

Wat beweegt de atmosfeer?



In de atmosfeer wordt voortdurend zonne-energie omgezet in windenergie. In dit artikel beschrijven we hoe dit gebeurt. En passant wordt ook de atmosferische energiehuishouding beschreven en proberen we aan de hand van getallen de menselijke energieconsumptie in een wereldwijd perspectief te plaatsen. Peter Siegmund

DE WERELDWIJD GEMIDDELDE ENER-GIEBALANS

De intensiteit van de inkomende zonnestraling aan de top van de atmosfeer bedraagt gemiddeld zo'n 340 W/m^2 . Dit volgt uit de wet van Stefan-Boltzmann, de temperatuur en grootte van de zon en de afstand van de zon tot de aarde. De zon verliest door kernfusie per seconde een massa van twee kilo om het vermogen aan zonne-energie te maken dat door de aarde wordt onderschept. Dit is zo'n tienduizend keer zoveel als de huidige wereldwijde energieconsumptie, die gemiddeld per persoon neerkomt op 2500 W – een flinke waterkoker. Wolken weerkaatsen 30% van de inkomende zonnestraling en de atmosfeer absorbeert 20%. De aarde absorbeert de rest. Die energie raakt hij weer kwijt door verdamping (24%), directe warmteafgifte aan de atmosfeer (6%) en door

het uitzenden van infrarode straling (20%). Deze infrarode straling wordt grotendeels (14%) geabsorbeerd door de atmosfeer, vooral door waterdamp en kooldioxide (het 'broeikaseneffect'). De verdampingsenergie komt in de atmosfeer vrij in de vorm van warmte als de waterdamp condenseert. Van de inkomende zonnestraling wordt dus uiteindelijk $(20+24+6+14)=64\%$ opgenomen door de atmosfeer. De atmosfeer verliest deze energie weer door het uitzenden van infrarode straling. Wereldwijd gemiddeld heerst aan de top van de atmosfeer stralingevenwicht: de netto ingaande zonnestraling $(100-30=70\%)$ is even groot als de uitgaande infrarode straling $(20+14+64=70\%)$.

POOLWAARTS WARMTE-TRANSPORT

In- en uitgaande straling zijn wereldwijd weliswaar in evenwicht, maar lokaal

geldt dit allerminst. Door de bolvorm van de aarde is de netto inkomende zonnestraling in de tropen groter dan in het gebied daarbuiten (de extratropen). De tropen zijn hierdoor niet alleen warmer dan de extratropen, maar ook de uitgaande infrarode straling is er groter. De netto inkomende zonnestraling is in de tropen ongeveer 40 W/m^2 groter dan de uitgaande infrarode straling en in de extratropen is het andersom. De directe warmtebron van de tropische atmosfeer is niet de inkomende straling zelf, maar hoofdzakelijk de warmte die vrijkomt bij de condensatie van waterdamp in stijgende, afkoelende lucht. Zo wordt de inkomende straling aan het aardoppervlak voor een groot deel omgezet in verdampingsenergie en is zo indirect de warmtebron van de tropische atmosfeer. Ook in de extratropen komt condensatiewarmte vrij, maar deze is

relatief gering en wordt gedomineerd door de afkoeling van de atmosfeer veroorzaakt door het uitzenden van infrarode straling. Ook al worden de tropen voortdurend opgewarmd en de extratropen voortdurend afgekoeld, het is niet zo dat de tropen alsmat warmer en de extratropen alsmat kouder worden. Stromingen in de atmosfeer (wind!) en in de oceaan zorgen voor transport van dit warmteoverschot. De tropen en de extratropen zouden anders ongeveer 10 graden warmer respectievelijk kouder zijn dan het geval is.

DE ATMOSFEER ALS WARMTEMOTOR

In de atmosfeer wordt dus energie getransporteerd van de warme tropen, waar de energie vrijkomt, naar de koude extratropen, waar de energie wordt afgevoerd. Hierbij wordt een deel van de energiestroom omgezet in bewegings-

energie, in wind. Dit is analoog aan wat in een motor gebeurt. Door verbranding van brandstof komt in een motor energie vrij waardoor het binnenste van de motor opwarmt. Er ontstaat hierbij een warmtestroom van de warme binnenkant van de motor naar de koude buitenlucht, waarvan een fractie wordt omgezet in bewegingsenergie. Deze fractie is altijd kleiner dan het Carnot-rendement, dat gelijk is aan $(T_H - T_L)/T_H$, waarbij T_H de hoge en T_L de lage temperatuur is. Het temperatuurverschil tussen tropen en extratropen, $T_H - T_L$, is gemiddeld ongeveer 30 Kelvin, de temperatuur in de tropen is ongeveer 300 Kelvin, dus het Carnot-rendement van de atmosfeer is ongeveer 0,1. Het werkelijke rendement van de atmosfeer blijkt maar weinig minder te zijn. Door wrijving, vooral met het aardoppervlak, verliest de atmosfeer voortdurend zo'n 2 W/m^2 bewegingsenergie



Het vermogen (in Joule per jaar) van de in dit artikel beschouwde bronnen van energie. Van de zonne-energie die de aarde bereikt wordt in de atmosfeer 6% als warmte van de tropen richting de polen getransporteerd. Ongeveer 10% van deze warmte wordt gebruikt om de atmosferische motor draaiende te houden. Dit nuttige vermogen van de atmosfeer is ongeveer even groot als het vermogen dat de mens aan de atmosfeer toevoegt via het versterkte broeikaseneffect en ongeveer zestig keer zo groot als de menselijke energieconsumptie. Van deze energieconsumptie wordt momenteel ongeveer 0,4% als windenergie aan de bewegende atmosfeer onttrokken.

[1]. Dit verlies is in evenwicht met de aanmaak van bewegingsenergie (waarover hieronder meer). Het poolwaartse warmtetransport bedraagt 40 W/m^2 (de hierboven genoemde netto inkomende straling in de tropen), hetgeen we moeten vermenigvuldigen met het oppervlak van de tropen. Aannemende dat de tropen de halve aarde beslaan (in werkelijkheid is het wat minder), bedraagt het wereldwijd gemiddelde poolwaartse warmtetransport dus ongeveer 20 W/m^2 . Hiervan wordt, zoals gezegd, 2 W/m^2 omgezet in bewegingsenergie, zodat het rendement van de atmosfeer ongeveer gelijk is aan het Carnot-rendement van 0,1. De atmosfeer beweegt wat hij kan om temperatuurverschillen zoveel mogelijk te vereffenen.

HET ONTSTAAN VAN WIND

Zoals gezegd remt het aardoppervlak de

wind af. Toch valt deze niet stil en moet er dus wind 'ontstaan'. Dat gebeurt doordat lucht, net als water, voortdurend het laagste punt opzoekt. De potentiële energie die hierbij vrijkomt wordt omgezet in bewegingsenergie, in wind. Dit gebeurt als warme, lichte lucht stijgt en koude, zware lucht daalt, zoals in depressies. Dit is vergelijkbaar met een bak water met daarop een laag olie, waarbij het grensvlak tussen de twee vloeistoffen een helling heeft. De vloeistoffen zullen gaan bewegen, waarbij de helling afneemt, het massamiddelpunt lager komt te liggen en potentiële energie wordt omgezet in bewegingsenergie. De wind transporteert warmte van de warme naar de koude gebieden en probeert zo zijn eigen oorzaak – temperatuurverschillen – weg te nemen. Toch blijven de temperatuurverschillen bestaan doordat de atmosfeer in de tropen wordt opgewarmd en in de extratropen wordt afgekoeld. Dit vergroot de temperatuurverschillen en brengt het massamiddelpunt van de atmosfeer juist omhoog, waarbij potentiële energie ontstaat. Zo blijft het waaien zolang de zon schijnt. Zonder zon zou de windsnelheid al na een week zijn gehalveerd. Er ontstaat aan potentiële energie precies evenveel als er aan bewegingsenergie ontstaat, en beide zijn weer precies even groot als de afname van de bewegingsenergie door wrijving, die, zoals gezegd, 2 W/m^2 bedraagt. Dit is, vermenigvuldigd met het oppervlak van de aarde, ongeveer 60 keer de wereldwijde energieconsumptie, en 17.000 keer het wereldwijde vermogen aan windturbines.

DE BEWEGINGSENERGIE VAN DE ATMOSFEER EN DE AARDE

De jaargemiddelde bewegingsenergie van de gehele atmosfeer is ongeveer $6 \cdot 10^{20} \text{ J}$, wat overeen komt met een gemiddelde windsnelheid van ongeveer 15 m/s [1]. Deze energie is ongeveer even groot als de jaarlijkse energieconsumptie. De winden zijn het sterkst op het winterhalfjaar, omdat hier de temperatuurcontrasten het grootst zijn. Oceanen verkleinen de jaarlijkse cyclus van de temperatuurcontrasten en daarmee die van de windsnelheid, waardoor de cyclus het sterkst is op het noordelijk halfjaar. De wereldwijd gemiddelde bewegingsenergie is daarom in onze winter ongeveer 15% groter dan in onze zomer. Het impulsmoment van de aarde plus de atmosfeer is een behouden grootheid, zodat het impulsmoment

van de aarde een jaarlijkse cyclus heeft in tegenfase met die van de atmosfeer. Hierdoor duurt tijdens onze winter de dag ongeveer 1 milliseconde langer dan tijdens onze zomer. De jaarlijkse verandering van het impulsmoment van de aarde is nihil ten opzichte van het impulsmoment zelf. De rotatie-energie van de aarde is ongeveer $2 \cdot 10^{29} \text{ J}$. Met het huidige energieverbruik zou de wereld hier ruim 400 miljoen jaar mee toekunnen, maar bij de huidige jaarlijkse groei van 2% slechts 800 jaar. Van deze rotatie-energie kunnen we profiteren door gebruik te maken van getijdenenergie. Ondanks de grote hoeveelheid rotatie-energie zal getijdenenergie nooit een belangrijke energiebron worden: de bron is eendimensionaal -de kustlijn- terwijl de energiebehoefte in een tweedimensionaal vlak leven, en een groot verschil tussen eb en vloed bestaat slechts langs een klein gedeelte van de kust.

DIRECTE EN INDIRECTE OPWARMING DOOR DE MENS

Bij het verbranden van fossiele brandstoffen warmt de aarde direct op door de warmte die vrijkomt bij de verbranding en indirect via het versterkte broeikaseffect door de CO_2 die eveneens bij de verbranding vrijkomt. Sinds het begin van de industriële revolutie is de atmosferische CO_2 -concentratie toegenomen van 270 naar 380 ppmv. Van de CO_2 die bij verbranding ontstaat blijft ongeveer de helft achter in de atmosfeer en verdwijnt de andere helft in de oceanen en de biosfeer. Bij de verbranding die tot deze CO_2 -toename leidde kwam, per m^2 aardoppervlak, ongeveer 50 MJ aan warmte vrij. Daarnaast heeft de CO_2 -toename een versterkt broeikaseffect veroorzaakt van $1,5 \text{ W/m}^2$, ofwel ongeveer $50 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{jaar}^{-1}$. Het duurt enkele honderden jaren voordat de oceanen en de biosfeer de extra CO_2 hebben opgenomen en daarom voegt de extra CO_2 , via het versterkte broeikaseffect, een hoeveelheid warmte aan de atmosfeer toe die enkele honderden malen groter is dan de warmte die vrijkwam bij de verbranding. Is dit versterkte broeikaseffect, dat je gratis honderden keer zoveel energie teruggeeft als je er 'instopt', daarmee het ei van Columbus voor het energieprobleem? Helaas niet, de extra $1,5 \text{ W/m}^2$ aan infrarode stralingsenergie maakt de aarde hooguit een paar graden warmer waardoor 's winters de kachel wat omlaag kan.

REFERENTIE

- 1 J.P. Peixoto en A.H. Oort, *Physics of Climate*, American Institute of Physics, ISBN 0-88318-711-6