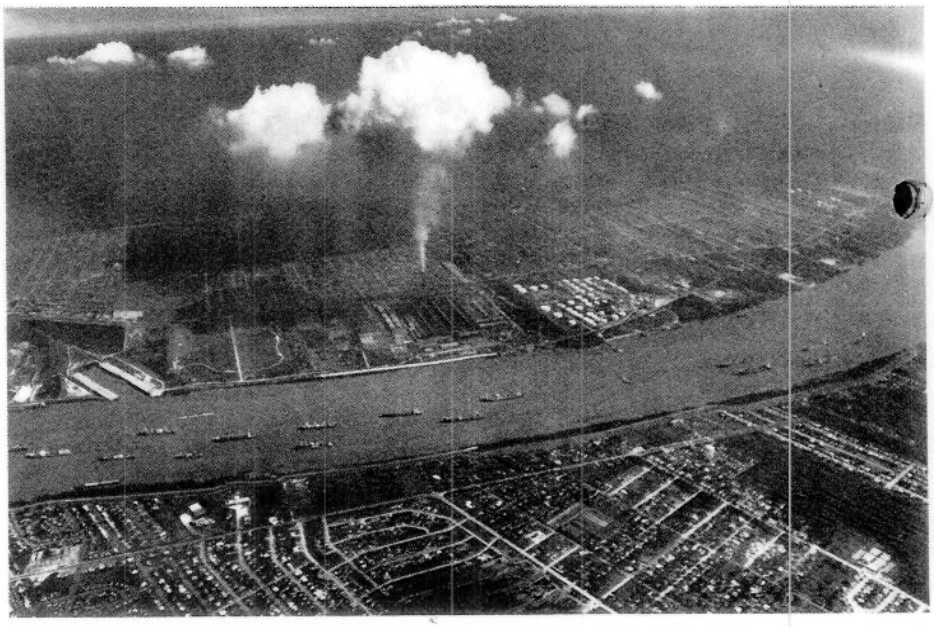
C. J. E. SCHUURMANS, H. M. VAN DEN DOOL EN J. A. WISSE

Luchtverontreiniging en wereldklimaat (2)

Sommige vormen van luchtverontreiniging veranderen de stralingshuishouding van de atmosfeer. Samen met het warmtetransport is de stralingshuishouding bepalend voor de temperatuurverdeling. In dit artikel wordt het normale thermische gedrag van het systeem aarde + atmosfeer besproken. Nagegaan wordt welke wijzigingen verwacht mogen worden bij bepaalde veranderingen in de samenstelling van de atmosfeer. De nadruk ligt hierbij op de mogelijke gevolgen van een toenemend CO_2- en waterdampgehalte, een afname van het stratosferisch ozon en een toename van het aantal deeltjes op de temperatuur, gemiddeld over de aardbol en gemiddeld over seizoenen. Evenals in het voorgaande deel worden de temperatuurwijzigingen besproken aan de hand van de gemiddelde warmtehuishouding in de atmosfeer.



De absorptie van kortgolvige straling door *ozon* veroorzaakt verwarming in alle lagen van de atmosfeer. De absorptie van kortgolvige straling door waterdamp en kooldioxyde is in figuur 3 verwaarloosd. De infrarode straling van het aardoppervlak (in het atmosferische venster) wordt door het ozon in de lagere stratosfeer geabsorbeerd, wat een geringe verwarming tot gevolg heeft. Boven 30 km overheerst echter de emissie door het ozon, wat koeling veroorzaakt in het langgolvige deel. Een afname van de hoeveelheid ozon zal dan ook kunnen leiden tot een koeling in de troposfeer en lage stratosfeer. Een reductie van 30% van de totale hoeveelheid zou naar schatting het wereldgemiddelde v/d temperatuur 1 °C doen dalen. Deze speculatieve ozonreductie zou veroorzaakt kunnen worden door freonen. Deze absorberen echter in het atmosferische venster, wat tot een compenserende verwarming van 0,5 °C zou kunnen leiden. Men mag deze apart beschouwde effekten echter niet zomaar optellen.

De emissie in het infrarood door CO_2 en waterdamp overheerst de absorptie door deze gassen. In de gehele atmosfeer veroorzaken deze gassen een koeling. In de stratosfeer heerst gemiddeld over de aarde stralingsevenwicht: de verwarming en koeling door straling compenseren elkaar. In de troposfeer heerst geen stralingsevenwicht: de koeling door straling is groter dan verwarming door absorptie. Deze koeling wordt gecompenseerd door toevoer van latente en voelbare warmte.

Wat is nu het effect van toename van het CO_2-gehalte in de atmosfeer? In de troposfeer betekent een extra hoeveelheid CO_2 een extra absorptie en extra emissie. Deze emissie is uiteraard zowel opwaarts als neerwaarts gericht. De neerwaarts gerichte extra emissie zorgt voor extra tegenstraling aan het aardoppervlak. Hierdoor zal het aardoppervlak warmer worden, wat tevens leidt tot een extra toevoer van latente en voelbare warmte naar de troposfeer. In een nieuw evenwicht zal het aardoppervlak en de onderste luchtlagen warmer worden; deze verwarming zal met de hoogte afnemen. De extra latente en voelbare warmte kan door de stabiele opbouw boven de tropopauze de stratosfeer niet bereiken. Bij toename van het CO_2-gehalte zal zich daar een nieuw stralingsgewicht moeten instellen bij een lagere temperatuur. Fig. 2 toont de berekende temperatuurverdeling in afhankelijkheid van de CO_2-concentratie.

In fig. 2 is verondersteld dat de relatieve vochtigheid konstant blijft (en de absolute vochtigheid dus toeneemt) en dat de klimatologie van de bewolking niet wijzigt. In de troposfeer betekent namelijk een extra toevoer van latente warmte door een verhoging van het CO_2-gehalte een extra verdamping en wolkenvorming. Het waterdampgehalte en de bewolkingsgraad zal dus kunnen toenemen. Deze effecten zijn veel groter dan die door de antropogene emissie van waterdamp. Een verhoging van het waterdampgehalte zal leiden tot een grotere temperatuurverhoging nabij het aardoppervlak, omdat waterdamp en kooldioxyde een analoge rol vervullen in de stralingshuishouding. Uitgaande van een standaardverdeling van het ozon- en de waterdampverdeling in de atmosfeer en een constante bewolking, volgt uit de boven omschreven stralingsberekening met convectieve aanpassing, voor het geval dat het CO_2-gehalte in de atmosfeer verdubbelt, gemiddeld over de aardbol van een temperatuurverhoging van 1,3 °C als de absolute vochtigheid constant wordt gedacht: 2,4 °C als de relatieve vochtigheid constant wordt gehouden.

Deeltjes verstrooien kortgolvig licht en absorberen zowel kortgolvige als langgolvige straling. Het is gebleken dat de onderlinge verhouding van de optische eigenschappen van de deeltjes, het albedo van het aardoppervlak en de verdamping van het aardoppervlak zeer kritisch is. Bovendien beïnvloedt de fysisch-chemische aard van de deeltjes het aantal en de grootte van de druppeltjes en ijsdeeltjes in een wolk en daarmee het albedo van die wolk. Afhankelijk van de schattingen van de verschillende constanten resulteert een koeling of een verwarming. Een uitspraak over de invloed op het klimaat van een toename van het aantal

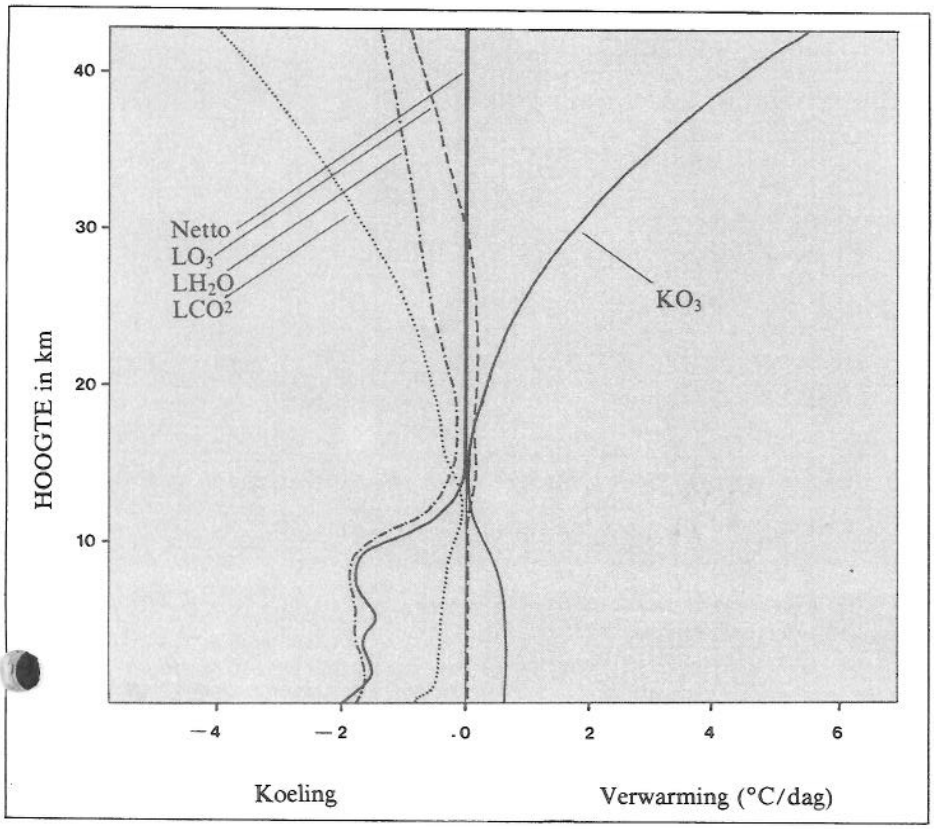


Fig. 1. Berekende vertikale verdeling van de verwarming en koeling die het gevolg is van infrarode stralingsdivergentie (L) van CO_2, H_2O en O_3 en kortgolvige (K) stralingsdivergentie van O_3 (3).

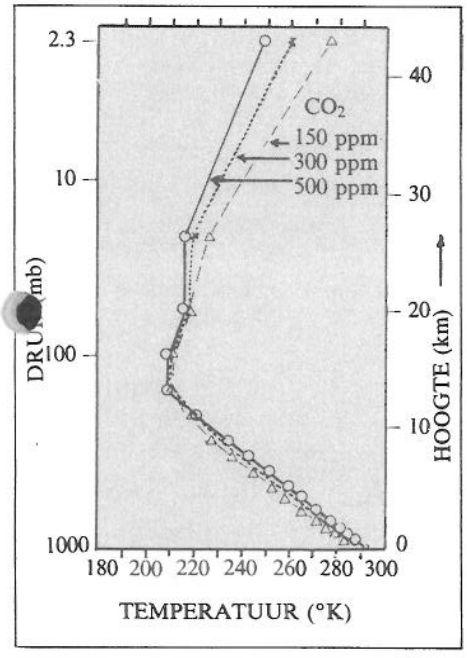


Fig. 2. Vertikale temperatuurverdeling bij stralingsevenwicht met convectieve aanpassing voor 3 verschillende CO_2-concentraties (10).

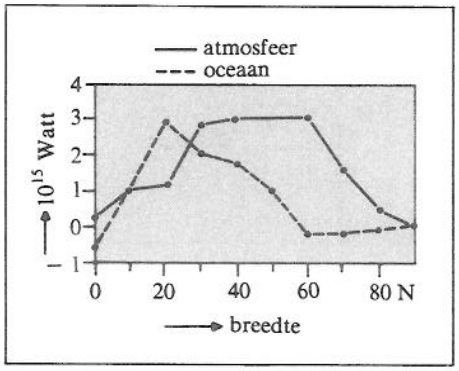


Fig. 3. Componenten van energiebalans voor het systeem aarde + atmosfeer voor één 'doos' begrensd door de aangegeven breedtegraden.

deeltjes in de atmosfeer is nog niet mogelijk (13).

Invloed algemene circulatie

In het voorafgaande werd de temperatuur berekend uit de stralings- en energiebalans voor een atmosfeer die het gemiddelde van de gehele atmosfeer voorstelt. Misschien is er geen plaats op aarde te vinden waar zich die toestand precies voordoet, al zal de atmosfeer op de 45e breedtegraad er dicht bij in de buurt komen. Voor een willekeurige plaats op aarde zal men over het algemeen niet kunnen volstaan met een beschouwing van de stralingsbalans, aangevuld met een herverdeling van energie in de vertikaal. Voor verreweg de meeste plaatsen op aarde spelen in de energiebalans ook de horizontale energietransporten een rol. Als we die mee willen nemen wordt de berekening echter onmiddellijk driedimensionaal. In de meest geavanceerde modellen is dit ook het geval. Voor een beter begrip van de rol van de horizontale energietransporten is echter een één-dimensionale beschouwing voldoende. Deze zal hier worden gevolgd. We kiezen dan de horizontale dimensie: equator-pool. Wel moeten we dan de atmosfeer en het aardoppervlak als een geheel beschouwen; met andere woorden: de vertikale dimensie van de atmosfeer tijdelijk vergeten.

Het aldus vereenvoudigde model is in fig. 3 toegelicht. De figuur toont een doos waarvan twee opstaande vlakken evenwijdig aan de breedtecirkels zijn opgesteld. De bovenkant staat in open verbinding met de wereldruimte. De doos steekt zover de aarde (of oceaan) in, dat de energieoverdracht door de onderkant nul kan worden genomen. De resterende ingrediënten van de energiebalans zijn dan de volgende vier:

1. Geabsorbeerd zonlicht; lucht, wolken en aardoppervlak absorberen een deel van de zonnestraling die onze planeet continu bereikt; op een vlak loodrecht op de zonnestraling, op de gemiddelde afstand aarde–zon, bedraagt deze instraling S_o = 1367 ± W/m^2: de zogenaamde zonneconstante.
2. Gereflecteerd zonlicht; de fraktie van de inkomende zonnestraling die door wolken en aardoppervlak wordt gereflecteerd heet de albedo; het is een erg belangrijke klimaatgrootheid.
3. Uitgaande infraroodstraling; deze gaat deels uit van het aardoppervlak, deels van de atmosfeer en de wolken.
4. Horizontale energietransport; dit transport wordt verzorgd door de luchtstromingen en door stromingen in de oceaan; de energievormen waar het om gaat zijn warmte, latente warmte van de waterdamp en potentiële energie; transport van kinetische energie is in dit verband onbelangrijk.

Het principe van de energiebalans is dat de vier genoemde ingrediënten elkaar precies in evenwicht houden, gemiddeld over een jaar bijvoorbeeld.

Aan de hand van enkele figuren zullen we de breedte-afhankelijkheid van de vier genoemde componenten van de energiebalans nader bekijken. De gegevens zijn gemiddelden over het jaar en langs breedtecirkels. Zij zijn in hoofdzaak ontleend aan satellietwaarnemingen. De inbreng van satellieten is voor de klimatologie van onschatbare waarde. In fig. 4 zien we de verdeling van de inkomende, de geabsorbeerde en gereflecteerde zonnestraling. Opvallend is het nette, regelmatige verloop met de geografische breedte. En verder het nagenoeg constant zijn van de hoeveelheid straling die op de verschillende breedten wordt gereflecteerd. Dit laatste is eigenlijk alleen maar toevallig zo omdat de plaatsen op aarde met veel zon een lage albedo hebben (tropische oceanen met nagenoeg loodrechte invalshoek) en de plaatsen met weinig zon een vrij hoge albedo (de witte poolkappen). Als fractie van de inkomende straling is de gereflecteerde straling dan ook beslist niet constant met de geografische breedte, zoals fig. 5 laat zien. Behalve door de eerder genoemde faktoren (zonshoogte en ijs- en sneeuwbedekking) wordt de albedo sterk bepaald door de soort en bedekkingsgraad van de bewolking en ▶▶

door de toestand van het oppervlak: land–zee, begroeid of onbegroeid, bebouwd of onbebouwd.
Een kaart van de albedo voor de verschillende plaatsen op aarde ziet er dan ook beslist veel onregelmatiger uit dan de curve in fig. 5 doet vermoeden. De volgende fig. 6 voegt het gegeven toe van de uitgaande infrarode straling. Deze is enigszins afhankelijk van de geografische breedte, maar misschien minder dan op grond van haar afhankelijkheid van de temperatuur wordt verwacht. Waar het in dit plaatje om gaat is de vergelijking van de uitgaande IR-straling met de geabsorbeerde zonnestraling. Men komt dan tot de conclusie dat de gordel tussen 35°NB en 35°ZB een stralingsoverschot kent, terwijl de gebieden poolwaarts van de genoemde geografische breedten een negatieve stralingsbalans hebben. Deze gegevens hebben betrekking op de jaargemiddelde toestand. De tropen zouden als gevolg van dit warmteoverschot dus steeds warmer moeten worden en de poolkappen door warmteverlies kouder. Dat zien we echter niet gebeuren. De overschotten en tekorten worden steeds meer genivelleerd door het enorme transportsysteem van de algemene luchtcirculatie en voor een deel ook door de oceaanstromingen. Het zou natuurlijk prachtig zijn als het gemeten warmtetransport precies even groot is als het benodigde warmtetransport afgeleid uit fig. 6. Zover is het echter nog niet, vooral omdat voor de oceanen nog onvoldoende meetgegevens over stroming en temperatuur bekend zijn. Voor de atmosfeer ziet de toestand er beter uit, vooral voor het Noordelijk Halfrond. Sinds de Tweede Wereldoorlog worden twee keer daags op bijna 600 plaatsen op de wereld (waarvan verreweg de meeste op het noordelijk halfrond) radiosondes opgelaten, die metingen verrichten van wind, temperatuur en luchtvochtigheid tot hoogten van ca. 30 km. Deze gegevens zijn in eerste instantie bedoeld voor de weerdiensten die verwachtingen moeten uitgeven, maar zij vormen achteraf een schat van gegevens voor de studie van de algemene circulatie van de atmosfeer. Resultaat van een dergelijke studie is fig. 7, waarin het berekende noordwaartse transport door de atmosfeer staat aangegeven. Alleen gelet op dit atmosferische warmtetransport is de conclusie dat dit maximaal is op de gematigde breedten tussen 40 en 60°NB. Uit fig. 6 zou men echter verwachten dat het totale warmtetransport maximaal is op ca. 35°NB, de plaats namelijk waar het stralingsoverschot omslaat in een stralingsdeficiet. Het verschil nu tussen het verwachte warmtetransport op grond van fig. 6 en het berekende atmosferische warmtetransport is in fig. 7 aangegeven met een stippellijn. Men mag aannemen dat dit het transport is dat door de oceanen wordt verzorgd, zonder dat er voldoende directe metingen zijn om deze conclusie te staven. Men ziet dat op lage breedten de rol van de oceanen in het poolwaartse warmtetransport aanzienlijk is.

Het CO_2-probleem

Gezien de enorme rol van het horizontale warmtetransport in de energiebalans van de

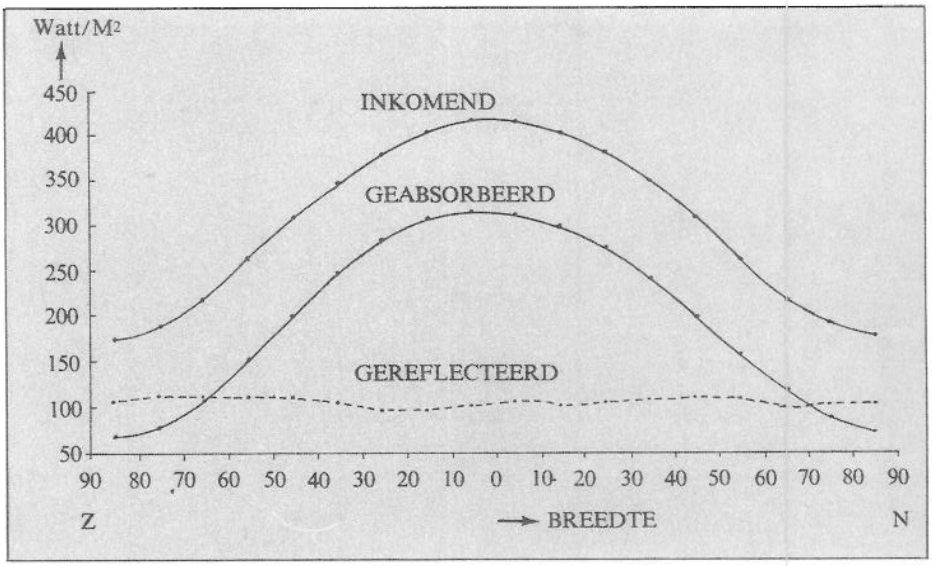


Fig. 4. Jaargemiddelden van de inkomende, geabsorbeerde en gereflecteerde zonnestraling als functie van de geografische breedte (8).

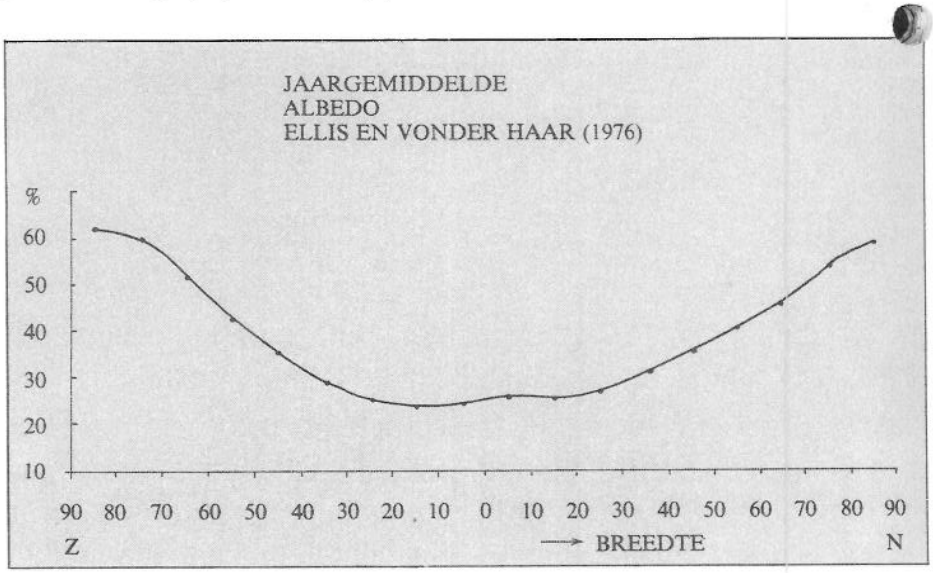


Fig. 5. Jaar- en breedtegraadsgemiddelde van de albedo van het systeem aarde + atmosfeer (8).

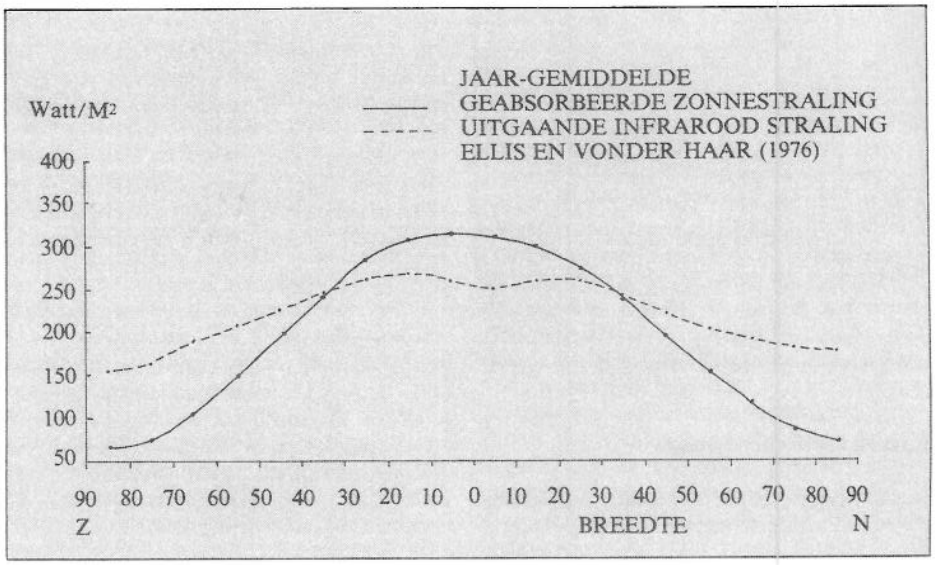
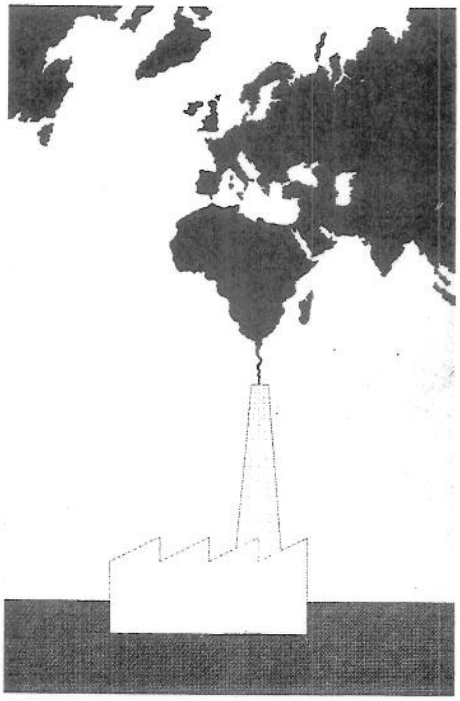


Fig. 6. Jaargemiddelden van de geabsorbeerde zonnestraling en van de uitgaande infrarode straling als functie van de geografische breedte (8).

atmosfeer, is het duidelijk dat bij de bepaling van de CO_2-invloed op de temperatuur de warmtetransporten in de berekening moet worden opgenomen. Nu, dat hebben Manabe en Wetharald gedaan, in 1975, en ze hebben de zaak nu ook meteen tamelijk algemeen aangepakt. Dat wil zeggen zij hebben de stralingsberekeningen in een groot aantal punten uitgevoerd met volledige dynamische interactie tussen de verschillende punten, zowel in horizontale als in vertikale richting.

De vergelijkingen van het circulatiemodel bepalen nu zelf welke vertikale temperatuurgradiënt eruit gaat komen, evenals dat voor de horizontale temperatuurgradiënten het geval is. Nog twee andere processen werden in dit meer algemene model opgenomen, namelijk de gehele hydrologische kringloop (met uitzondering van de bewolking) en de ijs- en sneeuwbedekking, die de albedo beïnvloedt. Het model aardoppervlak bestond voor een deel uit land en voor een deel uit zee. De hoeveelheid landijs werd praktisch als vast aangenomen. Vooral het inbouwen van een hydrologische kringloop moet als een enorme verbetering op de vroegere modellen worden gezien. Bij de vroegere stralingsmodellen was immers duidelijk geworden dat het heel wat uitmaakt voor de eindtemperatuur bij een tweemaal zo grote hoeveelheid CO_2, of bij verandering van temperatuur de absolute dan wel de relatieve vochtigheid constant wordt gehouden. Als een tekortkoming mag nog worden beschouwd dat de bewolkingsgraad en ook de verdeling van de bewolking voor de stralingsberekeningen constant werd gehouden, en wel volgens de klimatologische verdeling met de hoogte en geografische breedte.

Om te komen tot een schatting van de gevolgen van een verdubbeling van het CO_2-gehalte, werd het model doorgerekend met



Cartoon van Mice Jankuloski, Joegoslavië (1977).

de huidige hoeveelheid CO_2 en met de dubbele hoeveelheid. In beide gevallen werd uitgegaan van een volkomen fictieve begintoestand (isotherm, droog en zonder enige luchtbeweging) en doorgerekend tot een stationaire toestand bereikt was. De zon stond al die tijd boven de equator, waarmee een soort jaargemiddelde toestand werd bedoeld. Het temperatuurverschil tussen de beide computerruns is gegeven in fig. 8. Het zijn gemiddelden langs breedtecirkels, weergegeven als functie van de geografische breedte en hoogte. Aangezien dit de beste schatting is van het CO_2-effect die momenteel beschikbaar is, zullen we op enkele details van het resultaat iets verder ingaan:

a. In de troposfeer vindt verwarming plaats, terwijl de stratosfeer afkoelt. Dit resultaat sluit aan bij wat vroeger werd gevonden met één-dimensionale energiebalans-modellen. In het voorlaatste hoofdstuk is van dit verschijnsel een verklaring gegeven.

b. Op hoge breedten vindt veel sterkere verwarming plaats dan op middelbare en lage breedten. Dit hangt samen met het zogenaamde albedo-effekt, waardoor een positieve terugkoppeling tussen temperatuur en albedo (zie fig. 9) voor versterking van een temperatuurverandering zorgt. Daarnaast ontstaan de hogere temperaturen door gebrek aan vertikale menging in de zeer stabiel gelaagde poolatmosfeer.

c. De wereldgemiddelde temperatuur neemt volgens deze berekening bij een tweemaal zo grote hoeveelheid CO_2 met 2,93°C toe. Dit getal moet worden vergeleken met de in het voorlaatste hoofdstuk genoemde + 1,3°C en + 2,4°C. De ééndimensionale aanpak met constant houden van de relatieve vochtigheid sluit het beste aan bij het resultaat van het driedimensionale model. Bij dit laatste zien we dan ook dat de relatieve vochtigheid bij een situatie van verdubbelde hoeveelheid CO_2: beneden de 3 km neemt de relatieve vochtigheid met enkele procenten toe en daarboven met enkele procenten af.

Er zijn nog een paar andere rekenresultaten te vermelden die niet direkt op de temperatuur betrekking hebben:

a. De stralingsbalans bij een verdubbelde hoeveelheid CO_2 bestaat uit een grotere absorptie van zonnestraling en dus ook iets grotere IR-uitstraling (ca. 1%).

b. De hydrologische cyclus (neerslag en verdamping) neemt ca. 7% toe, deels als gevolg van de grotere geabsorbeerde zonneflux, deels echter ook omdat bij hogere

Fig. 7. Jaargemiddelden van het noordwaartse energietransport door de atmosfeer en de oceanen op het noordelijk halfrond (9).

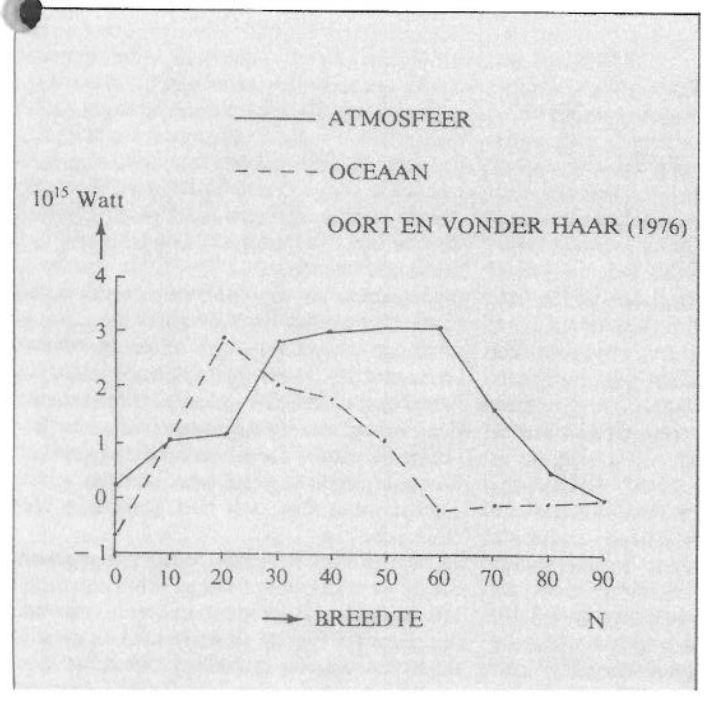
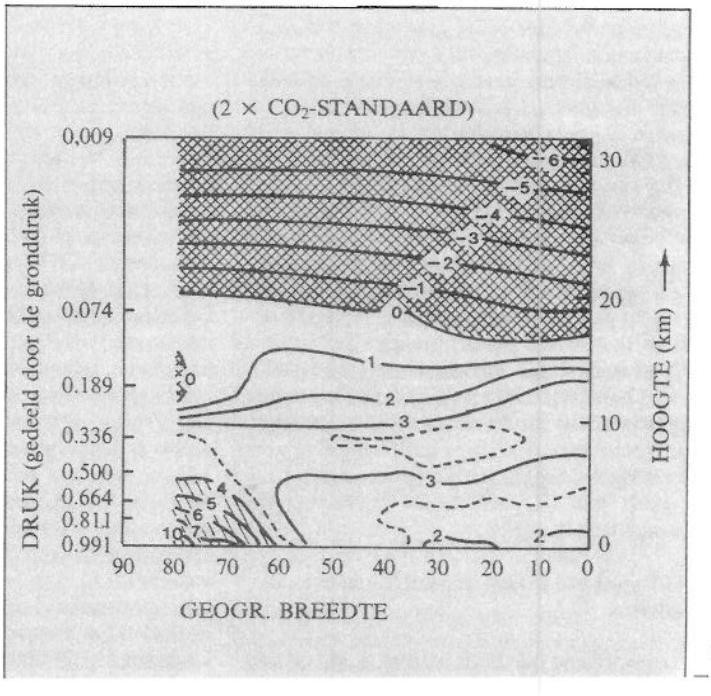


Fig. 8. Temperatuurverandering bij verdubbeling van het CO_2-gehalte, berekend in een algemene circulatiemodel (11).



temperatuur relatief meer warmte in latente dan in voelbare vorm door de aarde aan de atmosfeer wordt afgestaan.
c. De sneeuwgrens wordt over ca. 15 breedtegraden naar het noorden teruggedrongen. Dit vermindert de albedo, waardoor de onder a. genoemde grotere absorptie van zonnestraling plaatsvindt.
d. De horizontale temperatuurgradiënt op de gematigde breedten neemt af en daarmee de depressieaktiviteit.

Andere problemen en consensus

Dat toeneming van het CO_2-gehalte van de atmosfeer tot een toeneming van de temperatuur op aarde leidt, is nauwelijks nog aan twijfel onderhevig. Ook de mate waarin de verwarming optreedt is qua grootte-orde redelijk bekend. De CO_2-toename is echter maar één aspect van de mogelijke antropogene invloed op het klimaat. In eerdere hoofdstukken werden ook andere aspecten genoemd. Voor de meeste zijn modelberekeningen, vergelijkbaar met die voor het CO_2-effect, nog niet uitgevoerd. Schattingen van hun effect hebben dan ook meestal betrekking op kwalitatieve beschouwingen, of op z'n best op berekeningen in eenvoudige, vaak één-dimensionale modellen. Een uitzondering hierop vormt de thermische pollutie. De invloed hiervan op het klimaat is ook nagegaan in drie-dimensionale modellen.
De uitkomsten waren niet altijd even duidelijk. Gebleken is dat de invloed op het klimaat afhangt van de geografische verdeling van de thermische verontreiniging en van de wijze waarop de warmte in de atmosfeer komt: direct of via watér of verdamping. En uiteraard ook van de hoeveelheid warmte die vrijkomt. De beste schattingen komen er op neer dat voor een thermische pollutie die 100 keer zo groot is als thans (in 1970 bedroeg de warmteafgifte gemiddeld over de aarde 0,01 W/m²; vergelijkbaar met geabsorbeerde zonnestraling van ca. 150 W/m², zie fig. 4) een stijging zou kunnen optreden van 1 à 2 °C. (12)
Opvallend is dat bijna alle verontreinigingen van de atmosfeer tot temperatuurverhoging aanleiding geven, althans gemiddeld over de aarde. Uitzonderingen die tot op heden bekend zijn vinden we alleen in de eerdergenoemde afneming van ozon als gevolg van freonen en een toeneming van de albedo als gevolg van ontbossing. Als zoveel effecten afzonderlijk tot verwarming leiden is men licht geneigd te veronderstellen dat ook het netto-effect verwarming is. Zo eenvoudig is het helaas niet. Door wisselwerking tussen de processen kan het netto-effect anders zijn dan de som van de geïsoleerd berekende effecten. Met de bestaande kennis wordt echter algemeen aangenomen dat luchtverontreiniging leidt tot een hogere wereldgemiddelde temperatuur, vooral ook omdat het CO_2-effect als overheersende faktor wordt gezien.

Antropogene versus natuurlijke klimaatinvloeden

Antropogene faktoren en met name de veranderingen in de samenstelling van de atmosfeer die door menselijke aktiviteiten teweeg worden gebracht, kunnen veranderingen in het wereldklimaat ten gevolge hebben. Dat is wat het voorgaande ons heeft geleerd. Die antropogene veranderingen kunnen zelfs heel groot worden, in ieder geval even groot of groter dan de natuurlijke veranderingen van het klimaat in de afgelopen eeuwen. De klimaatgeschiedenis van de aarde gaat daarmee een heel nieuwe fase in. De veranderingen die we waarnemen zullen voortaan, en misschien al enige tijd, het netto-effect zijn van de natuurlijke gang van het klimaat en een onbekende antropogene component. De detectie van deze laatste is dus praktisch onmogelijk.
Alleen wanneer we aannemen dat de natuurlijke variabiliteit van het klimaat in de naaste toekomst dezelfde blijft als in de afgelopen eeuw(en), kunnen we met enige zekerheid zeggen of en wanneer zich een antropogene invloed laat gelden. In fig. 10, ontleend aan het werk van de Amerikaanse klimatoloog Mitchell, is een dergelijke poging gedaan. Om te beginnen is in de figuur het werkelijke verloop van de wereldgemiddelde temperatuur over de afgelopen eeuw aangegeven. De lijn slingert zich rond de nullijn, maar in werkelijkheid moet er 15 °C bij worden opgeteld om de ware wereldgemiddelde temperatuur te krijgen. Men ziet dat de schommelingen tamelijk klein zijn: de grootste afwijking van het langjarig gemiddelde bedraagt ca. 0,5 °C, in een temperatuurmaximum dat voorkwam rond 1940. In vroegere eeuwen waren de schommelingen wat groter, zoals in de zogenaamde Kleine IJstijd rond de 17e eeuw. Voor de wereldgemiddelde temperatuur hebben we daar echter weinig gegevens over. Het gestippelde gebied dat de variabiliteit van het klimaat over de afgelopen eeuwen moet weergeven is dan ook niet meer dan een ruwe schatting.
In deze grafiek is verder de lijn aangegeven die de wereldtemperatuur gevolgd zou moeten hebben zonder de berekende verwarming door CO_2 (de streepjeslijn) en de lijn die de wereldtemperatuur verder zal volgen als gevolg van het berekende CO_2-effect in

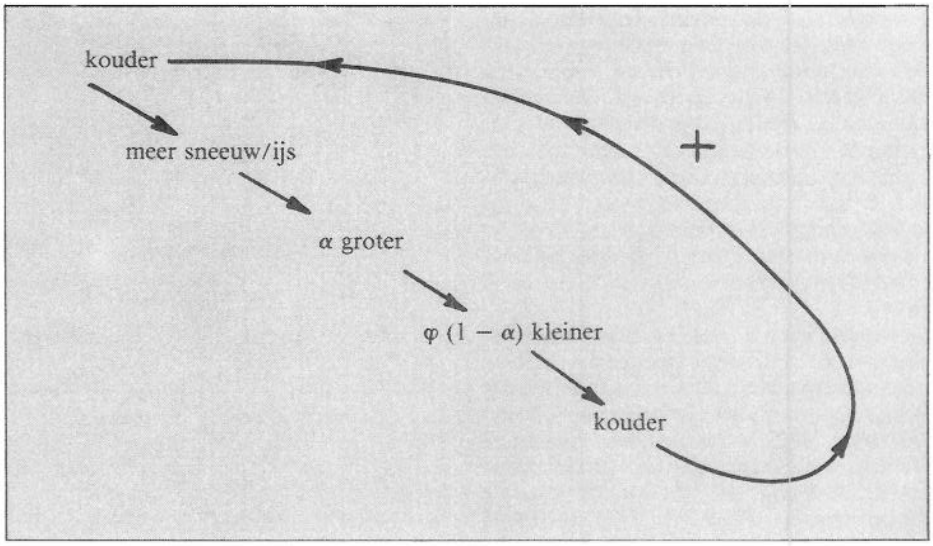


Fig. 9. Schema van de positieve temperatuur- albedo terugkoppeling.

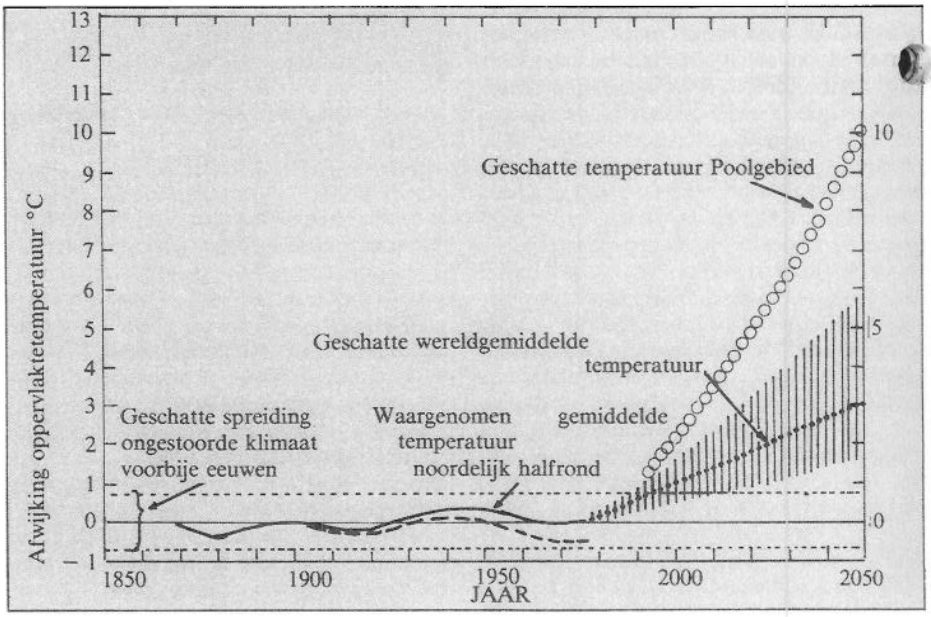


Fig. 10. Verloop van de wereldgemiddelde temperatuur vanaf 1870 met prognose van de toekomstige verloop (5).

de toekomst. Alleen de laatstgenoemde lijn komt op een gegeven moment buiten het gestippelde variabiliteitsgebied te lopen en wel vanaf 1995. Op zichzelf heeft de voorspelde lijn weer een bepaalde onzekerheid (aangegeven door vertikale arcering), waaruit blijkt dat op z'n vroegst in 1990 en op z'n laatst in 2020 met enige zekerheid kan worden vastgesteld of de antropogene klimaatcomponent zich overeenkomstig de berekening gedraagt.
Het berekende CO_2-effect is voor hoge geografische breedten 3 à 5 keer zo groot als elders op aarde, maar omdat het natuurlijke klimaat op hoge breedten ook van nature zoveel variabeler is dan elders, levert dit geen voordelen op voor de detectie van het antropogene klimaateffect.

Mogelijke gevolgen

De natuurlijke klimaatsveranderingen vormen een beperkende faktor bij de detectie van antropogene klimaatsveranderingen. Zij hebben echter ook hun voordelen. Inzake de natuurlijke klimaatschommelingen die de wereld zoal heeft doorgemaakt, is namelijk een schatting mogelijk van het effect (de 'impact') van evengrote antropogene klimaatsveranderingen. Helaas kennen we het karakter van de laatste nog erg slecht. Op grond van onze berekeningen weten we eigenlijk alleen dat we ons vermoedelijk voor moeten bereiden op een warmere aarde, althans gemiddeld over een breedtecirkel en in ieder geval gemiddeld over de aarde. Het effect hiervan op bijvoorbeeld de voedselproduktie in de wereld is niet zonder meer aan te geven. Daarvoor is onder andere ook kennis nodig van de neerslaghoeveelheid en -verdeling. Bovendien zegt een toeneming van de jaargemiddelde temperatuur in dit verband ook nog niet veel. Op de gematigde en hogere breedten is voor de voedselproduktie namelijk vooral de temperatuur en de lengte van het groeiseizoen van belang. Gegevens daarover komen pas ter beschikking als de eerder besproken rekenmodellen de jaarlijkse gang van de temperatuur op verschillende breedten kunnen simuleren.
Een soortgelijk betoog is ook van toepassing als het gaat om de mogelijke gevolgen van een warmere aarde voor de ijskappen op aarde en daarmee voor de hoogte van de zeespiegel.
Omdat de gevolgen van een hogere temperatuur op aarde nog niet kunnen worden berekend, moeten klimatologen hun toevlucht nemen tot zogenaamde 'analoge situaties'. Men gaat dan kijken hoe in het verleden de aarde eruit zag, bij een wereldgemiddelde temperatuur die hoger was dan thans. De Westduitse klimatoloog Flohn heeft voor de opeenvolgende studia van verwarming het volgende staatje van vergelijkbare situaties uit het klimaatverleden opgesteld (zie tabel).

Verder onderzoek

Om verder te komen moet het klimaatonderzoek zich noodzakelijkerwijze richten op een zeer breed gebied. Reconstructie van vroegere klimaten is nodig, om samenhangen en interacties binnen het klimaatsysteem onder omstandigheden die van de huidige verschillen beter te leren kennen. Verder moet de klimaatmodellering verder worden ontwikkeld en verbeterd. Het gaat hierbij niet alleen om onvolkomenheden van de modellen m.b.t. de processen die al worden gesimuleerd, maar vooral ook om processen die tot op heden niet in modellen werden ingebouwd. Dit onderzoek is niet alleen van belang in verband met de mogelijke antropogene invloeden op het klimaat. Ook de natuurlijke gang van het klimaat is nog bij lange na niet verklaard en begrepen. In klimaatmodellen als hiervoor omschreven en onder andere gebruikt om de invloed van een verdubbeling van het CO_2-gehalte te berekenen, moeten met name de volgende processen nog worden opgenomen:
a. Wolkenvorming naar soort, hoogte en bedekkingsgraad;
b. De oceaan als warmtereservoir, als transporteur van warmte en als buffer voor bijvoorbeeld CO_2;
c. Vorming en afbraak van ozon;
d. Realistische land-zee verdeling en topografie;
e. Seizoenvariatie.
De lijst is zo omvangrijk, dat niet verwacht mag worden dat het perfecte klimaatmodel binnen afzienbare tijd beschikbaar zal zijn. Trouwens, ook een ideaal klimaatmodel geeft niet persé het antwoord op onze vragen. Bij constante uitwendige omstandigheden hoort niet één klimaat, maar een hele verdeling van klimaten, die alle een kans hebben gerealiseerd te worden. Gezien het bovenstaande zal de situatie met betrekking tot de berekening van antropogene invloeden op het klimaat op korte termijn niet wezenlijk veranderen. Kwalitatief kunnen natuurlijk wijzigingen optreden doordat nieuwe invloeden of processen bekend worden. Ook wat de verontreinigingen zelf betreft kunnen nieuwe inzichten ontstaan, onder andere doordat bepaalde kringlopen beter worden onderzocht. Zolang de opvattingen over de verontreiniging van de atmosfeer, met name betreffende de toeneming van het CO_2-gehalte dezelfde blijven, zal op basis van de beschikbare kennis en modelresultaten echter rekening moeten worden gehouden met een antropogene toeneming van de temperatuur op aarde die rond de eeuwwisseling reeds de omvang kan hebben aangenomen van ca. 1°C. Zij is daarmee vergelijkbaar met de omvang van de klimaatwijzigingen die de aarde de afgelopen 1000 jaar van nature heeft ondergaan.

TABEL

ΔT	Periode	Kenmerken
+ 0,5°C	1930-40	Veel westcirculaties op gematigden breedten; warme zomers en weinig strenge winters
+ 1,0°C	Middeleeuwen	Wijnbouw tot in onze streken; schapenteelt op Groenland
+ 1,5°C	5000 B.P. (before present)	Aanzienlijk droger dan nu in b.v. Scandinavië, aanzienlijk meer regen in b.v. de Sahara
+ 2,5°C	125000 B.P. Eem-interglaciaal	Klimaat op de continenten sterk verschillend van nu; zeespiegel 5 à 6 m hoger dan nu
+ 4,0°C	$2{,}3 \times 10^6$ B.P.	Noordelijke IJszee ijsvrij

De tabel geeft enige indruk van het aantal jaren dat we in de bestaansgeschiedenis van de aarde terug moeten gaan om een periode met de aangegeven hogere temperaturen aan te treffen. Zorgvuldige bestudering van de algemene klimaatsituatie tijdens de aangegeven periode zou een indikatie moeten geven van hoe het klimaat er in verschillende stadia van antropogene verwarming uit zou komen te zien. Het is belangrijk om op te merken dat bij deze studie van analoge situaties de traagheid van het systeem atmosfeer-oceaan-ijskappen niet over het hoofd mag worden gezien. Vooral de ijskappen reageren zo ontzettend langzaam op een verandering van de lucht- en watertemperatuur dat, ook al zou de antropogene temperatuurverhoging in de loop van de volgende eeuw enkele graden bedragen, de invloed daarvan op de ijskappen en daarmee op de zeespiegel volgens glaciologen, op een tijdschaal van een eeuw volkomen nihil zou zijn (2).
Van meer direct belang is het daarom te letten op die gevolgen die tamelijk rechtstreeks met een temperatuurverhoging nabij het aardoppervlak samenhangen. Deze gevolgen zullen ongetwijfeld een verschuiving teweegbrengen van de agroklimatologische gebieden, verschuivingen die het eerst aan de dag zullen treden op plaatsen die voor de groei van bepaalde gewassen als marginaal zijn te beschouwen.

Literatuur

1. Luchtverontreiniging en weer. Staatsuitgeverij 's-Gravenhage, KNMI, De Bilt, 2e druk, 1979.
2. Carbon Dioxyde, Climate and Society, Jill Williams (ed.), IIASA Proceedings Series, Pergamon Press, 1978.
3. Manabe, S. and R. F. Strickler, J. Atm. Sci., *21*, 361-385, 1964.
4. Woodwell, G. M., Scientific American, *238*, 34-43, 1978.
5. Kellogg, W. W., Effects of human activities on global climate, WMO Tech. Note no. 156, 1977.
6. Van den Dool, H. M. et al., Climatic Change, *1*, 319-330, 1978.
7. Paltridge, G. W. and C. M. R. Platt, Radiative Processes in Meteorology and Climatology, Elsevier, 1976.
8. Ellis, J. S. and T. H. von der Haar, Atm. Sci. Pap. no. 240, Colorado State Univ., 1976.
9. Oort, A. H. and T. H. von der Haar, J. Phys. Oceanogr., *6*, 781-800, 1976.
10. Manabe, S. and R. T. Wetherald, J. Atm. Sci., *24*, 241-259, 1967.
11. Manabe, S. and R. T. Wetherald, J. Atm. Sci., *32*, 3-15, 1975.
12. Williams, J., The effects of climate on energy policy, Electronics and Power, April, 1978, 261-268.
13. Twomey, S., Atmospheric Aerosols, Elsevier, 1978.
14. Papers presented at the World Meteorological Organization Symposium on the geophysical aspects and consequences of changes in the composition of the stratosphere, Toronto, 26-30 June 1978, Publication no. 511, Geneva 1978.