

Uitzonderlijk blauwe voorjaarsluchten in 2020

JAN FOKKE MEIRINK, WOUTER KNAR, PIET STAMMES (KNMI)

Blauwe luchten hebben in de loop van de geschiedenis velen gefascineerd en ook Minnaert schrijft er uitvoerig over in zijn werk. Het voorjaar van 2020 bood ruim baan voor deze fascinatie aangezien de lente in Nederland begon met een groot aantal zonnige dagen met helderblauwe luchten. De meteorologische omstandigheden onder de invloed van hoge luchtdruk (Figuur 1) waren hier primair verantwoordelijk voor. De maatregelen tegen de verspreiding van het coronavirus zorgden daarbij voor een geringere aanwezigheid van vliegtuigstrepen en minder luchtvervuiling, waardoor de luchten nog extra blauw konden worden. Maar hoe kun je een blauwe lucht eigenlijk kwantificeren en hoe bijzonder waren de blauwe luchten dit voorjaar? Om daar iets over te kunnen zeggen, definiëren we een maat voor de blauwheid van de lucht. Vervolgens worden de blauwe luchten van dit voorjaar op basis van waarnemingen van inkomende zonnestraling op de Ruisdael-meetlocatie te Cabauw, 20 km ten zuidwesten van het KNMI in De Bilt, in historisch perspectief geplaatst.

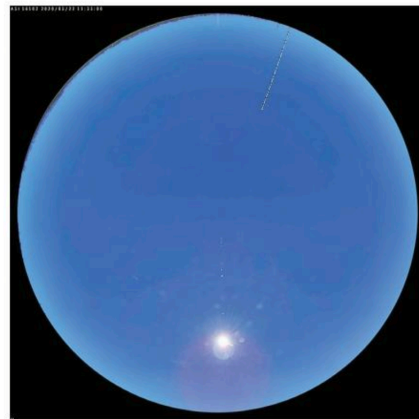
Simulaties van de kleur van de lucht

De kleur van de lucht kan eigenlijk het best worden uitgedrukt door middel van een foto. Zo toont Figuur 2 de blauwe hemel boven Cabauw op 22 maart 2020. Om de kleur kwantitatief te beschrijven maken we gebruik van simulaties van spectrale instraling (dus als functie van de golflengte λ) met het Doubling-Adding KNMI (DAK) model (Stammes, 2001). Dit model is door de jaren heen ingezet voor vele toepassingen en onder andere gebruikt om de zogenoemde sluiting van stralingscomponenten in Cabauw te evalueren (Wang et al., 2009). Figuur 3 laat spectra zien van in de atmosfeer verstrooid licht dat invalt op het oppervlak. In een atmosfeer zonder wolken, vocht en vervuiling wordt zonlicht alleen verstrooid aan luchtmoleculen, voornamelijk stikstof en zuurstof, die veel kleiner zijn dan de golflengtes van het zonlicht. De sterkte van deze Rayleighverstrooiing, genoemd naar de Nobelprijswinnaar (1904) Lord Rayleigh, is evenredig met λ^{-4} : het blauwe (en violet) licht, dat de kortste golflengte heeft, wordt dus veel sterker verstrooid dan de andere kleuren, waardoor een heldere lucht diepblauw kleurt. De berekende blauwe curve in Figuur 3 volgt inderdaad ongeveer het λ^{-4} -verband, waarbij kleine afwijkingen worden veroorzaakt door meer- en minderverstrooiing en absorptie door ozon, dat als enige sporengas significant effect heeft in dit golflengtegebied. De twee andere curven tonen simulaties met aerosolen, zoals die op 22 maart 2020 zijn waargenomen en in een normale situatie

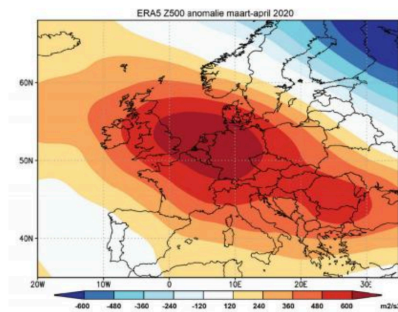
bij Cabauw voorkomen. Aerosolen hebben een vergelijkbare grootte als de golflengtes van het zonlicht en in dat geval vindt Mie-verstrooiing plaats, die veel minder sterk afhangt van de golflengte: λ^{-2} , met α de Ångström-exponent die varieert tussen 0.5 voor grote deeltjes en 2.0 voor kleine deeltjes. De totale verstrooiing neemt dus vrij gelijkmatig toe voor alle kleuren, zodat het contrast tussen blauw en andere kleuren sterk afneemt en de lucht minder blauw (bleker) wordt. Wolken, niet meegenomen in Figuur 3, bestaan uit nog grotere deeltjes. De verstrooiing daaraan hangt nauwelijks van de golflengte af en daarom zijn wolken over het algemeen wit.

Waarnemingen van breedbandige instraling

Spectrale waarnemingen van de inkomende straling op de grond zijn in Nederland niet beschikbaar, maar spectraal geïntegreerde, ofwel breedbandige stralingsmetingen worden wel gedaan. Het KNMI verricht sinds 2005 gedetailleerde en uiterst nauwkeurige waarnemingen in Cabauw in het kader van het wereldwijde Baseline Surface Radiation Network (BSRN, Knap, 2020; Driemel et al., 2018). De meetopstelling bevat een pyrheliometer voor direct, uit de richting van de zon, inkomende zonnestraling (Direct Normal Irradiance, DNI) en een beschaduwde pyranometer voor diffuse, ver-



Figuur 2. Opname van de sky imager in Cabauw op 22 maart 2020 om 11:33 UTC. Bovenin is de 213 meter hoge meetmast te zien.



Figuur 1. Anomalie van de 500-hPa geopotential in maart en april 2020 ten opzichte van de periode 1981 – 2010 op basis van de ERA5-heranalyse. Figuur gemaakt met de KNMI Climate Explorer (climexp.knmi.nl).

strooide, zonnestraling (Diffuse Horizontal Irradiance, DIF). Deze instrumenten zijn geplaatst op een nauwkeurige zonnevolger. De directe en diffuse component geven samen de globale straling (Global Horizontal Irradiance, GHI) volgens:

$$GHI = DNI \cos \theta_0 + DIF,$$

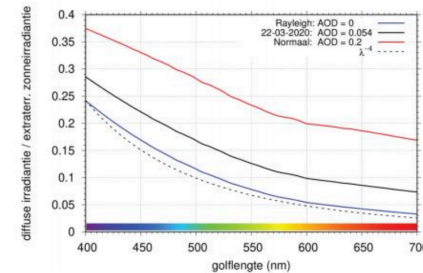
waarin θ_0 de zonne-zenithoek is. De stralingscomponenten worden uitgedrukt in $W m^{-2}$. Als voorbeeld zijn de stralingsmetingen in Cabauw op 22 maart 2020 in Figuur 4 weergegeven.

Verband tussen breedbandige instraling en blauwe lucht

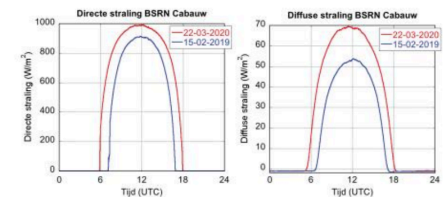
De componenten van de breedbandige instraling hangen, net als de kleur van de lucht, af van de samenstelling van de atmosfeer. Om deze afhankelijkheden in kaart te brengen, gebruiken we een database van de door DAK gesimuleerde GHI, DNI en DIF irradianties als functie van een aantal atmosferische parameters (Greuell et al., 2013), ontwikkeld voor het afleiden van zonnestraling aan de grond uit satellietmetingen (Meirink et al., 2019). Figuur 5 toont de verschillende stralingscomponenten, genormaliseerd op hun waarden voor een atmosfeer met alleen Rayleighverstrooiing (verder Rayleigh-atmosfeer genoemd), als functie van aerosoleigenschappen, waterdamp

en ozon. Voor een wolkenloze atmosfeer worden de sterkste effecten op de stralingscomponenten veroorzaakt door aerosolen. Een stijging van de aerosol optische dikte (AOD) leidt tot een afname in DNI en een sterke toename in DIF, zodat de verhouding DNI/DIF scherp afneemt (Figuur 5a), zie ook Gueymard (2019). De totale hoeveelheid inkomende straling (GHI) verandert relatief veel minder. Uiteraard hangt het effect van aerosolen af van het type deeltje. In Figuur 5b en 5c wordt apart gekeken naar twee belangrijke eigenschappen van aerosolen: het enkelvoudig verstrooiingsalbedo ω_0 , en de eerder genoemde Ångström-exponent α . Meer absorberende deeltjes (lagere ω_0) zorgen bij gelijkblijvende AOD voor een hogere DNI/DIF. Kleinere deeltjes (grotere α) geven ook een hogere DNI/DIF omdat bij grotere golflengtes minder licht wordt verstrooid. Atmosferische gassen zoals waterdamp en ozon absorberen zonlicht in specifieke delen van het spectrum, waardoor er ook minder licht overblijft om verstrooid te worden. De mate waarin DNI/DIF wordt beïnvloed hangt af van de spectrale signatuur van de absorptie en van de hoogte waarop de absorberende gassen zich bevinden. Netto leidt waterdamp (Figuur 5d) tot een afname van DNI/DIF terwijl ozon (Figuur 5e) tot een lichte toename leidt.

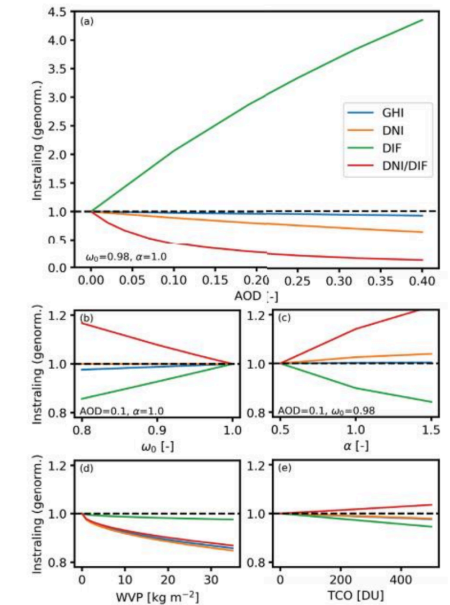
Zetten we de resultaten van Figuur 5 op een rij, dan blijkt



Figuur 3. Gesimuleerde spectra van diffuse inkomende zonnestraling gemiddeld over alle richtingen van de hemel en genormaliseerd met de inkomende straling aan de top van de atmosfeer. Drie gevallen worden getoond: atmosfeer zonder aerosolen (AOD = 0), atmosfeer van 22 maart 2020 in Cabauw (AOD = 0.054) en atmosfeer met een normale hoeveelheid aerosol in Cabauw in maart (AOD = 0.2). Ook de theoretische Rayleigh-afhankelijkheid (λ^{-4}) is afgebeeld. De simulaties zijn gedaan met het DAK-stralingsmodel voor een zonne-zenithoek van 55 graden en een ozonkolom van 410 DU (gemeten waarde van 22 maart 2020).



Figuur 4. Directe (links) en diffuse (rechts) instraling in Cabauw op 22 maart 2020 (rood) en 15 februari 2019 (blauw). Deze dagen hebben respectievelijk de hoogste blauwheidsindex in het voorjaar van 2020 en in de hele Cabauw-meetreeks vanaf 2005.



Figuur 5. Gevoeligheid van GHI, DNI, DIF en DNI/DIF voor (a) aerosol optische dikte, AOD, bij 500 nm, (b) enkelvoudig verstrooiingsalbedo, ω_0 , (c) Ångström-exponent, α , (d) hoeveelheid waterdamp, WVP en (e) hoeveelheid ozon, TCO (in Dobson Units, DU). De stralingscomponenten zijn genormaliseerd op de Rayleighatmosfeer, behalve in (b) en (c), waar genormaliseerd is op een atmosfeer met AOD = 0.1. In (a) – (c) zijn tevens de waarden van de niet-gevarieerde aerosoleigenschappen aangegeven. De simulaties zijn gedaan voor een zonne-zenithoek van 55 graden en de oppervlaktealbedo van grasland. Merk op dat de verticale as in (a) afwijkt van die in de andere panelen.

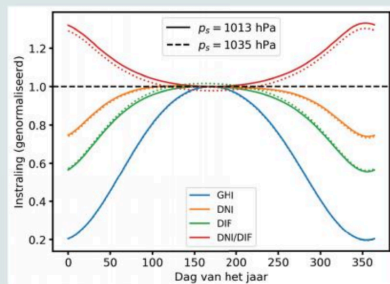
voor de effecten van aerosolen (Figuren 5a-c) steeds te gelden dat een hogere DNI/DIF samengaat met een blauwere hemel. Voor wolken, die niet in Figuur 5 zijn opgenomen, geldt dit des te meer. Al bij een klein beetje bewolking wordt het blauwe aanzien van de lucht verstoord; tegelijkertijd neemt de diffuse straling sterk toe, neemt DNI (als de wolken zich voor de zon bevinden) sterk af en wordt DNI/DIF dus laag. Voor de absorberende gassen waterdamp en ozon (Figuren 5d en 5e) is zo'n verband niet evident, maar daar staat tegenover dat hun effecten relatief klein zijn. Gegeven bovenstaande verbanden definiëren we hier de blauweindex B , een proxy voor de blauweheid van de lucht afgeleid uit metingen van DNI/DIF (Kader 1). Het is van belang hierbij nog twee opmerkingen te maken. Ten eerste heeft B een sterke relatie met de blauweheid van de hemel maar het is er geen directe meting van; B bevat ook subtiele effecten die niet een-op-een met de blauweheid corresponderen. Ten tweede is B een over de hemelbol gemiddelde grootheid, die dus geen uitdrukking geeft aan de blauweheid van delen van de hemel.

Kader 1 – Blauweindex

In een Rayleighatmosfeer hangt de straling aan de grond af van de stand van de zon en de hoeveelheid lucht (oppervlaktedruk, p). Deze aspecten worden geïllustreerd in Figuur 6. Het blijkt dat DNI/DIF in een Rayleighatmosfeer toeneemt als de zon lager aan de hemel staat en afneemt bij hogere oppervlaktedruk. We definiëren de blauweindex (B) als de verhouding van de gemeten DNI/DIF en de theoretische, gesimuleerde DNI_R/DIF_R voor een Rayleighatmosfeer, waarbij alle stralingscomponenten worden geïntegreerd over een te kiezen tijdvak ($t_0 < t < t_1$) op de dag:

$$B = \frac{\int DNI(t)dt / \int DIF(t)dt}{\int DNI_R(\theta_0(t), p_s(t))dt / \int DIF_R(\theta_0(t), p_s(t))dt}$$

Deze blauweindex kan in theorie waarden aannemen tussen 0 en 1 en kan worden uitgedrukt in %. Aangezien het doel is om naar blauwe dagen te kijken wordt het tijdvak zo groot mogelijk gekozen met als voorwaarde dat de zon ook op de kortste dag gedurende het hele tijdvak boven de horizon staat. Deze voorwaarde leidt ertoe dat we het tijdvak 8:00 – 15:00 UTC zullen beschouwen.



Figuur 6. Jaarlijkse gang van GHI, DNI, DIF en DNI/DIF over het tijdvak 8 – 15 UTC voor een Rayleighatmosfeer in Cabauw en voor twee verschillende waarden van de oppervlaktedruk. De stralingscomponenten zijn genormaliseerd op de waarden op 20 juni bij $p_s = 1013$ hPa.

De zeer blauwe luchten van 22 en 31 maart 2020

Voor de periode 2005 – 2020 kunnen we op basis van de Cabauwmetingen per dag de blauweindex bepalen en een top twintig van blauwe dagen samenstellen (Tabel 1). De maximale blauweindex voor deze periode blijkt bijna 79% te zijn, gemeten op 15 februari 2019. De op die dag gemeten instraling is eveneens weergegeven in Figuur 4. 22 en 31 maart 2020 komen op de respectievelijk achtste ($B = 71.0\%$) en dertiende ($B = 67.8\%$) plaats. Deze dagen van 2020 zijn dus zeker bijzonder, maar er zijn recentelijk nog 'blauwere' dagen voorgekomen. Opvallend is overigens dat de meeste dagen in deze top twintig in recente jaren zijn opgetreden; een interessant feit dat we nog nader willen onderzoeken.

Kijken we alleen naar de voorjaarsmaanden maart, april en mei dan blijkt 22 maart 2020 de ranglijst aan te voeren (Tabel 2). Bovendien staat 31 maart op de derde en 25 maart op de

Ranking	Datum	Blauweindex B [%]	DNI [$W m^{-2}$]	DIF [$W m^{-2}$]	DNI/DIF [-]
1	15/02/2019	78.8	843	48	17.6
2	04/12/2016	75.3	692	37	18.8
3	29/11/2016	75.1	700	38	18.4
4	17/08/2016	73.9	939	64	14.7
5	25/02/2018	72.9	887	56	15.8
6	25/02/2019	71.1	847	55	15.3
7	02/07/2018	71.1	955	69	13.8
8	22/03/2020	71.0	953	66	14.5
9	01/07/2018	69.0	950	71	13.4
10	05/10/2016	68.6	871	60	14.4
11	29/05/2009	68.5	944	72	13.1
12	24/08/2016	68.1	884	65	13.5
13	31/03/2020	67.8	948	70	13.6
14	09/02/2008	66.9	784	52	15.2
15	17/02/2008	65.0	815	57	14.3
16	28/11/2016	64.0	676	43	15.7
17	29/01/2006	62.5	745	51	14.7
18	10/10/2010	61.6	841	63	13.3
19	02/10/2015	61.6	869	67	13.0
20	02/02/2012	61.4	777	55	14.2

Tabel 1. Top twintig van de blauwste dagen in Cabauw sinds de start van de BSRN-metingen in 2005. Alle waarden zijn berekend over het tijdvak 8 – 15 UTC.

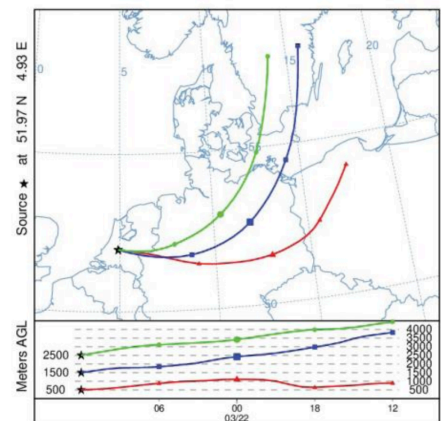
Ranking	Datum	Blauweindex B [%]	DNI [$W m^{-2}$]	DIF [$W m^{-2}$]	DNI/DIF [-]
1	22/03/2020	71.0	953	66	14.5
2	29/05/2009	68.5	944	72	13.1
3	31/03/2020	67.8	948	70	13.6
4	07/03/2011	61.0	865	67	12.9
5	06/05/2018	60.1	933	80	11.7
6	20/03/2014	60.0	879	70	12.6
7	15/05/2019	59.0	938	82	11.4
8	20/03/2018	58.5	907	75	12.1
9	25/03/2020	58.2	931	78	11.9
10	03/05/2011	56.7	943	85	11.1

Tabel 2. Top tien van de blauwste voorjaarsdagen (maart tot en met mei) in Cabauw sinds de start van de BSRN-metingen in 2005.

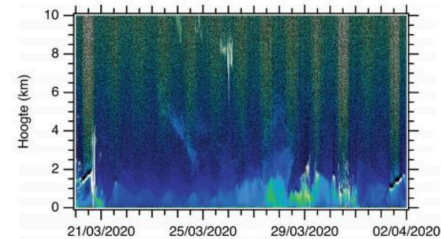
negende plaats. In totaal blijken er vijftien dagen van 2020 (5x maart, 7x april, 3x mei) in de voorjaars-topvijftig te staan.

Atmosfeer in het voorjaar van 2020

Maart en april 2020 kenden langdurige periodes met een persistent hogedrukgebied boven Nederland (Figuur 1). In de stabiele atmosfeer vormden zich nauwelijks wolken. Als gevolg van de coronacrisis was het vliegverkeer drastisch afgenomen en door de vaak droge bovenlucht lieten de sporadisch aanwezige vliegtuigen vrijwel geen condensstrepen achter. Ook natuurlijke cirrus was door de droge bovenlucht weinig aanwezig. De coronamaatregelen zorgden tevens voor minder uitstoot van luchtvervuiling, zoals bijvoorbeeld overtuigend is aangetoond voor NO_2 (Eskes et al., 2020). De lucht boven Nederland had vaak een noordelijke herkomst, met regelmatig ook een duidelijke oostelijke component (zie



Figuur 7. Terugwaartse trajectoriën op 22 maart 2020. De trajectoriën zijn gemaakt met het NOAA HYSPLIT model op basis van GDAS-data. Ze eindigen in Cabauw om 12 UTC en gaan 24 uur terug in de tijd. De kleuren komen overeen met drie verschillende hoogtes van het eindpunt: 500 m (rood), 1500 m (blauw) en 2500 m (groen).



Figuur 8. Aanwezigheid van aerosolen en wolken in de hoogte gemeten met een lidar-instrument in Cabauw van 20 maart tot 2 april 2020. De kleuren geven aan of er wolken zijn (wit) of aerosolen. De blauwe tinten betekenen weinig aerosol, terwijl groen, geel en bruin hogere concentraties aangeven. Op grotere hoogte (boven de 4 km) neemt de ruis in het lidarsignaal toe. Hierdoor zijn wolken, die een sterk signaal geven, op grotere hoogte wel goed zichtbaar, maar eventuele aerosolen minder.

Figuur 7 voor 22 maart), die normaal gesproken voor meer vervuiling zou zorgen maar nu schone lucht bracht. De AOD bij 500 nm was op 22 maart ongeveer 0.05. Dit is een zeer lage waarde voor Cabauw, waar de AOD gemiddeld in deze tijd van het jaar rond de 0.2 bedraagt, hoewel metingen aantonen dat dergelijke lage waarden in het verleden vaker zijn voorgekomen. Verticale profielen gemeten met een lidar (Figuur 8) tonen aan dat vanaf de namiddag van 21 maart tot en met 25 maart de atmosfeer erg schoon was, met lage concentraties aerosol (donkerblauwe kleuren). Op 24 maart is te zien dat er een pluim van stof over Cabauw trok op een hoogte tussen 2 en 4 km. Verder werd aan het eind van deze periode enige cirrusbewolking waargenomen. Na 25 maart nam de luchtvervuiling met een meer zuidelijke stroming sterk toe en op 27 maart liep de AOD zelfs op tot rond de 0.35. Op 31 maart volgde nogmaals een zeer heldere dag.

Conclusie

Op basis van de hier geïntroduceerde maat voor de blauweheid van de lucht mogen we concluderen dat, in vergelijking tot eerdere voorjaren, de maanden maart en april van 2020 zeer veel dagen met uitzonderlijk blauwe luchten kenden. De 'blauwste' dag in Cabauw was 22 maart, gevolgd door 31 maart. In de afgelopen 15 jaar is er echter nog een handvol dagen met blauwere luchten geweest, vooral buiten het voorjaar. Zulke blauwe luchten zijn mogelijk als de lucht uit schone regio's komt, wat in de praktijk betekent dat de aanvoer-richting een noordelijke component heeft. De afwezigheid van zowel vliegtuigstrepen als natuurlijke sluierbewolking, veroorzaakt door het persistente hogedrukgebied en geholpen door het verminderde vliegverkeer en de verlaagde hoeveelheid luchtvervuiling, hebben de ideale omstandigheden voor blauwe luchten gecreëerd. Het exacte aandeel van de coronamaatregelen hierin is met deze studie niet te bepalen maar is volop onderwerp van lopend onderzoek.

Dankwoord

We willen Henk de Bruin bedanken voor de stimulerende discussies en Arnoud Apituley voor het maken van Figuur 8.

Referenties

Driemel, A. en 36 co-auteurs, 2018: Baseline Surface Radiation Network (BSRN): structure and data description (1992-2017). Earth Syst. Sci. Data, 10, 1491-1501. doi:10.5194/essd-10-1491-2018.

Eskes, H., Veeffkind, P. en Levelt, P., 2020: Afnam luchtvervuiling boven Nederland, KNMI-Klimaatbericht 27-03-2020. <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/afname-luchtvervuiling-boven-nederland>.

Greuell, W., Meirink, J. F. en 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.50194.

Gueymard, C. A., 2019: Clear-sky radiation models and aerosol effects, in Polo, J., Martin-Pomares, L., Sanfilippo, A. (eds) Solar resources mapping, pp 137-182. Green Energy and Technology, Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-97484-2_5.

Knap, W. H., 2020: Basic measurements of radiation at station Cabauw (2020-05). Koninkrijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt, <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.921048>.

Meirink, J. F., de Vries, H., Knap, W. en Stammes, P., 2019: Globale straling meten met satellieten – terugblik op het zonnige jaar 2018, Meteorologica, 28, 12-15.

Stammes, P., 2001: Spectral radiance modelling in the UV-visible range, in IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation, edited by W. L. Smith and Y. M. Timofeyev, pp 385-388. A. Deepak, Hampton, Va.

Wang, P., W. H. Knap, P. Kuipers Munneke en P. Stammes, 2009: Clear-sky shortwave radiative closure for the Cabauw Baseline Surface Radiation Network site, Netherlands, J. Geophys. Res., 114, D14206. doi:10.1029/2009JD011978.