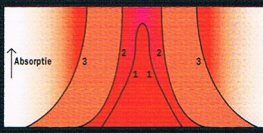


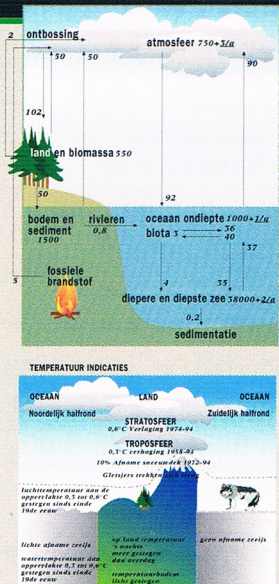
De Ingenieur

VEERTIENDAAGS MAGAZINE VOOR TECHNIEK EN MANAGEMENT

Feiten en fictie



Het grote CO₂-debat



Meer passie bij het ontwerpen

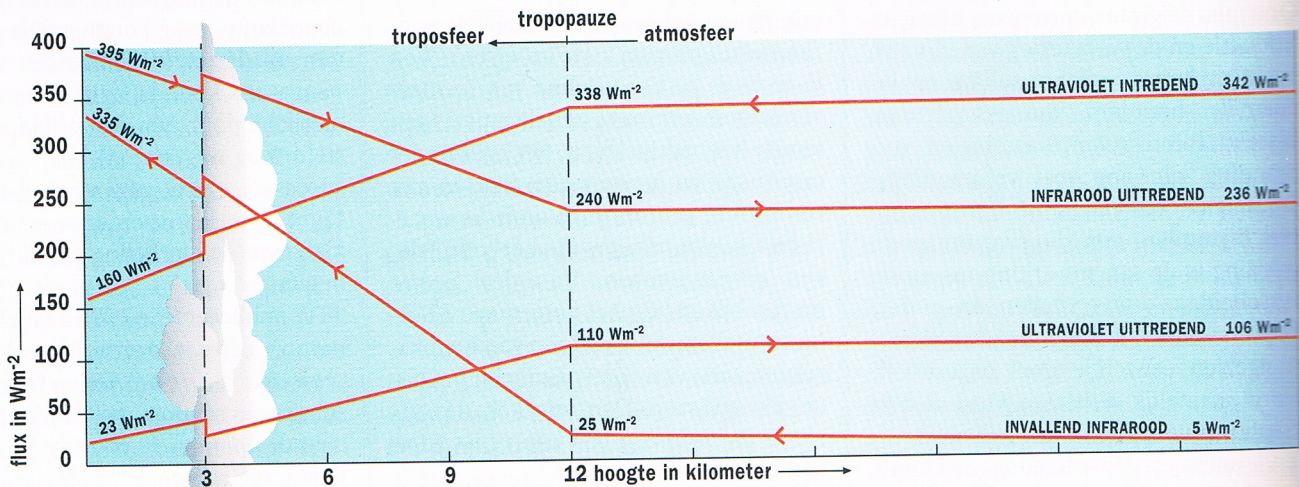


Broeikastheorie kent veel meer onzekerheden dan ze

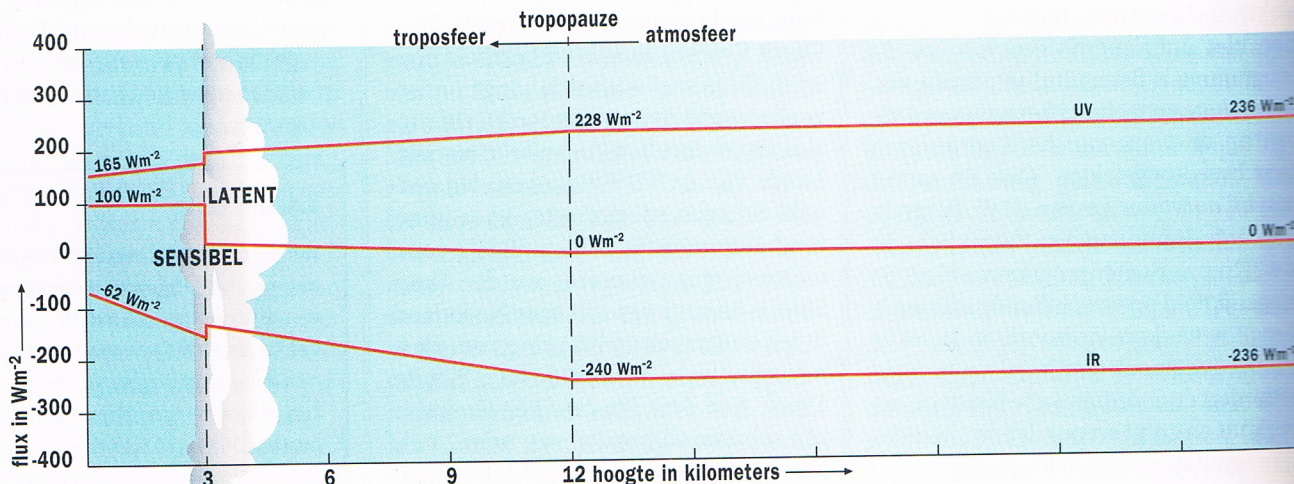
Over geloof en weten in

De Klimaatnota van de regering, die deze maand verschijnt, en de publikatie van het 1995-rapport van de IPCC (the Intergovernmental Panel on Climate Change) hebben de kwestie van het broeikaseffect weer aan de orde gesteld. Het valt daarbij op dat maar weinig Nederlandstalige literatuur beschikbaar is, waarin duidelijk wordt uiteengezet wat het broeikaseffect nu eigenlijk is. Dat maakt het moeilijk om tot een afweging te komen. Voor een beter geïnformeerde meningvorming moeten we feiten scheiden van aannamen en veronderstellingen.

- Prof. dr. Jan Kommandeur -



Afb. 1 UV- en IR-stralingsfluxen door de atmosfeer.



Afb. 2 Netto UV-, IR- en convectiefluxen.

heden

het CO₂-debat

Hoe komt de Aarde aan zijn temperatuur? Onze planeet is een door vacuüm zeer goed geïsoleerde bol die vrijwel alleen door de Zon wordt verwarmd. Hoe groot is het vermogen dat op de Aarde wordt ingestraald? Als eenheid nemen we de hoeveelheid energie die per seconde door een loodrechte denkbeeldige kolom dampkring met een doorsnede van één vierkante meter vloeit: de fluxdichtheid (S). De hoeveelheid zonne-energie die zo de Aarde bereikt, is $S = 1368$ watt per m².

De blote Aarde

De Aarde presenteert aan het zonlicht een (cirkel)oppervlakte van πR^2 , waarin R de straal van Aarde plus de atmosfeer is. Het door de Aarde ontvangen vermogen van de Zon is dus $\pi R^2 S$. De totale oppervlakte van de Aarde is $4\pi R^2$. De over tijd en ruimte gemiddelde flux aan de rand van de atmosfeer is dus $\frac{1}{4} S = 342 \text{ Wm}^{-2}$. Van deze inkomende straling wordt 31 %, dat is 106 Wm^{-2} , door het aardsysteem gereflecteerd en dus wordt er gemiddeld 236 Wm^{-2} aan zonnestraling door Aarde en atmosfeer geabsorbeerd. In de stationaire toestand, als de temperatuur van de Aarde constant blijft, moet ook gemiddeld 236 Wm^{-2} aan infrarode (IR) straling ('warmte') de Aarde verlaten. Daardoor heeft de Aarde een eindige temperatuur. Die kunnen we berekenen door de Aarde op te vatten als een bron van infrarode straling met een spectrum, dat wordt gegeven door de Wet van Planck. Door nu de energieën bij alle golflengten bij elkaar op te tellen, krijgen we de wet van Stefan-Boltzmann: $W = \sigma T^4$, waarbij σ de stralingsconstante ($5,67032 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}$) is, T de absolute temperatuur en W het uitgezonden vermogen zijn. Eenvoudig invullen levert voor $W = 236 \text{ Wm}^{-2}$ een temperatuur van 254 K. Van grote afstand ziet de Aarde er dus uit als een bol met een temperatuur van 254 K ofwel -19°C . Al deze waarden zijn nauwkeurig tot op één of twee eenheden, reden waarom men ook wel -18°C als 'stralingstemperatuur' ziet. Ruwweg wordt onze berekening bevestigd door metingen van de temperaturen op de Maan, die immers 'bloot' is.

De aangeklede Aarde

Gelukkig is -19°C niet de gemiddelde temperatuur waarbij wij moeten leven. Want er is meer aan

De Aarde ontvangt en weerkaatst kortgolvig (UV) licht en zendt licht met een lange golflengte (IR) uit. Aan de hand van afbeelding 1 beschrijven we hier de weg die kortgolvig (ultraviolet en zichtbaar) licht aflegt dat op de Aarde valt. Eerst moet het licht de stratosfeer passeren. De aldaar (nog) aanwezige ozon filtert het UV-deel weg en verder wordt het licht voor- en achterwaarts verstrooid (blauw licht meer dan rood licht, daarom is de lucht hier beneden blauw, boven de atmosfeer is de hemel zwart). Doordat de druk er laag is, neemt de lichtintensiteit naar beneden toe maar langzaam af. Nadat de tropopauze is gepasseerd wordt de dichtheid van de dampkring en daardoor de verstrooiing van het licht groter. Er treedt enige absorptie op door water en troposferisch ozon. Het licht wordt verstrooid, geabsorbeerd en gereflecteerd door allerlei soorten van wolken en het wordt verstrooid en geabsorbeerd door atmosferische stofdeeltjes. Van de 342 Wm^{-2} die binnenkwam, bereikt gemiddeld 183 Wm^{-2} het aardoppervlak, waarvan 23 Wm^{-2} direct weer wordt weerkaatst. Netto ontvangt het aardoppervlak dus 160 Wm^{-2} . We volgen deze kortgolvige flux vanaf de Aarde terug de ruimte in. Allereerst wordt hij vergroot door het terugverstrooide licht van stofdeeltjes en moleculen in de troposfeer en door het van de wolken de ruimte in weerkaatste licht. Alles te zamen treedt aan de buitenzijde van de atmosfeer 106 Wm^{-2} uit. Dat is 31 % van de inkomende 342 Wm^{-2} ofwel de 'albedo' van de totale Aarde, de weerkaatsing, is 0,31.

Alle objecten van een eindige temperatuur stralen licht uit. Ook de Aarde en de omringende atmosfeer. Bij de temperatuur die beide hebben is dat infrarode straling. Zoals gellustreerd in afbeelding 1 volgen we de infrarode flux, maar nu vanaf het aardoppervlak. Gemiddeld is de IR-flux daar 395 Wm^{-2} (naar boven). Door absorptie in waterdamp, wolken, CO₂, CH₄ en andere broeikasgassen neemt deze flux naar boven toe af tot ongeveer 240 Wm^{-2} bij de tropopauze en treedt er uiteindelijk 236 Wm^{-2} uit. Daarmee is de Aarde in stralingsevenwicht, want deze flux, vermeerderd met de gereflecteerde kortgolvige flux (106 Wm^{-2}), is exact gelijk aan de 342 Wm^{-2} die op het aardsysteem viel.

Het feit van de stralingsbalans zou een mogelijkheid kunnen scheppen het broeikas-effect direct te meten. Als de Aarde opwarmt, of afkoelt, is de balans uit evenwicht. Nauwkeurige infrarood- en ultraviolet-metingen met satellieten zouden deze onbalans moeten kunnen constateren.

Er is ook een benedenwaartse infrarood flux, die echter niet van buiten de dampkring komt maar in de stratosfeer ontstaat, sterk toeneemt in de troposfeer en uiteindelijk 335 Wm^{-2} op het aardoppervlak deponeert. Deze is het gevolg van de in alle richtingen uitgezonden straling van eerder met lichtenergie opgeladen broeikasgassen en wolken. Daarnaast, zagen we, valt er 160 Wm^{-2} kortgolvige straling op het aardoppervlak. Samen met de langgolvige is dat dus 495 Wm^{-2} .

Door het aardoppervlak wordt 395 Wm^{-2} uitgezonden. Er is dus een overschot van 100 Wm^{-2} dat, wil het aardoppervlak gemiddeld een constante temperatuur hebben, op een andere wijze dan door straling moet worden afgevoerd. In tegenstelling tot de buitenzijde van de atmosfeer is de 'binnenzijde', het aardoppervlak, niet in stralingsevenwicht. Het 'overschot' aan de aardzijde moet naar de atmosfeer worden afgevoerd. Dit transport heeft twee componenten: het latente en het sensibele transport. Het eerste wordt veroorzaakt door het verdampen van water en het weer condenseren in een hogere luchtlag. Deze flux bedraagt 85 Wm^{-2} , waarmee per jaar gemiddeld 970 mm water wordt gecirculeerd. De resterende 15 Wm^{-2} wordt als sensibele flux door geleiding en turbulente bewegingen in de troposfeer verzorgd.

De verschillende netto fluxen zijn weergegeven in afbeelding 2. Bedacht moet daarbij worden dat over wereldwijde gemiddelden is gesproken.

de hand dan het stralingsevenwicht. Er is namelijk het *broeikas*effect. Dat de gemiddelde temperatuur op Aarde reeds jaren ongeveer 15 °C is, dus 34 graden hoger dan de 'stralingstemperatuur', is aan dat effect te danken.

Wat is het nu precies, dat broeikas

effect? Daarvoor moeten wij eerst de samenstelling en de temperatuurverdeling van de atmosfeer bekijken. De atmosfeer bestaat ruwweg voor 4/5 deel uit stikstof (N₂), 1/5 uit zuurstof (O₂) en 1 % uit het edelgas argon. Daarnaast bevat de dampkring zogenoemde broeikasgassen waaronder water (H₂O), het verbrandingsgas (ook wij ademen het uit) koolstofdioxide (CO₂), methaan (CH₄), lachgas (N₂O) en ozon (O₃). Deze broeikasgassen hebben de eigenschap in hun moleculaire trillingen infrarood licht te absorberen omdat ze asymmetrisch zijn; ze bestaan uit verschillende atomen. Zuurstof (O₂) en stikstof (N₂) bestaan elk uit twee identieke atomen en absorberen geen infrarood vanwege hun symmetrie. Naast de samenstelling is het verloop van de temperatuur in de atmosfeer over verschillende hoogten belangrijk. Aan het aardoppervlak heeft de atmosfeer een gemiddelde temperatuur van 15 °C. Zij koelt vervolgens 6 °C per km af tot op ongeveer 14 km hoogte een minimum van pakweg -70 °C wordt bereikt. Dit niveau heet de tropopauze. Hieronder spreken we van troposfeer, daarboven van stratosfeer. Als we in de stratosfeer komen en

Als er al een klimaatverandering komt, is het steeds de vraag of menselijk handelen daarvoor verantwoordelijk is

tallen gemiddelden zijn. Zeker het latente verticale transport kan in sommige gebieden oplopen tot meer dan tien maal de gegeven waarden. Het overschot wordt afgevoerd door horizontale luchtcirculatie. Sommigen hebben daarom voorspeld dat een extra broeikas

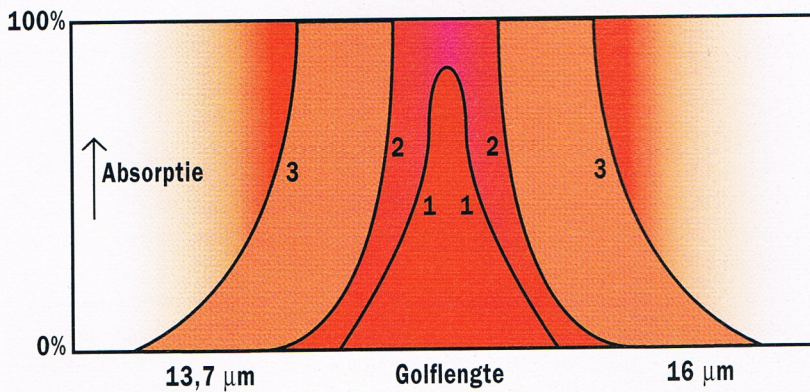
Modellen

Het globale begrip van de atmosfeer is empirisch goed ontwikkeld. Dat wil niet zeggen dat men de gevolgen van veranderingen eenvoudig kan uitrekenen. Daarvoor is het systeem veel te ingewikkeld. Te meer omdat er complexe zogenoemde mee- en tegenkoppelingen in voorkomen. Om tot kwantitatieve uitspraken te komen moet men ge-

bruik maken van (grote) computers. De oudste modellen waren globaal. Zij hadden een wereldwijd karakter. Alles werd uitgerekend aan de hand van gemiddelden voor de hele Aarde. Dat schept problemen. Het CO₂-gehalte zal wel zo'n beetje overal gelijk zijn, alhoewel de seizoenschommelingen die men overal heeft gemeten wel aangeven dat de menging (wereldwijd) op termijn van één jaar niet volledig is. Maar hoe zit het met de gemiddelde temperatuur? Hoe dicht moet het net zijn waarmee men die meet en hoe moet men de getallen wegen met het oppervlak waarvoor ze kenmerkend worden geacht? Of moet men de meetdichtheid blijven verhogen totdat het niets meer uitmaakt als men meetpunten toevoegt? Het lijkt erop dat men dat punt nu heeft bereikt, maar is dat waar voor alle andere gegevens waarover men dient te beschikken? Natuurlijk heeft men de beschikking over satellietgegevens over de wolkenbedekking, maar kan men altijd nauwkeurig hun reflectiviteit voor kortgolvlige straling en absorptievermogen voor langgolvlige straling bepalen? En voor globale modellen: welke rol speelt de structuur in de wolkbedekking die op wereldschaal niet kan worden meegenomen? Vragen te over.

Overigens bestaan er ook zekerheden. De albedo (= weerkaatsing) van de Aarde (0,31) is goed bekend, evenals de samenstelling van de dampkring en de optische eigenschappen van de samenstellende delen. Die eigenschappen zijn bijvoorbeeld hun brekingsindex voor kortgolvlige licht om de strooiing ervan te berekenen en hun absorptiebanden in het infrarood.

Met deze absorptie is overigens voor de in wat hogere concentratie aanwezige gassen zoals CO₂, CH₄ en N₂O nog iets bijzonders aan de hand. Weliswaar is er tot op een hoogte van 14 km slechts een geringe concentratie van deze gassen, maar er is toch zoveel CO₂ aanwezig dat alle infraroodemissie van de Aarde in het golflengtegebied tussen 13,7 µm en 16 µm al in de eerste 100 meter wordt opgenomen in de atmosfeer. Dat heeft sommigen



afb. 2a Het verloop van de absorptie bij toenemende concentraties 1, 2 en 3. Het gas blijft in de flanken absorberen. Het midden van de absorptieband gaat een steeds kleinere rol spelen.

we blijven doorstijgen, dan zal de temperatuur weer toenemen met zo'n 2 °C per km. Dat komt doordat de daar aanwezige ozon inkomend ultraviolet licht absorbeert. Die temperatuurstijging gaat door totdat geen omgevingstemperatuur meer gemeten kan worden omdat de atmosfeer daarvoor te ijl is.

De pure stralingsafkoeling van de troposfeer bedraagt ongeveer 1 °C per dag, voor ongeveer 80 % veroorzaakt door straling die afkomstig is van waterdamp. Maar ook de afwezigheid van waterdamp kan een rol spelen. Daardoor kan de Aarde ongehinderd naar het heelal stralen. In een woestijnnacht is dat duidelijk merkbaar; het koelt dan snel af. Wéér moet worden opgemerkt dat de ge-

ertoe verleid te stellen dat deze absorptie al is 'verzadigd' en dat verder toevoegen van CO₂ geen effect zou hebben. Dat is niet juist.

Als we de mate waarin infrarood wordt geabsorbeerd bij een gegeven CO₂-concentratie, afzetten tegen de golflengten, dan krijgen we een klokkromme: in het midden van het golflengtegebied is zij het hoogst. Naar de flanken (13,7 μm en 16 μm) wordt zij wel minder, maar er blijft een zekere mate van absorptie bestaan. Deze flankabsorptie verzadigt veel minder gauw, omdat zij zo veel zwakker is! Wel wordt het effect van een toename van CO₂ minder naarmate er meer van is. Daarom wordt het stralingseffect ten gevolge van CO₂ als een logaritmische term voor de absorptie aan de flanken meegenomen (zie afbeelding 2a).

Een dergelijk verschijnsel doet zich voor bij methaan. Ook daar treedt een zekere 'verzadiging' op, maar veel minder sterk, zodat het stralingseffect met een vierkantswortel afhankelijkheid kan worden beschreven. Tevens moet er rekening gehouden worden met overlappende absorpties zoals van CH₄ en N₂O. Dáárvoor worden dan ook gewogen mengtermen in de berekeningen meegenomen. Alle andere broeikasgassen zijn van een dermate grote verdunning dat ze eenvoudig lineair kunnen worden behandeld: twee keer zoveel gas, twee keer zo groot de absorptie van aardse infraroodstraling. Tot nu toe bespraken we alleen de zogenoemde *directe* effecten van infraroodabsorptie door CO₂ en andere BKG's (broeikasgassen). Er zijn echter veel mee- en tegenkoppelingen denkbaar, zelfs op wereldschaal, die de modellen sterk niet-lineair maken. We noemen er hier een paar: hogere temperaturen betekenen in eerste instantie minder wolkvorming, dus een grotere zoninstraling en dus een meekoppeling, een verergering. Een ander gevolg van temperatuurverandering zou kunnen zijn dat het ijs van gletsjers maar vooral van de poolkappen zou gaan smelten. Daardoor wordt de Aarde minder wit en dus minder weerkaatsend. Zij zal als een zwarte zonnecollector meer zonlicht opnemen. De temperatuur stijgt nog meer, een klassiek geval van meekoppeling, waardoor grote veranderingen zouden kunnen plaatsvinden.

Maar hogere temperatuur betekent ook hogere luchtvochtigheid. Nu is het aan de polen nog erg droog. Als vochtige lucht daar naar toe zou worden getransporteerd, kan men veel meer sneeuw verwachten, waardoor de witheid en dus de weerkaatsing van de Aarde zou toenemen, waardoor de temperatuur zou afnemen. Een klassiek geval van tegenkoppeling dus: alle veranderingen worden min of meer afgeremd.

Wat overheerst? Het zal duidelijk zijn: alleen zeer gedetailleerde beschouwingen, uitgaande van zeer goed gevalideerde gegevens kunnen met zekerheid uitsluitsel over deze dilemma's geven.

Stralingsforcering

Als de temperatuur van de Aarde gemiddeld constant is, heerst er in de stratosfeer gemiddeld stralingsevenwicht: de inkomende stralingsenergie

van de Zon is gelijk aan de uitgaande infrarode stralingsenergie. Wanneer aan de atmosfeer zogenoemde broeikasgassen of aërosolen worden toegevoegd, dan zal de stralingsbalans veranderen. De atmosfeer zal meer infrarode aardstraling tegenhouden. Men noemt dit toeneming van de 'stralingsforcering' (F).

Als ijkjaar nemen we 1765 toen er nog bijna geen industrie was. Dat was al duizenden jaren zo geweest. De atmosfeer had dus voldoende tijd gehad om in evenwicht te komen. Met behulp van de eerder besproken modellen kan men de fluxverandering aan de tropopause berekenen. Door dat voor verschillende concentraties te doen krijgt men een serie uitkomsten. Die kunnen dan aan een functioneel verband worden aangepast, waardoor er gemakkelijker mee valt te rekenen. In tabel I is een aantal van die relaties gegeven.

Andere broeikasgassen zoals CFK-11 en CFK-12, enzovoorts, zijn lineair in hun effect, $\Delta F = kC$, waarin de factor k varieert tussen 0,2 en 0,3 als de concentratie C in ppb (delen per miljard) wordt gegeven. Met deze gegevens konden onderzoekers afbeelding 3 construeren, nadat zij met behulp van massaspectrometrische methoden uit in ijs ingesloten luchtbelletjes hadden gemeten wat de concentraties vóór 1950 waren. Het is duidelijk dat de stralingsforcering sinds 1765 behoorlijk is toegenomen.

Stralingsforcering (ΔF in Wm^{-2}) voor gassen		
Gas	Functie	Opmerkingen
CO ₂	$\Delta F = 6,3 \ln(C/C_0)$	met $C_0 = 279$ ppm
CH ₄	$\Delta F = 0,036 (\ll M - \ll M_0)^*$	met $M_0 = 790$ ppb
N ₂ O	$\Delta F = 0,14 (\ll N - \ll N_0)^*$	met $N_0 = 0,027$ ppb

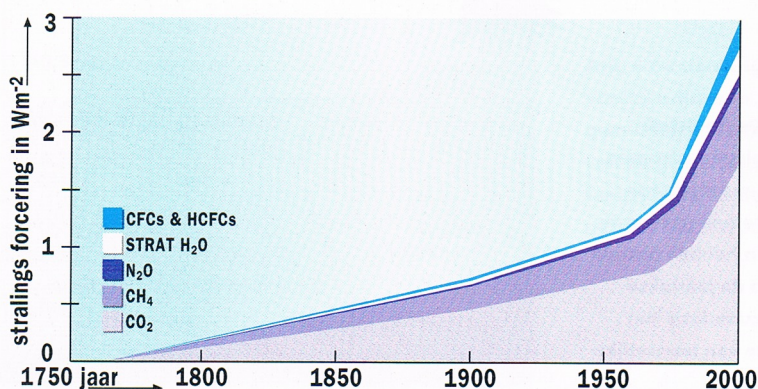
* met correctie termen voor overlappende absorpties van CH₄ en N₂O (C = koolstof, M = methaan, N = stikstof)

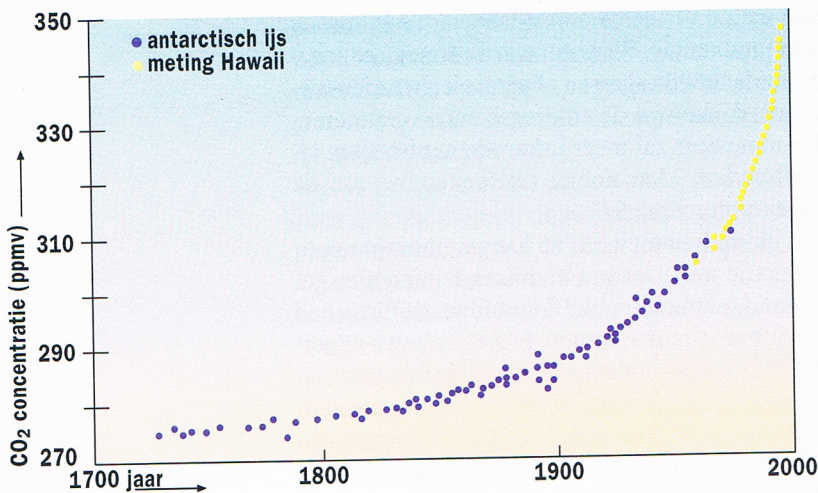
Tabel I

Water

Het belangrijkste broeikasgas is ongetwijfeld waterdamp. Toch wordt het die naam meestal niet gegeven. De hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer wordt 'intern geregeld'; de mens heeft daarop geen directe invloed. We kunnen nog steeds niet op enige schaal regen maken. Veranderingen in de hydrologische cyclus zijn een eventueel *indirect*

Afb. 3 Stralingsforcering van verscheidene broeikasgassen vanaf 1765.





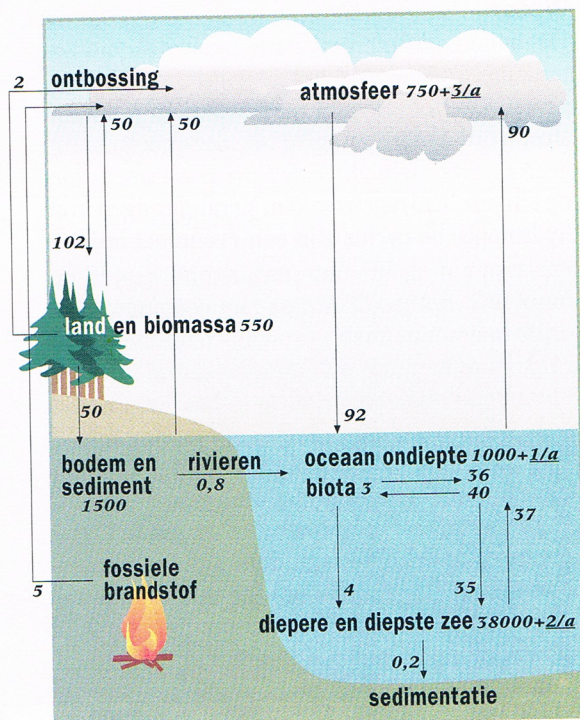
Afb. 4 Toename van de concentratie van atmosferische CO₂ in de laatste 250 jaar afgeleid uit metingen aan in Antarctica ijs gevangen luchtbelletjes en uit metingen op Hawaii sinds begin jaren vijftig

gevolg van menselijk handelen, maar kunnen niet antropogeen genoemd worden. Wél moet die cyclus altijd in de modellen meegenomen worden. Ruwweg draagt water voor zo'n 80 % aan het broeikas effect bij.

Koolstofdioxide (CO₂)

Na water is CO₂ het belangrijkste broeikasgas. Voor zover de mens het broeikas effect versterkt, komt dit vooral door dit gas (zie afbeelding 4). Vandaar de huidige ongerustheid. Het is daarom de moeite waard om de globale koolstofcyclus te bezien (zie afbeelding 5; de hoeveelheden zijn in gigaton koolstof (GtC); 1 gigaton CO₂ zou 44/12 maal zo veel zijn).

Voor de mens zijn twee fluxen belangrijk, want wellicht beïnvloedbaar: het resultaat van verbranden van fossiele brandstoffen (5 GtC per jaar) en de CO₂ die vrijkomt door het kappen en verbranden of laten verrotten van hout (2 GtC per jaar) en door sommige industriële activiteiten (cementproductie). Die activiteiten over de laatste 200 jaar worden verantwoordelijk gehouden voor de



Afb. 5 De koolstof-reservoirs en -stromen in giga-metrische ton (10⁹). De onderstreepte getallen hebben betrekking op de jaarlijkse CO₂-accumulatie ten gevolge van menselijke activiteit.

toename van de CO₂-concentratie (afbeelding 4). Het duurt ongeveer vier jaar voordat een atmosferisch CO₂-molecuul tijdelijk wordt vastgelegd in een plant of in de oceaan. Dit is niet de tijd die het CO₂-systeem neemt om na verhoging van de concentratie terug te keren naar het oorspronkelijk gehalte. Deze is iets van 50...200 jaar. Zo lang neemt het voor de extra CO₂ om definitief vastgelegd te worden in gesteente. Deze lange tijden zijn belangrijk wanneer men tot verlaging van het CO₂-gehalte wil komen. Maatregelen daartoe zullen pas merkbaar effect hebben op een termijn van tientallen jaren.

Een redelijke vraag is natuurlijk of al die extra CO₂ sinds 1765 is veroorzaakt door de mens. Schattingen leiden tot een jaarlijkse emissie in 1995 van 5,5 GtC/a. Naast CO₂ van fossiele brandstof en cementproductie is er ook nog CO₂-toename ten gevolge van ontbossing in de tropen. Deze hoeveelheid wordt geschat op 1,6 GtC/a. Dat is een getal met een grote foutenmarge ($\pm 0,5$ GtC/a). Voorlopig lijkt het vrijgekomen land hoofdzakelijk voor landbouw te worden gebruikt en dan is de tijd waarvoor CO₂ wordt vastgelegd (in gewas) te kort om in de CO₂-balans te figureren. Maar herbebossing in subtropische en matige streken legt jaarlijks naar schatting 0,5 GtC vast.

CO₂ is ook een 'meststof' voor bomen. Men schat dat zo (met een grote foutenmarge) circa 1,3 GtC per jaar extra wordt vastgelegd.

Over de uitwisseling van het oppervlaktewater van de oceanen met de diepere lagen is heel weinig bekend, maar als we het jaarlijkse budget van de antropogene CO₂ opmaken, dan ziet dat er ongeveer uit zoals weergegeven in tabel II.

Het lijkt er een beetje op dat men als een *missing sink* de definitieve opslag in de diepe oceaan heeft genomen.

Erg veel ander bewijsmateriaal is er niet. Maar een feit is dat het CO₂-gehalte van de atmosfeer sinds 1960 jaarlijks met zo'n 1,6 ppm is toegenomen tot de huidige waarde van 358 ppm.

Methaan

Methaan (aardgas, CH₄), het na CO₂ meest bijdragende broeikasgas, komt momenteel met een gehalte van 1,72 ppm in onze atmosfeer voor. De concentratie neemt met 0,8 % per jaar toe. Waarom zouden we ons over zo weinig CH₄ druk maken? De Greenhouse Warming Potential (GWP) van methaan, de effectiviteit voor stralingsforcing, is door zijn sterkere infraroodabsorptie ruwweg 60 keer zo groot per gram als die van het broeikasgas CO₂. Daar staat tegenover dat CH₄ door hydroxyl- (OH)-radicalen binnen negen jaar al tot de helft wordt afgebroken tot H₂O en zwak-IR-actieve producten. Het effect is daardoor kortstondig vergeleken met dat van CO₂, maar als men een systeem beschouwt waar elk jaar een tental ppt (particles per trillion, 10¹²) bijkomt, dan draagt ondanks zijn lage concentratie methaan dus toch aanzienlijk bij aan de stralingsfocering en dus aan het broeikas effect.

Wat zijn de bronnen van methaan in de atmosfeer? In eerste instantie moerassen (bij ons heette methaan vroeger niet 'aardgas', maar 'moerasgas'). Ook schijnt er een vergelijkbaar proces op te treden in natte rijstvelden (alhoewel dit door Indiase wetenschappers wordt bestreden). Darmgisting bij dieren, produktie door termieten en verliezen bij winning van olie en aardgas zijn andere bronnen. Dan zijn er nog verscheidene kleinere zoals steenkoolmijnen, aangeplempte gronden (vaak afval) en de oceanen. Ten slotte nog de lekkage van pijplijnen voor aardgas. Met name de Siberische vertonen veel lekken.

Er is nog een verborgen mogelijkheid. Methaan vormt zogenoemde hydraten met water, die bij lagere temperatuur en/of onder hogere druk stabiel zijn. Er is de veronderstelling geuit dat de grond van de toendra veel van deze hydraten bevat. Een temperatuurverhoging van de Aarde zou deze hydraten kunnen doen ontleden, waardoor veel extra methaan in de atmosfeer vrij zou komen. Een

Jaarlijks Budget

EMISSIES		OPSLAG	
Brandstof en/of cement GtC/jr	5,5 ± 0,5	Atmosfeer	3,3 ± 0,5
		Hergroei	0,5 ± 0,5
Tropisch Bos	1,6 ± 1,0	Bemesting	1,3 ± 1,5
		Oceanen	2,0 ± 0,8
Totaal	7,1 ± 1,1		7,1 ± 1,3

dergelijke 'voorraad' methaan wordt ook wel verondersteld zich in de diepe oceaan te bevinden. Verhoogde temperaturen zouden ook die hoeveelheid kunnen vrijmaken. Hoeveel dat zou zijn is pure speculatie, we laten het daarom bij deze opmerking.

Andere broeikasgassen

Naast CO₂ en CH₄ zijn er nog enkele andere broeikasgassen, zoals N₂O (lachgas) en CFK en in het algemeen halo-alkanen. N₂O komt vooral vrij uit oceanen en (sterk variërend) uit zoet-waterreservoirs. Het is nog niet duidelijk welke processen tot N₂O-vorming leiden. Vooral bodems lijken N₂O vrij te maken, door nitrificatie onder anaërobie condities. Verder geven explosiemotoren en de chemische industrie N₂O af en komt het vrij bij verbranden van biomassa. Het gehalte aan N₂O is nu 0,310 ppm, dat is 8 % hoger dan in het pre-industriële tijdperk; de toename is circa 0,2...0,3 % per jaar, kennelijk een heel geringe antropogene bijdrage.

Daarnaast hebben we nog de CFK's, de volledig gehalogeneerde koolwaterstoffen. Eenmaal in de stratosfeer dragen ze bij aan het ontstaan van het ozongat. In de troposfeer dragen ze bij aan het broeikas effect. Ze zijn zeer stabiel en zullen hun bijdrage lang leveren. Hun Global Warming Potential is zeer hoog, tussen 4000 en 8000. Dat wil

zeggen bij gelijke hoeveelheid zijn ze 4000 tot 8000 keer zo effectief voor opwarmen als CO₂! Gelukkig zijn de concentraties niet zo hoog, ze liggen rond de 100 ppt en alles te zamen circa 2000 ppt. Zij dragen toch bij tot het (extra) broeikas effect. Gelukkig zijn hun concentraties in de atmosfeer nu gestabiliseerd of licht aan het dalen. Gevreesd moet echter worden dat de CFK's door HFK's (waterstof-fluorkoolwaterstoffen) vervangen zullen worden. Die laten ozon ongemoeid, maar zijn een broeikasgas met een aan CFK's gelijke GWP. Naast N₂O en de CFK's heeft men dan nog O₃ (ozon) in de troposfeer. Ongeveer 10 % van het O₃ in de stratosfeer wordt naar de troposfeer gevoerd, maar het komt ook vrij bij de oxidatie van methaan. Ozon in de troposfeer draagt bij aan het broeikas effect, in de stratosfeer vangt het de directe zonnestraling in. Meer ozon dáár betekent afkoeling. In de laatste jaren is boven Antarctica een vermindering van het ozongehalte geconstateerd, in mindere mate evenzo boven Arctica.

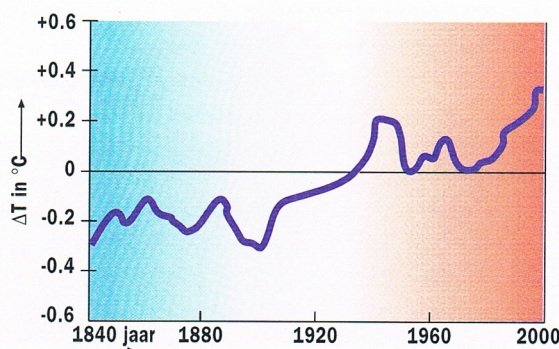
Bij de tropen lijkt het onveranderd te zijn. Er is van het O₃ netto een klein verwarmend effect te verwachten.

Tabel II

Aërosolen

Aërosolen worden veroorzaakt door stofstormen, door zeezout, maar ook door het onder invloed van zonlicht en water samenklonteren van zwaveldioxidegas tot kleine druppeltjes zwavelzuur (zure regen). Ongeveer 10 % van het stof en vrijwel alle zure regen is van antropogene oorsprong, en dat geldt waarschijnlijk ook voor het verbranden van biomassa, al is dat niet echt zeker. De verblijftijd van aërosolen in de troposfeer is van de orde van enige dagen tot enige weken. Voor een accumulereffect behoeft dus niet te worden gevreesd. Het voorkomen van aërosolen is erg ongelijk, omdat zij vaak van lokale oorsprong zijn en betrekkelijk snel weer neerslaan. Zo wordt bijvoorbeeld 80 % van de massa van natuurlijke en antropogene aërosolen op het noordelijke halfrond gevonden.

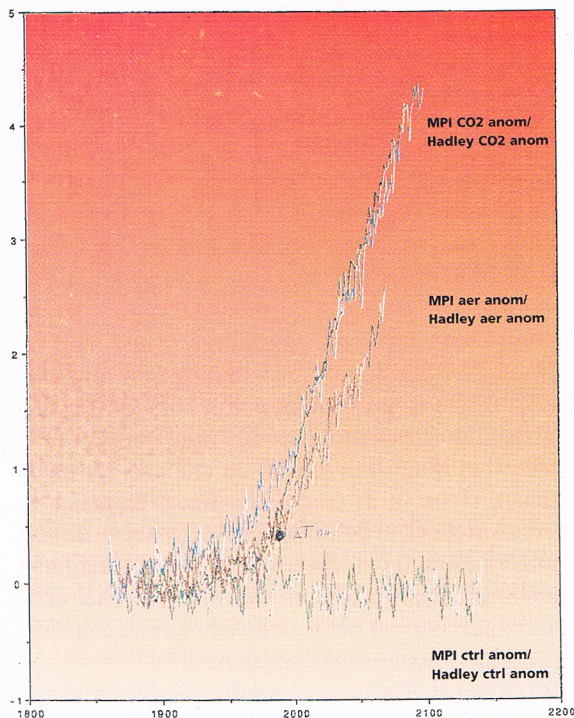
Sulfaat-aërosolen vergroten vooral de totale weerkaatsing van de Aarde en leiden tot afkoeling. Roetdeeltjes echter zijn meer als een broeikasgas. Het totale directe gemiddelde effect van aërosolen op de stralingsforcering is niet onbelangrijk en zal onder voorbehoud waarschijnlijk tot enige afkoeling leiden.



Afb. 6 De tienjarige voortschrijdende gemiddelde afwijking van de gemiddelde temperatuur in de periode 1925-1935.

Afb. 7 Huidige afwijking van de gemiddelde temperatuur in de 'synthetische' ruis van twee broeikasmodelberekeningen. MPI CO₂ anom is de verhoging van de gemiddelde wereldwijde temperatuur bij toename van de CO₂-concentratie volgens het klimaatmodel van het Duitse Max Planck Instituut. Hadley CO₂ anom: hetzelfde, maar dan berekend met het klimaatmodel van het Britse Hadley Instituut. MPI aer anom en Hadley aer anom: in beide klimaatmodellen wordt nu ook uitgegaan van hogere concentratie aërosolen. Die zorgen voor afkoeling, c.q. geringere opwarming dan CO₂ aléén zou doen. De grafiek in het horizontale vlak laat zien hoe het klimaat zich volgens beide modellen zonder toename van CO₂ en aërosolen zou gedragen.

ΔT= huidige temperatuur



De temperatuur van de Aarde

De stralingsforcering is sinds 1765 behoorlijk toegenomen. Maar is het daardoor sindsdien ook warmer op Aarde geworden? Redelijk betrouwbare temperatuurreeksen zijn beschikbaar, maar zij zijn althans voor de vroegste decennia (1860-1890) open voor discussie. Zijn de thermometers goed genoeg geweest, was het meetnet dicht genoeg, enzovoorts.

Het wordt allemaal iets betrouwbaarder wanneer we alleen naar de verschillen tussen de jaren kijken; dan vermijden we wellicht de systematische fouten. Afbeelding 6 laat het verloop van deze verschillen ten opzichte van het gemiddelde van 1925-1935 zien. Over de gehele 134 jaar zou men tot een opwarming van 0,5 °C kunnen besluiten. De afgelopen 130 jaar lag die temperatuurverhoging binnen de natuurlijke schommeling van het klimaatsysteem, maar dat zegt niets over het ge-

drag in de volgende 100 jaar. De statistiek van het temperatuurverloop is over langere tijd niet goed bekend en zal dat voorlopig ook niet worden. Maar wellicht bieden recente, heel uitvoerige klimaatsimulatieprogramma's wél soelaas. Zij nemen vooral ook het gedrag van de oceanen en hun koppeling via het klimaat aan de landmassa's mee. We kunnen die programma's bij verschillende beginvoorwaarden laten starten. Elke keer krijgen we een verloop in de tijd te zien van allerlei grootheden, waaronder de temperatuur. Door dat een groot aantal keren voor verschillende beginwaarden te herhalen, krijgen we een soort ruis, een soort statistiek.

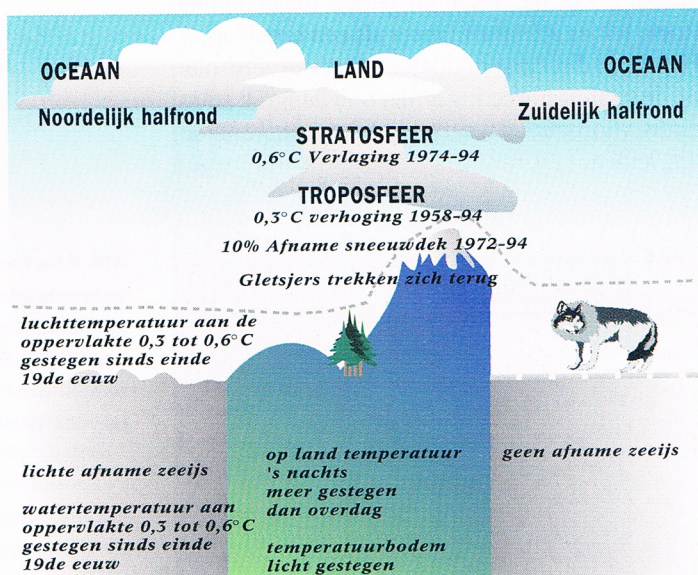
Als we voldoende statistiek hebben over de huidige situatie, laten we het programma weer lopen, maar vergroten we heel langzaam bijvoorbeeld de CO₂-concentratie tot men een verdubbeling ten opzichte van de eerdere situatie heeft bereikt. Ook dat herhalen we een aantal keren en we bekijken of de berekende waarden voor de inmiddels verlopen jaren aansluiten bij de gemeten waarden en of latere boven de 'synthetische' ruis uitsteken. Het resultaat voor twee computerberekeningen zien we in afbeelding 7. De huidige temperatuur is aangegeven. Men zou kunnen concluderen, dat het opwarmend effect van de broeikasgassen *nèt* waarneembaar is.

Er zijn ook andere, meer experimentele indicatoren denkbaar: gedesaggregeerde gegevens, vooral in continenten en oceanen gescheiden. Ze zijn samengevat in afbeelding 8. De stratosfeer lijkt tussen 1979 en 1994 zo'n 0,6 °C kouder te zijn geworden. De troposfeer werd tussen 1958 en 1994 zo'n 0,3 °C warmer, maar toont geen verandering over de laatste 15 jaar, terwijl de temperatuur op het aardoppervlak zo'n 0,3...0,6 °C hoger schijnt te zijn geworden.

De gemiddelde sneeuwbedekking op het Noordelijk Halfrond lijkt 10 % te zijn afgenomen over de laatste 21 jaar en de gletsjers geven in het algemeen een teruggang te zien. Het oppervlaktewater in de oceaan volgt de aardtemperatuur: een stijging van 0,3 °C tot 0,6 °C sinds het eind van de vorige eeuw. Opmerkelijk is dat over de laatste 40 jaar de nachttemperaturen sneller zijn gestegen dan die van de dag, iets wat ook uit de computermodellen naar voren komt. Ten slotte is het zeeijs op het Noordelijk Halfrond wat verminderd over de laatste 20 jaar en sinds 1990 óók op het Zuidelijk Halfrond.

Naast de temperatuur zijn er ook hydrologische verschijnselen waarneembaar. Ze zijn in afbeelding 9 aangegeven: de hoge bewolking is sinds 1951 toegenomen, maar blijft sinds 1981 gelijk. De middenniveau-bewolking op het Noordelijk Halfrond is ook toegenomen, evenals de hogere convectieve wolken. De mooi-weercumulus is echter afgenomen. Min of meer hetzelfde geldt voor het Zuidelijk Halfrond. De subtropen zijn droger geworden en de verdamping van water in de VS en in het territorium van de voormalige Sovjetunie is afgenomen. Zo is ook de grond in dat ge-

Afb. 8
Temperatuurindicaties voor het broeikas effect.



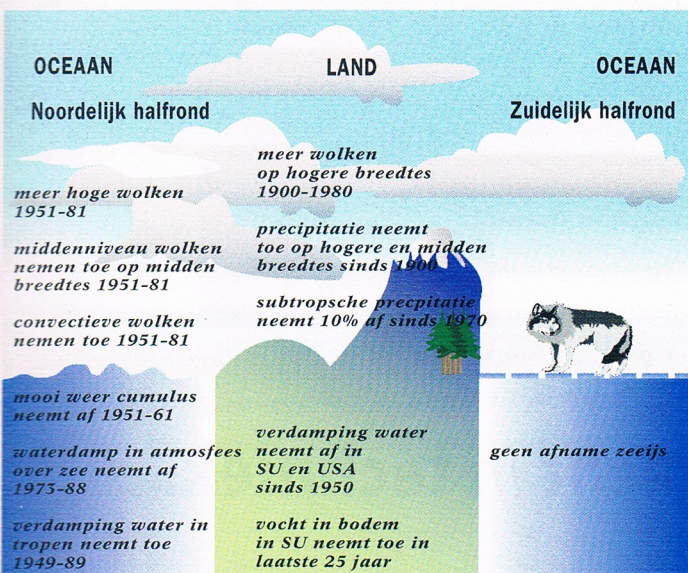
bied natter geworden. Boven de oceaan vindt men overigens meer waterdamp dan vroeger in de lucht. Al deze verschijnselen kunnen in verband gebracht worden met modelleringen van het broeikas-effect, maar zekerheid geven ze niet.

Als er al een verandering komt is het steeds de vraag of menselijk handelen daarvoor verantwoordelijk is. Van bijzonder belang is het mogelijke stijgen van de zeespiegel. Het bepalen van de hoogte daarvan is aan verschillende moeilijkheden onderhevig. Men meet de zeespiegel ten opzichte van het land, maar wat als de bodem daalt? Meten we de zee- (of ijs-) hoogte met een satelliet, dan moet men de baan van die satelliet tot op de centimeter nauwkeurig kennen. Aan beide technieken is veel aandacht besteed, de consensus lijkt te zijn dat een stijging van 2...7 cm over de laatste honderd jaar heeft plaatsgevonden. Deze wordt vooral veroorzaakt door de warmteuitzetting. Door de langzame uitwisseling van diep en ondiep oceanwater kan verwacht worden dat de 'rijzing' nog vele jaren door zal gaan.

De Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) van de VN bestudeert intensief alle gegevens over het broeikas-effect. Het panel durft in stelligheid niet verder te gaan dan dat *'The balance of evidence suggests a discernible human influence on global climate'*. Voorzichtiger kun je het niet zeggen: niet *evidence*, maar *the balance of evidence*. Niet *shows*, maar *suggests*. En: *discernible human influence* in plaats van *perceptable*, of zelfs maar gewoon *human influence*. Nee je moet erg goed kijken voor je het ziet, het gaat niet vanzelf: *discernible*. En dan *influence on global climate*: Er wordt niet eens gepoogd aan te geven wat voor invloed. Wordt 't kouder, warmer, natter, droger? Het IPCC zegt het niet, maar erkent wel de invloed van de mens. Het is moeilijk om met die uitspraak van mening te verschillen.

Conclusies

Klimatologen adviseren regeringen over de mogelijke gevolgen van het (extra-) broeikas-effect.



Moeten zij adviseren alle industriële CO₂-productie te verbieden, haar te belasten of de zaak op zijn beloop laten? Ik benijd de klimatologen niet. Zij zouden toch eigenlijk een antwoord moeten kunnen verzinnen. Maar dat lijkt niet zo te zijn. Het is eerder: 'Er moet nog meer onderzoek gebeuren'.

Ik ben zelf geen klimatoloog, ik ben spectroscopist en weet als zodanig iets van licht en materie af. Maar ik heb dit verhaal na enige studie geschreven en voel mij als een onbetrokken intermediair. Dan vind ik het passend als ik voor de lezer opschrijf wat ik er van denk. En wel in drie categorieën: wat weten we (vrijwel) zeker, wat vermoeden we en wat kunnen we voorlopig alleen maar geloven?

De toename van de CO₂- en CH₄-concentraties zal voorlopig nog wel doorgaan, zeker wat het effect op de temperatuur betreft. Dat heeft een 'uitlooptijd' van ten minste honderd jaar. Dat betekent dat we wel zeker weten dat het warmer wordt in de volgende honderd jaar. Gemiddeld 2...3 °C en méér aan de polen dan aan de evenaar.

Dat betekent ook dat - puur door thermische expansie van het oppervlaktewater - de zeespiegel ongeveer twintig centimeter zal stijgen, misschien iets meer. Ik vermoed dat de 'verwoestijning' van het subtropisch gebied verder zal worden bevorderd en dat in het algemeen soorten landbouw die het al moeilijk hebben verder in de verdrukking komen, behalve als ze door de opwarming juist minder marginaal worden. Toch weer wijn uit Nederland? Gegeven onze geografische positie zal de druk op de subtropen wellicht leiden tot een hogere druk van politieke of economische vluchtelingen. Ik vermoed ook dat Nederland de veranderingen bij zal kunnen houden, het is een verstandig land dat, als het getij verloopt, de bakens tijdig verzet.

Ik geloof niet dat we binnen afzienbare tijd 'Amersfoort aan Zee' zullen meemaken. Wel geloof ik, gegeven de onzekerheid van de berekeningen, dat de zogenaamde Small Island States zich terecht zorgen maken. Het gaat toch niet aan de bewoners van deze eilanden in grote moeilijkheden te brengen door onze emissies.

Ik geloof niet dat voldoende bewijs beschikbaar is dat grote stormen zullen plaatsvinden. Ik geloof niet dat in Nederland een subtropisch klimaat zal ontstaan.

Wat geloof ik dan wel? Ik vermoed, met aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid, dat het langdurig effect van CO₂, juist is. En dát betekent dat regeren in dit geval echt vooruitzien moet zijn. Maatregelen die we nu nemen zullen hun effect over 10...20 jaar hebben, dus is het hoog tijd om ermee te beginnen. ●

Afb. 9 Hydrologische indicaties voor het broeikas-effect.