

Globale stralingsmeting vanuit de ruimte

Observeren van wolkeneigenschappen en zonnestraling met de huidige generatie METEOSAT

Hartwig Deneke, Robert Roebeling, Erwin Wolters en Arnout Feijt (KNMI)

Sinds januari 2004 verzamelen de satellieten uit de Meteosat Second Generation (MSG)-serie iedere 15 minuten beelden van Europa en Afrika. Deze beelden geven informatie over de huidige weersituatie en worden door meteorologen frequent gebruikt bij het maken van weersverwachtingen en voor presentaties op televisie. MSG is echter ook een unieke bron van informatie voor wetenschappers. Het KNMI heeft algoritmen ontwikkeld om uit MSG informatie over wolkeneigenschappen en globale straling af te leiden. Dit artikel laat zien dat MSG zeer goed gebruikt kan worden voor een nauwkeurige schatting van globale straling onder bewolkte condities. Nauwkeurige schattingen van globale straling zijn van belang voor de ontwikkeling van een beter begrip van het klimaatsysteem, maar dragen ook bij aan het traditionele meetnet van grondstations waar globale straling met behulp van pyranometers wordt gemeten.

Motivatie en achtergrond

Zonlicht, of de meer wetenschappelijke term zonnestraling, is de belangrijkste bron van energie voor het klimaatsysteem van de aarde. Zonnestraling is de energiebron voor de atmosferische circulatie en de hydrologische cyclus en speelt een belangrijke rol in een groot aantal processen van het klimaatsysteem. De hoeveelheid zonnestraling die het aardoppervlak bereikt, aangeduid als de globale straling, beïnvloedt onder andere de temperatuur aan het aardoppervlak en de verdamping van de planten en de bodem. Wolken hebben een sterk beperkend effect op de globale straling en kunnen op korte tijdschaal voor grote variaties in globale straling zorgen. Gemiddeld neemt de globale straling met 20% af door bewolking, wat een verlaging van de oppervlaktetemperatuur tot gevolg heeft. Wolken houden echter ook de langgolvlige straling die het aardoppervlak uitstraalt tegen, wat een verwarmend effect heeft. In Figuur 1 wordt schematisch weergegeven wat de gevolgen van bovengenoemde en andere effecten gemiddeld zijn op het globale energiebudget.

De representatie van wolken en hun invloed op de straling zijn momenteel de grootste bronnen van onzekerheid in ons begrip van het huidige klimaatsysteem en bij het voorspellen van klimaatveranderingen. Daarom is er bij onderzoekers grote behoefte aan nauwkeurige metingen van wolkeneigenschappen en globale straling, welke gebruikt kunnen worden voor de evaluatie en verbetering van klimaatmodellen. Naast het wetenschappelijke belang van deze metingen, heeft ook de samenleving groot belang bij nauwkeurige metingen van globale straling. Zo is informatie over de ruimtelijke verdeling van globale straling essentieel bij het bepalen van de optimale locatie voor zonne-energie centrales. Verder wordt informatie over globale straling binnen de land en bosbouw gebruikt voor het schatten van verdamping en bodemvocht, of voor de voorspelling van oogstproducties. In de architectuur worden stralingsgegevens gebruikt om het thermische gedrag van gebouwen te kwantificeren en te optimaliseren voor de heersende stralingscondities.

De nationale meteorologisch diensten zijn primair verantwoordelijk voor de levering van meteorologische gegevens, waarvan de globale straling metingen onderdeel van uitmaken. In 1901 is het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) begonnen met het meten van zonneshijnduur met de Campbell-Stokes zonneshijnduurmeter. De glazen bol van dit instrument

werkt als een brandglas, en brandt gedurende zonneshijn een spoor in een papierstrook. Omdat dit instrument slechts een ruwe schatting van globale straling maakt, gebruikt het KNMI sinds 1958 pyranometers voor stralingsmetingen¹. In Nederland zijn momenteel 35 pyranometers operationeel in gebruik door het KNMI. Sinds 2006 is het meetstation van Cabauw onderdeel van het internationale Baseline Surface Radiation Network (BSRN), waarbinnen stralingsmetingen met een zeer hoge nauwkeurigheid worden gedaan voor klimaatonderzoek.

In tegenstelling tot de meteorologische metingen op grondstations verzamelen satellieten informatie met een grote ruimtelijke dekking. In 1977 is de eerste Europese geostationaire satelliet gelanceerd, METEOSAT-1. Geostationaire satellieten staan op een vast punt van 36000 km boven de evenaar en hebben een constante kijkgeometrie. Hierdoor kunnen er zeer frequent opnamen gemaakt worden van bepaalde locaties, wat het mogelijk maakt om veranderingen in meteorologische condities te volgen. De eerste generatie METEOSAT-satellieten, waarvan er 7 zijn gelanceerd tussen 1977 en 1995, hadden slechts 3 spectrale kanalen met een ruimtelijke resolutie van 5 km x 5 km boven de evenaar, waardoor slechts beperkt kwantitatief onderzoek met deze satelliet mogelijk was. Door technologische verbeteringen en de groeiende vraag naar hoogkwalitatieve satellietgegevens voor weersvoorspelling en klimaatonderzoek hebben EUMETSAT en ESA, de vertegenwoordigers van het METEOSAT programma, de Meteosat Second Generation (MSG)-satelliet ontwikkeld. MSG heeft aan boord het Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) instrument, dat informatie verzamelt in 12 spectrale kanalen met een ruimtelijke resolutie boven de evenaar van 3 km x 3 km voor 11 kanalen en 1 km x 1 km voor een hoogresolutie zichtbaar lichtkanaal. De MSG-satelliet verzamelt deze informatie iedere 15 minuten voor een gebied dat zich uitstrekt over Europa en Afrika. Om het gebruik van MSG maximaal te benutten heeft EUMETSAT een netwerk van acht Satellite Application Facilities (SAFs) opgezet waarbinnen hoge kwaliteit satellietproducten worden ontwikkeld voor verschillende onderzoeksvelden.

Sinds begin jaren '90 heeft het KNMI algoritmen ontwikkeld om informatie over wolkeneigenschappen en globale straling uit meteorologische satellieten af te leiden. Dit werk heeft geresulteerd in een actieve betrokkenheid van het KNMI bij de Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM-SAF). Binnen de CM-SAF is het KNMI verantwoordelijk voor de ontwikkeling en evaluatie van verschillende wolkenproducten die worden afgeleid met het *Cloud Physical Properties (CPP)* algoritme (Roebeling et al., 2006). Verdere ontwikkeling van de methode om globale straling af te leiden heeft plaatsgevonden binnen het *Surface Insolation under Cloudy Conditions derived from SEVIRI Imagery (SICCS)* van het Nederlands Instituut voor Vliegtuigontwikkeling en Ruimtevaart (NIVR). Het werk binnen SICCS is een voortzetting van het werk dat de eerste auteur van dit artikel heeft gedaan binnen zijn promotieonderzoek.

Methode

Wolken hebben grote invloed op de transmissie en reflectie van zonlicht binnen de aardse atmosfeer. De invloed van wolken op zonnestraling hangt af van de wolkeneigenschappen, waarvan de belangrijkste eigenschappen de hoeveelheid water of ijs die zich in de wolk bevindt en de grootte van de druppels of ijskristallen zijn. Ander factoren die een rol spelen zijn de hoeveelheid waterdamp en aerosolen in de atmosfeer, de dikte en hoogte van de wolken en het albedo van het aardoppervlak.

Al deze effecten kunnen worden gesimuleerd met zogeheten stralingstransportmodellen. Deze modellen beschrijven het pad van zonnestraling door de atmosfeer. Bij de bepaling van wolkeneigenschappen en globale straling met de CPP- en SICCS-algoritmen wordt een stralingstransportmodel gebruikt om voor een groot aantal verschillende wolkensituaties de verwachte satellietreflectantie van een bepaald spectraal kanaal te simuleren. De wolkensituaties worden onderscheiden naar het volume wolkenwater, wat gedefinieerd wordt als vloeibaar waterpad voor waterwolken en als ijswaterpad voor ijswolken, en de grootte en verdeling van de wolkendeeltjes, welke kunnen bestaan uit waterdruppels of ijskristallen. De stralingstransport simulaties zijn uitgevoerd voor de 0.6- en 1.6- μm kanalen van het SEVIRI instrument, wat heeft geresulteerd in een database van verwachte hoeveelheden gereflecteerd licht in de richting van de

¹ In Wageningen is in 1928 begonnen met de eerste metingen van globale straling (zie De Bruin et al. 1995).

satelliet voor verschillende wolksituaties en kijkgeometrieën van de satelliet en de zon. Door de informatie uit deze database te vergelijken met de door SEVIRI waargenomen hoeveelheden terugverstrooid licht bij 0.6 en 1.6 μm kunnen de thermodynamische fase (ijs of water), het vloeibaar water pad (het volume wolkenwater in een atmosferische kolom) en de deeltjesgrootte van druppels of ijskristallen bepaald worden.

De globale straling wordt berekend voor het gehele zonnenspectrum, voor de golflengten tussen 0.2 en 4 μm , en is daarmee gelijk aan de globale stralingsmetingen van een pyranometer aan het aardoppervlak. Om de juiste globale straling te kunnen berekenen voor bewolkte situaties maakt het SICCS algoritme gebruik van de wolkeneigenschappen die met het CPP algoritme zijn afgeleid. Zowel voor het afleiden van de wolkeneigenschappen als bij de bepaling van de globale straling wordt een correctie uitgevoerd voor de invloed van het oppervlakte albedo. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een klimatologie van oppervlakte albedo's die is bepaald met het MODIS instrument. Op een soortgelijke wijze wordt ook informatie over waterdamphoeveelheden gebruikt, die nodig is om te corrigeren voor de effecten van waterdamp op de absorptie in de atmosfeer.

Evaluatie en resultaten

De bepaling van de nauwkeurigheid en precisie van de globale straling uit SEVIRI is van zeer groot belang binnen het SICCS project. Nauwkeurige informatie over wolkeneigenschappen is een belangrijk vereiste voor de schatting van globale straling bij bewolkte condities. Validatie van wolkeneigenschappen is dan ook een essentiële stap bij de ontwikkeling van een nauwkeurig globale stralingproduct. Binnen de CM-SAF heeft het KNMI uitgebreid aandacht besteed aan de validatie van wolkeneigenschappen. Zo hebben Roebeling et al. (2007) door SEVIRI afgeleide vloeibaar waterpaden vergeleken met microgolf radiometer (MWR) metingen, waarbij microgolf radiometer metingen zijn gebruikt om het vloeibaar waterpad van de wolken vanaf de grond met een hoge nauwkeurigheid te bepalen. Uit deze vergelijking blijkt dat wolkeneigenschappen, zoals vloeibaar waterpad, met een kleine fout uit SEVIRI metingen kunnen worden afgeleid. De fouten zijn over het algemeen kleiner dan 10%. Figuur 2 toont een tijdserie van de mediaan van het dagelijks vloeibaar waterpad (LWP) afgeleid uit SEVIRI- en MWR-metingen. Voor het grondstation van Chilbolton in Groot-Brittannië zijn de dagelijkse mediaan LWP-waarden van SEVIRI en MWR zeer goed gecorreleerd ($r = 0.94$). Verder hebben de LWP-waarden van SEVIRI een nauwkeurigheid van beter dan 5 g m^{-2} en een standaarddeviatie van ongeveer 15 g m^{-2} .

Het traditionele netwerk van 35 grondstations met pyranometers in Nederland is gebruikt om de nauwkeurigheid te bepalen van de SEVIRI globale stralingschattingen die zijn afgeleid met het SICCS-algoritme. Deze vergelijking laat zien dat de gemiddelde dagelijkse globale straling met ongeveer 4 W m^{-2} wordt onderschat door SEVIRI. De belangrijkste reden voor deze onderschatting ligt in het oppervlakte-albedo, dat boven land iets te laag is. Hierdoor overschat het CPP-algoritme de optische dikte en het vloeibare waterpad van wolken, wat een reducerend effect heeft op de globale straling. In de volgende versie van de CPP- en SICCS-algoritmen zullen nauwkeurigere oppervlakte-albedokaarten worden gebruikt. De standaarddeviatie tussen de SEVIRI-schattingen en pyranometermetingen van globale straling zijn voor de uurlijkse, dagelijkse en maandelijks gemiddelden respectievelijk 55, 10 en 5 W m^{-2} . Figuur 3 toont voor de uurlijkse en dagelijkse resultaten de bijbehorende scatterplots. De nauwkeurigheid van de SEVIRI-schattingen is gedurende de zomer vergelijkbaar met de zogenaamde "first class" pyranometers, welke het gemiddelde in dagelijkse globale straling met een nauwkeurigheid van 5% meten. In de winter neemt de nauwkeurigheid van de met SICCS afgeleide globale stralingschattingen af tot 10 à 15% door de veel lagere hoeveelheid inkomende zonnestraling gedurende deze tijd van het jaar. Dit effect wordt gevisualiseerd in Figuur 4, waarin een boxplot het verloop toont van het gemiddelde en de spreiding van de maandelijks globale straling voor zowel de SEVIRI- als pyranometermetingen.

Figuur 5 presenteert de langjarige gemiddelde globale straling over de periode 1970 tot 2000 gemeten door het netwerk van pyranometerstations, en de jaarlijkse gemiddelde globale straling over de periode juni 2004 – mei 2005 afgeleid met SICCS. Hoewel de middelingperiode van door SICCS afgeleide globale straling te kort is om volledige overeenstemming te krijgen, hebben beide datasets vergelijkbare gemiddelde waarden, en neemt de globale straling geleidelijk vanuit het zuidwesten in noordoostelijke richting af.

Figuur 6 geeft een voorbeeld van met SICCS afgeleide kaarten van de seizoensgemiddelde globale stralings waarden voor Noordwest-Europa. In deze figuur zijn een aantal kenmerken te zien die niet afgeleid kunnen worden uit de metingen van het netwerk van pyranometer grondstations. Boven het Kanaal en Zuidwestelijk Groot-Brittannië bijvoorbeeld is de globale straling significant hoger boven de zee dan boven land. Verder is voor de Rijnvallei in Duitsland goed te zien dat de globale straling in de vallei hoger is dan op de bergruggen aan weerszijde van de vallei. Het is onmogelijk om dergelijke details te detecteren met behulp van een netwerk van pyranometer grondstations.

Tot slot laat Figuur 7 de gemiddelde globale straling over Nederland voor 24 juni 2004 zien. Het weer op deze dag werd bepaald door een lagedrukgebied ten noorden van Nederland. Het geocludeerde front lag over noord-Nederland, met nabij het front een zone met volledige bewolking waaruit neerslag viel. Naar het zuiden toe nam de invloed van het lagedrukgebied af, waardoor hier de bewolking later op de dag begon te breken en er minder neerslag viel (zie Figuur 8 voor de grondanalyse van de weerssituatie). Uit Figuur 7 is te zien dat er grote regionale verschillen zijn in globale straling, met daggemiddelde van 250 W m^{-2} in het zuiden en 50 W m^{-2} in het noorden. De rechter grafiek in Figuur 7 laat zien dat de door SEVIRI afgeleide globale stralingswaarden zeer goed correleren met de metingen van 24 pyranometer stations.

Conclusies en vooruitblik

Dit artikel laat zien dat men met het CPP- en SICCS-algoritme wolkeneigenschappen en globale straling nauwkeurig kan afleiden uit de spectrale metingen van het SEVIRI-instrument. Binnen de CM-SAF zal het CPP-algoritme de komende jaren nog verder worden ontwikkeld en verbeterd. Deze verbeteringen zullen direct hun weerslag vinden in de kwaliteit van de globale stralingproducten van het SICCS-algoritme, zodat de onderschatting van globale straling met 4 W m^{-2} kan worden verkleind en de nauwkeurigheid van de globale stralingschattingen gedurende de winter kan worden verbeterd.

Er zijn plannen dat het KNMI het globale stralingsproduct in de nabije toekomst operationeel gaat aanbieden aan interne en externe gebruikers als aanvulling op de metingen van de 35 pyranometerstations. Deze stap draagt onder andere bij aan huidig en toekomstig onderzoek, waarbij de uit SEVIRI afgeleide wolkeneigenschappen en stralingschattingen gebruikt kunnen worden voor het evalueren en verbeteren van weers- en klimaatmodellen.

Omdat de SICCS-methode wolkeneigenschappen gebruikt als basis voor het berekenen van globale straling is het eenvoudig om, naast globale straling, ook andere stralingscomponenten af te leiden. Zo wordt het de SICCS methode al gebruikt voor het bepalen van de dosis UV-straling, hetgeen een belangrijke verbetering kan betekenen voor het voorspellen van UV-straling gerelateerde risico's.

Literatuur

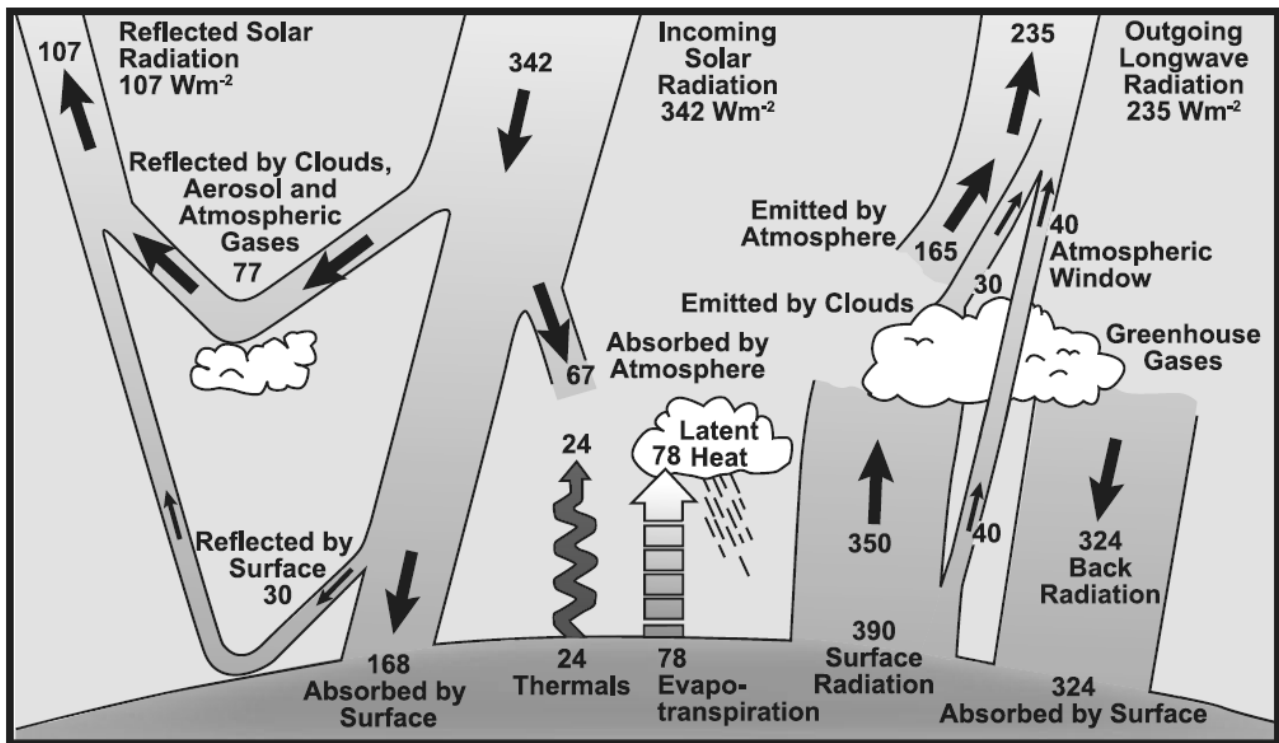
De Bruin et al. 1995: A series of global radiation at Wageningen for 1928-1992, *Int. J. Clim.*, 15(11).

Kiehl, J. T. and Trenberth, K. E., 1997: Earth's Annual Global Mean Energy Budget, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, p197-208.

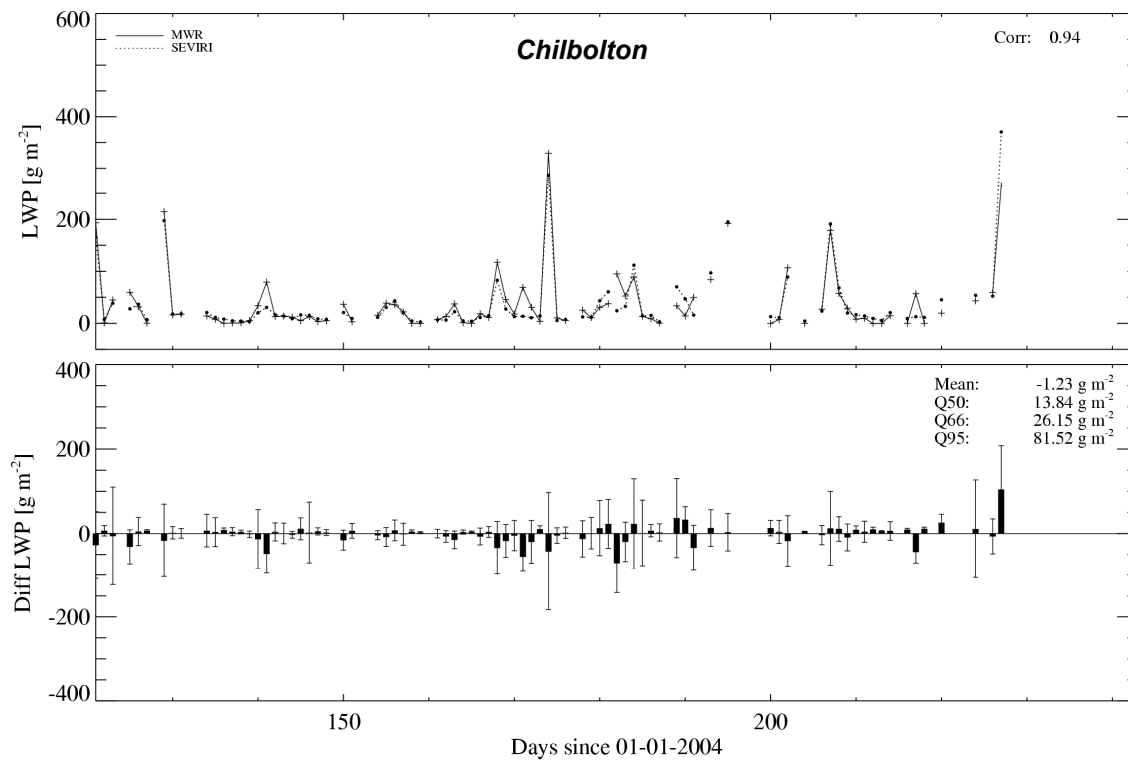
Roebeling, R.A., A.J. Feijt en P. Stammes, 2006: *Cloud property retrievals for climate monitoring: implications of differences between SEVIRI on METEOSAT-8 and AVHRR on NOAA-17* J. Geophys. Res., 111, D20210, doi:10.1029/2005JD006990.

Roebeling R. A., H. M. Deneke and A. J. Feijt, 2007, *Validation of cloud liquid water path retrievals from SEVIRI using one year of CloudNET observations*, J. of Appl. Met. and Clim., (accepted)

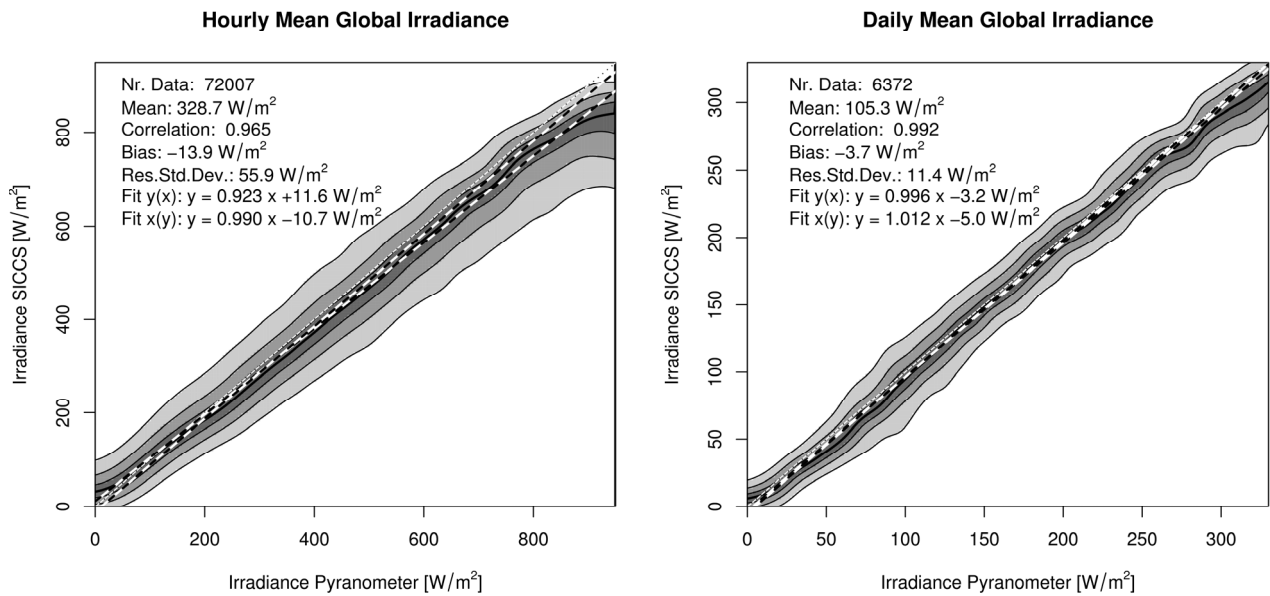
Figuren



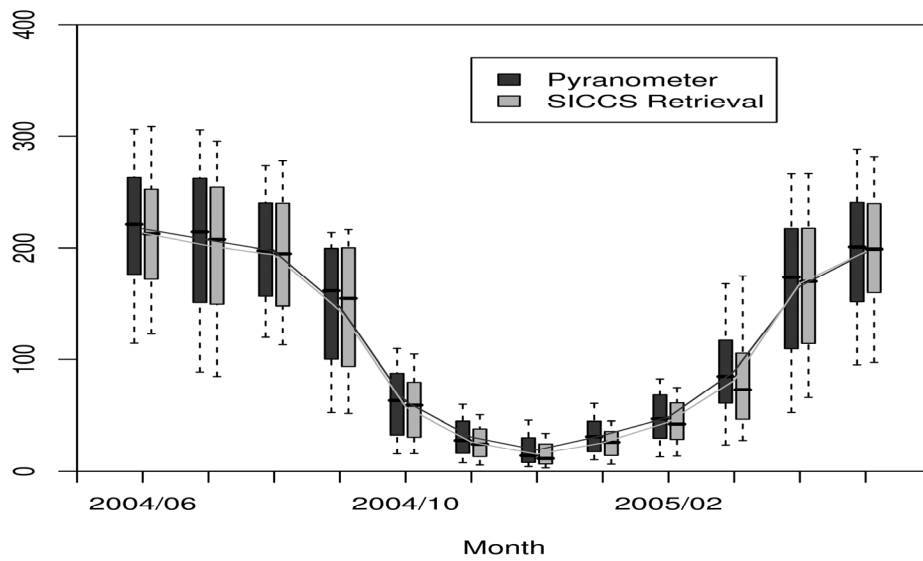
Figuur 1: Schatting van het energiebudget van de aarde (bron Kiehl and Trenberth, 1997: *Earth's Annual Global Energy Budget*, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 78). Over lange perioden is aan de top van de atmosfeer de inkomende globale straling in evenwicht met de reflectie van zonnestraling en de emissie van langgolvlige straling.



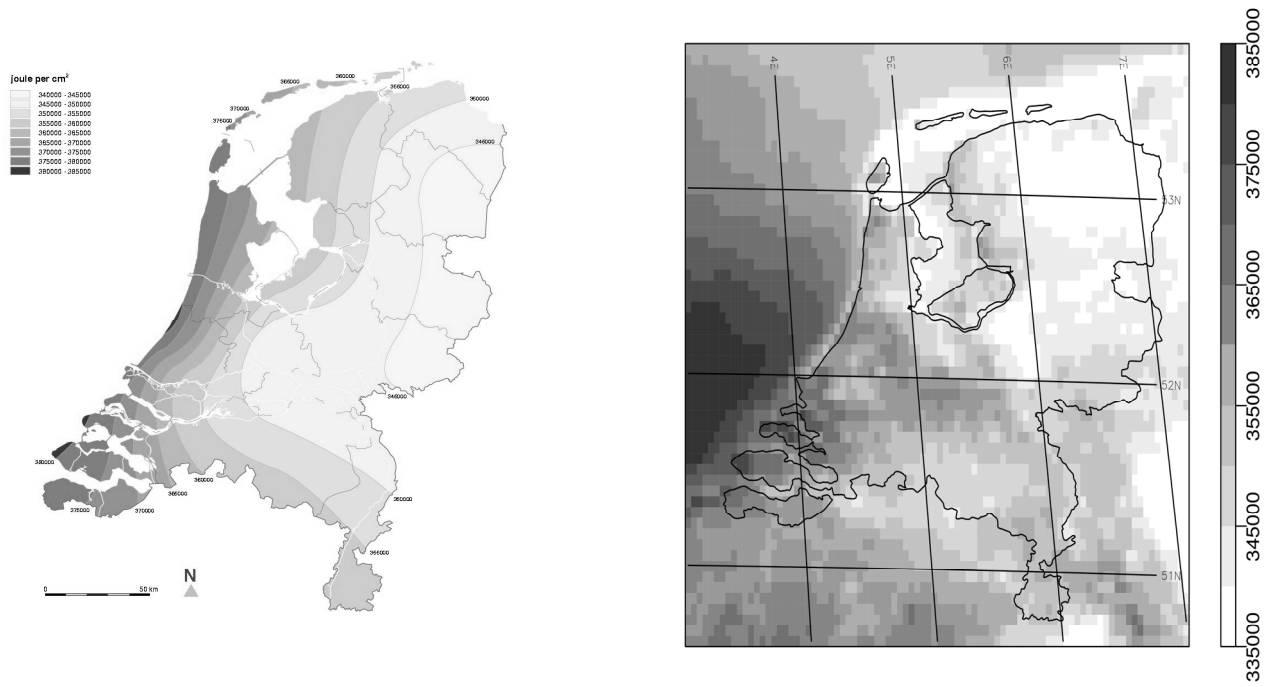
Figuur 2: Tijdserie van de dagelijkse mediaan vloeibaar waterpadwaarden (LWP) afgeleid uit SEVIRI en MWR-metingen (bovenste grafiek), en het verschil tussen de LWP-waarden van SEVIRI en MWR (onderste grafiek). De grafiek beschrijft de periode mei tot en met augustus 2004 voor het meetstation van Chilbolton in Groot-Brittannië.



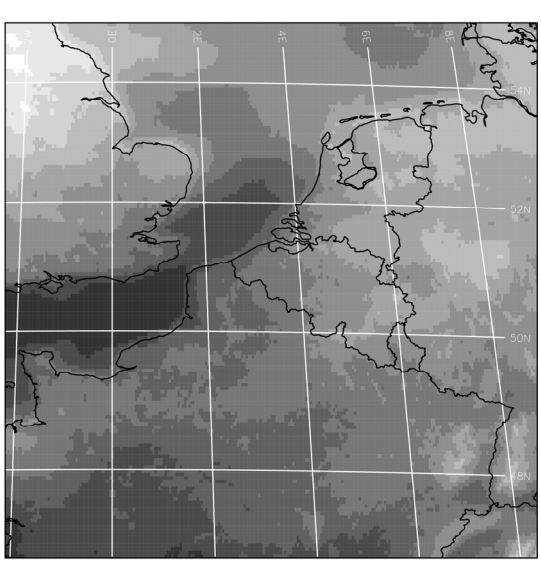
Figuur 3: Scatterplot van SICCS afgeleide globale straling schattingen versus pyranometer metingen (in W m^{-2}) voor uurlijkse gemiddelde waarden (linker grafiek) en de dagelijkse gemiddelde waarden (rechter grafiek). De grijsstinten beschrijven de ruimte waarbinnen 33, 66 en 95 procent van de data paren liggen.



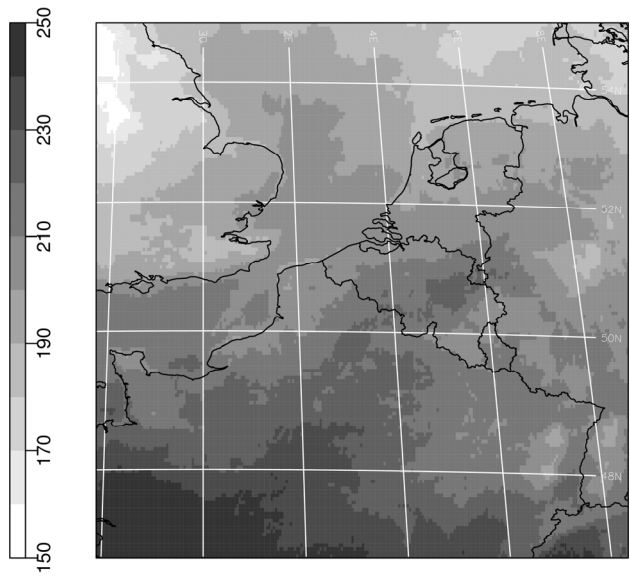
Figuur 4: Boxplot van dagelijkse gemiddelde globale straling (in $W m^{-2}$) voor de pyranometermetingen (donker grijs) en de bijbehorende SEVIRI-schattingen (licht grijs). De boxen illustreren de range van waarden binnen het 25ste en 75ste percentiel. De lijnen geven de range tussen het 5de en 95ste percentiel weer .



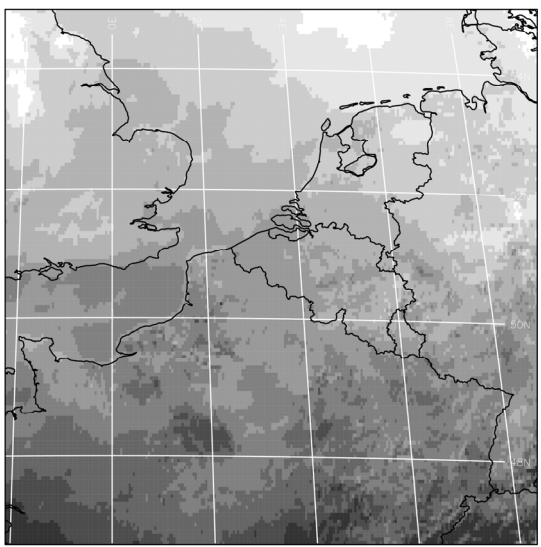
Figuur 5: Jaarlijkse gemiddelde globale stralingssom (in $J\ cm^{-2}$) voor Nederland afgeleid uit pyranometer metingen. De linker grafiek toont de klimatologie over de periode 1970 t/m 2000, terwijl de rechter grafiek de gemiddelde globale stralingssom toont die is afgeleid uit SEVIRI – metingen over de periode juni 2004 t/m mei 2005).



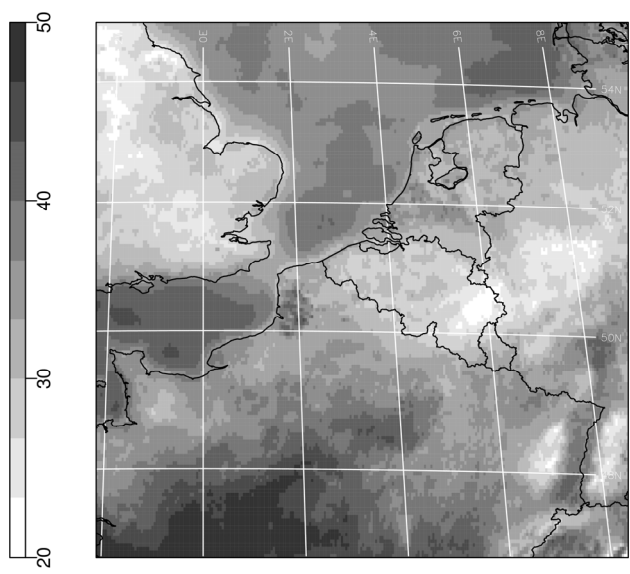
(jja)



(son)

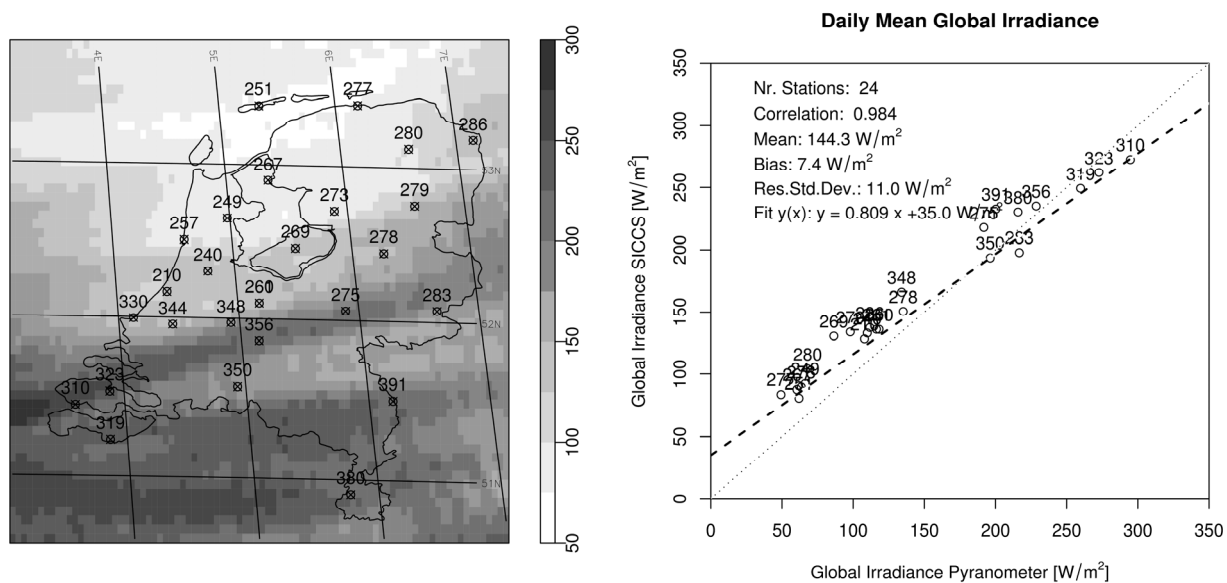


(djf)

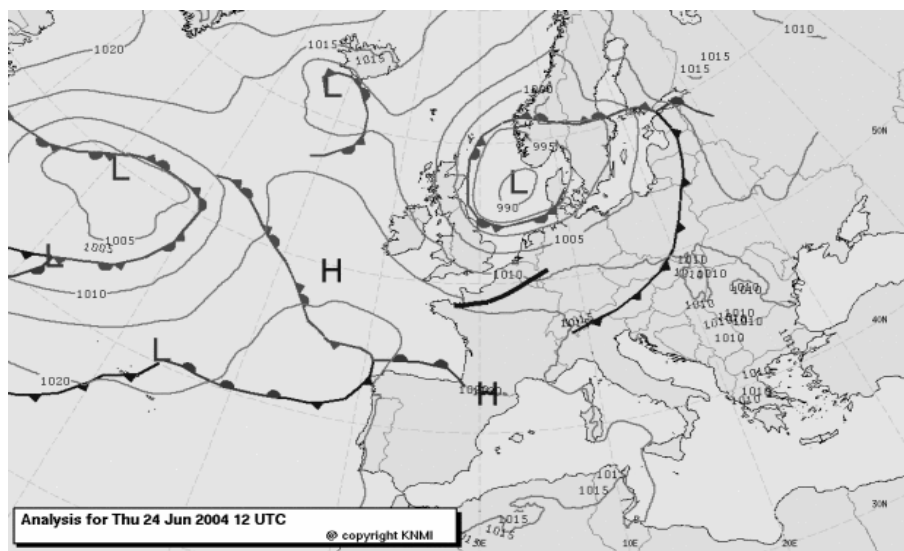


(mam)

Figuur 6: Seizoensgemiddelde globale straling (in $W m^{-2}$) afgeleid uit SEVIRI-metingen met het SICCS-algoritme. De beelden zijn gemaakt voor Noordwest-Europa voor de periode juni, juli en augustus 2004 (jja), september, oktober en november 2004 (son), december 2004 en januari en februari 2005 (djf) en maart, april en mei 2005 (mam).



Figuur 7: Gemiddelde globale straling (in $W\ m^{-2}$) voor Nederland voor 24 juni 2004. De linker grafiek toont de ruimtelijke verdeling en de positie van de pyranometerstations, terwijl de rechter grafiek toont de relatie tussen de globale stralingswaarden van de pyranometer en SEVIRI.



Figuur 8: Grondanalyse van de weerssituatie voor Europa voor 24 juni 2004, 12 UTC.