

DEEL VIJF

IJstijden en zonnepulsen

21 Goudlokje en de drie planeten

Waarom de aarde 'precies goed' is voor het leven

De 'binnenring' van planeten van onze zon wordt gevormd door, achtereenvolgens, Mercurius, Venus, de aarde en Mars. Al vanaf hun ontstaan uit kosmisch gruis, 5 miljard jaar geleden, zijn die planeten meer geweest dan alleen maar steenklompen. Om te beginnen zijn ze heet. Ze bestaan uit een dunne, harde korst met daarbinnen een grote vloeibare kern. Door de korst ontsnappen gassen van turbulente chemische processen in de diepte. Mercurius is te klein en heeft te weinig zwaartekracht om die gassen vast te houden, maar de andere hebben althans een deel van die gassen bij zich gehouden en een atmosfeer gevormd. Die atmosferen bevatten broeikasgassen, zoals kooldioxide, waterdamp en methaan, die de zonnewarmte vasthouden en voor klimaten zorgen.

De drie atmosferen van de drie planeten leken waarschijnlijk in het begin tamelijk veel op elkaar, maar ze hebben zich in zeer verschillende richtingen ontwikkeld. Tegenwoordig heeft Venus een dikke atmosfeer met genoeg broeikasgassen om temperaturen te handhaven van rond de 450 graden C. Het schijnt dat Mars ooit een substantiële atmosfeer heeft gehad en een klimaat waarin regen mogelijk was. Misschien is er ook leven ontstaan. Maar op een bepaald moment heeft de planeet het grootste deel van zijn atmosfeer verloren en is verdroogd. Als er al leven geweest is, dan is het nu dood. De teloorgang van dit levenssysteem op Mars is een raadsel, want de planeet heeft aan de oppervlakte veel koolstof. Die koolstof dreef waarschijnlijk ooit in de atmosfeer in de vorm van kooldioxide en vormde zodoende een deken die warm genoeg was voor het bestaan van vloeibaar water en voor

levende organismen. Maar het merendeel van die koolstof zit nu in de gesteenten.

De aarde daarentegen heeft een rijke, chemisch zeer actieve atmosfeer en net voldoende broeikasgassen om een gelijkmatige temperatuur te handhaven, plus veel vloeibaar water – en de planeet zindert van leven. Een aantal planetologen heeft de aarde ‘Planeet Goudlokje’ gedoopt. Als Goudlokje in het gelijknamige kinderverhaal in het huis van de drie beren komt en van de pap proeft, vindt ze die in één kom te warm (Venus), in de andere te koud (Mars), maar in de volgende precies goed (de aarde). Op het eerste gezicht lijkt dat puur toeval. De aarde moet op precies de goede afstand van de zon hebben gestaan. Maar toch, aangezien de drie planeten in het begin vrijwel dezelfde atmosfeer hebben gehad, is de theorie geopperd dat het verschillende lot dat ze heeft getroffen evenveel te maken heeft met die atmosferen als met hun afstand tot de zon.

De aardatmosfeer, dat is wel duidelijk, heeft standgehouden en is een goede omgeving gebleken voor het ontstaan van talloze levensvormen. In het begin was het wel vaak moeilijk. Het schijnt dat onze planeet verschillende keren helemaal met sneeuw en ijs bedekt is geweest, en toen kon het leven zich alleen in warme kieren en gaten onder het bevroren oppervlak handhaven. Het lot van Mars leek nabij. ‘Het was kantie boord,’ zegt Joe Kirschvink van het Californian Institute of Technology in Pasadena, die als eerste de term ‘Sneeuwbal Aarde’ gebruikte voor die toestand, die voor het laatst zo’n 600 miljoen jaar geleden voorkwam. Hij denkt dat de aarde een soortgelijk lot als Mars alleen maar bespaard is gebleven door de uitstoot van kooldioxide via vulkanen onder het ijs. ‘Als de aarde een klein beetje verder van de zon had gestaan, zou de temperatuur aan de polen zo ver hebben kunnen dalen dat kooldioxide bevroor, waarmee de broeikasontsnapping van Sneeuwbal Aarde zou zijn geblokkeerd.’

Maar de aarde sloeg zich door die moeilijk tijden heen en heeft, minstens de afgelopen 500 miljoen jaar, een verrassend

constante temperatuur bewaard. Niet volledig constant, zoals we verderop zullen zien, maar verrassend constant als je de kosmische krachten die eromheen spelen in aanmerking neemt. De belangrijkste daarvan is de zon, de voornaamste bron van energie en warmte aan het aardoppervlak. Vergeleken daarbij is de bijdrage van de aardkern te verwaarlozen. Maar de zon is veel veranderd in de tijd dat de aarde bestaat. In het begin – de eerste miljard jaar van het bestaan van de aarde – was het een zwak beestje. Hij straalde ongeveer een derde minder energie uit dan nu. Ook 500 miljoen jaar geleden was hij nog wel 10 procent zwakker dan tegenwoordig. Maar toen behoorde Sneeuwbal Aarde al tot het verre verleden en scheen de aarde toch warmer te zijn geweest dan nu en helemaal ijsvrij. Dat kwam omdat er veel methaan, kooldioxide en waterdamp in de atmosfeer zaten, die bij elkaar een dikke deken vormde die de aarde met zijn groeiende leger van primitieve organismen warm hield. Er was nog veel vulkanische activiteit, zodat een telkens nieuwe uitstoot van kooldioxide de lekkage uit de atmosfeer compenseerde en ervoor zorgde dat de concentratie broeikasgassen rond de twintig keer hoger bleef dan nu.

Maar met het ouder worden van de planeet nam de vulkanische activiteit af en verdween de kooldioxide geleidelijk aan uit de atmosfeer. Dat proces schijnt herhaaldelijk te hebben bedreigd met een terugkeer naar Sneeuwbal Aarde en een Martiaans verval in een koude, levenloze wereld. Maar misschien heeft dat proces de aarde ook in laatste instantie behoed voor een soortgelijk lot als Venus. Dat roept een interessante vraag op. Is die gelukkige Goudhaartje-uitkomst puur toeval? Of heeft de aarde misschien een primitief soort thermostaat ontwikkeld? Het verrassende antwoord is dat dat laatste wel eens het geval zou kunnen zijn.

Kooldioxide werd ook toen al uit de aardatmosfeer gehaald doordat het oplostte in regenwater en als verdund koolzuur neersloeg. Dat zuur vrat aan de gesteenten op de grond, die voornamelijk uit calciumsilicaat bestonden. Daar-

door ontstond calciumcarbonaat dat als sediment op de zeebodem eindigde. Dat proces heeft een ingebouwde thermostaat, omdat de hoeveelheid regen afhankelijk is van de temperatuur. Dus de erosie neemt toe als het warm is. Maar een snellere erosie verwijdt meer kooldioxide uit de lucht en verlaagt de temperatuur weer. Als de thermostaat de boel opjaagt en het te koud wordt, daalt het tempo van verweering en stijgt opnieuw de temperatuur. Dat is een negatieve feedback die opereert via de koolstofkringloop. Die kan ons nu niet redden, want het duurt miljoenen jaren voordat die effectief wordt. Maar op geologische tijdschaal werkte hij waarschijnlijk goed en hield de temperatuur op een niveau die gunstig was voor het leven.

Heel erg gunstig. Verdacht gunstig, vond de Britse chemicus en uitvinder Jim Lovelock in de jaren 1980. Lovelock vroeg zich af of het leven zelf dit proces misschien regelde, en kort daarna toonden twee van zijn volgelingen, Tyler Volk en David Schwartzman, aan dat hij wel eens gelijk kon hebben, door te laten zien dat basalt duizend keer sneller erodeert als er organismen zoals bacteriën in de omgeving zitten. Dat betekende een nieuwe en uiterst dynamische negatieve feedback. Meer bacteriën houden de aarde koel. Als de lucht te koud wordt, raakt de aarde bedekt met ijs, de bacteriën sterven af, de erosie vertraagt en de atmosfeer warmt weer op. Dit proces is in potentie een uiterst krachtige aardse thermostaat en een hoeksteen van Lovelocks weidse visie op de aarde als een zelfregulerend systeem dat hij 'Gaia' noemde. Het kan ook verklaren waarom de feedback van de koolstofkringloop Mars niet kon redden: misschien had de Rode Planeet op een kritiek moment niet genoeg leven om hem goed te laten functioneren.

Lovelock is een controversieel figuur. Hij is inmiddels in de tachtig, en hij kreeg zijn idee van Gaia toen hij nog voor NASA werkte en een manier zocht om erachter te komen of er leven was op andere planeten. Hij bedacht dat je daarvoor het beste kunt speuren naar gassen die alleen door levens-

vormen in de atmosfeer kunnen worden gehouden. En toen realiseerde hij zich dat het leven alleen dan natuurlijk kan evolueren als het de omgeving in stand houdt waarin het ook kan gedijen. Hij betoogde dat het leven op aarde vanaf het begin uitgekende strategieën had ontwikkeld om het klimaat over langere tijd te stabiliseren. Volgens hem was de temperatuur voor het leven op aarde ‘precies goed’, omdat het leven die temperatuur handhaafde door de belangrijkste planetaire levenssystemen, zoals de koolstofkringloop, te reguleren.

Jarenlang was Lovelock vrijwel uitgestoten uit de wetenschappelijke gemeenschap. Gaia werd door velen gezien als quasi-religieuze poespas. Grote tijdschriften zoals *Nature* en *Science* wilden zijn werk niet publiceren. Hij verdiende zijn brood als freelance uitvinder van wetenschappelijke instrumenten. Maar zijn idee van de aarde als – metaforisch gesproken – één levend organisme heeft hem tot geestelijk vader van een hele generatie aardwetenschappers gemaakt. Of je nu gelooft in het idee van een levende aarde of niet, zijn manier van denken over de aarde als een enkel systeem met zijn eigen feedbacks is uiterst vruchtbaar gebleken.

De thermostaat van de aarde, of die nu gereguleerd wordt door het leven of door de geologie, is tamelijk grof. Al 400 miljoen jaar is de aarde aan het afkoelen. Sommigen beschouwen dat als een weerlegging van de Gaia-theorie. Maar anderen, zoals Greg Retallack, een bodemdeskundige van de University of Oregon, betogen dat de afkoeling plaatsvond omdat het leven, of althans een groot deel daarvan, dat wilde. Vooral planten, zegt hij, houden van een koele aarde. En planten zijn uiterst efficiënt gebleken in het absorberen van kooldioxide, dat ze vervolgens permanent begraven op plaatsen waar het niet meer naar de atmosfeer kan terugkeren. Zo’n 7 biljoen ton plantaardige koolstof heeft tientallen miljoenen jaren in de vorm van fossiele brandstoffen onder de aardkorst gezeten. Daarnaast zit waarschijnlijk nog zo’n

hoeveelheid methaan gevangen in clathraten onder de zeebedding. Dat is een heleboel opgeslagen warmte, zoals we nu tot onze grote schade ontdekken.

De afkoeling van de aarde is een lang en traag proces geweest, dat met horten en stoten is gegaan. Rond de 55 miljoen jaar geleden liet de aarde, zoals we al eerder hebben gezien, 'de grootste scheet in de geschiedenis', een enorme eruptie van methaan uit de onderzeese clathraten, die de wereldtemperatuur met ongeveer 5 graden C deed stijgen. Dat was duidelijk geen onderdeel van een alomvattend Gaiaans plan. Maar de Gaianen betogen dat de feedbacks van het leven de controle weer overnamen. Het methaan werd uiteindelijk weer omgezet in kooldioxide, dat op zijn beurt door het zeewater werd geabsorbeerd en zo terugkeerde. Maar zelfs nadat de normale processen weer werden hervat, bleef het kooldioxidegehalte in de atmosfeer vijf keer zo hoog als nu – rond de 2000 ppm. Na ongeveer een miljoen jaar echter, begonnen die concentraties scherp te dalen. (Dat wil zeggen, scherp op een geologische tijdschaal, want het gemiddelde tempo van de afname was minder dan één tienduizendste van het tempo van de toename in de afgelopen decennia.) Zo'n 40 miljoen jaar geleden waren de concentraties gezakt tot 700 ppm. En rond 24 miljoen jaar geleden zaten ze onder de 500 ppm, waarschijnlijk voor het eerst sinds het ontstaan van de planeet.

In die tijd vormde zich een ijskap op de Zuidpool – het eerste permanente ijs op aarde na honderden miljoenen jaren. En ongeveer 3 miljoen jaar geleden zette een nieuwe sterke afkoeling in, die ervoor zorgde dat ook op het noordelijk halfrond ijskappen kwamen. Verklaringen voor deze algemene koelingstrend lopen uiteen van continentale drift in de westelijke Stille Oceaan tot een nieuwe instelling van de Gaiaanse thermostaat. Maar daar hoeven we het niet over te hebben. Want de ijstijden zelf – de geologisch korte maar extreem koude perioden binnen de algemene afkoelingstrend – voltrokken zich in een tijdspanne die veel belangrijker is

voor de penibele situatie waarin we nu verkeren. De oorzaken van de ijstijden achterhalen, zo denken veel klimatologen, zal ons een belangrijk inzicht verschaffen in wat ons de komende decennia te wachten kan staan.

22 De grote vorst

Hoe een hobbel in de baan om de zon de ijstijden op gang bracht

De ontdekking dat de aarde ooit in een ijstijd gedompeld is geweest was een van de grootste wetenschappelijke vondsten van de negentiende eeuw. Voor de aardwetenschappen was die ontdekking wat de evolutietheorie van Darwin was voor de biologie. Alles veranderde. De feiten kwamen geleidelijk aan het licht, maar de eerste die doorhad op welke schaal het noordelijk halfrond aan bevriezing ten prooi was geweest, was een Zwitserse bioloog, Louis Agassiz genaamd. Toen Agassiz in 1836 de zomer doorbracht in de Alpen, wees zijn gastheer hem op enorme kloven in de bergellingen die aantoonde, zei hij, dat de gletsjers ooit veel dieper tot in de vallei hadden gereikt.

Agassiz vroeg zich af wat dit betekende. Hij herinnerde zich dat hij op veel plaatsen in Europa, ver van de toenmalige gletsjers, ook dat soort kloven in het landschap had gezien. En hij hoorde dat heel Noord-Amerika vol zat met dezelfde gletsjersporen. In de krant las hij berichten over volledig geconserveerde mammoeten die uit de sneeuw in Siberië werden opgegraven en waarvan het vlees nog zo vers was dat het aan de honden gevoerd kon worden en werd opgegeten door beren. De enige verklaring, concludeerde hij, was dat een groot deel van het noordelijk halfrond ooit onder het ijs moest hebben gelegen en dat dit heel plotseling was gebeurd, in één grote ijsapocalyps. 'Het Europese land, dat eerder bedekt was met tropische plantengroei, waar kudden grote olifanten leefden, enorme nijlpaarden en reusachtige roofdieren, werd plotseling begraven onder een uitgestrekte

ijskap,' schreef hij. 'Het roeren van een machtige schepping werd vervangen door de stilte van de dood.'

Zijn visie was als een omgekeerd scheppingsverhaal. Verder onderzoek in de geologie toonde al gauw aan dat er niet één ijstijd was geweest, maar een hele reeks, zo ongeveer om de 100.000 jaar, met daartussen warme perioden zoals de onze. Maar verder is het beeld opmerkelijk intact gebleven. Recent onderzoek heeft zijn oorspronkelijke idee zelfs bevestigd dat het begin van de laatste ijstijd heel snel moet zijn verlopen, waarbij de temperaturen in hoogstens een paar honderd jaar – en heel waarschijnlijk minder – kelderden.

We weten nu dat er twee grote ijskappen werden gevormd. Eén die zich uitstreckte van de Britse Eilanden en de Noordzee en Scandinavië en vandaar oostwaarts over Rusland en West-Siberië en naar het noorden over de Barentssee, helemaal tot Spitsbergen. Een tweede, zo mogelijk nog grotere ijskap, bedekte heel Canada en Zuid-Alaska, met een uitloper over Groenland. Een andere, kleinere ijskap, lag op IJsland, en de zee eromheen was bedekt met dikke ijsschotsen. Het gekke is dat Noord-Alaska en Oost-Siberië, ofschoon diep bevroren, nooit met ijs bedekt zijn geweest. Maar tezamen met het oudere ijs op de Zuidpool bevatten die kappen drie keer zoveel ijs als nu op aarde aanwezig is – genoeg om de zeespiegel 120 meter te verlagen ten opzichte van nu. Dertig procent van het landoppervlak lag onder het ijs. De ijskappen waren niet alleen uitgestrekt, maar ook heel dik, wel 4 kilometer rezen ze boven het land uit. Ze koelden de lucht af die eroverheen streek en fungeerden als een barrière voor de heersende westenwinden, die zuidwaarts werden gedirigeerd, om de ijskappen heen. Dat maakte de ijskappen nog permanentier, aangezien de wind de meest voor de hand liggende warmtebron was om ze te smelten.

De temperatuur zakte wereldwijd gemiddeld met 5 graden C, maar in delen van Groenland was hij 20 graden lager dan nu en maar 3 graden lager in de westelijke Stille Oceaan. De wereld buiten de ijskappen werd droog en koud. Woestijnen

bedekten het Amerikaanse middenwesten, Frankrijk en de weidse vlakten van Europa en Azië, tussen Duitsland en de tegenwoordige Gobiwoestijn in Mongolië. Verder naar het zuiden verlegde de Sahara zijn grenzen, werd de Aziatische moesson vrijwel uitgeschakeld en krompen de tropische regenwouden in Afrika en Zuid-Amerika in tot een paar plukjes omgeven door grasland. Op het dieptepunt, ongeveer 70.000 jaar geleden, waren zelfs de graslanden grotendeels verdwenen en veranderd in uitgestrekte woestijnen waar de wind enorme stofstormen opwierp. De mens leefde van de jacht op de vlakten en school in de schaarse gebieden die ondanks de kou en de droogte nog een weelderige vegetatie hadden.

Het was Agassiz en zijn collega-onderzoekers vanaf het begin duidelijk dat er iets drastisch moest zijn gebeurd om dat allemaal teweeg te brengen. Algauw werd geopperd dat het astronomische krachten moesten zijn geweest. Met name de aantrekkingskracht van andere planeten in het zonnestelsel, zoals Jupiter, kon het komen en gaan van de jaargetijden beïnvloeden en er op die manier voor zorgen dat de gletsjers en ijskappen groeiden. Veel wetenschappers speelden destijds met dat idee. Maar de eerste die het gedetailleerd analyseerde was de Schotse zoon van een keuterboertje, die geen enkele formele opleiding had genoten, maar die wel een bijzonder ijverig en hartstochtelijke autodidact was. James Croll was een verlegen slungel van een man met grote ambities. Hij stuitte in de bibliotheek op het idee van een astronomische oorzaak voor de ijstijd en hield er zich in de jaren 1860 en 1870 grotendeels mee bezig. Hij nam allerlei baantjes aan, van verzekeringsagent tot conciërge van een school, om zijn passie te financieren.

De astronomische krachten, zo ontdekte hij, hebben in principe drie uitwerkingen op onze planeet, die allemaal de verdeling van de zonnestraling die de aarde bereikt een beetje veranderen. Het effect is het grootst in de poolstreken, waar ze de hoeveelheid zonlicht wel met 10 procent kunnen ver-

lagen. Het eerste wat ze doen is de vorm van de jaarlijkse baan van de aarde om de zon veranderen. Die baan is niet cirkelvormig, maar enigszins elliptisch, en de vorm van die ellips verandert al naargelang de zwaartekracht die door de andere planeten op de aarde wordt uitgeoefend. Die variatie in de *excentriciteit* van de aardse baan doet zich elke 100.000 jaar voor.

De aarde draait niet alleen in één jaar om de zon, maar ook in één dag om zijn eigen as. Die as staat echter niet loodrecht op het baanvlak om de zon. Vanuit de ruimte gezien draait de aarde dus enigszins scheef om zijn as. De wisselwerking tussen de baan om de zon en de hoek die de aardas met het baanvlak maakt zorgt voor de seizoenen, want dat betekent dat het noordelijk en het zuidelijk halfrond de zon de ene keer meer en de andere keer minder zien. Die toestand is echter niet statisch. De astronomische krachten veranderen de hoek van de aardas met het baanvlak ook een beetje. Die verandering in de *inclinatie* van de aarde zorgt voor een verandering in de intensiteit van de seizoenen. Die verloopt cyclisch en heeft een periode van 41.000 jaar.

Daarnaast is er nog een andere wiebel in de aardas die *precessie* heet. Dat is precies zo'n wiebel die je ziet bij een draaitol, en die bepaalt het tijdstip in het jaar waarop de verschillende halfronden het dichtst of het verst van de zon staan. De precessie wordt gecompliceerd door zijn relatie met de andere twee effecten, maar heeft een cyclus van tussen de 19.000 en de 23.000 jaar. Op dit moment is het op het noordelijk halfrond zomer en het zuidelijk halfrond winter wanneer de aarde het verst van de zon staat. 10.000 jaar geleden was het precies andersom.

Het blijkt dat de 'excentriciteit' van de aardbaan de 100.000-jarige cyclus van de ijstijden aandrijft. Het schijnt dat de andere twee effecten, met name de precessie, de korte warmere perioden binnen elke ijstijd op gang brengen.

Croll beseftte dat die veranderingen, gemiddeld over een jaar, weinig verschil maken voor de hoeveelheid zonnestra-

ling die de aarde bereikt. Het totale effect was waarschijnlijk minder dan 0,2 watt per vierkante meter. Maar die variaties brachten wel verandering in de plaatsen waar en wanneer de zon de aarde trof. Croll berekende tot in de kleinste details hoe die invloeden toe- en afnamen gedurende tienduizenden jaren. En hij kwam, althans voor zichzelf, bevredigend tot de conclusie dat ze samenvielen met wat de geologen destijds ontdekten over de timing van de aardse ijstijden.

De veranderende vorm van de omloopbaan, de hellingshoek van de aardas en de precessie, allemaal tezamen wijzigen ze de intensiteit van de seizoenen, waardoor de winters meer of minder streng en de zomers meer of minder warm worden. En dat zette de vorming van ijskappen op het land in het noordelijk halfrond in werking, zei hij. De ijskappen begonnen zich te vormen wanneer de noordelijke winters het koudst waren, en dat gebeurde wanneer de aarde het verst weg stond van de zon en de veranderde hellingshoek van de as maakte dat het noordelijk halfrond het minste zonlicht kreeg. Als de ijskappen eenmaal begonnen te groeien, dan reflecteerden ze nog meer zonlicht terug de ruimte in en werd de afkoeling intenser. Hij besepte ook dat er op het zuidelijk halfrond veel minder ruimte was voor de groei van ijskappen omdat ze zich alleen op het continent Antarctica konden vormen. Dus het noordelijk halfrond domineerde de processen en bepaalde de totale warmtehuishouding van de aarde. Hij opperde ook andere feedbacks, zoals veranderingen van wind en oceaanstromingen, die de wereld dieper een ijstijd in konden drijven.

Het bleek dat Croll ongelijk had met zijn veronderstelling dat koude winters de kritieke factor waren. Later onderzoek toonde aan dat koude zomers de wereld een veel hardere duw in de richting van de ijstijden gaven, omdat de in de winter geaccumuleerde sneeuw weinig kans kreeg te smelten. Niettemin leverde het werk van Croll een verbluffend diepgaande analyse van een lange periode, die een nieuw onderzoeksterrein ontsloot – ongeveer zoals Arrhenius later

deed met zijn onderzoek aan de impact van veranderde kool-dioxideconcentraties op het klimaat.

Croll kreeg een paar medailles voor zijn theorie, maar omdat hij van lage komaf was en van nature zwijgzaam, vond hij nooit een plaats in de wetenschappelijk salons van zijn tijd. Ze waren hem en zijn ideeën gauw beu. De laatste tien jaar van zijn arbeidzame leven sleet Croll als landmeter en secretaris van de Schotse Geologische en Topografische Dienst in Edinburgh. Tot het laatst moment moest hij zijn research in zijn eigen tijd doen. Aan het eind van de negentiende eeuw waren Croll en zijn ideeën grotendeels vergeten. Zelfs Arrhenius, van wie geacht mag worden dat hij het werk van Croll begreep, wees het van de hand als een ongewenste rivaal voor zijn eigen ideeën, hoewel die ze, zoals we verderop zullen zien, in werkelijkheid aanvulden.

Tegenwoordig is het idee van astronomische invloeden op de vorming van ijskappen weer helemaal terug, en het zal ook wel niet meer weggaan. Bewijzen voor de juistheid ervan werden eindelijk, in de jaren 1970, geleverd. De Britse geofysicus Nick Shackleton voerde een nauwgezette isotopenanalyse uit van de sedimenten op de zeebodem, en kon daarbij de cycli van de ijstijden voldoende nauwkeurig dateren om het verband met astronomische gebeurtenissen te bevestigen. Maar de handboeken mogen dan herschreven zijn, Croll is grotendeels uit het verhaal verdwenen. De onregelmatigheden in de baan van de aarde die hij zo nauwgezet analyseerde staan nu algemeen bekend als de Milankovitch-parameters, genoemd naar Milutin Milankovitch, een kalende Servische wiskundige met een monocle, die de theorie van Croll in het begin van de twintigste eeuw nieuw leven inblies.

Hoewel Croll en Milankovitch voor de meesten bevredigend hebben aangetoond dat verstoringen in de baan van de aarde de aanjagers zijn van de ijstijden, verklaarden ze totaal niet hoe dat proces precies in zijn werk ging. Hoe kon een kleine verandering in de distributie van de zonnearmte uitver-

groot worden tot een wereldwijde bevrozing op een schaal die waarschijnlijk niet meer was vertoond sinds Sneeuwbal Aarde 600 miljoen jaar eerder was ontdooid? En waarom was het van de vele verschillende onregelmatigheden net die ene die om de 100.000 jaar terugkwam die zoveel invloed had op het wereldklimaat? Een onregelmatigheid bovendien die kennelijk minder effect had op de hoeveelheid zonnestraling die de aarde bereikte dan de andere. Het lijkt erop dat de aarde, in de woorden van Dan Schrag, een geochemicus van Harvard, 'krachtige ingebouwde versterkers heeft die de planeet hoogst gevoelig maken voor kleine invloeden van buitenaf'. Of, zoals Richard Alley zou zeggen, we hebben met een dronkenlap te maken. Het is belangrijk om die versterkers te identificeren, niet in de laatste plaats omdat daardoor een antwoord kan worden gegeven op de vraag hoe het klimaatsysteem van de aarde zou kunnen reageren op onze eigen bemoeienis.

Croll geloofde sterk in de kracht van het groeiende ijs om de koeling aan te jagen, en er zijn een heleboel aanwijzingen die de potentie van deze ijs-albedofeedback ondersteunen. Toen de sneeuw zich eenmaal begon op te hopen op de Canadese hooglanden rond Hudson Bay, had de ijskap de neiging op eigen kracht verder te groeien door het gebied eromheen af te koelen. Jim Hansen berekent dat op het hoogtepunt van de laatste ijstijd de totale hoeveelheid warmte die door het aardoppervlak werd geabsorbeerd met zo'n 4 watt per vierkante meter afnam. Wat de onderzoekers meer bezighield was hoe die afkoeling precies beperkt werd. Waarom trokken de ijskappen zich terug nadat ze ongeveer 21.000 jaar geleden hun grootste omvang hadden bereikt?

Gezien de kracht van de ijsalbedo-feedback is het verre van duidelijk waarom de ijskappen niet doorgingen met groeien totdat ze de hele aarde bedekten en voor een comeback zorgden van Sneeuwbal Aarde. Zelfs een verandering in de aardbaan die de verandering in de seizoenen kon opheffen waardoor het ijs was ontstaan, zou wel eens niet voldoende

kunnen zijn. En in elk geval kan geen enkele hobbel in de aardbaan de uiterst snelle teloorgang van de ijskappen aan het eind van de laatste ijstijd verklaren.

Er moeten snelle feedbacks aan het werk zijn geweest. Eén mogelijkheid is dat de ijskappen niet verder konden groeien omdat ze al zo groot waren en daardoor snel afbraken. De hoofdtheorie is dat ijskappen kwetsbaar zijn voor warmte uit het binnenste van de planeet. Die onderaardse warmte is gering vergeleken met die van de zon, maar opgesloten onder het ijs werd die met het groeien van de ijskappen steeds belangrijker. Uiteindelijk, zo wil de theorie, werd een drempel overschreden en smolten de ijskappen aan hun basis, waardoor een gigantische, continentbrede versie ontstond van Hansens 'glijbaan', met grote brokken ijs die naar de zee schaatsten.

De tweede feedback die een hobbel in de aardbaan in een ijstijd omzette werd geleverd door de broeikasgassen. Iemand die mocht twifelen aan de rol van kooldioxide in het opwarmen en afkoelen van de aarde moet maar eens naar de grafieken kijken van atmosferische temperaturen en kooldioxideconcentraties in ijskernen van de Groenlandse en Antarcticaanse ijskappen. Die bestrijken de afgelopen half miljoen jaar, een periode waarin verschillende ijstijden voorkwamen. De twee curves volgen elkaar over de hele lengte. Naarmate de concentraties kooldioxide minder werden, daalde ook de temperatuur, en omgekeerd. Dat zegt niets over oorzaak en gevolg, maar het toont wel duidelijk aan dat ze in een intieme dans verwickeld waren, waarbij de kooldioxide de temperatuurveranderingen zo niet initieerde dan toch zeker versterkte.

Naarmate de temperatuur daalde aan het begin van elke ijstijd, verdween rond de 200 miljard ton koolstof uit de atmosfeer. Dezelfde hoeveelheid keerde weer terug tijdens de korte interglacialen. Het verdwijnen van de koolstof was voldoende om de opname van zonnewarmte door de aarde rechtstreeks met ongeveer 2 watt per vierkante meter te

verminderen. Maar wat bracht deze grote verandering in de koolstofkringloop van de aarde op gang en waar bleef de koolstof? Hij ging zeker niet in de planten op het land zitten, want daarvan kwamen er steeds minder naarmate de wereld afkoelde. Het voor de hand liggende antwoord is: de oceanen. Er zit op dit moment zo'n 40 biljoen ton koolstof in het zeewater – vijftig keer zoveel als in de atmosfeer. Dus een geringe opname van koolstof door de oceanen kan een enorm effect hebben gehad op de atmosfeer.

Hoe? Hier moeten we de natuurkunde te hulp roepen. In koud water (zolang het nog niet bevroren is) lost kooldioxide beter op dan in warm water. Maar de meeste wetenschappers denken dat er ook een meer dynamische feedback bij kwam kijken, en volgens Gaia is dat het leven. Eén verklaring is dat de aanvankelijke afkoeling de oceanen biologisch productiever maakte. Plankton, de weidegronden van de oceaan, houdt van lage temperaturen. Dat is de reden waarom de Zuidzee rond Antarctica op dit moment een van de productiefste oceanen op aarde is. Met het groeien van het plankton werd meer kooldioxide uit de atmosfeer opgenomen, en dat aanzwengelen van de biologische pomp zal waarschijnlijk nog versterkt zijn door stofstormen als gevolg van krachtiger winden en groeiende woestijnen, waardoor meer mineralen in het zeewater terecht kwamen. Ook nu nog zijn mineralen zoals ijzer de beperkende factor in de vruchtbaarheid van een groot deel van de voedselketen in de oceaan.

Er kunnen ook andere feedbacks geweest zijn die de aarde de ijstijden in en uit dreven. Methaan kan belangrijk geweest zijn. De concentratie methaan in de atmosfeer houdt kennelijk op even rigide wijze gelijke tred met de temperatuur als die van kooldioxide. Een waarschijnlijke verklaring is dat de droge ijstijden zorgden voor verdroging van de draslanden, waardoor hun uitstoot van methaan verminderde. Een lagere temperatuur betekent ook minder waterdamp in de atmosfeer, en ook dat zal de afkoeling hebben versterkt.

Een laatste versterkende factor kan de oceaanstroming zijn geweest, met zijn enorme vermogen om warmte over de planeet te verdelen. Er zijn sterke aanwijzingen dat het circulatiesysteem vertraagde in de ijstijden en dat het misschien op het koudste punt helemaal stilstond. Dit is het domein van een van de legendarische figuren in het klimaatdebat, Wally Broecker, en we zullen er in het volgende hoofdstuk op terugkomen.

Op grond van studies van de ijstijden kunnen we zeggen dat het natuurlijke klimaatsysteem twee toestanden heeft gekend waar het voortdurend naar terugkeerde. De ene is glaciaal en de andere is interglaciaal. De glaciale toestand (ijstijd) heeft een atmosfeer met rond de 400 miljard ton kooldioxide, en de interglaciale toestand heeft een atmosfeer met ongeveer 600 miljard ton kooldioxide. De aarde oscilleert regelmatig en snel tussen die twee toestanden. Maar in tussentoestanden blijft hij nooit lang hangen.

De data, zegt Berrien Moore III, directeur van het Institute for the Study of the Earth, Oceans and Space van de University of New Hampshire, 'wijzen op een strak in de hand gehouden controlesysteem met duidelijke limieten'. Er moeten wel negatieve feedbacks zijn om alle kleine verstoringen terug te duwen naar de vorige positie. Maar er moeten ook krachtige positieve feedbacks zijn. Als de zaak eenmaal te ver is doorgeschoten en een verborgen drempel wordt overschreden, dan drukken die positieve feedbacks het systeem naar de stabiele toestand de andere kant op. En elke keer schijnt dat sturende feedbackmechanisme 200 miljard ton kooldioxide van de atmosfeer naar de oceaan en vice versa te hebben verplaatst.

Zo schijnt het de afgelopen 2 miljoen jaar te zijn gegaan. Tot nu. Voor het eerst in een hele lange tijd wordt het systeem voorbij die grenzen gedrukt. In pakweg de afgelopen eeuw is door menselijk handelen nog eens 200 miljard ton kooldioxide in de atmosfeer gepompt, bovenop de hoge con-

centratie van de interglaciale toestand. De atmosfeer bevat nu ongeveer 800 miljard ton kooldioxide, twee keer zoveel koolstof als tijdens de laatste ijstijd en een derde meer dan in de laatste interglacialen, inclusief de meest recente. En we voegen er elk jaar verscheidene miljarden tonnen aan toe. Die extra koolstof in de atmosfeer maakt geen deel uit van recente natuurlijke kringlopen. Die komt voor het merendeel van fossiele brandstoffen, dat wil zeggen de overblijfselen van moerassen en bossen die tientallen miljoenen jaren geleden vergingen.

We bevinden ons op onbekend terrein. En de grote vraag is: hoe zal het systeem reageren op deze enorme injectie? Waar zal die koolstof uiteindelijk belanden? Naar het schijnt zijn er drie mogelijkheden. Ten eerste, hopen sommige optimisten, kan het systeem negatieve feedbacks aanwenden om die verandering het hoofd te bieden. Misschien dat een geaccelereerde biologische pomp in de oceanen de koolstof uit de atmosfeer haalt. Het is mogelijk. Maar de oceanen hebben het over het algemeen liever koud. En er is nog geen enkel teken van dat soort negatieve feedbacks te bespeuren, en er is ook geen duidelijke reden waarom ze in actie zouden komen. Dit is 'nieuwe koolstof' waar het systeem geen ervaring mee heeft.

De tweede mogelijkheid is wat de meeste klimaatmodellen voorspellen, en wat ook de wetenschappelijke consensus van het IPCC is. Die houdt in dat het systeem normaal blijft functioneren en de koolstof geleidelijk aan opneemt en de temperatuur gaandeweg verhoogt. Er zijn geen abrupte drempels die het systeem plotseling in een nieuwe toestand brengen. Dat is een vrij bemoedigend vooruitzicht, en het is in overeenstemming met de standaard computermodellen, maar het is wel in tegenstelling met de manier waarop de aarde in de afgelopen 2 miljoen jaar heeft gefunctioneerd.

En daarmee komen we op een derde mogelijkheid. Veel aardwetenschappers vinden dat hun collega's klimatologen nog niet doorhebben hoe het aardsysteem werkt. Ze zijn

bang dat we dicht bij een drempel zitten waar voorbij krachtige positieve feedbacks in werking treden, zoals ook gebeurt wanneer de aarde in en uit een ijstijd gaat. Het zou kunnen dat de feedbacks het systeem in een nieuwe, tot nog toe onbekende toestand brengen. Hoogstwaarschijnlijk is dat een toestand met veel hogere atmosferische concentraties kool-dioxide en methaan – ongeveer zoals in de begintijd van de planeet aarde. De weg daar naartoe gaat misschien gepaard met een reusachtige uitstoot van koolstof die nu nog in de grond zit, of met enorme methaanschetten uit de zeebodem, of veranderingen op grote schaal in de oceaanstromingen, of een op hol geslagen afsmelting van de ijskappen. Dat is echter gissen. We weten het eenvoudig niet. Maar hou je vast: het zou wel eens een hobbelige rit kunnen worden.

23 De oceanische transportband

De echte day after tomorrow

Wally Broecker is een buitenbeentje – een wonderbaarlijke, onverschrokken ideeënmachine die al een halve eeuw een van de meest invloedrijke klimatologen is. Soms is hij zelfs meer dan dat. Naast bewondering voor zijn wetenschap worden er ook vaak harde woorden over hem geuit in de wetenschappelijke gemeenschap. Een bullebak, zeggen sommigen, vooral tegenover jonge wetenschappers, een man die zijn invloed gebruikt om ideeën te onderdrukken waar hij het niet mee eens is. Voor een man van in de zeventig gaat hij er in elk geval hard tegenaan, en hij zoekt de confrontatie. Hier volgt zijn ongevraagde commentaar op een van de belangrijkste Amerikaanse klimatologen, die de toorn opwekte van een paar Republikeinse senatoren: ‘Ik vind dat die senatoren hun boekje ver te buiten gingen, maar als iemand klappen verdient, dan is hij het wel. Die gozer verkoopt gladde praatjes en hij is heel erg zeker van zijn zaak. Hij luistert naar niemand. Ik vertrouw dat soort mensen niet. Zijn data zijn vaak shit, weet je. Die voldoen gewoon niet voor wat ie wil bewijzen.’

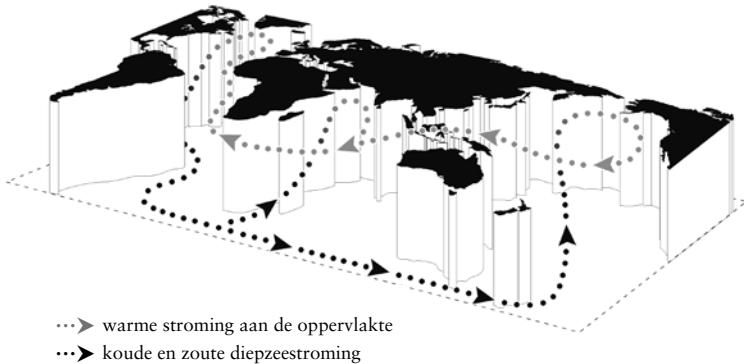
Broecker is niet iemand die je als vijand moet hebben. En om eerlijk te zijn heb ik even getwijfeld of ik dit wel zou opschrijven. Ik hou wel van dat doordouwerige van hem, maar ik zou niet graag door hem onder schot worden genomen. Sommigen vinden dat hij het recht verdiend heeft om af te geven op jonge collega's van wie hij vindt dat ze beneden de maat zijn. Anderen maken zich zorgen dat Broecker zijn gram lijkt te reserveren voor mensen die op hem lijken toen hij nog jong was. Maar hij heeft haast. Toen ik hem eind 2005 ontmoette in het Lamont-Doherty Earth Observatory

van Columbia University in New York, was zijn eminente vriend en collega Gerard Bond, een man die tien jaar jonger was dan hij, net overleden.

Broecker is een geochemicus met een smetteloze staat van dienst. Hij was de wegbereider van de isotopische analyse, waarmee de oceaanstromingen in kaart werden gebracht. Al meer dan dertig jaar schrijft en denkt hij over wat hij de 'oceanische transportband' noemt en wat traditioneel de 'meridionale omslagcirculatie' of 'thermohaline circulatie' heet. Maar hoe je het ook noemt, het is de moeder van alle oceaanstromingen, een duizendjarige kringloop met 'een watterverplaatsing gelijk aan honderd Amazonerivieren,' zoals hij zegt.

De transportband begint met een krachtige noordelijke stroming, de Golfstroom, die warm, zout water van het zuiden van de Atlantische Oceaan door de tropen naar het verre noorden voert. In het noorden van de Atlantische oceaan koelt het water af, vooral in de winter, als gevolg van de snijende wind die van het Canadese vasteland en Groenland aan komt waaien. Door die afkoeling stijgt de dichtheid van het water, een proces dat nog versterkt wordt door ijsvorming, dat zoetwater aan de zee onttrekt, waardoor het achtergebleven zeewater nog zouter en dus zwaarder wordt. Uiteindelijk zinkt het zwaardere water naar de zeebodem, doorgaans op twee plekken: een ten westen van Groenland in de Labradorzee en de andere ten oosten van Groenland door de verticale schoorsteen van Peter Wadhams. Vandaar begint het aan een reis zuidwaarts over de zeebedding naar het uiterste zuiden van de Atlantische Oceaan, waar het gezelschap krijgt van een stroming koud zout water dat rondom de Zuidpool naar de zeebodem zakt. Daarna gaat de transportband oostwaarts door de Indische en Stille Oceaan, om na pakweg duizend jaar in het zuiden van de Atlantische Oceaan weer aan de oppervlakte te komen en weer noordwaarts te stromen in de vorm van de Golfstroom, die vervolgens weer in de Noordelijke IJszee naar de bodem zinkt.

De stroming heeft velerlei functies. Hij brengt warm water van de tropen naar de poolstreken, mengt het zeewater en zorgt mede voor uitwisseling van kooldioxide tussen de atmosfeer en de oceanen. In de woorden van Richard Alley: 'hij maakt het mogelijk dat Europeanen rozen kunnen kweken op een plek die noordelijker ligt dan waar Canadezen ijsberen tegenkomen'. Op het eerste gezicht houdt de stroming zichzelf in stand. Doordat rond Groenland zeewater naar de bodem zakt, wordt het water van de Golfstroom naar het noorden gezogen, en dus zakt er nog meer water naar de zeebodem. Maar het is ook een driftig beest dat nogal eens abrupt aan en uit schakelt. Dat schakelen, zegt Broecker, is een vitale component van het klimaatstelsel. Niet iedereen is het eens over hoe die schakelaar precies werkt en hoe belangrijk hij is, maar wat hij erover vertelt klinkt overtuigend.



Een 'logo voor klimaatverandering': Broeckers diagram van de oceanische transportband die oppervlaktewater van de Noordpool op een duizendjarige onderzeese odyssee stuurt, en die weer aan de oppervlakte komt in de vorm van de Atlantische Golfstroom die Europa opwarmt. Het schijnt dat de transportband abrupt aan en uit wordt geschakeld en daarmee het klimaat van de aarde kan bepalen.

Het beeld dat Broecker van de oceanische transportband schetst is ontwapenend simpel. Te simpel, volgens sommigen. Hij geeft toe dat het idee oorspronkelijk komt van een schetsje. Toen het tijdschrift *Natural History* hem vroeg een diagram te tekenen als illustratie bij een ingewikkelde redenering over oceaanstromingen, tekende hij een kaart met een paar pijltjes waarmee hij waarschijnlijke 'rivieren' van intense stroming binnen het circulatiesysteem aangaf. 'Dat stuurden ze door naar een illustrator, die tekende iets en ik bracht een paar correcties aan. Ik besepte niet dat het zo belangrijk zou worden, maar het was een populair tijdschrift en ineens werd het diagram een soort logo voor klimaatverandering.'

Broecker ontkent het ruwe karakter van de schets niet. Veel wetenschappers zouden zich ervan gedistantieerd hebben, maar hij ziet de kracht ervan in en heeft de afbeelding juist naar zich toe gehaald. Hij stamt uit Broeckers pionierswerk op het gebied van chemische tracers, waarmee waterverplaatsingen in de oceanen kunnen worden getraceerd. Het water in de Stille en Indische Oceaan leek een mengsel van water dat naar de diepte was gezakt aan de Noordpool en in mindere mate rond de Zuidpool. Broecker merkte ook op dat het water diep in de noordelijke Atlantische Oceaan hetzelfde was als het water dat kort daarvoor met de Golfstroom naar het noorden was gestroomd. De rest vulde hij grotendeels zelf aan. 'De transportband is reëel, dat is wel duidelijk,' zegt hij. 'Maar natuurlijk is hij niet zo strak georganiseerd als het diagram suggereert.' Het is meer een trend dan een stroming, 'een combinatie van willekeurige bewegingen.' En toch is zijn ruwe schets een van de belangrijkste klimatologische diagrammen van de afgelopen kwarteeuw.

Hij koos de term 'transportband' omdat, zegt hij, 'namen volgens mij heel belangrijk zijn, en die naam was veel beter dan de correcte wetenschappelijke term. Sommige wetenschappers vinden hem idioot, maar voor leken is een transportband veel makkelijker voorstelbaar.' Broecker heeft in het algemeen de gave van het woord: hij was de eerste weten-

schapper die de term *global warming* ('opwarming van de aarde') gebruikte, in een artikel uit de jaren 1970.

Ik ontdekte de transportband voor het eerst aan het eind van de jaren 1980, toen ik research deed voor een boek over veranderingen in het milieu. Ik raakte geboeid door de eenvoud van het idee, door het feit dat de transportband wel eens twee toestanden zou kunnen kennen: aan en uit. En door de beangstigende mogelijkheid dat de klimaatverandering de transportband uit zou kunnen zetten wanneer het water voor de kust van Groenland zo overspoeld raakte met zoetwater dat de dynamiek van de vorming van dicht zout water rond de schoorstenen verstoord werd. Voor mij was dat idee de eerste echte aanwijzing dat het karakter van de klimaatverandering wel eens heel anders zou kunnen zijn dan in de mainstream modellen werd voorgesteld – dat het broeikaseffect wel eens iets veel ergers zou kunnen ontketenen.

In het begin deed Broecker vaak aarzelend over de mogelijkheid van natuurrampen. Maar in 1995 voelde hij zich zeker genoeg om op een grote klimaatconferentie een lezing over de transportband de titel te geven: 'Abrupte klimaatverandering: zit er een in de broeikas verstoopt?' In die lezing legde hij uit dat data van de zeebodem en van sedimenten in meren, van ijskernen, koralen en gletsjers, 'ondubbelzinnig aantonen' dat het aan- en uitschakelen van de oceanische transportband aan het begin en eind van de laatste ijstijd plaatsvond. Het idee was dat de uitschakeling van de transportband dé factor was die de ijstijd inluidde door de temperatuur met '4 graden C of meer te verlagen... vaak binnen de tijd van één generatie' – een bewering die hij korte tijd later, in een artikel in *Scientific American*, opblies tot '10 graden C in tien jaar tijd'.

Het beeld dat Broecker schetst is dat van een krachtige maar wispelturige oceanische transportband met een aan/uit-schakelaar in de Noordelijke IJszee. Als hij aan staat, warmt hij de wereld op, vooral het noordelijk halfrond, en

dat is kenmerkend voor de perioden tussen de ijstijden. Als hij is uit staat, koelt hij het noordelijk halfrond af en dat is typisch voor de ijstijden. Maar ook op andere tijden flakkert het systeem aan en uit, zegt hij. Het heeft voor warme episoden gezorgd midden in de laatste ijstijd en is waarschijnlijk ook de oorzaak achter meer recente klimaatgebeurtenissen, zoals de middeleeuwse warme periode en de kleine ijstijd in Europa. Broecker erkent dat de ultieme oorzaak voor deze dramatische veranderingen wellicht in astronomische verschijnselen ligt, zoals de trage cycli van Milankovitch. Maar als eenmaal een drempel is overschreden en er een plotselinge klimaatverandering optreedt, dan is het de transportband die de knop omdraait.

Dat zijn nog steeds zeer omstreden claims. De meeste wetenschappers willen wel toegeven dat Broecker gelijk heeft met zijn bewering dat de oceanische transportband in de ijstijden vertraagde en misschien op sommige punten helemaal stopte, maar ze denken dat dat een gevolg en niet de oorzaak was van de ijstijden. De grote krachten achter de afkoeling, zeggen ze, waren de opname van kooldioxide door de oceanen en de groei van het ijs. Hoe belangrijk de oceanische transportband in die processen was, moet nog worden aangetoond. Hij kan de afkoeling hebben geïntensiveerd in de noordelijke Atlantische Oceaan, waar iedereen weet dat de Golfstroom een belangrijke factor is die het gebied warm houdt, maar het is lang niet duidelijk dat de wereldwijde effecten zo groot zijn als Broecker claimt.

Broecker laat zich echter zelden van de wijs brengen door details. Twee jaar nadat hij zijn beweringen had gedaan over de oceanische transportband en de ijstijden – en net een week voor het Kyoto Akkoord in Japan – waarschuwde hij dat de klimaatverandering de transportband in de toekomst zou kunnen uit zetten. ‘Er is een reële mogelijkheid dat de toename van broeikasgassen weer voor zo’n reorganisatie van de oceaanstromingen kan zorgen,’ zei hij. En als dat gebeurt, zou ‘Dublin in tien jaar tijd, of minder, het klimaat van Spits-

bergen hebben... de gevolgen zouden vernietigend zijn.' Hij noemde de oceanische transportband de 'Achilleshiel van het klimaatsysteem'.

Ik denk dat Broecker meer wil met zijn uitspraken. Hij wil dat we anders gaan denken over de aarde. Klimaatsystemen, zo wil hij zeggen, werken ongeveer zoals Stephen Jay Gould zei dat de evolutie werkt: niet geleidelijk door middel van toenemende veranderingen, maar met plotselinge sprongen. De term van Gould, 'hortend evenwicht', is precies van toepassing voor de klimaatwereld van Wally Broecker. En zijn nieuwe paradigma past ook in de chaostheorie, volgens welke zijn oceanische transportband een 'emergente eigenschap' is van het totale aardsysteem.

Maar de crux in het debat over de oceanische transportband van Broecker blijft de simpele vraag: kan de opwarming van de aarde de transportband uitschakelen? Het schijnt dat Broecker zelf daar nooit aan heeft getwijfeld. En zijn bewering lijkt de afgelopen jaren haast een eigen leven te zijn gaan leiden. Dat drong het sterkst tot me door op een conferentie in 2005 over 'gevaarlijke' klimaatverandering in het Britse Hadley Centre for Climate Prediction in Exeter. Daar ontmoette ik Michael Schlesinger van de University of Illinois in Urbana-Champaign, een jongeman met de kleren en het kapsel van een nozem uit de jaren 1950. Hoewel er in Exeter ernstig aan getwijfeld werd of zijn smaak ooit weer in de mode zou komen, er was niet de geringste twijfel aan de indruk die zijn ideeën over klimaatverandering maakten.

Al meer dan tien jaar betoogt Schlesinger, net als Broecker, dat het uitschakelen van de oceanische transportband wel eens heel wat dichterbij zou kunnen zijn dan de mainstream klimatologen denken. Sommige critici vonden dat hij gewoon niet wist wanneer hij moest ophouden en met iets anders verdergaan. Maar hij bleef op zijn stuk en bekritiseerde het IPCC en zijn modellen omdat ze systematisch een reeks heel plausibele 'doemscenario's' uitsloten. 'Het probleem

met streven naar een consensus is dat alle interessante ideeën worden weggemoffeld,' zei hij. Wetenschap bij meerderheid van stemmen elimineert alles wat kwaliteit heeft – zoals het idee van de uitschakeling van de transportband. Maar in Exeter won Schlesinger weer het pleit. Hij was uitgenodigd om zijn model te presenteren waarin een opwarming van de aarde met slechts 2 graden C de Groenlandse ijskap zo snel zou doen smelten dat de oceanen overspoeld werden met zoet water en de transportband zou worden uitgeschakeld. Het risico, zei hij, was 'onaanvaardbaar groot'.

Hoewel hij dat al tien jaar riep, werd hij nu als mainstream genoeg beschouwd om naar de andere kant van de Atlantische Oceaan te worden uitgenodigd en zijn ideeën uiteen te zetten op een conferentie georganiseerd door de Britse overheid. En hij stond niet langer alleen. Later die dag zei Peter Challenor van het British National Oceanography Centre in Southampton dat hij zijn eigen schatting van de kans op een uitschakeling van de transportband had verlaagd van 1 tegen 30 naar 1 tegen 3. Hij schatte dat een opwarming van 3 graden van Groenland de zaak zou klaren. Gezien de snelheid waarmee Groenland nu opwarmt lijkt dat een overdonderende zekerheid.

Het zijn echter allemaal maar modellen. Wat voor aanwijzingen zijn er in de oceaan over de toestand van de transportband? De waarheid is dat er zich al gevaarlijke veranderingen voordoen in de noordelijke Atlantische Oceaan. En hoe groot de scepsis ook mag zijn over de verreikende claims van Broecker, de transportband zou al wel eens in grote moeilijkheden kunnen verkeren. Sinds het midden van de jaren 1960, zegt Ruth Curry van het Woods Hole Oceanographic Institution in Massachusetts, is het zeewater in het hoge noorden voor de kust van Groenland, waar de eenzame schoorstenen van Wadhams water naar de bodem van de oceaan sturen en de transportband van Broecker op gang houden, significant zoeter geworden.

Die ontwikkeling vond grotendeels al in de jaren 1960 plaats, toen ongeveer 10.000 kubieke kilometer zoetwater uit de poolstreek door de Fram Straat in de Atlantische Oceaan stroomde. Oceanografen noemden die gebeurtenis de Grote Zoutanomalie. Tot op de dag van vandaag weet niemand precies waarom dat gebeurde. Het zou kunnen dat een groot stuk van de Groenlandse ijskap afbrak, of dat zeeijs in een ongebruikelijk circulatiepatroon raakte, of door een toegenomen uitstroom van de grote rivieren in Siberië, zoals de Ob en de Yenisei. Gelukkig bleef het zoetwater niet te lang hangen en stroomde snel zuidwaarts de noordelijke Atlantische Oceaan in. Slechts 4000 kubieke kilometer bleef achter. Curry kwam in zijn studie van het fenomeen, in juni 2005 in *Science* gepubliceerd, tot de conclusie dat 9000 kubieke kilometer voldoende zou zijn geweest om de transportband 'substantieel te vertragen', en het dubbele van die hoeveelheid 'zou hem praktisch kunnen stilleggen'. Dus het was kantje boord.

Nu het water in de noordelijke Atlantische Oceaan grotendeels zoeter is dan aan het begin van de jaren 1960 blijft het uitkijken met de transportband. Nog zo'n guts zoetwater kan op elk moment desastreus zijn. In de komende decennia zou een combinatie van toegenomen neerslag, een toegenomen afwatering van het land rondom de Noordpool, of een snellere smelting van het ijs de transportband uit kunnen schakelen. En dan is er geen weg terug meer, want de modellen zeggen dat hij niet makkelijk meer aan te zetten is als hij eenmaal uit staat. Zoals Broeckers collega Peter deMenocal zegt: 'een omschakeling in de oceanische transportband is, eenmaal in gang gezet, onomkeerbaar voor een periode van tientallen jaren of eeuwen. Dat zou een blijvende verandering betekenen voor de klimaatgemiddelden van een aantal van de dichtstbevolkte en meest ontwikkelde gebieden van de wereld.'

Eind 2005 werden de resultaten bekend van nieuw onderzoek dat de risico's en de gevaren van de transportband nog

eens dramatisch onderstreepte. Harry Bryden van het National Oceanography Centre in Southampton had een hele lijn meetboeien in de Atlantische Oceaan gelegd, van de Canarische Eilanden tot de Bahama's, en was tot de bevinding gekomen dat de Golfstroom sinds het midden van de jaren 1990 met 30 procent was afgenomen. Er stroomde minder warm water aan de oppervlakte naar het noorden en er kwam minder koud water over de oceaانبodem terug naar het zuiden. Dat was, voorzover iemand wist, een gebeurtenis zonder precedent.

Na een gedetailleerdere analyse van het water kwam Bryden tot de ontdekking dat het 'diepe water' van de Labradorzee ten westen van Groenland nog steeds naar het zuiden leek te stromen. Maar de hoeveelheid diep water die zuidwaarts stroomde van de Groenlandzee, de plaats van Wadhams schoorsteen, was met de helft afgenomen. De implicatie was duidelijk: het verdwijnen van de schoorstenen, waar Wadham zo wanhopig getuige van was geweest, hinderde inderdaad de oceanische circulatie.

Dat alles toonde niet het gelijk van Broecker aan met zijn sombere voorspellingen van wat er gebeurt als de transportband stil komt te liggen. Dat het 'in Londen in de winter even koud zou worden als in Irkoetsk'. 'Meer iets als de kleine ijstijd', was het ergste wat de meeste klimatologen vreesden. Vervolgens kwam er recent bewijs boven water dat de stromingen meer fluctueren dan men dacht en dat Bryden misschien eenvoudig de 'ruis' in het systeem heeft gemeten. Maar de mogelijkheid blijft bestaan dat sommige ideeën van Broecker binnenkort toch nog uitkomen.

24 Een arctische bloem

Aanwijzingen voor een klimaatomslag

Het moet aangevoeld hebben als een wereldlente. De mens die 13.000 jaar geleden op aarde leefde moet zich opgetogen hebben gevoeld. Er kwam een einde aan 80.000 jaar ijstijd. De temperatuur steeg, het ijs smolt, rivieren stroomden en de permafrost maakte in heel Europa en Noord-Amerika plaats voor bossen en weidegronden. In de Atlantische Oceaan bracht de Golfstroom weer tropisch water naar het noorden en zette een oceanische circulatie in werking die op het diepste punt van de ijstijd helemaal was stilgelegd. Westenwinden die over de oceaan bliezen namen de warmte op en verdeelden hem over het continent, tot diep in Azië.

Tegelijkertijd krompen de woestijnen in de tropen en breidden de regenwouden zich weer uit vanaf de plaatsen waar ze zich in de ijstijd hadden teruggetrokken. De Aziatische moesson startte weer op. Het meest spectaculaire was dat de Sahara barstte van leven en bedekt was met vegetatie en grote meren. Het was de dageraad van het tijdperk van de *Homo sapiens*, die in de lange ijstijd in de plaats was gekomen van de laatste Neanderthalers. Als er onder hen een Charles Keeling was geweest, zou hij zeker de toenemende concentraties kooldioxide en methaan in de lucht hebben gemeten die de dooi versterkten. Misschien zou hij er zelfs de term *global warming* voor hebben bedacht.

Toen gebeurde het ondenkbare: het hele zaakje keerde weer om. Vrijwel van de ene op de andere dag hield de dooi op. De temperatuur zakte weer naar het koudste niveau van de ijstijd. De bossen die in de noordelijke streken waren gegroeid werden weggevaagd, de permafrost breidde zich uit

en de ijskappen en gletsjers wonnen hun verloren terrein terug.

De optimisten in de Steentijd hadden natuurlijk beter moeten weten. Als ze terug hadden kunnen kijken naar de voorafgaande 5000 jaar, dan hadden ze gezien dat het klimaat in een omslag zat. 18.000 jaar geleden was de ijstijd nog op zijn hoogtepunt. 16.000 jaar geleden warmde de aarde sterk op. Maar 15.000 jaar geleden werd het weer kouder en kwamen de ijskappen terug. 14.500 jaar geleden werd het zo warm dat de ijskappen binnen 400 jaar zover afsmolten dat de zeespiegel 20 meter steeg. Uiteindelijk kreeg de kou echter weer de overhand, om vervolgens plaats te maken voor de geprononceerde opwarming van 13.000 jaar geleden, waar 12.800 jaar geleden weer abrupt een einde aan kwam.

Die uitzonderlijke klimaatgeschiedenis kunnen we zien in het ijs dat uit de kappen van Groenland en de Zuidpool is geboord. Grafieken van het temperatuurverloop in die tijd lijken op de seismische curven van een aardbeving, of op het monitorsignaal van een hartaanval. Ze tonen een klimaatstelsel dat langdurig de stuipen heeft. Achteraf gezien herkennen we daarin de doodsstuipen van de ijstijd. Maar alleen achteraf. Destijds waren er weinig tekenen dat het klimaatstelsel überhaupt ergens heen ging. Het schoot heen en weer tussen ijstijd en interglaciaal. Het enige wat het niet deed was de gulden middenweg kiezen.

De laatste grote 'kouklap' van de ijstijd, 12.800 jaar geleden, wordt tegenwoordig het Jonge Dryas genoemd. De dryas is een witte arctische roos met een geel hart die plotseling terugkeerde in de Europese sedimenten toen de oude kou weer de overhand kreeg. Het tijdperk staat bekend als het Jonge Dryas om het te onderscheiden van het Oudere Dryas, de klimaatomslag van duizend jaar eerder, en het Oudste Dryas, dat daarvoor kwam. Het Jonge Dryas verliep snel en dramatisch, net als de andere twee. In ongeveer een generatie tijd kelderde de temperatuur op het noordelijk halfrond. De daling was

misschien maar 2 tot 3 graden C in de tropen, maar verder naar het noorden was die gemiddeld 16 graden. En volgens de ijskernen, geanalyseerd door George Denton van de University of Main, was de temperatuur in de winter gemiddeld 30 graden lager in Scoresby Sound in Oost-Groenland.

Maar niet alleen de temperatuur sloeg op hol. Geologische gegevens over stofwoestijnen in China en meren in Afrika en tropische passaatwinden en Zuid-Amerikaanse rivierstromen en Nieuw-Zeelandse gletsjers wijzen er allemaal op dat er zich 12.800 jaar geleden dramatische veranderingen voltrokken die gelijke tred hielden. De aarde was veel droger, winderiger en stoffiger. En op het zuidelijk halfrond gingen de temperaturen misschien wel precies de andere kant op. Boorkernen van zeesedimenten tonen een sterke opwarming in de zuidelijke Atlantische en Indische Oceaan – net zoals de temperaturen in de meeste ijskernen van de Zuidpool.

De ijstijd van het Jonge Dryas duurde zo'n vijftig generaties, 1300 jaar. Je kunt je voorstellen dat de stammen van de *Homo sapiens* wanhopig hun best deden de vaardigheden weer aan te leren die hun voorouders door de ijstijden heen hadden geholpen. Maar misschien gaf de klimaatomslag ook een prikkel tot innovatie. Sommigen denken dat het droge klimaat in het Midden-Oosten destijds de stoot heeft gegeven tot de kweek van de eerste landbouwgewassen en de domesticatie van dieren.

En toen eindigde de vrieskou, de temperatuur keerde nog sneller terug naar het vorige niveau dan hij was gedaald. De analisten van de Groenlandse ijskernen aarzelen niet om te zeggen dat de opwarming binnen tien jaar tijd zijn beslag moet hebben gekregen. Nauwkeuriger kunnen ze het aan de ijskernen niet aflezen. Richard Alley, die erbij was toen de ijskernen werden onderzocht, zegt: 'Het grootste deel van die omslag ziet eruit of het in één jaar tijd gebeurde. Misschien was het wel minder, misschien maar één jaargetijde. Het was echt een heel gekke tijd.' Net als in de film *The Day After Tomorrow*, alleen omgekeerd.

Dat is allemaal dubbel zo vreemd omdat de afkoeling van het Jonge Dryas dwars tegen de langetermijntrends van de planeet inging. De onregelmatigheden in de baan van de aarde die de ijstijd hadden ingeluid waren inmiddels afgevlakt, en de astronomische krachten drukten de aarde naar het volgende interglaciaal. Natuurlijk werd het echte werk gedaan door feedbacks, zoals het smeltende ijs, de terugkeer van broeikasgassen zoals kooldioxide en methaan in de atmosfeer en het weer opstarten van de oceanische transportband. Die feedbacks zorgden er in elk geval voor dat de overgang niet geleidelijk maar schokkend verliep. Maar ze zouden niet gauw de richting van de overgang hebben kunnen veranderen. Dus waarom die teruggang? Wat maakte dat het klimaat terugviel in de ijzige afgrond toen alle krachten en alle feedbacks de wereld juist naar een warmere periode hadden moeten drijven?

De chaostheorie kan hierbij helpen. Alley zegt dat juist in een tijd wanneer de omstandigheden het snelst veranderen de ogenschijnlijk willekeurige, onverwachte en abrupte veranderingen in welke richting dan ook de meeste kans krijgen. Het systeem is in de war en kwetsbaar. De dronkaard is aan de wandel. En er is een redelijke kans dat sommige van die abrupte veranderingen de andere kant op gaan dan verwacht. Dat is wat Alley in de slimme ondertitel van zijn rapport uit 2001 'onvermijdelijke verrassing' noemde. Het is ook duidelijk dat in die tijd het klimaatsysteem van de aarde maar twee mogelijke toestanden kende: ijstijd of interglaciaal. Er was geen derde manier. Dus gedurende de duizenden jaren dat het op de wip zat tussen die twee, schoot het van de ene toestand in de andere.

Eén element dat aan de grond een rol speelde was een plotselinge omschakeling in de oceanische transportband van Broecker. Tijdens de warme periode daarvoor was hij aangezet, maar tijdens het Jonge Dryas sloeg hij weer af. Het zou te ver gaan om te zeggen dat dit bewijst dat de oceanische transportband de grote klimaatschakelaar is zoals Broecker

beweert, maar het bewijst wel dat gebeurtenissen in het hoge noorden van de Atlantische Oceaan, zonder enige hulp van astronomische krachten, dramatische langetermijneffecten kunnen hebben op het wereldklimaat.

Het onverwachte schakelen van de oceanische transportband werd vrijwel zeker veroorzaakt door smeltend ijs. In de laatste millennia van de ijstijd, toen het smelten van de ijskappen met horten en stoten en soms spectaculair verliep, werd een enorme hoeveelheid zoetwater geproduceerd. Vaak stroomde dat niet direct in zee maar vormde reusachtige meren. Het grootste daarvan wordt het Agassiz Meer genoemd, naar de ontdekker van de ijstijden. Het strekte zich ruim duizend kilometer uit over een breed gebied in het middenwesten van Noord-Amerika, van Saskatchewan tot Ontario, Canada en de Dakota's tot Minnesota in de Verenigde Staten, en het breidde zich uit met het oprukkende warmtefront.

In de beginstadia van de deglaciatie waterde het meer naar het zuiden af, via de Mississippi, in de Golf van Mexico. Maar 12.800 jaar geleden schijnt er iets te zijn gebeurd waardoor die afwatering stopte. Misschien werd de route zuidwaarts geblokkeerd door land dat langzaam omhoog kwam nu het gewicht van het ijs het niet meer naar beneden drukte. Of misschien overschreed het meer een natuurlijke waterscheiding tijdens zijn noordelijke opmars achter de terugtrekkende ijskap aan. Hoe het ook zij, het meer werd gedwongen oostwaarts af te wateren, en uiteindelijk volgde er een enorme uitbraak van zoetwater van het midden van Noord-Amerika naar het bassin dat nu de Grote Meren vormt, en vandaar verder de noordelijke Atlantische Oceaan in.

Die snelle instroom van koud zoetwater zal de oceaan sterk hebben afgekoeld en zoeter gemaakt. Een hoog zoutgehalte was van cruciaal belang voor het op gang houden van de herleefde en misschien nog kwetsbare oceanische transportband. Dus het zoetwater schakelde de transportband opnieuw uit. De warme Golfstroom werd niet meer naar het noorden gezogen. De temperatuur daalde in de hele Noord-

Atlantische regio en waarschijnlijk het meest rond Groenland. Het kan zijn dat het hele klimaatsysteem van de aarde een klap kreeg en daardoor terugviel van een interglaciale naar een glaciële toestand.

Het is allemaal grotendeels giswerk. De aanwijzingen zijn summier. Sommigen betwijfelen zelfs of een grote instroom van zoetwater via de St. Lawrence River wel veel invloed kan hebben gehad op het zoutgehalte van de oceaan aan de andere kant van Groenland. En de onverzoenlijke tegenstanders van Broeckers hypothese vragen zich af hoe belangrijk de oceanische transportband voor het wereldklimaat eigenlijk is. Zelfs Broecker geeft toe dat die nog steeds voor een deel 'een raadsel' is.

Maar er komen steeds meer nieuwe aanwijzingen. Een belangrijke wijziging in het verhaal van Broecker is afkomstig van John Chiang van Berkeley in California. Zijn modellen van de Noord-Atlantische Oceaan zeggen dat de meest cruciale gebeurtenis aan het begin van het Jonge Dryas waarschijnlijk niet het stilleggen van de oceanische transportband zelf was, maar de impact van de invasie van zoetwater op de vorming van zeeijs in de noordelijke Atlantische Oceaan. Hij zegt dat een instroom die het warme water van de Golfstroom verdunde, tot snelle bevroering van het oppervlaktewater zou hebben geleid. En die bevroering zou een klimaatschakelaar hebben omgezet waardoor verdere diepzeeformaties werden tegengehouden en de Golfstroom werd geblokkeerd, en door de ijsalbedo-feedback koelde vervolgens de hele regio af.

Broecker heeft die theorie overgenomen als een verdere uitbreiding van zijn transportbands scenario. Anderen zien het meer als een vervanging of zelfs een weerlegging van zijn theorie. Alley zegt: 'Het lijkt erop dat dit de echte schakelaar is in de Noord-Atlantische Oceaan. Zinkt het water in de winter voordat het bevriest, of bevriest het voordat het zinkt? Zinken of bevroeren. Er zijn maar twee mogelijke antwoorden. Dat is de schakelaar.' Zoeter en kouder water bevriest, terwijl warmer en zouter water zinkt. Als het water

zinkt, blijft de transportband lopen en wordt het noordelijk halfrond warm gehouden. Als het befrist, stopt de circulatie en worden de westenwinden die over de oceaan naar Europa en Azië waaien niet meer verwarmd door de Golfstroom, maar juist afgekoeld door duizenden kilometers zeeijs. 'Het verschil tussen die twee is op sommige plaatsen het verschil tussen temperaturen rond het vriespunt en -30 graden C, zegt Alley.

En die knop, betoogt Alley, werd omgedraaid aan het begin en het einde van het Jonge Dryas. In het begin stroomde veel zoetwater in de noordelijke Atlantische Oceaan, de oceaan bevroor, en binnen tien jaar 'dreven er ijsschollen in de Noordzee en was er permafrost in de Nederlanden'. De westenwinden namen de kou mee van het Atlantische ijs en bliezen die dwars over Europa naar Azië. Ze koelden het hart van het continent Eurazië af en voorkwamen dat het voldoende opwarmde om de aanlandige wind op te wekken die de moessonregens naar Azië brengen. Deze geamendeerde theorie verklaart ook de gelijktijdige opwarming van het zuidelijk halfrond. Zonder de Golfstroom die zeewater noordwaarts over de evenaar voerde bleef de warmte in de zuidelijke Atlantische Oceaan. Terwijl dus het noorden van de aarde bevroor, warmde het zuiden op. Een instroom van zoetwater in Noord-Canada was tot een wereldwijde klimaatramp uitgegroeid. En bovendien ging die recht tegen de trend van de tijd in.

Het duurde ongeveer 1300 jaar voordat het water in de noordelijke Atlantische Oceaan weer zonk in plaats van in de winter te bevriezen. Men is het niet eens over wat uiteindelijk de doorslag gaf voor die omschakeling, maar het gebeurde in elk geval even snel als de bevestiging aan het begin. De noordelijke Atlantische Oceaan vroom niet meer dicht omdat het water zout en zwaar genoeg was om te zinken. De oceaan warmde op, de winden werden warmer, de temperatuur herstelde zich binnen een jaar en de natuur maakte zich weer meester van de toendra: de deglaciatie zette door.

Sommigen vinden dit een bemoedigend verhaal. Als enorme hoeveelheden koud water die uit een meer in zee stromen de oceanische transportband kunnen uitschakelen, zeggen ze, dan zijn we veilig. Er bestaan op dit moment geen instabiele meren gevormd door afsmeltende ijskappen. En in elk geval is de wereld nu nog warmer dan aan het begin van het Jonge Dryas. Het zou kunnen, zegt Alley, dat het klimaatsysteem van de aarde stabiel is in warme tijden dan in koude tijden. Maar de kans is even groot dat het niet zo is. Aan de ene kant zou de superwarme wereld die we nu creëren wel eens hele andere gevaren met zich mee kunnen brengen, en aan de andere kant zijn de oude gevaren misschien ook niet zo afdoende geneutraliseerd als de optimisten denken.

Misschien kan een gebeurtenis van 8.200 jaar geleden een waarschuwing zijn. Ondanks een sterke opwarming na het verstrijken van het koude Jonge Dryas, vuurde het ijs nog een laatste salvo af. Opnieuw kwam er een grote instroom van koud zoetwater in de noordelijke Atlantische Oceaan. Opnieuw kwam er veel zoetwater vrij, opnieuw vroom de oceaan dicht en opnieuw schijnt de oceanische transportband te zijn verstoord. Het was een kleinere interruptie dan het Jonge Dryas, waarschijnlijk had het alleen maar lokale gevolgen op het klimaat en het duurde maar ongeveer 350 jaar. Toch was het een van de grootste klimaatverschuivingen van de afgelopen 10.000 jaar. En misschien wel het belangrijkste voor ons, zegt Alley, is dat het gebeurde in een wereld die veel meer op de onze leek dan het Jonge Dryas. De temperaturen zaten over het algemeen dicht bij die van tegenwoordig en de ijskappen leken heel erg op die van vandaag. De gebeurtenis is minstens een aanwijzing dat er iets soortgelijks kan gebeuren als er voldoende zoetwater in de noordelijke Atlantische Oceaan komt.

Zoals we gezien hebben zijn er in de afgelopen decennia grote hoeveelheden zoetwater in de noordelijke Atlantische Oceaan gekomen. Misschien dat die bijna de oceanische transportband hebben stilgelegd. En het is niet waarschijn-

lijk dat er een eind komt aan deze ontwikkeling. Naarmate het klimaat warmer wordt en de permafrost in Siberië smelt, stijgt de uitstroom van zoetwater in de Noordelijke IJszee sterk. En er is altijd de mogelijkheid van een catastrofale smelting van de Groenlandse ijskap, waar de gletsjers aan het versnellen zijn en zich meren vormen.

Gavin Schmidt, een klimaatmodelmaker van Hansen bij het Goddard Institute for Space Studies in New York, een onderdeel van NASA, zegt dat de gebeurtenis van 8.200 jaar geleden de lakmoesproef van de huidige klimaatmodellen is. 'Als we betrouwbare voorspellingen willen doen over de huidige kans op catastrofale klimaatveranderingen, dan moeten de modellen de gebeurtenissen van 8.200 jaar geleden kunnen voorspellen,' zegt hij. 'Als we dat kunnen, dan zou dat geweldig zijn. We zouden er veel door te weten komen over processen die uiterst relevant zijn voor het klimaat van de eenentwintigste eeuw.'

25 De puls

Hoe de zon het klimaat verandert

Het pakijs van de Noordpool reikte zover zuidwaarts dat de Inuit met hun vissersboten op de noordkust van Schotland landden. Ze ontmoetten weinig weerstand, want de hongerslijdende Hooglanders hadden hun akkers in de steek gelaten toen de graanoogst zeven jaar achtereen mislukte, en waren op rooftocht naar de laaglanden in het zuiden gegaan. In de jaren 1690 was de gemiddelde temperatuur in Schotland 2 graden C lager dan normaal, en de sneeuw bleef tot diep in de zomer liggen. De achterblijvers in de bergen moesten brandnetels eten en brood bakken van boomschors. De politieke repercussies van die Schotse beroering zijn nu nog merkbaar. De heersers van de Schotse Hooglanden vreesden zo erg voor opstand dat ze boze clanleden met hun hongere gezinnen naar het katholieke Ierland verscheepten om daar Presbyteriaanse kolonies te stichten. En toen een wijdverbreide hongersnood in de jaren 1690 de bevolking deed wanhopen over de toekomst van Schotland als onafhankelijke natie werd een unie met Engeland gesloten.

Dat was de kleine ijstijd, een klimaataffaire die begon in het begin van de veertiende eeuw en die met horten en stoten zijn piek bereikte in de zeventiende eeuw, om vervolgens 150 jaar geleden uit te doven. Als een milde echo van de ijstijden spreidde hij zijn ijzige vingers vanuit het noorden over Europa, drukte de gletsjers in de Alpen de dalen in en creëerde spectaculaire schaatstaferelen voor de Hollandse schilders Breughel en Van der Neer. Voor de Londenaars maakte hij regelmatige ijsfestijnen mogelijk op de dichtgevroren Theems. Hendrik VIII reisde een keer per arrenslee over de rivier naar

Cambridge en een andere keer liep een olifant over het ijs vlak bij Friars Bridge.

Er waren wel enkele warme perioden in de kou. In de jaren 1420 zeilde naar verluidt een armada van Chinese ontdekkingsreizigers rond de noordkust van Groenland, een tocht die ook nu nog, zelfs met het verminderd poolijs, onmogelijk is. Tussen 1440 en 1540 was het in Engeland warm genoeg om kersen te kweken in de noordoostelijke Durham Hills. In de jaren 1730 was het buitengewoon warm in een groot deel van Europa. Maar op het hoogtepunt van de kleine ijstijd vroomde de Oostzee dicht en heerste er een wijdverbreide hongersnood in heel Noord-Europa. Sommigen zeggen dat de helft van de bevolking van Noorwegen en Zweden omkwam. IJsland was jarenlang door het zeeijs geïsoleerd en de scholen kabeljauw trokken naar warmer oorden. Volgens sommigen was de kou de verborgen hand achter de hongersnood, de stijgende graanprijzen en het broodoproer dat leidde tot de Franse Revolutie van 1789.

In Noord-Amerika vormden indianenstammen het Verbond van de Iroquois om het schaarse voedsel te delen. De Cree hielden op met graan verbouwen en gingen op bizonjacht. Maar het meest pregnante symbool van die tijd was de teloorgang van een Vikingnederzetting die in de zachte dagen van de elfde eeuw was gesticht door de Noorman Leif Erikson. De Vikingkoning had met de flair van een goede makelaar de naam 'Groenland' verzonnen om kolonisten te lokken naar het land dat nu zo heet. De nederzetting op de uiterste zuidpunt floreerde vierhonderd jaar, maar tegen het midden van de vijftiende eeuw mislukten de oogsten en sneed het zeeijs alle hoop op voedselhulp vanuit Europa af.

Als de Vikingen in Groenland de Inuit hadden nagedaan en waren overgeschakeld op de zeehonden- en ijsberenjacht, dan hadden ze het misschien overleefd. Maar ze bleven bij hun kippen en schapen en hun graan en bouwden steeds grotere kerken, in de hoop dat God ze zou verlossen. Dat deed Hij niet. Toen er eindelijk hulp kwam, was er niemand meer

in leven in de nederzetting. Het sluipende voedseltekort had de lengte van de Groenlandse Viking teruggebracht van een forse 1,78 m tot een gedrongen 1,57 m. De laatste vrouwen waren zo misvormd dat ze waarschijnlijk niet meer in staat waren kinderen te baren. Dat weten we allemaal omdat hun lijken in de groeiende permafrost bewaard zijn gebleven.

De kleine ijstijd, voor het eerst in de jaren 1960 door de Britse klimaathistoricus Hubert Lamb gedocumenteerd, is een vaststaand onderdeel van de Europese geschiedenis geworden. Vaak wordt de periode beschouwd als een rariteit, een vervelende, maar plaatselijke uitschieter in een zachte wereld van Europese klimaat zekerheid. Maar het wordt steeds duidelijker dat wat in Europa de kleine ijstijd heet dicht bij een wereldwijde klimaatstuip kwam die op verschillende plaatsen verschillende vormen aannam.

Omdat het stuiptrekken verscheidene eeuwen duurde is het heel lastig om verschillende klimaatgebeurtenissen van over de hele wereld in die tijd aan de invloed van de kleine ijstijd toe te schrijven. Maar er zijn goede argumenten om te zeggen dat als gevolg van de kleine ijstijd delen van Ethiopië met sneeuw bedekt werden, dat de oogsten in het zeventiende-eeuwse China erdoor mislukten en de val van de Ming-dynastie verhaast werd, en dat het Bovenmeer in Noord-Amerika onder het ijs kwam te liggen. In de tropen veranderden de temperaturen waarschijnlijk niet, maar het regenpatroon wijzigde substantieel. In het Amazonebekken was het zo droog tijdens de Europese kleine ijstijd dat de kurkdroge regenwouden door branden werden geteisterd. In de Sahara, waar het klimaat vaak tegengesteld lijkt aan dat van de Amazone, spoelden herhaalde overstromingen de grote woestijnstad Timboektoe weg.

De kleine ijstijd is niet de enige klimaatverstoring in de opgetekende geschiedenis. Een andere, die vanwege zijn invloed op het klimaat in Europa bekend staat als de 'middeleeuwse warme periode', duurde waarschijnlijk van 800

tot 1300 n.Chr. en eindigde op het moment dat de kleine ijstijd begon. Omdat de periode verder weg in het verleden ligt, is het verloop minder duidelijk. Zeker is dat op verschillende tijdstippen in Noorwegen graan werd verbouwd op hogere breedten dan tegenwoordig en dat wijngaarden bloeiden in de Pennines in Engeland. De warmte bracht Europa welvaart. Er volgde een orgastische bouw van magnifieke Gotische kathedralen. De Vikingen, zoals we eerder hebben gezien, vestigden zich in Groenland in een tijd dat het land zeker groen zal zijn geweest. Sommigen zeggen dat de middeleeuwse warme periode misschien wel warmer was dan het begin van de eenentwintigste eeuw. Maar de meeste wetenschappers zijn veel terughoudender.

Reconstructies van de temperaturen in het verleden komen voornamelijk van analyses van jaarringen in oude bomen. Er zijn uitzonderingen, maar in het algemeen geldt dat hoe breder de ring, hoe sterker de jaarlijkse groei en hoe warmer de zomer. Keith Briffa, een Britse specialist in het vergaren van klimaatinformatie aan de hand van jaarringen, zegt: 'Het was zonder meer koud in de zeventiende eeuw. De aanwijzingen dat het ook koud was tussen 1570 en 1850 lijken betrouwbaar. Maar de middeleeuwse warme periode is nog steeds heel erg onzeker. Er zijn niet veel data, en de data die we hebben zijn eenzijdig voor bepaalde regio's. We denken dat er rond 900 n.Chr. een warme periode was, zeker op hogere breedtes in de zomer. Daarvoor hebben we aanwijzingen van jaarringen. Maar verder hebben we vrijwel niets.' Het lijkt waarschijnlijk dat Europa 1 tot 2 graden C warmer was in de middeleeuwse warme periode dan in het begin van de twintigste eeuw, terwijl het in de kleine ijstijd evenveel kouder was in Europa. Maar de wereldwijde trends waren vrijwel zeker veel kleiner.

In ieder geval vinden velen de term 'middeleeuwse warme periode' veel te eurocentrisch. Jaarringen van het zuidelijk halfrond geven geen enkel aanknopingspunt in die richting. Buiten de regio van de noordelijke Atlantische Oceaan wordt

die tijd zelfs eerder gekenmerkt door lange intense droogtes die een aantal grote beschavingen ten onder deden gaan. In Midden-Amerika had de beschaving van de Maya's, een van de verst ontwikkelde en langst bestaande in de wereld, 2000 jaar gebloeid. Het was een verfijnde, stedelijke samenleving van een hoog wetenschappelijk en technisch niveau, met een bevolking van 10 miljoen, met allerlei kunstzinnige activiteiten, sterke handelsbanden met de naburige volkeren, die voorzover we weten beschikte over alle hulpbronnen om te blijven groeien en bloeien – kortom, een beschaving die in veel opzichten leek op de onze. Maar na drie droogteperiodes van tientallen jaren tussen 800 en 950 n.Chr. – misschien wel de ergste in de regio na het einde van de ijstijd – stortte de hele samenleving in elkaar en gaf haar materiële overblijfselen aan het oerwoud prijs. Een paar honderd kilometer verder naar het noorden, in wat nu het westen van de Verenigde Staten is, bezweek een aantal geavanceerde indiaanse beschavingen onder de druk van herhaalde droogteperiodes. Het best gedocumenteerd is de beschaving van de Anasazi, de voorzaten van de huidige Pueblo Indianen. Ze hadden complexe appartementsgebouwen in de canyons van New Mexico en beschikten over vernuftige irrigatiesystemen voor de landbouw, maar ze werden gedwongen de wildernis in te vluchten na een lange periode van droogte, die zijn hoogtepunt bereikte in de jaren 1280.

De kleine ijstijd en de middeleeuwse warme periode zijn waarschijnlijk recente voorbeelden van natuurlijke klimaatverandering. Hoewel de respectieve opwarming en afkoeling grotendeels beperkt bleef tot de regio rondom de Noord-Atlantische Oceaan, schijnen die perioden hun vingerafdruk te hebben achtergelaten in de gletsjers en in de vorm van intense droogteperiodes over de hele aarde. Wat was dan de oorzaak? En kunnen we daar iets van leren met betrekking tot onze eigen klimaattoekomst?

Er zijn veel theorieën over de oorzaak van die klimaatveranderingen. De slinger ging te hard om te denken aan cycli die te maken hebben met de baan van de aarde. Sommigen hebben geopperd dat het misschien kwam door vulkaanuitbarstingen die de aarde met een sluier van aerosols omgaven waardoor hij afkoelde. Nu zijn er inderdaad tijdens de kleine ijstijd verscheidene grote vulkaanuitbarstingen geweest. Het jaar na de uitbarsting van de Tambora in Indonesië in 1815 mislukte de oogst van India tot Europa en Noord-Amerika. Dat jaar kwam bekend te staan als ‘het jaar zonder zomer’. Maar vulkanische stofwolken verlagen de temperatuur hoogstens voor een paar jaar. Misschien dat ze van tijd tot tijd de afkoeling hebben versterkt, maar ze kwamen niet vaak genoeg voor en waren niet uitzonderlijk genoeg om een lange koudeperiode te verklaren die met tussenpozen bijna een half millennium duurde.

De meest klimatologen denken dat de schuld bij de zon gezocht moet worden. Het koudste deel van de kleine ijstijd, van het midden tot het einde van de zeventiende eeuw, staat bekend als het Maunder Minimum. Dankzij het feit dat Galileï een paar decennia tevoren de telescoop had gepopulariseerd konden de astronomen van die tijd zien dat de toen al bekende vlekken op de zon tussen 1645 en 1715 vrijwel waren verdwenen. Tegenwoordig weten we dat dit een goede indicator is voor een verminderde stralingsactiviteit van de zon. Geschat wordt dat de zonnestraling die de aarde tijdens het Maunder Minimum bereikte met misschien wel een halve watt per vierkante meter afnam, ofwel 0,2 procent. Maar de klimatologen vinden het verbijsterend dat zo’n kleine verandering zulke grote gevolgen kon hebben.

Dan verschijnt er een legendarische onderzoeker op het toneel van het Lamont-Doherty Earth Observatory van Columbia University, wiens kamer een paar deuren verwijderd is van Wally Broecker. Zijn naam is Bond, Gerard Bond. Net als Broecker bekommerde hij zich niet om details en hield zich liever met de grote lijn bezig. Net als Broecker was hij

bereid af en toe een vlieger op te laten, op zijn intuïtie te vertrouwen, en hij had voldoende zelfvertrouwen om in het openbaar een idee te lanceren, gewoon om te zien of iemand het onderuit kon halen. En zijn intellectuele reputatie, wederom net als die van zijn landgenoot, was zo goed dat hij de vliegers die hij opliet in de overwegend conservatieve literatuur gepubliceerd kon krijgen.

Bond betoogde tot aan zijn dood in 2005 met kracht van argumenten dat de kleine ijstijd en de middeleeuwse warme periode de meest recente tekenen waren van een wijd verbreide puls in het klimaatsysteem van de aarde. Die puls, zei hij, verliep cyclisch, met een periode van ongeveer 1500 jaar. Die puls leek bovendien grotendeels onafhankelijk te zijn van andere, kennelijk grotere, invloeden op het wereldklimaat, zoals de baancycli van Milankovitch die de grote ijstijden in werking stelden. Ijstijd of geen ijstijd, betoogde hij, die puls ging gewoon door. Bond had die puls niet uit zijn duim gezogen. Andere onderzoekers waren hem al jaren op het spoor, zonder het te beseffen. Maar net als zijn vriend een paar deuren verder was Bond de man met het zelfvertrouwen om de grote lijn samen te stellen uit de gefragmenteerde aanwijzingen.

In het begin van de jaren 1980 kwam een Duitse student met de eerste doorbraak. Tijdens zijn studie aan de universiteit van Göttingen onderzocht Hartmut Heinrich boorkernen van sedimenten in de bedding van de noordelijke Atlantische Oceaan. Hij vond een paar vreemde strata met kleine steentjes in kernen uit uiteenlopende gebieden, van de Canadese oostkust tot de zee ten westen van de Britse Eilanden en rond Bermuda. Radiokoolstofdatering bracht aan het licht dat die steentjes in minstens zes lagen waren afgezet in de afgelopen 60.000 jaar, tot aan het einde van de laatste ijstijd, met tussenpozen van ruwweg 8000 jaar.

Ik heb die steentjes bekeken in de verzameling mariene sedimenten van Bonds oude laboratorium in New York. Ze

zijn heel uitzonderlijk. Als je naar de andere sedimentmonsters kijkt, dan zie je over het algemeen vrij subtiele verschillen in de diverse boorkernen: een ander kleurtje hier, een enigszins andere consistentie van het stof daar. Bijna al het materiaal in die sedimenten is door de erosiemolen van het aardoppervlak gegaan en vervolgens beetje bij beetje door rivieren op de zeebodem gedeponeed. Maar dan komen de strata van Heinrich. Die bestaan uit steentjes ter grootte van grindkorrels of kiezels, maar met scherpe randen en duidelijk onaangetast door de normale processen van erosie en afzetting. Algauw gaven de wetenschappers de gebeurtenissen waardoor ze geproduceerd werden een naam: Heinrich-gebeurtenissen. Er was nergens in de sedimentgegevens iets dat er op leek.

Behalve de grootte en de vorm was er nog iets eigenaardigs aan die steentjes. Hoewel ze midden in de Atlantische Oceaan werden gevonden, kwamen de onderzoekers er algauw achter dat ze van ver kwamen, van het gebied rondom de Hudson Bay in Noord-Canada. Hoe konden ze zo ver van de kust zijn gekomen en zo ver naar het zuiden? Door wat waren ze daar naartoe gebracht? De enige logische verklaring, gezien het feit dat alle Heinrich-gebeurtenissen in de laatste ijstijd hadden plaatsgevonden, was dat ze van de bodem waren gescheurd door grote gletsjers en aan de onderkant van ijsbergen zuidwaarts waren getransporteerd. Ze dreven heel ver weg, want het was destijds erg koud in de noordelijke Atlantische Oceaan, en toen de ijsbergen smolten werden ze uiteindelijk op de zeebodem gedropt. Dat liet andere vragen onbeantwoord. Welke klimaatgebeurtenis zou massieve armada's van ijsbergen zuidwaarts naar de tropen zenden? En vanwaar die kennelijke cyclus van 8000 jaar?

De volgende aanwijzing kwam een paar jaar later, in het begin van de jaren 1990, toen een vooraanstaande Deense glacioloog, Willi Dansgaard van de universiteit van Kopenhagen, in de Groenlandse boorkernen een reeks forse en ab-

rupte temperatuurveranderingen ontdekte, die als het ware gaten in de laatste ijstijd stansden. Verscheidene keren schoot de temperatuur in ongeveer tien jaar tijd tussen de 2 en 10 graden C omhoog, om na een paar honderd jaar weer terug te vallen. Tot dusver zijn ruim twintig van die warme fasen aan de hand van ijskernen geïdentificeerd, en in veel daarvan was de temperatuur in Europa waarschijnlijk net zo hoog als tegenwoordig.

Die warmteperioden lijken een of andere periodiciteit of puls te hebben. Het werd herhaaldelijk warmer en dan weer kouder, in een cyclus van tussen de 1300 en 1800 jaar. De puls was even herkenbaar als een snelle hartslag en leek gemiddeld elke 1500 jaar een volledige cyclus te doorlopen. De puls kreeg ook al gauw een naam, hij werd, nogal klunzig, de 'Dansgaard-Oeschgercyclus' genoemd, naar Dansgaard en zijn Zwitserse collega Hans Oeschger.

Het verband tussen de Heinrich-gebeurtenissen en de Dansgaard-Oeschgercyclus werd niet direct onderkend. Dat is wel begrijpelijk. De ene had betrekking op koudeperiodes en de andere op warmteperiodes, ze hadden verschillende tijdsmarkeringen en de ene was te zien in de middenatlantische sedimenten terwijl de andere aan de ijskernen van Groenland viel af te lezen. Beide leken in elk geval op het eerste gezicht kleine lokale anomalieën binnen de laatste ijstijd te zijn en dus van geen belang voor het moderne klimaat. Maar Bond vermoedde dat die twee op de een of andere manier met elkaar verband hielden en dat ze belangrijk waren voor de hele wereld. Hij merkte op dat ze allebei kennelijk samenvielen met andere klimaatveranderingen, zoals het oprukken en terugtrekken van de gletsjers in Europa en Noord-Amerika. Net als het Jonge Dryas en de klimaatomslag van 8.200 jaar geleden leken ze de wereld ofwel in een andere klimaatmodus te drukken, of deel uit te maken van zo'n soort proces. Bonds maatje Broecker, een paar deuren verderop, was beschikbaar om een mogelijke link te leggen met de oceanische transportband. Het verhaal begon een eigen leven te

leiden. Maar eerst moesten ze allebei nieuw bewijsmateriaal hebben om hun vermoeden te schragen.

Bond onderwierp de sedimentkernen uit de bedding van de Noord-Atlantische Oceaan, die hij in zijn archief in New York had, aan een nieuw onderzoek. Sommige kernen waren oud, jaren tevoren door het onderzoeksschip *Vema* uit de zeebodem voor de kust van Ierland en de zeestraat tussen Groenland en IJsland geboord. Andere waren nieuw, onder supervisie van Bond geboord voor de kust van Newfoundland.

Zoals verwacht vond Bond verdere bewijzen voor de steenslag van Heinrich die gedurende de laatste ijstijd ongeveer om de 8000 jaar plaats had gevonden. Maar de mariene sedimenten bevatten ook dunnere lagen van materialen die normaal niet in de bedding van de noordelijke Atlantische Oceaan voorkomen. De meest opwindende vondst was dat die dunnere lagen ruwweg om de 1500 jaar waren gedeponeerd en een koude fase leken te vertegenwoordigen van de Dansgaard-Oeschgercyclus in de Groenlandse ijskernen. Dat was een waardevolle vondst, temeer daar later duidelijk werd dat de ijsbergarmada's van de Heinrich-gebeurtenissen in ongewoon koude fasen van de Dansgaard-Oeschgercyclus voorkwamen. Het patroon leek als volgt in elkaar te zitten: een grote Heinrich-gebeurtenis werd gevolgd door vijf steeds minder heftige 1500-jarige Dansgaard-Oeschgercycli, tot er weer een grote Heinrich-gebeurtenis kwam.

Misschien wel de meest opmerkelijke ontdekking van Bond was dat er weliswaar geen grote Heinrich-gebeurtenis meer is geweest in de 10.000 jaar na de laatste ijstijd – de laatste vond 15.000 jaar geleden plaats – maar dat de 1500-jarige puls gestaag was doorgedaan. 'De oscillaties blijven optreden, wat de toestand van het klimaat ook is,' zei hij.

Bond stierf in 2005, op vijfenzestigjarige leeftijd. Zijn oud-collega Peter deMenocal heeft zijn werk voortgezet en is op zoek gegaan naar meer tekenen van de puls. Onderzoek van sedimenten in de zeebedding voor de westkust van

Afrika bracht aan het licht dat elke ± 1500 jaar de hoeveelheid stofdeeltjes in de sedimenten enorm toenam, een teken van hevige stofstormen op het land. De sedimenten toonden ook een dramatische toename van resten van het temperatuurgevoelige plankton, hetgeen wijst op een daling van de temperatuur in tropisch Afrika van wel 5 graden C. 'De overgangen waren scherp. Klimaatveranderingen waarvan we dachten dat ze duizenden jaren in beslag namen gebeurden in één of twee generaties,' zegt de Menocal.

De laatste claim van Bond, dat de puls tot op de huidige dag merkbaar is in cyclische klimaatgebeurtenissen, lijkt te zijn bevestigd, vooral door de temperaturen in Europa en Noord-Amerika. Er vond een sterke afkoeling plaats op het noordelijk halfrond, die eindigde rond 2000 jaar geleden, waarna de middeleeuwse warme periode volgde waarvan het hoogtepunt ongeveer 1100 jaar geleden viel, en daarna volgde er weer een koudeperiode, met een dieptepunt 350 jaar geleden, tijdens het Maunder Minimum, toen de temperatuur in Europa wel 2 graden daalde en de Inuit met hun kajaks in Schotland kwamen.

De studie van Bond was een buitengewoon staaltje detective-werk. Maar er werden meer vragen door opgeroepen dan beantwoord. Twee springen eruit. Als hij bestaat, wat is dan de relatie tussen deze cycli en andere onderdelen van het klimaatsysteem, zoals de oceanische transportband van Broecker? En natuurlijk: wat is de oorzaak van die geheimzinnige puls?

In 2001 dacht Bond dat hij het bewijs had gevonden voor het antwoord dat velen allang vermoedden. Hij ging terug naar de Groenlandse ijskernen om te zoeken naar aanwijzingen voor zonnecycli. Er is voorzover bekend geen directe marker voor zonnecycli in de ijskernen. Maar andere onderzoekers hadden ontdekt dat isotoopsporen van kosmische straling die de atmosfeer bombardeerde in de ijskernen waren achtergebleven. En ook dat als de zonnestraling het

meest intens is, de kosmische straling letterlijk uit het zonnestelsel wordt weggeblazen. Dus zitten er minder 'kosmogene' isotopen zoals koolstof-14 en beryllium-10 in de ijskernen uit de perioden van intense zonnestraling.

Bond haalde weer een slag binnen. De uitkomsten kwamen overeen met de hypothese. De fluctuaties in afval van de ijsbergarmada's in de Atlantische Oceaan gedurende de afgelopen 12.000 jaar vallen samen met de veranderingen in de kosmogene isotopen in de ijskernen. De zonnepulsen vertaalden zich dus in ijsbergpulsen, temperatuurveranderingen op wereldschaal en cyclische klimaatevents die zowel in de glaciële als in de postglaciële tijden terug te vinden zijn.

Bond was er vóór zijn dood van overtuigd dat de klimaatveranderingen van de afgelopen 10.000 jaar voornamelijk zijn aangedreven door die zonnepulsen, die vervolgens door feedbacks, zoals ijsvorming en de veranderde intensiteit van de oceanische transportband, werden versterkt. Hij maakte zich zorgen dat de mensen zouden denken dat de opwarming van de aarde dús natuurlijk was. 'Dat zou een verkeerde interpretatie van de data zijn,' vertelde hij me in een interview kort voor zijn dood. De belangrijkste les die we uit dit onderzoek kunnen trekken is eerder dat het ons iets vertelt over de gevoeligheid van het systeem. 'Het klimaatstelsel van de aarde is uiterst gevoelig voor zwakke schommelingen in de energieproductie van de zon.' En als het gevoelig is voor zwakke veranderingen in de zonnestraling, dan is het waarschijnlijk ook gevoelig voor 'andere externe krachten, zoals de toevoeging door de mens van broeikasgassen aan de atmosfeer.'

Wat precies de versterkingen van de zonnepulsen aandrijft is echter een ander verhaal. Terwijl Bond aan zijn theorie werkte verkondigde Broecker al jaren dat de Dansgaard-Oeschger-temperatuurcyclus in Groenland te maken had met de schommelingen in zijn oceanische transportband. Geografisch scheen dat in elk geval te kloppen. Allebei leken ze hun oorsprong te hebben in het verre noorden van de Atlantische Oceaan, maar het exacte verband bleef nog vaag. Het leek

ook duidelijk dat in de perioden toen de ijsarmada's zuidwaarts door de Atlantische Oceaan dreven de temperaturen in het noorden van de Atlantische Oceaan laag waren en dat er rond Groenland minder water naar de diepte zonk. In extreme gevallen – wellicht midden in een Heinrich-gebeurtenis – viel de transportband waarschijnlijk stil. Misschien dat een vermindering van de zonnestraling de hele sequentie in gang zette. Maar de bewijzen voor wát precies wát veroorzaakte zijn grotendeels indirect. En zoals we verderop zullen zien is er nóg een verklaring: een versterkend effect uit een totaal andere hoek.

Wat die versterker echter ook is, de puls is reëel en is merkbaar in het hele systeem. Misschien dat er alleen in de afgelopen vijftig jaar iets is gekomen met een groter vermogen om het klimaat overhoop te gooien.

