

Hoe warmen broeikasgassen de aarde op?

Lydia de Waard-Levöleger

Bron: www.knmi.nl

Er zijn veel manieren om het versterkte broeikaseffect te beschrijven, variërend van 'een dekentje om de aarde' in het Jeugdjournaal tot wetenschappelijke artikelen met stapels formules waarin alle details exact worden beschreven.

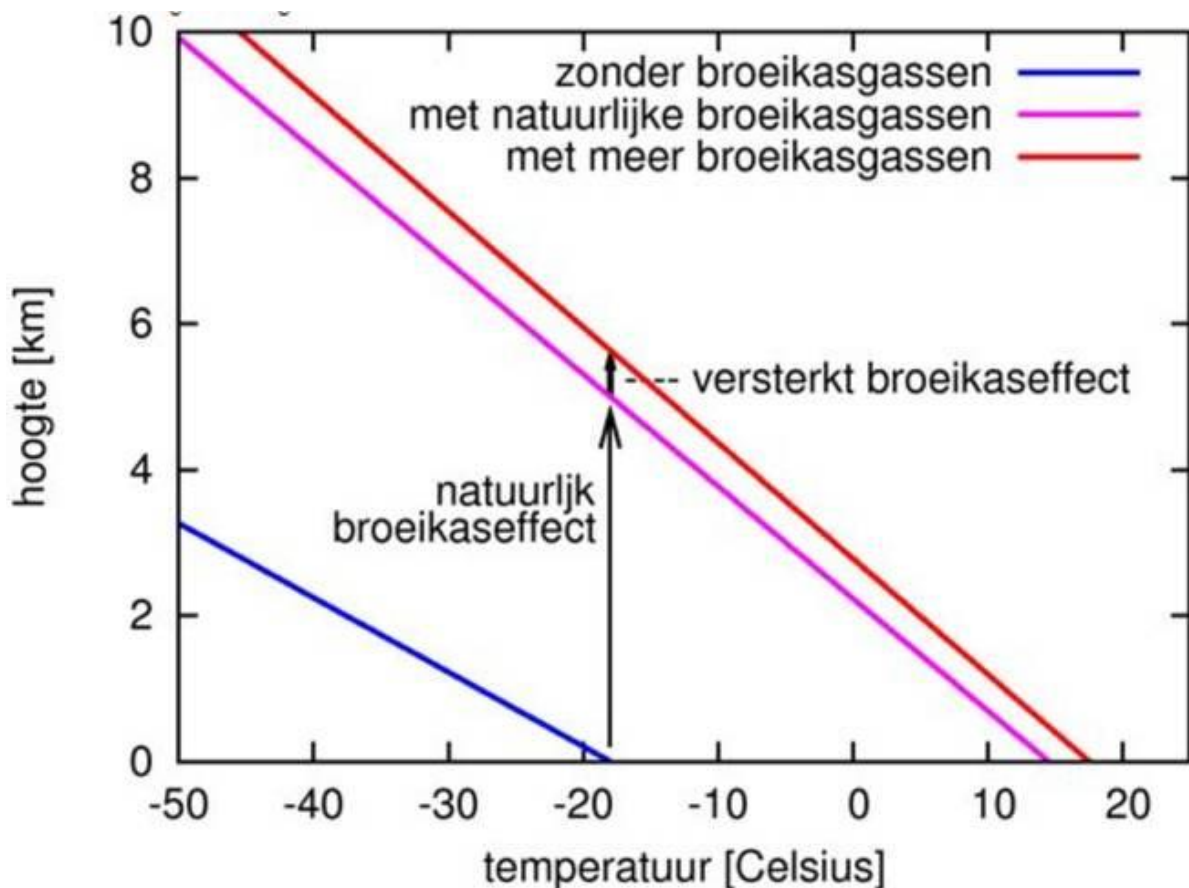
Met dit artikel proberen we een tussenweg te vinden, een beschrijving zonder formules die toch zo dicht mogelijk bij de natuurkunde staat. We laten zo veel mogelijk niet-essentiële details weg. Hoe werkt het nu echt? In 5 stappen is het versterkte broeikaseffect te verklaren.

1. Temperatuuropbouw van de atmosfeer

Zoals iedereen weet die een berg beklimmen heeft neemt de temperatuur in de atmosfeer van de aarde af met de hoogte. Dit komt omdat de zonnestraling vooral de bodem verwarmt. De grond warmt vervolgens de lucht op, die hierdoor uitzet, lichter wordt en opstijgt. De luchtdruk daalt echter met de hoogte, waardoor de opstijgende lucht verder uitzet. Uitzettende lucht koelt af, de temperatuur daalt hierdoor met gemiddeld 6,5°C per kilometer stijging.

Dit geldt tot ongeveer 13 kilometer hoogte, in het gebied waar het weer zich afspeelt. Daarboven loopt de temperatuur weer op. Boven de dertien kilometer hoogte wordt de lucht namelijk niet meer door de grond verwarmd, maar voornamelijk doordat ozon ultraviolette straling van de zon opvangt. Dit leidt juist tot een toename van de temperatuur met de hoogte.

Dit temperatuurverloop is geschetst in Figuur 3. Het is essentieel om het versterkte broeikaseffect te verklaren.

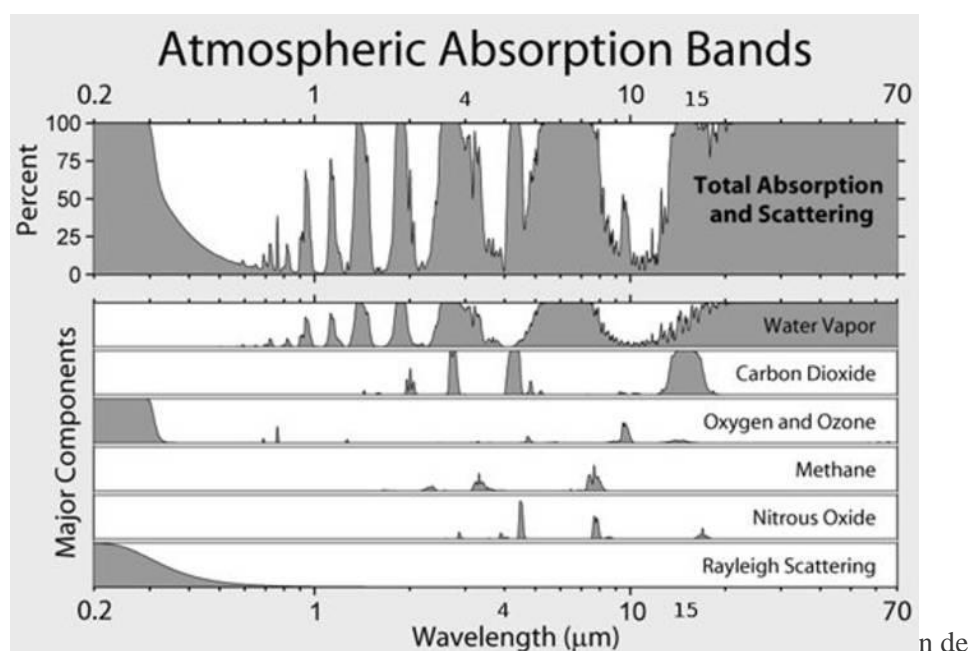


Figuur 3: temperatuurverloop in de atmosfeer zonder broeikasgassen (blauw), met de concentraties broeikasgassen voor de industriële revolutie (magenta), en met meer broeikasgassen (projectie voor 2100)

2. Stralingseigenschappen van CO2 en andere broeikasgassen

De zon straalt voornamelijk zichtbaar licht naar de aarde, grotendeels met een golflengte kleiner dan 4 μm . De bodem straalt warmtestraling terug omhoog, vrijwel allemaal met een golflengte groter dan ongeveer 4 μm . De warmtestraling van de grond kan niet ongehinderd naar de ruimte stralen. Moleculen die uit twee atomen bestaan, zoals stikstof (N_2) en zuurstof (O_2) zijn doorzichtig voor warmtestraling. Complexere moleculen zoals waterdamp (H_2O), kooldioxide (CO_2) en methaan (CH_4) zijn dat echter niet en nemen de warmtestraling op. Deze gassen worden daarom ook wel broeikasgassen genoemd.

Hoe sterk deze moleculen de warmtestraling opnemen hangt af van de golflengte van de straling. Bij sommige golflengtes kan de warmtestraling vrijwel ongehinderd door de atmosfeer stralen, dit zijn de witte stukken in figuur 2. Bij andere golflengtes wordt vrijwel alle straling door de broeikasgassen opgenomen, dit zijn de grijze banden in figuur 2. Het sterkst geldt dit voor straling rond 15 μm , die binnen enkele centimeters door CO_2 wordt opgenomen. Uit figuur 2 blijkt dat de meeste warmtestraling onderweg van de grond naar boven door waterdamp, CO_2 en andere broeikasgassen opgevangen wordt.



Figuur 2. De sterkte waarmee de belangrijkste broeikasgassen in de atmosfeer straling absorberen voor verschillende golflengtes.

De broeikasgassen zenden de opgenomen warmtestraling ook weer uit en wel op dezelfde golflengten waar ze de warmtestraling opnemen maar in een willekeurige richting. Zo "kaatst" de straling als het ware van molecuul tot molecuul naar boven, tot hoger in de atmosfeer er zo weinig broeikasgassen over zijn dat de straling ongehinderd naar de ruimte kan ontsnappen. Dit gebeurt gemiddeld op een hoogte van 5 km. Voor straling in de 15 μm band is de lucht echter pas op veel grotere hoogte doorzichtig.

3. Stralingsevenwicht

De zonnestraling naar de aarde is ongeveer 340 Watt per vierkante meter aardoppervlakte. Ongeveer een derde hiervan wordt teruggekaatst door wolken, sneeuw, ijs en andere niet-zwarte oppervlakken. De rest, 240 W/m^2 , verwarmt de aarde. De aarde koelt echter weer af door warmtestraling uit te stralen. Als de gemiddelde temperatuur van de aarde niet verandert is dit precies even veel als de opgenomen zonnestraling. Dit heet stralingsevenwicht.

Warme objecten stralen meer warmtestraling uit dan koude. De hoeveelheid warmtestraling kan berekend worden uit de temperatuur met de Wet van Stefan-Boltzmann. Omgekeerd kan je ook de temperatuur bepalen als je de hoeveelheid warmtestraling kent. Voor de 240 W/m^2 die de aarde netto van de zon ontvangt en dus ook weer terug straalt geeft deze wet een temperatuur van -18°C . Deze temperatuur wordt de effectieve stralingstemperatuur genoemd. Zonder broeikasgassen in de atmosfeer maar met dezelfde kleur zou dit de gemiddelde temperatuur aan de grond zijn.

4. Broeikasewfect

Het aandeel broeikasgassen in de atmosfeer bedraagt ongeveer 0,4%. Door de CO₂ en andere broeikasgassen die van nature in de atmosfeer voorkomen, komt de warmtestraling naar het heelal maar voor 10% rechtstreeks van het aardoppervlak (de witte golflengtes rond 10 μm bovenaan in Figuur 2). Het overgrote deel wordt onderweg naar boven vele malen opgenomen en weer uitgestraald. Pas op 5 kilometer hoogte gemiddeld ontsnapt de straling. Op die hoogte is de temperatuur dus volgens de Wet van Stefan-Boltzmann -18°C .

Omdat de temperatuur per kilometer hoogte $6,5^{\circ}\text{C}$ afneemt is het aan de grond is een stuk warmer, het is daar gemiddeld $14,5^{\circ}\text{C}$. (Dit is makkelijk te berekenen als -18°C plus $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ over 5 km.) Het verschil met de situatie zonder broeikasgassen, waarbij het aan de grond -18°C zou zijn, wordt het broeikasewfect genoemd. (Het werkt echter heel anders dan een glazen broeikas die voornamelijk opwarmt doordat vocht niet kan ontsnappen, de naam is ongelukkig gekozen.)

5. Versterkte broeikasewfect

Als er meer CO₂ en andere broeikasgassen in de atmosfeer komen, ontsnapt de warmtestraling minder makkelijk. De gemiddelde hoogte waarop er zo weinig broeikasgassen zijn dat de straling naar de ruimte ontsnapt neemt dus toe. Op die grotere hoogte is het echter kouder dan -18°C . De aarde straalt dan volgens de wet van Stefan-Boltzmann minder warmtestraling uit. Er komt dus meer zonnestraling binnen dan er warmtestraling uitgestraald wordt. De extra straling heeft als gevolg dat de aarde opwarmt totdat de temperatuur op die grotere hoogte weer -18°C is. Dan straalt de aarde weer evenveel warmte uit als er zonnestraling binnenkomt en verandert de temperatuur niet meer.

Als de temperatuur op 5 km hoogte stijgt, moet de temperatuur aan de grond ook stijgen. De temperatuur daalt immers nog steeds met ongeveer $6,5^{\circ}\text{C}$ per kilometer hoogte. Hoeveel de temperatuur aan de grond precies stijgt hangt af van allerlei mee- en tegenwerkende factoren, ook wel terugkoppelingen genoemd, die in een volgend artikel besproken worden. Het effect van alleen CO₂ zou een stijging van de wereldgemiddelde temperatuur zijn van $1,2^{\circ}\text{C}$ voor een verdubbeling van de concentratie. Dat is relatief eenvoudig uit te rekenen en onomstreden. Door de terugkoppelingen is het effect uiteindelijk groter. De terugkoppelingen zijn echter veel moeilijker te bepalen. De beste schatting van het totale effect is zo'n 3°C voor een verdubbeling van de CO₂ concentratie, met een onzekerheidsmarge van ongeveer 2°C tot zo'n $4,5^{\circ}\text{C}$ temperatuurstijging wereldgemiddeld.

5a. Een nevenewfect van het versterkte broeikasewfect

Een gedeelte van de warmtestraling (in de 15 μm band van CO₂) ontsnapt pas boven de 13 km. Op die hoogte werkt het versterkte broeikasewfect juist andersom. Omdat daar de temperatuur met de hoogte oploopt, leidt een toename van de concentratie CO₂ tot een afkoeling.

Conclusie

De aarde straalt vrijwel evenveel warmtestraling uit als de hoeveelheid opgevangen zonnestraling. De hoeveelheid straling die wordt uitgewisseld hoort bij een temperatuur van -18°C . Dit komt overeen met de gemiddelde temperatuur op 5 km hoogte, waar de warmtestraling ontsnapt. Een toename van de hoeveelheid CO₂ of andere broeikasgassen vergroot in eerste instantie de hoogte waarop de aarde de warmtestraling uitstraalt. Op grotere hoogte is het echte kouder dan -18°C , zodat er dan minder warmte wordt uitgestraald. Het overschot aan binnenkomende straling warmt het onderste deel van de atmosfeer op tot de temperatuur op de grotere hoogte van uitstraling weer -18°C is. Door meer CO₂ koelt de atmosfeer boven de 13 km juist af. Zowel de toename van de CO₂ concentraties, de verlaging van stralingstemperatuur in de CO₂-banden, de opwarming aan de grond en de atmosfeer tot 13 km hoogte als een afkoeling daarboven zijn waargenomen.

Een verdubbeling van CO₂ zonder andere veranderingen in het klimaatsysteem zou een opwarming van ongeveer $1,2^{\circ}\text{C}$ geven. Dit is een rechtstreeks gevolg van de stralingseigenschappen van CO₂, het temperatuurverloop van de atmosfeer en de wetten van de natuurkunde. In werkelijkheid verandert het klimaatsysteem wel direct door deze opwarming. Zodra de temperatuur verandert, veranderen ook diverse andere processen in het klimaatsysteem. Deze veranderingen versterken en verzwakken de opwarming en zijn veel onzekerder dan het rechtstreekse stralingseffect van CO₂. Inclusief deze terugkoppelingen is de gemiddelde opwarming van de aarde groter, waarschijnlijk tussen de 2°C en $4,5^{\circ}\text{C}$ voor een verdubbeling van de CO₂concentratie.

Literatuur

- Van Dorland, R., Radiation and Climate: from radiative transfer modelling to global temperature response, Ph.D. Thesis, ISBN 90-646-4032-7, 1999
- Rasmus Benestad, A simple recipe for GHE
- John Cook, How do we know more CO2 is causing warming?
- Wikipedia: de Wet van Stefan-Boltzmann