

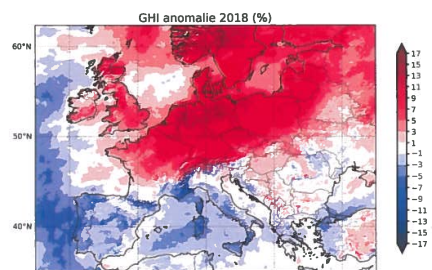
Globale straling meten met satellieten – terugblik op het zonnige jaar 2018

JAN FOKKE MEIRINK, HYLKE DE VRIES, WOUTER KNAF, PIET STAMMES (KNMI)

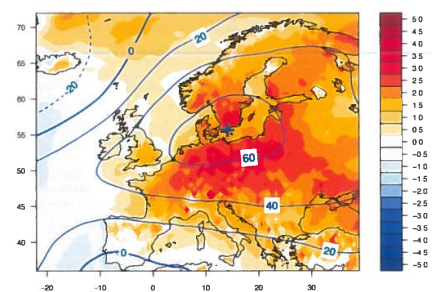
Inkomende zonnestraling ofwel globale straling (GHI, *Global Horizontal Irradiance*) is een essentiële atmosferische variabele. Behalve door de stand van de zon wordt GHI bepaald door de samenstelling van de atmosfeer: vooral bewolking en daarnaast ook aerosolen en waterdamp. GHI is een van de belangrijkste componenten in het oppervlakte-energiebudget. GHI reguleert onder meer de verdamping en bepaalt mede de temperatuur aan het oppervlak. Nauwkeurige metingen van globale straling zijn van belang voor tal van toepassingen zoals in de zonne-energiesector en in de tuinbouw. In dit artikel beschrijven we hoe GHI met meteorologische satellieten gemeten kan worden en analyseren we specifiek de observaties voor het jaar 2018, een voor Nederland uitzonderlijk zonnig jaar. Ten opzichte van de periode 2005-2017 was de jaargemiddelde GHI in 2018 tot wel 14% hoger, en waar normaliter de kustgebieden de meeste zonnestraling ontvangen, was dat in 2018 juist het binnenland.

Waarnemingen van zonnestraling

GHI is gedefinieerd als de totale hoeveelheid zonnestraling, uitgedrukt in W/m^2 of geïntegreerd in de tijd naar kWh/m^2 , die op een horizontaal deel van het aardoppervlak valt. In Nederland wordt GHI op ongeveer 30 KNMI-meteorologische metingen van satellietmetingen kan GHI nauwkeurig worden bepaald. Voor Europa en Afrika zijn de Meteosat-satellieten van EUMETSAT van belang. Uit de metingen van deze geostationaire satellieten leiden we gegevens over wolken, neerslag en straling af, wat



Figuur 1. Anomalie van Meteosat GHI in Europa in 2018 ten opzichte van de referentieperiode 2005-2017.



Figuur 2. Anomalie van 500 hPa geopotentiële hoogte (contouren, in m) en 2m-temperatuur (kleuren, in °C) in de maanden april tot en met september ten opzichte van de periode 1981-2010.

inmiddels een dataset lopend van eind januari 2004 tot heden heeft opgeleverd, met een tijdsresolutie van 15 minuten (zie Kader 1 voor verdere details). Het grote voordeel van deze satellietwaarnemingen is dat ze een ruimtelijk homogeen beeld geven, zowel boven land als zee.

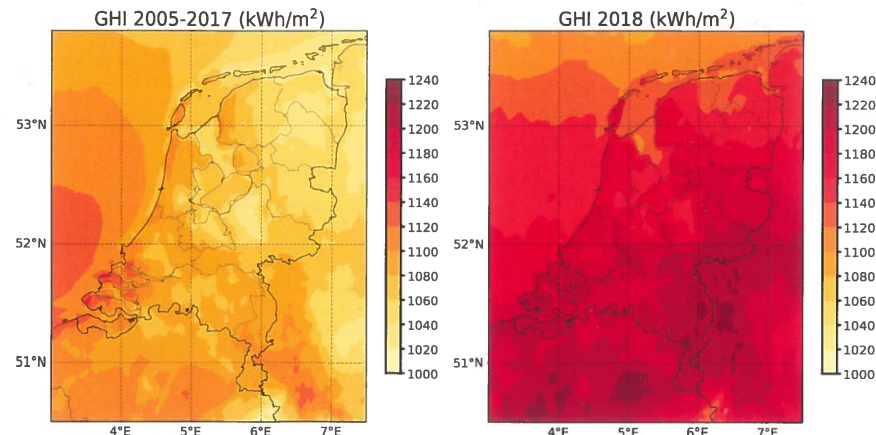
Zonnig 2018

De satellietwaarnemingen van GHI in Europa in 2018 zijn in Figuur 1 weergegeven als anomalie ten opzichte van de referentieperiode 2005-2017. Wat opvalt is dat het niet alleen in Nederland maar in heel Noordwest-Europa, inclusief Scandinavië, zeer zonnig was. In het Middellandse Zeegebied scheen de zon juist minder dan normaal. Deze verdeling hing samen met een hogedrukgebied dat zich een groot deel van het voorjaar en de zomer boven het continent bevond (Figuur 2). De bijbehorende, veelal oostelijke stroming leidde tot recordhoge temperaturen en grootschalige droogte in Noordwest-Europa.

De gemiddelde GHI in Nederland voor de referentieperiode en voor 2018 wordt in Figuur 3 getoond. Daaruit blijkt dat het hele land in 2018 meer zonnestraling ontving dan de normaal gesproken zonnigste provincie: Zeeland. De satellietwaarnemingen komen goed overeen met de volledig onafhankelijke metingen van het KNMI-metnet, met een bias van 1.7% voor de referentieperiode en 1.4% voor 2018 over de 30 stations. Bekijk de anomalie (Figuur 4), dan blijkt deze in Nederland maximaal rond de 14% te zijn geweest, namelijk in Twente en de Achterhoek. De anomalieën gemeten op de KNMI-stations, die ook in Figuur 4 zijn geplot, bevestigen het beeld van een aanzienlijk hogere instraling in 2018 dan gebruikelijk. Een directe vergelijking tussen de satelliet- en stationsmetingen in Figuur 5 laat een hoge correlatie van de anomalieën zien, waarbij de stationsmetingen zelfs een iets groter verschil in anomalie tussen het westen en (zuid)oosten van het land suggereren.

Kust versus landinwaarts

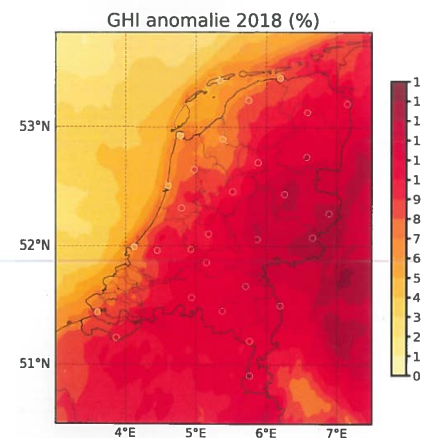
Behalve de hoeveelheid zonnestraling was echter ook de verdeling over het land afwijkend, zoals duidelijker te zien is in een west-oost dwarsdoorsnede door Nederland (Figuur 6). Normaal gesproken is het aan zee zonniger dan in het binnenland. Dit komt doordat in het voorjaar en in de zomer, wanneer de potentiële instraling het grootst is, de lucht in het binnenland snel kan opwarmen. Hierdoor ontstaan landinwaarts gemakkelijk stapelwolken. Aan de kust gebeurt dit minder



Figuur 3. Meteosat GHI in Nederland in 2005-2017 (links) en 2018 (rechts).

Station	GHI (kWh/m^2)		GHI (P2-P1)/P1 (%)
	1981-2010 (P1)	2005-2017 (P2)	
Eelde	977	1015	3.9
De Kooy	1065	1107	3.9
De Bilt	983	1028	4.6
Vlissingen	1073	1117	4.1
Maastricht	1020	1046	2.5

Tabel 1. Gemiddelde jaarlijkse GHI in kWh/m^2 voor de perioden 1981-2010 en 2005-2017 en het relatieve verschil daartussen voor de vijf stations in Nederland waar globale straling sinds 1981 wordt gemeten.

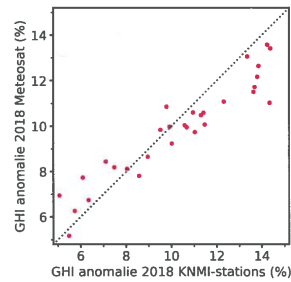


Figuur 4. Anomalie van GHI voor Nederland in 2018 ten opzichte van de referentieperiode 2005-2017 (zoom-in van Figuur 1). Behalve de Meteosat-waarnemingen zijn ook de anomalieën voor de KNMI-meteorologische stations geplot in witte cirkels en in dezelfde kleurschaal.

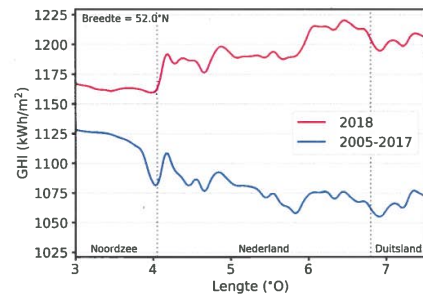
Kader 1 – Satellietmetingen

In 2002 lanceerde EUMETSAT het eerste exemplaar in een reeks van tweede-generatie Meteosat-satellieten (*Meteosat Second Generation* = MSG). Eind januari 2004 werd deze eerste MSG operationeel. Intussen bevinden zich al vier MSG's in een geostationaire baan, waarvan de 'prime' satelliet doorgaans rond de 0-gradenmeridiaan gepositioneerd is. Op de MSG's bevindt zich de *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI). Dit instrument meet elke 15 minuten gereflecteerd zonlicht en geïmitteerde thermische straling in 11 golflengtebanden met een ruimtelijke resolutie van 3×3 km² in het sub-satellietpunt en daarnaast nog in een breedbandige zichtbaarlichtband met 1×1 km² resolutie. Op het KNMI is een set algoritmes ontwikkeld (genaamd CPP, *Cloud Physical Properties*, Roebeling et al., 2006) om wolkeneigenschappen uit deze spectrale metingen af te leiden, met name bedekkingsgraad, wolcentrophoogte, fase (vloeibaar of ijs), optische dikte en effectieve deeltjesstraal. Naast de satellietmetingen worden hiervoor modelgegevens van onder andere waterdamp en datasets van oppervlaktealbedo gebruikt. In de *Climate Monitoring Satellite Application Facility* (CM SAF) wordt CPP verder ontwikkeld en gebruikt om consistente datareeksen af te leiden voor klimatologische toepassingen (Benas et al., 2017). Hierbij wordt veel aandacht besteed aan kalibratie van de satellietmetingen (Meirink et al., 2013). Op het KNMI wordt CPP bovendien toegepast op de actuele MSG-SEVIRI-metingen. Op basis van de CPP-wolkeneigenschappen en informatie over aerosolen uit de *Copernicus Atmosphere Monitoring Service* (CAMS) worden bovendien ook met breedbandige stralingstransportberekeningen de GHI en de directe en diffuse componenten daarvan bepaald. Dit specifieke algoritme heet *Surface Insolation under Clear and Cloudy skies derived from SEVIRI* (SICCS: Deneke et al., 2008; Greuell et al., 2013). Deze informatie is actueel beschikbaar op <http://msgcpp.knmi.nl>. Greuell et al. (2013) vonden op basis van vergelijkingen met hoge-kwaliteit grondmetingen van het *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) in Europa een bias in GHI tussen de 0 en 6% (mediaan 2%).

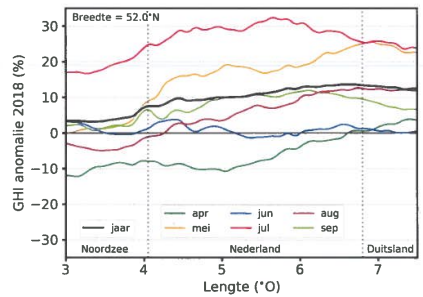
snel omdat de zee een koelende werking heeft. In 2018 bleven onder invloed van een stabiele, vaak oostelijke stroming de stapelwolken landinwaarts uit. De zonnestraling was daar dus hoog, zelfs iets hoger dan aan de kust, waar soms wolkenvelden van zee kwamen binnendrijven. Het is aannemelijk dat boven land de ernstige droogte heeft gezorgd voor een afname van verdamping, een verdere onderdrukking van wolkenvorming en daarmee een toename van instraling. De droogte was in het (zuid-)oosten van het land het hevigst (Sluijter et al.,



Figuur 5. Vergelijking tussen Meteoset-waarnemingen en metingen op de KNMI-stations van GHI-anomalieën in 2018.



Figuur 6. GHI voor 2005-2017 (blauw) en 2018 (rood) langs een west-oost dwarsdoorsnede door Nederland op 52°N.



Figuur 7. Anomalie van GHI van West- naar Oost-Nederland voor het gehele jaar 2018 en voor de zes maanden met de hoogste instraling afzonderlijk ten opzichte van 2005-2017.

2018), overeenkomstig met de hoogste waarden van GHI.

Vrijwel elke maand van 2018 was zonniger dan normaal. Juli springt eruit met een relatief zeer hoge instraling (Figuur 7), terwijl juni ongeveer normaal verliep. In mei valt het grote verschil tussen land en zee op: dit wordt vooral verklaard door een aantal dagen waarop boven zee hardnekkige mist bleef hangen, ook wel zeevlam genoemd. Een voorbeeld hiervan was 20 mei 2018, toen het langs een groot deel van de Nederlandse kust mistig bleef (Figuur 8). Om de aandacht te richten op de maanden met de meeste instraling zijn de herfst- en wintermaanden niet in Figuur 7 opgenomen. Daardoor is de relatief zonnigste maand hier niet zichtbaar, dat was namelijk februari met GHI-anomalieën tot wel 45-50%.

In de Figuren 3 en 6 valt op dat de GHI in 2018 vergelijkbare, ruimtelijk kleinschalige patronen heeft als de GHI in de referentieperiode. Een belangrijke verklaring hiervoor hangt samen met het oppervlaktealbedo. Zoals nader geanalyseerd in Kader 2 leiden variaties in het oppervlaktealbedo tot overeenkomstige variaties in de GHI door meervoudige reflectie tussen het oppervlak en de wolken.

Trends

In onze analyses is vanwege de beschikbaarheid van Meteoset-metingen een referentieperiode van 2005-2017 gehanteerd, terwijl de 'normaal' doorgaans als een 30-jarige periode wordt gedefinieerd, in dit geval 1981-2010. In Tabel 1 is voor de vijf KNMI-stations met voldoende lange meetreeksen het verschil in GHI tussen deze periodes weergegeven. Gemiddeld over de stations is GHI in de recente periode 3.8% hoger. Dit betekent dat de anomalieën ten opzichte van de gebruikelijke normaal nog hoger zouden uitvallen dan hier gerapporteerd.

Tijdreeksen voor de stations laten significante langjarige trends (sinds 1981) zien van 2.0 tot 2.9% per decennium (Figuur 10). Boers et al. (2017) tonen aan dat de toename in GHI voor een belangrijk deel kan worden toegeschreven aan een afname in de hoeveelheid aerosolen, een fenomeen dat bekend staat als *brightening* volgend op een periode van *dimming* eerder in de twintigste eeuw (Wild et al., 2005). Wolken spelen echter ook een rol, waarbij volgens Boers et al. (2017) een toename in de bedekkingsgraad meer dan gecompenseerd wordt door een verdunning van de bewolking, leidend tot een positieve trend in instraling. Terwijl aerosolen gelijkmatig veranderen, is de interjaarlijkse variatie in bewolking aanzienlijk en grotendeels verantwoordelijk voor de variatie in instraling (Figuur 10). Zo was 2018 dus een jaar met zeer weinig bewolking, waardoor voor alle stations behalve De Kooy de GHI in 2018 de hoogste waarde bereikte sinds 1981.



Figuur 8. Beeld van de Aqua-MODIS-satelliet op 20 mei 2018 om ongeveer 13:30 uur lokale tijd. Bron: NASA-Worldview.

Toekomst

De KNMI'14 klimaatscenario's voorzien slechts een kleine verandering in jaarlijkse GHI tot het eind van de eeuw (2071-2100), tussen de vier scenario's variërend van -0.9% tot

Kader 2 – Invloed van oppervlaktealbedo op GHI

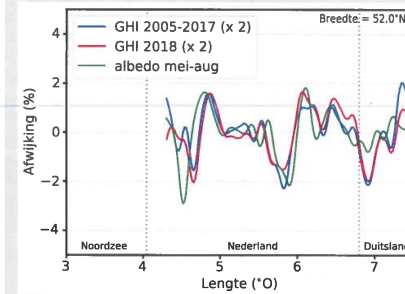
In de Figuren 3 en 6 is duidelijk te zien dat de globale straling in 2018 en het langjarige gemiddelde op kleine schaal veel overeenkomsten vertoont. Een belangrijke verklaring voor deze gezamenlijke variaties is het albedo van het onderliggende oppervlak, A_s . Hoe werkt dit? Straling die aan het oppervlak wordt weerkaatst, wordt door de wolken deels weer teruggekaatst volgens het albedo van de hemel, A_{sky} . Dit herhaalt zich in een oneindige reeks en leidt tot:

$$G = G_0 \left(1 + A_s A_{sky} + (A_s A_{sky})^2 + \dots \right) = \frac{G_0}{1 - A_s A_{sky}}$$

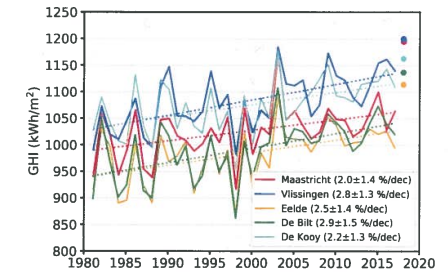
waarin G de GHI aanduidt en G_0 de GHI voor een zwart oppervlak. Voor een typische wolken-optische dikte van 8 geven stralingstransportberekeningen aan dat:

$$\frac{1}{G_0} \frac{\Delta G}{\Delta A_s} \approx A_{sky} \approx 0.5.$$

Met andere woorden: een verandering van 2% in A_s leidt tot een relatieve verandering van 1% in globale straling. Figuur 9 laat voor het landgedeelte van de dwarsdoorsnede van Figuur 6 de vergelijking tussen deze afwijkingen zien. Ze corresponderen inderdaad behoorlijk goed qua amplitude en de correlatiecoëfficiënt tussen A_s en GHI is respectievelijk 0.53 en 0.54 voor 2018 en de klimatologie. Los van deze werkelijke invloed van het oppervlaktealbedo op de globale straling, kunnen er ook systematische waarnemfouten ontstaan op het moment dat het albedo verkeerd wordt geschat. Dit is zichtbaar in Figuur 3 waar een waarschijnlijk te lage GHI boven ondiep water (kuststrook, IJsselmeer) verband houdt met een te lage schatting van het albedo. Ten slotte bestaan er reële effecten van het landoppervlak op bewolking en daarmee op GHI. Teuling et al. (2017) lieten zien dat boven twee grote bosgebieden in Frankrijk systematisch meer bewolking voorkomt dan in de omgeving. Dit geldt waarschijnlijk ook voor de Veluwe, terwijl bovendien de orografie nog aan de vorming van meer bewolking kan bijdragen.



Figuur 9. Relatieve afwijking van GHI voor 2018 en 2005-2017 (vermenigvuldigd met 2) en absolute afwijking van het oppervlaktealbedo van mei tot en met augustus ten opzichte van een lopend gemiddelde langs het deel van de 52°N doorsnede boven land.



Figuur 10. Jaarlijkse GHI voor vijf KNMI-meteorologische stations. De getrokken lijnen geven de tijdreeksen van 1981 tot en met 2017, de gestippelde lijnen de bijbehorende lineaire fits. De trends in % per decennium relatief ten opzichte van 1981 en de bijbehorende 95% betrouwbaarheidsintervallen zijn in de legenda weergegeven. GHI in 2018 is weergegeven door cirkels en is niet meegenomen in de fit.

+1.4%. In de zomer zijn de verwachte veranderingen groter: GHI neemt met name in de scenario's waarin de circulatie verandert toe met 5.5% (G_{sc} -scenario) en 9.5% (W_{sc} -scenario) omdat periodes met droogte en minder bewolking door de frequentere oostenwind daarin vaker voorkomen. Deze verwachte langetermijnveranderingen zijn echter nog behoorlijk onzeker en vergeleken met de waargenomen toename in de laatste decennia bovendien niet erg groot.

Een goede monitoring van GHI blijft ook de komende jaren mogelijk met de huidige Meteoset-satellieten. EUMETSAT is intussen al druk bezig met de derde generatie Meteoset (MTG), waarvan de eerste rond 2021 gelanceerd zal worden en waarop een instrument met meer spectrale kanalen en een hogere resolutie in ruimte en tijd geplaatst zal worden. De algoritmes om GHI te bepalen kunnen met deze extra informatie nog verder worden aangescherpt door wolken en aerosolen beter te kwantificeren.

Referenties

- Behas, N., Finkensleper, S., Stengel, M., van Zadelhoff, G.-J., Hanschmann, T., Hollmann, R., and Meirink, J. F., 2017: The MSG-SEVIRI-based cloud property data record CLAAS-2. Earth System Science Data, 9, 415-434, doi:10.5194/essd-9-415-2017.
- Boers, R., Brandsma, T., and Siebesma, A. P., 2017: Impact of aerosols and clouds on decadal trends in all-sky solar radiation over the Netherlands (1966-2015). Atmos. Chem. Phys., 17, 8081-8100, https://doi.org/10.5194/acp-17-8081-2017.
- Deneke, H. M., A. J. Feijt, and R. A. Roebling, 2008: Estimating surface solar irradiance from Meteoset SEVIRI-derived cloud properties. Remote Sens. Environ., 112, 3131-3141, doi:10.1016/j.rse.2008.03.012.
- Greuell, W., Meirink, J. F., and Wang, P., 2013: Retrieval and validation of global, direct, and diffuse irradiance derived from SEVIRI satellite observations. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118, 2340-2361, doi:10.1002/jgrd.10194.
- Meirink, J. F., Roebling, R. A., and Stammes, P., 2013: Inter-calibration of polar imager solar channels using SEVIRI. Atmos. Meas. Tech., 6, 2495-2508, doi:10.5194/amt-6-2495-2013.
- Roebling, R. A., A. J. Feijt, and P. Stammes, 2006: Cloud property retrievals for climate monitoring: Implications of differences between Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) on METEOSAT-8 and Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) on NOAA-17. J. Geophys. Res., 111, D20210, doi:10.1029/2005JD006990.
- Sluijter, R., Plegier, M., Van Oldenborgh, G. J., Beersma, J., and De Vries, H., 2018: De droogte van 2018: Een analyse op basis van het potentiële neerslagtekort. KNMI-rapport, 117162, 37pp.
- Teuling, A. J., Taylor, C. M., Meirink, J. F., Melsen, L. A., Miralles, D. G., van Heerwaarden, C. C., Vautard, R., Stegehuis, A. I., Nabuurs, G.-J., and de Arellano, J. V.-G., 2017: Observational evidence for cloud cover enhancement over western European forests. Nature Communications, 8, 14 065, doi:10.1038/ncomms14065.
- Wild, M., Gilgen, H., Roesch, A., Ohmura, A., Long, C. N., Dutton, E. G., Forgan, B., Kallis, A., Russak, V., and Tsvetkov, A., 2005: From dimming to brightening: decadal changes in solar radiation at Earth's surface. Science, 308, 847, https://doi.org/10.1126/science.1103215.