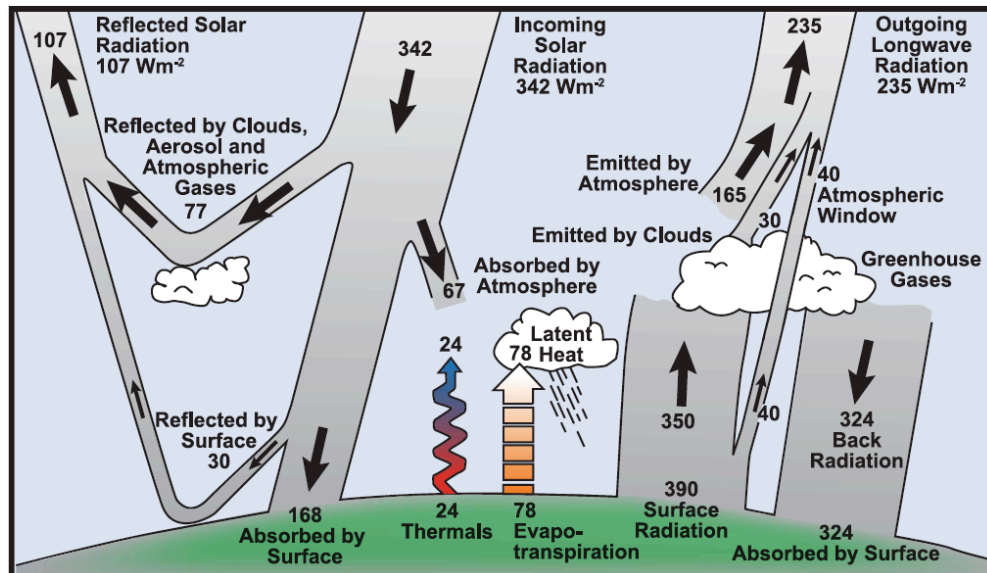
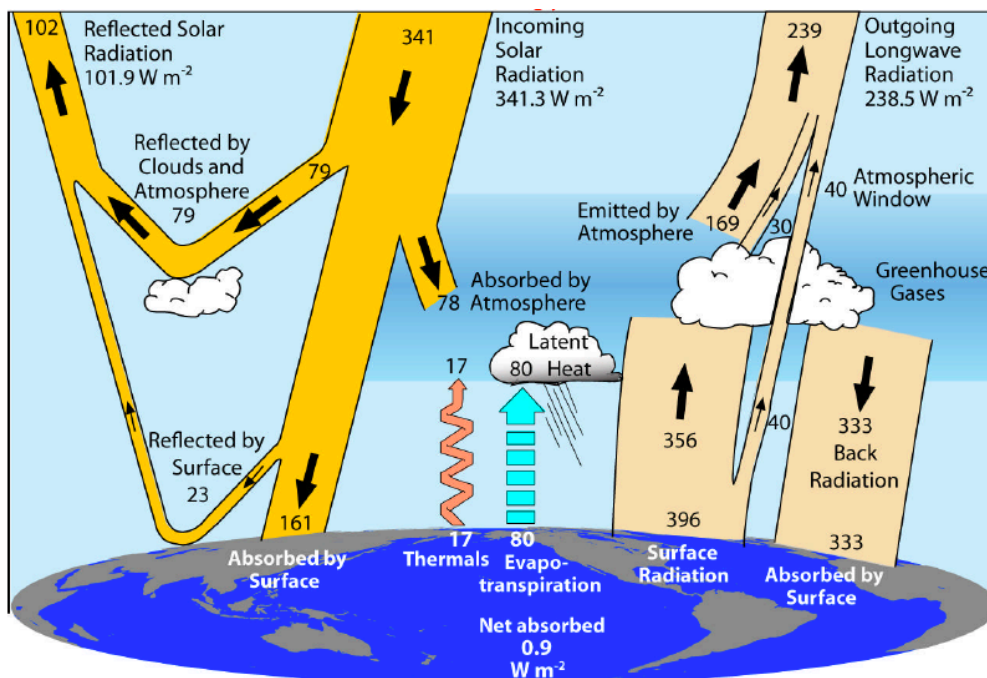


# Hoe goed bekend is de sterkte van het broeikaseffect?

Aarnout van Delden (IMAU) (december 2009)  
 Meteorologica, 4-2009



Figuur 1. Het globaal gemiddeld energiebudget voor de periode 1985-1989, volgens Kiehl en Trenberth (1997). Eenheid: Watt per vierkante meter.



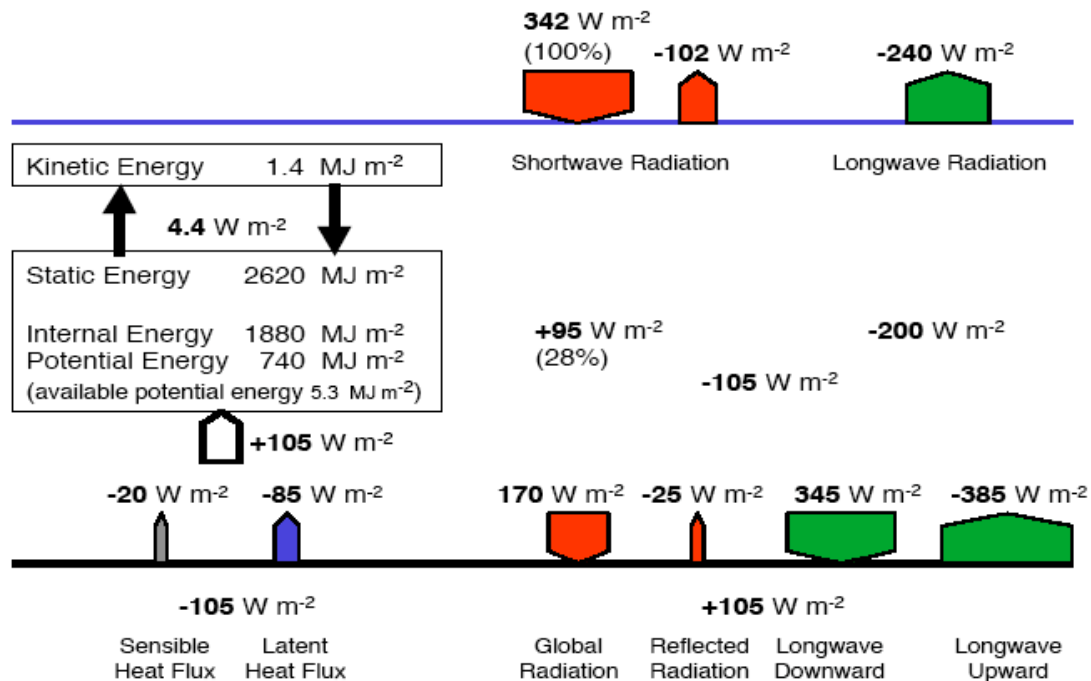
Figuur 2. Het globaal gemiddeld energiebudget voor de periode 2000-2004, volgens Trenberth, Fasullo en Kiehl (2009). Eenheid: Watt per vierkante meter.

De energiebalans van de aarde is al meer dan een eeuw intensief onderwerp van studie. Relatief nauwkeurige schattingen van globaal gemiddelde energieflexen kwamen echter pas na 1960 ter beschikking, toen satellieten met stralingssensoren in de ruimte werden gebracht. De eerste redelijk succesvolle satellietmissie, met als doel het meten van globaal gemiddelde stralingsfluxen aan de top van de atmosfeer, vond plaats tussen 1985 en 1989. Deze missie staat bekend als het *Earth Radiation Budget Experiment (ERBE)*. Kiehl en Trenberth (1997) hebben de waarnemingen van *ERBE* gebruikt voor een ijking van het globaal gemiddelde energiebudget, waarbij een nauwkeurig stralingsmodel is gebruikt om de niet gemeten fluxen door de atmosfeer te berekenen. Het resultaat van deze studie wordt samengevat in figuur 1. Dit plaatje is inmiddels één van de meest gereproduceerde plaatjes in de klimaatwetenschap. Zowel in het derde (uit 2001) als in het vierde (uit 2007) IPCC rapport bezet het een prominente plaats.

Inmiddels zijn er meer satellietmissies geweest, waaronder die van *CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System)*, en ook zogenaamde *reanalysis* projecten, zoals die van het *ECMWF (ERA-40)*, waaruit stralingsfluxen kunnen worden afgeleid. Trenberth, Fasullo en Kiehl (2009) hebben met deze nieuwe informatie het globaal gemiddeld energiebudget nog eens onder de loep genomen. Het resultaat van deze studie wordt samengevat in figuur 2.

Bij het vergelijken van de getallen in de figuren moeten we in gedachte houden dat een verdubbeling van de CO<sub>2</sub>-concentratie van de atmosfeer van 280 ppmv (voor het industrieel tijdperk) naar 560 ppmv (ergens in de 21ste eeuw) in theorie zal resulteren in een *toename* van ongeveer 4 W m<sup>-2</sup> in de stralingsflux van de atmosfeer naar het aardoppervlak. Deze stralingsflux, die representatief is voor de sterkte van het broeikaseffect, wordt in figuur 2 geschat op 333 W m<sup>-2</sup>, 9 W m<sup>-2</sup> hoger dan de schatting in figuur 1, terwijl de CO<sub>2</sub>-concentratie tussen 1985 en 2004 met slechts 5% is gestegen. Het kan zijn dat hier de positieve terugkoppeling van waterdamp een rol speelt, want het waterdampgehalte van de atmosfeer is in die periode met ongeveer 2,5% gestegen. Ook waterdamp is een belangrijk broeikasgas, en draagt daarom bij aan een toename van de langgolvlige terugstraling van de atmosfeer naar de aarde.

Deze terugstraling (*back radiation* in de figuren) wordt pas de laatste 15 tot 20 jaar betrouwbaar gemeten op 36 plekken verspreid over de wereld. De stralingsdeskundige, Atsumo Ohmura (*ETH, Zurich*), heeft deze metingen in 2006 gecombineerd met de *reanalysis* van het *ECMWF* en komt op een globaal gemiddelde waarde van 345 W m<sup>-2</sup> (figuur 3). Je gaat je dus afvragen hoe Kiehl en Trenberth in 1997 aan een waarde komen die 21 W m<sup>-2</sup> lager ligt. Overigens, heeft Ohmura (2006) de schattingen van de atmosferische terugstraling van verschillende auteurs in een tabel op een rijtje gezet. De Engelse meteoroloog, Dines, kwam in 1917 uit op een zeer lage waarde van 194 W m<sup>-2</sup>. Sellers (1965) noteert op blz. 47 van zijn bekende boek (het boek dat begin jaren 80 in Utrecht werd gebruikt bij het doctoraalvak klimaatfysika) een iets minder lage waarde van 273 W m<sup>-2</sup>. Verschillende klimaatmodellen kwamen begin deze eeuw uit op waarden die liggen tussen 311 en 345 W m<sup>-2</sup>. De *reanalysis* van *NCEP-NCAR* komt op een waarde van 334 W m<sup>-2</sup>, terwijl *ERA-40* een waarde van 340 W m<sup>-2</sup> berekend. Er is dus sprake van een grote onzekerheid in deze belangrijke grootte. De schatting van Kiehl en Trenberth uit 1997 (324 W m<sup>-2</sup>) is zeker té laag, maar valt wel binnen de onzekerheidsmarge.



**Figuur 3. Het globaal gemiddeld energiebudget volgens Ohmura (2006).**

Kiehl en Trenberth beschikten midden jaren 90 niet, zoals Ohmura (2006), over een lange reeks van betrouwbare metingen van de atmosferische terugstraling aan het aardoppervlak op meerdere plekken op aarde. De niet gemeten stralingsfluxen zijn daarentegen uitgerekend met een nauwkeurig stralingsmodel, waarbij een temperatuur-, waterdamp-, wolken- en CO<sub>2</sub>-verdeling, is verondersteld die representatief is voor de globaal gemiddelde atmosfeer. Dat de auteurs daarbij de zogenaamde *US-1976 Standard Atmosphere* als representatief voor de globaal gemiddelde atmosfeer hebben aangenomen is hoogst verbazingwekkend. Deze aanname houdt geen stand als het gaat om waterdamp. De *US-1976 Standard Atmosphere* is namelijk veel droger dan de globaal gemiddelde atmosfeer. Globaal gemiddeld zit er ongeveer 25 kg m<sup>-2</sup> waterdamp in de atmosfeer, terwijl de *US-1976 Standard Atmosphere* slechts 14 kg m<sup>-2</sup> bevat! De verbazing wordt nog groter als ik op bladzijde 200 van het artikel uit 1997 lees dat Kiehl en Trenberth de specifieke vochtigheid met nog eens 12% hebben gereduceerd om overeenstemming te krijgen tussen het model en de satellietmetingen van de uitgaande langgolvige straling aan de top van de atmosfeer (235 W m<sup>-2</sup> in figuur 1). Het is dus niet verrassend dat hierdoor de terugstraling van de atmosfeer naar het aardoppervlak, en daarmee de sterkte van het broeikas effect, wordt onderschat!

De onzekerheid in de waarde van andere energiefluxen tussen atmosfeer en aarde is eveneens minstens 4 W m<sup>-2</sup>. Neem bijvoorbeeld de globaal gemiddelde waarde van de latente warmteflux (78 W m<sup>-2</sup> in figuur 1, 80 W m<sup>-2</sup> in figuur 2). Deze waarde wordt afgeleid uit de gemeten globaal gemiddelde neerslag, in de veronderstelling dat het aan het oppervlak verdampte water uiteindelijk weer terugkomt als neerslag. De schattingen van de globaal gemiddelde neerslag, die overigens voor verschillende tijdvakken gelden, lopen uiteen van 2.61 mm per dag (1979-2001) (Adler et al., 2003) tot 3.1 mm per dag (NCEP2 reanalysis 1989-2008). Kiehl en Trenberth (1997)

houden het op 2.69 mm per dag terwijl Ohmura (2006) een waarde van 2.74 mm per dag gebruikt. Dit laatste relatief kleine verschil representeert  $7 \text{ W m}^{-2}$ !

Kijken we vervolgens naar de zonnestralingsflux dan zien we dat ook hier de onzekerheid groot is. In figuur 2 is de reflectie van zonnestraling door het systeem aarde plus atmosfeer  $5 \text{ W m}^{-2}$  lager dan in figuur 1. Dit heeft te maken met zowel een toename van de door de atmosfeer geabsorbeerde zonnestraling van  $11 \text{ W m}^{-2}$ , als een afname van het gemiddeld albedo van het aardoppervlak van 0.18 naar 0.14. Het planetaire albedo is iets minder sterk afgenomen (van 0.31 naar 0.30)!

Tenslotte, het voelbare warmtetransport van de aarde naar de atmosfeer wordt als sluitstuk bepaald uit de netto straling aan het aardoppervlak en de latente warmteflux. Ook hier zijn de onderlinge verschillen groot: Kiehl en Trenberth (1997) krijgen een waarde van  $24 \text{ W m}^{-2}$ ; Trenberth et al. (2009) komen uit op een waarde van  $17 \text{ W m}^{-2}$ ; Ohmura (2006) komt uit op een waarde van  $20 \text{ W m}^{-2}$ .

Als het globaal gemiddeld energiebudget aan het aardoppervlak zo slecht bekend is, zoals blijkt uit deze vergelijking van verschillende recente studies, dan mag met recht worden getwijfeld aan de gedetailleerde klimaatverwachtingen voor de komende eeuw.

## Literatuur

Adler, R.F. et al., 2003: The Version-2 precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). **Journal of Hydrometeorology**, 4, 1147-1167.

Dines, W.H., 1917: The heat balance of the atmosphere. **Quarterly J. R.Meteorol.Soc.**, 43, 151-158.

Kiehl J.T., and K.E. Trenberth, K.E., 1997: Earth's annual global energy budget. **Bull.Am.Meteorol.Soc.**, 78, 197-208.

Ohmura, A., 2006: **New radiation and energy balance of the world and its variability**. IRS 2004: Current Problems in Atmospheric Radiation. 327-330.

Sellers, W.D., 1965: **Physical Climatology**. University of Chicago Press.

Trenberth, K.E., J.T. Fasullo and J. Kiehl, 2009: Earth's global energy budget. **Bull.Amer.Meteorol.Soc.**, 90, 311-324.