekken is niet met enige zekerheid vast te stellen. Een afzonderlijke studie laat echter zien dat Botswana zich in het epicentrum daarvan zal bevinden. Bovendien zullen de buurlanden niet in staat zijn om massale aantallen vluchtelingen uit Botswana op te nemen omdat ook zij de invloed van de droogte zullen ondervinden. De reden is eenvoudig: met 'voldoende' wereldwijde opwarming zal de Kalahariwoestijn – op dit ogenblik voor een groot deel begroeid met savannes en struikvegetatie – opnieuw een extreem droge woestijn worden, compleet met zandstormen en snel teruglopende vegetatie.

Net als de Amerikaanse Hoogvlakten bestaat de Kalahari thans uit 'gestabiliseerde' duinenvelden. Dit zijn zeeën van zand die al heel lang niet meer verstuiven en waar over grote oppervlakten rondtrekkende veehouderij en bestaanslandbouw mogelijk zijn. In dit gebied weten miljoenen mensen zichzelf en hun gezinnen te onderhouden door op kleine

akkers die zij met de hand verzorgen, sorghum, gierst, pompoenen en maïs te verbouwen. Voor de leek zijn deze sluimerende duinen niet direct zichtbaar: het landschap lijkt op een glooiend heuvellandschap, een soort bruinere versie van de Engelse South Downs. Maar elke heuvel en vallei vormen een lineaire duin, een aparte landvorm van soms wel tientallen kilometers lang, die deel uitmaakt van een zee van duinen die, net als golven in de zee, door duizenden vierkante kilometers landschap kan lopen. Deze stabiele duinen strekken zich over enorme oppervlakten uit: het Noordelijke Kalahari Duinenveld strekt zich uit tot in het huidige Zambia, Angola en Namibië, terwijl het Oostelijke Kalahari Duinenveld grote delen van Zimbabwe beslaat. Dan is er nog het Zuidelijke Duinenveld dat zich helemaal tot aan de noordgrens van Zuid-Afrika uitstrekt. En daar middenin ligt, hoe kan het ook anders, Botswana.

Er zijn twee redenen waarom die duinen nu stil liggen. Ten eerste, hoe weinig regen er ook valt, het is toch voldoende om de vegetatie in stand te houden. Ten tweede zijn de windsnelheden te laag om het zand over grote afstanden te verwaaien. Daardoor blijven de gigantische duinen op hun plaats. De computersimulatie door David Thomas van Oxford University voorspelde echter dat de grote zandzeeën van de Kalahari waarschijnlijk massaal aan de wandel zullen zijn als de wereldwijde opwarming de drie graden eenmaal heeft bereikt. Ook hierin werden verschillende computermodellen gebruikt, en eerst getest, om na te gaan of deze met terugwerkende kracht het waargenomen klimaat in de regio tussen 1961 en 1990 wisten te 'voorspellen'. Daarin slaagden alle modellen.

Ook al komen deze modellen niet precies overeen met het onderzoek van Hoerling, ook hier doemt het scenario van grootschalige verdroging op. Dit keer niet vanwege de Indische Oceaan, maar doordat hogere temperaturen er in de hele regio voor zorgen dat er meer vocht verdampt uit het landoppervlak en de vegetatie. Op zich is deze verande-

ring niet voldoende om de Kalahariduinenvelden opnieuw in beweging te brengen. De modellen voorspellen echter ook een grote toename in de windsnelheden, tot een verdubbeling in 2040. Hierdoor nemen de erosiekrachten toe waaraan de oude duinen blootgesteld staan. Het Zuidelijke Duinenveld zal het zwaarst getroffen worden, maar na 2040 zal waarschijnlijk in alle noordelijke en oostelijke gebieden, van Botswana, Namibië, Angola, Zimbabwe tot aan Zambia, de duinactiviteit toenemen nog voordat de mondiale opwarming drie graden heeft bereikt.

Als deze wereldwijde opwarmingsdrempel eenmaal bereikt is, zal er volgens de modellen weinig anders meer van de Kalahari overblijven dan gierende zandstormen. Met extreem hoge temperaturen en razende winden zullen zware stormen enorme hoeveelheden zand en stof over de regio verplaatsen, waardoor nieuwe duinen ontstaan en dorpen, middelgrote plaatsen en complete steden als Gaborone zullen worden weggevaagd. Zelfs in de grove resolutie van een computerscherm is het lot van Botswana zonneklaar: na ongeveer 2070 is het hele land bezaaid met 'actieve' duinen.

Thomas en zijn team laten verontrust weten: "Zij zouden aanzienlijke en zelfs catastrofale beperkingen inhouden voor het huidige gebruik van het milieu voor de landbouw." Met andere woorden, een groot deel van het land zal dan niet langer geschikt zijn voor menselijke bewoning. Botswana zoals wij dat nu kennen zal dan verdrinken, niet in water, maar in zand.

### De gevaren van het Pliocen

Sceptische lezers kunnen zich afvragen of het verstandig is om teveel geloof aan onderzoeksmodellen te hechten, omdat deze per definitie slechts zo goed zijn als hun menselijke ontwerpers. Ook al worden ze uitgevoerd door supercomputers zoals de Japanse Earth Simulator, een machine zo groot als

vier tennisbanen bij elkaar, die 35 triljoen berekeningen per seconde kan maken, dan nog zijn modellen niet in staat om precies weer te geven hoe de aarde op kleine schaal in werkelijkheid werkt, domweg vanwege de enorme complexiteit ervan. Het HadCM3-model van het Hadley Centre bijvoorbeeld, verdeelt de atmosfeer in een mondiaal rooster van 9673 cellen, waarbij op de gematigde breedtegraden vakken ontstaan van ongeveer 300 vierkante kilometer. Hierin zijn de Britse Eilanden nauwelijks te vatten, de Schotse Hooglanden nog minder, laat staan de Cairngorms. De weergave van veranderingen in de hoeveelheid neerslag in de Schotse bergen kan dan ook niet nauwkeurig zijn.

Een oplossing is om een regionaal klimaatmodel met een veel hogere resolutie in het mondiale model in te bedden. Veel van de artikelen waarnaar dit boek tot nu toe heeft verwezen, gaan van dit principe uit. Om orkanen met een krachtig oog van vaak niet meer dan een paar kilometer in doorsnee bijvoorbeeld nauwkeurig te kunnen weergeven, moeten modelontwerpers een regionaal model (met een hoge-resolutie roosterafstand van slechts 9 kilometer) in een mondiaal model laten 'nestelen'.

Voor het grove werk, zoals het berekenen van mondiale gemiddelde temperaturen, doen de huidige modellen het echter prima. Klimaatveranderingen in de vorige eeuw zijn door recente, uiterst krachtige modellen met vrijwel foutloze precisie te simuleren. Hieruit valt te concluderen dat de vergelijkingen voor de reacties van de atmosfeer op het vasthouden van warmte door broeikasgassen de realiteit inmiddels heel dicht zijn genaderd. De evaluatie van modellen is trouwens bepaald geen nattevingerwerk meer. Het achteraf voorspellen van de 20e eeuw is één manier om na te gaan of een model werkt, maar modellen zijn ook op andere periodes te ijken: op het koudste punt van de laatste ijstijd bijvoorbeeld, of op warmere periodes in een nog verder verleden. Wil je als voorspeller van de toekomst geloofwaardig blijven, dan moet je model in staat zijn het verleden nauwkeurig te simuleren.

Hoe dan ook, veel sceptici baseren hun bezwaren op het vermoeden dat er met veel modellen van te voren is gesjoemeld zodat wetenschappers met de ‘juiste antwoorden’ op de proppen komen om die felbegeerde wereldwijde-opwarmingssubsidie in de wacht te slepen: “Je krijgt eruit wat je erin stopt”, luidt het oude adagium. Maar klimaatmodellen hebben wel degelijk een belangrijke basis: zij zijn niet gebaseerd op de subjectieve oordelen van hun makers, maar op de fundamentele wetten van de natuurkunde. Deze te observeren fysische wetten, waaronder alles valt, van convectie in wolkenformaties tot aan de reflectie van pakijs, kunnen niet zomaar door mensen worden aangepast, waar ze politiek gezien ook mogen staan. Modellen doen tenslotte niets magisch. Alles wat ze doen is het oplossen van natuurkundige vergelijkingen. Alle processen van de HadCM3 kunnen in theorie bijvoorbeeld met de hand worden uitgewerkt. Alleen zou het dan eeuwen duren om slechts één model volledig uit te werken. Computers versnellen dus het proces, net zoals zakrekenmachines op school de wiskundeles versnellen.

Er heeft nog nooit iemand beweerd dat computermodellen volmaakt zijn. Ze komen allemaal met een iets ander antwoord op dezelfde vraag en weerspiegelen daarmee hun verschillende ontwerpen. De oorzaak is dat sommige fysische wetten die eraan ten grondslag liggen niet precies bekend zijn. Hoe wolken en de grotere atmosfeer bijvoorbeeld op elkaar inwerken is een onbekende factor, en daarom kan men naar sommige parameters voor wolkenmodellen alleen maar zo goed mogelijk gissen. Evenmin is bekend in hoeverre sulfaat-‘aerosols’, minuscule vervuilingsdeeltjes die de schuld van ‘global dimming’ krijgen, de temperatuur omlaag brengen. Modellen vormen echter nuttig gereedschap en bieden een waardevolle kijk op de vermoedelijke toekomstige omstandigheden op onze planeet – iets waartoe de mensheid voorheen nooit toegang had. In tegenstelling tot de orakels die men in de oudheid raadpleegde bieden modellen een manier om de toekomst te voorspellen die niet is gebaseerd op

de visioenen van een onzichtbare profetes, maar op meetbare, natuurkundige gegevens.

Naast modellen bestaat er nog een optie om in de toekomst te kijken: achterom kijken naar het verleden. Veel van de case-studies in dit boek tot nu toe zijn gebaseerd op paleo-klimaatonderzoek. Daarin kunnen warmere periodes in de geschiedenis van de aarde nuttige analogieën vormen voor wat ons deze eeuw mogelijk te wachten staat. De vorige hoofdstukken hebben teruggekeken naar het vroege Holoceen, minder dan 10.000 jaar geleden, en het laatste interglaciaal, ongeveer 130.000 jaar geleden. Voor een analogie van de drie-gradenwereld moeten we veel verder terug in de tijd, naar voordat de aarde in haar regelmatige cycli van ijstijden en interglacialen terecht kwam. We moeten tot wel 3 miljoen jaar terug, naar een periode die het Pliocéen wordt genoemd.

Het Pliocéen is van speciaal belang omdat het op allerlei manieren lijkt op de wereld waarin we nu leven. Mondiaal was de geografie zo ongeveer als nu. Grote bergketens als de Andes en de Himalayas bestonden al op hun huidige hoogtes en de Landengte van Panama had zich nog maar juist gesloten, waardoor het midden van de Atlantische en de Stille Oceaan van elkaar werden gescheiden. De oceaanstromingen die hierdoor ontstonden, bestaan vandaag de dag nog. Zelfs de Britse Eilanden waren toen al door het Kanaal gescheiden van het vasteland, net als tegenwoordig.

Mensen woonden er in Groot-Brittannië echter niet. Onze primatevoorouders leefden nog uitsluitend in Afrika, en zo waar, het beroemde 'Lucy'-skelet dat in Ethiopië is gevonden, stamt uit het Pliocéen. Volgens een recente studie zouden zij en andere menselijke voorouders het bipedalisme (lopen op twee in plaats van vier benen) wel eens hebben kunnen ontwikkelen in de uitgestrekte Oost-Afrikaanse bossen, die daar konden groeien dankzij het warme Pliocéen-klimaat.

Deze warmte betekende dat de wereld er klimatologisch, maar ook geografisch heel anders uitzag dan nu. Een aanwij-

zing over hoe anders die wereld wel niet was, werd in 1995 ontdekt door geoloog Jane Francis, één van de vier vrouwen die ooit de Polar Medal hebben gewonnen, en wel in het bitterkoude Transantarctische Gebergte. Samen met haar Australische collega Robert Hill nam zij een kijkje in lagen gesteente waarvan zij wist dat die uit het Pliocentijdperk dateerden. Tot haar verbazing trof zij hierin gefossiliseerd hout aan en beukenbladeren die in de rotsen bewaard waren gebleven.

Die fossiele bladeren kwamen niet uit weelderige, hoge bossen zoals in Engeland: groeipatronen in het hout wezen uit dat ze afkomstig waren van half-volgroeide struiken die horizontaal over de grond groeiden, waarschijnlijk vanwege het ruige klimaat en de harde winden. Vandaag de dag groeit, behalve op de uiterste noordpunt van het schiereiland, op de Zuidpool nergens vegetatie, en al helemaal niet in het ijzig koude centrum van het continent. De plaats waar de fossielen zijn gevonden, net ten noorden van de Beardmore Glacier in de Dominion Range van het Transantarctisch Gebergte, ligt op slechts 500 kilometer van de Zuidpool, en koestert zich tegenwoordig in een mild klimaat met een temperatuur van gemiddeld  $-39^{\circ}\text{C}$ .

Aan de andere kant van de wereld, op de Noordpool, lag net zo'n grote verrassing op ontdekking te wachten. Dit keer was het Noord-Groenland, het stukje droge aarde dat het dichtst bij de Noordpool ligt, waar stokoud Pliocenhout werd gevonden door de Deense geoloog Ole Bennike toen die er in 1997 op bezoek was. Bennike identificeerde sommige stukken als hout van dennen en andere coniferen, in een gebied dat vandaag de dag honderden kilometers ten noorden van de boomgrens ligt. Dit gebied is nu zelfs zo koud dat het grootste gedeelte volledig onbegroeid is, met alleen hier en daar kleine stukjes toendravegetatie die het nog volhoudt op beschutte plekken die in de korte zomer smeltwater krijgen. Het is duidelijk dat zowel de Noord- als de Zuidpool in het Pliocen stukken warmer waren dan tegenwoordig.

Hoeveel warmer dat precies was, wordt duidelijk als we een blik werpen op restanten van planten en insecten die zijn opgegraven uit vroege Pliocene-veenlagen op Ellesmere Island, in het hoge noorden van Canada. Het veen is afkomstig uit een beverpoel en de gevonden resten van planten- en keversoorten duiden op een klimaat met winters die  $15^{\circ}\text{C}$  warmer waren dan vandaag. Een fascinerende verzameling zoogdieren had de pech om uiteindelijk in dit ven te belanden, waaronder een beer, een spitmuis, een veelvraat en zelfs een paardje, allemaal uitgestorven voorouders van de tegenwoordige fauna. Het milde klimaat en de rijke ecologie wijzen op grassige en bosrijke streken met lariksen en berken, en dat op maar liefst 2.000 kilometer ten noorden van de huidige boomgrens. Continentale gletsjers waren op het noordelijk halfrond zelfs helemaal afwezig, waardoor de zeespiegel 25 meter hoger lag dan nu.

Lang heerste er in academische kringen een discussie over de vraag waarom het aan de polen tijdens het Pliocene zoveel warmer was dan nu. Het ene kamp beweerde dat een uitzonderlijk sterke oceaanstrooming meer warm water uit de tropen naar de poolzones stuwde. Deze zou wellicht samenhangen met de afsluiting van de zee-engte tussen Noord- en Zuid-Amerika, en zou hebben geleid tot een gelijkmatiger verdeling van oceaanhitte. Tegenstanders beweerden dat een hoger gehalte kooldioxide in de atmosfeer de hele planeet overal min of meer gelijkmatig opwarmde.

De discussie werd pas in 2005 beslecht toen een enorm onderzoek, waarin op supercomputers een model werd gedraaid, gebruik maakte van de chemische analyse van zeebodemsedimenten. Daarmee maakte men een geavanceerde reconstructie van de zeetemperaturen tijdens het Pliocene. Om het kamp van de oeaancirculatietheorie te laten winnen moest het model koelere tropen en warmere polen laten zien. Dat gebeurde niet. In plaats daarvan werden zowel de tropen als de polen warmer en dat strookte met de theorie dat kooldioxide de oorzaak was. Projectleider dr. Alan

Haywood van de British Arctic Survey zei: “Het patroon van zeewatertemperaturen dat wij hebben gevonden wijst on-dubbelzinnig naar CO<sub>2</sub> in plaats van naar de oceaanstromingen.” Haywood trok de voor de hand liggende conclusie: “Onze bevindingen zijn essentieel om te kunnen begrijpen hoe het klimaat op toekomstige emissies van broeikasgassen kan reageren.”

Het gesimuleerde Pliocéen bevat duidelijke waarschuwingssignalen voor het heden. Volgens het model van dr. Haywood werden, afhankelijk van de seizoenen, zowel de Noordelijke IJszee als de zeeën rond de Zuidpool tijdelijk ijsvrij. De hoeveelheid winterijs werd ook aanzienlijk minder. Nu fungeert ijs in de poolgebieden als een gigantische spiegel die de zonnewarmte terugkaatst en daarom versterkt het verdwijnen ervan het effect van kooldioxide op de temperatuur op aarde. We kunnen zelfs stellen dat de Noordpool in het Pliocéen waarschijnlijk voor het laatst in de afgelopen 3 miljoen jaar zijn ijsslaag helemaal is kwijtgeraakt. Daarmee veranderden ook de circulatiepatronen in de oceanen. Waarschijnlijk werd de Atlantische kringloop (besproken in Hoofdstuk 1) tegelijkertijd minder sterk.

Maar hoe hoog was het CO<sub>2</sub>-niveau in het Pliocéen nu eigenlijk en hoeveel warmer was het daarmee wereldwijd? Een antwoord op die eerste vraag komt mogelijk wederom van fossielen zoals de beukenbladeren die Jane Francis middenop de ijsskoude Zuidpool vond. Alle bladeren van planten bevatten minuscule gaatjes, stomata genaamd, die tijdens de fotosynthese kooldioxide binnenlaten en zuurstof laten ontsnappen. Experimenten in broeikassen die met CO<sub>2</sub> waren verrijkt tonen aan dat het aantal stomata per blad verandert met de hoeveelheid koolstofdioxide in de atmosfeer. Veel fossiele bladeren zijn zo goed bewaard gebleven dat hun stomata te tellen zijn en onderzoeken naar de dichtheid van stomata in het Pliocéen leveren een onthutsende conclusie op: atmosferische CO<sub>2</sub>-concentraties varieerden tussen de 360 tot 400 deeltjes per miljoen (ppm). (Deze maatstaf bete-

kent simpelweg dat elke miljoen liter lucht ongeveer 360 liter koolstofdioxide bevatte. Uitgedrukt in percentages betekent dat een gehalte van atmosferische CO<sub>2</sub> in het Pliocéen van 0,036 procent.)

Als u enigszins bekend bent met het vraagstuk van de wereldwijde opwarming, dan komen deze concentraties CO<sub>2</sub> in het Pliocéen u vast bekend voor: de concentraties van vandaag zijn 387 ppm en ze nemen jaarlijks met 2 ppm toe. In een artikel in *Geology Today* legt dr. Haywood uit: "De concentratie CO<sub>2</sub> in de atmosfeer tijdens het Pliocéen was waarschijnlijk dezelfde als de atmosferische concentraties nu als gevolg van de uitstoot van broeikasgassen." Ook de temperaturen uit die tijd zijn op een rijtje gezet, door gebruik te maken van indirecte meetgegevens uit zee- en landfossielen uit die periode. En hoeveel warmer was het destijds mondiaal? U raadt het al: iets minder dan 3 graden.

Dat leidt tot een voor de hand liggende conclusie: als de huidige CO<sub>2</sub>-concentraties tijdens het Pliocéen aanleiding gaven tot een mondiale opwarming van drie graden, dan zouden ze dat nu toch ook moeten doen? Misschien, maar dan toch zeker over een langere periode dan een eeuw. Zo duurt het bijvoorbeeld duizenden jaren voordat hogere temperaturen doordringen tot in het diepste duister van de oceaan. En zolang de zeeën warmer blijven worden kan de atmosfeer geen evenwicht bereiken, omdat warmte nog steeds naar beneden wordt doorgegeven. Dat is een voorbeeld van de 'thermische traagheid' van de planeet: door de lange reactietijd van het systeem 'Aarde' zullen de temperaturen altijd achterlopen bij de veranderingen onder druk van zonnestraling of broeikasgassen. Zo heeft een waterketel ook een paar minuten nodig om aan de kook te komen als hij op het vuur wordt gezet.

De opwarming van de aarde in de loop van deze eeuw is het resultaat van een optelsom van uitgestoten broeikasgassen sinds het begin van de industriële revolutie. (Het lijkt ongelooflijk dat kolen die in de eerste stoomtreinen zoals

Stephenson's Rocket werden opgestookt de planeet tot op de dag van vandaag nog steeds opwarmen.) Ook al zouden we de concentratie CO<sub>2</sub> in de atmosfeer met onmiddellijke ingang stabiliseren, dan nog zou het eeuwen duren voordat de aarde op een nieuw hoger niveau weer een thermisch evenwicht zou bereiken. De verwachting dat de huidige hoeveelheden CO<sub>2</sub> op het niveau van het Pliocéen morgen al voor hogere Pliocéen-temperaturen zouden zorgen, is net zoiets als de verwachting dat een ketel water à la minute kookt.

Het goede nieuws is dat dit erop wijst, dat als we de CO<sub>2</sub>-ketel nu snel van het vuur afhaken, we waarschijnlijk nog minstens een eeuw kunnen voorkomen dat de temperatuur drie graden extra aantikt. Aan de andere kant, als emissies in het huidige tempo blijven stijgen, dan zou de mondiale temperatuur al tegen het jaar 2050 de drie graden voorbij kunnen schieten. De keuze is aan ons, en de klok tikt door.

### De terugkeer van Het Kindeke Jesus

Een spervuur aan stormen beukt in op de Noord-Atlantische Oceaan. Overstromingen langs de Yangtze zetten Shanghai onder water waardoor in de rijstproducerende provincies Henan, Hubei en Anhui 100.000 mensen verdrinken. Grote droogte verscheurt de aarde in het Amazonegebied. In Australië gaan oogsten verloren, terwijl hongersnoden om zich heen grijpen in noordelijk Afrika en India.

Het is niet het jaar 2050, en de schuldige is niet de opwarming van de aarde. Het is 1912, en de schuldige is El Niño. In wetenschappelijke kringen bekend onder zijn volledige naam El Niño Southern Oscillation (ENSO) is El Niño de warme fase van schommelingen in de stroming van de Stille Oceaan, die het weer in de wereld danig in de war kan schoppen. Zijn naam (de Spaanstalige afkorting staat voor Kerstkindje) kreeg de warme stroming voor het eerst van Peruaanse vissers; zij zagen dat deze door de bank genomen rond Kerstmis

langskwam en hun normale productieve koudwatervisserij decimeerde. Er is niets nieuws aan de verschijning van El Niño of aan de vernietiging die hij tot gevolg kan hebben: meer dan duizend jaar geleden zouden droogtes die met ENSO samenhangen de ondergang van de Moche-beschaving in de Peruaanse kustwoestijn veroorzaakt hebben. In 1912 kan hij zelfs hebben bijgedragen aan het zinken van de Titanic: ongewone stormen die verband hielden met El Niño dreven ijsbergen veel verder naar het zuiden dan normaal, de route van de internationale scheepvaart op, net op het moment dat Smith, de kapitein van de Titanic, zijn gedoemde vaartuig de opdracht gaf om op volle kracht vooruit te gaan.

Doordat El Niño de weerpatronen in de Stille Oceaan feitelijk omdraait, waardoor overstromingen in de Atacama-woestijn in Peru ontstaan en droogtes in Indonesië en Australië, zorgt hij over de hele aardbol voor een domino-effect, dat *teleconnections* wordt genoemd. De goede kant hiervan is dat het noordoosten van de vs zachtere winters krijgt en dat de toegenomen windschering boven de tropische Atlantische Oceaan het Caribische orkaanseizoen tempert. Aan de andere kant hebben de droogtes in bosgebieden van de Amazone tot aan Papoea Nieuw-Guinea verwoestende branden tot gevolg, terwijl er daarnaast door neerslagtekorten in zuidelijk Afrika misoogsten en hongersnoden ontstaan. In de negentiende eeuw was El Niño mede de *trigger* voor de droogte die in Brits India miljoenen mensen het leven kostte. Een 130-jaar oud neerslagrapport laat zien dat het uitblijven van de moessonregens die in India tot ernstige droogte leidden, altijd gepaard gingen met El Niño-achtige verschijnselen.

Sinds lange tijd is het ontrafelen van mogelijke verbanden tussen de wereldwijde opwarming en El Niño voor klimaatwetenschappers een grote uitdaging geweest. De laatste twintig jaar zijn er sterkere en frequentere El Niño's geweest, met die van 1997-1998 als de krachtigste die ooit geregistreerd is. Recente gegevens vanuit zowel modellenstudies als onderzoeken naar het vroegere klimaat op aarde wijzen

erop dat El Niño niet alleen krachtiger, maar zelfs wel eens permanent kan worden. Voor de menselijke bevolking en de ecosystemen op aarde voorspelt dat niet veel goeds. Op dit moment leveren kortstondige overstromingen en droogtes voor de slachtoffers verschrikkelijke beproevingen op, maar vroeg of laat vindt het normale leven toch zijn draai weer. Maar in onze wereldwijde opgewarmde toekomst is dat niet zonder meer het geval.

De wetenschappelijke wereld is over de kwestie El Niño echter alles behalve eensgezind. Sommige studies laten in de toekomst inderdaad een verschuiving naar een semi-permanente staat van El Niño zien, met hogere temperaturen in de oostelijke Stille Oceaan en regenwolken die dichter naar de Peruaanse kust toeschuiven. Een recent onderzoek komt echter tot de tegenovergestelde conclusie en voorspelt zwakkere El Niño-verschijnselen in een warmere wereld. Weer andere onderzoeken voorspellen weinig verandering, of concluderen dat de complexe computermodellen die door wetenschappers zijn ontworpen om het wereldklimaat weer te geven nog niet goed genoeg zijn om de details van een ENSO-cyclus in kaart te brengen en zo betrouwbare voorspellingen te doen. In de wereld van klimaatmodellen heeft de jury zich nog niet uitgesproken, zo lijkt het.

Maar nogmaals, het verleden levert bruikbare aanwijzingen op om de toekomst beter mee te kunnen voorspellen. Sommige onderzoeken geven aan dat El Niño in koudere periodes zoals het hart van de laatste ijstijd zwakker was, of zelfs helemaal afwezig. Wat betreft het warme Plioceen-tijdperk dat hierboven werd besproken, waarin de temperaturen over de hele wereld gemiddeld 3°C hoger lagen, zijn er bovendien sterke aanwijzingen dat permanente El Niño-omstandigheden wel degelijk overheersten.

De redenen zijn relatief eenvoudig: een warmere aardbol leidde tot een warmer oceanoppervlak, waardoor er minder van het opwellende koude zeewater kwam dat tegenwoordig langs de westkust van Zuid-Amerika omhoogkomt. Door een

kleiner temperatuurverschil tussen het westen en het oosten van de Stille Oceaan namen de oostelijke passaatwinden af of vielen helemaal uit; daardoor werd er minder water naar het westen gestuwd en raakte de koude stroming afgesneden. Gaandeweg dit proces zouden de laag hangende stratuswolken, die elke Peruaanse kustbewoner kent, drastisch worden uitgedund (in Lima wordt de altijd aanwezige lage mist *neblina* genoemd); daarmee zou de witheid van de planeet afnemen en dus minder zonlicht het heelal in worden gereflecteerd. Daaruit zouden weer hogere temperaturen voortvloeien en zo zou de greep van El Niño permanent worden. In plaats van een omdraaiing van de oceaanstroming zou dit dan de normale situatie zijn. Vandaag de dag zijn de passaatwinden door menselijk toedoen al in kracht aan het afnemen. Dat suggereert dat dat proces er weer aan zit te komen.

Eén man die denkt dat ‘super El Niño’s’ een ernstig gevaar betekenen is James Hansen, de NASA-klimaatwetenschapper wiens recente waarschuwingen over instortende ijsvelden in het vorige hoofdstuk onder de loep zijn genomen. Ook al suggereren Hansen en zijn collega’s niet dat El Niño per se permanent wordt, zij verschaffen wel een stevige theoretische basis voor verschijnselen die veel sterker en verwoestender zijn. Door de snelle wereldwijde opwarming stijgt de temperatuur al in het westelijke deel van de Stille Oceaan, waar – onder de juiste omstandigheden – El Niño wordt geboren. Dit contrasteert met het oostelijke deel van de Stille Oceaan. Daar blijft het opwellende water koel, omdat het tientallen jaren op grote diepte zat en niet in contact is geweest met de opwarmende atmosfeer. Het zijn deze temperatuurverschillen die volgens Hansen het vuur onder de ‘super El Niño’s’ zou kunnen aansteken, wat overal op de wereld tot chaotische weersomstandigheden zou leiden.

In een dergelijk scenario staan Europa drogere winters te wachten. Het Atlantische orkaanseizoen zou getemperd worden door een toegenomen windschering, die de ontwikkeling van grote stormen zou verhinderen, maar tegelijkertijd

zouden grootschalige overstromingen en modderstromen de drogere stukken van Californië kunnen teisteren. Met het falen van de Indiase moessonregens zouden miljoenen levens op het Indiase subcontinent in gevaar komen. In Zuid-Amerika zou een van de natste gebieden ter wereld, het grote regenwoudbekken van de Amazone, ten oosten van de Andes, spoedig één van de droogste kunnen worden. Al doende zou, zoals we in het volgende gedeelte zullen zien, de langdurige terugkeer van het Kindeke Jezus de vonk zijn die leidt tot één van de meest verwoestende vuurzeeën die de wereld ooit heeft gekend.

### De dood van het Amazonegebied

In mijn dossierkast bewaar ik een beduimelde en een nogal sjofele print van een artikel dat in november 2000 in *Nature* werd gepubliceerd. Aan de achterkant zit een bladzijde vastgeniet met daarop slordige aantekeningen die ik destijds maakte, waarin ik me verbijsterd uitlaat over de inhoud ervan. Meer dan welk ander werk dat ik gelezen had, overtuigde dit artikel mij ervan dat dit boek geschreven moest worden, niet eens zozeer om de inhoud ervan, maar om de manier waarop het werd ontvangen. Ondanks het feit dat het een van de meest alarmerende voorspellingen bevatte die in de wetenschappelijke literatuur verschenen was, bracht het in de media of in politieke kringen nauwelijks iets teweeg. Er had paniek op straat moeten uitbreken, met mensen die het van de daken schreeuwden, verklaringen aan het parlement en 24 uur per dag aandacht in het nieuws. Niets van dat alles. Het artikel met de bescheiden titel 'Acceleration of global warming due to carbon cycle feedbacks in a coupled climate model', ('De versnelling van de wereldwijde opwarming door koolstofcyclus-feedbacks in een gekoppeld klimaatmodel'), geschreven door een team van het Britse Hadley Centre, werd vrijwel volledig genegeerd.

Tijdens de droogte in het Amazonegebied in 2005 moest ik er weer aan denken. Het was de grootste droogte in tientallen jaren, een tijd waarin vers drinkwater moest worden ingevlogen naar dorpen die normaal gespreken aan enorme rivieren liggen. Bij het doorlezen van de krantenkoppen kreeg ik het gevoel alsof de voorspellingen van het Hadley Centre al bewaarheid waren, al was dat een halve eeuw te vroeg. Er braken branden uit in bossen waar daarvoor nog nooit brand geweest was. In de meanderende rivieren stonden grote stukken droog, die in gebakken modder waren veranderd. Had het Amazonegebied het omslagpunt dan al bereikt? Gelukkig kwam het bos dit keer toch weer terug van de rand van de afgrond. Voor het einde van het jaar hield de droogte op en sijpelde er regenwater langzaam terug de zijrivieren in, waardoor de verdorde bomen weer bij konden komen. De branden werden kleiner en 's werelds meest diverse en waardevolle ecosysteem was gered. Dit keer nog wel.

Het artikel van het Hadley Centre in *Nature* had over de hele wereld alarmbellen moeten doen rinkelen. Allereerst toonde het aan dat wereldwijde opwarming zijn eigen stuwkracht kan genereren, als een voorheen onvoorziene positieve feedback in werking treedt. In een vicieuze cirkel komen er daarbij door de opwarming nog meer broeikasgassen vrij, waardoor het nog warmer wordt, waardoor er in een niet te stoppen spiraal nog meer broeikasgassen vrijkomen. Deze 'koolstofcyclus-feedback', waar de titel van het artikel naar verwijst, zou ons mensen tot machteloze toeschouwers maken in een rampzalig scenario van een stuurloos geworden wereldwijde opwarming. Ten tweede heeft het Hadley-artikel aan het licht gebracht dat de belangrijkste vuurhaard van deze positieve feedback niet zou liggen in het hart van de geïndustrialiseerde hoofdsteden van de wereld, maar in het afgelegen hart van Zuid-Amerika, waar het begint met een vrijwel totale ondergang van het regenwoud in de Amazone.

De auteurs van dit artikel, met aan het hoofd de klimaat-modelexpert Peter Cox, waren tot deze beangstigende con-

clusie gekomen nadat zij hun mondiale model realistischer hadden gemaakt door een stap te zetten die achteraf gezien nogal logisch klinkt. Waar eerdere modellen de temperatuurstijging louter als een simpel lineair proces hadden benaderd, realiseerde het team van Cox zich dat land- en oceaansystemen tijdens een snelle mondiale opwarming niet statisch zouden blijven. Deze zouden zelf door het veranderende klimaat worden beïnvloed. In het geval van de oceanen is het zo dat warmere zeeën minder CO<sub>2</sub> absorberen, zodat zich meer CO<sub>2</sub> in de atmosfeer kan ophopen en de wereldwijde opwarming alleen maar toeneemt. Op het land zou het zelfs nog erger zijn. Grote hoeveelheden koolstof zitten op dit moment opgeslagen in de aardbodem, als half vergane overblijfsels van lang geleden afgestorven vegetatie. Volgens algemeen aanvaarde schattingen bedraagt het totale koolstofreservoir zo'n 1600 miljard ton, oftewel meer dan het dubbele van de huidige hoeveelheid koolstof in de gehele atmosfeer. Bij het opwarmen van het aardoppervlak gaan bodembacteriën sneller werken; ze breken de opgeslagen koolstofverbindingen af en brengen die vervolgens als kooldioxide in de atmosfeer. Terwijl de meeste klimaatmodellen het aardoppervlak als inert beschouwen, nam het team van Cox voor de eerste keer deze 'positieve feedback' van koolstof uit de opwarmende aardbodem en vegetatie mee in de berekeningen en daarbij kwam het tot een onthutsend resultaat.

Volgens het zojuist bijgewerkte model gaat de koolstofcyclus door een opwarming van de aarde met drie graden – die al in 2050 het geval kan zijn – juist andersom lopen. In plaats van CO<sub>2</sub> op te nemen, geeft de vegetatie en de bodem dit in grote hoeveelheden af, omdat in een hetere omgeving bacteriën harder werken om organisch materiaal af te breken en de plantengroei juist minder hard gaat, stopt, of zelfs omkeert door bladverlies e.d. Er stroomt zoveel koolstof de atmosfeer in, dat de wereldwijde concentratie tegen het jaar 2100 met 250 deeltjes per miljoen (ppm) zal zijn toegenomen. Daardoor zal de temperatuur wereldwijd nog eens met

1,5°C stijgen. Het team van Hadley Centre had met andere woorden ontdekt, dat de planeet door de positieve feedbacks van koolstofkringlopen rond het midden van de eeuw in een stuurloze mondiale opwarmingsspiraal kan belanden en dat was veel eerder dan wat men tot op dat moment had aangenomen. Rond 2100 zou de mondiale opwarming volgens het Hadley-model geen 4°C, maar 5,5°C bedragen, en dat komt gevaarlijk dicht in de buurt van het doemscenario van het IPCC. Dat is de reden dat er in die krabbels zoveel schrik en wanhoop stond toen ik het rapport in 2000 voor het eerst las.

Er kwamen dan wel geen politici in beweging, maar andere wetenschappers gingen rechtop zitten en spitsten hun oren. In navolging van het Hadley Centre voegden klimaatmodel-experts van het National Centre for Atmospheric Research in Colorado een koolstofcomponent aan hun model toe en ook zij noteerden wereldwijd een afname van de hoeveelheid koolstof in warmere bodems. Een Frans team herhaalde het Hadley-experiment met behulp van weer een ander model en kwam tot dezelfde conclusie. Weer een ander team, met bases in de Verenigde Staten en Italië, nam deze koolstof-feedback in hun model op en constateerde dat de hoeveelheid CO<sub>2</sub> in de atmosfeer met ongeveer 90 ppm omhoog schoot en dat de wereldwijde opwarming 0,6°C hoger uitkwam. Deze uitkomsten mogen dan in omvang verschillen, ze wijzen wel allemaal in dezelfde richting.

Ook al zouden deze modellen het allemaal bij het verkeerde einde hebben, dan nog ligt er een groot gevaar onder de tropische bosgebieden in Indonesië, Maleisië en de Amazone verscholen: veen. Duizenden jaren lang heeft dode vegetatie zich onder het levende oerwoud opgehoopt, waardoor zich op sommige plekken veenlagen konden vormen van tientallen meters dik. Maar deze veenlaag is alleen maar stabiel omdat hij permanent onder water staat. In Indonesië was het brandend veen dat het grootste deel bijdroeg van de twee miljard ton extra koolstof die in het rampzalige brand-

seizoen van 1997-1998 in de atmosfeer terecht kwam. Veel ervan lag ondergronds nog maandenlang te smeulen en bleef koolstof afgeven toen de branden boven de grond al door de teruggekomen regens waren geblust. Het gaat hier over nog een ander, potentieel verwoestend feedbackmechanisme in de koolstofcyclus. Als in een toekomst van wereldwijde opwarming de neerslagpatronen veranderen, waardoor deze licht ontvlambare veenbergen in Zuidoost-Azië en het Amazonegebied er over een oppervlakte van tientallen miljoenen hectaren kurkdroog bij komen te liggen, zullen ontzaglijke hoeveelheden extra koolstof in de atmosfeer belanden. Hierdoor neemt de opwarming van de aarde nog verder toe. De uitkomsten van modellen die deze potentiële terugkoppeling onderzoeken, geven geen uitsluitsel, maar zijn wel degelijk zorgwekkend. Zo toont een onderzoek uit 2007 aan dat zeven van de elf onderzochte modellen een afname voorspellen in de hoeveelheid neerslag gedurende het droge seizoen in de Indonesische veengebieden; zes van de elf voorzien een vergelijkbare afname in het Amazonegebied.

Deze laatste uitslag illustreert de onzekerheid in het voorspellen van veranderingen in hoeveelheden neerslag. Waar de modellen van het Hadley Centre in het Amazonegebied een dramatische verdrogingstrend laten zien, laten andere modellen een kleinere verandering zien en weer andere zelfs een toename van de neerslag. Het is van het allergrootste belang om te bepalen welk model het bij het juiste eind heeft. Ten eerste omdat dit kolossale ecosysteem de helft van 's werelds biodiversiteit herbergt. Ten tweede omdat dit systeem maar liefst een tiende voor zijn rekening neemt van de netto primaire productie van de hele planetaire biosfeer – dat wil zeggen van de fotosynthetische productie van planten. En dat alles in een gebied van nog geen zeven miljoen vierkante kilometer. Gevoed door smeltwater uit het Andesgebergte en heftige buien in het regenseizoen (in sommige gebieden meer dan twee en halve meter per jaar), bevat de Amazonerivier 20 procent van al het water op de wereld dat in de oceanen

terecht komt. Dat is tien maal de inhoud van de Mississippi. De energie die door deze gigantische hoeveelheid neerslag wordt losgemaakt speelt een belangrijke rol in de mondiale weerpatronen. In dat verband stelt Peter Bunyard, auteur van wetenschappelijke publicaties: “Het functioneren van het Amazonebekken als een hydrologische krachtcentrale is een essentiële component van het huidige klimaat.”

Maar het Amazonegebied ligt sowieso onder vuur, nog afgezien van wereldwijde opwarming. Inmiddels is meer dan een half miljoen vierkante kilometer ontbost, een gebied zo groot als heel Frankrijk, en elk jaar wordt er meer woud gekapt om ruimte te maken voor veehouderijen en sojaplantages. De oprukkende bevolking in het woud is in de afgelopen halve eeuw vertienvoudigd en elke nieuwe weg die de Braziliaanse regering aanlegt in stukken ongerept oerwoud, is al gauw omgeven door een ‘visgraat’-patroon van nieuw ontboste plekken. Een ander serieus gevaar is de ‘slash-and-burn’-landbouw, het kappen en platbranden van stukken bos om akkertjes aan te leggen. Een half miljoen naar land hongerende boeren komen samen in Brazilië’s laatste grote wildernis om voor zichzelf en hun gezin een beter bestaan op te bouwen. De illegale houtkap tiert er welig en toen Greenpeace vaststelde dat 80 procent van alle houtkap illegaal wordt uitgevoerd, stak de Braziliaanse regering zijn armen in de lucht en beaamde het, in plaats van het woedend te ontkennen. In mei 2008 nam zelfs de Braziliaanse milieu-minister Marina Silva plotseling ontslag. Zij kreeg, zei ze in haar ontslagbrief, het federale regeringsplan voor het milieu niet uitgevoerd. Later wees zij beschuldigend naar Blairo Maggi, een van ’s werelds grootste sojaboeren en gouverneur van de staat Mato Grosso.

Maar zelfs al zou de vernietiging morgen stoppen, dan nog zouden de bossen van het Amazonegebied volgens de modellen van het Hadley Centre gedoemd zijn te verdwijnen, tenzij de wereldwijde opwarming niet voorbij de twee graden komt. Als de wereld dit cruciale omslagpunt voorbij

gaat, dan voorspelt het model een vloedgolf van verwoesting, te beginnen in het noordoosten van het Amazonegebied, die gestaag in zuidelijke en westelijke richting over het continent komt rollen. De gemodelleerde neerslag zakt tegen het jaar 2100 in sommige gebieden tot bijna nul. De temperaturen vliegen naar Sahara-hoogtes, met *een gemiddelde* van 38°C. Wanneer de instorting eenmaal compleet is, is het centrale deel van het Amazonegebied in wezen een woestijn, waar geen enkele vegetatie van betekenis meer groeit. Alleen wat kleine stukken grasland en savanne houden het aan de buitenste randen nog vol.

Elk brandseizoen biedt een voorproefje van de manier waarop deze ondergang zich in werkelijkheid zou manifesteren. De bomen in de Amazone zijn gewend aan een constante luchtvochtigheid en hebben geen afweer tegen vuur. Ze verschillen heel erg van bomen in andere boscsystemen, die niet alleen bestand zijn tegen een bosbrand om de zoveel tijd, maar die zelfs regelmatig brand nodig hebben om het bos gezond te houden. In tegenstelling hiermee zullen de bomen in de Amazone, die geen evolutionaire ervaring met bosbranden hebben, ook lang nadat de vuurzee al is uitgeraasd nog blijven doodgaan. De regeneratie verloopt langzaam, zodat zonlicht door het kronendak kan heendringen en zo de bosgrond verder uitdroogt. De aantallen vogel- en diersoorten gaan catastrofaal achteruit. En de neerslag wordt verder onderdrukt door de rookwolken die maandenlang over het geteisterde woud hangen.

Als de definitieve vlammenzee zijn werk doet, zal dat zich afspelen op een schaal die wij nog niet eerder hebben meegemaakt. Het beste valt die misschien te vergelijken met de bosbranden door heel Indonesië in 1998, die verschillende buurlanden maandenlang onder een verstikkende grauwe rooksluier legden. In landen als Brazilië, Venezuela, Colombia, oostelijk Peru en Bolivia zal het leven steeds moeilijker worden, wanneer de lucht een niet in te ademen mengsel van gloeiend hete gassen en rook is geworden. De zon zal worden

verduisterd door een loodgrijs rookgordijn, terwijl er vanuit de lucht een grijze miezerregen van lichte as neerdaalt.

Vanuit de ruimte zouden satellieten wel eens gigantische vuurzeeën door de laatste stukken ongerept oerwoud kunnen zien trekken. Duizenden inheemse bewoners – de Yanomami's, de Ashaninka's en andere stammen die dit oerwoud sinds de prehistorie kennen als hun enige huis – worden eruit weggejaagd. Bestolen van hun levensonderhoud en cultuur, en niet in staat dit plotselinge verlies van alles wat ze ooit gekend hebben te begrijpen, zullen ze wegwijnen. Hun wereld is voorgoed verdwenen. Voor deze mensen zal de aarde zelf aan haar einde zijn gekomen, omdat nadat de brand heeft huisgehouden, er niets anders van de majestueuze Amazone overblijft dan witte, grijze en zwarte hopen smeulende as te midden van verschroeide en rokende resten hout.

Een nieuw, onherkenbaar landschap wordt geboren. In het midden van het stroomgebied, waar ooit slechts het gebrul van apen en het ruisen van bladeren te horen was, steekt nu een klagende wind op. Stof hoopt zich op in de luwte van uitgebrande boomstronken. Dichterbij de grond is een zacht gesis te horen. Zandduinen verrijzen. De woestijn is gearriveerd.

### **Aswoensdag in Australië**

In Australië arriveerde de woestijn al een hele tijd geleden – net als de brand. Australië is 's werelds droogste continent en 's zomers rukt de brand op tot aan de rand van steden als Sydney, Perth en Adelaide. Er is niets nieuws aan Australische bosbranden. Sommige eucalyptussoorten moeten zelfs de brand over zich heen krijgen om hun zaaddozen te laten openspringen. De aboriginals van Australië gebruikten vuur als een manier om hun jachtgronden te beheren. Die techniek kreeg de bijnaam 'vuurstoklandbouw', en die beoefenden ze reeds lang voordat de blanke bezetters voet aan land zetten.

Maar deze lange geschiedenis maakt de Australische bosbranden voor mensen niet minder gevaarlijk. Dwarrelende vonken kunnen soms op vele kilometers afstand weer nieuwe brandhaarden veroorzaken. Hierdoor komt de brandweer letterlijk tussen twee vuren te zitten. De meest gevreesde soort brand is de zogenaamde 'kroonbrand', die niet alleen sneller door de boomtoppen jaagt dan mensen kunnen rennen, maar daarbij ook nog eens alle zuurstof uit de lucht wegzuigt, waardoor iedereen stikt die zich eronder bevindt. Op Aswoensdag 16 februari 1983 werden twee brandweerlieden van het korps in een buitenwijk van Melbourne er kansloos uitgelopen door een kroonbrand, die in 15 seconden sprongen van 500 meter maakte. Geen van beiden overleefde het. In januari 1994 was Sydney bijna geheel omsingeld door meer dan 800 afzonderlijke branden, waardoor het as regende op het centrale zakencentrum en de zon werd verduisterd door bruine rook die over grote delen van de stad dreef.

In de drie-gradenwereld zal er in Australië nog veel meer in de as worden gelegd. Hoe groot het brandgevaar is en hoe fel de branden worden hangt af van de combinatie van twee factoren: droogte en hitte. Prognoses voor klimaatveranderingen voorzien dat Australië in de komende eeuw droger en heter wordt, wat het risico van brand aanzienlijk opdrijft. Volgens een vooraanstaand onderzoek van CSIRO Atmospheric Research zijn er in het jaar 2070 in New South Wales twee tot zeven maal meer dagen met een temperatuur van meer dan 35°C. De kans op echt gloeiend hete dagen in dorpen in het binnenland, met een kwikstand van meer dan 40°C, zou met een factor zes toenemen.

Alhoewel de modellen voor neerslagvoorspellingen minder nauwkeurig zijn, kan droogte volgens het CSIRO-onderzoek drie maal zo vaak gaan voorkomen. Door de bank genomen zou de hoeveelheid regen met gemiddeld 25 procent inzakken. En van extreem harde winden, die kleine brandjes in een paar minuten kunnen aanwakkeren tot een dodelijk

inferno, wordt voorzien dat ze 's zomers vaker voorkomen, wanneer branden toch al de meeste schade veroorzaken.

Ook andere staten zullen het moeilijk krijgen. In het noorden van Victoria zou de neerslag volgens een ander onderzoek van het CSIRO tegen het jaar 2070 met 40 procent kunnen dalen. Ook in het zuidwesten van Australië is de tendens dat er minder neerslag komt. Het kan geen verrassing zijn dat zulke extreme omstandigheden een aanslag op de gezondheid betekenen. Volgens de Australian Conservation Foundation zullen er in de hoofdsteden van de Australische staten jaarlijks tussen de 8.000 en 15.000 ouderen als gevolg van de hitte komen te overlijden. Ook zullen er nieuwe ziektes hun entree kunnen maken. Tegen het jaar 2070 kan de zone waarin knokkelkoorts voorkomt, een ziekte die door muskieten wordt overgebracht, zich naar het zuiden tot aan Sydney hebben uitgebreid.

Behalve brand zal water Australië zorgen gaan baren. Ondanks de relatieve droogte van Australië in vergelijking met andere continenten, jaagt het gemiddelde Australische huishouden er al doortrekkend, drinkend, wassend en sproeiend dagelijks maar liefst 350 liter water doorheen. Zulke verkwisting is niet vol te houden wanneer de hoeveelheid neerslag daalt en rivieren droog komen te staan. Noorderlijke gebieden als Darwin en Queensland, die in de regentijd al ruim voldoende water krijgen, kunnen in een warmer wordende wereld nog meer regenval verwachten, doordat de moesson heviger wordt. Het grootste deel van het land, behalve misschien Tasmanië op de gematigde breedtegraad, zal terecht komen in een situatie van chronische watertekorten en een instorting van de landbouw. Dat proces is nu reeds zichtbaar omdat het land wankelt onder een droogte die al sinds 2002 aanhoudt. Een onderzoek naar de toekomstige potentiële graanproductie in Zuid-Australië laat zien dat alleen boerderijen in het diepe zuiden of aan de kust het in een toekomstig klimaat zullen weten te redden.

Het stroomgebied van de Murray-Darlingrivier strekt zich uit over vijf staten en voorziet steden als Canberra, Melbourne en Adelaide van water. Daarvan wordt verwacht dat het tegen de tijd dat de temperatuur op aarde met drie graden is gestegen een kwart tot de helft minder water zal aanvoeren. Perth, dat de hoeveelheid regen de afgelopen jaren al heeft zien dalen, is zelfs nog kwetsbaarder. Stormsystemen boven de oceaan zorgen normaliter voor regen, maar deze verplaatzen zich geleidelijk naar het zuiden als het voorspelbare gevolg van het samentrekken van de klimaatgordels dichterbij de polen. In hun plaats komen er hardnekkige hogedrukgebieden die boven land voor droog weer zorgen. Het gevolg daarvan is zonneklaar: de jaarlijkse hoeveelheid regen maakt een diepe val en daarmee gaat de toekomstige landbouwproductiviteit van een regio die vandaag de dag de helft van al het Australische graan produceert, eraan.

In een opwarmende wereld zal deze combinatie van brand, hitte en droogte het leven in Australië in toenemende mate onhoudbaar maken. De landbouw en de voedselproductie zullen onomkeerbaar achteruitgaan. Zout water zal het getroffen riviersysteem binnenkruipen en daar de grondwatervoorraden vergiftigen. Hogere temperaturen betekenen een hogere verdamping, die de vegetatie en de bodem nog verder zal uitdrogen. En dat zal weer leiden tot slinkende watervoorraden achter stuwdamwanden.

Op zijn minst betekenen deze veranderingen een ontwrichting van het leven van de gemiddelde Australiër, aanzienlijke economische verliezen en strenge rantsoenering voor water. Het minst gunstige scenario voorspelt het op drift raken van de bevolking uit gebieden met te weinig water, in de richting van Tasmanië en de noordelijke tropische gebieden waar regenval nog betrouwbaarder is. In grote delen van het binnenland zal door de ongekend hoge temperaturen domweg niet meer te leven zijn. En als de kraan in grote delen van Australië de komende decennia inderdaad droog komt te staan,

zullen er nog wel harde woorden vallen over de weigering van de regering Howard van 1996 tot 2007 om de uitstoot van broeikasgassen aan banden te leggen. Maar tegen die tijd is het natuurlijk te laat.

Heel toepasselijk kreeg Canberra, de hoofdstad van Australië, op 18 februari 2003 al een voorproefje van de nieuwe maatregelen voor brandpreventie. De maanden daarvoor had het oosten van Australië te maken gehad met abnormaal weinig regen en hoog oplopende temperaturen. Op het vliegveld van Canberra was het kwik op 18 januari tot 37°C opgelopen terwijl er op dat moment straffe, droge winden uit het westen woeien, waardoor een uiterst brandgevaarlijke situatie ontstond. Niemand weet hoe de vonk oversloeg, maar toen de brand eenmaal was begonnen, greep die zo explosief snel om zich heen, dat meteorologen de rook van het uitgebroken inferno vergeleken met de vulkanische rookpluim na de uitbarsting van Mount Pinatubo.

In de amper tien minuten waarin het vuur op zijn felst brandde, kwam meer energie vrij dan bij de atoombom op Hiroshima. Door de intense convectie en hitte ontstonden er boven de vlammen enorme, door de brand aangedreven onweerswolken – zogeheten pyrocumulonimbus. Er viel geen regen, maar zo'n dertig kilometer naar het oosten roffelde zwarte hagel op de grond. Een tornado uit de categorie F2 zette even ten westen van de stadsrand voet aan de grond. De rook werd met zo'n explosieve kracht de lucht ingeslingerd dat die de stratosfeer binnendrong en vervolgens de aarde rondging. Hierdoor werd een deel van de zonnestraling afgesneden, in een soort kleinschalige 'nucleaire winter'. Toen de rust was weergekeerd, waren er vier slachtoffers te betreuren en bleken er vijfhonderd gebouwen in de as te zijn gelegd. Omdat politici hadden geweigerd om na te denken over de toekomst, was de toekomst zelf bij de politici op bezoek gegaan, in hun eigen achtertuin.

## Houston, we hebben een (orkaan)probleem

Houston, Texas, 5 augustus 2045, 9 uur 's morgens. Bij het vervagen van het avondlicht komt een olieachtige, aanzwellende watermassa aangerold uit de Golf van Mexico. Een paar pluizige wolken vangen de laatste zonnestrallen weg, maar de lucht ziet er bijna te rustig uit. Alleen een steeds dikker wordende sluier van hoge vederwolken wijst op er wat komen gaat.

Op de grond is de hel echter al losgebarsten. Winkeliers timmeren koortsachtig hun zaken dicht. De prijs van hardboard is verviervoudigd, terwijl de paar winkels die open zijn gebleven helemaal door hun voorraad voorverpakt voedsel en flessen drinkwater heen zijn. Miljoenen televisieschermen zenden geanimeerde satellietbeelden uit van Superorkaan Odessa terwijl zij kolkend over de Golf heen raast en officials waarschuwen op dringende toon voor de hoogste zeewater-temperaturen ooit, die windsnelheden van 290 kilometer per uur veroorzaken. Zij roepen op tot de evacuatie van de hele stad, en wel *nu*. Mensen persen zich in pendelbussen, anderen zetten zich achter het stuur van welke auto ze maar grijpen kunnen en voegen zich bij de alsmaar groeiende massa mensen die, ten einde raad, op weg is naar het binnenland. De meesten van hen zijn te voet, als een leger dat optrekt over de Northwest Freeway. Ironisch genoeg zijn sommigen van hen vluchtelingen uit New Orleans, van toen de stad, nu tien jaar geleden, de strijd tegen de zee en de stormen uiteindelijk moest staken.

Aan de kust bij Galveston stroomt de vloedgolf al over de golfbrekers heen, de aan het strand gelegen straten in. Er is bijna niemand getuige van; men kent de verhalen over de Galveston-orkaan in 1900, die meer dan honderd jaar gold als de ergste natuurramp in de geschiedenis van de Verenigde Staten. Niemand wil op een laaggelegen zandbank gaan zitten afwachten of de geschiedenis zich misschien herhaalt.

De eerste regenvlaag van Odessa komt onder dekking van het donker dichterbij en dumpst gigantische hoosbuien over de kust van Texas, van Corpus Christi in het zuiden tot aan de grens met Louisiana. Deze storm is immens en Houston ligt midden op zijn voorziene route. Tegen het ochtendgloren zwelt de windkracht aan; het grauwe ochtendlicht onthult een heel ander beeld dan dat van de zonsondergang de vorige avond. Huilend buldert de wind de Baai van Galveston in en rukt daarbij massa's water uit de aanzwellende vloedgolf, die met de snelheid van een tsunami het binnenland in raast. Plotsklaps zijn regen, wind en water haast niet meer van elkaar te onderscheiden. Ze vormen samen een onontwarbare massa van water en geweld.

Toch wordt de storm nog steeds zwaarder. De water-vloed beweegt nu de rivier op en het eerste water bereikt de gebouwen aan de oostelijke kant van Houston zelf. Verblindende stortbuien beuken al uren op heel Harris County in, en de reeds lang getemde rivier Buffalo Bayou begint zijn wilde aard weer te vertonen. Als eerste komen ondergrondse parkeergarages en winkelcentra blank te staan. Vanuit stormdrainagesystemen komt het water plotseling naar buiten gutsen. Zonder waarschuwing worden de deksels van mangaten weggeblazen en meteen spuiten er schuimfonteinenvijf meter hoog de lucht in. Achtergelaten auto's drijven in de alsmaar stijgende rivier, samen met andere wrakstukken die door de wind uit de ondergelopen straten zijn geblazen.

Wanneer het oog van Superorkaan Odessa de kust bereikt, is zij nog steeds een monster van categorie 6. Heel Galveston staat opnieuw onder water, onder de voet gelopen door immense golven van tientallen meters hoog. Wanneer de wind vanuit de rand van het oog Houston binnendendert, beginnen de blinkende gebouwen van het zaken centrum onheilspellend te zwaaien. Vlagen water en natte rukwinden gieren over de betonnen ravijnen terwijl ver daarboven glazen ruiten door de kracht van de uitbarsting uit elkaar spatten.

Het commerciële centrum van Houston, hoofdkwartier van de Amerikaanse olie-industrie, wordt volledig leeggeroofd. Het stormt papieren, toebehorend aan de machtigste bedrijven op de planeet; ze worden de binnenste draaikolk van de orkaan ingezogen en hoog in de troposfeer uitgestrooid. De gierende winden zijn zo hard dat ze van de bomen in het nabij gelegen speeltuintje niet alleen de bladeren, maar zelfs de schors afrukken. Het geluid daarbij lijkt op dat van een goederentrein die hoog in de lucht langs komt denderen. Houten gebouwen storten in elkaar en vallen om; alleen beton en staal houden stand.

Op televisieschermen over de hele wereld slaan mensen de vernietiging met stijgende ontzetting gade. Van de Baai van Bengalen tot de Filippijnen en van Taiwan tot Australië zijn de weerdiensten in alle tropische cycloonbekkens nu in de hoogste staat van paraatheid. Zij weten dat de Odessa-orkaan nog maar het begin is. Het tijdperk van de superorkaan is begonnen.

Zoals het denkbeeldige scenario hierboven suggereert zal, tegen de tijd dat de wereld drie graden warmer is, alle overgebleven twijfel over het verband tussen wereldwijde opwarming en zwaardere orkanen de kop zijn ingedrukt door de brute werkelijkheid van een onstuimig geworden atmosfeer. Warmere zeeën leveren meer energie om tropische cyclonen aan te wakkeren en overal in de tropen zullen orkanen kwetsbare kustgebieden vernielen. New Orleans was als eerste aan de beurt, maar er zullen nog veel andere steden volgen, van Houston tot Shanghai. En twee wetenschappers zullen de geschiedenis ingaan als diegenen die ons hebben proberen te waarschuwen.

Tom Knutson en Bob Tuleya, twee bescheiden klimaatmodelexperts met hun thuisbasis in de Verenigde Staten, schreven in 2004 een artikel in het *Journal of Climate* waarin zij waarschuwden voor heviger orkanen in de broeikaswereld. Het lukte Knutson en Tuleya om computersimulaties van orkanen te maken, compleet met de typerende 'donut'-vorm en

het stille oog. Zij wilden onderzoeken wat er in een warmere wereld met deze dodelijke stormen zou kunnen gebeuren.

Nadat zij hun computer-orkanen maar liefst 1300 keer hadden laten razen in een klimaat met dubbel zoveel CO<sub>2</sub>, trokken zij een zorgwekkende conclusie: met een verdere opwarming van de aarde neemt de kracht van tropische orkanen toe, tot maximale windsnelheden die 6 procent hoger liggen, en zorgen ze voor 18 procent meer neerslag. Die cijfers mogen niet veel bijzonders lijken, maar in de echte wereld komt het erop neer, dat er over de hele wereld meer verwoestende stormen van categorie 5 op de kusten zullen inbeuken. In ons huidige klimaat vormt categorie 5 de hoogste rang voor een orkaan. Maar in een warmere toekomst waarin alle stormen in principe een halve of hele categoriepunt hoger liggen, zullen de zwaarste stormen meer dood en verderf zaaien dan we tot nog toe ooit hebben meegemaakt.

### **De dageraad boven een nieuwe Noordpool**

Zoals een volwassen orkaan met haast perfecte symmetrie laat zien, is de atmosfeer een vloeistof die in beweging is, met overal golven, draaikolken en wervelbewegingen, en zich als een stromende rivier continu over het oppervlak van de aarde beweegt. De draaikolken zijn lagedruksystemen, waar tropische cyclonen er één type van zijn, terwijl de rustige poelen hogedrukgebieden zijn, waar dalende lucht voor een kalm briesje en droge dagen zorgt. Net zoals water in een rivier staat ook alles in de atmosfeer met elkaar in verbinding, dus niet alleen met zichzelf, maar net zo goed met de oceanen en de biosfeer. Zo vermengen orkanen bijvoorbeeld de hogere lagen van een tropische oceaan met de sterke winden erboven en drijven daarmee de enorme stromingen aan die uiteindelijk warm water naar de polen brengen.

Veranderingen aan de polen zullen dan ook een domino-effect hebben op gebieden die ver weg liggen. Een ver-

moedelijk gevolg is dat een vermindering van de hoeveelheid pakijs de uitdroging van het westen van Noord-Amerika zal verergeren. In plaats van dat de oceaanwarmte 's winters onder het drijfs ijs gevangen blijft, zullen grote stukken open oceaan aan de wind worden blootgesteld wanneer de ijskap eenmaal grotendeels is verdwenen. Dat zal het gangbare patroon in het Noordamerikaanse winterweer veranderen. In één modelonderzoek worden regendragende lagedrukgebieden noordwaarts richting Canada en zuidelijk Alaska gedi-rigeerd, weg van de door droogte getekende vlakten van het westen van de Verenigde Staten. Het gevolg is een scherpe daling in de neerslag van 30 procent aan de hele westkust van Amerika. Watertekorten zullen tot diep in het binnenland voelbaar zijn, waar de droogte in elf staten, van Nevada tot Wyoming, voor noodsituaties gaat zorgen. Bovendien vormen deze veranderingen, zoals besproken in hoofdstuk 1, slechts een deel van een veel meer omvattende trend waarin klimaatgordels zich samentrekken aan de polen door wereldwijd hogere temperaturen.

Wat betreft de Noordpool zelf geven modelsimulaties aan dat hier in een drie-gradenwereld 80 procent van het pakijs verloren gaat en er alleen wat ijs overblijft tussen de pool en de noordpunt van Groenland. Zoals we in het voorgaande hoofdstuk zagen, is die voorspelde 80 procent vermoedelijk een ernstige onderschatting; het is waarschijnlijker dat al het ijs tegen die tijd verdwenen is. De meeste modellen laten een Noordpool zien die veel langzamer opwarmt dan nu in de echte wereld gebeurt. Een recente analyse laat zien dat het verdwijnen van het pakijs op dit moment 30 jaar voorligt op de IPCC-voorspellingen. De auteurs behoren tot 's werelds meest vooraanstaande Noordpool-experts en concluderen droogjes dat “de gevoeligheid van deze regio wel eens groter zou kunnen zijn dan wat de modellen aangeven” en dat de “overgang van de Noordpool naar een nieuwe toestand” zich “ruim voor het einde van deze eeuw” zal voltrekken.

Ook aan land zullen ijskappen en gletsjers in hoog tempo afsmelten. In de drie-gradenwereld gaan we meemaken hoe fenomenale hoeveelheden water van Groenland af komen stromen en samenkomen in immense gletsjerrivieren, terwijl de randen van het ijs zich terugtrekken tot in het midden van het gigantische eiland. Met het krimpen van de gletsjers komen nieuwe stukken land bloot te liggen die honderdduizenden jaren lang onder het ijs klem hebben gelegen. Er ontstaan reusachtige nieuwe meren, gevangen tussen opgehoopt gletsjerpuin en de terugtrekkende ijskap. Terwijl de smeltzone elke zomer verder landinwaarts kruipt, ontstaan overal op het ijsveld blauwe meren. Dan treed een volgende positieve feedback in werking: op dit moment is de top van Groenland kouder dan het laagste punt, puur door zijn hoogte, net zoals de top van een berg kouder is dan zijn lagere flanken. Maar naarmate de afsmelting doorzet, kan een steeds kleiner deel van de gigantische ijskap zichzelf koel houden door hoog in de atmosfeer te blijven. Doordat een steeds groter deel van de ijskap in hogere temperaturen terechtkomt, zal deze nog sneller gaan smelten.

Kleinere ijskappen zoals de Vatnajökull op IJsland zullen sneller verdwijnen dan de logge reus van Groenland. Vatnajökull is een groot gewelf dat het zuidoostelijk deel van het land domineert en een trekpleister vormt voor de toeristen die in groten getale naar de IJslandse vulkanen, geysers en watervallen komen kijken. Hij vormt de grootste ijsmassa van Europa en er liggen verschillende vulkanen onder. Sommige daarvan barsten onder de 400 meter dikke ijslaag af en toe uit, wat zo eens in de tien jaar tot de beroemde *jökulhlaup*-gletsjerdoorbraken leidt, waarbij massa's water en modder onder het ijs vandaan komen spuiten. In totaal bevatten de IJslandse gletsjers ongeveer 3.500 kubieke kilometer ijs en dat is genoeg voor een 40 meter dikke ijslaag over het hele land.

Tegen 2100 blijft er van Vatnajökull nog maar de helft over en tegen 2200 is de gehele ijskap verdwenen. De af-

voer door rivieren zal verdubbelen als de afsmelting op gang komt, waardoor enorme hoeveelheden modderwater over de vlakten naar zee gutsen. De kleinere IJslandse ijsvelden als de Hofsjökull zullen zelfs in nog hoger tempo verdwijnen. Ook de alpiene gletsjers in Zweden en Noorwegen smelten snel, net als die in Alaska en Noord-Canada. Vergeleken met de ijsmassa's op Groenland en de Zuidpool bevatten zij maar heel weinig water, maar als alle kleinere ijskappen en gletsjers tegelijk zouden smelten, stijgt de zeespiegel wereldwijd met vijftig centimeter.

Deze veranderingen zijn ook elders op de Noordpool terug te vinden. De positieve kant hiervan is misschien dat het groeiseizoen langer wordt zodat er gewassen verder naar het noorden kunnen groeien dan ooit tevoren. Hierdoor is wellicht een deel van het voedseltekort op te vangen dat ontstaat door de verdrogende landbouwgronden in het zuiden. In het jaar 2050 kent Noorwegen bijvoorbeeld een groeiseizoen dat overeenkomt met dat van het huidige Zuid-Engeland, Nederland en Noord-Duitsland. In Finland krijgt het groeiseizoen er twee maanden bij.

Het is niet waarschijnlijk dat er op grote schaal nieuwe landbouwgrond zal ontstaan, daar het grootste deel van de Noordpool slechts dunne, rotsige en zure bodems heeft. Sommige stukken land die eerst bevroren veengebieden waren, vallen misschien droog en zijn dan om te ploegen. Maar dat zou ten koste gaan van de uitstoot van enorme hoeveelheden koolstof vanuit de rottende veenlagen. In een regio waar het voorspelbare verloop van de seizoenen allang achterhaald zal zijn, is dat misschien niet het enige gevaar dat op de loer ligt.

### Het Mysterie van de Maya's

Veel mensen die de Maya-ruïnes in Mexico bezoeken, voelen dat Palenque iets bijzonders heeft. De piramides zijn er minder hoog als die in Chichen Itza en de tempels minder

afgelegen als die van Tikal, die zo fotogeniek in mist zijn gehuld. Misschien is het de wetenschap dat slechts vijf procent van deze antieke stad tot dusver is opgegraven en het opwindende uitzicht op mysterieuze, beboste heuvels langs paden die de jungle in voeren. Of misschien zijn het de onlangs ontcijferde hiërogliefen die verhalen over bovennatuurlijke verrichtingen door heilige koningen en moedige strijders. Of anders de weelderige omgeving, waar natuurlijke bronnen aan de rotsen ontspringen en uitstromen in de rivier de Otulum, die door de Maya-architecten symbolisch onder het centrale plein van Palenque is doorgeleid.

Hoe het ook zij, Palenque's pure schoonheid en mysterie zorgen er samen voor dat de plek iets buitenaards heeft en op een of andere manier iets transcendent. Als onwetende rugzaktoerist kon ik in mijn studententijd maar moeilijk geloven dat de voorouders van dit eenvoudige, inheemse volk, dat op blote voeten langs de kant van de weg met fruit stond te leuren, eeuwen geleden zulke bijzondere monumenten hadden geschapen. De eerste archeologen kampten met hetzelfde probleem, zeker gezien de schaarse bevolking in de tijd dat de eerste Europeanen het gebied bezochten. Hoe hadden deze dorpelingen in hun modderhutten zo iets wonderbaarlijks kunnen uithakken? En waarom zijn deze grootse steden ooit verlaten? Velen schreven Palenque en andere plekken liever toe aan de Egyptenaren, de Polynesiërs of zelfs aan de verloren gewaande stammen uit Israël, vooral omdat de lokale bevolking weinig kennis over de cultuur van hun voorouders bezat.

Naarmate er meer over de Maya's bekend werd, werd het er alleen maar mysterieuzer op. Dit was duidelijk een van de meest geavanceerde beschavingen geweest die zich ooit in de Nieuwe Wereld had ontwikkeld. Miljoenen mensen hadden op geïrrigeerde landbouwgronden gewoond die zo dicht bevolkt waren als het huidige Bangladesh. De Klassieke Maya's (tussen 50 voor Christus en 900 erna) maakten niet alleen uitgebreid gebruik van een schrift dat in steen werd uitge-

houwen, maar vervaardigden zelfs boeken van boomschors en pleisterkalk. Daarvan zijn vermolmde resten teruggevonden in koninklijke graven. Zij gebruikten een kalender die bekend staat als de Lange Telling, die teruggaat tot 3.000 voor Christus. Hierin staan belangrijke oorlogen en dynastieke troonopvolgingen vermeld. Er wordt zelfs beweerd dat zij verstand hadden van astronomie en maansverduisteringen konden voorspellen.

Tegen de tijd dat de Spanjaarden het land binnenvielen waren de klassieke Mayasteden als Palenque en Tikal echter al eeuwen verlaten. Hun hoge piramides verbrokkelden onder het oprukkende oerwoud. Slechts een handjevol boeren was in de buurt gebleven en wist zich op de verarmde gronden in leven te houden door zielig ogende maïs en bonen te verbouwen. Toen de opgravingen vorderden, begon het tot de archeologen door te dringen dat de Maya's iets dramatisch en verschrikkelijks was overkomen, iets dat vrijwel van de ene dag op de andere tot de ondergang van hun gehele beschaving had geleid.

Dat 'iets' was, zo ontdekte men later, droogte. Onder het grootste deel van het Maya-gebied ligt zandsteen dat in tijden met weinig regen nauwelijks vocht vasthoudt. De Maya's compenseerden dat door reservoirs te bouwen die zij van binnen met gips afwerkten, door aquaducten aan te leggen en door in de lager gelegen gebieden in het noorden enorme waterputten, zogeheten *cenotes*, te graven om het grondwater te bereiken. Maar de droogteklok bleef altijd tikken: de watervoorraden van de Maya's gingen maar 18 maanden mee.

Natuurlijk baarde dat zowel koningen als het boerenfolk grote zorgen. De culturele lijm die de Maya-samenleving bij elkaar hield was hecht. In ruil voor luxe en vleierij hielden de koningen offerceremonies en voerden ze rituelen uit om de goden gunstig te stemmen en de regen op tijd te laten komen. In tijden van uitzichtloze droogte was de aanspraak van een heerser op zijn eigen goddelijkheid dan ook nauwe-

lijks nog geloofwaardig. Wanneer verhongering in de lucht hing, kwam het vast wel eens op in diens tot dan toe trouwe onderdanen om in opstand te komen, of zelfs om hun koning te vermoorden.

Toen de droogte langdurig toesloeg, gebeurde dat ook echt, zo schijnt het. Vondsten op de bodem van meren laten duidelijk zien dat zich langdurige droogtes voordeden, precies in de tijd dat het Mayarijk instortte. Verder is er in sedimenten op de zeebodem bewijs gevonden dat de Klassieke Mayaperiode afloep met de dubbele klap van een langdurig droge periode die tussen het jaar 810 en 910 “werd onderstreept door nog intensere, jarenlange droogtes”.

In zijn boek *Collapse: How Societies Choose to Fail or Survive* (in het Nederlands verschenen als *Ondergang*), noemt Jared Diamond de ondergang van het Mayarijk een klassiek geval van ecologische overbelasting. Als hoogontwikkelde maatschappij vroeg zij teveel van haar natuurlijke hulpbronnen, waardoor zij kwetsbaar werd voor natuurrampen als droogte. Diamond waarschuwt dat de bevolkingsgroei en economische ontwikkeling de hulpbronnen in Midden-Amerika andermaal onder grote druk zetten. Grote stukken van Zuid-Mexico zijn opnieuw al hun bos kwijt. De erosie van hellingen verwoest opnieuw landbouwgrond. Grote orkanen veroorzaken overstromingen, waaruit weer modderstromen voortvloeien, waarin duizenden mensen omkomen. En wat gebeurt er als de droogte nog eens toeslaat?

Helaas draait het in de voorspellingen over de drie-gradenwereld in de regio juist om droogte. Hoewel men diep in de tropen meer neerslag voorziet, worden de subtropen droger, en Midden-Amerika ligt in het hart van één van deze droger wordende zones. Het model van het Hadley Centre voorspelt een daling van de neerslag met één tot twee millimeter per dag; in sommige gebieden is dat de helft van wat er jaarlijks valt. En net als bij de ondergang van het Mayarijk betekent een gemiddeld drogere situatie dat er vaker ernstige droogtes zullen voorkomen. Het droge weer kan

ook de ontbossing bevorderen, doordat de overblijvende bomen eerder afsterven. Dat is de voornaamste reden dat Midden-Amerika in een onderzoek uit 2006 werd aangewezen als 's werelds 'hot spot' in verband met de klimaatverandering, oftewel een gebied dat ons de grootst mogelijke zorgen baart.

Het is moeilijk voor te stellen hoe tientallen miljoenen mensen die nu in Midden-Amerika wonen het op zulk marginaal land lang zouden kunnen volhouden. De middelmatige droogte van 2001, die volgens schattingen onder zo'n anderhalf miljoen mensen tot voedseltekorten leidde, was daarvan nog maar een voorproefje. Hierdoor werden honderdduizenden mensen maandenlang afhankelijk van voedselhulp. Maar van dergelijke hulp zal het niet komen in een wereld waarin de bodem van de voedselvoorraden al in zicht is. Dus zolang de klimaatverandering steeds sneller gaat, zullen deze Midden-Amerikaanse landen tot de eerste horen die zien hoe hun landbouwproductiviteit wordt lamgelegd en hun bevolking gemarginaliseerd en ontheemd raakt. Bij de ontvolking van hele gebieden zullen emigranten lange rijen spooksteden achterlaten: stoffige ruïnes op plekken die hen niet meer kunnen onderhouden.

Die verlaten dorpen en gehuchten liggen er dan misschien wel weer eeuwenlang onaangeroerd bij, net als de puinhopen die hun Maya-voorouders lang geleden achterlieten. Ook deze ruïnes hebben een lesje voor een toekomstige wereld in petto. Maar het is de vraag of er ook nog mensen zullen zijn die hier lering uit kunnen trekken, zoals we in het volgende hoofdstuk zullen zien.

### De moesson van Mumbai

De voedselgewassen van 60 procent van de wereldbevolking zijn afhankelijk van slechts één enkel terugkerend weersysteem: de Aziatische zomermonsoon. Miljoenen komen van

de honger om als de moesson zijn beloofde regen achterhoudt en nog eens miljoenen zullen hun huis kwijtraken aan overstromingen als de moesson voor een zondvloed zorgt die het land niet aankan. Dagtotalen van 40 centimeter regen zijn bij deze hevige tropische stortbuien niet ongevoelbaar en tijdens de recordwolkbreuk in Mumbai in juli 2005 viel er een meter regen in minder dan 24 uur. De overstroming die hierop volgde kostte 1.000 mensen het leven. Maar zonder dit jaarlijkse natte seizoen zouden de vruchtbare vlakten van India en Bangladesh, met de hoogste bevolkingsdichtheid ter wereld, dor en levensloos zijn. Vandaar dat de betrouwbaarheid van de moesson in een warmere toekomst voor miljoenen mensen een kwestie van leven of dood is.

Zoals ik al in hoofdstuk 1 heb uitgelegd, hangen moessons samen met warmteverschillen tussen het land en de omliggende oceaan. In een warmere wereld zullen deze verschillen groter worden en dat betekent dat een totale instorting van de Indiase moesson in de komende eeuw niet waarschijnlijk is. De keren in het verleden dat het regenseizoen zwakker was hingen gewoonlijk juist met koudere periodes samen, zoals op het toppunt van de laatste ijstijd. Ook hedendaagse vervuilende stoffen zoals aerosols (meestal zwaveldioxide en deeltjes die bij brand vrijkomen) kunnen een verkoelend effect hebben en zelfs zonder wereldwijde opwarming kan de zogenaamde 'Aziatische Bruine Wolk' het regenseizoen danig in de war schoppen, zo stelt een onderzoek. De schrijvers ervan stellen als hypothese dat zich hierbij alsnog een 'achtbaanscenario' kan gaan afspelen. Daarin zouden verontreinigende stoffen met een afkoelend effect de moesson eerst afzwakken, voordat maatregelen tegen de vervuiling en hogere broeikasgasniveaus hem juist weer met ongekende kracht terugbrengen. Veel onderzoeken die uitsluitend het effect van broeikasgassen bekijken, zijn echter tot de slotsom gekomen dat aanzienlijk meer neerslag in het regenseizoen het meest waarschijnlijke scenario is, zeker gezien het feit dat een warmere atmosfeer meer vocht kan vasthouden.

Een heviger regenseizoen zadelt ons met twee problemen op. Ten eerste zorgt een hoger neerslaggemiddelde in de moesson voor zwaarder weer en in samenhang daarmee voor extreme overstromingen, dankzij de warmere en vochtiger atmosfeer. In India is inmiddels al een hogere frequentie en intensiteit van zware regenbuien geconstateerd, zoals ik in hoofdstuk 1 heb aangegeven. Ten tweede zal de moesson waarschijnlijk wispelturiger worden. In sommige jaren kan hij in bepaalde gebieden volledig uitblijven, om het volgende seizoen met hernieuwde kracht terug te komen. Weersvoorspellers hebben er nu al moeite mee om de jaarlijkse eb en vloed van het regenseizoen te bepalen en die taak zal nog lastiger worden wanneer zich in het weer wereldwijd nieuwe patronen gaan aftekenen.

Die nieuwe weerpatronen kunnen van invloed zijn op gebieden die verrassend ver van het Indiase subcontinent af liggen. Onderzoek aan oud koraal voor de kust van Indonesië heeft aangetoond dat Sumatra en andere Indonesische eilanden 6.000 jaar geleden, in een periode met intense moessons, hard werden getroffen door ernstige droogte. Die was te wijten aan veranderende patronen in de windstroming over de tropische Indische Oceaan en wijst erop dat als de Indiase moesson steeds intenser wordt, het in dit dicht bevolkte land opnieuw aanhoudend droog zou kunnen worden, zoals veel klimaatmodellen voorspellen. Droogtejaren zijn in Indonesië nu al rampzalig, compleet met voedseltekorten en zulke ernstige bosbranden, dat grote delen van het land en het nabij gelegen Maleisië voor weken onder zwarte rooksluiers verdwijnen. Zelfs ver weg gelegen gebieden als Zuid-Australië zullen mogelijk minder neerslag krijgen als gevolg van het veranderende Indiase regenseizoen.

In India zelf zullen boeren grote moeite hebben om met succes gewassen te verbouwen als het steeds onzekerder wordt wanneer het regenseizoen begint. In heviger jaren zullen overstromingen catastrofale vormen aannemen als uitgestrekte gebieden onder water komen te staan. Met name

de gebieden die nu al de meeste regen krijgen, zoals de westkust van India, de Golf van Bengalen, Bangladesh en Noord-oost-India, zullen zwaar getroffen worden. Het lijkt net een bijbelse spreuk: hen die reeds hebben, zal nog meer gegeven worden. Ook het omgekeerde is waar: in gebieden waar regen op dit moment schaars is gaat nog minder vallen, zoals in Noord-India en Zuid-Pakistan.

En het is precies Pakistan waar we ons hierna op richten, want wanneer de temperatuur mondiaal drie graden stijgt, zal dit land zich op de rand van een crisis bevinden zoals die zich in de geschiedenis van de mensheid nog niet eerder heeft voorgedaan. En zoals dat zo vaak het geval is, zal deze ramp niet direct voortvloeien uit de grotere hitte zelf, maar uit de indirecte gevolgen ervan. Pakistan loopt grote kans om enorme hoeveelheden van zijn meest waardevolle hulpbron kwijt te raken: water.

### Waar ooit de Indus stroomde

De twee hoogste bergen ter wereld schragen internationale grenzen. Mount Everest maakt deel uit van het grensgebied tussen Nepal en Tibet, terwijl K2 de scheidslijn vormt tussen Pakistan en Xinjiang, een afgelegen provincie van China. K2 vormt daarnaast de top van het machtige Karakoram-gebergte, dat kan bogen op maar liefst vier pieken boven de 8.000 meter en nog eens tien van meer dan 7.000 meter hoog. Buiten de poolgebieden herbergt de Karakoram in één van 's werelds hoogste en meest ontoegankelijke bergketens het grootste gletsjerveld op aarde. Bergbeklimmers moeten bijvoorbeeld meer dan een week de Baltorogletsjer oplopen voordat zij de eerste glimp opvangen van de ontzagwekkende, piramidevormige top van de K2.

In deze gletsjers liggen gigantische hoeveelheden zoet water opgeslagen, en alle drie de grote rivieren van het Indiase subcontinent, de Indus, de Ganges en de Brahmaputra,

vinden hun oorsprong in de sneeuw van de Karakoram, de Himalaya en de Tibetaanse Hoogvlakte daarachter. Doordat de Mekong, de Yangtze en de Gele Rivier ook hun bronnen in deze uitgestrekte hooglanden hebben, is het niet overdreven om te stellen dat de rivieren die op de hellingen van deze gletsjerpieken ontspringen, in het levensonderhoud voorzien van de halve mensheid.

Terwijl het water uit het Everestgebied uiteindelijk in de Ganges terechtkomt, stroomt het water aan de noordkant van de Himalaya in de Brahmaputra. Deze loopt van west naar oost, om vervolgens  $180^\circ$  om te draaien, door de bergketens ten oosten van Bhutan en zuidwaarts richting Bangladesh. Intussen krijgt de Indus vroeg in het seizoen zijn water vooral uit de 72 kilometer lange Siachen-gletsjer, één van de acht gletsjers in het Karakoramgebied van meer dan 50 kilometer lang. Verder stroomafwaarts loopt de Indus pal langs de 8.126 meter hoge piek van de Nanga Parbat in het uiterste westen van de Himalaya, waar een cluster gletsjers nog meer water levert. Hier is de Indusvallei al grotendeels dor en het uitzicht op de flanken van deze torenhoge berg – in hoogte nummer negen van de wereld – is een streling voor het oog in vergelijking met de blinkende hittewaas die boven de vlakke, stenen valleibodem hangt.

Al met al omvat het stroomgebied van de Indus meer dan 3.500 individuele gletsjers, en dat is meer dan de Ganges en de Brahmaputra samen. Over de hele lengte van zijn stroomgebied kent de Indus echter een droger klimaat dan de andere twee rivieren, die beide 's zomers meer water aangevoerd krijgen uit de moessonregens in de gebieden rondom hun benedenloop. Deze combinatie van een droog klimaat en een sterk vergletsjerd stroomgebied maakt de Indus uitgesproken afhankelijk van bergwater. En dat is zijn achilleshiel: de ooit tijdloze sneeuw is er al aan het smelten. Een grilligheid in de atmosferische dynamiek betekent dat de luchttemperatuur boven het hoogland twee maal zo snel stijgt als het gemiddelde wereldwijd en een versnelde terugtrekking van

de gletsjers is in alle grote verijsde gebergtes waargenomen. Zelfs de machtige Everest is ijsmassa kwijtgeraakt; de Khumbu-gletsjer is over een lengte van vijf kilometer gekrompen vanaf het punt waar Hillary en Tenzing in 1953 hun klim naar de top begonnen.

Terwijl de gletsjers zich aan hun bron de komende eeuw stukje bij beetje terugtrekken, zal de Indus een dramatische verandering ondergaan. In een vroeg stadium van deze grootse transformatie zal de rivier aanzwellen dankzij het extra smeltwater van het versneld wegsmelten van de gletsjers. Voor een ontwikkelingsland als Pakistan met een uitdijende landbouw en een groeiende bevolking lijkt die extra aanvoer van zoet water een zegen. Maar wel één die van korte duur zal zijn. Tientallen jaren later, als het ijs grotendeels is weggesmolten, zal er van de rivier weinig meer overblijven dan een sijpelend stroompje. En de vertakkingen van de wijde Indus-delta zullen er maanden achtereen leeg bijliggen.

Het Britse Department for International Development financierde een onderzoek dat gebruik maakte van hydrologische modellen om veranderingen te voorspellen in de stromen rivierwater voor de komende eeuw. Dit onderzoek bevestigt het sombere vooruitzicht voor de bovenloop van de Indus. Terwijl de stroom aanvankelijk, afhankelijk van de opwarmingssnelheid, met 14 tot 90 procent aangroeit, voorziet het model dat er later deze eeuw tot 90 procent minder water zal zijn. Bij Skardu, de toegangspoort tot de Karakoram en een belangrijke rustplaats voor bergbeklimmers die op weg zijn naar K2 en Broad Peak, bereiken de stroommodellen van de Indus hun hoogste punt in 2030. Dan duikt de hoeveelheid water tegen het jaar 2080 met de helft naar beneden, terwijl de rivier bovenstrooms, bij Shyok in Ladakh, in het jaar 2090 al droog kan komen te staan. Intussen zal de Indus benedenstrooms, waar hij bij Bisham Qila uit de bergen tevoorschijn komt, rond 2080 tussen 20 en 40 procent minder water voeren.

Het wegvallen van het gletsjerwater aan de bronnen van de Indus zal een dramatisch effect hebben op de hoeveelheid water over zijn hele benedenloop door Pakistan. Zowel in het oosten, in de Punjabvallei, als in het westen, in het droge en wetteloze berggebied van Baluchistan, zal er weinig regen vallen die het gletsjerwater kan aanvullen. De Pakistaanse landbouw is praktisch geheel afhankelijk van water uit de Indus, dat in irrigatiekanalen kriskras door de Punjab heen stroomt. Zodoende staat het land de vernieling van zijn belangrijkste graanschuur te wachten wanneer de rivier en zijn zijrivieren eenmaal droog komen te staan.

Uit het buitenland valt niet veel hulp te verwachten, aangezien Pakistan's buurlanden zelf waarschijnlijk ook problemen krijgen met een kwijnende wateraanvoer. In China woont bijvoorbeeld 23 procent van de bevolking in het westen, waar smeltende gletsjers in het droge seizoen de voornaamste bron van water vormen. En ook al zal die minder getroffen worden dan de Indus, dan nog is het water van de Ganges voor maar liefst 70 procent afkomstig van smeltende gletsjers, net als de helft van het water in andere grote rivieren. Op een bepaalde manier gaat het om 'fossiele' watervoorraden, die miljoenen jaren lang opgeslagen hebben gezeten in een tijd dat de gletsjers min of meer in evenwicht waren. De komende decennia zullen deze voorraden vrijkomen door de opwarming van de aarde.

Daar India bij uitstek afhankelijk is van elektriciteit uit waterkrachtcentrales, kan de teruglopende wateraanvoer in de zomer leiden tot black-outs en energietekorten in de heetste maanden van het jaar. Twee van de grootste zijrivieren van de Indus, de Chenab en de Sutlej, ontspringen in India en stromen Pakistan in. Beide zullen eveneens de gevolgen ondervinden van het wegsmelten van de gletsjers boven in hun stroomgebied. Naarmate er minder water beschikbaar is en politieke leiders ruziën over hoeveel water er bovenstrooms in stuwmeren kan worden opgeslagen, is er grote kans op het uitbreken van conflicten tussen deze twee kernwapenstaten.

Elke crisis in de voedselproductie zou snel kunnen escaleren tot een crisis in de hele Pakistaanse economie. Het land is sterk afhankelijk van de export van marktgewassen zoals rijst en suiker, die beide op grote schaal in het geïrrigeerde Punjab worden verbouwd. Verder naar het zuiden is de provincie Sindh volledig afhankelijk van het water uit de Indus voor de aanvoer in haar irrigatiesysteem. Op den duur zullen de boeren daar dan ook weggeconcurrereerd worden door hun machtiger collega's uit de Punjab in het noorden. En boeren in het hele land zullen op hun beurt weggeconcurrereerd worden door grote steden als Lahore, Hyderabad en Karachi, die alle vele miljoenen inwoners hebben.

Als in het droge seizoen de aanvoer van Induswater door het krimpen van de gletsjers bovenstreams afneemt, zal een cascade aan opeenvolgende effecten worden ontketend die voor Pakistan niet meer te overzien zijn. Mensen trekken massaal van het platteland naar de al overbevolkte steden. Aangezien de wereldvoedselvoorraden toch al onder druk staan, zoals eerder besproken, zal er weinig extra capaciteit zijn om de mensen te voeden die uit voorheen geïrrigeerde gebieden zijn weggevlucht. Er zouden nog meer conflicten met India kunnen uitbreken wanneer miljoenen Pakistaanse vluchtelingen de grens oversteken, op zoek naar voedsel in gebieden die door de Ganges worden bevoeid, gebieden die zelf ook al dichtbevolkt zijn.

De hele geschiedenis laat zien dat als mensen de keus hebben om ter plekke te verhongeren of hun biezen te pakken, ze dat laatste doen; ze vertrekken. Tegen het eind van de eeuw komen tientallen miljoenen Pakistaanse burgers misschien wel voor die keuze te staan, omdat de rivier die hun beschaving eeuwenlang mogelijk heeft gemaakt, opdroogt en de graanschuren die hij al die tijd heeft gevoed, nu worden overmeesterd door de oprukkende woestijn. Pakistan, dat kernwapens bezit, zou zichzelf op het lijstje van mislukte staten kunnen zien opduiken, wanneer het burgerlijk bestuur instort en gewapende bendes het beetje overgebleven voed-

sel te pakken krijgen. Waar ooit de wet heerste, zal dan het geweer de baas zijn.

Hoog in de bergen zal, behalve op de allerhoogste toppen, de schitterend witte sneeuw plaats hebben gemaakt voor kale rotsen en hardgebakken bodem. Meer naar beneden zullen de valleigletsjers, die duizenden jaren lang zoetjesaan hun weg tussen de steile toppen door hebben uitgeschuurd, tot puin zijn vergaan. En ergens in de afgelegen woestenij van de Tibetaanse hoogvlakte, ver weg van iedere menselijke bewoning, zal een eenvoudige hoop stenen de plek markeren waar ooit de machtigste rivier in de geschiedenis ontsprong.

### De laatste druppels van de Colorado

Anders dan de Indus, is de Colorado geen natuurlijke rivier meer. Zijn eb en vloed worden niet bepaald door de grillen van het weer, maar door ingenieurs die op knoppen drukken in de controlekamers van zeker twaalf grote stuwdammen. Elke druppel van de 18 miljoen kubieke meter water die in een gemiddeld jaar door de Colorado stroomt is al voorbestemd voor menselijk gebruik. In dit deel van de Verenigde Staten wordt het water volgens een hele stapel overeenkomsten verdeeld tussen staten in de Upper Basin (Wyoming, Utah, Colorado en New Mexico), in de Lower Basin (Californië, Arizona and Nevada) en Mexico. Net als bij de Indus is het grootste deel van het water, namelijk meer dan 70 procent, afkomstig uit het stroomgebied hoog in de bergen, en niet uit de het dorre laagland. Maar net als de Sacramento en de San Joaquin in Californië is de Colorado niet zozeer een levende rivier, maar een gigantisch staaltje loodgieterswerk. Door overgebruik kraken de leidingen van de Colorado bovendien in hun voegen. Een serie droogtejaren na 2000 duwde het systeem bijna over rand, waardoor het waterpeil in Lake Mead, net achter de smalle Hoover Dam, zo diep wegzakte dat de aanvoer naar drie staten met miljoenen mensen in gevaar kwam. Hoewel

de stuwdammen in de Colorado voldoende water bevatten om de rivier vier jaar lang te kunnen voorzien en daarmee een buffer vormen voor wisselende waterstanden in de rivier, gaat er van een lang aanhoudende droogte nog steeds een ernstige bedreiging uit. Een gedetailleerde simulatie waarin men onderzocht hoe het Colorado-systeem zich in een toekomstig klimaat zou kunnen gedragen, liet zien dat het systeem in de tweede helft van 21<sup>ste</sup> eeuw tussen een kwart en de helft van de tijd in wezen faalt.

De stuwdammen in de Colorado hebben vanaf het eerste moment dat er plannen voor op tafel kwamen, grote weerstand opgeroepen. Dat geldt met name voor de Glen Canyon Dam, die prachtig uitgehouwen ravijnwanden – de beroemde Woestijnkathedraal – liet verdrinken, zodat het gebied eromheen inmiddels bekend staat als het ‘Verloren Nationale Park’ van Amerika. Campagnevoerders beweren dat er door verdamping zoveel water verloren gaat dat Lake Powell, achter de dam, in wezen nutteloos is en dat er beter ergens anders water kan worden opgeslagen.

Wie er in dit specifieke geval ook gelijk heeft, het is duidelijk van essentieel belang om rivierwater op een of andere manier op te slaan, om zo de seizoensgebonden wisselingen in de waterstand te kunnen opvangen. Dat geldt in het bijzonder voor de rivieren in het westen van de Verenigde Staten, die vroeg in de zomer een piek laten zien als de sneeuw gaat smelten, om dan later in de zomer terug te vallen wanneer de menselijke vraag naar water op zijn hoogst is. Het probleem van het slinkende sneeuwdek is in het vorige hoofdstuk al besproken. Daarbij zagen we dat de westelijk kuststaten door de wereldwijde opwarming met grote veranderingen te maken krijgen, zowel in de hoeveelheid water die de rivieren voeren, als in de waterbehoefte van steden en van de landbouw. Tegen de tijd dat de temperatuur wereldwijd drie graden hoger ligt dan nu, wordt de situatie steeds kritieker. Niet alleen zal sneeuw in de lagere stroomgebieden regen zijn geworden, zodat er helemaal geen natuurlijke wintervoor-

raad wordt opgebouwd, maar ook dient de datum waarop de sneeuw in het voorjaar hoog in de bergen begint te smelten zich een maand eerder aan, of zelfs nog vroeger.

Als het 's winters meer regent en de sneeuw in de lente eerder gaat smelten, zal er water uit de stuwmeren gelaten moeten worden, om capaciteit te creëren om water tijdens overstromingen te kunnen opvangen. Dat komt neer op de verspilling van een kostbare hulpbron die later in het jaar schaars zal zijn. De meeste rivierensystemen hebben echter niet genoeg stuwdammen om op deze stroom afwatering in te spelen en het leeuwendeel van dit 'vroeg water' zal dan ook naar de oceaan worden afgevoerd en daarmee verloren gaan. De lange zomerse droogte zal nog langer worden en de ecosystemen en menselijke bewoning in het hele westen van de Verenigde Staten bedreigen.

In feite is de hele Amerikaanse kust langs de Stille Oceaan verregaand afhankelijk van smeltende sneeuw. Seattle kampt in jaren met weinig sneeuw bijvoorbeeld al met tekorten. Ook de landbouw zal getroffen worden. Zo valt er in de vruchtbare Yakimavallei in de staat Washington, beroemd om zijn appels, kersen en een bloeiende zuivelindustrie, maar bar weinig regen, en is het irrigatiestelsel er vrijwel volledig afhankelijk van het verdwijnende smeltwater.

Zelfs ver naar het noorden in Canada zal deze situatie zich herhalen, terwijl je zou verwachten dat de sneeuw daar door de winterse kou wel gegarandeerd zou zijn. Eén Canadese rivier zou wel eens 40 procent minder water kunnen gaan voeren. Grote delen van de Rocky Mountains zouden zo goed als sneeuwvrij kunnen worden, waarbij slechts de allerhoogste toppen hun witte winterjas aanhouden. Irrigatiewater uit de Rockies is voor de landbouw in heel Alberta van vitaal belang en landbouwgewassen als aardappelen, peulvruchten en zomertarwe zullen het zonder dit water al snel afleggen.

En dan hebben we het nog niet eens over een bijkomend gevaar: droogte. Hoofdstuk 1 gaf aan hoe kwetsbaar het wes-

ten van de Verenigde Staten in een warmere wereld is voor de terugkeer van extreme, middeleeuwse droogtes. En op basis van een opvallend sterke consensus tussen verschillende klimaatmodellen kan vooral het zuidwesten, met staten als Californië, Arizona, Nevada, Utah, Colorado, New Mexico, Texas, Oklahoma en Kansas, een klimaat verwachten dat permanent droger is. Volgens een artikel dat in mei 2007 in *Science Magazine* verscheen zou dit hogere ariditeitsniveau lijken op de Dust Bowl-jaren of op de droogte in de jaren '50. Behalve dan dat de verandering dit keer blijvend zal zijn.

Lentes zonder sneeuw, hetere zomers en intensere droogtes zullen alle de kwetsbaarheid van het westen van de Verenigde Staten vergroten voor wat wellicht het meest gevreesde element is: vuur. Californië is altijd uitermate gevoelig voor bosbrand geweest. De staat heeft hierdoor in de afgelopen eeuw meer financiële verliezen geleden dan welke andere staat ook. Er is al bewijs dat het aantal zware bosbranden midden jaren '80 plotseling opliep doordat de zomers langer waren en de sneeuw eerder was gaan smelten. En die branden hielden elke keer wekenlang aan. In 2003 joegen door de wind aangewakkerde bosbranden door het zuiden van Californië en bereikten zelfs de buitenwijken van Los Angeles. De brandweer kon destijds alleen maar machteloos toezien hoe enorme vlammentornado's boven de brand uitstegen. Oktober 2007 bracht opnieuw een dozijn branden in Californië. 14.000 ha en honderden panden gingen in vlammen op. Delen van San Diego werden geëvacueerd evenals de huizen van sterren als Sting en Mel Gibson in Malibu.

Volgens voorspellingen door de Forest Service van het USDA en academici van het Berkeley National Laboratory zou het aantal 'ontsnapte', uit de hand gelopen bosbranden in het zuiden van de San Francisco Bay Area met meer dan 50 procent kunnen toenemen en op de flanken van de Sierra Nevada, meer naar het oosten, zou de toename zelfs naar 125 procent kunnen doorschieten. Alleen de mistige en klamme noordkust zou aan de vlammen ontsnappen. Verder zou

Californië niet het enige getroffen gebied zijn: het grootste deel van het Zuidwesten, de Great Basin en de noordelijke Rocky Mountains zouden er elk jaar twee à drie weken aan verhoogd risico op bosbrand bij krijgen.

Al die uiteenlopende gevolgen wijzen maar op één ding: een heel ander Amerikaans westen dan wij nu kennen. Wanneer de bergen hun sneeuw kwijtraken, verliezen steden hun water en boeren hun vruchtbare grond. Als 's zomers de droogtes de graslanden en de bossen verdorren, kan men erop wachten dat de eerste vonk deze wereld in lichterlaaie zet. De brandweer mag dan wel aan komen rijden, maar de bluswagens zijn leeg en de slangen nutteloos. Niets zal de brand kunnen tegenhouden.

### De Big Apple verzuipt

Aan de andere kant van het Amerikaanse continent zal New York met het tegenovergestelde probleem te maken krijgen. Wat de Big Apple bedreigt is niet dat er te weinig, maar juist teveel water zal zijn. De New Yorkse metropool, waar bijna 20 miljoen mensen wonen, heeft een kustlijn van 2.400 kilometer. Het grootste deel daarvan ligt laag en is volgebouwd met flatgebouwen, wegen en treinrails. Van de vijf New Yorkse stadsdistricten liggen er vier op eilanden, die door meer dan 2.000 bruggen en tunnels met het vasteland verbonden zijn. De inritten naar de meeste spoorlijnen, tunnels en luchthavens liggen op slechts drie meter boven de waterspiegel, sommige zelfs nog minder. De vorm van de kustlijn in het oosten maakt New York ook nog eens uitermate kwetsbaar voor stormvloed: de haakse bocht tussen New Jersey en Long Island werkt als een trechter die water direct de haven in perst, terwijl ook de oostpunt van Long Island een trechter vormt.

Als het over een grote overstroming gaat, mogen gemeenteambtenaren graag zeggen dat het geen kwestie is van óf hij

komt, maar wanneer. Als de orkaan Floyd niet tot een tropische storm was afgezwakt toen hij in 1999 over dit gebied kwam razen, dan was 'die ene grote' waarschijnlijk al langse gekomen. Evengoed viel er op sommige plekken 30 centimeter regen, waardoor het plotseling hoogwater was en het transportsysteem in de stad bijna volledig stil kwam te staan.

Een paar jaar eerder, in december 1992, was de stad zelfs nog dichterbij een overstroming geweest. Toen joeg een harde noordooster storm een gigantische vloedgolf het land op, terwijl hij de gehele regio bekogelde met zware stortbuien. De vloedgolf sloot in de binnenstad het hele metrosysteem kort, waardoor mensen vast kwamen te zitten in treinen en op stations. Hij zette ook FDR Drive en andere wegen in Manhattan meer dan een meter onder water, terwijl het water in de tunnel van Battery Park twee meter hoog kwam te staan. Dorpen langs de kust van New Jersey, Connecticut en Long Island werden geëvacueerd. Ambtenaren slaakten een zucht van verlichting toen de storm begon over te waaien. Zij wisten dat een vloedstand van slechts een halve meter hoger tot grootschalige overstromingen en slachtoffers zou hebben geleid.

De afgelopen eeuw is de zeespiegel langs de kust van New York al zo'n 25 centimeter gestegen en er wordt voorspeld dat die verhoging de komende honderd jaar nog eens dramatisch zal versnellen. Het effect van de wereldwijde stijging van de zeespiegel wordt namelijk nog eens versterkt doordat het land langs het grootste deel van de Amerikaanse oostkust geleidelijk aan het zakken is. Tegen de tijd dat de temperatuur wereldwijd drie graden hoger ligt dan nu, zal de zeespiegel met nog eens 25 centimeter tot zelfs een hele meter zijn gestegen. (Zoals we al eerder zagen, hangt de onzekerheid hierover vooral samen met het onvoorspelbare gedrag van de ijsskappen op Groenland en Antarctica.) Met waarschijnlijk hardere orkanen en mogelijk ook nog eens zwaardere noordoosterstormen in de winter, zal die ene 'volmaakte storm'

New York wellicht niet slechts eenmalig, maar herhaaldelijk aandoen. Wat vandaag de dag geldt als de overstroming die eens in de 100 jaar plaatsvindt zou zich rond 2050 wel eens elke 20 jaar kunnen afspelen, en rond 2080 iedere vier jaar. De zone met drie meter overstroming, die nu veel van Manhattan, Coney Island in Brooklyn, grote delen van Jersey City en Hoboken en de beide luchthavens van Newark en LaGuardia omvat, zou maar liefst elke vijf jaar blank kunnen komen te staan. Daardoor zouden grote gebieden economisch niet meer levensvatbaar zijn. De overstromingsproblemen zullen nog verergeren, doordat het stijgende zeewater de kustlijn zoetjesaan wegvreet. Als er niet op grote schaal zand wordt aangevoerd, zullen de stranden in het noorden van New Jersey en Long Island rond 2080 jaarlijks drie meter verder landinwaarts kunnen komen te liggen.

Verschillende stedenbouwkundigen hebben inmiddels plannen op tafel gelegd voor de bouw van stormvloedkeringen op drie locaties om zo New York in de toekomst tegen vloedgolven te beschermen: één bij Arthur Hill tussen Staten Island en New Jersey, één in de buurt van de Narrows bij de monding van de New Yorkse haven en één aan de noordoever van Queens, aan de overkant bovenaan de East River. “In de toekomst zal een zwakkere storm dezelfde schade aanrichten als een zware storm momenteel doet,” zegt Malcom Bowman, stormvloedexpert en voorvechter van stormvloedkeringen. “Als deze drie barrières hoog genoeg zijn om elke denkbeeldige stormvloed te weerstaan en voor een zware storm worden afgesloten, dan zouden zij de stad rondom beschermen.”

Het bouwen van zo'n serie waterkeringen zou miljarden dollars kosten, maar het *niet* bouwen ervan zou in termen van mensenlevens en bezittingen nog wel eens meer kunnen kosten. Lower Manhattan, Coney Island en Rockaway Beach, drie van de meest kwetsbare delen van New York, zijn ook nog eens dichtbevolkt, terwijl de evacuatie routes onder het stormvloedpeil zullen liggen, zodat mensen die zichzelf

in veiligheid proberen te brengen de pas wordt afgesneden. Zoals de beleidsmakers die niets aan de dijken rond New Orleans deden ten koste van veel mensenlevens ondervonden: wanneer de grote storm eenmaal in aantocht is, is het te laat.

### **Storm boven Europa**

Inderdaad, de bouw van de stormvloedkering in de Thames heeft miljarden gekost, maar het geld bleek goed besteed. Tussen 1983 en 2001 is de waterkering 62 keer gebruikt en in de jaren daarna gebeurde dat nog vaker; het huidige ontwerp gaat tot 2030 mee. Zijn opvolger zal tot het eind van de eeuw misschien wel 200 keer gebruikt moeten worden om het hoofd te kunnen bieden aan de gevolgen van zowel zwaardere stormen als een hogere zeespiegel.

Jason Lowe van het Meteorologisch Bureau van het Britse Hadley Centre is één van de wetenschappers die zich bezighouden met het voorspellen van toekomstige stormvloedrisico's. Hij is mede-auteur van een artikel uit 2001 waarin hij aangeeft dat er in een warmere wereld aan de Britse kust inderdaad meer overstromingen te verwachten zijn. "In het zuidelijke deel van de Noordzee", zo stelt hij, "zal iets wat zich momenteel eens in de 150 jaar voordoet, rond 2080 elke zeven à acht jaar optreden."

Net als in Nederland was in 1953 een stormvloed verantwoordelijk voor de zwaarste natuurramp die Groot-Brittannië ooit heeft meegemaakt. In de nacht van 1 februari 1953 kwamen meer dan 300 mensen om het leven, nadat een gierende storm op de Noordzee in 24.000 huizen aan de Engelse oostkust voor overstroming had gezorgd. Vele overlevenden brachten urenlang in het steenkoude donker op de daken van hun huizen door, terwijl de golven door de onderste verdiepingen klotsten. Alleen wie geluk had overleefde die nacht, terwijl vele anderen aan de bitterkoude wind en

onderkoeling bezweken voordat reddingswerkers hen de volgende ochtend per boot konden bereiken.

Toentertijd werd de ramp in 1953 bestempeld als iets wat zich slechts eens in de 120 jaar voordoet. Het werk van Lowe laat zien dat overstromingen van deze orde de kust tegen het eind van deze eeuw om de paar jaar zouden kunnen treffen. Hierdoor zouden hele dorpen, steden en grote stukken landbouwgrond onbewoonbaar worden. Aparte steden, met hun kostbare vastgoed, zijn wel te beschermen. Maar wanneer het water blijft stijgen, is voor de kustlijn als geheel terugtrekken de enig haalbare optie.

Hoe vaak stormvloeden op gaan treden hangt af van de frequentie van het extreme weer dat hen veroorzaakt. Een Duits onderzoek voorspelde dat tegen de tijd dat de temperatuur wereldwijd drie graden hoger ligt, meer extreme orkanen een spoor over West-Europa zullen trekken. Daarbij zal zich in Groot-Brittannië, Spanje, Frankrijk en Duitsland meer stormschade voordoen. Een tweede onderzoek voorziet dat zelfs bij een daling in het totale aantal stormen, er in de tweede helft van de eeuw wereldwijd steeds vaker zware orkanen voorkomen. Weer een ander onderzoek voorspelt zwaardere stormen in heel West-Europa ten noorden van de Alpen, vooral in Frankrijk, Duitsland, Denemarken en Groot-Brittannië; daarbij zal de wind gemiddeld zo'n 25 procent harder zijn. Als gevolg daarvan zal het ook boven de Noordzee vaker gaan stormen en zullen er hogere golven op de kust van Nederland, Duitsland en Denemarken komen beuken.

Met zijn laagliggende kust en uitgebreide stelsel van waterkeringen en dijken zal Nederland uitermate kwetsbaar zijn voor plotselinge veranderingen in de zeespiegel. Zulke veranderingen zijn nooit voorzien door de ingenieurs die de infrastructuur voor deze kustverdediging hebben aangelegd; waarschijnlijk had geen van hen ooit van wereldwijde opwarming gehoord. Tijdens de ramp in 1953 kwamen veel meer Nederlanders dan Engelsen om – het totale dodental lag op

ruim 1800. En aangezien grote delen van het land onder het huidige zeeniveau liggen, zal Nederland tegen het midden van de eeuw wellicht genoeg moeten nemen met een flink gekrompen areaal. Gezien het feit dat Nederland vóór de drooglegging in de Middeleeuwen voor een groot deel onder water lag, kan de huidige vergrote vorm van het land wel eens een tijdelijke dwaling blijken te zijn in de voortdurende eb en vloed van de Noordzee.

De hardere wind zal vergezeld gaan van zwaardere regens – iets dat voor de hele aardbol wordt voorspeld, omdat de extra hitte-energie de processen van verdamping en neerslag versnelt. En die ontwikkeling is inderdaad al gaande; overall op de planeet is reeds een intensivering van de hydrologische cyclus waargenomen. In 2007 meldde een internationaal onderzoeksteam in het tijdschrift *Nature* dat regionen boven de 50° noorderbreedte op het noordelijk halfrond (een gebied dat Canada, Groot-Brittannië, Scandinavië, Noord-Europa en Rusland beslaat) een toename van de hoeveelheid neerslag hebben ervaren. Die extra neerslag weegt ruwweg op tegen de uitdroging in de tropen en subtropen. Men voorziet dat deze trend zich doorzet, en zodoende kan Noord-Europa rond 2070 zo'n 20 procent meer regen verwachten, die grotendeels tijdens steeds heviger stortbuien zal vallen. Dat betekent bovendien meer overstromingen in de winter. Volgens een onderzoek kunnen het noorden en westen van Groot-Brittannië te maken krijgen met 50 procent meer zware overstromingen.

Jaren met droogte en overstroming kunnen elkaar afwisselen, net zoals de ongekende Europese zondvloed in de zomer van 2002 werd gevolgd door een dodelijke hittegolf in de zomer van 2003. Dat beeld wordt bevestigd door een onderzoek van Italiaanse klimatologen, waarin in een warmer klimaat een toename van het aantal zware overstromingen en droogtes in West- en Midden-Europa wordt voorzien. Daardoor zullen de landbouw en dichtbevolkte gebieden kort na elkaar door zondvloeden en watertekorten worden

geteisterd. Met een scherpe daling van de neerslag in de Alpen zal Europa in droge jaren net zulke problemen krijgen als het westen van de Verenigde Staten. De rivieren bereiken hun hoogste stand al vroeg in het voorjaar, waarna het water middenin de zomer gevaarlijk laag zakt. Vrachtschepen lopen aan de grond en gewassen staan te verwelken op het land. De Rijn, de langste rivier in West-Europa, zou in de wintermaanden 30 procent meer water te verstouwen krijgen, waardoor er benedenstrooms in Duitsland en Nederland regelmatig overstromingen zullen optreden. Intussen zal de rivier in augustus 50 procent minder water voeren.

Ten zuiden van de bergen zullen zich aan de rand van het Middellandse Zeegebied deels woestijnachtige omstandigheden ontwikkelen. Zo werd een team Franse onderzoekers verrast door hun model, dat in de zomer een afname liet zien van de verdamping van vocht uit mediterrane bodems, terwijl de temperaturen rond 2070 de pan uit rijzen. Dat was vreemd, omdat water bij hogere temperaturen sneller verdampt en de verdamping in de zomer daarom toe had moeten nemen. Pas na diepgaand onderzoek beseften zij dat dat kwam doordat de bodem zozeer uitgedroogd zou zijn dat er geen water meer was dat kon verdampen. Onder zulke omstandigheden zou er niets meer kunnen groeien. De Sahara zal de Straat van Gibraltar zijn overgestoken en de mars naar het noorden zijn begonnen.

### **Koorts in Afrika**

Het is natuurlijk niet alleen Europa dat in een warmere wereld straks met een natter klimaat en meer extremen te maken krijgt. In Oost-Afrika wordt het vochtiger, terwijl zich op hetzelfde moment in Botswana en verder naar het zuiden de zandduinen ophopen. Regen in Oost-Afrika is complex. Het gebied kent twee regenseizoenen, een in het voorjaar en een tweede in het najaar. Dit hangt samen met de seizoens-

gebonden verschuiving van de passaatwinden en met de intertropische convergentiezone – de gordel onweerstormen rond de evenaar die zich met de zomer mee van het ene naar het andere halfrond beweegt. De landen van Somalië tot aan Mozambique, inclusief Kenya en Tanzania, zouden extreme neerslag en frequentere overstromingen kunnen krijgen. In Europa zijn poelen stilstaand water die een overstroming achterlaat misschien lastig, maar in Afrika nemen ze dodelijk gezelschap mee: ziekte.

Malaria en andere ziektes als knokkelkoorts, die door insecten worden overgebracht, tieren welig in warme, vochtige omstandigheden. En aangezien de klimaatverandering voor hogere temperaturen en meer neerslag zorgt, zullen beide ziektes naar grotere hoogtes en hogere breedtegraden verhuizen. Voor malaria is Afrika *ground zero*: van alle infecties en sterfgevallen vindt 85 procent daar plaats. Omdat malariamuggen met de opwarming van het klimaat op grotere hoogte nieuwe geschikte gebieden vinden, gaan hele nieuwe bevolkingsgroepen risico lopen die vaak nog nooit met malaria in aanraking zijn geweest. Dat zou met name Zimbabwe zwaar kunnen treffen. Omdat grote steden als Harare en Bulawayo hoog op de centrale hoogvlakte liggen, leeft het gros van de bevolking op dit moment boven de besmettingszone. Maar als de temperatuur verder oploopt, zal de Anopheles-mug ongehinderd door het gehele gebied kunnen vliegen. Daarmee gaan miljoenen mensen risico lopen, omdat dan maar liefst 96 procent van het land omstandigheden heeft waarin de ziekte gemakkelijk wordt overgebracht.

Maar het plaatje is nog ingewikkelder omdat het klimaat slechts één factor in de overdracht van malaria is. Als reactie op de apocalyptische scenario's waarin malaria in noordelijke richting oprukt naar Europa en de Verenigde Staten hebben sceptici er terecht op gewezen, dat malaria in Engeland, Nederland en het westen van Amerika tot in de negentiende eeuw heel algemeen voorkwam. De epidemie werd echter niet uitgeroeid door een verandering in het klimaat,

maar door veranderingen in de materiële omstandigheden: economische groei en betere gezondheidszorg. Vandaar dat voorspellingen voor de toekomst van malaria in de kern niet alleen afhangen van de neerslag en de temperatuur, maar ook van ontwikkelingen in de economie en de bevolkingsgroei. Dit verklaart ook de nogal onverwachte uitkomst van een onderzoek in 2004, waarin werd vastgesteld dat er in een toekomstscenario met een lagere uitstoot van broeikasgasen honderden miljoenen méér mensen het risico op malaria gaan lopen. Dat kwam omdat de scenario's met minder broeikasgassen weliswaar minder opwarming lieten zien, maar ook minder economische groei in combinatie met een hogere bevolkingsgroei.

Die complexiteit betekent dat de geschatte veranderingen die we mondiaal zullen zien in de bevolkingsaantallen die risico lopen op besmetting met malaria, danig uiteenlopen: van 150 miljoen *minder* tot 400 miljoen *meer* dan de huidige aantallen – en dat alles volgens één en hetzelfde onderzoek. Hoe dan ook, het is slecht nieuws voor Afrika. Afrika is het enige continent waar er in alle scenario's meer mensen aan de gevaren van malaria bloot komen te staan, en dat varieert dan van 21 miljoen mensen in het beste geval tot 67 miljoen in het ergste geval. Net als AIDS zal deze ziekte in sub-Sahara Afrika een vicieuze cirkel aandrijven, waarin gezonde en sterke mensen met de regelmaat van de klok ten prooi vallen aan de malariakoorts. Hierdoor worden productieve arbeidskrachten aan de arbeidsmarkt onttrokken en wordt de landbouw afgeremd. Als gevolg daarvan zijn zulke landen vaak vastgelopen in de armoede en blijft de gezondheidszorg er onder enorme druk staan. Terwijl andere werelddelen de oprukkende malaria met strenge maatregelen misschien weten in te dammen, zullen de ziekenhuizen in Afrika overstelpt blijven met zwetende en rillende patiënten. En iedere keer dat de wolken de doorweekte grond begieten, dalen er ook wolken muskieten neer en begint de cirkel weer van voren af aan.

## Het verloren paradijs

Voor Arthur Conan Doyle was het de Verloren Wereld. Een tafelberg in het hart van het Amazonewoud, bevroren in de tijd dat de dinosaurussen over de aarde zwierven, en vol angstwekkende wonderen voor het enige team wetenschappers dat in de buurt durfde te komen. De roman van Conan Doyle was niet gebaseerd op een verzonnen plek, maar op een uithoek van Venezuela waar ongelofelijke tafelbergen, die even fabelachtig als ontoegankelijk zijn, ook écht oprijzen als in mist gehulde, verticale schepen, drijvend in een zee van bomen. De lokale bevolking noemt ze ‘tepuis’; vanaf hun onbeklimbare hoogtes storten watervallen zich naar beneden. De scheuren en geulen waarin een paar planten zich met hun wortels hebben vastgegrepen, geven de steile zandstenen wanden een groene adering. Veel van deze bergen hebben de tred van mensenvoeten nog nooit gevoeld.

En Conan Doyle zat er niet ver naast toen hij zich de vreemde wezens voorstelde die er bovenop leefden. Felle lanspuntslangen, niet-springende padden, jaguars en klimmende ratten: deze geïsoleerde, steile reuzeblokken zijn bepaald uniek. Bovenop de vlakke top groeit er weelderige vegetatie, die varieert van glooiende weilanden tot dichte bosjes sappige bromelia’s. Op sommige tepuis is 60 procent van de planten nergens anders ter wereld te vinden. De meeste bergen worden door ecologen geclassificeerd als ongerept, zo geïsoleerd liggen ze van de menselijke invloeden als brand en ontbossing die elders de biodiversiteit bedreigen.

Maar datzelfde isolement heeft hen ook kwetsbaar gemaakt. Door hun vorm liggen de bergen er bij als een archipel van uitgestrooide eilanden, duizend meters boven een wijde vlakke. Daardoor kunnen de meeste soorten zich niet van het ene naar het andere eiland bewegen. En de vlakke tafelvorm maakt dat planten niet bergopwaarts kunnen als het klimaat voor hogere temperaturen zou zorgen dan zij kunnen verdragen.

Helaas, de opwarming van de wereld lijkt ervoor te gaan zorgen dat de temperatuur nu juist boven de tolerantiedrempel van de planten uit zal stijgen. Volgens een onderzoek door twee Spaanse biologen zal waarschijnlijk ruim een derde van de bij de tepuis behorende planten worden weggevaagd: een verlies aan biodiversiteit van mondiaal belang. De twee wetenschappers bevelen dan ook dringend nader onderzoek aan, om te bepalen of het mogelijk is om zoveel mogelijk soorten te behouden met behulp van botanische tuinen, opslag van zaden of zelfs van DNA, met het oog op een eventuele herintroductie in het wild als het klimaat zich eenmaal zou stabiliseren. Maar gezien het feit dat veel tepuis nog nooit door mensen zijn beklommen, laat staan onderzocht en geïnventariseerd, zijn de kansen op succes van zo'n soort programma uiterst gering. Bovendien is met een paar exemplaren in een gekoeld laboratorium een soort niet echt 'gered'. Voor de meeste soorten is de doodsklok echter al gaan luiden nu de temperaturen hoger komen dan zij de laatste duizenden jaren hebben gedaan en de toppen beginnen te verschroeien. Met het verstrijken van de eeuw zal het klimaat alles achter zich laten wat deze diverse en unieke verzameling planten en dieren de afgelopen miljoenen jaren heeft meegemaakt, en vele soorten zullen dat dan ook niet overleven. De wereld van Conan Doyle zal werkelijk verloren gaan en dit keer voorgoed. Het droeve lot van de tepuis illustreert dat zelfs de meest afgelegen plekken niet ontsnappen aan een wereldwijde verandering als de temperatuurstijging. Van de diepste oceaan tot de ijskoude wildernis van de antarktische ijskap, de klimaatverandering zal een impact hebben die eerst niet waarneembaar is, maar die geleidelijk aan voor meer ontwrichting zorgt en waarbij klimaatzones verschuiven en natuurlijke systemen uit elkaar vallen.

Wanneer de temperatuur op aarde drie graden verder oploopt, verbleken in de tropen de koraalriffen aan de kust elk jaar. En dat terwijl er nu al hele rifstelsels zijn afgestorven en alleen hun koude buitenranden nog vaag doen denken aan

hun oorspronkelijke diversiteit. Meer dan de helft van de planten in Europa zal op de Rode Lijst komen te staan, of al naar hun gewisse ondergang op weg zijn. Daarbij zijn juist de planten in berggebieden extra kwetsbaar. In de Rocky Mountains en de Great Plains in Amerika zullen vogels ofwel in hun leefgebied drastisch in aantal teruglopen, ofwel 400 kilometer naar het noorden trekken, op zoek naar betere oorden. In het noordoosten van China zal een van de laatste toevluchtsoorden van de Siberische tijger worden bedreigd, wanneer de boreale naaldbossen hun plaats moeten afstaan aan oprukkende hardhoutsoorten uit het zuiden.

Deze golf van vernietiging heeft een eenvoudige oorzaak. De verschillende klimaten waaraan deze soorten zich de afgelopen honderdduizenden jaren hebben aangepast, zullen verdwijnen. Een fascinerend, zij het ook deprimerend onderzoek, heeft precies in kaart gebracht welke gebieden het zwaarst door het fenomeen van de ‘verdwijnende klimaten’ getroffen zullen worden. Het werd in april 2007 gepubliceerd door een team onder leiding van John Williams, wetenschappelijk assistent op de faculteit geografie van Wisconsin University. Op zijn lijstje staan het Andesgebied in Colombia en Peru, het Riftgebergte in Afrika, de Hooglanden van Zambia en Angola, de Kaapprovincie in Zuid-Afrika, het zuidoosten van Australië, delen van de Himalaya, de archipels van Indonesië en de Filippijnen en de gebieden rond de Noordpool. In totaal zal op 10 à 50 procent van het aardoppervlak het gangbare klimaat volledig uit zicht verdwijnen. Planten en dieren die aan deze gedoemde klimaten zijn aangepast kunnen geen kant op; nergens ter wereld zal er nog een plek te vinden zijn met een klimaat dat bij hen past. Het meest deprimerende van alles is echter dat er een nauw verband is tussen de gebieden waar het klimaat volledig zal verdwijnen en de plekken met de grootste biodiversiteit. De plekken die er het meest van langs krijgen zijn met andere woorden precies die plekken, waar het leven nu zijn glansrijke overvloed en diversiteit zo uitbundig etaleert.

Geloof het of niet, maar deze cijfers onderschatten de omvang van het probleem nog steeds. Veel soorten zullen hun klimaat zien opschuiven in de richting van de polen, zodat ze wel snel weg moeten trekken om nog in hetzelfde klimatologische 'kader' te kunnen blijven. Hun klimaat zal met andere woorden niet helemaal verdwijnen, maar honderden kilometer verder naar het zuiden of noorden opduiken. De snelheid waarmee soorten zich kunnen verspreiden zal echter ver achterblijven bij het tempo van deze verandering. Toen de wereld bijvoorbeeld tegen het einde van de laatste ijstijd warmer begon te worden, wisten bomen en andere planten hun leefgebied per eeuw maximaal 200 kilometer te verleggen, terwijl de meeste zelfs nog veel langzamer gingen. Ga maar na hoe groot de afstand is tussen de plek waar een bepaald klimaat vandaag de dag heerst, en waar het zich in de toekomst zal vestigen, en dan wordt de ernst van de situatie pas goed zichtbaar. Zelfs als we het ruim nemen en ervan uitgaan dat 500 kilometer opschuiven haalbaar is, dan nog zullen planten en dieren die tussen de 40 en 85 procent van het aardoppervlak bewonen, hun klimaat zien verdwijnen. Toevallig zal volgens het onderzoek in datzelfde deel van het aardoppervlak een 'nieuw' klimaat heersen, een klimaat dus dat in de afgelopen miljoen jaren niet is terug te vinden.

Er bestaat een term die ecologen gebruiken voor soorten waarvan het leefgebied al grotendeels verdwenen is, en die nog maar zo sporadisch voorkomen dat zij gedoemd zijn om voorgoed uit te sterven. Zulke soorten worden 'levende doden' genoemd. Het is als de Ark van Noach, maar dan omgekeerd. Wegkwijnende groepen planten en dieren, van boskikkers tot ijsberen, maken zich op om voorgoed van het wereldtoneel te verdwijnen. Om een idee van hun aantallen te krijgen, kunnen we het artikel uit 2004 in *Nature* van Chris Thomas en zijn collega's erbij pakken. Daarin stellen zij dat tussen een derde en de helft van alle nu levende soorten rond 2050 tot de categorie van de 'levende doden' horen als de wereldwijde opwarming tegen die tijd boven de twee graden uitkomt.

Het is haast niet te geloven dat het leven, in al zijn schoonheid, zijn uitbundigheid en zijn veerkracht van miljoenen jaren, zo plotseling tot zo'n gevoelloze doodstraf zou zijn veroordeeld; dat de wereld niet meer mee zou maken hoe de paradijsvogel tijdens zijn paringsdans met zijn verentooi loopt te pronken, of hoe de bultrug zijn aangrijpende liederen zingt. Maar de harde cijfers spreken voor zich, verzameld door experts die strenge wetenschappelijke normen aanhouden. En laat niemand de gevolgen in twijfel trekken. De zesde massale uitroeiing van het leven is al in volle gang nu de temperatuurstijging wereldwijd op weg is naar de drie graden.

Het Tijdperk van de Eenzaamheid is aangebroken.

### Voedsel uit de kas

Alle planten hebben een thermische tolerantiedrempel en ook de voornaamste voedselgewassen op aarde vormen daarop geen uitzondering. Granen zijn met name gevoelig voor hitte tijdens de bloei en de zaadvorming, en temperaturen boven de 30°C zorgen voor toenemende schade. John Sheehy van het International Rice Research Institute in Manilla stelt dat "bij elke extra graad boven de 30°C de oogst van rijst, tarwe en maïs met 10 procent terugloopt". Boven de 40°C valt er helemaal niets meer te oogsten. Veel gebieden in de tropen liggen al tegen die drempel van 30°C aan en daardoor dreigen de oogsten in de drie-gradenwereld langzaam af te glijden. Wereldwijd zal zich een patroon aftekenen waarin de teelt van landbouwgewassen zich over de hele linie vanuit de tropen verplaatst naar de hogere breedtegraden, waar nog koelere en nattere omstandigheden heersen. In die noordelijke gebieden mag er dan nog wel voldoende voedsel zijn, maar deze tropische temperatuurcrisis betekent een ramp voor miljoenen mensen.

Zoals altijd zal droogte hierin een sleutelrol gaan spelen. In de semi-aride tropen van Afrika moet de landbouw het

voor zijn water vooral van neerslag hebben, niet van irrigatie, en daarom is deze uitermate kwetsbaar voor klimaatveranderingen. Noord-Afrika zou wel eens tot 20 procent minder neerslag kunnen krijgen, terwijl er in het zuiden middenin het groeiseizoen 5 tot 15 procent minder regen zal vallen. Simulatiemodellen van de landbouw in de tropen als geheel voorzien verlamdende dalingen in de productie van tarwe, maïs en rijst. In de tropen zullen gewassen het zwaar krijgen omdat zij al tegen de thermische tolerantiedrempel aanzitten, maar op de hogere breedtegraden zullen zij aanvallig van een langer groeiseizoen kunnen profiteren. Wanneer we echter de drempel van 2,5°C over zijn, zullen zelfs de graanschuren op de gematigde breedtegraden klappen krijgen, omdat de gewassen er in de gloeiende zomerpiek door een gebrek aan water zullen verdorren. Zoals een belangrijk onderzoek voor het IPCC-rapport in 2007 stelde: “Als het 2 à 3°C warmer wordt, zullen alle grote graanschuren op aarde maatregelen moeten nemen, hoe de neerslag zich ook ontwikkelt.”

In de Verenigde Staten krijgen vooral de gebieden in het zuiden, die het dichtst bij de subtropen liggen, het zwaar te verduren. Wanneer de watervoorziening hapert, worden tarwe en maïs de voornaamste slachtoffers. Droogtes zullen worden afgewisseld door zwaardere stortbuien, wat betekent dat de oogst ook nog eens kan mislukken dankzij overstromingen. Zulke extra overstromingsschade kan in de maïsgordel van de Verenigde Staten oplopen tot 3 miljard dollar, zo blijkt uit onderzoek. Ook ziekten en plagen profiteren vaak van een warmer klimaat, waardoor de vraag naar pesticiden omhoog zal gaan. Boeren zullen zich flink moeten aanpassen met welke gewassen zij verbouwen kunnen en met hoeveel water ze kunnen irrigeren. Het zal nog heel moeilijk worden in het westen, waar watervoerende bodemlagen zullen zijn leeggepompt op het moment dat de aanvoer vanuit de smeltende sneeuw minder wordt. Zelfs in Canada zal de hoeveelheid beschikbaar water op de Prairies

een hogere graanproductie bemoeilijken. Waar echter water in overvloed is kan de opbrengst van maïs en sojabonen in Canada met sprongen omhoog. Ook aardappels en winter-tarwe zouden het dan goed doen. Volgens een onderzoek naar de situatie in de Verenigde Staten en Canada zou “het gebied waar hoofdgewassen worden verbouwd uiteindelijk honderden kilometers naar het noorden opschuiven”.

Maar zelfs als er dichterbij de polen winst te halen is, dan nog zal de wereldvoedselsituatie kritieker worden en zullen er in de tropen en subtropen miljarden mensen lijden onder droogte en hongersnood. Het IPCC-onderzoek voorziet dat het netto mondiale voedseltekort de marktprijzen zal opdrijven als de drempel van  $2,5^{\circ}\text{C}$  eenmaal is overschreden. In ontwikkelingslanden waar de landbouw de grootste klappen krijgt, is de kans groot dat mensen op grote schaal zullen verhongeren.

Wanneer structurele hongersnood grote delen van de subtropen in zijn greep heeft, hebben honderden miljoenen mensen maar één optie als zij en hun gezinnen niet willen omkomen: inpakken en wegwezen. De volksverhuizingen die dan op gang zullen komen, zijn niet te vergelijken met wat zich eerder in de geschiedenis heeft afgespeeld als uitvloeisel van oorlogen of mislukte oogsten. Nooit eerder heeft de mens een hele gordel breedtegraden moeten verlaten. En als deze grote aantallen klimaatvluchtelingen elders toch al dichtbevolkte gebieden binnenstromen, zullen er onherroepelijk conflicten uitbreken. Zo zouden bijvoorbeeld in Midden-Amerika miljoenen mensen door de droogte gedwongen worden om huis en haard te verlaten en uit te wijken naar het noorden, naar Mexico en de Verenigde Staten. Nog eens tientallen miljoenen zullen uit Afrika naar Europa vluchten, waar zij niet bepaald warm ontvangen zullen worden. Nieuwe fascistische partijen zouden hun verkiezingen wel eens verpletterend kunnen winnen door te beloven de hordes hongerende Afrikanen buiten de deur te houden. Onverschrokken zullen veel van deze nieuwe klimaatvluchtelingen, met kinderen en

ouden van dagen in hun kielzog, hun tocht te voet afleggen en meenemen wat zij kunnen dragen. Velen zullen sterven langs de kant van de weg. Ontworteld, statenloos en zonder een sprankje hoop zijn zij de eerste generatie van een nieuw soort mens: klimaatnomaden, voortdurend onderweg op zoek naar voedsel, zonder besef van hun eens zo uiteenlopende culturen en voorgoed afgesneden van de band met hun voorouders en hun geboortegrond.

Maar misschien zullen deze mensen zich niet zomaar schikken in hun nieuwe rol van passieve slachtoffers. Zij zijn zich er terdege van bewust dat de wereld die zij geërfd hebben niet door hen geschapen is. Daarmee vergeleken is de wrok onder moslims ten aanzien van westerlingen maar een flauwe grap. Naarmate de sociale instorting sneller gaat, zullen er wellicht nieuwe politieke filosofieën ontstaan, filosofieën die de schuld leggen waar deze werkelijk hoort – bij de rijke landen, die ooit het vuur aanstaken waarin de wereld langzaam maar zeker wordt verteerd.