

DEEL DRIE

De koolstofkringloop

11 In de jungle

*Zouden we het merken
als het Amazonewoud in rook opging?*

Het Amazoneregenwoud is het grootste bioreservoir voor kooldioxide op het landoppervlak van de aarde. De bomen bevatten ongeveer 70 miljard ton koolstof, en de bodem misschien wel net zoveel. Dat is ongeveer twintig jaar menselijke uitstoot van fossiele brandstoffen. Het is ook een motor van het wereldklimaatstelsel, omdat het zowel warmte als vocht in omloop brengt. Meer dan de helft van alle regendruppels die op de boomkruinen vallen komen er nooit aan de grond, maar verdampen terug in de lucht om windafwaarts verdere regenval te veroorzaken. Het woud heeft regen nodig, maar de regen heeft ook het woud nodig.

Naarmate echter de wetenschappers meer begrijpen van het belang van het Amazoneregenwoud voor de instandhouding van het klimaat, ontdekken ze ook dat het zelf onder vuur ligt van de klimaatverandering. We zijn al genoegzaam bekend met de schade die door boeren met kettingzagen en bosbranden is toegebracht aan de grootste en meest verscheiden jungle van de wereld, maar die kan het regenwoud slechts langzaam vernietigen, hoezeer ze ook hun best doen. Ondanks tientallen jaren van rooibouw is het merendeel van deze jungle ter grootte van West-Europa nog intact. Klimaatverandering daarentegen zou het woud in een paar jaar kunnen vernietigen.

Tot voor kort beschouwden veel ecologen het Amazoneregenwoud ongeveer op dezelfde manier als glaciologen de ijsskape van Groenland: groot en buitengewoon stabiel. Het ijs van Groenland hield het klimaat in stand dat het ijs bevroren

hield, terwijl het Amazoneregenwoud de regen in stand hield die het woud besproeide. Maar net zoals het stabiele beeld van de Groenlandse ijskap een flinke deuk heeft opgelopen, zo is ook de kijk op de Amazone veranderd: sommige onderzoekers denken dat het in werkelijkheid een grote dynamiek heeft en dat het hele ecosysteem wel eens dicht bij een omslagpunt zou kunnen staan, waarna het snel in een orgie van branden en droogtes de vernietiging in gaat. Niemand weet precies wat er gaat gebeuren als het Amazoneregenwoud verdwijnt. Door de uitstoot van zijn reservoir aan kooldioxide zal het zeker de klimaatverandering een extra duw geven. Hoogstwaarschijnlijk zal ook de regenval in heel Zuid-Amerika erdoor verminderen, en het kan ook de weersystemen op het hele noordelijk halfrond veranderen. Als het Amazone-regenwoud brandt, kan Europa schade lijden.

Een van de mensen die de stabiliteit van het Amazoneregenwoud onderzoeken is Dan Nepstad, een boscoloog die officieel verbonden is aan het Woods Hole Research Center in Massachusetts, maar die al meer dan twintig jaar in de Amazone gedetacheerd is. Hij observeert het oerwoud niet alleen, maar voert ook op grote schaal experimenten uit. In 2001 begon Nepstad met het creëren van een kunstmatige droogte op een klein stukje jungle in het Tapajos Nationaal Park bij de rivierhaven Santarem. In een groot deel van de Amazone regent het de meeste jaren vrijwel elke dag, maar Tapajos ligt aan de oostgrens van het eigenlijke regenwoud, waar het maanden achtereen droog kan blijven. Het oerwoud is hier tot op zekere hoogte aangepast aan droogte. Maar er zijn beperkingen, en Nepstad heeft geprobeerd erachter te komen waar die liggen.

Hij heeft een stuk land van 1 hectare bedekt met ruim vijfduizend doorzichtige plastic panelen die het zonlicht doorlaten, maar die de regen naar houten goten leiden die afwateren in sloten en een ringgracht. Tegelijkertijd heeft hij steigers tot hoog boven het bladerdak gebouwd, onderling

verbonden met loopbruggen, zodat hij de bomen tijdens de kunstmatige droogte gedetailleerd kan bestuderen. Het werk werd geheel met de hand gedaan om het dichte woud niet te beschadigen, en de onderzoekers kwamen er al gauw achter dat ze niet alleen waren. De sloten werden 'verzamelplaatsen voor alle soorten slangen die je je maar kunt voorstellen,' zegt Nepstad. Kaaimannen en jaguars kwamen langs om poolshoogte te nemen.

De resultaten waren de moeite waard. Het bleek dat het woud zonder veel moeite twee jaar van droogte kan doorstaan. De bomen laten hun wortels dieper in de grond groeien op zoek naar water en vertragen hun stofwisseling om vocht vast te houden. Maar daarna gaan de bomen afsterven. Te beginnen met de hoogste komen ze krakend neer en rotten, waarbij hun koolstof in de lucht vrijkomt en de bodem van het woud aan de drogende werking van de zon wordt blootgesteld. In het derde jaar bevatte het stuk land nog maar 2 ton koolstof, terwijl een naburige controleperceel, waar het bleef regenen, 7 ton bevatte. Van een hoekje van een van de grootste opslagplaatsen van koolstof op aarde 'was het slot af'. Ecoloog Deborah Clark van de University of Missouri, die de onderzoeksresultaten in *Science* besprak, zei dat de studie aantoonde dat het Amazone-woud 'een rampzalige kant op gaat. Gezien het feit dat verschillende klimaatmodellen een toename van droogte in de Amazone voorspellen, zijn de implicaties voor die veelzijdige ecosystemen somber.'

Overall in de jungle wordt droogte gevolgd door brand. Dus begon Nepstad begin 2005 een nog gedurfder experiment in het regenwoud. Hij stak een ander perceel in brand. 'We wilden bekijken of herhaalde branden het bestaan van het woud kunnen aantasten,' zegt hij. De eerste bevindingen voorspelden niet veel goeds. De branden verspreidden zich laag over de bodem van het woud, het vuur bleef onder het bladerdek en was grotendeels onzichtbaar voor de satellieten die van boven constant de wacht hielden. Maar toch gingen

veel bomen dood omdat de schors verkoelde en de toevoer van sap uit de wortels werd geblokkeerd.

De experimenten van Nepstad zijn onderdeel van een groot internationaal project om de gezondheid van het Amazone-regenwoud te monitoren. Het heet *Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia* ('Grootschalig Biosfeer-Atmosfeer Experiment in Amazonië') ofwel LBA. Met vliegtuigen en satellieten en vanaf steigers boven de jungle hebben onderzoekers van een tiental landen de ademhaling van het regenwoud gemeten en zijn overlevingstrategieën bestudeerd. De huidige schatting is dat door bosbranden in het regenwoud ongeveer 200 miljoen ton koolstof per jaar in de lucht vrijkomt, veel meer dan wordt geabsorbeerd door de groei van het woud. Het Amazonegebied is een belangrijke bron van kooldioxide geworden, die bijdraagt aan de opwarming van de aarde. Nog akeliger is dat de experimenten een groeiende afstervingstendens in het hele Amazonegebied aan het licht hebben gebracht, die de kwetsbaarheid voor branden nog vergroot. Het werk van Nepstad wijst uit dat voorbij een bepaald punt het woud niet meer in staat is zich van de branden te herstellen en een proces van snelle uitdroging begint, dat hij de 'savannisering' van de Amazone noemt.

En in dezelfde tijd dat hij zijn droogte-experiment voltooide leek de natuur het te repliceren. In heel 2005 bleven de regens weg in het Amazonegebied, waardoor bomen doodgingen, branden ontstonden en de capaciteit van het woud om vocht te circuleren verminderde – en daarmee nam de kans op toekomstige droogten toe. De experimenten van Nepstad wijzen erop dat het regenwoud dicht bij een overgang staat – een overgang naar een toestand van permanente droogte, onbeheersbare bosbranden, savannisering, of nog erger. In de laatste weken van 2005 kwamen de regens terug. Misschien dat deze keer het regenwoud zich herstelt. Maar als een toekomstige klimaatverandering voor een significante droogte zorgt die van het ene jaar tot het volgende duurt, dan

zouden de feedbacks van het woud Nepstads ergste nachtmerries wel eens kunnen doen uitkomen.

De droogte van 2005 werd veroorzaakt door extreem hoge temperaturen in de tropische Atlantische Oceaan – dezelfde hoge temperaturen waarvan vermoed wordt dat ze het recordbrekende orkaanseizoen van dat jaar veroorzaakten. De opstijgende lucht die de orkanen verwekte daalde uiteindelijk weer naar de aarde terug en onderdrukte de vorming van regenwolken boven het Amazonegebied. En zoals ik op het British Hadley Centre for Climate Prediction ontdekte: dat is precies wat klimaatmodellen voorspellen voor de komende decennia.

Het model van het Hadley Centre voor het wereldklimaat wordt algemeen beschouwd als een van de drie beste in de wereld. En het voorspelt dat de gebruikelijke toename in wereldwijde industriële kooldioxideuitstoot in de komende decennia voor warmer zeewater zal zorgen, met tot gevolg herhaaldelijke droogtes in het Amazonegebied die op hun beurt ‘drempelwaarden’ creëren waarboven branden ontstaan. Vóór het einde van de eeuw zal het Amazoneregenwoud dood zijn. Niet halfdood of ziek, maar dood en verdwenen. ‘Er zullen alleen nog maar struiken, of op zijn hoogst gras groeien,’ stond in een studie die het Hadley Centre in 2005 publiceerde.

Niet alle modellen komen daarmee overeen. Maar het Hadley-model reproduceert het best de huidige relatie tussen oceaantemperaturen en regenval in de Amazone, dus de kans is groot dat het ook klopt voor de toekomst. Nepstad zelf voorspelt een ‘megabrand’ die zich over het hele gebied verspreidt. Als de bossen in het kwetsbaardere oosten van het regenwoud sterven, dan zullen ze geen vocht meer in de atmosfeer terugpompen voor benedenwindse regenval. Een golf van droogte zal westwaarts trekken en de voorwaarden scheppen voor branden die het hart uit de jungle rukken.

Als de bomen weg zijn, zal de dunne bodem in de zon verdroren. Het regenwoud kan letterlijk in een woestijn ver-

anderen. De voorspelling van het Hadley Centre bevat een grafiek van de toekomstige koolstof van het Amazonewoud. Die voorspelt dat de opgeslagen 70 miljard ton van de twintigste eeuw in 2050 tot 40 miljard ton zal zijn gekrompen en tot 15 miljard ton aan het eind van de eeuw. Dat zou genoeg zijn, zo zegt de berekening, om de verwachte opwarming van de aarde met minstens 50 procent te verhogen.

Het Amazoneregenwoud produceert niet alleen voor zichzelf regen. Volgens één berekening verdampt er elk jaar zo'n 6 biljoen ton water uit de jungle, en ongeveer de helft van die hoeveelheid vocht wordt uit het Amazonebekken geëxporteerd. Een deel daarvan gaat naar de Andes, waar het wolken vormt die zo dicht om sommige bergen hangen dat de oppervlakte ervan nooit door satellieten is waargenomen. Een deel waait naar het zuiden om de pampa's van Argentinië te besproeien, en een deel naar het oosten, naar Zuid-Afrika, en een ander deel noordwaarts naar de Cariben. Het woud is een vitale regenmachine voor het grootste deel van Zuid-Amerika. Waarschijnlijk begint zo ongeveer de helft van de regenval in Argentinië als verdamping in het Amazonegebied.

Maar de weldaden van de grote hydrologische motor in de Amazone gaan veel verder en beperken zich niet tot regen. Het vocht is ook een drager van energie. Een heleboel zonne-energie wordt gebruikt om het vocht van het bladerdak te verdampen. Dat is een van de redenen waarom wouden koeler zijn dan de omringende vlakten. En als het vocht uiteindelijk condenseert en nieuwe wolken vormt, dan komt die energie weer vrij in de lucht. Die drijft weersystemen aan en hoge winden die straalstromen worden genoemd en die tot ver in het noordelijke halfrond reiken. Nicola Gedney en Paul Valdes, twee jonge klimatologen van de University of Reading, hebben berekend dat dit proces uiteindelijk de winterstormen aandrijft die boven de Atlantische Oceaan naar Europa waaien. 'Er is een betrekkelijk direct fysisch

verband tussen veranderingen boven het ontboste gebied en het klimaat van de noordelijke Atlantische Oceaan en West-Europa,' zeggen ze. Als het regenwoud het begeeft, zal ook de hydrologische motor het laten afweten en wordt het verband verbroken. Verdroging van het Amazonegebied kan worden gevolgd door verdroging van Europa.

12 Woeste branden van Borneo

Klimaat in de zomp door brandend moeras

De rook wolkte door Palangkaraya. Een van de grootste steden op Borneo lag onder een zure smog die zelfs nog dikker was dan de oude Londense erwtensoep. De zon werd zo sterk verduisterd dat er een kilte hing in de stad die anders bijna altijd vochtig en smoorheet was van het regenwoud eromheen. Het was eind 1997 en het regenwoud brandde. De meest intense El Niño in de Stille Oceaan had de stormwolken tegengehouden die normaliter regen naar Borneo en de andere Indonesische eilanden voeren. Landeigenaars maakten gebruik van de droogte om bos plat te branden en nieuwe plantages aan te leggen voor palmolie en andere marktgewassen. De branden liepen uit de hand en het gevolg was een van de grootste bosbranden in de geschiedenis van de mensheid. De rook verspreidde zich over een gebied van duizenden kilometers. Ongeziene vliegtuigen stortten neer en schepen botsten op zee. In het naburige Maleisië en het verre Thailand lagen de ziekenhuizen vol slachtoffers van longaandoeningen, en scholen werden gesloten. De brand werd wereldnieuws. De schade van de brand aan gederfde inkomsten in het bedrijfsleven alleen al werd geschat op tientallen miljarden dollars.

Maar niet alleen de bomen brandden. De rook was het dichtst in Midden-Borneo, rond Palangkaraya, waar de vuren zich een weg de bodem in hadden gevreten en een uitgestrekt veenmoeras onder het bos hadden verdord en verbrand. Dat veen, op veel plaatsen 20 meter diep, bestaat uit de geaccumuleerde resten van een oerwoud dat hier tienduizenden jaren geleden in het moeras verzonk. Ook toen het weer begon te regenen, bleef het veen maandenlang smeulen,

en toen de rook eindelijk was opgetrokken, was het grootste deel van het moerasbos zwart geblakerd en staken skeletachtige boomresten uit de verkoolde bodem, die op sommige plaatsen een meter of meer was gedaald.

Het verbranden van het moeras op Borneo was onderdeel van een wereldwijde aantasting van tropische regenwouden – voor landaanwinning en houtkap. Maar hier was de zaak erger. Tot voor kort leefden er geen mensen in de moerassen. Ze waren te onherbergzaam en te ontoegankelijk voor de plaatselijke stammen, en ook voor de moderne boeren. Maar in het begin van de jaren 1990 verkondigde president Soeharto van Indonesië dat een gebied van het centrale moeras op Borneo met een oppervlakte van ongeveer 10.000 vierkante kilometer gedraineerd moest worden en tot een gigantische rijstveld gemaakt, zodat het land zelf in zijn basisvoedsel kon voorzien. Er werden zo'n 4000 kilometer kanalen gegraven om het moeras te ontwateren, en ongeveer 60.000 boeren werden vanuit het binnenland verplaatst om de rijst te verbouwen. De bodem bleek onvruchtbaar en er groeide vrijwel geen rijst. Het megaproject werd opgegeven, maar het gevolg was dat de kanalen de moerassen bleven ontwateren en het verdorde veen elk droog seizoen brandde. Vooral tijdens El Niño's.

Dit is niet zomaar een lokale milieuramp. Jack Rieley, een Britse ecooloog met een passie voor veenmoerassen die de moerassen in Centraal-Borneo tot onderwerp van zijn veldstudies heeft gemaakt, zegt dat de ramp voor de hele wereld van belang is. Minstens de helft van de tropische veenmoerassen van de wereld liggen op de Indonesische eilanden Borneo, Sumatra en West-Nieuw-Guinea. En de grootste en diepste daarvan liggen in Centraal Borneo, waar ze een gebied beslaan zo groot als een kwart van Engeland en waar de grootste populaties van de Maleise beer en de nevelpanter leven, alsmede de grootste populatie orang-oetans die er in de wereld nog bestaat. Ze bevatten ook grote hoeveelheden koolstof – naar schatting 50 miljard ton. Dat is bijna net

zoveel als het hele Amazoneregenwoud, dat ruim tien keer zo groot is. Eén hectare veenmoeras op Borneo bevat 2000 ton koolstof.

Tropische veenmoerassen zijn een belangrijk onderdeel van de koolstofkringloop in de wereld. Het zijn belangrijke aanjagers van klimaatverandering, in staat om de wereld in en uit ijstijden te drijven door kooldioxide aan de lucht te onttrekken of er juist in te pompen. Nu hebben ze duizenden jaren lang de wereld koeler gehouden dan hij anders misschien geweest zou zijn, door kooldioxide uit de lucht te absorberen. Om die kooldioxide vrij te maken net nu de wereld zijn best doet om de opwarming van de aarde tegen te gaan zou echt krankzinnig zijn. Maar dat is precies wat er gebeurt. Rieley schat dat tijdens de El Niño van 1997 en 1998, toen Palangkaraya maandenlang onder de rook verdween, de smeulende moerassen een laag van meer dan vijftig centimeter veen hadden verloren en dat er tussen de 800 miljoen en de 2,6 miljard ton kooldioxide in de atmosfeer was gestoten. Dat was zo'n 40 procent van alle uitstoot van fossiele brandstoffen in dat jaar.

Aanvankelijk was er enige scepsis over Rieley's cijfers. Er waren maar weinig andere onderzoekers naar Borneo gegaan om te zien wat er gebeurde. Maar in 2004 publiceerden onderzoekers van de Amerikaanse overheid een gedetailleerde analyse van gasmetingen over de hele wereld. Die toonden aan dat in 1998 ruwweg 2 miljard ton meer koolstof dan gebruikelijk in de atmosfeer was gekomen – en dat tweederde van dat overschot uit Zuidoost-Azië kwam. De branden op Borneo moeten daar grotendeels voor verantwoordelijk zijn geweest, en het brandende veen was vrijwel zeker de belangrijkste component. 'We zijn getuige van de dood van een van de laatste natuurlijke ecosystemen op aarde, en die jaagt ook de klimaatverandering verder aan,' zegt Rieley. 'Wat ooit een van de belangrijkste 'koolstofputten' op aarde was, geeft zijn koolstof nu prijs. De hele wereld merkt het effect.'

Elk jaar gaan de boeren op Borneo door met oerwoud platbranden om landbouwgrond te winnen. En als het droog is, verspreiden die branden zich door de jungle en over het veen. In 2002 en 2003, blijkt uit satellietfoto's, stonden op een bepaald moment 5 miljoen hectare van het moerasbos in brand. Dat waren ook de eerste jaren dat de netto toevoeging aan de atmosfeer van koolstof continu de 4 miljard ton overschreed, en Rieley denkt dat de brandende moerasbossen daar een miljard ton aan bijdroegen.

Het zag ernaar uit dat de smeulende bossen op het verre Borneo in hun eentje de snelheid van de klimaatverandering opvoerden. Dat toont aan, zegt David Schimel van het National Center for Atmospheric Research (NCAR) in Boulder, Colorado, dat 'catastrofale gebeurtenissen in kleine gebieden een enorme invloed kunnen hebben op de wereldwijde koolstofbalans.' Branden op Borneo en in het Amazonegebied kunnen in de eenentwintigste eeuw de grootste bioreservoirs van kooldioxide in de meest explosieve uitstoters van het gas veranderen.

13 Van *sink* tot *source*

Als de koolstofkringloop rechtsomkeer maakt

Het leek te mooi om waar te zijn. Gedurende de hele jaren 1980 en 1990 hoopten de aanwijzingen zich op dat bossen, overall in de wereld waar ze overleefden, harder groeiden. En daarbij onttrokken ze steeds meer kooldioxide uit de lucht. Ondanks ontbossing in de tropen fungeerden de bossen over het algemeen als een krachtige *sink* ('zinkput') voor koolstof. De meeste onderzoekers veronderstelden dat de extra groei het gevolg was van de stijgende concentraties kooldioxide in de atmosfeer, waardoor het makkelijk werd voor de bomen om het gas aan de lucht te onttrekken. Als de andere grondstoffen voor fotosynthese, zoals water en voedingsstoffen, aanwezig waren, was voor de planten the sky the limit. Het leek erop dat de natuurlijke koolstofkringloop een grote negatieve feedback leverde om de opwarming van de aarde tegen te houden. De term 'CO₂ fertilisatie-effect' deed zijn intrede in het lexicon van de klimatologen.

In 1998, op het hoogtepunt van deze golf van enthousiasme, schoot een groep koolstofmodelmakers van Princeton University in New Jersey politiek zowel als wetenschappelijk midden in de roos – althans, zo leek het. Song Miao Fan c.s. beweerden in een artikel in *Science* 'een grote koolstofput in Noord-Amerika' te hebben ontdekt. De Verenigde Staten en Canada, zeiden ze, was een hotspot voor koolstofabsorptie geworden doordat meer bomen op verlaten bouwland en in bossen groeiden waar voorheen gekapt werd, en de kooldioxide in de lucht stimuleerde de groei. Ze berekenden dat de zinkput de verbazende hoeveelheid van 2 miljard ton per jaar aankan – meer dan genoeg om de jaarlijkse emissie van

beide landen door krachtcentrales, auto's enzovoort te compenseren. Dankzij hun bomen waren de grootste vervuilers ter wereld 'koolstofneutraal'.

Veel mensen vonden het een sterk verhaal. En bij nader onderzoek bleek dat de aannames over waar de kooldioxide in de atmosfeer vandaan kwam, waar die naartoe ging en hoe die circuleerde, wel heel erg ver gingen. Specialisten in de koolstofkringloop trakteerden de auteurs op een koude douche. Het getal van 2 miljard ton kwam dicht bij de totale hoeveelheid koolstof die de Noord-Amerikaanse bomen per jaar absorberen om te kunnen groeien. Als het waar was wat ze beweerden, dan ging er geen enkele Noord-Amerikaanse boom meer dood. Ze ademden zelfs niet meer uit – bij beide processen wordt namelijk kooldioxide in de lucht gestoten. De resultaten werden gepubliceerd binnen een jaar nadat de regering Clinton het verdrag van Kyoto had getekend, waarbij het land zich verplichtte tot een straffe reductie op de uitstoot van kooldioxide, zonder een duidelijk idee te hebben hoe dat bereikt moest worden. Die cijfers kwamen als manna uit de hemel vallen.

En ja, het was inderdaad te mooi om waar te zijn. De auteurs gaven toe dat hun data mager waren en hun analytische technieken grotendeels prematuur. Het bleek dat niemand de resultaten kon repliceren. Een lange rij onderzoekers toonde aan dat de Noord-Amerikaanse bossen nooit meer dan een vijfde van de uitstoot van die landen konden opslaan. Na een poosje was er niemand meer die de originele resultaten wilde verdedigen en ze verdwenen even snel uit het zicht als ze gekomen waren.

De laatste nagel aan hun doodskest werd geslagen toen later bleek dat in 1998, het jaar waarin het rapport gepubliceerd werd, de capaciteit van de natuur om kooldioxide uit de lucht te absorberen tot zo ongeveer het laagste punt in de geschiedenis was gedaald. Veen- en bosbranden woedden van de Amazone tot Borneo. Als er al een grote zinkput was geweest, dan verdween die even snel weer als hij was

ontdekt. En het waren niet alleen de tropen waar koolstof uit de biosfeer lekte. Er woedden grote bosbranden van Florida tot Sardinië en van Peru tot Siberië, waar de Russische boswachters bekendmaakten dat een bosbrand vergelijkbaar met die van Borneo vrijwel onopgemerkt was gebeven. Het grootste bos ter wereld, dat 200 jaar lang een klein deel van de Europese emissie had geabsorbeerd die oostwaarts op de heersende wind werd meegevoerd, gaf nu terug wat het voorheen had opgeslokt. Aan het eind van 1998 leek het hele idee van een gigantische koolstofput in de vs, of waar dan ook, volkomen absurd.

De volgende episode in het verhaal van de wonderbare verdwijning van de koolstofput speelde zich af in de zomer van 2003. Europa zuchtte onder een intense hittegolf. De temperaturen in juli lagen 6 graden C boven het gemiddelde. In Frankrijk steeg het kwik tot boven de 40 graden C. Met zulke hoge temperaturen, én met minder dan de helft van de gebruikelijke regenval, verdorden de berken en de graanvelden, de graslanden en de dennenbossen van Europa.

Philippe Ciais, een milieuwetenschapper uit Parijs, volgde de gebeurtenissen. Hij was een van de sleutelfiguren van CaboEurope, een project dat een paar jaar eerder van start was gegaan om de koolstofput van Europa te meten. Dat was tijdens de nasleep van de vermeende ontdekking van een grote Noord-Amerikaanse koolstofput. De Europese politici wilden, net als hun Amerikaanse collega's, dolgraag horen dat de natuur hen een handje hielp met het behalen van de doelstelling van het Kyoto Protocol. Aanvankelijk vond Ciais dat, dankzij de hogere temperaturen, de toegenomen kooldioxideconcentraties in de lucht en een langere groeiperiode, de Europese ecosystemen wel 12 procent van de door de mensen veroorzaakte uitstoot van het continent absorbeerden.

Maar in 2003 vloog de deksel van de koolstofput. In juli en augustus van dat jaar, in een tijd dat de Europese eco-

systemen normaliter in volle bloei zouden hebben gestaan en op volle toeren kooldioxide uit de lucht zouden hebben geabsorbeerd, ontsnapte er 500 miljoen ton koolstof aan de bossen en akkers van Europa. Die uitstoot was twee keer zo groot als de Europese emissie van fossiele brandstoffen in diezelfde twee maanden. Alle koolstof die in de voorafgaande paar jaar was geabsorbeerd, werd weer razendsnel terug in de atmosfeer gepompt. De snelle uitademing van de Europese ecosystemen 'kende zijn gelijke niet in de afgelopen eeuw', zei Ciaï. Maar hij meende dat de kans op herhaling groot was, 'omdat toekomstige droogteperiodes de ecosystemen van de gematigde zones van koolstofzinkputten in koolstofbronnen veranderen'.

Het leek erop dat Europa, vastgeketend aan een op hol geslagen broeikas-effect, in vliegende vaart op een nachtmerrie afstevende. En al gauw bleek dat de Europese koolstofcrisis deel uitmaakte van een algemene zomerstress op het hele noordelijk halfrond. Ning Zeng van de University of Maryland vond een droogtezone die zich uitstrekte van de Middellandse Zee tot Afghanistan. Die hield van 1998 tot 2002 stand en had in de hele regio een natuurlijke koolstofput uitgeschakeld die in de voorafgaande twintig jaar 700 miljoen ton per jaar had geabsorbeerd.

Alon Angert van de University of California in Berkeley geeft het overzicht. Gedurende de hele jaren 1980, tot in het begin van de jaren 1990, werkte het 'CO₂ fertilisatie-effect' vrij goed, waarbij een toegenomen fotosynthese op het noordelijk halfrond steeds meer kooldioxide uit de lucht haalde. Maar rond 1993 nam dat effect af, waarschijnlijk als gevolg van droogtes en hogere temperaturen. En sinds het midden van de jaren 1990 ging de koolstofput erg achteruit. Van de Middellandse Zee tot Centraal-Azië, en zelfs in het noorden van Siberië en Noord-Europa, werd de extra opname van koolstof door planten in het vroege voorjaar teniet gedaan door de hitte en het watertekort van de warmere en drogere zomers. Die cijfers, zegt Angert, sloegen de wijdverbreide

hoop op een 'groene trend', waarbij warmere zomers de plantengroei bevorderen en de klimaatverandering temperen, de bodem in. In plaats daarvan gaat door 'de excessieve hitte het afsterven van de bossen in versneld tempo door, neemt de emissie van koolstof uit de grond toe en wordt het land veranderd van een zinkput in een bron van koolstof voor de atmosfeer'.

En verder naar het noorden, boven de boomlijn, waar op sommige plaatsen de opwarming het best merkbaar is, neemt de angst toe voor de koolstof die ligt opgeslagen in de dikke lagen permanent bevroren grond die permafrost wordt genoemd. Die koolstof is afkomstig van de geaccumuleerde dode resten van mos en andere planten die bevroren voordat ze de kans kregen te rotten. David Lawrence van NCAR rapporteerde in 2005 te verwachten dat de bovenste 3 meter van de permafrost in het grootste deel van de Noordpoolstreek in de eenentwintigste eeuw zal smelten. Dat zal een spoor van verzakte wegen, ingestorte gebouwen, kapotte pijpleidingen en ontredderde rendieren teweegbrengen. Er zullen ook tientallen, misschien wel honderden miljarden ton koolstof door vrijkomen. Wanneer de ontdooide vegetatie eindelijk gaat rotten, keert de koolstof grotendeels terug naar de atmosfeer in de vorm van kooldioxide. In de veenmoerassen en meren waar geen zuurstof zit, zal de koolstof merendeels worden omgezet in methaan dat, zoals we in het volgende hoofdstuk zullen zien, een nog krachtiger broeikasgas is.

We hoeven de koolstofput niet helemaal af te schrijven. Hij gaat niet helemaal teloor. Vooral op hogere breedten zullen de warmere en vochtiger omstandigheden er over het algemeen voor zorgen dat bomen sneller groeien en ook verder naar het noorden groeien – tenminste, als ze niet eerst geveld worden door insectenplagen. Op dit moment is de beste gok dat de bossen gemiddeld veel meer kooldioxide absorberen dan ze vrijgeven. Tot een vijfde van de kooldioxide die wij uitstoten door middel van fossiele brandstoffen kan

nog steeds door de bodem en door de bossen worden geabsorbeerd. Maar de put wordt kleiner en niet groter, zoals velen verwachtten. En velen geloven dat de zinkput tot de ondergang gedoemd is naarmate er meer jaren komen als 1998 en 2003.

Een van de mensen die het ergste vrezen is Peter Cox, een jonge Britse topklimatoloog die het Britse Hadley Centre verliet om meer onderzoek te gaan doen aan de koolstofkringloop bij het Centre for Ecology and Hydrology in Winfrith in Dorset. Hij denkt dat hij de verdwijning van de koolstofput op het spoor is en hij is bereid er een datum aan te plakken.

‘In wezen zien we twee dingen met elkaar concurreren,’ zegt hij. ‘Planten absorberen kooldioxide wanneer ze groeien door fotosynthese, maar die kooldioxide geven ze weer terug als ze afsterven en het hout, de bladeren en de wortels ontbinden. De snelheid van beide processen neemt toe.’ Ten eerste, de extra kooldioxide in de atmosfeer stimuleert en versnelt de fotosynthese. De planten groeien sneller en absorberen meer kooldioxide. Maar die extra kooldioxide maakte het klimaat ook warmer. En dat opwarmen bevordert het proces dat het plantenmateriaal afbreekt en kooldioxide weer aan de lucht vrijgeeft. Omdat er een paar decennia overheen gaan voordat de extra kooldioxide is omgezet in hogere temperaturen hebben we het fertilisatie-effect eerst gezien. Maar nu maakt het ontbindingsproces een inhaalslag. We naderen het punt waarop de afbraak en de uitstoot van kooldioxide de groei en de absorptie voorbijstreven.

Daarbij zijn niet alleen planten betrokken. De bodem heeft zijn eigen processen waarmee kooldioxide wordt in- en uitgedemd. En ook die zullen veranderen van een netto zinkput in een netto bron van koolstof – en ten slotte uitstoten wat ze in de afgelopen decennia hebben geabsorbeerd. Uiteindelijk, zegt Cox, ‘kun je niet het een hebben zonder het ander. Als je inademt, zul je uiteindelijk ook weer moeten uitademen.’ En weldra zullen vrijwel alle regenwouden, en

zal alle vruchtbare grond, op aarde gaan uitademen en de koolstof die erin ligt opgeslagen teruggeven aan de lucht. Als het klimaat droger wordt en er komen meer branden, dan verloopt de uitstoot van kooldioxide nog sneller. Maar gebeuren zal het.

De hele 'biosfeer' op het land – de bossen en de bodem en de weiden en de venen – heeft het tempo van de opwarming van de aarde enkele tientallen jaren vertraagd. Weldra zal de biosfeer de opwarming gaan versnellen. De dag dat de biosfeer verandert van *sink* ('zinkput') in *source* ('bron') zal er weer een omslagpunt in het aardsysteem komen. Net als de smelting van de ijskappen zal het proces, eenmaal op gang gekomen, niet meer te stoppen zijn. Potentieel kunnen honderden miljarden ton koolstof in de biosfeer gedestabiliseerd worden, zegt Pep Canadell, een onderzoeker van de koolstofkringloop die verbonden is aan het researchcentrum CSIRO van de Australische overheid.

Niemand weet precies wanneer het omslagpunt komt. 'Het is mogelijk,' zegt Cox, 'dat de plotselinge verhevigde uitstoot van kooldioxide in de atmosfeer in 2003 het eerste teken daarvan is.' Maar hoewel sommige delen van de biosfeer op dit moment onherroepelijk in koolstofbronnen zijn veranderd, zal het waarschijnlijk nog wel een paar decennia duren eer het hele systeem omschakelt. Afhankelijk, natuurlijk, van hoe snel we de temperatuur doen stijgen.

Cox schat dat de biosfeer in 2040 hoogstwaarschijnlijk wraak zal gaan nemen voor het feit dat we op haar bijsturende werking hebben vertrouwd. Hij berekent dat tegen het einde van deze eeuw de biosfeer wel eens 7 miljard ton koolstof per jaar in de atmosfeer kan pompen. Dat is ongeveer de hoeveelheid afkomstig van de huidige verbranding van fossiele brandstoffen en waarschijnlijk genoeg om nog eens 1 of 2 graden C extra aan de wereldtemperatuur toe te voegen – 2 graden die nog (steeds) niet zijn meegenomen in de voorspellingen van het IPCC.

Slechts één land, voorzover ik weet, heeft een nationale studie voltooid over de huidige impact van die veranderingen in de biosfeer op zijn wereldwijde bijdragen aan de klimaatverandering. Guy Kirk van het National Soil Resources Institute, onderdeel van Cranfield University, heeft die klus voor Groot-Brittannië geklaard. Hij heeft 6000 testpercelen onderzocht in bossen en venen, op heiden en akkers, in struikgewas en in tuinen, om te zien hoeveel kooldioxide de biosfeer verlaat en hoeveel erin komt. Zijn conclusie is dat de Engelse biosfeer elk jaar ongeveer 1 procent van zijn koolstof vrijgeeft. Genoeg, met andere woorden, om het hele land in een woestijn te veranderen als die uitstoot nog een eeuw zo doorgaat.

Kirk sluit landbouwmethoden of gebruik van de grond als voornaamste oorzaak uit. De veranderingen zijn zo universeel, dat het alleen maar kan komen door klimaatverandering. Hij schat de totale uitstoot van de Britse biosfeer op ongeveer 13 miljoen ton per jaar. Dat, zo zegt hij, is ruwweg de hoeveelheid kooldioxide die de Britse overheid elk jaar uit de atmosfeer houdt in haar pogingen om te voldoen aan het Kyoto Protocol. Zoals de Duitse onderzoeker Ernst-Detlef Schulze van CarboEurope stelde – nogal meesmuilend, vond ik – ‘dat doet de technologische successen op het gebied van de reductie van kooldioxide-emissies volledig teniet en plaatst het Britse succes bij de vermindering van de uitstoot van broeikasgassen in een heel ander licht.’ Helemaal waar. Maar Groot-Brittannië is niet de enige.

14 De doemmachine

Er schuilt een dodelijk geheim in de permafrost

Een van mijn favoriete films is *Dr. Strangelove*. Hij werd gemaakt in 1964, toen een nucleaire vernietiging de grootste bedreiging voor de wereld was. De film, geregisseerd door Stanley Kubrick, met in de hoofdrol Peter Sellers als Dr. Strangelove, een aan een rolstoel gekluisterde karikatuur van Henry Kissinger, was een satire op de militaire strategie die bekend stond als *Mutual Assured Destruction* ('wederzijds gegarandeerde vernietiging'), ofwel MAD. Het verhaal was dat de Sovjetunie een ultiem verdedigingsmiddel had gebouwd, een doemmachine in de afgelegen woestijn van Siberië. Als Rusland werd aangevallen, zou de machine de wereld in een radioactieve wolk hullen en al het menselijk en dierlijk leven op aarde vernietigen. Jammer genoeg verzuimden de Russen dit aan de Amerikanen te vertellen en, het ligt voor de hand, Dr. Strangelove en de Amerikaanse militairen vielen aan. De film eindigt met een mataglap majoor Kong die boven op een atoombom zit die boven Siberië wordt afgeworpen. Het einde van de wereld is nabij als de aftiteling over het doek rolt.

Nu is klimaatverandering ons meest gevreesde Armageddon. Een van de redenen die we hebben om bang te zijn voor de consequenties zit verborgen in de bevroren moerassen van West-Siberië. Daar, onder een vrijwel onbewoonde woestijn van permafrost, ligt iets wat zonder overdrijving de doemmachine van de natuur genoemd kan worden. Die wordt niet door een atoombom ingeschakeld maar door de opwarming van de aarde. De machine bestaat uit dikke lagen bevroren veen waarin tientallen miljarden ton koolstof liggen opgeslagen.

Het hele West-Siberische veenmoeras beslaat een miljoen vierkante kilometer, een gebied zo groot als Frankrijk en Duitsland bij elkaar. Vanaf zijn ontstaan heeft het mos dat aan de oppervlakte groeide langzaam gigantische hoeveelheden koolstof uit de atmosfeer geabsorbeerd. Omdat het zo koud is, ontbindt de vegetatie slechts gedeeltelijk en vormt een steeds dikkere bevroren massa veen onder het moeras. Misschien wel een kwart van alle koolstof die sinds de laatste ijstijd door de bodem en de vegetatie op het land is geabsorbeerd, bevindt zich daar.

De vrees is nu dat als het moeras begint te dooien, het veen gaat ontbinden en zijn koolstof vrijgeeft. 's Wereld grootste koolstofput zou wel eens 's werelds grootste koolstofbron kunnen worden. In tegenstelling tot de tropische moerassen van Borneo, die kooldioxide produceren als ze branden, zullen de Siberische venen in vochtige omstandigheden ontbinden wanneer de permafrost smelt. In de stinkende moerassen en meren, die geen zuurstof bevatten, zullen ze methaan produceren. Methaan is een krachtig, snelwerkend broeikasgas, in potentie honderd keer sterker dan kooldioxide. De snelle uitstoot in zulke hoeveelheden van het gas is als een atmosferische tsunami die de hele planeet in warmte zou dompelen. Maar we hoeven niet eens meer de voorwaardelijke wijs te gebruiken. Lees 'dompelt' voor 'zou dompelen'.

In de zomer van 2005 ontving ik een merkwaardige e-mail van een man die ik nooit had ontmoet en met wie ik ook nooit eerder had gecorrespondeerd, een jonge ecooloog uit Siberië, een zekere Sergej Kirpotin van de Staatsuniversiteit Tomsk, in het hart van Siberië. Een medewerker van hem aan de universiteit van Oxford had mij aanbevolen als westerers doorgeefluik voor wat Kirpotin in zijn e-mail een 'dringende boodschap voor de hele wereld' noemde. Kort tevoren had hij een expeditie ondernomen dwars door de duizenden kilometers lege vlakten van de West-Siberische veenlanden, tussen de grauwe, winderige steden Chatanij-Mansijsk,

Pangodij en Novij Oerengoj. Daar leeft niemand, behalve hier en daar een rendierhoeder. Kirpotin en zijn collega's hadden het gebied in de afgelopen vijftien jaar herhaaldelijk bezocht om de ogenschijnlijk onveranderlijke geografie en biologie van de toendra te bestuderen. Deze keer vonden ze een enorme verandering.

'We hadden nog nooit zoiets gezien en we hadden het ook niet verwacht,' zei hij. Enorme gebieden bevroren veenmoeras waren plotseling gaan smelten. De vroeger zo sponzige mosbodem veranderde in een merenlandschap dat zich honderden kilometers ver uitstreckte. Hij beschreef het als een 'ecologische landverschuiving die waarschijnlijk onomkeerbaar is en ongetwijfeld te maken heeft met de opwarming van het klimaat'. De meeste meren, zei hij, waren gevormd sinds zijn vorige bezoek drie jaar eerder. Er was duidelijk groot gevaar dat het smeltende veenland methaan zou gaan produceren.

Ik had wel eerder Russische wetenschappers met maffe theorieën ontmoet die te lang in de toendra hadden gezeten. Maar Kirpotin hoorde daar niet bij. Hij was onlangs benoemd tot vice-rector van zijn universiteit. En hoe meer ik zijn verhaal checkte, hoe waarschijnlijker het werd. Larry Smith van de University of California in Los Angeles vertelde me dat het West-Siberische veenmoeras sneller opwarmt dan welke plek op aarde dan ook. Elk jaar begon de voorjaarsmelt eerder en nam de regen toe, waardoor het hele landschap natter werd, zei hij.

Andere onderzoekers vonden grote methaanemissies in die regio. Katey Walter van de University of Alaska in Fairbanks had op een bijeenkomst van de US Arctic Research Consortium een paar weken eerder een lezing gehouden over 'hotspots' van methaanemissies in meren van Oost-Siberië, waarin ze zei dat die 'in niets leken op wat eerder was waargenomen'. Veen op de bodem van meren werd omgezet in methaan en borrelde zo snel naar de oppervlakte dat de meren niet meer dichtvroren in de winter. En Euan Nisbet

van het Londense Royal Holloway College, die de supervisie heeft over een groot internationaal methaanprogramma dat ook Siberië bestrijkt, zei te schatten dat de veenmoerassen in West-Siberië wel 100.000 ton methaan per dag uitstoten, wat een opwarmingseffect heeft dat groter is dan alle door de mens veroorzaakte emissies in de Verenigde Staten bij elkaar. 'Die gigantische methaanstroom is het gevolg van de temperatuur,' zei hij. 'Als veenland natter wordt door de opwarming en de smelting van de permafrost, dan zal de methaanuitstoot van veenland in de atmosfeer spectaculair toenemen.'

Dus ik schreef een artikel over Kirpotins verhaal in de *New Scientist*, waarin ik de nadruk legde op het methaanaspect. Het ging de hele wereld rond. De Londense *Guardian* nam de volgende dag het meeste eruit op de voorpagina over, onder de kop: 'Opwarming bereikt "omslagpunt"'. In *Dr. Strangelove* ontketende één atoombom op Siberië de lancering van nog duizenden atoombommen meer. Hier, in de echte wereld van smeltende permafrost, kon een bepaalde mate van opwarming van de aarde genoeg methaan vrijmaken om de temperatuur met ettelijke graden te doen stijgen.

Een paar jaar eerder had ik Siberië bezocht. Ik maakte toen een reis samen met westerse bos- en oliedeskundigen naar Noyabr'sk, een grote oliestad aan de zuidkant van het grote veenmoeras. Tijdens een reeks helikoptervluchten had ik duizenden vierkante kilometers van nog intact moeras gezien boven op de permafrost. Het landschap zat vol afschuwelijke littekens van menselijke activiteit: in stukken gedeeld door oliepijplijnen, wegen, hoogspanningsleidingen en paden voor seismische metingen, besmeurd met olie, bezaaid met achtergelaten vaten, pijpen, kabels en de overblijfselen van oude goelags en half afgebouwde spoorwegen, en dat alles onder een laag zwarte rook afkomstig van gasfakkels. De rendieren waren gevlucht, en er was zoveel op de beren gejaagd dat ze haast waren uitgestorven. Maar het veenmoeras

en de permafrost hadden het overleefd. De helikopter landde normaal en we sprongen op de sponsachtige bodem zonder zelfs maar natte voeten te krijgen.

Nu niet meer. Onderweg naar een ontmoeting met Kirpotins collega's op het researchstation in Pangody op de poolcirkel vloog ik twee uur boven een uitgestrekt moeras dat zo te zien aan het smelten was. In plaats van het groene mosparket waren er nu, zoals Kirpotin me verteld had, talloze meren die zich tot de horizon uitstrekten. Vanuit de lucht zagen ze er niet uit als de natuurlijke meren die zich in holten in het landschap vormen. Ze waren over het algemeen rond en leken meer op vol water gelopen gaten in een weg. En vol water gelopen gaten waren het ook min of meer. De meren hadden zich allemaal gevormd in breuken in de permafrost. Op elk punt waar het ijs in water veranderde vormde zich een klein vijvertje. Vervolgens vielen stukken bevroren veen in het water en groeide de vijver in concentrische cirkels aan, totdat kilometers bevroren veenmoeras tot één grote massa meren was gesmolten.

'Westerse wetenschappers kunnen zich de schaal van de smelting niet voorstellen,' had Kirpotin me verteld. Maar ik zag het beneden me toen ik naar het oosten vloog. Het leek me dat er een positieve feedback werkzaam was, net zoals bij het versnelde smelten van het Noordpoolijs in zee. Het nieuwe gesmolten oppervlak was donkerder dan het oude bevroren oppervlak, absorbeerde meer warmte en veroorzaakte meer opwarming. Kirpotin was het met me eens. Het leek erop, zei hij, dat er een 'kritische drempel' was waar voorbij 'het proces van opwarming plotseling essentieel veranderde. Een of ander schakelmechanisme werd in werking gesteld en het proces van degradatie van de permafrost begon zichzelf te stimuleren en voorwaarts te stuwen.' Zijn slechte Engels maakte de gebeurtenissen die hij beschreef op de een of andere manier nog indrukwekkender. 'Het probleem waar het om gaat heeft niet alleen een wetenschappelijk karakter, maar heeft het toneel van de wereldpolitiek betreden. Als de

mensheid geen ernstige sociale en economische verliezen als gevolg van de opwarming van de aarde wil lijden, dan zijn dringende maatregelen nodig. Het is duidelijk dat de tijd om te handelen dringt.’

Ik slaagde er niet in die processen in de Siberische veenmoerassen aan de grond te zien. Ik landde met alle vereiste papieren in Novy Urengoi, maar werd toch de toegang geweigerd. ‘U moet een speciale uitnodiging hebben van een organisatie in de stad,’ zei een vervaarlijke politieagente op het vliegveld terwijl ze mijn paspoort in beslag nam en het in een kluis wegborg. Dit was een bedrijfsstad. Ik kwam er later achter dat de burgemeester, die benoemd was door de gasmaatschappij, enkele maanden daarvoor toestemming van Moskou had gekregen voor speciale regels om ongewenste vreemdelingen buiten te houden. Novy Urengoi was een van Ruslands weinige nog bestaande gesloten steden.

Het was ook een nogal wanordelijke stad. Ik werd niet bewaakt en liep dus toch de stad in, een van de meest desolate en onherbergzame waar ik ooit geweest ben. Geen wonder dat zijn naam in de taal van de plaatselijke rendierherders ‘godverlaten plaats’ betekent. Ik had een korte ontmoeting met de wetenschapper voor wie ik halve wereld had rondgereisd om hem te spreken. Daarna werd ik opgehaald door een griezels in een pak met vest en een glimlach zoals die van Poetin en terug naar het vliegveld gereden. Hij scheen te denken dat ik een terrorist was, en het feit dat ik met wetenschappers sprak die de toendra bestudeerden maakte hem alleen nog maar achterdochtiger. Ik kon in elk geval zeggen dat ik Siberië was uitgezet.

In eigen land was de zorg over de rol van methaan in het aanvuren van de opwarming van de aarde toegenomen. Begin 2006 had een dramatische studie uitgewezen dat wellicht alle planten, niet alleen die in veenmoerassen, methaan produceren – iets waar de wetenschappers nooit eerder bij stil

hadden gestaan. Dat gaf aanleiding tot krantenkoppen die zeiden dat bomen de aarde opwarmden, en dat was niet helemaal fair tegenover die bomen. Ze produceren weliswaar methaan, maar ze absorberen ook kooldioxide. En aangezien bomen al miljoenen jaren bestaan en er waarschijnlijk nu minder zijn dan in de meeste van die miljoenen jaren, lijkt het niet waarschijnlijk dat ze een rol hebben gespeeld in de recente opwarming. Ze zijn gewoon onderdeel van de natuurlijke stroom van chemische stoffen die de atmosfeer in en uit gaan. Maar als blijkt dat ze door de opwarming van de aarde meer methaan uitstoten dan vroeger, dan is dat erg zorgwekkend. En dat is precies wat er schijnt te gebeuren met de veenmoerassen in de noordelijke permafrost. Het laatste woord is hierover zeker nog niet gesproken.

Er loopt een kritische lijn rond de poolstreek die de zone afbakt van de maximum impact van opwarming. Het is een 'frontlijn' van klimaatverandering, de zogenaamd nul-isotherm, waar de gemiddelde jaartemperatuur 0 graden C is, het smeltpunt van ijs. Ten noorden van die lijn liggen ijs en sneeuw, bevroren bodem en toendra. Ten zuiden daarvan liggen rivieren en meren en vruchtbare grond waarin bomen groeien. De lijn loopt midden door Siberië en Alaska – waar gigantische blokken bevroren bodem, die duizenden jaren stabiel zijn gebleven, nu smelten – dwars door Canada, vlak langs de zuidkust van de Hudsonbaai, door de zuidpunt van Groenland en door Noord-Scandinavië.

Nu ik er niet in was geslaagd het veldstation van Kirpotin te bezoeken om het smelten van de Siberische veenmoerassen van dichtbij te bekijken, ging ik in plaats daarvan naar Noord-Zweden, naar wat vrijwel zeker het langst continu geobserveerde veenmoeras aan de Noordpool is. In 1903 namen wetenschappers gebouwen over die waren opgetrokken in de buurt van Abisko voor de bouw van een spoorweg die ijzererts uit de Zweedse mijn Kiruna naar de Noorse haven Narvik moest vervoeren. En ze zijn er altijd gebleven: tijdens

de middernachtzon en de lange donkere winters maten ze de temperatuur en noteerden ze de data van het komen en gaan van het ijs in het nabij gelegen Tornetrask Meer, ze brachten de bewegingen van de boomlijn in kaart, ze onderzochten de ecosystemen van het veenmoeras, ze reconstrueerden het klimaat in het verleden aan de hand van de jaarringen in de blokken hout in het meer en ze onderzochten de kosmische krachten achter het spectaculaire noorderlicht van dat gebied.

Dus ze hebben een solide basis als ze zeggen dat het hier dramatisch warmer wordt. Het meer befrist een maand later dan een paar decennia geleden: in januari in plaats van half december. Vroeger bleef het bevroren tot eind mei, maar in de afgelopen jaren is het verschillende keren gebeurd dat het jaarlijkse ijsvisfestival van begin mei op het meer moest worden afgelast omdat het ijs al was gaan kruien. De gemiddelde jaartemperatuur was hier in de afgelopen eeuw $-0,7$ graden C, maar in de laatste jaren is die tot net boven nul gestegen.

Even ten oosten van Abisko ligt het Stordalen-moeras. Het is geen groot veenmoeras, maar het is oud en waarschijnlijk het best geobserveerde in de best geobserveerde regio van de Noordpool. Het heeft talloze perioden van natuurlijke klimaatverandering in de laatste vijfduizend jaar doorstaan. Maar ineens leek het tot de ondergang gedoemd. Want hier, zoals Kirpotin trouwens in het hele West-Siberische drasland heeft geconstateerd, zie je met iedere stap de onmiskenbare aanwijzingen voor wat er gebeurt met een veenmoeras dat zich op de nulisotherm bevindt. Behalve de wetenschappers zijn vogelaars de enige bezoekers van het moeras, en voor hen hebben de autoriteiten een paar jaar geleden een netwerk van loopschotten aangelegd. Maar die schotten kantelen nu al, omdat de heuveltjes permafrost waarop ze liggen aan het smelten zijn en in de nieuw gevormde vijvers wegzakken.

Ik arriveerde nogal spectaculair aan boord van een helikopter die was gehuurd om een paar uitrustingsstukken van

het centrum te halen, en ik vond een droog heuveltje om te praten met Torben Christensen, een Deense biochemicus die hoofd is van het researchcentrum hier. 'Het moeras verandert heel erg snel,' zei hij. Onder onze voeten was de permafrost nog steeds wel 10 meter diep, maar een stap verderop was hij weg. We inspecteerden een scheur in het veen, waar weer een stuk op het punt stond in het water te glijden. 'Van alle plekken op aarde verwacht je hier, op de nulisotherm, aan de rand van de permafrost, de klimaatverandering in actie te zien. En dat is ook precies wat we zien. Natuurlijk gebeurt het op veel grotere schaal in de Siberisch moerassen, maar hier meten we alles.'

In het moeras heeft Christensen een aantal van de modernste apparaten te wereld staan voor het meten van gasmissies in de atmosfeer. In een bepaald deel groeien afzonderlijke moerasplanten in doorzichtige plastic dozen, waarvan de deksels automatisch open en dicht gaan voor het meten van de uitwisseling van gassen tussen de planten en de atmosfeer. Het *pièce de résistance* is een micrometeorologische toren die gebruikmaakt van de zogenaamde 'eddy-correlatietechniek'. Daarbij wordt elk klein windstroompje in de omringende lucht, verticaal zowel als horizontaal, gemeten en opgetekend, en worden met behulp van een laser de voorbijkomende moleculen methaan en andere gassen gedetecteerd. Door de twee datasets te correleren kan een constante en nauwkeurige aflezing van de methaanstroom uit het moeras worden verkregen.

Er komt nu gestaag methaan vrij uit het moeras, zegt Christensen. Een deel daarvan lekt uit de moerassige bodem, een ander deel borrelt op door het water in de vijvers en weer een ander deel wordt door planten naar de oppervlakte gebracht. De aantallen lijken klein: gemiddeld komt 6 milligram methaan per vierkante meter per uur vrij. Maar bij elkaar opgeteld is die uitstoot een broeikas-opstopper. Christensen schat, op basis van de stromingsgegevens, tezamen met satellietbeelden van de veranderende vegetatie in het

Stordalen-moeras, dat de uitstoot van methaan in de laatste dertig jaar met dertig procent is toegenomen, waardoor de bijdrage van dit kleine moeras aan de opwarming van de aarde met 50 procent is gestegen.

Er is niks vreemds met Stordalen. Het werd niet uitgekozen om spectaculaire resultaten op te leveren. De metingen begonnen in de tijd dat de onderzoekers alleen maar processen wilden registreren waarvan ze dachten dat ze onveranderlijk waren. Met andere moerassen in de buurt is het nog erger gesteld, naarmate de nulisotherm noordwaarts opschuift. In het nabijgelegen berkenbos is het veenmoeras Katterjokk in slechts vijf jaar tijd veranderd in een ijsvrije zone, terwijl het vroeger grotendeels rustte op een ondergrond van permafrost. Stordalen lijkt eerder typisch voor de gebieden rond de nulisotherm in het noorden van Scandinavië. Afzonderlijk zijn ze maar speldenprikken in de klimaatverandering, maar tezamen dreigen ze een explosief karakter aan te nemen.

In de behaaglijke bibliotheek van Abisko vond Christensen een studie die aantoonde dat de helft van de permafrost in de moerassen van Noord-Finland sinds 1975 is verdwenen. De rest zal tegen 2030 weg zijn. Christensen zelf heeft een onderzoek gecoördineerd van methaanemissies uit veengebieden rondom de poolcirkel, waarbij hij tijdelijk geplaatste apparatuur gebruikte voor het meten van gasstromen. Ten noorden van de nulisotherm verandert er weinig volgens dat onderzoek. Een paar kleine methaanbelletjes uit de toendra in Noordoost-Groenland, bijvoorbeeld, waar de temperatuur nog steeds rond de -10 graden C schommelt. Maar, zegt hij, 'naarmate de temperatuur stijgt, neemt de methaanuitstoot exponentieel toe'. De hoogste uitstoot vindt plaats in West-Siberië en Alaska, waar de temperatuur heel hard stijgt.

Wat er in die poolmoerassen gebeurt is in een bepaald opzicht heel subtiel. In veel daarvan blijft de temperatuur laag genoeg om ontbinding van vegetatieresten te beperken, en dus hoopt de koolstof zich nog steeds op, zoals dat altijd is gebeurd sinds de vorming van de moerassen aan het eind

van de laatste ijstijd. Maar het ontbindingsgetal neemt toe en het gevaarlijke is dat vanwege het smelten van de permafrost steeds meer koolstof vrijkomt in de vorm van methaan in plaats van kooldioxide. Dat verandert het klimaateffect van de moerassen drastisch. Methaan is een zeer krachtig broeikasgas en de opwarmende invloed van de uitstoot van methaan overtreft de afkoelende invloed van de voortgaande absorptie van kooldioxide. Dus, zegt Christensen, 'hoewel moerassen nog steeds een koolstofput zijn, dragen ze toch bij aan de opwarming van de aarde. Dat is misschien voor veel mensen moeilijk te begrijpen, maar het is een absoluut cruciaal gegeven voor wat er rond de poolstreek gebeurt.'

Er zijn nog steeds zo weinig harde gegevens dat het moeilijk te zeggen is hoeveel de veenmoerassen in de poolstreek op dit moment bijdragen aan de opwarming van de aarde. De huidige methaanemissies blijven waarschijnlijk nog onder de 50 miljoen ton per jaar. Maar dat is nog steeds het opwarmingsequivalent van ruim een miljard ton kooldioxide. En nu er overal meren gevormd worden en de klimaatmodellen voorspellen dat 90 procent van de permafrost aan de Noordpool tegen het jaar 2100 tot een diepte van 3 meter zal zijn gesmolten, is 'methaan een alarmerend potentieel voor positieve feedback op het klimaat geworden,' zegt Christensen.

Larry Smith schat dat de noordelijke veenmoerassen van Siberië, Canada, Scandinavië en Alaska in totaal wel zo'n 450 miljard ton koolstof kunnen bevatten, ofwel een derde van alle koolstof in de hele toplaag van de aardbodem. Als al die koolstof in de vorm van kooldioxide vrijkwam, dan zou dat de gemiddelde wereldtemperatuur nog eens 3 graden C extra verhogen. Maar als het meeste daarvan in de vorm van methaan vrijkomt, dan kan het op korte termijn een veel grotere opstoot geven. Hoe groot, hangt af van de snelheid waarmee het methaan vrijkomt, omdat na ongeveer tien jaar het methaan wordt omgezet in kooldioxide. Als al het methaan in één keer vrijkomt, kan de temperatuur wereldwijd

tientallen graden stijgen. Dat is misschien een onwaarschijnlijk scenario, maar toch dienen we er goed rekening mee te houden dat smelten boven de nulsotherm een grote invloed zal uitoefenen op het klimaat in de eenentwintigste eeuw. Van Stordalen tot Pangody staat de doemmachine op scherp.

15 Het zuurbad

Wat kooldioxide doet met de oceanen

De oceanen zijn de ultieme zinkput voor het merendeel van de warmte van de zon en ook voor het merendeel van de broeikasgassen die we in de atmosfeer pompen. De atmosfeer mag dan de ruimte zijn waarin wij leven en ademen, voor de planetaire systemen op langere termijn is ze alleen maar een opslagruimte. Op elk moment bevat het zeewater vijftig keer meer kooldioxide dan de lucht. Gegeven voldoende tijd kunnen de oceanen het overgrote merendeel opnemen van wat wij in de atmosfeer uitstoten. Maar tijd is nu juist wat we niet hebben, en het geduld van de oceanen met onze activiteit zou wel eens beperkt kunnen zijn.

Er is een constante uitwisseling van kooldioxide tussen de zeespiegel en de atmosfeer. En vanwege de steeds stijgende concentraties in de atmosfeer worden er nu ongeveer 2 miljard ton meer per jaar door de oceanen geabsorbeerd dan uitgestoten. Een groot deel van dat overschot zakt uiteindelijk naar de oceaانبodem, na te zijn opgenomen door groeiende organismen – een proces dat vaak de ‘biologische pomp’ wordt genoemd. Soms zinken er zoveel skeletten naar de diepzee dat biologen het ‘mariene sneeuw’ noemen.

De oceanen zijn dan wel de ultieme zinkput voor de meeste kooldioxide, maar het is niet zo dat ze simpelweg alle overtollige kooldioxide uit de atmosfeer absorberen. De relatie is veel dynamischer – en veel minder betrouwbaar. Op de lange termijn schijnt de kooldioxide te zigzaggen tussen de oceanen aan de ene kant en de atmosfeer en de landvegetatie aan de andere. Landplanten hebben het over het algemeen graag warm, dus de ‘voorraad’ koolstof op het land is groter

tijdens warmere interglaciale perioden, zoals nu, en kleiner tijdens de ijstijden. Het oppervlaktewater van de oceanen daarentegen absorbeert meer kooldioxide als het water koud is. De oorzaak daarvan schijnt te zijn dat het plankton, dat de basis is van het leven in de oceanen, de voorkeur geeft aan koud water, en gedeeltelijk ook omdat, als het land koud en droog is, er door stofstormen grote hoeveelheden mineralen worden aangevoerd die de oceanen bemesten.

In de laatste ijstijd, werden zo'n 200 miljard ton koolstof van het land en de atmosfeer naar de oceanen verplaatst. Dat proces zette de ijstijden niet in gang, maar het was wel een zeer krachtige positieve feedback die de koeling aandreef. En dat baart zorgen. Want als het ijstijdenpatroon klopt, dan kunnen toekomstige generaties erop rekenen dat de biologische pomp van de oceanen minder goed gaat werken naarmate de aarde opwarmt en dat er grote hoeveelheden kooldioxide in de lucht komen.

Dat is in elk geval het standpunt dat, in een lang artikel over de koolstofkringloop in *Science*, naar voren werd gebracht door Paul Falkowski van Rutgers University in New Brunswick. 'Als onze huidige kennis over de koolstofkringloop van de oceanen juist is, dan zal de capaciteit van de oceanen als zinkput afnemen, waardoor een groter percentage van de door de mens geproduceerde kooldioxide in de atmosfeer blijft.' Gezien de tientallen miljoenen ton koolstof die elk jaar tussen de atmosfeer en de oceanen worden uitgewisseld, is er maar een kleine verandering nodig om de oceaan van een koolstofput te veranderen in een potentieel zeer krachtige koolstofbron. Misschien gebeurt dat al. In 2003 publiceerde Watson Gregg, een wetenschapper van NASA, satellietmetingen die erop wezen dat de biologische productiviteit van de oceanen sinds de jaren 1980 misschien wel met 6 procent is gedaald. Dat zou onderdeel kunnen zijn van een natuurlijke cyclus, zei hij, maar het zou ook een vroeg teken kunnen zijn dat de biologische pomp vertraagt door het opwarmen van de oceaan.

Tot dusver hebben de oceanen sinds de Industriële Revolutie ongeveer 120 miljard ton door de mens geproduceerde koolstof uit de atmosfeer geabsorbeerd. Daarvan is weliswaar veel naar de zeebodem gezonken, maar een aanzienlijk deel blijft opgelost in het zeewater. Met een uniek en nogal opmerkelijk effect: de oceanen worden zuurder.

Het koolzuur dat gevormd wordt wanneer kooldioxide in zeewater oplost veroorzaakt corrosie en is vooral schadelijk voor de organismen die calciumcarbonaat nodig hebben voor hun schelpen of skeletten. Daartoe behoren koralen, zee-egels, zeesterren, vele schelpdieren en een deel van het plankton. Niet alleen worden de organismen aangetast, maar het zuur vermindert ook de concentratie van het carbonaat in het water, waardoor ze van de chemische stoffen beroofd worden die ze nodig hebben om te groeien.

De zuurgraad, gemeten als het aantal waterstofionen in het water, is al 30 procent hoger. Anders gezegd: de pH is 0,1 gedaald, van 8,2 naar ongeveer 8,1. Als de oceanen doorgaan grote hoeveelheden overtollige kooldioxide uit de atmosfeer te absorberen, dan zal de zuurgraad in de tweede helft van deze eeuw verdrievoudigd zijn, met mogelijk grote schade aan het ecosysteem in de oceanen. De meest kwetsbare oceaan is waarschijnlijk de afgelegen Zuidzee. Die ligt ver van het land en heeft dus nu al een tekort aan carbonaat, met name in de vorm van het zogenaamde aragoniet, dat cruciaal schijnt te zijn voor de groei van organismen.

Een rapport van de Britse Royal Society waarschuwde dat 'koralen tegen 2050 zeldzaam kunnen worden op de tropische en subtropische riffen zoals het Great Barrier Reef. Dat zal grote consequenties hebben voor honderdduizenden soorten die op de riffen leven en de mensen die van ze afhankelijk zijn.' Andere soorten kunnen stikken of sterven door gebrek aan energie. Zeedieren die veel energie verbruiken, zoals inktvissen, hebben veel zuurstof nodig, maar de hoge concentratie kooldioxide zal de opname van zuurstof uit het zeewater belemmeren.

‘Het is nog vroeg dag,’ zegt Carol Turley van het Plymouth Marine Laboratory, een van de gezaghebbende instituten op dit gebied. ‘De experimenten zijn nog maar net op gang gekomen.’ Maar een van de uitkomsten is al binnen. James Orr van de Laboratoires des Sciences du Climat et de l’Environnement in Frankrijk zette kleine slakjes, zogenaamde pteropoden, in een aquarium en stelde ze bloot aan de samenstelling van het zeewater zoals die voor later deze eeuw verwacht wordt. Die beestjes leven in alle zeeën en zijn van levensbelang voor veel ecosystemen. Ze zijn de meest voorkomende soort in sommige wateren rond de Zuidpool, waar er wel duizend in één kubieke meter zeewater kunnen zitten. Niet alleen zijn pteropoden een belangrijke voedselbron voor alle organismen in zee, van vissen tot walvissen, maar ze zijn ook de belangrijkste spelers in de biologische pomp.

Orr vond dat het zuur binnen een paar uur gaten in de schelpen van de pteropoden brandde. Binnen een paar dagen begonnen de schelpen los te laten en kwam het weke vlees daaronder bloot. In de echte wereld zouden roofdieren door de verzwakte schelpen breken en zouden de slakken het niet overleven, concludeert hij. De ondergang van de pteropoden zou een ‘grote reductie in de biologische pomp teweegbrengen’, schreef de Royal Society instemmend. Binnen een paar decennia zouden de oceanen zuurder kunnen worden dan op enig moment in de afgelopen 300 miljoen jaar.

Wat de uitkomst ook is, we zien hier het begin van een onverwacht en schrikbarend bijverschijnsel van de toegenomen concentratie kooldioxide in de atmosfeer. Wat misschien wel het dichtst bij de huidige toestand komt is de situatie op aarde zoals die 55 miljoen jaar geleden was. Dat was de laatste keer dat er in korte tijd een grote hoeveelheid koolstof in de atmosfeer werd gebracht...

16 De wind waait uit een andere hoek

Tsunami's, megascheten en fonteinen uit de diepte

Het was de grootste scheet die de aarde ooit had gelaten. Vijfenvijftig miljoen jaar geleden barstte er meer dan duizend miljard ton methaan uit de oceaan, waardoor de temperatuur 10 graden C omhoog schoot en twee derde van alle levende soorten in de oceanen uitstierven en een geweldige evolutionaire schok over het aardoppervlak ging. Het verhaal speelt zich in het verre verleden af, maar het herinnert ons eraan dat methaan in gigantische hoeveelheden op vele plaatsen van onze planeet op de loer ligt – niet alleen in bevroren moerassen – en dat het ooit op een dag in catastrofale hoeveelheden vrij kan komen.

Een eerste vleugje van deze prehistorische megascheet werd in 1991 opgevangen uit een gat van twee kilometer diep dat in een onderaardse bergrug vlak voor de kust van de Zuidpool was geboord. Na onderzoek van de verschillende lagen oeroud sediment die uit het gat waren gehaald vonden de geologen James Kennett van de University of California in Santa Barbara en Lowell Stott van de University of Southern California in Los Angeles aanwijzingen voor een plotseling uitsterven van organismen die 55 miljoen jaar geleden op de zeebodem leefden. Die soorten waren naar het scheen binnen een paar honderd jaar, misschien wel minder, verdwenen. Kennett en Scott ontdekten al gauw dat andere onderzoekers aanwijzingen voor soortgelijk uitsterven in dezelfde periode hadden gevonden in mariene sedimenten van zowel het Caribisch gebied als Europa. Het ging duidelijk om een wereldwijde gebeurtenis – een van de omvangrijkste uitstervingen in de geschiedenis van de aarde.

Wat was er gebeurd? In de chemie van de fossielen uit de opgeboorde sedimenten vonden de twee geologen een paar intrigerende aanwijzingen. Zo was er een plotselinge verandering in de verhouding tussen twee typen, ofwel isotopen, van zuurstof, die bekend staan als O-18 en O-16. De verhouding in de natuur van die twee typen zuurstof is erg gevoelig voor temperatuur, en die isotopische ‘signatuur’ in de sedimenten en ijskernen is een veel gebruikte indicator voor de temperatuur in het verleden. Kennett en Stott kwamen tot de conclusie dat de oceaantemperatuur, na eerst miljoenen jaren geleidelijk te zijn gestegen, ongeveer 55 miljoen jaar geleden plotseling veel scherper omhoog schoot. De temperatuurverandering viel samen met het uitsterven.

De sedimenten brachten ook een tweede isotopische verschuiving aan het licht, deze keer tussen isotopen koolstof. Het organisch materiaal van de aarde bevatte ineens veel meer koolstof-12 (C-12). Ergens vandaan waren duizenden miljarden ton van het spul in het milieu gekomen. Het was duidelijk dat een broeikasgas, kooldioxide of methaan, voor beide veranderingen had gezorgd. Het probleem was een bron te vinden die de capaciteit had om dat karwei te klaren.

Jerry Dickens, een biochemicus van James Cook University in Townsville, Australië, nam de taak op zijn schouders om erachter te komen waar dit C-12 vandaan kon zijn gekomen. De eerste mogelijkheid was kooldioxide van vulkaanuitbarstingen, een belangrijke bron van C-12 in de moderne atmosfeer. Maar, zo zegt Dickens, daarvoor zou een jaarlijkse hoeveelheid vulkaanuitbarstingen nodig zijn geweest die honderd keer groter is dan het gemiddelde van de afgelopen miljard jaar. Fossiele brandstoffen zoals kolen, olie en aardgas waren mogelijke bronnen. Maar die zitten voor het merendeel veilig in gesteenten opgesloten. Aangezien er destijds geen mensen waren om ze op te graven en te verbranden, leek ook dat een onwaarschijnlijke optie. Ook methaan uit moerassen en draslanden, zoals ze tegenwoordig in Borneo

en Siberië voorkomen, werd uitgesloten. Daar waren er destijds ongeveer drie keer zoveel van als nu. Maar evengoed zouden ze de vereiste hoeveelheid C-12 niet hebben kunnen leveren. Dan bleef er nog één bron over, een die groot genoeg en toegankelijk genoeg was om een klimaatomwenteling teweeg te brengen. Dat, opperde Dickens, moesten wel de enorme voorraden methaan zijn die de geologen recentelijk hebben ontdekt in de sedimenten onder de oceaan: de methaanclathraten.

Methaanclathraten zijn een raadsel. Tot voor kort waren ze aan de aandacht ontsnapt van olie- en gasprospectors, omdat ze niet voorkomen in het soort diepe, gesloten geologische formaties waar prospectors gewoonlijk naar fossiele brandstoffen zoeken. Ze liggen meestal dicht onder de zeebodem, niet ingesloten door fysieke barrières, maar door hoge druk en lage temperatuur bevroren in een rooster van ijskristallen, ongeveer zoals een honingraat. De wetenschappers zijn het er nog niet over eens hoe en wanneer ze precies gevormd zijn, maar ze schijnen te ontstaan wanneer koud zeewater in contact komt met methaan dat wordt geproduceerd door microben die onder de zeebedding leven. Seismische peilingen hebben die structuren aan het licht gebracht in de bovenste paar honderd meter sedimenten onder tienduizenden vierkante kilometer oceaan, meestal vlak over de rand van continentale plateaus. Veel van die bevroren clathraten houden zelfs nog grotere voorraden gasvormig methaan vast dat daaronder zit en dat door de warmte van de aardkern behoed wordt voor bevroering.

Dickens schat dat er op dit moment tussen de 1 en 10 biljoen ton methaan in of onder de clathraten wordt vastgehouden. Maar die opsluiting zou wel eens niet blijvend kunnen zijn. Als de druk wordt weggenomen of de temperatuur verhoogd, dan wordt de roosterstructuur verbroken en ontsnapt het methaan door de sedimenten in het zeewater en uiteindelijk in de atmosfeer. Het lijkt erop dat zo'n soort gebeurtenis 55 miljoen jaar geleden heeft plaatsgevonden. Bovendien,

als dit de bron was van de grootste uitstoot van C-12, dan verklaart het ook waarom het uitsterven het grootst was in de diepzee, waar vrijwel zeker de oceaan het meest verzuurd zal zijn geweest. 'Nu schijnt vrijwel iedereen aan te nemen dat het vrijkomen van methaanclathraten de enige plausibele verklaring is voor wat er gebeurde,' zegt Dickens.

Zijn chronologie is als volgt. Zeven miljoen jaar lang warmde de aarde op, waarschijnlijk door buitenaardse invloeden zoals de zon. De opwarming verwarmde geleidelijk aan de sedimenten op de zeebodem, tot de clathraten verbrijzelden, waardoor methaan vrijkwam. Misschien gebeurde het in fasen, waarbij de opwarming methaan vrijmaakte dat weer voor verdere opwarming zorgde die weer meer methaan vrijmaakte. Maar in elk geval, binnen een paar eeuwen, of op z'n hoogst een paar duizend jaar, werden biljoenen ton methaan in de atmosfeer uitgestoten – voldoende om de waargenomen wereldwijde verschuiving in de verhouding tussen de koolstofisotopen en een langdurige stijging van de temperatuur te veroorzaken.

'De wereld raakte in een chaotische toestand,' stelt Dickens. Het leven op aarde veranderde op bijna dezelfde schaal als na de inslag van een planetoïde 10 miljoen jaar eerder, die voor het uitsterven van de dinosaurussen zorgde. Toen de methaanuitstoot ophield, absorbeerden de aardse ecosystemen gaandeweg de overblijfselen van de grote scheet, en het klimaat hervond zijn evenwicht en de oceanen kwamen weer tot rust. Maar de evolutionaire consequenties van die gebeurtenis in het verre verleden werken tot op de huidige dag door. Tegen de tijd dat het klimaat zich had hersteld, waren veel soorten op het land en in zee uitgestorven, terwijl andere als gevolg van de hogere temperaturen waren geëvolueerd en tot bloei gekomen.

'Tegelijk met de grote opwarming vond er een belangrijke evolutie en verspreiding van nieuwe zoogdieren plaats,' zegt Chris Beard, een paleontoloog van het Carnegie Museum of Natural History in Pittsburgh. Het was 'het begin van het

tijdperk van de zoogdieren'. Onder de organismen die op evolutionaire drift raakten waren allerlei soorten hoefdieren – de voorlopers van de paarden, de zebra's, de neushoorns, de kamelen en de runderen – en primaten. En een van de nieuwe primaten die evolueerden in het warme klimaat waren de omomyiden, de voorlopers van de aapachtigen, die op hun beurt weer de mens voortbrachten.

Zou zo'n ramp opnieuw kunnen gebeuren? Misschien in de eenentwintigste eeuw? Er zit in elk geval genoeg methaan onder de zeebodem. Maar zou de huidige opwarming van de aarde die vrij kunnen maken? Volgens sommigen is het niet erg waarschijnlijk: het zeewater is nog steeds veel kouder dan 55 miljoen jaar geleden. Maar Deborah Thomas van de University of North Carolina, die de gebeurtenis in detail heeft bestudeerd, is niet zo zeker. Het zeewater is misschien nog steeds kouder, maar het warmt ook veel sneller op dan 55 miljoen jaar geleden. En het tempo van verandering kan even gevaarlijk zijn als de omvang. Als dat zo is, dan 'kan de trekker van het clathraat veel gemakkelijker worden overgehaald dan 55 miljoen jaar geleden.'

Er zijn veel redenen waarom een zeewaardig schip zonder enige waarschuwing van de oceaan kan verdwijnen. Het kan getroffen worden door een reuzengolf, omver worden gekiept door duikboten, lek gestoten door ijsbergen of in een storm op de klippen slaan. Zouden enorme bellen methaan die uit de diepzee opwellen ook een oorzaak kunnen zijn? Sommigen zeggen van wel. Neem het vreemde geval van Alan Judd en het Heksengat.

Judd is een Britse oceaangeoloog van de University of Newcastle die al lang belangstelling heeft voor methaan-clathraten. Eind jaren 1990 overreedde hij de Franse staatsoliemaatschappij om gigantische kraters op de bodem van de Noordzee in kaart te brengen. Geologen beschouwen die anderszins onverklaarbare kraters als de overblijfselen van methaaneruptions diep in het sediment. Op een dag verkende

de op afstand bestuurde sonde van Judd een bijzonder grote krater op 150 kilometer voor de kust van Aberdeen. Hij mat 100 meter in doorsnede en stond bij zeelieden bekend als het Heksengat. Ineens stootte de sonde ergens tegenaan. Iets groots, iets van metaal, iets onbekends, waardoor hij kapot ging.

In de zomer van 2000 ging Judd terug om erachter te komen waar zijn sonde tegenaan gebotst was. Deze keer had hij geld gekregen van een tv-maatschappij en beschikte hij over een piepklein radiografisch bestuurd duikbootje met een videocamera. Hij vond de schuldige. Het was de stalen romp van een 25 meter lange treiler die, aan de bouw te zien, uit het begin van de twintigste eeuw stamde. Het schip stond overeind op de zeebodem, midden in de krater, zo te zien zonder een gat in zijn romp. 'De boot was niet met de voor- of de achterstevan eerst gezonken, nee, hij was rechtstandig naar beneden gegaan,' zei Judd later. 'Het leek net of hij volgelopen en toen gezonken was.' Het kan zijn dat het schip in een storm was vergaan, maar 'het zou wel heel toevallig zijn dat de boot precies midden in het Heksengat terecht kwam. Het is verleidelijk om aan te nemen dat dit wijst op een catastrofale ontsnapping van gas,' zei hij.

Pogingen om het schip te identificeren en berichten uit die tijd over de schipbreuk te vinden, hebben tot dusver niets opgeleverd. Er zijn ook geen fondsen meer beschikbaar gesteld voor verdere verkenningen. Het blijft een intrigerend raadsel, en daarbij komen nog de andere verhalen over schepen die in ogenschijnlijk rustige wateren zijn verdwenen. Zo zeggen sommigen dat methaanerupties uit de diepte misschien het mysterieuze verdwijnen kunnen verklaren van schepen in het deel van de Atlantische Oceaan dat de Bermuda Driehoek wordt genoemd. Zeker is dat in dat gebied methaanclathraten zijn gevonden. Die Driehoek is met veel mythes omgeven en er worden verhalen over verteld die niet kloppen, maar deze theorie zou wel eens waar kunnen zijn. 'Als het gas naar de oppervlakte borrelt, verlaagt het de dichtheid van het

water en dus zijn opwaartse kracht,' zegt Judd. 'Een schip dat er recht boven vaart zinkt als in een liftschacht.' Iedereen die overboord springt om zich in veiligheid te brengen zinkt ook. Er blijft geen spoor van over – aan de oppervlakte.

Intussen duiken bijna overal waar clathraten zijn kraters in de zeebedding op: van de tropen tot de polen, van de Atlantische tot de Stille Oceaan en van de Noordelijke IJszee tot de Indische Oceaan en de Zuidzee. Wanneer precies methaan uit de zeebodem vrijkwam blijft voorlopig nog onzeker, maar er zijn tekenen van massale erupties. Bij Blake Ridge voor de oostkust van de Verenigde Staten hebben oceaangeologen enorme kraters zoals op de maan gevonden, van 700 meter doorsnede en soms wel 30 meter diep. En boringen wijzen uit dat er misschien nog wel 15 miljard ton bevroren methaan onder de kraters zit, en een minstens even grote hoeveelheid in gasvorm in de warmere sedimenten onder de bevroren zone. Europese onderzoekers hebben kraters van dezelfde afmetingen gevonden in de Barentssee ten zuidoosten van Spitsbergen. De vaak geciteerde schatting dat er daar tussen de 1 en 10 biljoen ton methaan onder de zeebodem zit is een beetje een schot in het duister, maar de orde van grootte klinkt goed.

De roosterstructuren waarin de methaanclathraten gevangen zitten houden alleen stand bij lage temperaturen en onder hoge druk, dus we krijgen ze zelden te zien. Af en toe komt er een brokstuk in een visnet terecht en soms blijven ze korte tijd intact aan de oppervlakte van de oceaan. Als ze aan boord van een schip worden gehesen, smelten ze bruisend, waarbij het methaan vrijkomt. Onderzoekers hebben witte brokstukken clathraat 'zo groot als radijsjes' in de modder op de bodem van de Barentssee gevonden, en soms zien ze kleine wolkjes methaan van de zeebedding naar de oppervlakte stijgen. Russische onderzoekers hebben erupties van clathraten in de Kaspische Zee gemeld die in brand vlogen 'als gigantische toortsen met vlammen van honderden meters

hoog'. Maar zelfs die gebeurtenissen zijn nog mild vergeleken met het verzamelde bewijsmateriaal dat wijst op grote catastrofes door methaanuitbarstingen in de oceaan. En die catastrofes vonden veel recenter plaats dan 55 miljoen jaar geleden.

In de kliffen aan de oostkust van Schotland zit op plaatsen een geheimzinnige grijze sliblaag van ongeveer 10 centimeter dik tussen lagen veen. Het slib lijkt niets bijzonders, maar het strekt zich honderden kilometers langs de kust uit en zit vol overblijfselen van piepkleine zeeorganismen die normaliter alleen op de zeebodem te vinden zijn. Het slib werd 8000 jaar geleden gedeponerd door een tsunami die door de Noordzee raasde na de instorting van een onderwaterklif aan de rand van het continentaal plat ten westen van Noorwegen. Het was een catastrofale gebeurtenis. De 400 kilometer lange klif stortte ruim 3 kilometer recht van de steile helling naar de diepzee en nam daarbij de verbluffende hoeveelheid van 1700 kubieke kilometer sediment mee. Het werd over een gebied bijna ter grootte van Schotland over de zeebodem verspreid.

De littekens die deze gigantische onderzeese aardverschuiving achterliet werden voor het eerst in 1979 opgemerkt door Norman Cherkis van het Naval Research Laboratory in Washington D.C. Cherkis zocht met sonarapparatuur de oceaانبodem af naar schuilplaatsen voor militaire onderzeeërs. Hij ging er aanvankelijk vanuit dat de aardverschuiving was veroorzaakt door een zeebeving, hoewel er weinig seismografische data waren die daarop wezen. Die theorie werd ondergraven door een Noorse oceaangeoloog, Juergen Mienert van de universiteit van Tromso, die zag dat het gebied van de zeebedding, Storegga genaamd, dat naar beneden was gestort, een grote hoeveelheid kraters telde die verband hielden met clathraaterupties.

Mienert merkte op dat de aardverschuiving samenviel met een stijging van 6 graden C in de temperatuur van het zeewater voor de kust van Noorwegen. Die stijging kwam

door de warme Golfstroom, die tropisch water meevoerde en die in de nasleep van de laatste ijstijd veel sterker was geworden. De sterke stroom warm water over een zeebedding die daarvóór koud was geweest, was voldoende, zei hij, om de clathraten te doen smelten. Aangezien één kubieke meter clathraat genoeg methaan bevat om onder normale atmosferische druk 160 kubieke meter gas te produceren, zullen de erupties explosief zijn geweest en de sedimenten in de zeebedding over een groot gebied hebben verstoord, waardoor nog meer methaan vrijkwam en een cataclysmische landverschuiving het gevolg was.

Mienert schat dat bij die onderzeese eruptie tussen de 4 en de 8 miljard ton methaan vrijkwam – genoeg om de temperatuur op aarde met verscheidene graden te verhogen. Zijn theorie kreeg grote aanhang toen een analyse van Groenlandse ijskernen een grote stijging van de methaanconcentraties in de lucht van die tijd aantoonde. Sommigen betogen dat de methaanuitbarsting afkomstig was van tropische draslanden die groeiden naarmate de wereld warmer en natter werd. Mienert is het daar niet mee eens, maar de kwestie is nog niet helemaal beslist.

De tsunami had in elk geval een reusachtige impact. Een golf van 12 meter hoog sloeg op de Noorse kust en deponeerde slib boven de kustlijn in Schotland. De Shetland Eilanden vingen de zwaarste klap op: er kwamen minstens twee vloedgolven die een slijmerig spoor achterlieten, 20 meter boven de toenmalige zeespiegel. In de paar uur na de aardverschuiving van Storegga zullen veel mensen in de Steentijd aan de kust van Europa om het leven zijn gekomen. En het was geen geïsoleerde gebeurtenis. Er schijnen al verscheidene eerdere landverschuivingen in Storegga te zijn geweest, en men vreest dat het weer kan gebeuren. ‘Er zit veel methaan aan de noordzijde van de Storegga-landverschuiving,’ zegt Mienert.

Sinds de ontdekking van de landverschuiving in Storegga zijn de overblijfselen van een aantal soortgelijke aardverschui-

vingen gevonden in delen van de oceaan waarvan men wist dat ze methaanclathraten bevatten. Ze zijn gevonden voor de kust van British Columbia in Canada, voor zowel de oost- als de westkust van de Verenigde Staten en aan de monding van grote rivieren, zoals de Amazone en de Congo, waar reusachtige onderwaterdelta's van sedimenten methaan bevatten afkomstig van rottende vegetatie van het regenwoud verder stroomopwaarts. De tijdsbepaling is nog niet rond, maar Mienert denkt dat de thermale schok van Storegga een domino-effect kan hebben gehad, waardoor andere methaanvoorraden vrijkwamen uit clathraten die toch al kwetsbaar waren geworden door de opwarmende postglaciale oceaan.

Sommige onderzoekers hangen de theorie aan van het 'clathraatkanon', die inhoudt dat er aan het eind van de ijstijden, en misschien ook in andere perioden, opeenvolgende erupties van methaan zijn geweest die een wereldwijde opwarming inluiden. Zij beschouwen de catastrofale gebeurtenis van 55 miljoen jaar geleden als simpelweg de grootste van een hele reeks klimaatrampen die met methaan te maken hadden.

Toen ik Juergen Mienert ontmoette in zijn lab met uitzicht over een fjord aan de rand van Tromsø – lekker hoog, graptten we, voor als er een tsunami kwam – was hij net bezig met de voorbereiding van een groot nieuw Europees researchproject om te speuren naar verdere resten van landverschuivingen en clathraaterupties. Het 'Euromargins Project', waarvan hij voorzitter is, 'zal zich richten op gebieden met zowel kraters die wijzen op clathraaterupties in het verleden, als met warme oceaanstromingen die duiden op een risico van destabilisatie,' zei hij.

Hij is al op het spoor van een oude landverschuiving in het hoge noorden, voor de kust van Spitsbergen. Dat gebied warmt momenteel snel op en wordt periodiek overspoeld met warm water van de Golfstroom, dat door de Fram Straat in de poolzee dringt. 'Direct onder die stroom ligt een aan-

tal van de rijkste methaanafzettingen,' zei hij. Hij liet me de nieuwe karteringsbeelden van het zeebed ter plaatse zien, die twee maanden eerder waren genomen tijdens een tocht door een gebied dat Malene Bay wordt genoemd. Daarop is een andere grote aardverschuiving te zien. 'Moet je kijken,' zei hij enthousiast. 'Kijk eens naar de hoogte van de klif die viel. Hij was 1400 meter hoog, zeven keer zo hoog als de ingestorte klif van Storegga.'

De vooruitzichten, zegt Mienert, zijn somber. De huidige omstandigheden lijken zorgelijk veel op die waarin de grote methaanuitbarstingen in het verleden plaatsvonden – een snel stijgende zeetemperatuur die tot in het sediment dringt en het bevroren methaan ontdooit. De opwarming van de aarde, zo denkt hij, 'zal meer uitbarstingen en meer kraters teweegbrengen waardoor meer gas vrijkomt'. Het risico van een reusachtige tsunami die Europa overspoelt, het dichtst bevolkte continent op aarde, terwijl tegelijk een enorme uitbarsting van methaan de klimaatverandering in de overdrive schakelt, dat is op zijn minst zorgelijk te noemen.

Sommigen betogen dat die angst overdreven is. Het duurt decennia, of zelfs eeuwen, eer een warmtepuls in de oceaan tot in de sedimentzone doordringt waar methaanclathraten gewoonlijk voorkomen. Maar Mienert antwoordt dat clathraten steeds dichterbij het oppervlak worden aangetroffen, vooral aan de Noordpool. In elk geval is er een tweede en veel snellere neerwaartse route voor de warmte. Warren Wood, een onderzoeker van de Amerikaanse marine, heeft ontdekt dat sedimenten op de zeebodem vaak scheuren bevatten die tot in de bevroren clathraatzone reiken. Warm water is in een mum van tijd onder aan de scheur en kan dus snel het methaan vrijmaken. Zoals Richard Alley zei over de scheuren in de ijskappen: 'scheuren veranderen alles'.

Methaan is slechts het derde belangrijke broeikasgas, na waterdamp en kooldioxide. Maar, zegt Euan Nisbet, 'er zijn goede argumenten om te veronderstellen dat het de beste kandidaat is voor het ontketenen van catastrofale verande-

ringen'. Dat komt 'omdat de hoeveelheid die nodig is om het klimaat te veranderen kleiner is dan bij kooldioxide het geval is, en omdat de beschikbare hoeveelheid van het gas, in de bodem en vooral in methaanclathraten, zo groot is.' Methaan heeft duidelijk catastrofale gevolgen gehad in het verleden. In de gevaarlijke wereld van plotselinge, abrupte en onstuitbare klimaatveranderingen is methaan het kruitvat.

