

Enkele moleculaire aspecten van de atmosferische temperatuuropbouw en van het broeikaseffect.

G.P. Können, Soest, The Netherlands
Private document 2010/03
Versie 4; 22 nov 2010

INHOUD

1. De verticale temperatuuropbouw van de atmosfeer p.2
 - 1.1 *Straling door warmte*
 - 1.2 *Temperatuuropbouw atmosfeer: primaire voorstelling*
 - 1.3 *Niet-ideale gassen in stralingszin*
 - 1.4 *Temperatuuropbouw atmosfeer: invloed van dissociatieprocessen*
 - 1.5 *Equipartitie*
 - 1.6 *Hoogten waarop deeltjes hun aanslagenergie kwijt kunnen via uitzending van een foton*

2. Broeikasgassen p.5
 - 2.1 *Welke moleculen zijn broeikasgassen?*
 - 2.2 *Een gedachte-experiment met broeikasgassen*

3. Het natuurlijke broeikaseffect p.7
 - 3.1 *Broeikasgassen in de atmosfeer zijn sporengassen*
 - 3.2 *Fysica van het broeikaseffect*
 - 3.3 *Sterkte van het natuurlijk broeikaseffect; de rol van waterdamp*

4. Versterking van het broeikaseffect door toename van het CO₂ gehalte p.8
 - 4.1 *Versterking broeikaseffect gebeurt anders dan je zou denken*
 - 4.2 *Mechanisme van de temperatuurtoename in de troposfeer*
 - 4.3 *Afkoeling van de stratosfeer*

Enkele moleculaire aspecten van het broeikaseffect.

1. De verticale temperatuuropbouw van de atmosfeer

1.1 *Straling door warmte*

Een lichaam van een zekere temperatuur verliest zijn warmte door het uitzenden van elektromagnetische straling. De maximale golflengte waar dat gebeurt is gegeven door de verschuivingswet van Wien¹. De zon heeft een oppervlaktetemperatuur van 6000 K en straalt dus maximaal bij 0.5 μm , dwz in het zichtbaar licht. De Aarde heeft een oppervlaktetemperatuur van bijna 300 K en straalt dus bij ca 10 μm , dwz in het infrarood (IR).

1.2 *Temperatuuropbouw atmosfeer: primaire voorstelling*

De zon warmt de het Aardoppervlak en de oceanen op via absorptie. De atmosfeer absorbeert in eerste benadering (ideaal gas) nauwelijks zonnestraling. Hij zou dus zeer koud moeten zijn, omdat hij geen straling invangt en zijn eventuele warmte zou moeten verliezen door uitstraling, net als een vast lichaam. De reden dat de atmosfeer toch op temperatuur blijft, is dat hij in contact staat met de ondergrond. Hij wordt dus als het ware van onderaf ‘gekookt’: de opwarming geschiedt door het opstijgen van warme bellen lucht (convectie). Bij het opstijgen zetten deze bellen uit (door de afnemende luchtdruk). Dit gaat met een temperatuurverlaging van de bel gepaard. Door dit proces neemt de temperatuur van de atmosfeer af met de hoogte, met ca 6.5 K/km.

1.3 *Niet-ideale gassen in stralingszin*

Een niet-ideaal gas in stralingszin kan ook energie opnemen op andere wijze dan via onderlinge botsingen. De deeltjes in zo'n gas – atomen en moleculen – kunnen bijv ‘electronisch aangeslagen’ worden: een electron komt door straling in een hogere baan. Wanneer dat electron weer terugvalt, zendt het deeltje licht uit en blijft alles bij het oude. Maar indien het aangeslagen deeltje met een ander botst voor het de kans heeft gehad zijn licht uit te zenden², dan draagt hij zijn energie over aan het andere deeltje dat dus harder gaat bewegen, oftewel een hogere temperatuur krijgt. Dit heet wel een botsing van de tweede soort.

Twee- of meeratomige moleculen kunnen bij invangst van licht ook, in plaats van electronisch aan te slaan, gaan dissociëren. Ze vliegen dan uit elkaar en kunnen eventueel weer (via een botsing met een ander deeltje) recombineren. Dat andere deeltje krijgt er dan bewegingsenergie (kinetische energie) bij, dus de temperatuur van het gas stijgt.

Er is een forse hoeveelheid foton-energie nodig om moleculen te dissociëren – nl. in de orde van eV (electronvolts). Fotonen van zichtbaar licht (golflengten

¹ Deze luidt $\lambda T = 3 \cdot 10^{-3}$ mK waarin λ golflengte is (in meters) waarop maximaal geëmitteerd wordt, en T de absolute temperatuur.

² Voor electronische aangeslagen toestanden is dit proces (botsingen van de tweede soort) zelfs op zeeniveau in de Aardse atmosfeer zeldzaam, omdat de vervaltijd van electronisch aangeslagen moleculen zeer kort is ($\sim 10^{-8}$ s). Was dat niet het geval, dan zou bij bliksem geen flits zichtbaar zijn, omdat alle aanslagenergie via botsingen van de tweede soort meteen in warmte werd omgezet.

0.4-0.7 μm) hebben een energie¹ van ruwweg 2 eV. Kortgolvig zichtbaar licht en ultraviolette straling (UV) zijn dus in staat tot dit proces. Het infrarood (IR) dat de Aarde uitstraalt (0.1 eV per foton) doet bij dissociatieprocessen niet mee.

1.4 Temperatuuropbouw atmosfeer: invloed van dissociatieprocessen

Dissociatieprocessen van twee- of drieatomige moleculen beïnvloed de temperatuuropbouw van de Aardse atmosfeer door de aanwezigheid van twee gasen, namelijk ozon (O_3) en waterstof (H_2). Deze zijn aanwezig op grote hoogten (resp. ca 20-50 km en >90 km), als gevolg van respectievelijk chemische (re)combinatie van een los zuurstofatoom met een zuurstofmolecuul en recombinatie van losse waterstofatomen uit gedissocieerde watermoleculen (H_2O).

Waterstof (H_2) heeft een dissociatie-energie van 4.5 eV, dus licht moet tenminste een golflengte van 0.27 μm hebben om het molecuul te kunnen dissociëren. Inderdaad houdt het hoge waterstof op >90 km het zogeheten UV-C licht van de zon tegen (golflengten 0.10-0.28 μm ; UV staat voor ultraviolet)². En ozon heeft een dissociatie-energie van ca 4 eV, zodat licht het kortere golflengten dan 0.31 μm het kan dissociëren – de ozonlaag op 20-40 km (of liever: het dissociatieproces erin) houdt dus bovendien het UV-B licht van de zon (0.28-0.31 μm) tegen. UV-A (0.31-0.40) bereikt gewoon het Aardoppervlak³.

Door de absorptie van UV licht in die twee lagen is de temperatuur aldaar hoger dan we zouden verwachten bij een ideaal gas, oftewel: de overall trend van afname met de hoogte stagneert in die twee lagen. De onderste laag waar dit gebeurt is de stratosfeer (ca. 11 tot 50 km); de bovenste de thermosfeer (hoger dan 90 km). In onderste laag van de atmosfeer (de troposfeer die zich uitstrekt van 0-11 km), en in de laag tussen de stratosfeer en de thermosfeer (de zogeheten mesosfeer, 50-90 km), doet de atmosfeer ‘gewoon’ (afname temperatuur met hoogte⁴). Zie de schets hieronder⁵.

¹ Een simpel ezelbruggetje geeft het verband tussen golflengte λ in Ångström en energie E in eV van een foton: $E = 12345/\lambda$, waarbij $10000\text{Å} = 1\mu\text{m}$. Zichtbaar licht (golflengte $\sim 0.5\mu\text{m}$) heeft dus in deze oude maat een golflengte van 5000Å en dus een energie/foton van 2.5 eV.

² Als gevolg van dit proces bestaat de allerhoogste atmosfeer voor een flink deel uit losse waterstofatomen. Hun gemiddelde snelheid van ca 2.6 km/sec is zodanig dicht bij de ontsnappingssnelheid van de Aarde (7 km/sec) dat een fractie ervan daadwerkelijk in de wereldruimte verdwijnt. Gezien vanuit de ruimte is de Aarde inderdaad door een wolk van deze ontsnappende waterstof omringt.

³ Hiermee is het hele UV gebied gecoverd, want UV met golflengten van minder dan 0.1 μm komt nauwelijks in het zonnenspectrum voor.

⁴ In de twee lagen waar de temperatuur afneemt kan wolkenvorming plaatsvinden ofwel: daar spelen zich weerverschijnselen af. Behalve de welbekende troposferische wolken, kunnen zich dus ook wolken vormen op 90 km hoogte, bovenin in een tweede weer-actieve laag, te weten in de top van de mesosfeer. Deze ijle hoge wolken zijn de befaamde zomerse ‘Lichtende nachtwolken’. Zie, onder meer, mijn artikelje in 2009 in Zenit, down te laden vanuit mijn site (www.guntherkonnen.com)

⁵ Historisch gezien is de indeling en nomenclatuur van de atmosferische lagen (troposfeer-stratosfeer-mesosfeer-thermosfeer) puur tot stand gekomen als gevolg van de ontdekking van lagen met af- of toename van de temperatuur met de hoogten. Ten tijde van deze naamgeving was het hier beschreven mechanisme achter deze gelaagdheid nog onbekend.

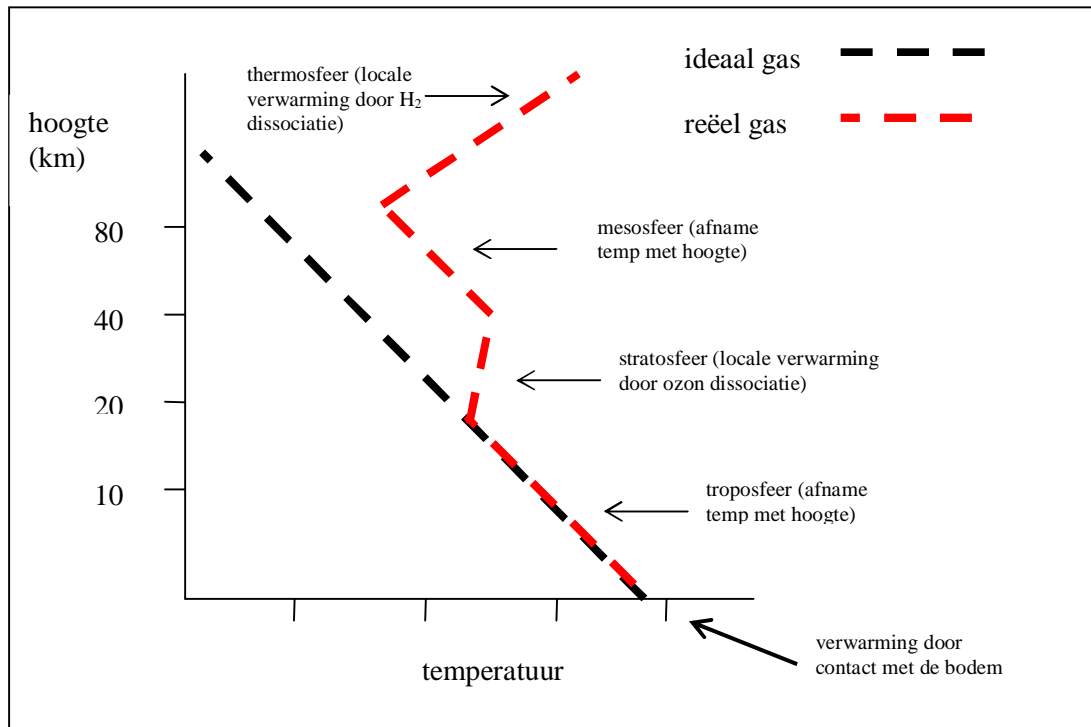


Fig. 1. De ideaal-gas atmosfeer wordt alleen vanaf de bodem door de zon verwarmd. De echte atmosfeer wordt daarnaast in de ozonlaag en de hoge atmosfeer verwarmd, waardoor de afname van de temperatuur in die lagen onderbroken is.

1.5 Equipartitie

De snelheidsverdeling van deeltjes en dus hun (kinetische) energieverdeling in een gas van een zekere temperatuur voldoet aan de zogeheten Maxwellverdeling. Omdat temperatuur uit willekeurige beweging voortkomt, is de energieverdeling in alle bewegingsrichtingen hetzelfde – dat heet equipartitie.

Een niet-ideaal gas heeft naast beweging ook interne manieren om energie op te slaan: ze kunnen elektronisch aangeslagen zijn en, als het om moleculen gaat, bovendien trillen ('vibreren') of roteren.

Het equipartitie-principe schrijft nu voor dat de interne energieniveaus en de kinetische energie elk volgens dezelfde Maxwellverdeling bevolkt zijn.

Populair gezegd: als een gas een bepaalde temperatuur heeft en opeens merkt dat hij kan vibreren en roteren, dan zal de verdeling van de vibratie energie en die van de rotatie energie gelijk zijn aan die van de bewegingsenergie van de deeltjes. Onderlinge botsingen van twee vibrerende moleculen kunnen er toe leiden dat de vibratie-energie van één van hen afneemt, en het tweede deeltje een hogere (bewegings) energie krijgt door deze klap. Bij deze uitwisselingen, die voortdurend plaatsvinden, blijft het totaal van alle energie behouden – gemiddeld behouden de deeltjes de kinetische, vibratie- en rotatie energie die hoort bij de gegeven temperatuur.

1.6 Hoogten waarop deeltjes hun aanslagenergie nog kwijt kunnen via uitzending van een foton

De minimale hoogte waarop een deeltje zijn aanslagenergie nog als foton kwijt kan alvorens te botsen hangt af van zijn vervaltijd van de aanslag en van de deeltjesdichtheid ter plekke. Een interessant ijkpunt hierbij is het groene poollicht (golflengte $0.5577 \mu\text{m}$), dat ontstaat door verval van elektronisch aangeslagen zuurstofatomen met een vervaltijd van maar liefst 0.7 sec. Dit licht¹ komt van hoogten van tenminste 80-85 km, alwaar de deeltjesdichtheid (evenals de luchtdruk) 10^{-5} keer lager is dan op grondniveau. In eerste benadering is de dichtheid waarbij verval door uitzending van een foton nog n et kan, omgekeerd evenredig met de vervaltijd. Dit leidt tot de volgende vuistregel:

- op zeeniveau moet de vervaltijd korter zijn dan $\sim 10^{-5}$ sec om licht te kunnen uitzenden
- op 15 km korter dan ruwweg 10^{-4} sec; op 30 km korter dan ruwweg 10^{-3} sec.

CO_2 , dat voor zijn vibratieovergangen (golflengten $\sim 10\text{-}20 \mu\text{m}$) een vervaltijd heeft in de orde van $10^{-4}\text{-}10^{-3}$ sec, kan als het zich in de troposfeer bevindt zijn IR licht dus niet uitzenden. Stratosferisch CO_2 kan zijn IR licht echter wel kwijt.

2. Broeikasgassen

2.1 Welke moleculen zijn broeikasgassen?

Het broeikaseffect wordt veroorzaakt door een extra verwarming van de atmosfeer. Ditmaal niet door absorptie van de straling van de zon, maar door absorptie van de infrarode straling vanaf de Aarde – ook wel warmtestraling genoemd. De geabsorbeerde straling komt dus niet van boven, maar van onderaf, en heeft maar weinig energie per foton: ca 0.1 eV.

Om de breedbandige Aardse IR straling effectief tegen te kunnen houden, moet een deeltje fotonen van *lage* energie *breedbandig* kunnen absorberen. Breedbandig houdt in dat het deeltje aangeslagen toestanden moet bezitten die energetisch dicht op elkaar zitten. Hieronder zetten we uiteen welke deeltjes broeikasmoleculen kunnen zijn, dus aan beide criteria voldoen:

Electronische aanslagniveaus in atomen of moleculen voldoen aan geen van deze twee criteria, daar hun energieniveaus meestal te hoog zijn en de energietoestanden te ver uit elkaar liggen.

Vibratietoestanden van *twee* atomige moleculen voldoen w el aan het criterium van lage-energie toestanden, maar ni et aan het criterium van breedbandigheid – hun mogelijke trillingstoestanden is beperkt tot het naar elkaar toe en van elkaar af bewegen. Daarom liggen hun energietoestanden te ver uit elkaar om een breed stuk spectrum effectief te bedekken, oftewel: tussen de energietoestanden (spectraallijnen) in hun banden zijn zodanig brede gaten dat het IR en nog makkelijk doorheen komt.

Vibratietoestanden van *meer* atomige moleculen voldoen w el aan beide criteria. De reden dat het tweede criterium nu wel vervuld wordt, is dat de atomen binnen zulke moleculen op een

¹ De reden van deze lange vervaltijd (vergeleken met 10^{-8} sec normaal) is dat het hier gaat om een overgang die quantummechanisch sterk ‘verboden’ is.

zeer groot verschillende manieren ten opzichte van elkaar kunnen trillen, en de energieniveaus dus dicht op elkaar zitten¹.

Conclusies:

1. Alle moleculen bestaand uit drie of meer atomen zijn broeikasgassen.

In onze atmosfeer zijn de belangrijkste broeikasgassen H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O .

2. Hoe meer atomen, des te sterker de broeikaswerking per molecuul.

Dit is de reden dat de zogeheten CFK's (vijf of meer atomen per molecuul) zo een enorm sterk broeikaseffect hebben.

2.2 Een gedachte-experiment met broeikasgassen

We beschouwen twee vaten met gas, beide in vacuüm en gevuld met gas. In het ene vat is een broeikasgas (CO_2 , bijvoorbeeld), in het andere een niet-broeikasgas (Argon, bijvoorbeeld). Beide gassen hebben op tijdstip nul dezelfde temperatuur (laten we zeggen 300 K) en beginnen dan af te koelen door straling. We nemen aan dat de wanden in dit proces niet meedoen en dat de twee vaten elkaar niet beïnvloeden. Zie Fig. 2. De vraag is nu: welk van de twee vaten met gas koelt het snelst af?

Het antwoord blijkt te zijn dat het vat met broeikasgas het snelst zijn warmte verliest. De reden is dat het broeikasgas een extra stralingslek heeft. Volgens het equipartitie-principe is namelijk niet alleen de snelheid maar ook de interne energietoestanden verdeeld volgens de Maxwellverdeling. Bij temperaturen in de orde van 300 K betekent dat dat vibratie (en rotatie) niveaus bevolkt zijn – tot aan energieën² van pakweg 0.1 eV.

De vibratie-aangeslagen broeikasgassen zullen deels hun energie verliezen door terugval in een lagere toestand [‘minder gaan vibreren’], hetgeen gepaard gaat met het ontsnappen van een foton. Als dat gebeurt is, is dat molecuul kouder dan het zou moeten zijn volgens de Maxwellverdeling. Door onderlinge botsingen worden de vibratieniveaus weer bevolkt en de Maxwellverdeling dus weer hersteld, maar de energie-inhoud in het vat is door het ontsnappende foton achteruitgelopen – met andere woorden, de temperatuur in het vat is verlaagd.

¹ Dit wordt nog eens versterkt door het feit dat in het vibratiespectrum de lijnen zijn verbreed door rotatieovergangen

² Bij een temperatuur van 10000 K is de gemiddelde energie van de deeltjes 1 eV. Bij 300 K is die dus 0.03 eV, maar de Maxwellverdeling schrijft voor dat ook hogere energieniveaus bevolkt zijn.

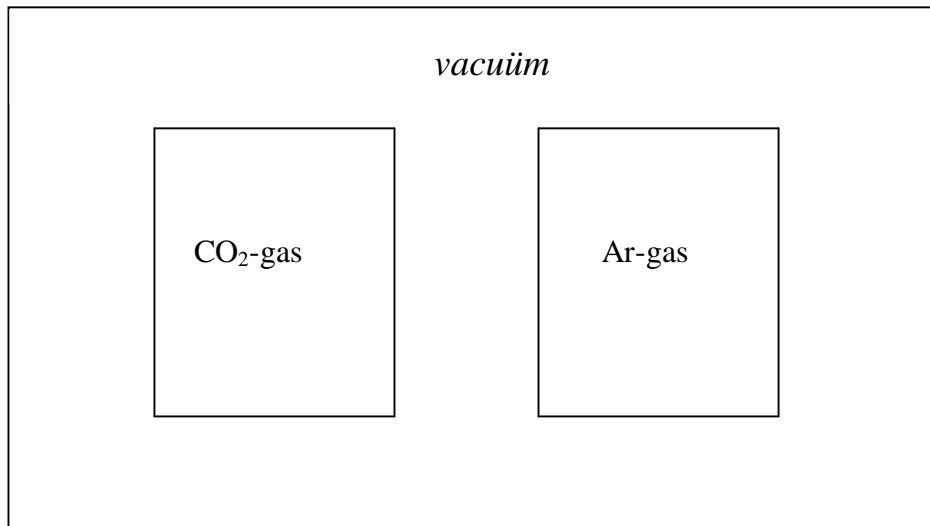


Fig. 2. In dit gedachte-experiment beschouwen wij twee vaten op grote afstand van elkaar, één gevuld met een broeikasgas en één met een niet-broeikasgas en kijken welk van de twee het snelst afkoelt. Dit blijkt het eerstgenoemde vat te zijn.

Aangezien in het vat met niet-broeikas gassen dit extra mechanisme niet aanwezig is, zal de afkoeling daar langzamer gaan dan in het vat met broeikasgassen.

Omgekeerd, als er een warmtebron van vast vermogen in beide vaten aanwezig is om de temperatuur te op een vaste niveau stabiliseren, dan zal de temperatuur in het vat met broeikasgassen lager zijn dan die in het vat zonder broeikasgassen.

3. Het natuurlijke broeikaseffect

3.1 Broeikasgassen in de atmosfeer zijn sporengassen

De atmosferische deeltjes bestaan¹ voor 99.6%² uit niet-broeikasgassen N₂ [77.8%], O₂ [20.9%] en Ar [0.9%].

De broeikasgassen maken slechts 0.4% van de atmosferische deeltjes uit: H₂O [0.4%], CO₂ [0.04%], CH₄ [0.0002%] etc.

Van die 0.4% broeikasgassen is slechts het niet-waterdeel – ééntiende van het totaal aan broeikasgas – ‘manipuleerbaar’, bijvoorbeeld door uitstoot van vulkanen of door de mens. De hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer kan niet worden gemanipuleerd, want die wordt bepaald door de dampspanning, die weer af hangt van de temperatuur: als er te weinig H₂O-damp is dan wordt dat aangevuld via verdamping van het oceaانwater; is er te veel, dan verdwijnt het terug in de oceaan via condensatie gevolgd door uitregenen.

3.2 Fysica van het Aardse broeikaseffect

NB: de diverse begrippen en fysische mechanismen zijn in de vorige secties uitgelegd.

Stap 1:

¹ Tot 100 km hoogte, dus tot en met de mesosfeer, is de atmosferische samenstelling vrijwel constant, doordat de atmosfeer tot aan die hoogten door turbulentie nog goed gemengd is.

² De hier gehanteerde maat is fractie van het aantal deeltjes, oftewel fractie per volume-eenheid (dus niet: fractie in gewichtseenheden).

- inkomende zonnestraling is geconcentreerd in het zichtbare licht
- dit licht gaat vrijwel ongehinderd door de atmosfeer en warmt de bodem op
- de atmosfeer wordt slechts in geringe mate door dit licht opgewarmd; het opwarmen gebeurt hoofdzakelijk via verwarming van de bodem

Stap 2:

- de bodem zendt warmtestraling in het IR uit
- de broeikasgassen in de troposfeer absorberen dat IR via aanslag van hun vibratietoestanden.
- voordat de aangeslagen broeikasmoleculen (via uitzenden van een IR foton) vervallen, raken ze hun interne energie kwijt via onderlinge moleculaire botsingen. Dit warmt de atmosfeer op.

Stap 3:

- er is dusdanig veel broeikasgas in de Aardse atmosfeer dat de warmtestraling van de bodem er nauwelijks doorheen kan komen: de atmosfeer is voor die IR straling vrijwel ondoorzichtig. Men zegt wel dat het atmosferische CO₂ venster vrijwel *verzadigd* is
- de uitstraling van IR straling vanaf de Aarde naar de wereldruimte gebeurt daarom niet vanaf de bodem, maar vanaf een zekere hoogte in de atmosfeer. Dit is de ‘*effectieve stralingshoogte*’. Deze effectieve stralingshoogte ligt op circa 5 km – een hoogte waar de luchtdruk 500 hPa is en de temperatuur ongeveer –20 °C.
- gemeten vanuit de wereldruimte lijkt de Aarde dus een temperatuur van *vér* onder nul te hebben. Uit stralingsmetingen van buitenaf is niet op te maken dat in werkelijkheid de temperatuur bij het Aardoppervlak door het broeikaseffect *zó* hoog is¹.

3.3 Sterkte van het natuurlijk broeikaseffect; de rol van waterdamp

De temperatuur op Aarde is door de aanwezigheid van de 0.4 % broeikasgassen 33° hoger dan het, onder verder gelijke omstandigheden, zonder broeikaseffect zou zijn. Hiervan komt slechts 7 graden direct op conto van CO₂ etc; de overige 26 graden komt voornamelijk door het feit dat de hogere temperatuur tot meer H₂O-damp leidt en hiermee het broeikaseffect verder aanjaagt².

4. Versterking van het Aardse broeikaseffect door toename van het CO₂ gehalte

4.1 Versterking broeikaseffect gebeurt wat anders dan je zou denken

Verdubbeling van de huidige CO₂ concentratie in de Aardse atmosfeer (van 0.04% naar 0.08%) leidt *niet* tot verdubbeling van het temperatuureffect: het is namelijk niet zo dat hiermee ook de IR straling twee maal beter wordt tegengehouden. Omdat het CO₂ venster al vrijwel verzadigd is, zorgt toename van CO₂ er slechts voor dat de verzadiging nog iets dichter naar de 100% toe kruipt. Het mechanisme dat tot verwarming bij de bodem leidt, is

¹ Dit speelt in extreme mate op Venus, wiens 102 keer dichtere atmosfeer (resultierend in een luchtdruk van 92.1 keer die op Aarde) voor bijna 97% uit het broeikasgas CO₂ bestaat – en aldus in een verticale kolom 170000 keer meer CO₂ moleculen bevat dan de Aardatmosfeer. De effectieve stralingshoogte zit bij Venus op 65 km hoogte, waar de temperatuur – 30 °C is. Uit IR metingen vanaf de Aarde is niet te zien dat Venus een kolosaal broeikaseffect heeft (van maar liefst 500 graden) dat er voor zorgt dat bij het oppervlak een temperatuur van maar liefst 470 °C heerst. Dit laatste werd pas duidelijk in 1970 toen de Russische ruimtesonde Venera 7 de eerste succesvolle zachte landing op Venus uitvoerde.

² Dit aanjaag-effect speelt op planeten met een hydrologische cyclus: het atmosferisch gehalte van de stof in gastoestand wordt bepaald door de temperatuur. Als de cyclus een stof betreft die broeikasgas is, dan werkt dit mechanisme als een ‘winstverdriedubbelaar’ van het broeikaseffect. Op de Aarde (H₂O-cyclus) en de Saturnusmaan Titan (CH₄-cyclus) treedt deze versterking op. Mars en Venus kennen daarentegen geen hydrologische cyclus (meer); op deze twee planeten is het broeikaseffect een zuivere CO₂ aangelegenheid.

hierdoor anders dan het beeld dat hierboven (bij de beschrijving van het natuurlijk broeikaseffect) is geschetst.

Ook de toename van het temperatuur is minder dan op grond van het naïeve beeld verwacht mag worden: in plaats van 7 graden extra, levert verdubbeling van de CO₂ concentratie slechts één graad verhoging extra aan het Aardoppervlak op. Het aanjaageffect van H₂O zorgt voor nog eens 3 graden, zodat het totaaleffect (CO₂+ H₂O) bij verdubbeling van de CO₂ concentratie op 4 graden komt – aanzienlijk minder dan de 7+26 = 33 graden bij de overgang van géén CO₂ naar het huidige niveau (één maal CO₂).

4.2 Mechanisme van de temperatuurtoename in de troposfeer

Stap 1:

- CO₂ toename zorgt ervoor dat de atmosfeer nóg ondoorzichtiger wordt voor IR. Hierdoor gaat de effectieve stralingshoogte, die zich op 5 km bevindt, wat omhoog. Omdat de atmosferische temperatuur tot aan 11 km afneemt met de hoogte, daalt door dit stijgen de temperatuur van de effectieve stralingshoogte.

Stap 2:

- De afname van temperatuur op de effectieve stralingshoogte zorgt ervoor dat er volgens de wet van Stefan Boltzman¹ minder (IR) straling de wereldruimte ingezonden wordt.
- Omdat de inkomende zonnestraling hetzelfde is, stijgt de temperatuur van de atmosfeer in de lagen onder de effectieve stralingshoogte (dus onder de 5 km).

Stap 3:

Ook in de lagen boven de effectieve stralingshoogte stijgt de temperatuur. CO₂ moleculen die zich boven de 5 km bevinden, zien niet de IR straling van de bodem, maar het IR afkomstig uit de effectieve stralingshoogte. Dit absorberen ze en de energie wordt via botsingen als temperatuurverhoging aan de omgeving medegedeeld – op dezelfde wijze als beschreven in het hoofdstukje over het natuurlijke broeikaseffect. De toename in het aantal CO₂ moleculen compenseert ruimschoots de afname in temperatuur die optreedt door het omhoogschuiven van de effectieve stralingshoogte, zodat het netto effect een verwarming is.

Het totaaleffect is dat de troposfeer bij toename van het CO₂ gehalte zowel boven als onder² de effectieve stralingshoogte opwarmt.

4.3 Afkoeling van de stratosfeer

Toename van CO₂ [en van andere broeikasgassen] leidt in de hoogste luchtlagen tot opwarming onderin tot *afkoeling* in plaats van tot opwarming.

Afkoeling gebeurt op hoogten waar de lucht zó ijl is dat een aangeslagen broeikasmolecuul zijn aanslagenergie als foton weer uitzendt vóóordat hij het via botsingen aan de omgeving kan overdragen (zie Sectie 1.6, getiteld '*Hoogten waarop...*'). Dit gebeurt op hoogten zich die ruim boven de effectieve stralingshoogte bevinden, zodat de uitgezonden fotonen vrijelijk uit de atmosfeer kunnen ontsnappen. De rol van het broeikasgas als opwarmer is daarmee uitgespeeld.

¹ Deze luidt $E = \sigma T^4$, waar E de uitgezonden energie, T de absolute temperatuur en σ een constante is.

² Het is interessant zich te realiseren dat de opwarming onderin de atmosfeer afhangt van het feit dat de temperatuur op het niveau van de effectieve stralingshoogte *afneemt* met de hoogte. Zou de temperatuur op dat niveau *toenemen* met de hoogte (zoals dat in hogere luchtlagen het geval is), dan zou een toename van CO₂ leiden tot een *afkoeling* in de atmosfeer die zich uit zou strekken vanaf zeeniveau tot aan een hoogte 5 km.

De stratosferische afkoeling vindt plaats omdat het CO₂ nog steeds via botsingen met andere moleculen aangeslagen wordt (zie Sectie 1.5, getiteld '*Equipartitie*'), maar tegelijk deze vibratie-energie voortdurend verliest door uitzending van een foton. Om equipartitie te herstellen moet deze weglekkende energie aangevuld worden door botsingen met andere moleculen, die dus daarbij hun kinetische energie verliezen -- oftewel de temperatuur van de lucht is verlaagd (zie Sectie 2.2, getiteld '*Een gedachte-experiment*'). Toename van broeikasgassen verlaagt dus de temperatuur op die hoogten.

Het omslagpunt waar de opwarmende werking van CO₂ toename overgaat in een afkoelende werking ligt in de Aardse atmosfeer op zo'n 15 km hoogte (100 hPa). Deze waarde is in goede overeenstemming met onze ruwe schatting in Sectie 1.6 van de hoogte waarop CO₂ zijn vibratie-energie via foton-emissie nog kwijt kan raken.