



UvA-DARE (Digital Academic Repository)

De ware aard van het versterkte broeikaseffect

van Boxel, J.

Publication date

2016

Document Version

Final published version

Published in

Geografie

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

van Boxel, J. (2016). De ware aard van het versterkte broeikaseffect. *Geografie*, 25(7), 32-35.
<https://geografie.nl/artikel/de-ware-aard-van-het-versterkte-broeikaseffect>

General rights

It is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), other than for strictly personal, individual use, unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

Disclaimer/Complaints regulations

If you believe that digital publication of certain material infringes any of your rights or (privacy) interests, please let the Library know, stating your reasons. In case of a legitimate complaint, the Library will make the material inaccessible and/or remove it from the website. Please Ask the Library: <https://uba.uva.nl/en/contact>, or a letter to: Library of the University of Amsterdam, Secretariat, Singel 425, 1012 WP Amsterdam, The Netherlands. You will be contacted as soon as possible.

De ware aard van het versterkte broeikaseffect

De wetenschappelijke discussies over de opwarming van de aarde en het broeikaseffect gaan meestal over de hoofden van het lekenpubliek heen. John van Boxel doet een manmoedige poging zonder ingewikkelde formules uit te leggen hoe het zit.

John van Boxel

Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics, Universiteit van Amsterdam

In de discussies over de opwarming van de aarde door versterking van het broeikaseffect verschillen de meningen. Sceptici stellen bijvoorbeeld dat vrijwel alle door het aardoppervlak uitgezonden straling die kan worden geabsorbeerd door kooldioxide (CO₂), al wordt opgenomen en dat een toename van de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer daar niets aan verandert. Dat klopt. Toch beweren klimatologen dat een verhoging van de CO₂-concentraties (en andere broeikasgassen) leidt tot versterking van het broeikaseffect. Ook dat klopt. Hoe kunnen deze schijnbaar tegenstrijdige

stellingen beide juist zijn? Om dat te begrijpen, moet je weten hoe het broeikaseffect precies werkt. Dat vergt enig begrip van de theorie over straling en het onderscheid tussen kort- en langgolvlige straling. Die zal ik daarom eerst kort behandelen.

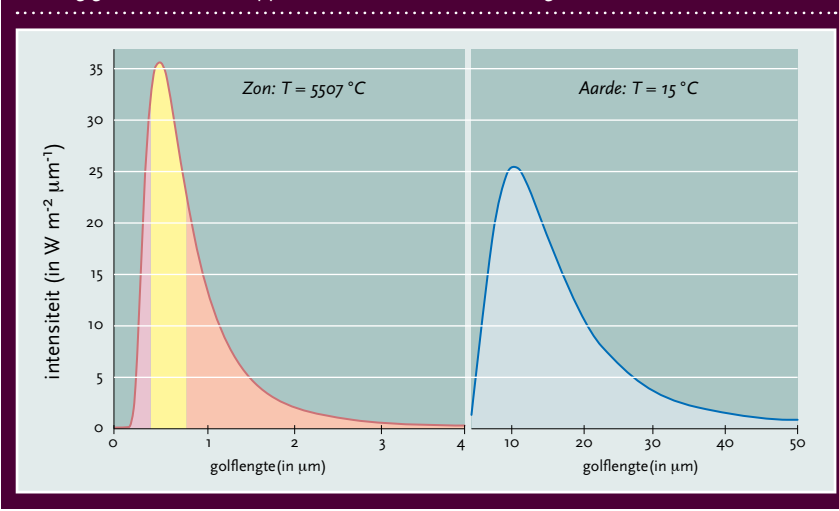
KORT- EN LANGGOLVLIGE STRALING

Alle voorwerpen met een temperatuur boven het absolute nulpunt (-273,15°C, oftewel 0 K) zenden straling uit. Hoe warmer ze zijn, des te meer straling ze uitzenden. Hete voorwerpen zenden straling uit met kortere golflengten dan koude voorwerpen. Bij temperaturen hoger dan 1500°C beginnen voorwerpen te gloeien: ze stralen rood licht uit (golflengten 0,6-0,8 μm). Het spectrum van de zon, met een oppervlaktetemperatuur van 5507°C, bestaat voor 9% uit ultraviolette straling (0,1-0,4 μm), voor 49% uit zichtbaar licht (0,4-0,8 μm) en 42% uit nabij infrarode straling (0,8-4,0 μm). Het hele golflengtegebied waarin de zon straling uitzendt, noemen we *kortgolvlige straling* (0,1-4,0 μm) (figuur 1).

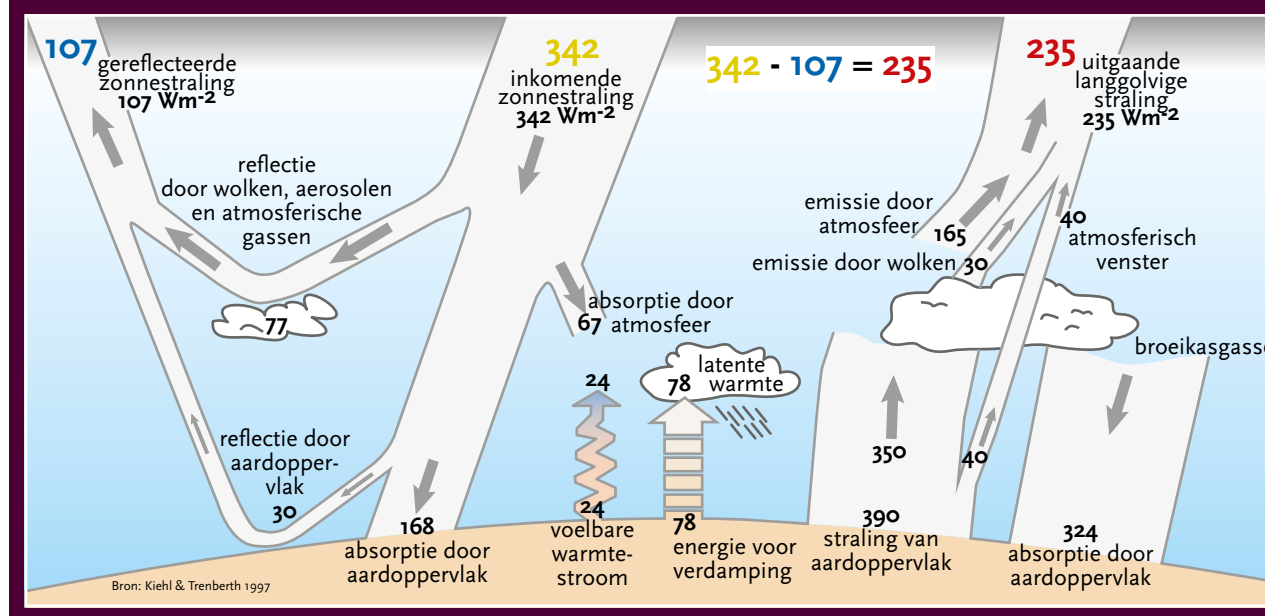
Het aardoppervlak en de atmosfeer hebben veel lagere temperaturen, ongeveer -50°C tot +50°C. Bij deze temperaturen wordt ver infrarode straling uitgezonden, ook wel aangeduid met *langgolvlige straling* (4,0-100 μm).

Niet alleen de temperatuur van het oppervlak, maar ook het materiaal zelf bepaalt de hoeveelheid uitgezonden straling; dit wordt uitgedrukt in de *emissiecoëfficiënt*. De meeste vaste stoffen en vloeistoffen kunnen vrijwel het hele langgolvlige deel van het spectrum uitzenden. Hun emissiecoëfficiënt (ε) ligt dicht bij 1,0. Een wolk is een verzameling van druppels en ijskristallen, oftewel vloeistoffen en vaste stoffen. De emissiecoëfficiënt van een wolk ligt dus dicht bij 1,0. Gassen kunnen alleen bepaalde golflengten uitzenden. Hun emissiecoëfficiënt is dan ook aanzienlijk kleiner dan 1,0. Als een gas een golflengte kan uitzenden, kan het diezelfde golflengte ook absorberen. De *absorptiecoëfficiënt* is dus gelijk aan de emissiecoëfficiënt. Dit is belangrijk als je gaat nadenken over het broeikaseffect.

Figuur 1: Het zonlicht (links) bestaat uit ultraviolette straling, zichtbaar licht en nabij infrarode straling en de aarde (rechts) zendt ver infrarode straling uit. De x-as van de linkse grafiek is zodanig geschaald dat de oppervlakken onder de curven vergeleken kunnen worden.



Figuur 2: De energiebalans van het systeem aarde-atmosfeer in evenwicht. In verschillende publicaties over dit onderwerp zijn de getallen vaak net iets anders, maar de grote lijnen zijn hetzelfde.



EVENWICHTSTEMPERATUUR

De *evenwichtstemperatuur* is de temperatuur die de aarde zou moeten hebben om evenveel langgolvlige straling uit te zenden als ze aan kortgolvlige zonnestraling absorbeert. Daarbij wordt de aarde als een ideale straler beschouwd (ε = 1,0). De *stralingsbalans* is dan in evenwicht.

We weten heel goed hoeveel zonnestraling de rand van de atmosfeer bereikt. Van die straling wordt ongeveer 30% gereflecteerd door wolken, aerosolen en atmosferische gassen en het aardoppervlak (figuur 2). Ongeveer 70% wordt dus geabsorbeerd, waarvan 20% in de atmosfeer en 50% aan het aardoppervlak.

De aarde zelf zendt langgolvlige straling uit. De hoeveelheid is sterk afhankelijk van de temperatuur, immers hoe warmer een object is, des te meer straling het uitzendt.

Je kunt vrij eenvoudig afleiden dat de hoeveelheid straling die de aarde en de atmosfeer absorberen, vrijwel gelijk moet zijn aan de hoeveelheid straling die het systeem aarde uitzendt. De temperatuur die daarvoor nodig is, de *evenwichtstemperatuur*, is voor de aarde -18°C. De gemiddelde oppervlaktetemperatuur van de aarde is echter ongeveer +15°C. Het broeikaseffect kun je definiëren als het verschil tussen de evenwichtstemperatuur en de gemiddelde oppervlaktetemperatuur. Dat lijkt misschien veel, maar het broeikaseffect van buurplaneet Venus is meer dan tien keer zo groot.

Het aardoppervlak zendt met zijn gemiddelde temperatuur van +15°C langgolvlige straling uit. Deze wordt voor ongeveer 90% geabsorbeerd in de atmosfeer; door wolken, broeikasgassen en aerosolen (figuur 2). Die 90% draagt niet bij aan het stralings-evenwicht aan de rand van de atmosfeer. Als het bewolkt is, wordt zelfs alle door het aardoppervlak uitgezonden straling geabsorbeerd. Bij onbewolkt weer kan straling ontsnappen met golflengten tussen de 8 en 13 μm. Dit golflengtegebied noemen we het *atmosferisch venster* (figuur 3, pag. 34). In het atmosferisch venster absorberen de meeste broeikasgassen nauwelijks straling, behalve Ozon (O₃) en heel zwak: waterdamp (H₂O). Daarnaast kunnen aerosolen

een deel van deze straling absorberen.

De straling die ontsnapt naar de ruimte, komt dus maar voor een klein deel van het aardoppervlak (ongeveer 17%). Het grootste deel komt van de toppen van wolken (13%) en van aerosolen en broeikasgassen hoog in de atmosfeer (70%) (figuur 2). De gemiddelde hoogte (*stralend oppervlak*) ligt op ongeveer 5000 m. In de troposfeer is de temperatuurafname gemiddeld ongeveer 6,5°C/km. Dus het temperatuurverschil tussen het stralend oppervlak en het aardoppervlak is dan 33°C.

BROEIKASGASSEN

De gassen met de hoogste concentratie in de atmosfeer (stikstof, zuurstof en argon) kunnen nauwelijks langgolvlige straling absorberen. Gassen die dat wel kunnen, noemen we broeikasgassen. Deze verhinderen dat de straling, uitgezonden door het aardoppervlak, de hemelruimte bereikt. Ook kunnen ze langgolvlige straling uitzenden, zowel naar het aardoppervlak als richting hemelruimte. De belangrijkste broeikasgassen zijn waterdamp, CO₂, methaan, lachgas, ozon en chloorfluorkoolwaterstoffen (beter bekend als cfk's).

Het allerbelangrijkste broeikasgas in de aardatmosfeer is waterdamp. De bijdrage van waterdamp aan het broeikaseffect is ongeveer vier keer zo groot als die van CO₂. De hoeveelheid waterdamp in de lucht varieert sterk, maar gemiddeld bestaat de atmosfeer voor ongeveer 0,26% uit waterdamp (volumeprocenten), oftewel 2600 ppm (parts per million).

De meeste waterdamp zit in de onderste kilometers van de atmosfeer, omdat koude lucht minder waterdamp kan bevatten dan warme lucht, en de temperatuur in de troposfeer afneemt met de hoogte. De concentratie van waterdamp wordt nauwelijks direct beïnvloed door menselijke emissies. Daarom wordt waterdamp vaak niet genoemd als een antropogeen broeikasgas. Waterdamp zit wel in alle klimaatmodellen als een terugkoppeling. Als de oceanen warmer worden, zal er immers meer water verdampen en neemt de hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer toe.

Het tweede belangrijke broeikasgas is CO₂. Vóór de industriële revolutie was de CO₂-concentratie 278 ppm. Anno 2016 is deze gestegen tot ruim 400 ppm (= 0,04%). Door verbranding van fossiele brandstoffen, ontbossing en cementproductie neem de concentratie toe met ongeveer 2 ppm/jaar. CO₂ is redelijk verdeeld over de atmosfeer, al loopt de concentratie op het zuidelijk halfrond enkele jaren achter bij die van het noordelijk halfrond. En de concentratie in de stratosfeer loopt zo'n 5 jaar achter bij de troposfeer.

Andere broeikasgassen zijn methaan (2 ppm, concentratie meer dan verdubbeld in de 20^e eeuw), lachgas (0,32 ppm), ozon (0,05 ppm) en cfk's (0,001 ppm). Ze dragen alle bij aan de toename van het broeikas effect, maar we zullen ons hier vooral concentreren op waterdamp en CO₂. De meeste aerosolen verzwakken het broeikas effect, omdat ze een deel van de zonnestraling reflecteren. Ook veranderingen in de bewolking hebben de afgelopen eeuw het broeikas effect waarschijnlijk verzwakt, maar dat effect is moeilijk te kwantificeren.

VERSTERKING BROEIKASEFFECT

Bij de beschrijving van het broeikas effect ligt vaak de nadruk op wat er dicht bij het aardoppervlak gebeurt, omdat wij daar leven. Zo stelt het vierde IPCC-rapport uit 2007: 'Much of this thermal radiation emitted by the land and ocean is absorbed by the atmosphere, including clouds, and reradiated back to Earth. This is called the greenhouse effect'. Houghton omschrijft het broeikas effect als: 'It is the water vapour, carbon dioxide and some other minor gases [...] that absorb some of the thermal radiation leaving the surface, acting as a partial blanket for this radiation and causing [...] the natural greenhouse effect'. Het is dan ook geen verrassing dat klimaatsceptici opmerken dat er aan deze processen weinig

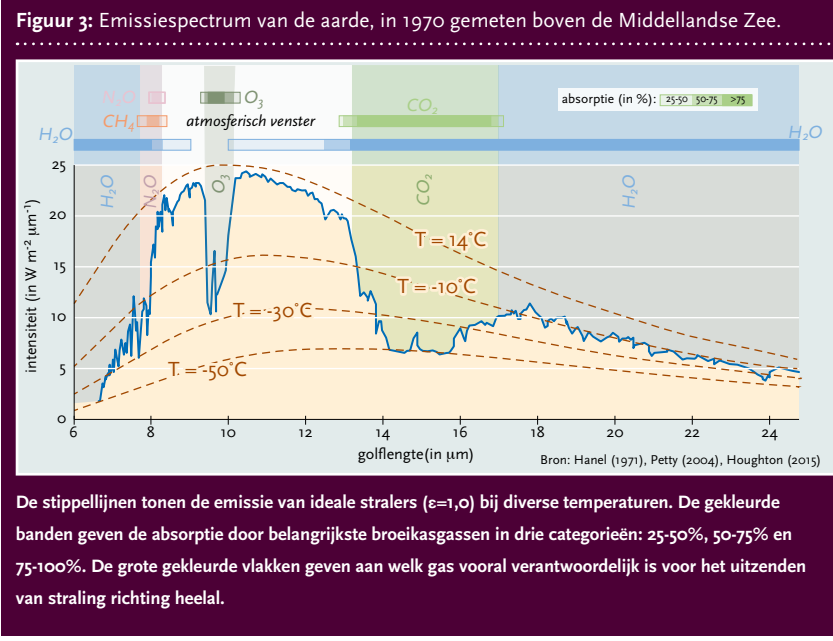
verandert als de CO₂-concentratie toeneemt. Er wordt immers nog evenveel geabsorbeerd van de thermische (langgolvlige) straling die het aardoppervlak uitzendt.

Voor het broeikas effect, en zeker voor de verandering daarvan, is het veel belangrijker te kijken wat er gebeurt met het stralings-evenwicht aan de buitenrand van de atmosfeer. De meeste straling die vanaf de aarde richting hemelruimte gaat, komt van broeikasgassen. Als de atmosfeer meer broeikasgassen bevat, zal deze minder langgolvlige straling uitzenden naar het heelal. Dat lijkt in eerste instantie misschien vreemd, maar ik zal dat uitleggen aan de hand van figuur 4. Daarbij neem ik CO₂ als voorbeeld, maar het principe geldt ook voor de meeste andere broeikasgassen.

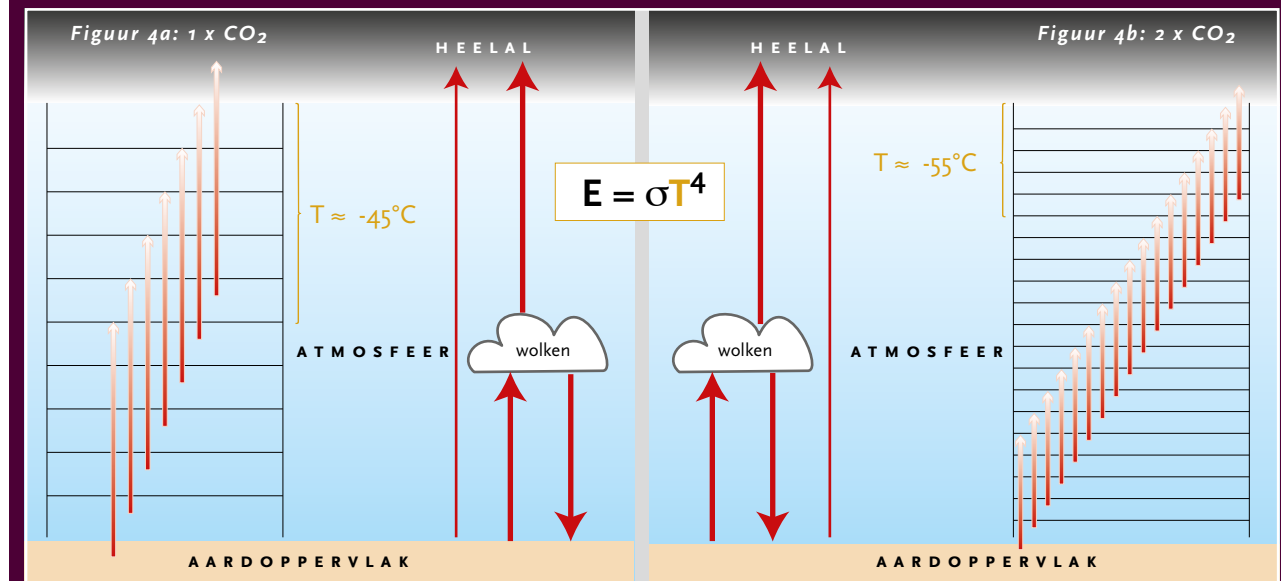
Figuur 4a geeft de situatie weer met de CO₂-concentratie van vóór de industriële revolutie (278 ppm). Een klein deel van de straling die het aardoppervlak uitzendt, ontsnapt via het atmosferisch venster. Daarnaast ontsnapt een deel van de straling die wordt uitgezonden door de wolke toppen. Om de emissie door CO₂ te bekijken is de atmosfeer onderverdeeld in tien lagen die allemaal even veel CO₂ bevatten. De CO₂ in de onderste laag (laag 1) kan straling uitzenden met golflengten tussen ongeveer 13 en 17 μm (figuur 3), zowel naar beneden als naar boven. In de lagen daarboven zit ook CO₂, die precies dezelfde golflengten weer kan absorberen. In het voorbeeld hebben we aangenomen dat de straling voor meer dan 90% wordt geabsorbeerd in de vijf daarboven liggende lagen. De straling die in laag 2 richting hemelruimte wordt gezonden, wordt dan geabsorbeerd in laag 3 t/m 7, enzovoorts. De door CO₂ uitgezonden straling die kan ontsnappen richting hemelruimte komt voor het overgrote deel uit de bovenste vijf lagen in dit model (de bovenste helft van de atmosfeer, in massa gerekend). De gemiddelde temperatuur is daar ongeveer -45°C.

Figuur 4b geeft de situatie weer in een atmosfeer met een twee keer zo hoge CO₂-concentratie. Om het model vergelijkbaar te houden, onderscheid ik twintig lagen die ieder net zo veel CO₂ bevatten als elk van de tien lagen in figuur 4a. Als onder in de atmosfeer door CO₂ straling wordt uitgezonden richting heelal, wordt die weer voor meer dan 90% geabsorbeerd in de erboven liggende vijf lagen. De straling die kan ontsnappen, komt weer uit de bovenste vijf lagen, maar dat is nu maar een kwart van de atmosfeer, wederom in massa gerekend. De straling komt dus uit een hoger deel van de atmosfeer. Omdat in de troposfeer de temperatuur gemiddeld genomen afneemt met de hoogte, is het daar kouder, ongeveer -55°C. Hoe kouder een gas is, des te minder straling het uitzendt. De straling die kan ontsnappen, wordt uitgezonden door CO₂ die kouder is en er wordt dus minder straling uitgezonden richting hemelruimte.

Je zou kunnen zeggen dat het gemiddeld stralend oppervlak hoger komt te liggen. Laten we veronderstellen op 5500 m in plaats van 5000 m. Nu het stralingsevenwicht verstoord is en de aarde minder straling uitzendt dan ze ontvangt, begint de aarde op te warmen, totdat de stralingsbalans weer in evenwicht komt. Dit is het geval als het stralend oppervlak een temperatuur heeft die gelijk is aan de evenwichtstemperatuur (-18°C). Daaronder



Figuur 4: Conceptueel model voor de versterking van het broeikas effect



Links (figuur 4a) de situatie bij de CO₂-concentratie van vóór de industriële revolutie, rechts de situatie waarbij de concentratie verdubbeld is. Iedere laag bevat evenveel CO₂ (ongeveer 4,3 kg per vierkante meter aardoppervlak).

neemt de temperatuur weer toe met 6,5°C/km. Dat geeft dus een broeikas effect van 36°C (5,5 km * 6,5°C/km) en een oppervlakte-temperatuur van +18°C (-18°C + 36°C).

OVERLAPPENDE EMISSIESPECTRA

Waterdamp heeft een belangrijke absorptieband tussen 5 en 8 μm, absorbeert zwak in het atmosferisch venster (8 tot 13 μm) en absorbeert sterk in het golflengtegebied van 13 tot 25 μm (figuur 3). Bij golflengten tussen 17 en 25 μm zendt waterdamp straling uit die vergelijkbaar is met de uitstraling van een voorwerp met een temperatuur van ongeveer -10°C (figuur 3). Dat is een temperatuur die we vaak aantreffen in de onderste kilometers van de atmosfeer. Dat is logisch, omdat de meeste waterdamp in de onderste kilometers van de atmosfeer zit. Koude lucht kan immers minder waterdamp bevatten dan warme lucht.

Waterdamp kan veel meer golflengten absorberen en emitteren dan CO₂. Mede daarom is waterdamp een sterker broeikasgas dan CO₂. Bovendien kan waterdamp ook de golflengten opnemen die kooldioxide absorbeert; in ieder geval deels. Waarom zou kooldioxide desondanks een belangrijk broeikasgas zijn?

CO₂ absorbeert en emitteert vooral golflengten tussen 13 en 17 μm. Maar deze golflengten worden ook goed geabsorbeerd door waterdamp. De straling die het aardoppervlak uitzendt in het golflengtegebied tussen 13 en 17 μm, zal grotendeels worden geabsorbeerd door waterdamp. De waterdamp zit immers grotendeels in de onderste kilometers van de atmosfeer, terwijl in die laag maar 20% van alle CO₂ zit (CO₂ is gelijkmatig verdeeld over de atmosfeer). Voor de absorptie van de door het aardoppervlak uitgezonden straling is waterdamp dus het belangrijkste.

Als we willen weten of het broeikas effect verandert, moeten we kijken naar de straling die aan de rand van de atmosfeer ontsnapt naar de hemelruimte. Als waterdamp onder in de atmosfeer straling uitzendt met golflengten tussen 13 en 17 μm, kan die gemakkelijk

worden geabsorbeerd door de CO₂ die in hogere lagen van de atmosfeer zit. CO₂ kan ook dezelfde golflengten uitzenden. De straling die ten slotte kan ontsnappen richting hemelruimte, komt dan van CO₂ hoog in de atmosfeer, waar de temperatuur ongeveer -50°C is (figuur 3).

Voor de absorptie van de door het aardoppervlak uitgezonden straling is dus waterdamp het belangrijkste, maar voor de toename van het broeikas effect speelt CO₂ toch een belangrijke rol.

CONCLUSIES

Als de CO₂-concentratie toeneemt, wordt er van de door het aardoppervlak uitgezonden straling nauwelijks extra geabsorbeerd – daarin hebben klimaatsceptici dus gelijk. Maar de versterking van het broeikas effect wordt vooral bepaald door de hoeveelheid straling die ontsnapt aan de rand van de atmosfeer. Als de CO₂-concentratie toeneemt, wordt de atmosfeer minder transparant voor straling met golflengten tussen 13 en 17 μm (de emissieband van CO₂). De door CO₂ naar de ruimte uitgezonden straling komt dan vanaf grotere hoogte, waar het meestal kouder is. Omdat het kouder is, wordt er dan minder straling uitgezonden, en dat versterkt het broeikas effect.

Waar de emissiespectra van CO₂ en waterdamp overlappen, zal de meeste door het aardoppervlak uitgezonden straling worden geabsorbeerd door waterdamp. De meeste straling die ontsnapt naar de hemelruimte komt van CO₂. Dit laatste is belangrijk voor de verandering van het broeikas effect. Bij andere golflengten draagt waterdamp zoals eerder opgemerkt wél bij aan de verdere versterking van het broeikas effect via een positieve terugkoppeling. •

BRONNEN: ZIE WWW.GEOGRAFIE.NL