

# SPACE WEATHER

## RUIMTEWEER, WAT IS DAT NU WEER?

Drs. ing. Sander van den Groenendaal,  
junior onderzoeker

Nieuwjaarsdag 2023 was al meteen een dag met een nieuw warmterecord, een aangename 16 graden Celsius. Zo hebben wij Nederlanders al op dag een van 2023 'lekker weertje hè' kunnen zeggen. Ook de 'weersomstandigheden' buiten de aardse atmosfeer, ook wel *Space Weather* (SPWX) genoemd, waren rustig en zacht (zie figuur 1). Eind februari was het aardse weer misschien minder qua temperatuur, maar wel zonnige dagen en heldere nachten. Er was echter wel een geomagnetische storm gaande op 26 en 27 februari. Dus over welk weer gaat zo'n 'lekker weertje hè' dan, over het aardse weer of het ruimteweer? Dit artikel gaat over dat *space weather*, naar aanleiding van mijn onderzoek dat gaat over de effecten van *space weather* op de systemen (communicatie, radar, GPS, etc.) van defensie. →

CORONAL MASS EJECTIONS

SOLAR ENERGY

COSMIC RAYS

SINGLE EVENT UPSET

ASTRONAUT RADIATION

RADIATION DAMAGE

ENERGETIC RADIATION BELT PARTICLES

SIGNAL SCINTILLATION

NAVIGATION ERRORS

ENHANCED IONOSPHERIC CURRENTS AND DISTURBANCES

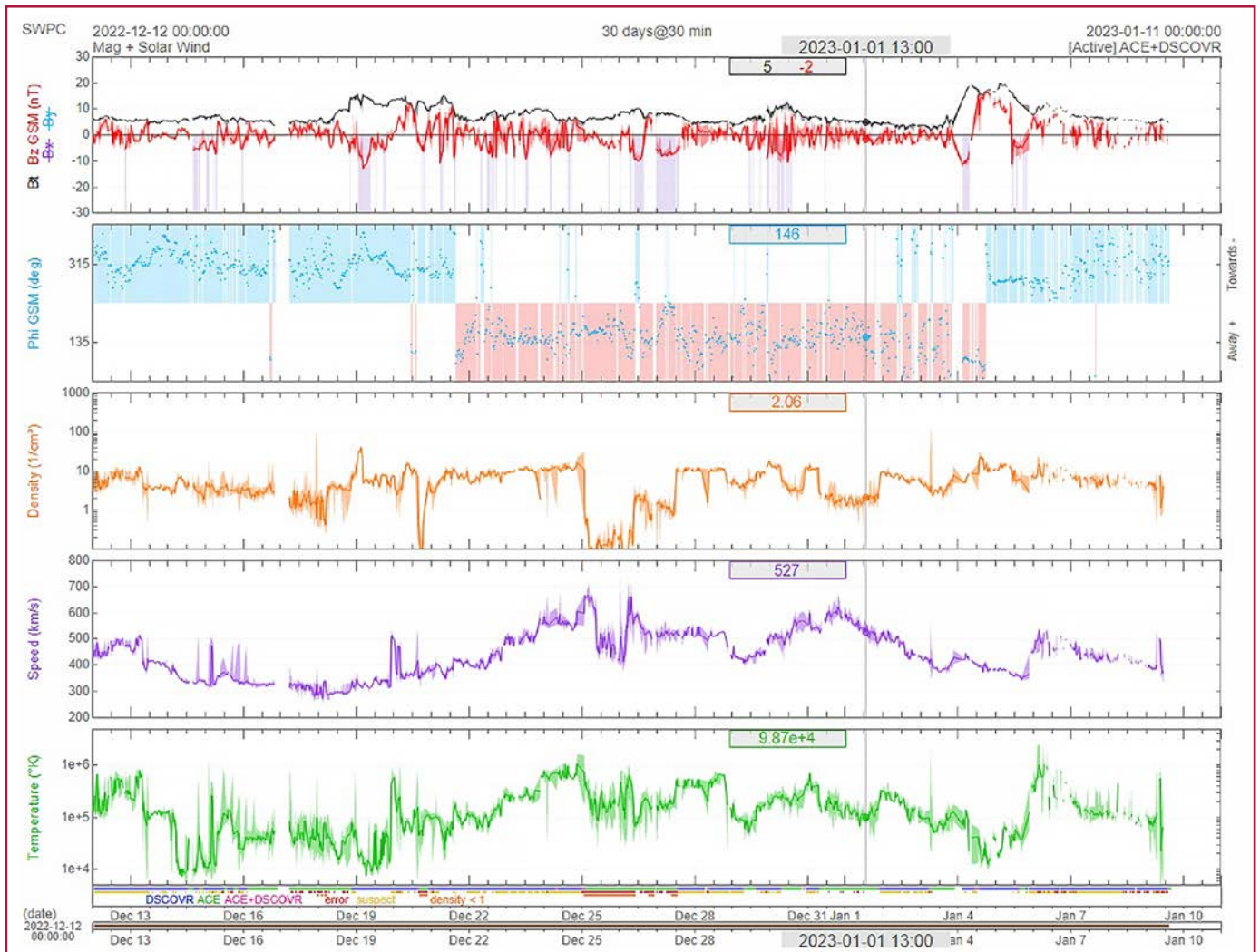
HF RADIO WAVE DISTURBANCE

AURORA AND OTHER ATMOSPHERIC EFFECTS

GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENTS IN POWER SYSTEMS

DECREASED DIRECTIONAL DRILLING ACCURACY

INDUCED GEOELECTRIC FIELD AND CURRENT



Figuur1: Zonnewindoverzicht van 12 dec 2022 t/m 10 jan 2023, met de verticale lijn op 1 dec 2023 13:00 (NOAA)

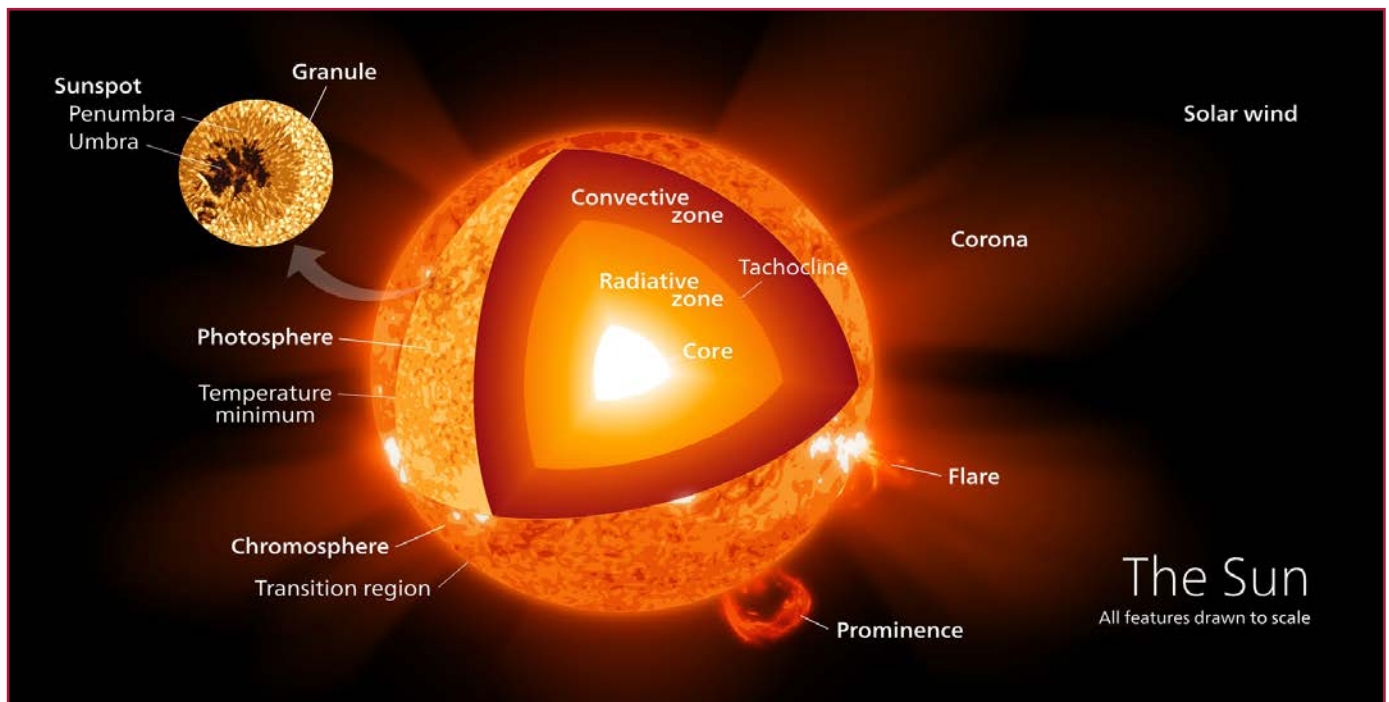
In Intercom 49-3 heeft maj Otten van het DSSC al het bewustzijn van Space aangehaald, het vijfde domein waar NATO in opereert, waarbij de zes Space Capabilities benoemd werden die behoren tot het Space Domain; Satellietcommunicatie (SatCom), Position Navigation & Timing (PNT), Meteorological and Oceanographic (METOC), Space Domain Awareness (SDA), Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (ISR) en Shared Early Warning (SEW). Bij de toelichting van METOC werd al vermeld dat het aardse weer hier invloed op heeft, maar dus ook het ruimteweer. Zo zou bij de commandovoering en bevelsuitgifte al rekening moeten worden gehouden met ruimteweer. Extreem ruimteweer kan niet alleen voor een verbindingsspoek zorgen, maar kan ook de communicatiemogelijkheden van defensie zwaar verstoren en zelfs platleggen, net als twee andere capabilities, SatCom en PNT. Ook Dr. Brentjens van ASTRON, senior onderzoeker die mijn onderzoek begeleidt, had het in Intercom 50-1<sup>1</sup> over de effecten van Solar Radio Bursts (SRBs), die behoren tot SPWX. Maar wat is SPWX dan? Waar komt het vandaan en wat doet het? Hoe kan het invloed hebben op het optreden van de verbindingdienst en op het communicatievermogen van defensie? Hoe kan het radar-systemen en andere elektronica beïnvloeden? Hoe kan defensie hier mee omgaan?

### Historie

In het verleden heeft SPWX namelijk al voor de nodige effecten gezorgd, zoals een bijna nucleaire oorlog tussen de VS en Sovjet Unie in 1967<sup>1</sup>, een helikopter in Mali die aan de grond bleef en 'defecte' communicatiemiddelen in Mali.

- Op 23 Mei 1967, tijdens de Koude Oorlog, werden drie Ballistic Missile Early Warning System (BMEWS) radars verstoord. Dit werd door de VS gezien als directe aanval door de Sovjet Unie, zodat hun vliegtuigen ongezien de VS zouden kunnen bereiken. De Amerikaanse luchtmacht had als reactie alle nucleaire strategische bommenwerpers gereedstaan om op te stijgen als vergeldingsaanval. Een meteoroloog van de NORAD die zich bezig hield met zonneactiviteit kon op tijd de lancering stoppen door te vertellen dat het niet de Sovjets waren die de radars verstoorden, maar een zonnevlam.
- Op 4 november 2015 dacht een Nederlandse helikopterpiloot in Mali meerdere malen door de toren aangeroepen te worden, terwijl de toren hem helemaal niet aanriep. Na enkele keren te zijn opgeroepen vertrouwde de piloot het niet, jamming of storing of wat dan ook, waardoor een vliegmissie niet door kon gaan en er dus geen luchtsteun aanwezig was. Achteraf bleek dat ook een SRB te zijn geweest. Deze had toeval-





Figuur 2: Schematische weergave van de zon met benamingen (Kelvinsong)

lig dezelfde frequentie als de helikopter en toren, waardoor de helikopter 'aangeropen' werd.

- Tijdens een missie voor de commando's leken de communicatiemiddelen defect en was er tijdens de missie ineens geen communicatie mogelijk. Hierdoor werd de missie afgeblazen en zijn alle spullen terug naar Dongen gestuurd ter reparatie. Eenmaal in Dongen aangekomen bleek alles wel gewoon te werken en werd alles weer terug naar Mali gestuurd. Ook daar bleek achteraf SPWX de oorzaak te zijn geweest.

Voor alle drie de gebeurtenissen geldt wel dat zodra het SPWX-effect afnam, de normale werking weer terugkwam.

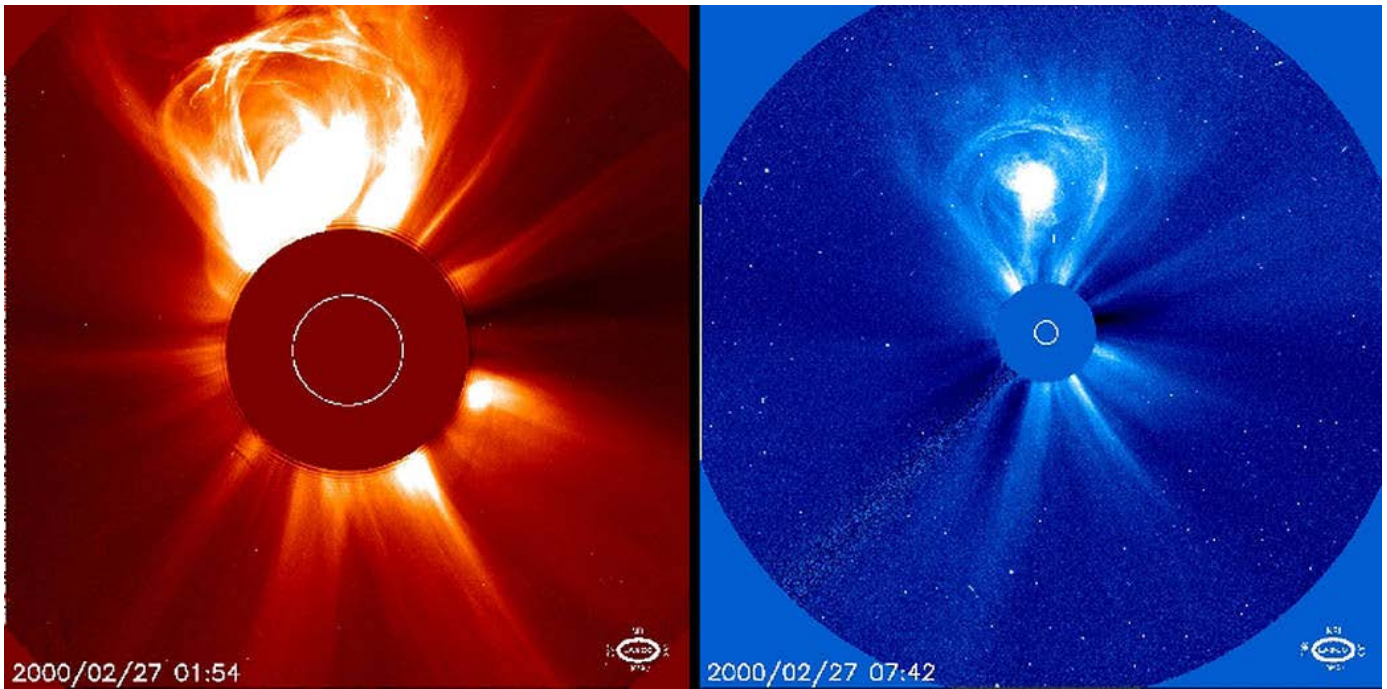
### Space Weather

Om SPWX volledig te begrijpen is kennis nodig van sterrenkunde, plasmawetenschap en magnetisme. In plaats van hier diep op de natuurkunde in te gaan, volgt er een globale samenvatting. Het is goed om te weten dat SPWX eigenlijk te omschrijven is als 'de invloed van de zon en de zonneactiviteit op ons en onze technologie' en er dus naar de zon moet worden gekeken (zie figuur 2).

De zon is een grote bol 'gas' (voornamelijk waterstofplasma) wat in de kern van de zon door middel van kernfusie wordt omgezet naar helium (600 miljoen ton waterstof per seconde!). Hierbij komt er energie vrij die voor warmte (core, 15,7 miljoen °C) en licht zorgt. Deze warmte en licht verplaatsten zich via de stralingszone (radiative zone, 2 miljoen °C) naar de convectieve zone om in de fotosfeer (photosphere, ~4000-5800 °C) zichtbaar te worden. De zon brandt dus ook niet, hij 'gloeit'. De fotosfeer wordt ook wel het 'oppervlakte' genoemd, en aan het oppervlakte verliest de zon constant wat van z'n massa. Dit 'gas' is een soort van uitlaatgas (corona, ~ 1 miljoen °C), dat nog zichtbaar

gloeit. De dichtheid van het gas neemt daarna dusdanig af dat het niet meer zichtbaar gloeit. Het beweegt ook met hoge snelheden (gemiddeld 450 km/s, op 1 januari 527 km/s, zie figuur 1, paarse lijn) steeds verder van de zon af. Dit snelle gas wordt zonnewind genoemd (solar wind, ~ 1 miljoen °C). Het magnetisch veld van de aarde wordt dus continue blootgesteld aan zonnewind (zie figuur 5) en het bereik van deze zonnewind reikt helemaal tot aan de rand van ons zonnestelsel.

Doordat de energie vanuit de kern naar het 'oppervlakte' van de zon moet gaan, zorgt het ervoor dat in de convectiezone convectie plaats begint te vinden in het gas (vandaar de naam). Deze convectie van heet gas opwaarts en ietsjes minder heet gas neerwaarts zorgt ervoor dat er magnetische velden ontstaan. Deze magneetvelden kunnen ook tot buiten het oppervlakte van de zon komen en gas aantrekken (*filament of prominence*, figuur 2). Deze velden kunnen dan zichtbaar worden waar ze door het oppervlakte komen, als zonnevlekken (*sunspots*, zie figuur 2). Het lijkt dan alsof de zon bij zo'n donkere vlek helemaal niet heet is, maar ook zo'n zonnevlek is nog steeds een paar duizend graden. Het is alleen minder heet dan het omliggende gas, waardoor het minder straalt, en daarom dus donkerder lijkt. Zo'n zonnevlek is echter wel de bron van SPWX. Bij deze zonnevlekken kunnen de magneetvelden ver boven het oppervlakte uitkomen en daar recombineren (connectie maken met een ander magneetveld). Na een recombina-tie kan het gas aan het oppervlakte in korte tijd flink in temperatuur toenemen en gaat het harder gloeien, een zonnevlam (*flare*, figuur 2). Het magneetveld dat losgekoppeld is boven het oppervlak, met het bijbehorende gas dat zich in dat magneetveld bevond, wordt met hoge snelheid afgestoten (*Coronal Mass Ejection*, CME) bij een recombina-tie (zie figuur 3).



Figuur 3: CME van 27 feb 2000 om 01:54 (links) en zes uur later (rechts). De witte cirkel in het midden bij beide is waar de zon zou zitten, deze is uitgevlakt om de corona (en CME's) zichtbaar te krijgen. De CME, het magnetisch veld met gas dat is afgestoten door een recombinitie, is zichtbaar groot en zich van de zon af aan het verplaatsen. (SOHO ESA&NASA)

Door deze recombinitie wordt er ook elektrische energie overgedragen aan protonen (chemische deeltjes) in de atmosfeer van de zon, die tot ongeveer 50 miljoen km/uur worden versneld (~5% van de lichtsnelheid), een protonenstorm genoemd.

Dit zijn de drie hoofdaspecten van SPWX: 1) zonnevlammen, 2) protonenstromen en 3) CME's. Het is te vergelijken met de ontploffing van een bom: de explosie is zichtbaar (zonnevlam), waarna er een schokgolf komt (protonenstorm), gevolgd door een stofwolk (CME).

Als er een zonnevlam plaatsvindt, dan weten we dat pas acht minuten later, aangezien het licht er zo lang over doet om vanaf de zon de aarde te bereiken. Er is voor een zonnevlam dus ook geen waarschuwingstijd, zodra een zonnevlam gedetecteerd wordt op aarde, ondervinden we de gevolgen al. Als de zonnevlam gepaard gaat met een naar de aarde gerichte protonenstorm en CME, dan zal de protonenstorm minuten tot uren later de aarde bereiken, terwijl de CME 17 tot 90 uur na de zonnevlam de aarde pas bereikt.

De waarschuwingstijd per event, hoe lang een event kan duren en wat de primaire gevolgen zijn, zijn weergegeven in tabel 1.

### Gevolgen Space Weather

In tabel 1 zijn de primaire gevolgen van SPWX al weergegeven per event. Een zonnevlam is een felle lichtflits, voornamelijk goed zichtbaar in het röntgen- en UV-spectrum. Een zonnevlam zendt daarnaast over het hele elektromagnetisch (EM) spectrum. De röntgenstraling die door de aardse atmosfeer wordt geabsorbeerd in de ionosfeer, kan er voor zorgen dat HF-communicatie verstoord wordt, of geheel niet meer mogelijk is (*radio blackout*). Dit doordat de D-laag en F-laag in de ionosfeer dikker worden dan normaal, want deze lagen absorberen de röntgenstraling waardoor er meer ionen ontstaan. Door deze absorptie kunnen er ook plasmabubbels in de atmosfeer ontstaan. Deze bubbels kunnen het signaal van grondgebonden schotels naar satellieten verbuigen (en vice versa), waardoor het signaal verloren gaat (*Loss of Lock*). Dit is te vergelijken met het afbuigen van licht in water (zie figuur 4).

Tabel 1: overzicht SPWX en primaire gevolgen

Wat	Tijd voor impact	Waarschuwingstijd	Tijdsduur	Primair gevolg
Zonnevlam ( <i>radio blackout</i> )	~ 8 minuten	geen	minuten tot uren	HF-uitval GNSS-uitval radar-interferentie
Protonenstorm ( <i>Solar Proton event</i> )	minuten tot dagen	0,5 tot meerdere uren	uren tot dagen	mogelijk satellietuitval HF-uitval poolgebieden hogere stralingsdosis tijdens vliegen
Geomagnetische storm ( <i>Coronal Mass Ejection</i> )	17 tot 90 uur	17 tot 90 uur	1 tot 2 dagen	Verlies of interferentie satelliet en radio verlies of interferentie PNT elektriciteitsnet schade



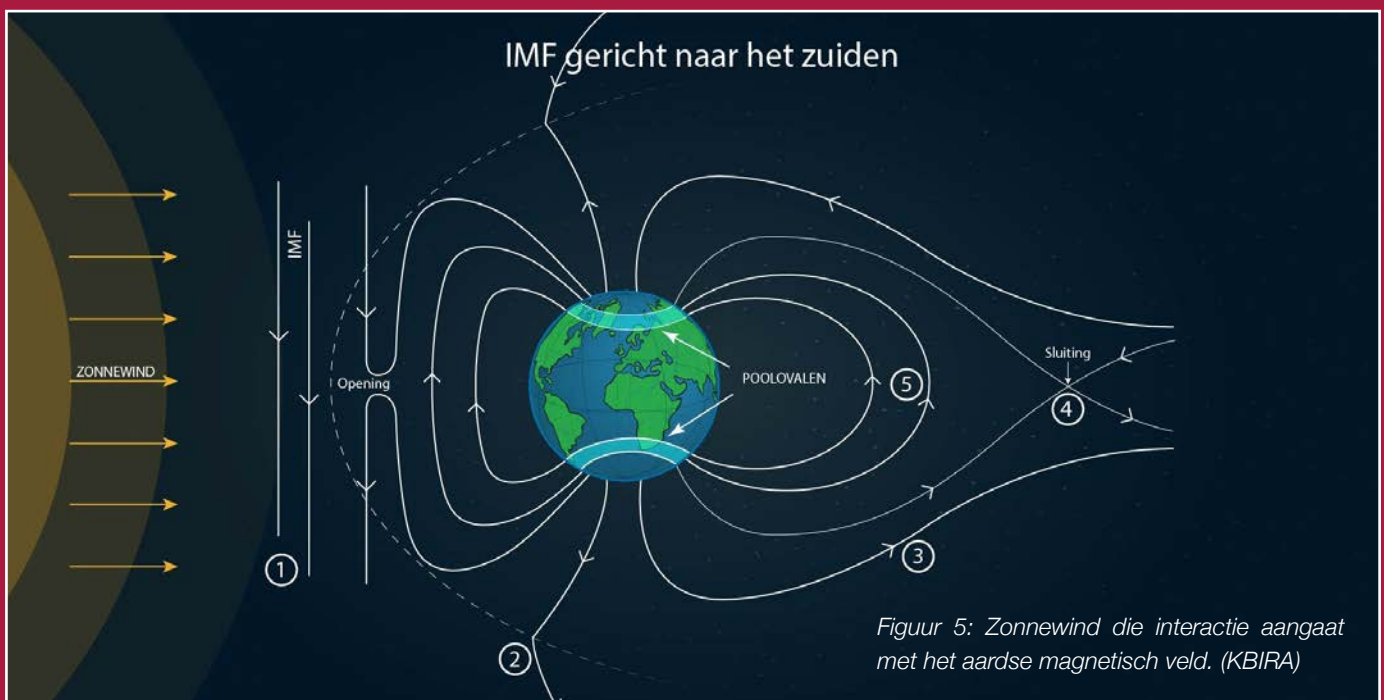
Figuur 4: refractie van licht in water.

Zo kan op deze manier ook een eventuele ballistische raket vals gevolgd worden, waarbij de raket niet precies op de locatie is als waar deze gezien wordt door grondgebonden traceersystemen. Ook kan zo'n zonnevlam SRBs veroorzaken, zoals vermeld in Intercom 50-1. Deze SRBs kunnen signalen overstemmen (*Sig-*

*nal-to-noise ratio*), waardoor het signaal verloren gaat. Ze kunnen ook valse positieve signalen geven bij radarsystemen. Doordat een SRB dezelfde frequentie kan hebben als radar, kan een radar dit weergeven als vliegtuig(en), terwijl er helemaal geen vliegtuigen zijn, ook wel *ghostplanes* genoemd, zoals in Zweden in 2015<sup>2</sup>. Gevolgen van een zonnevlam vinden wel alleen plaats op de 'dagzijde' van de aarde.

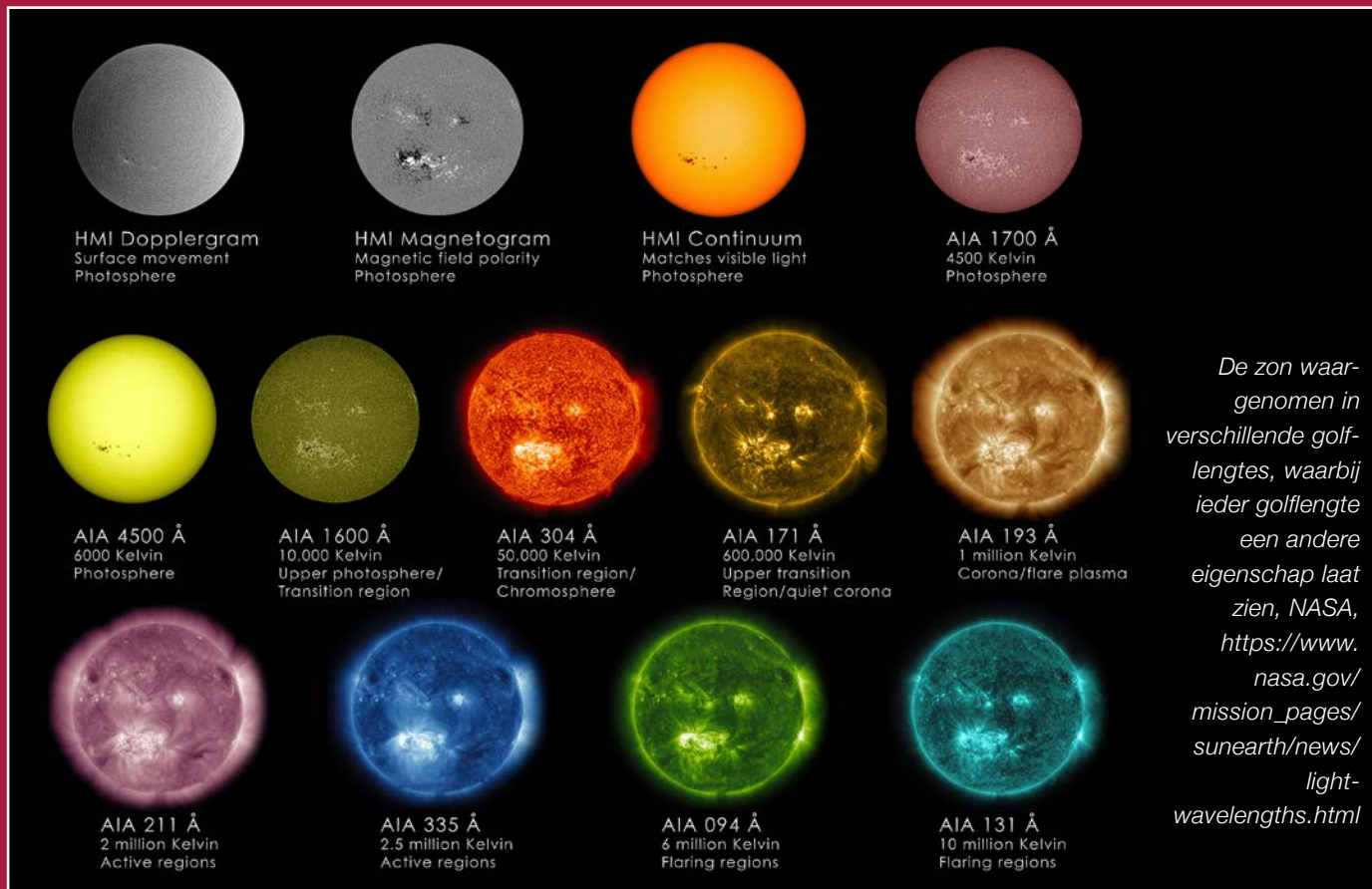
Een protonenstorm heeft voornamelijk impact rond de hogere breedtegraden, maar hoe heftiger een protonenstorm, hoe verder deze naar de evenaar gevolgen kan hebben. De protonen van een protonenstorm volgen namelijk de magneetvelden van de aarde, die in de polen de aarde bereiken. Voor satellieten rondom de aarde kunnen de protonen uit zo'n storm ook voor schade zorgen, doordat bijvoorbeeld een enkele proton botst met een atoom van een printplaat/transistor/semiconductor/etc. Hierdoor kan deze verkeerde signalen doorgeven, een *Single Event Error* (SEE) genoemd, of dusdanig beïnvloed worden dat het apparaat niet werkt (*Single Event Burnout*, SEB). Ook de zonnepanelen op de satellieten verliezen opbrengst door protonenstormen.

De aarde wordt continu blootgesteld aan zonnewind die de magneetlijnen van de zon volgen, ook wel het Interstellair Magnetisch Veld (IMF) genoemd. Een CME, die zelf nog een magnetisch veld met zich meebrengt, kan interactie aangaan met het aardse magnetisch veld. Hierdoor kunnen er veranderingen in het aardse veld ontstaan, een geomagnetische storm. Een voorwaarde hiervoor is wel dat de magnetische velden een tegenovergestelde polariteit hebben. Het aardse veld is naar het noorden gericht, dus als een CME met een zuidwaarts polair veld komt, kunnen de magneetvelden reconnecteren (1, figuur 5). Na zo'n reconnectie slaat een magneetlijn om (2, figuur 5) naar de 'achterkant' van de aarde om daar weer te sluiten (4, figuur 5), waarbij er



Figuur 5: Zonnewind die interactie aangaat met het aardse magnetisch veld. (KBIRA)





De zon waargenomen in verschillende golflengtes, waarbij ieder golflengte een andere eigenschap laat zien, NASA, [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/news/light-wavelengths.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/light-wavelengths.html)

plasma naar de aarde schiet. Dit is zichtbaar als poollicht. Hoe heftiger zo'n CME, hoe verder het plasma komt, en het poollicht verder naar de evenaar zichtbaar is. Eind februari 2023 was er een 'sterke' geomagnetische storm en was er in Noord-Nederland noorderlicht zichtbaar<sup>3</sup>. Bij een heftige geomagnetische storm kan er ook elektriciteit worden opgewekt door inductie, zoals in 1989 in Canada gebeurde. Daarbij waren er transformatoren doorgebrand waardoor een deel van Quebec zonder stroom kwam te zitten.

Een CME kan ook nog voor vertraging zorgen bij satellieten, waardoor deze meer brandstof moeten verbruiken om in hun baan te blijven, wat de levensduur van satellieten kan verkorten.

### Zonnecyclus

De activiteit van de zon is goed waar te nemen en we weten ook wanneer deze heftiger wordt. De zon heeft namelijk ook een cyclus, die ongeveer elf jaar duurt. Tijdens deze cyclus neemt de activiteit steeds verder toe totdat hij maximaal actief is, *solar maximum* genoemd, en zwakt weer af tot de rustige basistoestand, *solar minimum* genoemd. Met de genoemde voorbeelden in dit artikel (1967, 1989, 2000), is die cyclus redelijk constant. Het komende verwachte *solar maximum* van de huidige cyclus, wordt in 2025 verwacht. Dat wil niet zeggen dat er buiten het *solar maximum* geen SPWX effecten kunnen plaatsvinden, zoals in 2015. Ook tijdens *solar minimum* kan er een heftige zonnevlam plaatsvinden, de kans is alleen groter dat dat tijdens een *solar*

*maximum* gebeurt. Het aantal zonnevlekken en de frequentie van zonnevlammen zijn namelijk significant hoger tijdens een *solar maximum*. Een zware geomagnetische storm zoals eind februari 2023 vindt gemiddeld 200 keer per cyclus plaats, dus we kunnen er nog wel meer verwachten.

### Onderzoek

Nu weten we wat SPWX is, wat het veroorzaakt en wat de globale primaire gevolgen zijn van SPWX. Maar er zijn nog vele vragen. Bijvoorbeeld hoe worden de communicatiemiddelen specifiek van defensie beïnvloed? En 'kans op HF-verstoring', wat betekent dat voor frequentiemangers? Of hoe kan een verbindelaar omgaan met de gevolgen van SPWX? Kunnen we de gevolgen voorspellen? Hoe kan SPWX meegenomen worden in de bevelvoering en wie gaan daar mee te maken krijgen? Dat is waar mijn onderzoek bij het Kenniscentrum C2OstCo & CEMA (land) over gaat. De voornemens zijn dan ook om de resultaten van dit onderzoek te publiceren in Intercom.

### Eindnoten

- 1: Verblind door de (radio) zon, Intercom 50-1 <http://vovklicl.nl/intercom/2021/1/49.pdf>
- 2: Solar storm knocks out flight control systems in Sweden, <https://phys.org/news/2015-11-sweden-solar-flare-flight.html>
- 3: KNMI Het noorderlicht, <https://www.knmi.nl/over-het-knmi-nieuws/noorderlicht-in-nederland>