

RUIMTEWEER IN BELGIË

De Koninklijke Sterrenwacht van België (KSB) bestaat uit vier operationele directies waaronder ook het departement Zonnewetenschappen en Ruimtetweer. Deze directie staat internationaal beter bekend als het Sunspot Indices Data Analysis Center (SIDC) en omvat een Regional Warning Centre (RWC) dat sinds 2000 het ruimtetweer opvolgt en voorspelt. Dit artikel gaat in op de opmerkelijke ontstaansgeschiedenis en de huidige taken van de Belgische ruimtetweerdienst SIDC/RWC Belgium [1].

Wat is ruimtetweer?

Ruimtetweer behelst de zonneactiviteit en de impact ervan op biologische en technologische systemen op aarde en haar omgeving. Het wordt bepaald door vier hoofdrolspelers: zonnevlammen, coronale massa-ejecties, protonstormen en hogesnelheidsstromen uit coronale gaten.

Zonnevlammen worden in röntgenstraling gemeten door de GOES-satellieten (Geostationary Operational Environmental Satellites). Ze worden naar sterkte opgedeeld in verschillende klassen, waarbij elke klasse tienmaal sterker is dan de voorgaande: de C-klasse (common, gewoon), de M-klasse (medium) en de X-klasse (eXtreem) [2]. Zonnevlammen kunnen de hoogfrequente radiocommunicatie grondig verstoren en de soms optredende radioruis kan ook nog de goede werking van radarsystemen en de communicatie met satellieten in de war sturen.

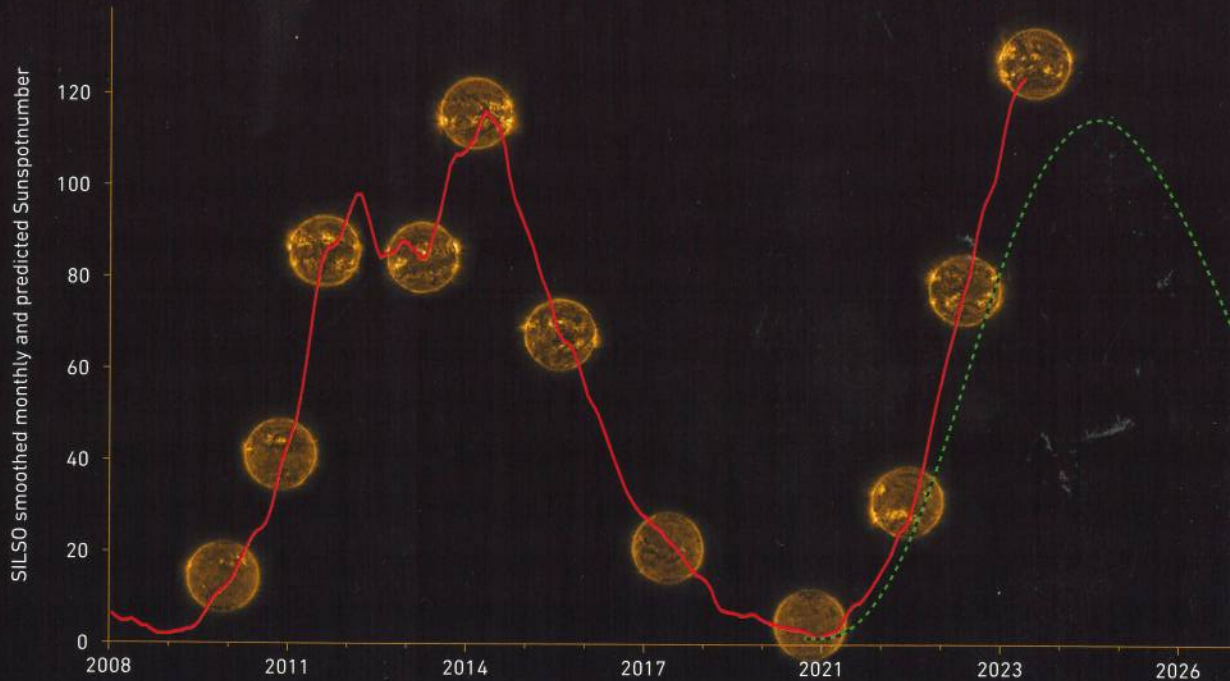
Coronale massa-ejecties (CME's) kunnen, als ze naar de aarde gericht zijn, de afstand tot de aarde overbruggen in twee tot vier dagen. Bij aankomst

verstoren ze dan het magnetisch veld van de aarde. Sterke verstoringen worden geomagnetische stormen genoemd en worden meestal gekenmerkt door een spectaculair poollicht. Minder onschuldig zijn de storingen die ze kunnen teweegbrengen in elektriciteitsnetwerken en communicatiesystemen. Satellieten – zoals Skylab destijds – kunnen meer wrijving ondervinden met de buitenste aardatmosfeer, waardoor hun hoogte daalt. Bovendien neemt de kans op elektrostatische ontladingen toe, waardoor hun computers en andere boordinstrumenten schade kunnen ondervinden. De ionosfeer, een laag van geladen deeltjes in de bovenatmosfeer van de aarde, kan grondig verstoord worden, waardoor satellietsignalen van gps of Galileo (GNSS: *global navigation satellite systems*) verzwakken of niet langer meer ontvangen kunnen worden. Uitzonderlijk kunnen zonne-explosies ook gepaard gaan met de uitstoot van protonen met zeer hoge energieën die de aarde al in een half uur tot enkele uren kunnen bereiken. Protonstormen

kunnen satellieten beschadigen en de hoogfrequente radiocommunicatie aan de polen verhinderen. Ze vormen een stralingsbedreiging voor astronauten, evenals voor de bemanning en passagiers van vliegtuigen die over de poolstreken vliegen. Astronauten van het Internationaal Ruimtestation (ISS) mogen dan geen ruimtewandelingen meer uitvoeren en moeten schuilen in de best beschermde delen van het ruimtestation. Vliegtuigen boven de polen moeten lager vliegen of worden omgeleid, wat meer brandstof kost. De hogesnelheidsstromen (HSS) van deeltjes uit coronale gaten hebben grotendeels dezelfde effecten als CME's, alleen minder intens. Ze kunnen de energie van elektronen in het magnetisch veld van de aarde naar veel hogere energieën opdrijven dan normaal (de zogenaamde *killer electrons*) die op hun beurt een grote bedreiging vormen voor satellieten.

Sunspot Index Data Center

De zonnevlekkenactiviteit werd al sinds 1863 bijgehouden door de



Figuur 1. Rood: tijdsevolutie van het afgegladde maandelijkse zonnevlekkengetal (SILSO) voor de vorige (SC24) en de huidige zonnecyclus (SC25). Groen: voorspelling uit 2020. Opnamen in extreem ultraviolet door de SWAP-camera van de PROBA2-satelliet. Tijdens een cyclusmaximum zijn er meer actieve gebieden (heldere vlekken) en complexere coronale structuren.

Zwitserse Federale Sterrenwacht van de Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich. Die sterrenwacht was opgericht door Rudolf Wolf (1816-1893), die het illustere Zürich Relatieve Zonnevlekkengetal R_z (het Wolfgetal) had ingevoerd om de zonneactiviteit te meten, en dit teruggaand tot 1749. Figuur 1 toont het recente verloop van het zonnevlekkengetal. Toen de vierde directeur Waldmeier met pensioen ging, zag de ETH Zürich de kans schoon om het onderzoek naar 'meer originele' projecten te leiden en de Federale Sterrenwacht op te heffen. Dat zou meteen het einde betekenen voor de bepaling van het zonnevlekkengetal als fundamentele parameter voor de zonneactiviteit.

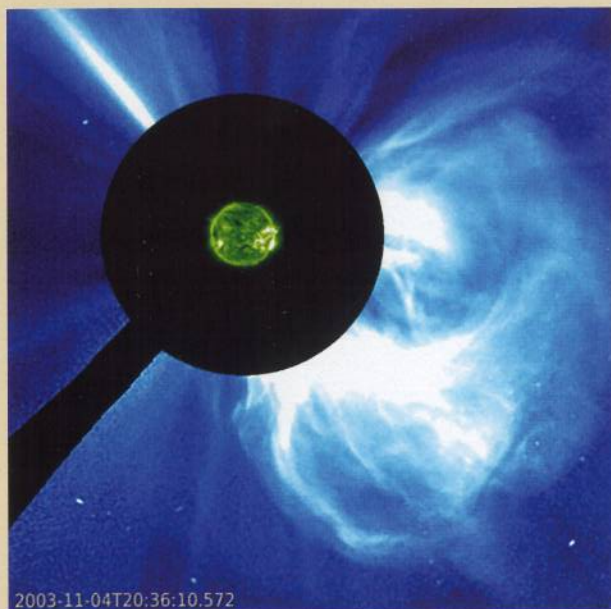
De eerste reden voor de opheffing was dat de sterrenwacht in de stad lag en de waarnemingen steeds meer hinder ondervonden van de slechte *seeing* (turbulentie). Waldmeier had wel al twee andere waarnemingsstations opgericht in landelijker contreien, namelijk in Arosa en Locarno. De belangrijkste

reden was evenwel dat er een alternatief bestond voor het zonnevlekkengetal: in Ottawa (Canada) werden al drie decennia lang metingen verricht van de 10,7 cm radioflux (2800 MHz). Arthur Covington had in de jaren 1950 aangetoond dat deze radioflux in hoge mate vergelijkbaar was met het R_z . De reacties van de internationale gemeenschap waren echter niet min. In 1978 had het Committee on Space Research (COSPAR) al per resolutie bij de betrokken Zwitserse instanties erop aangedrongen om deze langetermijnwaarnemingen van het RZ verder te zetten. De International Union of Radio Sciences (URSI) liet duidelijk verstaan dat, aangezien de radioflux pas beschikbaar was sinds 1947, er enkel van het zonnevlekkengetal voldoende gegevens waren om statistische studies van de zonnecyclus toe te laten. Met de snel evoluerende technologie en de daaraan verbonden kwetsbaarheden voor stormachtig ruimteweer, was het duidelijk dat niemand zat te wachten op een nieuw Skylab-doemscenario. De Eidgenössische Sternwarte zocht

daarom een opvolger voor de productie van R_z en de bijhorende taken. Snel viel de keuze op de Koninklijke Sterrenwacht van België (KSB), een betrouwbare leverancier van zonnevlekken data voor R_z [3]. Een nieuwe structuur, het Sunspot Index Data Center (SIDC), begon per januari 1981 met de productie van het internationale zonnevlekkengetal (R_i) en de bepaling en verspreiding van de dagelijkse, maandelijkse en jaarlijkse zonnevlekkengetallen. Aangezien R_i gebaseerd was op een internationaal netwerk van zonnewaarnemers, werd voor coherentie met R_z besloten om Locarno te behouden als referentiestation. De overgang van het World Data Center (WDC) voor het zonnevlekkengetal van de Eidgenössische Sternwarte naar het SIDC in Brussel werd bekrachtigd door de International Astronomical Union (IAU).

SIDC bis in Brussel

Toen de Belgische zonneonderzoeker André Koeckelenbergh in 1994



Figuur 2. Een krachtige zonnevlam (4 november 2003, EIT 195) met bijbehorende CME (LASCO/C3) waargenomen in respectievelijk extreem ultraviolet en met een coronograaf door de SOHO-satelliet. De zonnevlam is de heldere vlek aan de rechterrand van de zon, de CME is de bloemkoolachtige structuur rechts. Deze was grotendeels van de aarde weg gericht en veroorzaakte slechts een matige geomagnetische storm op 6 november. Compilatie: JHelioViewer (KSB).



Figuur 3. Dashboards ontwikkeld voor en door ruimteweervoorzegers van het Regional Warning Center, RWC Belgium.

bij het KSB met pensioen ging, werd Pierre Cugnon hoofd van de afdeling Zonnestructuur en tevens directeur van het SIDC. Cugnon was sinds 1968 bij de afdeling en vanaf de oprichting betrokken bij het SIDC. In het begin van de jaren 1990 speelde hij een sleutelrol in de Belgische deelname aan de Extreme-ultraviolet Imaging Telescope (EIT) aan boord van de ESA/NASA-missie SOHO, het Solar and Heliospheric Observatory, gelanceerd op 2 december 1995.

De beelden van EIT van zonne-uitbarstingen bleken al snel complementair te zijn aan de beelden van de SOHO-coronagrafen (LASCO), die reusachtige coronale massa-ejecties (CME's) lieten zien (figuur 2). Door combinatie van de waarnemingen kon bepaald worden of een CME naar de aarde toe gericht was of niet. Dankzij de betrokkenheid van de KSB bij de EIT-telescoop, die uiteindelijk een uitstekende ruimteweermontor bleek te zijn, kon het SIDC in de jaren daarna uitgroeien van het World Data Center

voor de zonnevlekkenindex tot een volledig operationeel ruimteweercentrum. Tevens vormde dit de basis voor de ontwikkeling van nieuwe zonnetelescopen, zoals SWAP voor de PROBA2-missie van de European Space Agency (ESA), en de Extreme-Ultraviolet Imager (EUI) van de Solar Orbiter, waarmee het SIDC een expertise verwierf in dit domein.

RWC voor West-Europa

De International Space Environment Service (ISES) is sinds 1962 de belangrijkste organisatie voor de coördinatie van ruimteweerdiensten [4]. Ze beheert daartoe een netwerk van 22 Regionale Waarschuwingscentra (Regional Warning Centers, RWC's) en zorgt voor een uniforme onderlinge gegevensuitwisseling. Een RWC volgt en voorspelt het ruimteweer en informeert eindgebruikers over de fluctuerende helio- en geofysische toestand. In 2000 verleende ISES het SIDC de status van RWC voor West-Europa (later RWC Belgium gedoopt), omdat het

Observatorium van Parijs (Meudon) dat de taken sinds 1965 vervuld had, personeel miste voor voortzetting. Het SIDC nam de taken over en ontwikkelde daartoe een webgebaseerd interactief systeem (PREVIWEB), waarmee de RWC-dienst 24/7 kon worden uitgevoerd. De naam werd gewijzigd in Solar Influences Data analysis Center, waarbij het acroniem behouden bleef [5]. Hierdoor kwam het World Data Center (WDC) voor het zonnevlekkengetal wel steeds meer in de schaduw te staan van de ruimteweerdiensten en andere activiteiten binnen het departement Zonnestructuur van de KSB. Eind 2013 kwam het WDC met een eigen website onder de nieuwe naam van Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO) [6]. Het baande hiermee meteen ook de weg voor een grote herziening van het zonnevlekkengetal, die in 2015 zou volgen.

Data en modellen

Om de zonneactiviteit op te volgen beschikt het SIDC over zijn eigen

zonnematelliet PROBA2, de zonnetele-scopen van het SILSO, en de radio-telescopen van Humain (figuur 5). De site van Dourbes (Koninklijk Meteorologisch Instituut, KMI) volgt met magnetometers de lokale storingen van het geomagnetisch veld op (de 'K-BEL-index') [7]. De wetenschappers beschikken ook over instrumenten om de lokale toestand van de ionosfeer te meten, evenals neutronenmonitors voor de opvolging van het aantal hoogenergetische deeltjes afkomstig van protonstormen en kosmische straling.

Voor de ionosfeer en ionosferische storingen wordt er ook nauw samengewerkt met de afdeling GNSS (global navigation satellite systems) van het departement Referentie Systemen en Planetologie van de KSB [8]. Het Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie (BIRA) heeft modellen en waarschuwingsberichten ontwikkeld in geval van protonstormen. Uiteraard maakt het SIDC ook gebruik van bestaande gegevensbronnen (zoals GOES) en modellen zoals voor de zonnewind (EUHFORIA, ontwikkeld met de KU Leuven). Data en modellen zijn terug te vinden op de respectievelijke websites, of werden geïntegreerd op het ruimteweerportaal van ESA [9] of op dat van de SIDC-ruimteweervoorspellers.

RWC Belgium ruimteweerberichten

Het RWC Belgium verstuurt dagelijks om 12:30 UTC een ruimteweerbericht, een zogenoemd URSIgram, een samentrekking van URSI (International Union of Radio Sciences) en telegram. Vroeger waren dat alleen cijfers en verwachtingen voor 24 tot 72 uur, maar nu komen deze berichten ook met een uitgebreide uitleg. Het team ruimteweervoorspellers bestaat uit een tiental wetenschappers die elkaar om de week aflossen en een weekbulletin publiceren.

Als een snellere reactie dan dagelijks nodig is – bijvoorbeeld bij minstens een M5-zonnevlam of een wijde CME gesignaleerd door LASCO op SOHO – wordt er een automatisch bericht verstuurd. Bij een CME richting aarde stuurt de

voorspeller een CME arrival alert met aankomsttijd en intensiteit. Een PRESTO alert volgt op een X-klasse zonnenvlam, schok in de zonnewind, geomagnetische storm, protonstorm of gedeeltelijke of volledige halo-CME. Maar een All Quiet alert, vooral in het minimum van een zonnecyclus, betekent juist dat er geen grote zonnenvlammen, geomagnetische stormen of protonstormen verwacht worden voor de volgende 48 uur. Satellietoperatoren vroegen om dit type alert, om veilig bepaalde operaties met satellieten uit te voeren.

Met ESA werd de laatste jaren een communicatieplan uitgewerkt voor extreme events, zoals een X10-zonnevlam of sterker. Voor dit soort events onderhoudt het RWC Belgium trouwens ook contact met het Nationaal

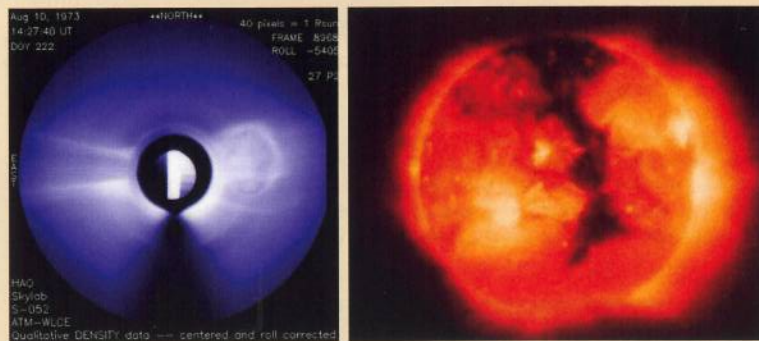
Crisiscentrum van België (NCCN). De laatste tien jaar ondersteunde het RWC Belgium regelmatig ESA-missies, bijvoorbeeld de Rosetta-missie met de landing van Philae op de komeet 67P/Churyumov-Gerasimenko in 2014. Actueel wordt dit soort ruimteweerberichten verstuurd voor BepiColombo naar Mercurius en voor Mars-missies. ESA's coördinatiecentrum voor ruimteweer (SSCC) binnen de KSB zorgt voor een consistente communicatie over deze missies.

Burgerluchtvaart

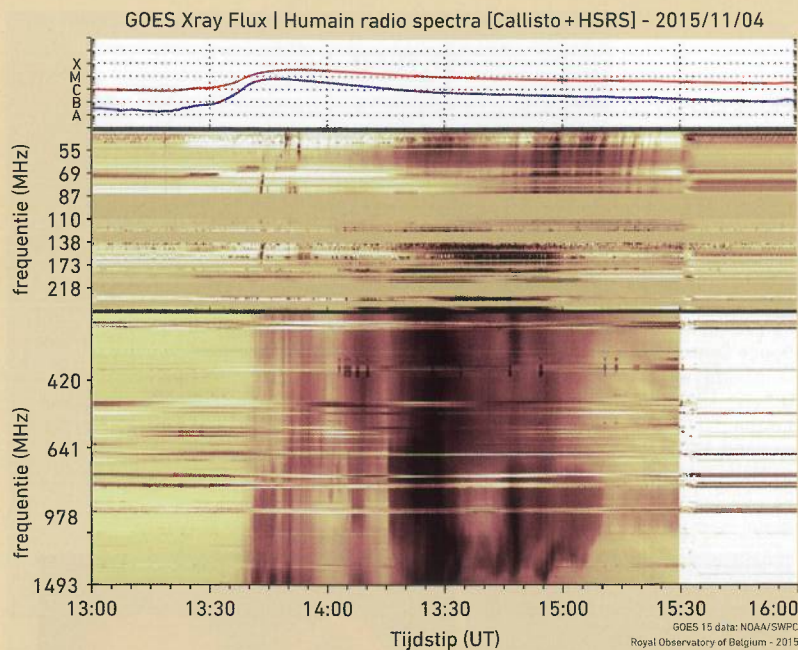
Het SIDC/RWC Belgium levert verder een belangrijke bijdrage aan de veiligheid van de internationale burgerluchtvaart (International Civil Aviation Organization, ICAO). De

SKYLAB

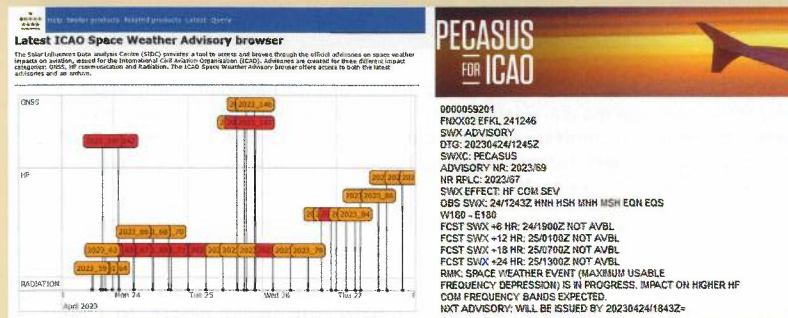
Skylab was het eerste Amerikaanse operationele ruimtestation, gelanceerd op 14 mei 1973. Drie ploegen astronauten deden baanbrekend onderzoek naar de zonnecorona en coronale massa-ejecties, en ontdekten de coronale gaten. Maar een jaar na de lancering besloot NASA om de missie te stoppen en Skylab gecontroleerd te laten opbranden in de aardatmosfeer of in een hogere 'kerkhofbaan' te brengen waar het geen risico meer kon vormen voor andere satellieten. Ruimteweervoorspellers van NASA dachten dat ze daarvoor nog meerdere jaren de tijd hadden. Maar de opkomende zonnevlekkencyclus (Solar Cycle 21, 1976 - 1986) en zijn remmende invloed op de baan van Skylab bleek veel sterker dan ze verwacht hadden. Daarom deactiveerden ingenieurs van het Johnson Space Center op 11 juli 1979 de gyroscopen van Skylab. Daardoor ging het langzaam tuimelen en desintegreerde het enkele uren later boven de Indische Oceaan. Het ruimtestation brandde echter niet helemaal op en enkele brokstukken kwamen terecht in het zuidwesten van Australië. Gelukkig raakte niemand hierbij gewond. Na dit debacle liet NASA de voorspelling van de zonnecyclus over aan de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), de Amerikaanse overheidsdienst voor oceanografie en meteorologie.



Figuur 4. NASA's Skylab onderzocht de zonnecorona (de hete buitenatmosfeer van de zon) en coronale massa-ejecties (CME's, magnetische wolken van elektrisch geladen deeltjes) en ontdekte coronale gaten. Links: lampvormige CME in wit licht rechts van het midden. Rechts: langgerekt coronaal gat (zwart) in röntgenstraling op 1 juni 1973. Bron: Skylab, NASA.



Figuur 5. Een zware storing op radiofrequenties werd geregistreerd op 4 november 2015 met de radiotelescopieën in Humain, Zuid-België. Bovenaan: het verloop van de gelijktijdige zonnevlam in röntgenstraling waargenomen met een GOES-satelliet. De radioruus van de M3-zonnevlam verstoortte de radar boven Zweden en het luchtruim werd er meer dan een uur gesloten. Bron: NOAA/GOES en SIDC/Humain.



Figuur 6. De zwaarste geomagnetische storm van de huidige zonnecyclus tot dusver vond plaats op 23 en 24 april 2023. Tussen 23 tot 28 april schreven de SIDC ruimteweervoorspellers veertig berichten voor de burgerluchtvaart ICAO. Deze betroffen mogelijk matige (oranje) en zware (rood) verstoringen van GNSS (global navigation satellite systems) toepassingen en vooral radiocommunicatie (HF: high frequency). Rechts: voorbeeld van een bericht (advisory) door een PECASUS-operator op 24 april.

ICAO-ruimteweerdienst startte op 7 november 2019. Zij wordt bij toerbeurt verzorgd door PECASUS [10], het Space Weather Prediction Center van NOAA, het consortium van Australië, Canada, Frankrijk en Japan en het China-Rusland-consortium. PECASUS is het Pan European Consortium for Aviation Space Weather User Services van ICAO-lidstaten, inclusief België en

Nederland, onder leiding van het Finse Meteorologische Instituut FMI [11]. Bij overschrijding van alarmdrempels in drie mogelijke domeinen – radio-communicatie (HF: 3-30 MHz), zware protonstormen en ionosferische verstoringen (GNSS) – wordt een bericht verspreid, zie figuur 6. Binnen PECASUS is het RWC Belgium verantwoordelijk voor het schrijven van

deze berichten, met behulp van een eigen dashboard (figuur 3). Er wordt intens samengewerkt met de Meteo Wing van de Belgische Defensie, vooral voor de paraatheid 's nachts. Het Belgische Solar-Terrestrial Centre of Excellence (STCE) verzorgt opleidingen en coördineert de ruimteweertactiviteiten van de drie instituten KSB, KMI en BIRA [12]. De huidige zonnecyclus lijkt iets sterker te worden dan oorspronkelijk verwacht door het internationaal team van experts dat door NOAA was samengeroepen en waar ook het SILSO deel van uitmaakte. Het maximum lijkt ook iets eerder te zullen plaatsvinden, vermoedelijk eind 2024. Het SIDC/RWC Belgium zal zich de komende jaren alvast niet vervelen!

Jan Janssens behaalde zijn master in de vliegtuigmechanica aan de Industriële Hogeschool Brussel. Hij neemt de zon al veertig jaar waar en schreef in 2003 het boek *Zon en Aarde: een unieke relatie over zonnewaarnemingen en ruimteweer*. Sinds 2012 is hij wetenschappelijk medewerker bij de Koninklijke Sterrenwacht van België waar hij de *public outreach* en ruimteweerdiensten ondersteunt. jan.janssens@oma.be

REFERENTIES

- 1 D. Berghmans et al., *History of the Sunspot Index: 25 years SIDC*, *Beiträge zur Geschichte der Geophysik und Kosmischen Physik* 7, 288 (2006). www.sidc.be/SILSO/IMAGES/about/Berghmansetal2006.pdf.
- 2 Barbara B. Poppe en Kristen P. Jorden, *Sentinels of the Sun: Forecasting Space Weather*, Bower House, Denver, Colorado (2006).
- 3 J. O. Stenflo, *Transition of the Sunspot Number from Zurich to Brussels in 1980: A Personal Perspective*. *Sunspot Number Recalibration, Solar Physics* 291, 2487-2492, doi: 10.1007/s11207-015-0837-2 (2016).
- 4 International Space Environment Service (ISES), www.spaceweather.org.
- 5 Solar Indices Data Analysis Center (SIDC), www.sidc.be.
- 6 Sunspot Index and Long-term Solar Observations (SILSO), www.sidc.be/SILSO/home.
- 7 Geomagnetisme en Ionosfeer (Dourbes, KMI), http://ionosphere.meteo.be/geomagnetism/K_BEL.
- 8 GNSS (Global Navigation Satellite Systems), <https://gnss.be/SpaceWeather>.
- 9 ESA's ruimteweerportaal, <https://swe.ssa.esa.int/current-space-weather>.
- 10 Pan European Consortium for Aviation Space Weather User Services (PECASUS), <https://pecasus.eu>.
- 11 Kirsti Kauristie et al., *Space Weather Services for Civil Aviation - Challenges and Solutions*, *Remote Sens.* 13, 3685, doi: 10.3390/rs13183685 (2021).
- 12 Solar-Terrestrial Centre of Excellence (STCE), www.stce.be.