

CO₂ – probleem en zeeniveau

J. OERLEMANS*

CO₂ in de atmosfeer

Menselijke activiteiten veranderen de samenstelling van de atmosfeer. Afgezien van alle lokale overlast die dit met zich mee kan brengen, moeten we er ook ernstig rekening mee houden dat het klimaat op mondiale schaal zal worden beïnvloed. De stralingsbalans is hier het kritische onderdeel. Sommige gassen in de atmosfeer komen slechts in kleinere hoeveelheden voor (koolzuurgas, ozon, waterdamp, om een paar voorbeelden te noemen), maar zijn toch zeer belangrijk omdat ze zonne- of aardse straling sterk absorberen.

In dit artikel zal nader ingegaan worden op de rol die het koolzuurgas speelt. Daar is goede reden voor, omdat door de verbranding van fossiele brandstoffen, zoals steenkool, olie en aardgas, de concentratie van dit gas in de atmosfeer sterk toeneemt. Sinds enkele decennia worden er op een groot aantal plaatsen nauwkeurige metingen gedaan van de CO₂-concentratie. Hierbij is gebleken dat de toename opvallend uniform is, ondanks het feit dat de emissie van CO₂ heel geconcentreerd in kleine gebieden plaatsvindt (in de verstedelijkte gebieden van het Noordelijk Halfrond). Figuur 1 laat een voorbeeld zien. Blijkbaar wordt het CO₂ in de atmosfeer snel gemengd.

Voor de tweede wereldoorlog werden metingen meer incidenteel verricht, en over de zogenaamde pre-industriële waarde van het atmosferisch CO₂-gehalte is men het niet geheel eens. Op verschillende manieren wordt geprobeerd tot een goede schatting te komen. Eén methode is om monsters uit ijskappen te boren, die honderden tot duizenden jaren oud zijn, en de destijds ingevangen lucht op de samenstelling te analyseren.

Algemeen neemt men nu aan, dat de pre-industriële waarde van het CO₂-gehalte tussen de 270 en 290 ppm (part per million by volume) ligt.

* Dr. J. Oerlemans is wetenschappelijk medewerker aan het Instituut voor Meteorologie en Oceanografie van de Rijksuniversiteit van Utrecht.

Men kan dus stellen dat op dit moment het CO₂-gehalte zo'n 20% boven het 'natuurlijke' niveau ligt.

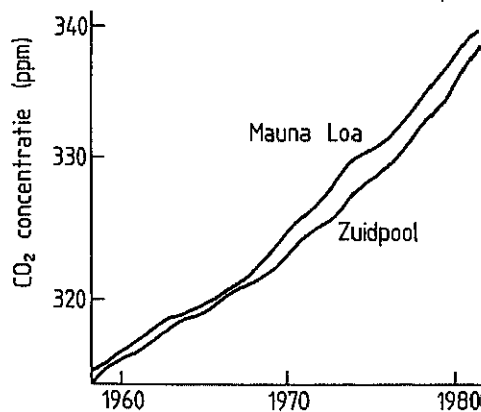
Er zijn uiteraard schattingen gemaakt van de hoeveelheid koolzuurgas die geëmitteerd is. Hieruit kan men berekenen hoeveel het CO₂-gehalte in de atmosfeer toegenomen zou moeten zijn. Een dergelijke berekening levert het interessante resultaat op dat tot nu toe slechts ongeveer de helft in de atmosfeer is gebleven. Het overige koolzuurgas is voor het overgrote deel door de oceanen opgenomen. Er zijn rekenkundige modellen ontwikkeld waarmee, uitgaande van bepaalde economische scenario's, schattingen kunnen worden gemaakt van de toekomstige CO₂-concentratie. Deze modellen geven aan dat een verdubbeling van het CO₂-gehalte halverwege de volgende eeuw te verwachten is. Althans, als er geen radicale verandering komt in de manier waarop energie opgewekt wordt.

broeikaseffect

Wordt het klimaat warmer?

Zoals gezegd is koolzuurgas belangrijk met betrekking tot de stralingshuishouding van de atmosfeer. Vaak spreekt men in dit verband van het broeikaseffect, wat eigenlijk een

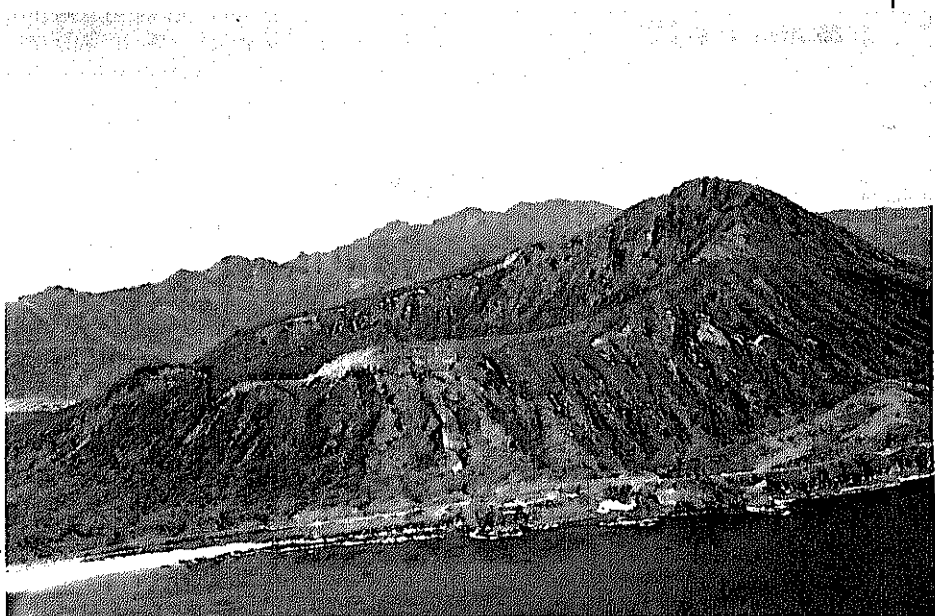
Figuur 1. Metingen van de CO₂-concentratie in de atmosfeer op Hawaii en op de Zuidpool. De seizoensfluctuaties zijn uit de metingen verwijderd. De concentratie is in ppm (parts per million), d.w.z. in één-miljoenste volumedelen

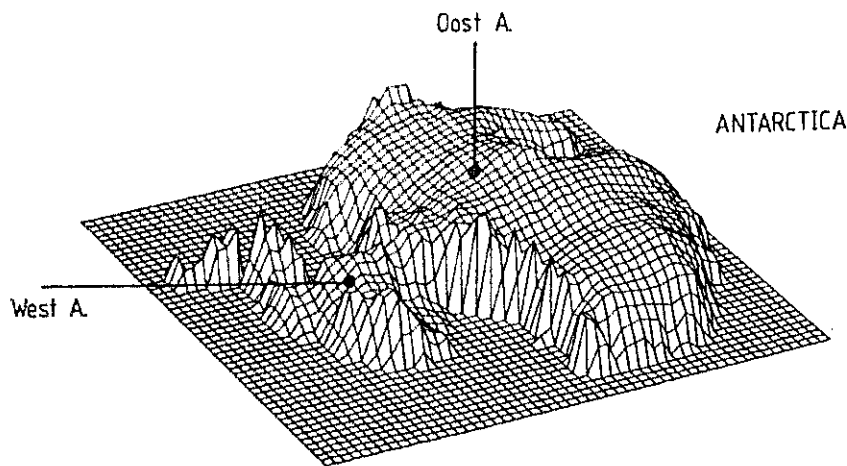


niet geheel correcte term is. Om te begrijpen wat het effect kan zijn van een hogere CO₂-concentratie, moeten we de energiebalans van de aarde beschouwen.

De aarde onderschept zonnestraling, waardoor de temperatuur toeneemt. Elk lichaam met een temperatuur boven het absolute nulpunt straalt energie uit, en zo ook de aarde. Bezien in een langjarig gemiddelde is de gemiddelde temperatuur op aarde ongeveer constant, en dit kan alleen als de onderschepte zonnestraling en de door de aarde uitgestraalde energie gelijk zijn. Wat is nu de rol van het koolzuurgas?

Krater van een dode vulkaan in Hawaii waar ook meteorologische metingen zijn gedaan. (foto ABC)





Figuur 2. Een isometrische voorstelling van het Antarctisch continent. Elk vakje stelt een oppervlak van 100 bij 100 km voor.

Van de door het aardoppervlak uitgezonden straling (in het infrarood) wordt maar liefst 90% door de atmosfeer geabsorbeerd, hoofdzakelijk door koolzuurgas, waterdamp en wolken. De atmosfeer straalt op haar beurt ook, naar boven en naar beneden (de zg. tegestraling). Omdat de atmosfeer kouder is dan het aardoppervlak straalt ze minder dan het aardoppervlak, zodat het aardoppervlak toch netto energie verliest. In deze situatie stelt zich een zekere evenwichtstemperatuur in, die op dit moment ongeveer 14 °C is (een mondiaal gemiddelde). Als nu het CO₂-gehalte toeneemt zal de absorptie (en de tegestraling) van de atmosfeer toenemen, waardoor er een andere (hogere) evenwichtstemperatuur komt. Deze is dan noodzakelijk om de energiebalans weer in evenwicht te krijgen. Hierbij moet opgemerkt worden, dat het koolzuurgas de zonnestraling die een veel kortere golflengte heeft, ongemoeid laat.

Er zijn talloze complicerende factoren. Zo betekent een hogere temperatuur meer verdamping, en dus meer waterdamp in de atmosfeer. Hierdoor neemt de tegenstraling en daarmee de temperatuur nog verder toe: men spreekt van een positieve terugkoppeling. De bewolgingsgraad kan ook veranderen, en dit heeft natuurlijk wél invloed op de hoeveelheid zonnestraling die door het klimaatsysteem wordt geabsorbeerd (wolken zijn bijzonder effectief in het reflecteren van zonlicht: op satellietfoto's zijn wolken wit).

Zo loopt het klimaatsysteem over van processen die elkaar op allerlei manieren beïnvloeden. Er komen dan ook bijzonder ingewikkelde computermodellen aan te pas om een schatting te maken van de temperatuurverhoging, die te verwachten is. Bij een verdubbeling van het CO₂-gehalte rekent men op een stijging van enkele graden.

De berekeningen laten ook zien dat het effect het grootst is in de poolgebieden, misschien wel een graad of zes!

De vraag die onmiddellijk opkomt is, of men met de huidige metingen al een temperatuurstijging vast kan stellen. Immers, het CO₂-gehalte is al flink gestegen. Het antwoord op deze vraag is nee. Niet dat de meetnauwkeurigheid onvoldoende zou zijn, maar de natuurlijke variabiliteit van het klimaatsysteem is zó groot (er is "veel ruis"), dat een lichte trend er als het ware in verdwijnt. Een precieze beschouwing leert dat, als de modelvoorspellingen juist zijn, de trend in de komende tien jaar vastgesteld moet kunnen worden op een statistisch significante wijze. Maar vooralsnog is er niets bewezen.

Effect op het zeeniveau

Een klimaatsverandering kan vele gevolgen hebben, afhankelijk van de plaatselijke situatie. Zo zal in Nederland een beetje meer of minder neerslag de landbouw niet bedreigen, terwijl een temperatuursverhoging van 1 of 2 °C ook géén dramatische effecten zal hebben. In gebieden zoals de Sahel, of Zuid Europa, kan een afname van de neerslag desastreus zijn.

De grootste dreiging voor Nederland heeft te maken met het zeeniveau. Er zijn vele processen, die een verandering van het zeeniveau teweeg kunnen brengen als het klimaat verandert. Thermische uitzetting van het zeewater is er één (orde van grootte: centimeters), veranderingen in de circulatie van atmosfeer en oceaan is een andere (orde van grootte: ook centimeters). Afgezien van tektonische processen en inklinking van de bodem, zijn er natuurlijk de gletsjers en ijskappen, waar grote hoeveelheden water opgeslagen liggen. De ijskappen van Groenland

en Antarctica nemen het leeuwendeel voor hun rekening: 99%. Dat het om grote hoeveelheden water gaat moge blijken uit het feit dat een vermindering van het ijsvolume met 1% leidt tot een zeespiegelverhoging van ongeveer 70 cm.

De tabel geeft enkele fysische eigenschappen van de ijskappen van Groenland en Antarctica. Het verschil in omvang wordt hieruit onmiddellijk duidelijk. Dit is vooral een gevolg van het grote verschil in oppervlak; de gemiddelde diktes ontlopen elkaar niet zoveel. Figuur 2 toont een isometrisch plaatje, gebaseerd op roosterpunten die 100 km uit elkaar liggen, van Antarctica. Weergegeven is het oppervlak. De West-Antarctische ijskap (het onregelmatige deel links in het plaatje) is nietig vergeleken met de grote Oost-Antarctische ijskap. Toch is de ijsdikte hier op vele plaatsen aanzienlijk, omdat de bodem vaak ver beneden zeeniveau ligt.

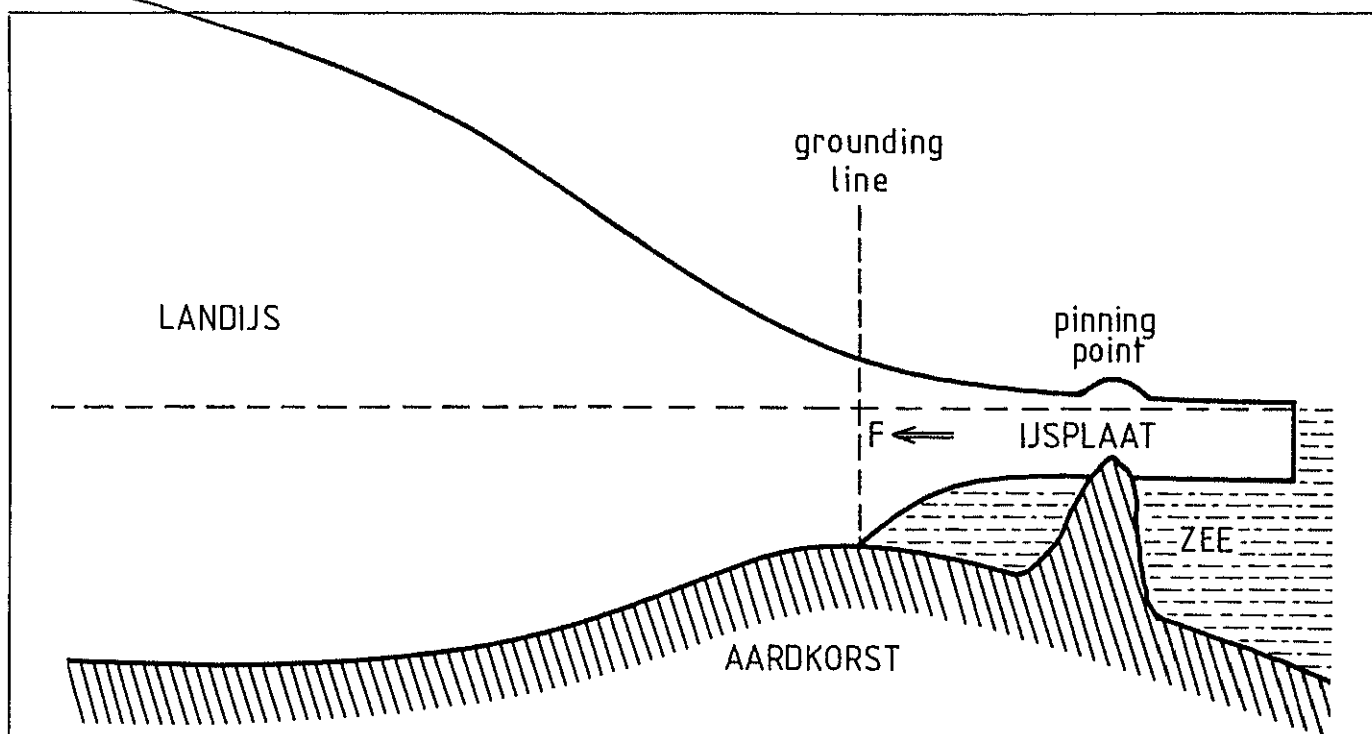
Uit de tabel is ook te zien dat de klimatologische omstandigheden van Groenland en Antarctica nogal verschillen. Bijna alle massaverlies op Antarctica is door afkalving aan de rand, dwz. door de vorming van ijsbergen; de directe afsmelting is erg klein. Voor de Groenlandse ijskap dragen deze processen in ongeveer gelijke mate bij aan het massaverlies. In feite wordt hier duidelijk het verschil in de hoogte van de sneeuwlijn (op deze hoogte is de jaarlijkse massabalans precies nul) weerspiegeld. Voor Groenland is deze hoogte ongeveer 1500 m, voor Antarctica in de buurt van het zeeniveau. Ter vergelijking: in de Alpen bevindt de sneeuwlijn zich op gemiddeld 2800 m, in Noord-Scandinavië op 1300 m.

Met deze achtergrondinformatie kan nu gekeken worden naar de reactie van deze ijskappen op een klimaatsverandering. Er zijn 3 processen te onderscheiden die een belangrijke rol spelen, te weten:

a. geleidelijke verhoging van de ijstem-

Tabel 1. Enkele fysische eigenschappen van de ijskappen van Groenland en Antarctica.

	Groenland	Antarctica
oppervlak (miljoen km ²)	1.7	14
gemiddelde ijsdikte (m)	1530	2160
ijsvolume (miljoen km ³)	2.6	30
maximale hoogte (m)	3300	4000
massabalans (cm ijsdiepte/jaar)	34	17
verlies door afsmelting	50%	1%
verlies door afkalving	50%	99%



Figuur 3. Schematische dwarsdoorsnede van West Antarctica. De horizontale onderbroken lijn geeft het gemiddelde zeeniveau. De ijsstroming is van links naar rechts en wordt bemoeilijkt door de tegendruk F welke ontstaat doordat de ijsplaat aan de grond gelopen is. Valt deze tegendruk weg (als de ijsplaat loskomt van zijn steunpunt bij een verhoogde afsmelting) dan neemt de ijsmeltheid toe, wat kan leiden tot de totale desintegratie van de West-Antarctische ijskap.

peratuur, waardoor de deformatiesnelheid en daarmee de ijsafvoer toeneemt, *b.* een verandering van de massabalans aan het oppervlak van de ijskap, *c.* dunner worden van de drijvende ijsplaten door een hogere oceaantemperatuur, waardoor ook de ijsafvoer kan toenemen.

Proces A werkt uiterst langzaam; het zal duizenden jaren duren voordat enig effect merkbaar zal worden.

Proces B, daarentegen, werkt onmiddellijk. Een groter-afsmelting, bijvoorbeeld, leidt direct tot een verkleining van het ijsvolume omdat de ijsafvoer niet onmiddellijk reageert (na honderden jaren zal de ijsafvoer ook af gaan nemen, maar de evenwichtstoestand zal er toch één zijn met een wat kleiner ijsvolume).

Proces C, tenslotte, is het meest gecompliceerd.

Het heeft betrekking op de West-Antarctische ijskap, waar grote delen van de bodem, waarop de ijskap rust, ver beneden zeeniveau ligt (-500 tot -1500 m!). Vanuit het centrum van de ijskap neemt de dikte geleidelijk af, totdat de zogenaamde grounding line bereikt wordt, waar het ijs begint te drijven. De ijsdikte is op de grounding line zo'n 700 m. Het ijs vormt dan een ijsplaat (niet te verwarren met zee-ijs, dat zelden dikker wordt dan enkele meters!), die geleidelijk dunner wordt. Na enkele honderden kilometers is de ijsdikte gereduceerd

CO₂ metingen

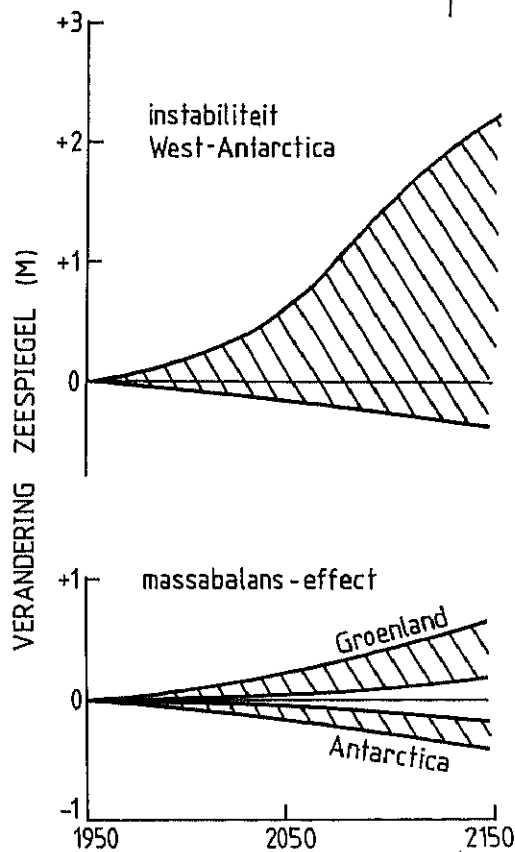
tot ongeveer 200 m, en dan vindt afbrokkeling plaats (de bekende tafelijsbergen worden dan gevormd).

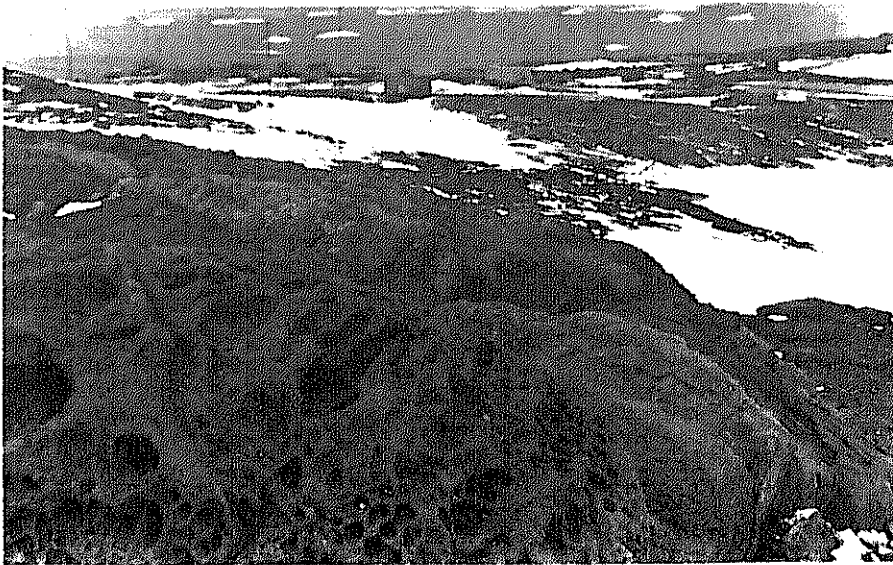
Het speciale aan de grote ijsplaten van West Antarctica is dat ze op een aantal plaatsen aan de grond lopen. En daar schuilt het gevaar. Door het aan de grond lopen oefenen de ijsplaten een tegendruk op de ijskap uit. Als nu de zeewatertemperatuur toeneemt zal door een vergrote afsmelting aan de onderkant van de ijsplaten een situatie kunnen ontstaan waarbij de ijsplaten los komen van de "pinning points". De tegendruk valt dan weg, en de ijsafvoer kan sterk toenemen. Omdat de bodem van de ijskap zover beneden zeeniveau ligt, kan dit het begin betekenen van een totale verdwijning van de West-Antarctische ijskap. De hiermee samenhangende verhoging van de zeespiegel is van de orde van 5 m! (Zie figuur 3)

Schatting van veranderingen in zeeniveau

Figuur 4 geeft het resultaat van schattingen van het effect van voornoemde processen op het zeeniveau. Deze schattingen zijn gebaseerd op berekeningen met computermodel-

Figuur 4. Schatting van toekomstige veranderingen van de zeespiegel t.g.v. klimaatverandering door de toenemende hoeveelheid koolzuurgas in de atmosfeer. Hierbij zijn alleen effecten beschouwd die te maken hebben met de Groenlandse en Antarctische ijskappen! De onzekerheidsmarges zijn groot. Ze zijn zo getekend dat de kans op een situatie binnen het gearceerde gebied zo'n 90% is.





Het grootste van de zes Russische weerstations op de Zuidpool. (foto ABC)

len, die nog verre van volmaakt zijn. Vandaar dat de aangegeven onzekerheidsmarges nogal groot zijn, vooral voor proces C. Bij het maken van deze berekeningen is er vanuit gegaan dat het CO₂-gehalte rond het jaar 2050 zal zijn verdubbeld. Veranderingen in temperatuur en neerslag, wat als input moet dienen voor modellen die het gedrag van de ijskappen beschouwen, zijn uit lit. 1 overgenomen (het betreft hier resultaten van een uitgebreid klimaat model dat op Geophysical Fluid Dynamics Laboratory te Princeton ontwikkeld is). Proces A is niet beschouwd, omdat het op een

tijdschaal van enkele jaren géén rol speelt.

Interessant is dat de massabalans van Antarctica enigzins toeneemt, terwijl die van Groenland juist afneemt. Dit is te begrijpen als men zich realiseert dat op dit moment de neerslag op Antarctica zeer beperkt is door de bijzonder lage luchttemperatuur (huidige neerslag in het centrum van Antarctica: ongeveer 3 cm/jaar, vergelijkbaar met de Sahara!). Hoewel de verandering in de massabalans van Antarctica veel kleiner is dan in die van Groenland, zijn de effecten op het zeeniveau qua orde van grootte verge-

lijkaar (maar tegengesteld!).

Proces C is het meest dramatisch, maar ook het meest onzeker. Modelresultaten zijn soms tegenstrijdig, en in feite weet men niet eens of de huidige toestand in evenwicht is. Met het laatste wordt bedoeld dat niet bekend is of, als het klimaat niet zou veranderen, de ijskap zijn huidige vorm zou handhaven. Waarschijnlijk niet!

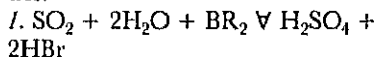
Het zal duidelijk zijn dat er nog veel onderzoek gedaan moet worden om de onzekerheidsmarges te verkleinen. Computermodellen zullen hierbij een belangrijke rol spelen, en metingen zullen nodig zijn om deze modellen te testen alvorens ze te gebruiken voor meer gedetailleerde voorspellingen. Op het Instituut voor Meteorologie en Oceanografie, (Rijksuniversiteit Utrecht) waar de auteur werkzaam is, is dergelijk onderzoek gaande. Voor meer informatie zij verwezen naar de literatuuropgave.

Literatuur

1. S. Manabe and R.J. Stouffer (1980): Sensitivity of a global climate model to an increase of CO₂-concentration in the atmosphere. *J. of Geophysical Research* 85, 5529-5554.
2. C.J.E. Schuurmans, J. Oerlemans, R. Mureau en H.M. van den Dool (1982): Fysische aspecten van het CO₂-probleem. *Energiespectrum*, 218-227
3. J. Oerlemans en C.J. van der Veen (1984): *Ice Sheets and Climate*, Reidel (Dordrecht), 217 pp.

Oproep voor voorstellen voor een proefinstallatie voor rookgasontzwaveling

De Commissie van de Europese Gemeenschappen heeft op 28 november jl. een oproep gepubliceerd tot het indienen van voorstellen voor de constructie en de exploitatie van een proefinstallatie voor rookgasontzwaveling op basis van het MARK 13A-procédé van de Gemeenschap. Voornoemd proces is een nieuw afvalwaterloos rookgasontzwavelingsprocédé dat is gebaseerd op de volgende reacties:



Het Europese patent voor dit procédé is verleend onder nr. EP-B10016290. Een aanvullend patent werd in Luxemburg onder nr. 85454 op 6 juli 1984 aangevraagd.

Het proces is ontwikkeld in het Gemeenschappelijk Centrum voor Onderzoek van de EG in Ispra, Italië. Er wordt geen gips of ruwe zwavel

geproduceerd, maar hoogwaardig geconcentreerd zwavelzuur. Of het procédé in de praktijk echter rendabel is moet uit een proefinstallatie blijken op basis van een hoeveelheid rookgas van 20.000 m³/h of meer.

De contractant gaat o.a. de verplichting aan:

- bouwen van de proefinstallatie op een daartoe geschikte plaats
- een testprogramma voor twee jaar afwerken
- testresultaten aan de Commissie beschikbaar stellen
- eventueel voor de ontmanteling zorgen.

Als tegenpresentatie is de Commissie bereid:

- 50% bij te dragen in de bouw en exploitatie van de installatie met een maximum van vijf miljoen ECU (1 ECU is ca. f 2,50)
- aan de contractant het eigendomsrecht over te dragen

- een kosteloze licentie te verlenen voor de proefinstallatie
- twee overdraagbare en kostenloze licenties te verlenen voor installaties op vol industriële schaal.

Het staat de contractant vrij bij derden steun voor zijn te leveren bijdrage te vragen. In geval van gelijkwaardige voorstellen zal het project gegund worden aan die contractant die de kleinste financiële bijdrage van de Commissie verlangt.

Belangstellenden kunnen de vereiste formulieren en verdere technische en andere gegevens aanvragen bij: Commissie van de Europese Gemeenschappen, Directoraat-generaal Informatiemarkt en Innovatie, DG XIII/A/3 - kamer B4/107. Bâtiment Jean Monnet, L - 2920 Luxemburg. Het voorstel moet uiterlijk op 31 maart 1985 aangetekend worden verstuurd in één van de officiële talen van de EG.

Voor nadere inlichtingen of assistentie: Bureau EG-Liaison, tel: 070-514071.