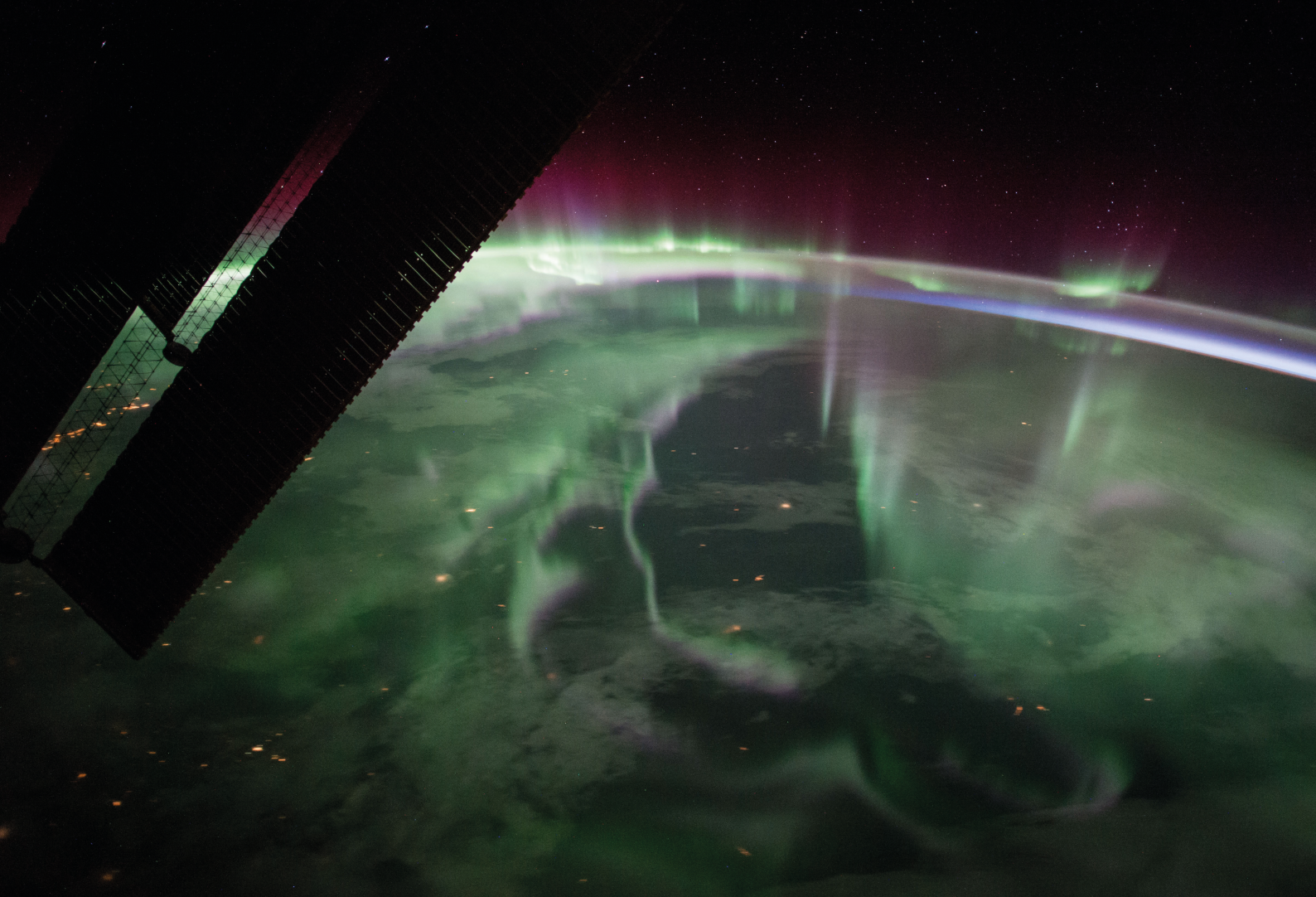




Rymdväder för en militär rymdlägesbild

Andreas Johlander och
Seméli Papadogiannakis

Andreas Johlander och Seméli
Papadogiannakis

Rymdväder för en militär rymdlägesbild

Titel	Rymdväder för en militär rymdlägesbild
Title	Space weather for space domain awareness
Rapportnummer	FOI-R--5652--SE
Månad	Oktober
Utgivningsår	2024
Antal sidor	41
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare	Försvarsmakten
Forskningsområde	Flygsystem och rymdfrågor
FoT-område	Rymdsystem
Projektnummer	E85110
Godkänd av	Lars Höstbeck
Ansvarig avdelning	Försvarsteknik

Bild: Norrsken sett från den internationella rymdstationen den 15 september 2017. Foto: Nasa.

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

Sammanfattning

Rymdväder är ett samlingsbegrepp för solens påverkan på jorden och dess närområde. Det är en av grundpelarna för att upprätthålla en korrekt och uppdaterad rymdlägesbild, då olika typer av solstormar påverkar atmosfären och satelliters banor, särskilt i låga omloppsbanor. Rapporten syftar till att ge läsaren en översiktlig förståelse av rymdvädrets effekter och hur de påverkar en operationell militär rymdlägesbild. Det är av särskilt intresse när Försvarsmakten planerar att äga och driftsätta egna satelliter till 2030. Genom att använda öppen litteratur, data och modeller för rymdväder beskrivs rymdväder på en översiktlig nivå och koncept och fenomen visualiseras för att exemplifiera på vilket sätt rymdväder påverkar Försvarsmaktens verksamhet. Solflammar och koronamassutkastningar påverkar kortvågsradio, flyg, kraftnät, satelliter och dess banor. Alla dessa är exempel på system som Försvarsmakten är intresserad av och vi ger en översikt av. Vi tittar på hur dessa system kan påverkas, med fokus på det som är relevant för en militär rymdlägesbild. Prognoser av rymdväder är svåra att ta fram och i dagsläget relativt osäkra på grund av begränsningar i modeller, antal observationspunkter, datorkraft och att fysiken inte är helt utredd. Vi presenterar flera metoder som används för att prognostisera olika typer av stormar. Försvarsmaktens nuvarande prognoser och framtida behov analyseras och vi ger rekommendationer till hur en rymdväderstjänst kan se ut i framtiden för Försvarsmakten.

Nyckelord

Försvarsmakten, geomagnetisk storm, kortvågsradio, militär, prognos, radiokommunikation, rymd, rymddomänen, rymdfysik, rymdväder, rymdlägesbild, rymdsystem, satellit, satellitkommunikation, satellitnavigering, solstorm, strålning

Summary

Space weather refers to the Sun's influence on Earth and its surrounding space and is one of the pillars of establishing and maintaining timely and actionable space situational awareness. This is due to different types of solar storms affecting the atmosphere and satellite orbits, especially in low earth orbits. The report aims to offer the reader a general understanding of the effects of space weather, and how they affect space domain awareness. It is of particular interest as the Swedish Armed Forces plan to own and operate their own satellites by 2030. By using open literature, data and models for space weather, space weather is described at a general level, and concepts and phenomena are visualized to exemplify how space weather affects the Swedish Armed Forces' operations. We aim to give an overview of all affected systems relevant for space domain awareness and the effect space weather has on them. Solar flares and coronal mass ejections affect several systems of interest, for example short-wave radio, satellite navigation, aviation, satellites, power grids, and the monitoring and surveying of space objects. Forecasts of space weather are difficult to make and currently relatively uncertain due to limitations in the models, number of observations, computational resources and that the physics are not being fully understood. We review the most used methods for different types of storms. We also study the limitations of forecasts and review and evaluate the most used methods. The Swedish Armed Forces' current forecasts and future needs are reviewed, and we present recommendations for what a space weather service might look like in the future.

Keywords

Swedish Armed Forces, geomagnetic storm, high-frequency radio, military, forecast, radio communication, space, space domain, space physics, space weather, space situational awareness, space systems, satellite, satellite communications, satellite navigation, solar storm, radiation

Innehåll

Förkortningar	7
1 Inledning	9
1.1 Syfte	9
1.2 Avgränsningar och definitioner	9
1.3 Metodik	9
1.4 Läsanvisning	10
2 Rymdväder	11
2.1 En del av den militära rymdlägesbilden	11
2.2 Solcykeln	11
2.3 Solstormar	13
2.3.1 Solflammer	14
2.3.2 Koronamassutkastningar	14
2.3.3 Rymdvädersskalor	14
3 Effekter på rymd- och marksystem	19
3.1 Kortvågsradio	19
3.2 Satellitkommunikation	20
3.3 Satellitbaserad positionering, navigation och tid	20
3.4 Atmosfärfriktion	20
3.5 Satellitsystem	23
4 Prognoser av solstormar	25
4.1 Solflammer	25
4.2 Solstrålningsstormar	26
4.3 Geomagnetiska stormar	27
4.4 Pålitlighet av prognoser	28
5 Försvarsmaktens behov och utveckling av rymdväderstjänst	31
5.1 Försvarsmaktens nuvarande prognoser	31
5.2 Framtida behov och rekommendationer	31
6 Slutsatser	33
Litteraturförteckning	35

Förkortningar

Förkortning	Svensk term/Förklaring	Engelsk term/Förklaring
AIA	Instrument ombord SDO	<i>Atmospheric Imaging Assembly</i>
CME	Koronamassutkastning	<i>Coronal Mass Ejection</i>
COSPAR	kommittén för rymdforskning	<i>Committee on Space Research</i>
EUV	Extrem ultraviolett	<i>Extreme Ultra Violet</i>
ESA	Europeiska rymdorganisationen	<i>European Space Agency</i>
EUHFORIA	Numerisk modell för solvinden	<i>EUropean Heliospheric FORecasting Information Asset</i>
EVE	Instrument ombord SDO	<i>Extreme Ultraviolet Variability Experiment</i>
FOI	Totalförsvarets forskningsinstitut	
FoT	Forskning och teknikutveckling	
G	Skala för geomagnetiska stormar	<i>Geomagnetic Storms</i>
GIC	Geomagnetiskt inducerade strömmar	<i>Geomagnetically Induced Currents</i>
GOES	Amerikanska vädersatelliter i geostationär bana	<i>Geostationary Operational Environmental Satellites</i>
HASDM	Operationell atmosfärsmodell från amerikanska flygvapnet	<i>High accuracy satellite drag model</i>
HF	Kortvåg	<i>High Frequency</i>
HMI	Instrument ombord SDO	<i>Helioseismic and Magnetic Imager</i>
IRF	Institutet för rymdfysik	
L1, ...L5	Lagrangepunkter	<i>Lagrange points</i>
LUF	Lägst användbara frekvens	<i>Lowest Usable Frequency</i>
METOCC	Försvarmaktens METeorologiska och OCEanografiska Centrum	
MeV	megaelektronvolt	<i>megaelectronvolt</i>
MSB	Myndigheten för samhällsskydd och beredskap	
MSISE	Familj av atmosfärsmodeller av NRL	<i>Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Radar (Exosphere)</i>
MUF	Högst användbara frekvens	<i>Maximum Usable Frequency</i>
NASA	USA:s myndighet för rymdfart och rymdforskning	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NOAA	USA:s vädermyndighet	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>

NRL	Forskningsinstitut för USA:s flotta	<i>United States Naval Research Laboratory</i>
R	Skala för avbrott i radiokommunikation	<i>Radio Blackouts</i>
S	Skala för på solstrålningsstormar	<i>Solar Radiation Storms</i>
SDO	Nasasatellit för solobservationer	<i>Solar Dynamics Observatory</i>
SEP	Solstrålningsstorm	<i>Solar Energetic Particles</i>
SPE	Solstrålningsstorm	<i>Solar Particle Event</i>
SWPC	NOAA:s rymdvädersavdelning	<i>Space Weather Prediction Center</i>
UTC	Koordinerad universell tid	<i>Coordinated Universal Time</i>
WDC-SILSO	Databas för solobservationen från det Kungliga belgiska observatoriet i Bryssel	<i>World Data Center - Sunspot Index and Long-term Solar Observations</i>
WSA-Enlil	Prognosmodell för solvinden och koronamassutkastningar	<i>Wang-Sheeley-Arge Enlil</i>

1 Inledning

Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI) har bedrivit forskning inom rymdlägesbild sedan 2004, med ett förnyat fokus på rymdväder sedan 2021 i projektet för Forskning och teknikutveckling (FoT) inom rymdlägesbild. Delar av denna rapport baseras på tidigare arbete på FOI presenterat i dessa rapporter: Lindström och Waldenvik [1], Lindström och Waldenvik [2], Lindström [3], Lindström och Waldenvik [4], Rosenqvist et al. [5], Rosenqvist et al. [6] men också arbete som presenterats på *European Space Weather Week* 2023 [7]. Denna rapport följer upp det arbetet men ger också en bredare översikt av rymdväder och hur det påverkar en militär rymdlägesbild nu och i framtiden.

1.1 Syfte

Försvarmakten planerar att i framtiden ha egna satelliter och upprätta en förmåga inom rymdlägesbild. För att upprätthålla en korrekt och uppdaterad rymdlägesbild är det nödvändigt att ha god kunskap om rådande och kommande rymdväder. Försvarmakten hanterar redan idag tjänster och prognoser inom rymdväder som verkar understödjande för mark-, sjö- och flygdomänerna och relaterar till effekter på kritiska system som kortvågsradio, satellitkommunikation och positionering, navigering och tidsangivelse. Utöver dessa effekter på militära system på jorden, har rymdväder en lång rad potentiella negativa effekter på militära system i rymddomänen. Rymdskrot och andra aktörers satelliter utgör, tillsammans med rymdväder, Försvarmaktens framtida operationsmiljö i domänen vilket kommer att ställa nya krav på myndigheten som satellitoperatör.

Denna rapport syftar till att ge läsaren en översiktlig förståelse av rymdvädrets effekter och dess roll i en militär rymdlägesbild. Vidare undersöker rapporten vilka ytterligare funktioner som kan vara till nytta för Försvarmaktens rymdvädertjänster vid införandet av en operationell rymdlägesbild.

1.2 Avgränsningar och definitioner

Denna rapport beskriver rymdväder på en översiktlig nivå och fokuserar på de delar som är av relevans till Försvarmakten. I denna rapport begränsas därför rymdvädrets påverkan till ett avstånd som inkluderar markytan ut till geostationär bana, som motsvarar en höjd på 35 786 kilometer över havet. Hur rymdväder påverkar banor och system utanför detta avstånd tas inte upp.

1.3 Metodik

Detta arbete bygger på öppen litteratur, både nationell och internationell, inom rymdväder, rymdfysik, satellitdesign och -operationer. Litteraturunderlaget består av tekniska rapporter, böcker samt vetenskapliga journalartiklar.

Arbetet utgår från Försvarmaktens nuvarande och framtida behov. Vi använder öppna data, modeller för rymdväder och satelliter för att i figurer visualisera koncept eller fenomen. Vi använder bland annat data från FOI:s egenutvecklade databas över människoskapade objekt i rymden, El Corazon, för att exemplifiera och konkretisera på vilket sätt rymdväder påverkar Försvarmaktens verksamhet i nuläget samt i framtiden. Källan för data och modellerna refereras i den mån det är möjligt i samband med figurerna. Exempel på återkommande källor i det här arbetet är den amerikanska rymdfarkosten *Solar Dynamics Observatory* (SDO) för bilder på solen, Kungliga belgiska observatoriet för solfläckstal och amerikanska *Space Weather Prediction Center* (SWPC) för olika rymdvädersprodukter och -prognoser.

Inom ramen för arbetet organiserade FOI också ett möte med ansvariga för rymdvädersprognoser på Försvarmaktens Meteorologiska och Oceanografiska Centrum (METOCC) för att diskutera rapportens inriktning och innehåll. I huvudsak handlade mötet om möjligheten att göra prognoser samt Försvarmaktens nuvarande och kommande arbete med rymdväder, vilket framförallt rör innehållet i Kapitel 4 och 5.

1.4 Läsanvisning

I Kapitel 2 ges en överblick av de delar inom rymdväder som är viktiga i den militära kontexten. Kapitel 3 beskriver ett urval av de effekter på civila och militära system som påverkas av rymdväder, både i rymden samt på marken. Kapitel 4 beskriver hur rymdvädersprognoser för olika typer av rymdväder görs i nuläget och hur pålitliga de är. Kapitel 5 diskuterar Försvarmaktens nuvarande och framtida operativa behov och ger rekommendationer på hur en rymdväderstjänst för Försvarmakten kan utvecklas i framtiden. Avslutningsvis presenteras våra slutsatser i Kapitel 6.

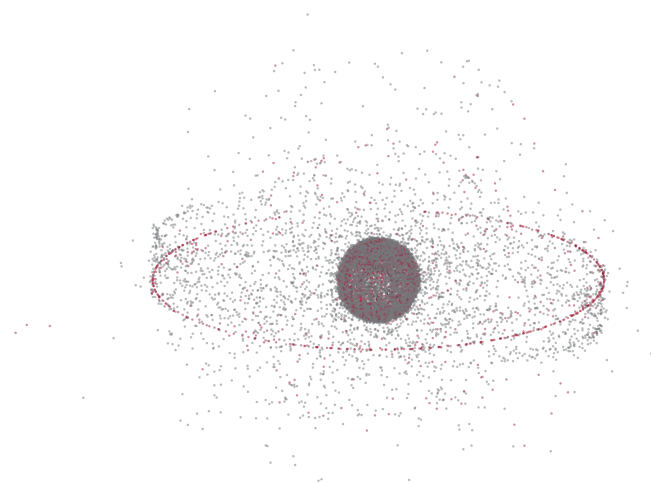
2 Rymdväder

Detta kapitel ger en översikt av vad rymdväder innebär i ett militärt sammanhang och de komponenter som är relevanta för att få en förståelse för ämnet.

2.1 En del av den militära rymdlägesbilden

Vi lever med en aktiv stjärna i mitten av vårt solsystem. Solen har ett inneboende magnetiskt fält som orsakar en våldsam upphettning av solens yttre atmosfär – koronan. Här expanderar det upphettade plasmat och bildar solvinden som bär med sig solens magnetfält till alla delar av solsystemet. Rymdväder är ett samlingsbegrepp på fysikaliska processer som orsakas av magnetisk aktivitet på solen och kan negativt påverka militära och civila system på jorden och i rymden [1, 3].

Rymden ses av Försvarmakten [8], Sverige [9] och Nato [10] som en egen operativ domän. Försvarmakten har instiftat en rymdavdelning med övergripande ansvar för rymddomänen och hur den kan stödja de övriga domänerna [11]. Myndigheten planerar en egen demonstratorsatellit till år 2027 och potentiellt fler satelliter efter det [12]. Rollen som satellitoperatör ställer nya krav på Försvarmakten att utveckla förmåga inom rymdlägesbild för att säkerställa handlingsfrihet i rymddomänen.



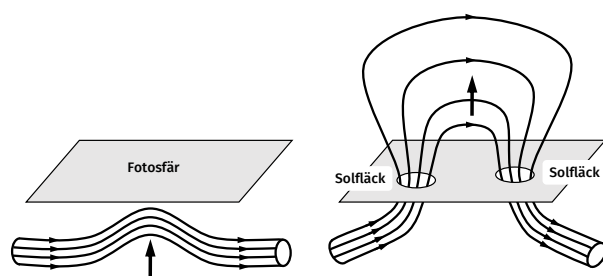
Figur 1: Människoskapade objekt i omloppsbana kring jorden i oktober 2024. Röda punkter visar aktiva satelliter och grå visar alla andra objekt, som inaktiva satelliter, uttjänta raketsteg och annat rymdskrot. Från FOI:s databas El Corazon [13].

Rymdväder utgör, tillsammans med övervakning och inmätning av rymdobjekt och karakterisering av satelliter, grunden till en militär rymdlägesbild [14, 15]. Rymdväder är en kritisk faktor för en militär rymdlägesbild, eftersom det direkt kan påverka kommunikation, satellitnavigering och andra rymdbaserade system som är avgörande för militära operationer. Rymdväder påverkar också satelliters omloppsbana vilket ökar osäkerheter och potentiellt risken för kollisioner i rymden samt försvårar militära operationer. Figur 1 visar alla spårade satelliter och rymdskrotsdelar i omloppsbana kring jorden i skrivande stund. Denna konkurrensutsatta och utmanande operationsdomän är tätt kopplad till rymdmiljön och rymdväder.

2.2 Solcykeln

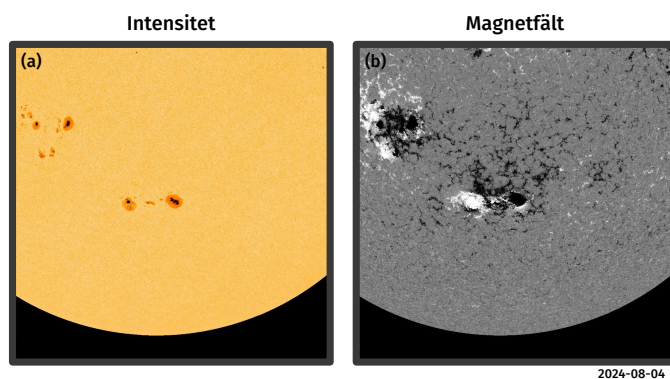
Nivån på solens aktivitet varierar i en elvaårscykel. Denna solcykel har en rad effekter på teknologiska system som satelliter och påverkar rymdvädet [16]. Den mest synliga effekten av solcykeln är solfläckar – magnetiska strukturer på solens yta som har lägre temperatur än den övriga ytan

och är därför mörkare. Fläckarna uppstår när magnetfält pressas upp till solens yta, en region som kallas fotosfären. När detta sker uppstår två solfläckar i ett par, se Figur 2. I solfläckarna är magnetfältet mycket starkare än normalt i fotosfären. Det förhöjda magnetiska trycket leder till ett lägre gastryck och lägre temperatur vilket i sin tur får solfläckarna att framstå som mörka regioner på solens yta. Figur 3 visar två bilder av solen, tagna vid samma tidpunkt av den amerikanska satelliten *Solar Dynamics Observatory* (SDO). Till vänster i figuren syns två solfläckspår som två mörka fläckar på solens yta. Den högra bilden visar magnetfältets styrka och riktning. Solfläckarna syns som vita och svarta regioner, vilket indikerar ett starkt magnetfält som är riktat respektive ut och in ur solens yta, samma konfiguration som visas i Figur 2.



Figur 2: Formation av ett solfläckspår. Genom konvektion pressas magnetfält upp genom fotosfären, som utgör solens yta, och bildar två kallare regioner som framstår som fläckar på solen. Anpassad efter [17].

Mängden solfläckar som är synliga i fotosfären varierar med den 11-åriga solcykeln. Toppen i solcykeln kallas solmaximum medan perioderna mellan topparna, där solen uppvisar inga eller mycket få solfläckar, kallas solminima. En solcykel utgör den ena halvan av en 22-årig magnetisk cykel där solens magnetfält byter riktning [18]. Hur solcykeln uppstår är i dagsläget inte helt klarlagt, men den tros uppstå genom en interaktion mellan solens magnetiska dynamo och att solen roterar snabbare vid polerna och långsammare vid ekvatorn [16]. Detta resulterar i en skjuvkraft (eng. *shearing*) på solens inre plasma, och eftersom magnetfältet rör sig tillsammans med plasmat byggs fältet långsamt upp längs med solens rotation och skiftar till slut riktning [19]. Under solmaxima håller magnetfältet därför på att byta riktning och fältet är "uppsnurrat" kring solen vilket orsakar fler solfläckar och, som vi kommer se senare, fler aktiva regioner och solstormar.

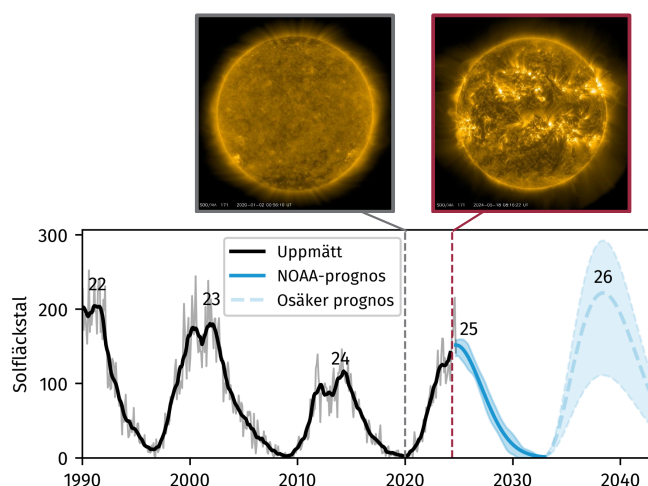


Figur 3: Två bilder av samma solfläckspår. (a) Intensitet i solens fotosfär. (b) Magnetogram som visar magnetfältets styrka och riktning. Vit färg visar magnetfält riktat ut från solen och svart färg magnetfält riktat in mot solens yta. Courtesy of NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams.

Historiskt har solfläckar observerats sedan åtminstone 300-talet före Kristus av kinesiska astronomer [20]. Sedan teleskopet uppfanns på 1600-talet har observationer av solfläckar varit vanliga

men det var först på 1800-talet som solfläckarnas elvaårscykel upptäcktes av astronomer som samlade och analyserade historiska soldata [21]. Ett standardiserat solfläckstal, ibland kallat ett *Wolfstal*, används för att räkna antalet fläckar på solens yta. Solcyklerna är numrerade sekventiellt efter den första observerade solcykel 1 som inträffade år 1755-1766. Figur 4 visar solfläckstalet från 1990 till idag. Som vi kan se varierar solcyklerna i vilket solfläckstal som nås vid solmaxima.

Att göra prognoser för hur stark en solcykel kommer att bli innan den har skett är utmanade [16, 22]. Prognoser utfärdas vanligtvis i början på solcykeln och baseras på statistiska modeller eller fysikaliska simuleringar av solens magnetiska dynamo. Den förra solcykeln med nummer 24 var en av de svagaste solcyklerna sedan rymdålderns början, mätt i solfläckstal, medan den nuvarande solcykel 25 ser ut att bli en mer normal cykel. Solcykel 25 förutspåddes av många att bli relativt svag [22] men har redan överstigit de prognoserna och förutspås nu av USA:s vädermyndighet *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) nå solmaximum 2024-2025 med ett solfläckstal på ungefär 160 och nå ett nytt minimum efter 2030 [23], se Figur 4.



Figur 4: Solens aktivitetscykel från 1990 till 2024 (svart linje), med prognoser för pågående och nästa solcykel (blå linje). Bilder från solen i 173 Ångström våglängd visas för två tidpunkter. Solfläckstal från WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels och fotografierna på solen från rymdfarkosten SDO Courtesy of NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams.

Att förutsäga styrkan på den pågående solcykeln är därmed mycket svårt. Försvarsmaktens första satelliter planeras att sändas upp runt år 2027 vilket sannolikt är i slutet av solcykel 25. Denna nedåtgående fas av solcykeln kan karakteriseras av ökad förekomst av geomagnetiska stormar [24]. Nästa solcykel med nummer 26, där Försvarsmaktens satelliter förväntas vara operationella, är än svårare att förutsäga [16]. Figur 4 visar, efter NOAA:s prognos för solcykel 25, mycket ungefärlig tid och styrka för solcykel 26. Solmaximum för den cykeln baseras på prognoser som använder statistisk analys av historiska solcykler [25], men ska anses som mycket osäker och visas här endast för illustrativa syften.

2.3 Solstormar

Solen bryter stundtals ut i energirika utbrott som kan skicka ut strålning och laddade partiklar i riktning mot jorden, med negativa effekter på tekniska system som följd. Dessa utbrott, eller solstormar, kan ta olika skepnader men de har gemensamt att de omvandlar energi från solens magnetfält till att accelerera laddade partiklar eller att stråla ut fotoner i olika våglängder. Utbrotten uppstår i så kallade aktiva regioner på solens yta. Aktiva regioner är områden på solen med stark magnetisk aktivitet och är ofta associerade med solfläckar. I detta avsnitt ger vi en överblick över de huvudsakliga typerna av solstormar och hur de propagerar till jorden.

2.3.1 Solflammor

Solflammor (eng. *solar flares*) är utbrott på solen som tillfälligt strålar ut ljus i ett brett spektrum av våglängder. Solflammor uppstår ur det magnetiska fältet ovanför aktiva regioner på solen där magnetisk energi plötsligt frigörs för att hetta upp och accelerera partiklar i det kringliggande plasmat. De energirika partiklarna orsakar sedan, genom interaktion med magnetfältet och plasmat, elektromagnetisk strålning i våglängder som sträcker sig från gamma- och röntgenstrålning, synligt ljus och radiovågor [26]. Eftersom strålningen rör sig genom solsystemet med ljusets hastighet är det omöjligt att få en förvarning om att en solflamma har inträffat förrän strålningen når jorden.

Då både gamma- och röntgenstrålning från solflammor absorberas helt av jordens atmosfär kan de endast observeras från rymden. Vid absorptionen joniseras gas i jordens övre atmosfär, vilket ökar elektrontätheten i jonosfären. Detta kan i sin tur leda till absorption av radiovågor och försvåra eller omöjliggöra kortvågsradiokommunikation på de solbelysta delarna av jorden, se [1] samt Kapitel 3. Solflammor klassificeras efter den maximala intensiteten av röntgenstrålningen de ger upphov till i fem kategorier: A, B, C, M och X, där varje kategori utgör en tiofaldig ökning från den förra. Varje kategori kan ytterligare graderas inom sitt intervall, till exempel C1 eller M5.5, där siffran multiplicerar intensiteten. Solflammor av kategori X har ingen övre gräns för graderingen.

2.3.2 Koronamassutkastningar

En annan typ av solstormar är så kallade koronamassutkastningar (eng. *coronal mass ejections (CME)*). Dessa är moln av plasma som kastas ut från solens korona och ut i den interplanetära rymden. Koronamassutkastningar är ofta, men inte alltid, associerade med solflammor och styrs i stor utsträckning av samma fysikaliska processer på solens yta [27]. Under en koronamassutkastning omvandlas magnetisk energi också till kinetisk energi hos ett plasmamoln som därmed kan kastas iväg från solens yta och ut i rymden [28].

Koronamassutkastningar som träffar jorden kan ge upphov till geomagnetiska stormar. Energi överförs då från plasmamolnet till jordens magnetfält, vilket i sin tur orsakar variationer i fältet. Hur starka geomagnetiska stormar orsakade av koronamassutkastningar blir bestäms bland annat av hastigheten av plasmamolnet. Även riktningen på magnetfältet innuti koronamassutkastningen bestämmer hur plasmat interagerar med jordens magnetfält och är en viktig parameter för geomagnetiska stormar [18].

2.3.3 Rymdvädersskalor

Som vi har sett är termen "solstorm" ett brett begrepp med olika processer på solen och med olika effekter på jorden. Denna breda palett av fysikaliska processer och effekter på jorden kan verka oöverskådliga för användare och operatörer. För att förenkla för både användare och för att operationalisera rymdväder har amerikanska NOAA tagit fram tre rymdvädersskalor som karakteriserar solstormar och inriktar sig på effekter på människor och kritisk infrastruktur. De tre kategorierna är

- avbrott i radiokommunikation (R)
- solstrålningsstormar (S)
- geomagnetisk stormar (G).

För att efterlikna skalor för till exempel jordbävningar och orkaner delas rymdvädersskalorna in i fem grader beroende på dess effekter på rymd- och markbaserade system [29]. NOAA:s skalor för solstormar är vida använda runt om i världen för att karakterisera rymdvädersförhållanden. För att ge en översikt över hur vanliga de olika typerna av solstormar är visar Tabell 2 ungefärligt antal

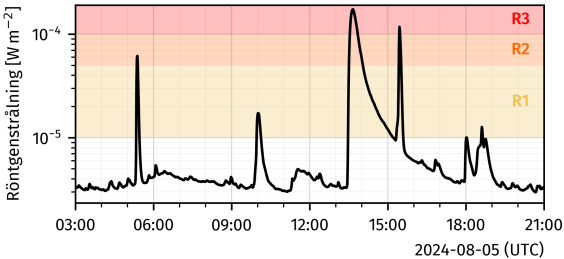
dagar per år med de olika typerna av solstormar, sammanställt från de senaste två solcyklerna. Alla typer av solstormar är mindre vanliga under solminimum och vanligare under solmaximum. Nedan beskriver vi kortfattat de olika typerna av solstormar enligt klassificeringen ovan.

Tabell 2: Ungefärligt antal dagar per år där minst en solstorm med olika NOAA-klassificeringar förekommer. Förekomsten av solstormar generellt är högre under solmaxima och lägre under solminima. För R-skalan anges förekomsten endast för R1-R2 och R3-R5. Data från SWPC [30] och GFZ Postdam [31] under perioden 1996-2022.

Skala	Antal dagar per år		
	R	S	G
1	50	8	40
2		3	10
3	6	1	5
4		0.1	2
5		-	0.1

Avbrott i radiokommunikation

Avbrott i radiokommunikation är en alternativ benämning på solflammor som ger upphov till störningar i radiokommunikation. R-stormar påverkar radiokommunikation på hela den solbelysta sidan av jorden. Röntgenstrålning från solflammorna joniserar gas i jordens övre atmosfär som i sin tur leder till absorption av radiovågor. R-skalan ökar med klassifikationen av solflammar. En solflamma av M-klass leder till en R1- eller R2-storm, medan en av X-klass leder till en R3-storm eller högre, beroende på styrkan. De minsta solflammorna ger inga eller mycket små störningar i radiokommunikation på jorden och inkluderas därför inte i R-skalan. Solflammar varar typiskt några minuter till några timmar [32], vilket vi kan se i Figur 5. Där ser vi exempel på flera solflammar med olika styrkor och varaktighet. Även geomagnetiska stormar och solstrålningsstormar kan orsaka avbrott i radiokommunikation, främst i polarområdena på jorden.

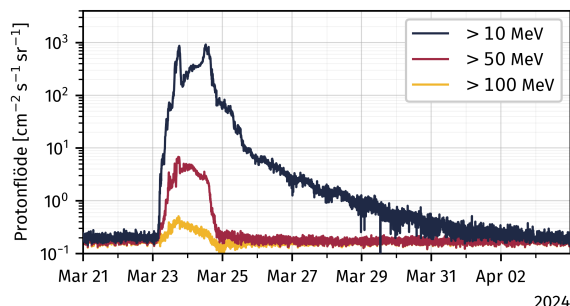


Figur 5: Flera solflammar som uppnådde avbrott i radiokommunikation av klasserna R1, R2 och R3 från augusti 2024. Kurvorna visar flödet av röntgenstrålning i intervallet 1-8 Ångström som en funktion av koordinerad universell tid (UTC). Data från GOES-satelliterna genom Community Coordinated Modeling Center [33].

Solstrålningsstormar

Under en solstrålningsstorm, även kallad solpartikelstorm (eng. *Solar Energetic Particle (SEP) event* eller *Solar Particle Event (SPE)*), ökar strålningen i form av laddade partiklar efter utbrottet på solen. Rymden nära jorden innehåller alltid radioaktiv strålning i form av kosmisk strålning från utanför vårt solsystem och strålningsbältena som består av laddade partiklar fångade i jordens magnetfält. Under en solstrålningsstorm ökar strålningsnivåerna av framförallt protoner med energier på ungefär 1–1000 megaelektronvolt (MeV) men också elektroner och tunga joner. Dessa partiklar accelereras till mycket höga hastigheter och kan nå jorden inom några timmar efter ett solutbrott,

till skillnad från röntgenstrålningen som når jorden på åtta minuter och därmed inte ger någon förvarning.



Figur 6: En S2-solstrålningsstorm som inträffade i mars 2024. Kurvorna visar flödet av protoner över 10, 50 och 100 megaelektronvolt. Data från GOES-satelliterna genom *Community Coordinated Modeling Center* [33].

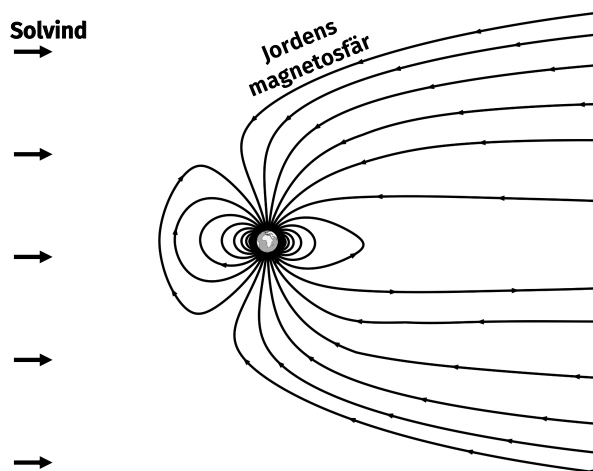
Solstrålningsstormar är associerade med både solflammor och koronamassutkastningar. Partiklarna accelereras nära solens yta i processer som inte är helt förstådda [34]. Vid jorden kan solstrålningsstormar orsaka störningar i radiokommunikation över polerna, skada satelliters elektroniska komponenter och påverka astronauter och till och med flygpassagerare. Stormarna uppvisar stor variation i vilka partiklar och vilka energier som dominerar. Vidare påverkas de laddade partiklarna av jordens magnetfält och strålningsnivåerna en satellit upplever kan variera beroende på omloppsbanan. S-skalan för solstrålningsstormar baseras av NOAA på flödet av protoner med energier över 10 megaelektronvolt som mäts med partikeldetektorer ombord *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES) som befinner sig i geostationär bana. Figur 6 visar ett exempel på en solstrålningsstorm i mars 2024 som uppmätte S2 på NOAA:s skala. Strålningsstormar varar normalt några timmar till några dagar [35]. Figur 6 visar en relativt långvarig solstrålningsstorm som varar flera dagar.

Geomagnetiska stormar

Geomagnetiska stormar orsakas av interaktionen mellan solvinden och jordens magnetfält. Under rätt förutsättningar överförs energi från solvinden till jordens magnetosfär – den region i rymden dit jordens magnetfält sträcker sig, se Figur 7. Störningar uppstår då i magnetosfären och komplexa strömsystem byggs upp i plasmat kring jorden. En del av energin som byggs upp kan senare plötsligt frigöras, i vad som kallas substormar, till elektriska strömmar i magnetosfären som flödar ner till jonosfären i jordens övre atmosfär. Dessa strömmar är kopplade till polarsken (norrskan och sydsken), som är synliga effekter av geomagnetiska stormar, och orsakar variationer i magnetfältet på marken. Variationerna inducerar i sin tur elektriska spänningar på jordens yta, som i sin tur kan ge upphov till strömmar i långa ledningar på marken (eng. *Geomagnetically Induced Currents* (GIC)) och kan bland annat orsaka skador i kraftnätet [36]. Ett exempel på detta är den så kallade *Halloweenstormen* [37] som inträffade 2003 och uppmätte G5 på NOAA-skalan, vilken lämnade delar av Malmö utan ström [38, 39].

Geomagnetiska stormar mäts bland annat genom markbaserade mätningar av variationer i jordens magnetfält. NOAA:s G-skala är baserad på det planetära indexet Kp som sammanställs från mätningar vid flera geomagnetiska observatorier runt om i världen och är ett mått på hur mycket det geomagnetiska fältet varierar över tid. Kp -indexet är skalat från 0 till 9, där varje steg representerar en kvasi-logaritmisk ökning av magnetisk aktivitet [41]. G-skalan startar vid $Kp = 5$ som motsvarar en G1-storm och ökar med stigande Kp -index där G2 motsvarar $Kp = 6$ och så vidare.

Geomagnetiska stormar kan orsakas av olika strukturer i solvinden. Till exempel kan så kallade koronahål i solens atmosfär ge upphov till en ovanligt snabb solvind som kan utlösa geomagnetiska stormar om jorden kommer i vägen för den. De största geomagnetiska stormarna som kan

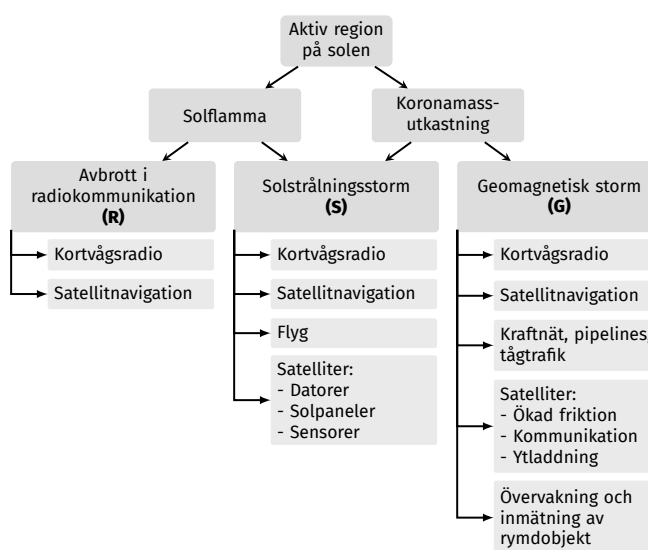


Figur 7: Tvärsnitt av jordens magnetosfär. Sträcken visar fältlinjer från jordens magnetfält. Solvinden från vänster i figuren trycker ihop magnetosfären på jordens dagsida och drar ut magnetfältet på jordens nattsida. Magnetfält från T96-modellen av Tsyganenko [40].

hota samhällskritisk infrastruktur kommer däremot i stort sett alltid från en koronamassutkastning som träffar jorden. På grund av detta anses ofta koronamassutkastningar utgöra det största hotet från rymdväder, med potential att hota ett brett spektrum av samhällsfunktioner.

3 Effekter på rymd- och marksystem

En aktiv region på solen, ofta associerad med solfläckar eller en grupp av solfläckar, exploderar i ett solutbrott som kan ge upphov till en solflamma, en koronamassutkastning eller båda två. En solflamma leder alltid till störningar i radiokommunikation på den solbelysta delen av jorden om flammen är tillräckligt stark och synlig från jorden. Solstrålningsstormar kan uppstå av solflammar och koronamassutkastningar, även om dessa missar jorden. Om en koronamassutkastning träffar jorden kan den utlösa en geomagnetisk storm. De olika effekterna från de tre typer av solstormar som beskrevs i kapitel 2 sammanfattas här i Figur 8.



Figur 8: Flödesschema över hur en aktiv region på solen kan ge upphov till en solflamma eller koronamassutkastning vilka i sin tur kan ge upphov till en av de tre kategorier av solstormar, definierat av NOAA [42]. Under varje kategori visas ett urval av system som kan påverkas av solstormarna. Anpassad efter Eastwood et al. [43] och Rosenqvist et al. [6].

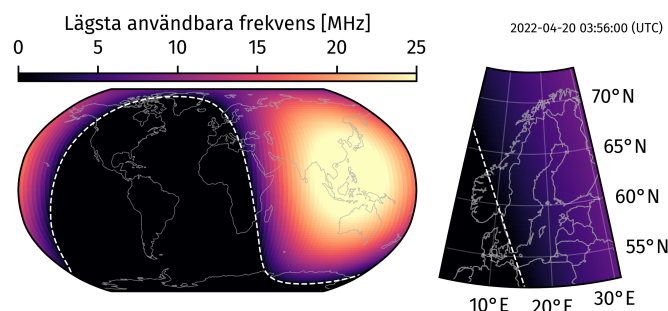
Varje typ av solstorm är associerade till potentiella negativa effekter på militära system på jorden och i rymden [44, 45]. System som kan slås ut eller få försämrad funktion är listade under varje typ av solstorm i Figur 8. Flera av dessa effekter har avhandlats i tidigare FOI-rapporter [1, 3]. Därför sammanfattar vi i detta kapitel först några av de viktigaste effekterna på militära system i nuläget och beskriver i större djup de effekter på satelltsystem och -operationer som är relevanta för att etablera och upprätthålla en militär rymdlägesbild.

3.1 Kortvågsradio

Kortvågsradio eller högfrekvensradio (förkortas ofta HF-radio) används för att kommunicera över höga frekvenser i spannet 3-30 megahertz. Radiovågorna reflekteras mot jonosfären vilket möjliggör kommunikation över längre avstånd. Sändningarna reflekteras av jonosfären och kan därför användas för kommunikation på långa avstånd. Det finns många användningsområden för HF-radio både civilt och militärt. Några exempel på militär användning är kommunikation mellan trupper på land, kommunikation för flyg på långa avstånd, som ett stödsystem till satellitkommunikation när det inte fungerar och för att lokalisera sändare.

Användningen av HF-radio påverkas av rymdväder på olika sätt och styrs av två parametrar, lägsta användbara frekvens (eng. *Lowest Usable Frequency* (LUF)) och högsta användbara frekvens (eng.

Maximum Usable Frequency (MUF)). MUF påverkas av elektrondensiteten i F-lagret av jonosfären (cirka 200-280 kilometer över ytan) som påverkas av solcykeln, tid på dygnet och geomagnetiska stormar. Denna variation i reflektionshöjd gör att spridningen och riktningen av signalen ändras vilket kan leda till degradering av signalen. LUF bestäms av radiovågornas absorption lite lägre ner i jonosfären (mellan cirka 80-120 kilometer) i D- och E- lagerna. Dessa lager påverkas starkt av solflammar som höjer jonisationsnivån, vilket leder till högre absorption av radiovågor. Detta kan i sin tur leda till borttoning av signalen som varar i minuter till timmar på den solbelysta sidan av jorden. Denna absorption illustreras i Figur 9.



Figur 9: Störningar på kortvågsradio på jorden under en solflamma som inträffade den 20 april 2022. Färgen visar den lägsta användbara frekvensen som upplever absorption lägre än 1 decibel. Den streckade linjen visar gränsen mellan den solbelysta och skuggade delen av jorden. Solflamman orsakade stora störningar men eftersom det var gryning i Sverige blev effekterna milda här.

Solstrålningsstormar och geomagnetiska stormar kan också påverka kortvågsradio, men främst nära polerna. Vid dessa stormar kan inkommande energetiska protoner eller elektroner jonisera den övre atmosfären och därigenom försvåra kortvågsradiokommunikation under dagarna eller veckorna under en solstrålningsstorm. Detta gör att norra Sverige och arktis är speciellt utsatta för störningar i kortvågsradio.

3.2 Satellitkommunikation

Satellitkommunikation sker på högre frekvenser än kortvågsradio och påverkas därför inte av absorption på samma sätt som HF-radio [46]. Däremot drabbas signalen som används vid satellitkommunikation av brytning och spridning av oregelbundenheter i elektroninnehållet i jonosfären, scintillationer och radiostrålning från solen.

3.3 Satellitbaserad positionering, navigation och tid

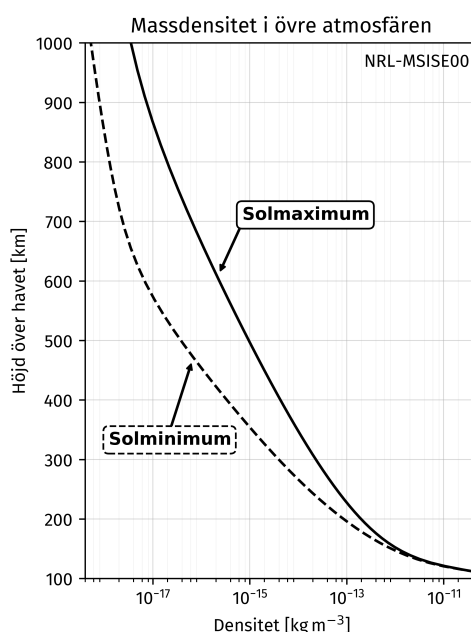
Elektroninnehållet i jonosfären som påverkas av solstormar påverkar också signalen från satellitsystem som tillhandahåller satellitbaserad positionering, navigation och tid, som till exempel amerikanska *Global Positioning System* (GPS) eller europeiska Galileo. Paziewski et al. [47] visade att under en storm som *St. Patrick's day*-stormen 2015 (kategoriserad som G4) kan upplösningen försämrans upp till 37%, vilket innebär betydande fel i både tids- och avståndsangivelser.

3.4 Atmosfärsfriktion

Jordens atmosfär sträcker sig utanför de lägre gränserna för vad vi kallar rymden [48]. I de övre lagren av atmosfären, där många satelliter befinner sig, bestäms atmosfärsdensiteten av rådande rymdväder. Atmosfären påverkar i sin tur satelliters banor genom friktion. Rymdväder utgör den största osäkerheten för satellitbanor upp till ungefär 1 000 kilometer [49]. Detta kan leda till förändringar i banor och i vissa fall även orsaka oplanerade återinträden av satelliter [50, 51] och större osäkerheter för varningar för kollisioner mellan objekt i omloppsbana [52].

Den övre atmosfären, där satelliter i låga jordbanor befinner sig, påverkas starkt av solens strålning i våglängder under 120 nanometer, som benämns extremultraviolett. Strålning i dessa våglängder varierar med både solcykeln och när specifika aktiva regioner på solen är synliga [53]. Detta betyder att atmosfärsdensiteten som satelliter upplever beror på rådande rymdväder och solcykel. Som vi kan se i Figur 10, som visar en modell för atmosfärens typiska massdensitet för solminima och solmaxima, kan densiteten variera med mer än en faktor tio beroende på fas i solcykeln.

Utöver solcykeln påverkas atmosfärsdensiteten av solstormar. Geomagnetiska stormar orsakar stora strömsystem i jordens magnetosfär. Dessa strömmar sluter i jordens jonosfär på en höjd av ungefär 100–200 kilometer över havet och orsakar, genom elektrisk resistans, uppvärmning av den övre atmosfären, vilket leder till en expansion och högre atmosfärsdensitet ovanför dessa höjder [54, 55].



Figur 10: Massdensitet som satelliter upplever i den övre atmosfären som funktion av höjd över havet. Heldragen linje visar typiska värden på massdensiteten vid solmaximum och streckad linje visar typiska värden för solminimum. Densiteten är från modellen NRL-MSISE00 [56].

En satellit i låg jordbana påverkas av atmosfären genom friktion (eng. *drag*) vilket leder till en inbromsning och att satelliten faller närmare jorden. Atmosfärfriktion utgör generellt den största kraften en satellit utsätts för i låga jordbanor, utöver gravitationen [57]. Accelerationen som satelliten utsätts för genom atmosfärfriktion kan uttryckas som

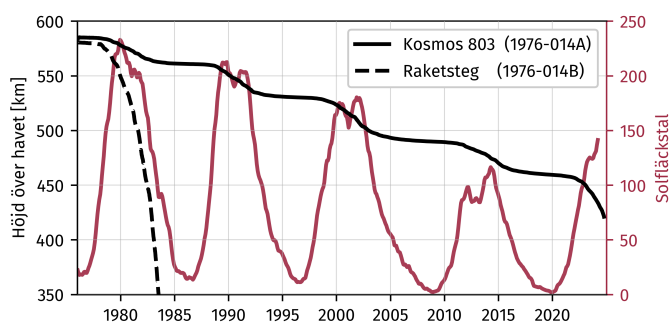
$$\mathbf{a}_f = -\frac{1}{2} \frac{C_D A}{m} \rho v_{\text{atm}} \mathbf{v}_{\text{atm}}. \quad (3.1)$$

Accelerationen beror på satellitens hastighet relativt atmosfären $\mathbf{v}_{\text{atm}}$, atmosfärens densitet ρ och satellitens luftmotståndskoefficient C_D , area mot luftströmmen A och massa m [58]. Det är vanligt att definiera en invers ballistisk koefficient för satelliten

$$B = \frac{1}{\beta} = \frac{C_D A}{m} \quad (3.2)$$

som beskriver till vilken grad satelliten påverkas av atmosfärfriktion [57]. På motsvarande sätt beskriver den ballistiska koefficienten β satellitens förmåga att övervinna atmosfärfriktion.

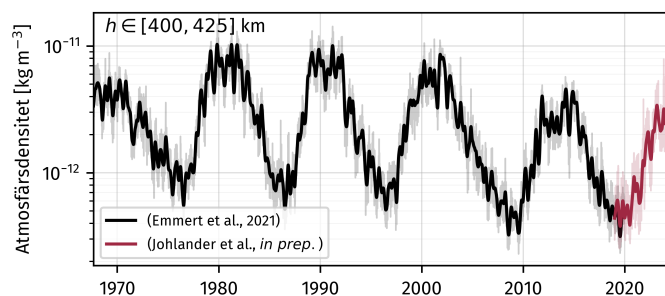
Tiden det tar för en satellit att tappa sin banhöjd och återinträda i atmosfären bestäms endast delvis av höjden på omloppsbanan. En satellit återinträder i atmosfären snabbare om den placeras i omloppsbanan under solmaximum då densiteten är högre under dessa perioder. Utöver detta bromsas en satellit med låg invers ballistisk koefficient in till en mindre grad än en satellit med högre invers ballistisk koefficient [59]. Ett exempel på detta kan vi se i Figur 11 som visar två objekt i omloppsbanan med helt olika ballistiska koefficienter. Satelliten Kosmos 803 sköts upp i februari 1976 och användes som mål för test av antisatellitvapen. Raketsteget som bar Kosmos 803 till sin bana lämnades på ungefär samma höjd som satelliten. Som vi kan se i Figur 11 startade båda objekten på samma höjd men på grund av olika ballistiska koefficienter utvecklades deras omloppsbanor på helt olika sätt. Raketstegets höjd minskade snabbt efter uppskjutningen och återinträdde i atmosfären i november 1983 och var därför i omloppsbanan i mindre än åtta år. Kosmos 803 själv, som hade en betydligt högre ballistisk koefficient, föll mer långsamt ner mot jorden, med en takt på höjdminskningen som är tydligt kopplad till solcykeln, och är i skrivande stund fortfarande i omloppsbanan, se Figur 11.



Figur 11: Utveckling av omloppsbanorna för satelliten Kosmos 803 och dess raketsteg som lades i samma omloppsbanor men hade olika ballistiska koefficienter. Helden svarta linjen visar orbitalhöjd för den sovjetiska satelliten Kosmos 803 och den streckade linjen visar raketsteget som placerade satelliten i sin bana. Beteckningarna från kommittén för rymdforskning (COSPAR) visas i parentes. Orbitaldata från 18:e skvadronen i USA:s rymdstyrka, space-track.org. Den röda linjen visar solfläckstalet på högra y-axeln.

Eftersom omloppsbanor påverkas så starkt av atmosfärsfriktion är det viktigt för satellitoperatörer att ha tillgång till en nulägesbild och prognoser av atmosfären [60]. Detta försvåras av atmosfärsdensitetens höga grad av beroende på rymdväder. Operationellt används en rad modeller för atmosfärsdensitet [61]. Dessa modeller kan bygga på direkta mätningar av densiteten, som *Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Radar* (MSIS)-modellerna från amerikanska *Naval Research Laboratory* (NRL) [56, 62], eller från satellitbanor som Jaccia-Bowman-modellen [63] och *High Accuracy Satellite Drag Model* (HASDM)-modellen [64] från amerikanska flygvapnet. Dessa modeller kräver generellt värden på både sol- och geomagnetisk aktivitet.

Det är också möjligt att bestämma atmosfärsdensiteten genom att mäta hur satellitbanor påverkas. Den takt som satelliter faller mot jorden bestäms av atmosfärsdensiteten, se Figur 11. Genom att använda en atmosfärsmodell för att bestämma ballistiska koefficienter hos rymdobjekt kan atmosfärens massdensitet sedan härledas från inmätningar av rymdobjekten. Detta har gjorts av bland andra Emmert et al. [65] för att få historiskt data över atmosfärsdensiteten i låga jordbanor vilket visas i Figur 12 där det också går att se den tydliga påverkan från solens 11-årscykel. FOI arbetar med ett forskningsprojekt för att använda en liknande metod för att i realtid bestämma atmosfärsdensiteten [66]. Detta kan potentiellt användas i operationer för att till exempel förbättra bedömningar av kollisionsrisker i omloppsbanan.



Figur 12: Atmosfärens massdensitet mellan 400 och 425 kilometer medlat över jorden. Den svarta kurvan visar resultat från Emmert et al. [65] och den röda kurvan visar resultat från FOI:s forskning som kan användas i realtid [66].

3.5 Satellitsystem

Strålningen som satellitsystem utsätts för består av fotoner, neutroner, protoner, elektroner och joner [67]. Strålmiljön av laddade partiklar i rymden kring jorden kommer i tre huvudsakliga kategorier

- galaktisk kosmisk strålning,
- strålningsbältena kring jorden och
- strålning från solstormar.

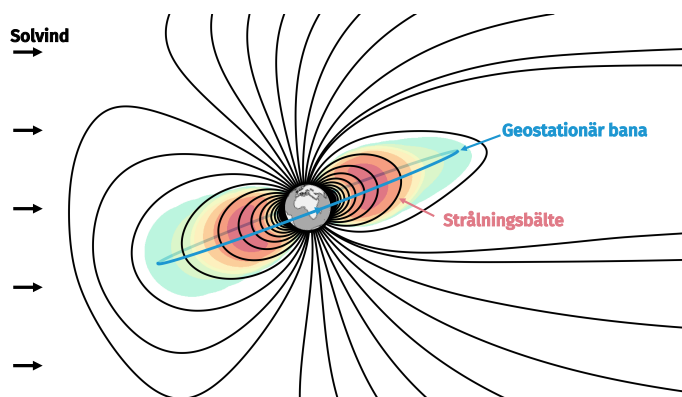
Galaktisk kosmisk strålning består huvudsakligen av protoner och tyngre joner med energier över en gigaelektronvolt och har sitt ursprung utanför solsystemet [68]. Den kosmiska strålningen påverkas av solens magnetfält och är generellt starkare under solminima. Strålningen fångad i strålningsbältena består av både elektroner med energier upp till cirka fem megaelektronvolt och protoner upp till cirka 100 megaelektronvolt som accelereras i jordens magnetosfär [69]. Strålningen från solstormar, som beskrivs i Kapitel 2, består huvudsakligen av protoner med energier upp till ungefär en gigaelektronvolt. Dessa typer av joniserande strålning kan ha olika negativa effekter på satelliter i omloppsbana [70].

Effekterna från strålning kan ta sig olika uttryck på satelliter [1, 67]. Dessa kan brytas ner i tre kategorier

- kumulativ dos,
- *single event effects* och
- elektrisk uppladdning

vilka alla orsakas av strålning från olika partiklar med olika energier. Vi går kortfattat genom effekterna nedan.

Kumulativ dos innebär att den totala mängden joniserande strålning över tid påverkar komponenter i satelliten. Detta sker huvudsakligen genom högenergetiska protoner och elektroner från solstormar och strålningsbältena. Framförallt elektronik ombord satelliter kan påverkas av strålning från solstrålningsstormar men även satelliters solpaneler degraderas över tid av strålningen och får ett förminskat effektuttag. Det är möjligt att skydda satelliter från effekterna av protoner och elektroner (eng. *shielding*), även om detta medför en ökad vikt och generellt endast skyddar mot strålning med lägre energier. [67]. Solstrålningsstormar kan bidra till att den kumulativa dosen byggs upp över tid, även om enstaka stormar har begränsad betydelse för den här typen av effekter. Däremot är oftast strålningsbältena största källan för den kumulativa dosen. Figur 13



Figur 13: Tvärsnitt av jordens magnetosfär med strålningsbältenas ungefärliga utsträckning och geostationär bana markerade. Anpassad efter [59]. Magnetfält från T96-modellen av Tsyganenko [40]. Färgen illustrerar strålningsnivå för protoner över 1 megaelektronvolt där röd färg betyder högre partikelflöde, från AP-8-modellen av Sawyer och Vette [71].

visar ett tvärsnitt av jordens magnetosfär och strålningsbältet för protoner som sträcker sig ut till geostationära omloppsbanor. Strålningen följer magnetfältslinjerna vilket betyder att satelliter i låga jordbanor som går över polerna och de i högre banor är mest utsatta för effekterna från kumulativ strålningsdos [59].

Single event effects är när en enskild laddad partikel träffar och ändrar tillståndet i elektronik. Dessa effekter orsakas främst av protoner eller tyngre joner från solstormar och kosmisk strålning. Effekterna från strålningen kan vara temporära där ett fel uppstår i omborddatorns minne men kan också orsaka mer långvarig eller permanent skada i elektroniken [67]. Denna typ av strålning kan också orsaka problem för andra system ombord satelliten som stjärnkameror eller kameror där strålningen kan jonisera spår i sensorerna [59].

Satelliter i omloppsbanor är av naturliga skäl elektriskt ojordade och laddas därför upp av rymdmiljön som omger dem. En satellits elektriska potential bestäms av en balans av strömmar från laddade partiklar från strålning och plasma samt extrem ultraviolett strålning från solen som genom den fotoelektriska effekten slår ut elektroner från satellitens yta [72]. På grund av olika materialegenskaper hos olika komponenter kan potentialskillnader uppstå inom satelliten vilket i sin tur kan leda till elektriska urladdningar som kan skada elektronik ombord. Solpaneler kan vara särskilt utsatta för dessa urladdningar [59, 73].

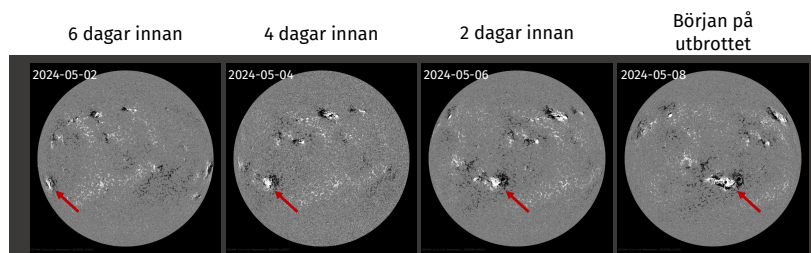
Det finns därmed flera typer av strålning som måste beaktas i rymdmiljön. Strålningsbältena kan förstärkas vid geomagnetiska stormar [74], men den typen som varierar mest över tid och tydligast relaterar till rymdväder är den från solstrålningsstormar. Beroende på energierna hos strålningen från solen kan den bidra till alla tre typer av effekter på satellitsystem.

4 Prognoser av solstormar

Prognoser för rymdväder är bland annat viktiga för satellitoperatörer. Prognoserna görs genom analys och modellering baserat på data från en rad mark- och rymdbaserade sensorer. För att förutsäga hur rymdvädersförhållandena kommer att se ut vid jorden krävs modellering av fysikaliska processer och komplexa interaktioner från solens yta, genom interplanetära rymden, och genom jordens magnetosfär.

4.1 Solflammar

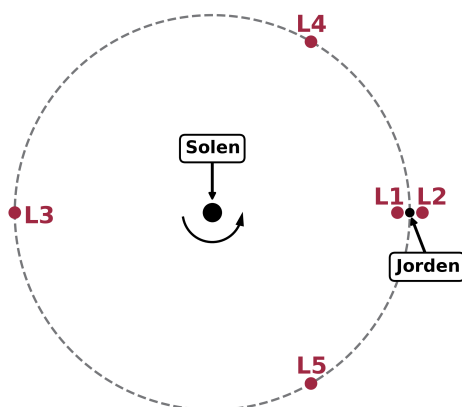
Allt rymdväder har sitt ursprung i solens magnetfält och prognoser av solstormar börjar därför med observationer av solen. En av de primära metoderna för att förutsäga solutbrott är att använda magnetogram, som är kartor över magnetfältet på solens yta. Magnetogram erhålls från magnetografer som mäter styrkan och riktningen av magnetfältet på solens yta, se till exempel Figur 3b. Prognoserna för sannolikhet för ett solutbrott görs ofta med maskininlärning och statistiska metoder som är tränade med historiska magnetogram [75]. Algoritmerna tränas på ett antal parametrar för varje aktiv region för att få en sannolikhet för att regionen ska ge upphov till en solflamma [76] inom en viss tid. Den totala sannolikheten för en solflamma är sedan en kombination av alla aktiva regioner på den sida av solen som är synliga från jorden.



Figur 14: Solmagnetogram från SDO från olika tidpunkter innan ett solutbrott. Den aktiva region som gav upphov till flest solflammar och koronamassutkastningar, med designering 13664, visas med en röd pil. *Courtesy of NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams.*

Likt alla himlakroppar i solsystemet roterar solen kring sin egen axel. Solens rotation är annorlunda från jordens i och med att de yttre lagren av stjärnan inte roterar lika snabbt överallt. Vid solens ekvator tar det ungefär 26 dagar att fullfölja ett varv relativt jorden, medan det tar nästan 38 dagar per varv vid solens poler [77]. Eftersom solfläckar oftast uppstår på högre latituder än solens ekvator brukar en rotationsperiod på ungefär 27 dagar antas, vilket kallas en Carringtonrotation [77]. Denna rotation sätter begränsningar på hur långt in i framtiden prognoser för rymdväder kan utföras. Figur 14 visar magnetogram på solen från maj 2024. Vi kan se hur en stor aktiv region långsamt kommer in i synfältet från jorden och är först synlig cirka sex dagar innan den är riktad mot jorden. Det är också tydligt från figuren hur den aktiva regionen utvecklas under tiden den är synlig. Den markerade aktiva regionen gav upphov till en stor mängd solflammar och koronamassutkastningar [78]. För att avhjälpa denna inneboende begränsning i hur lång tid före rymdvädersprognoser kan göras är det möjligt att sätta rymdfarkoster i omloppsbana kring solen. Detta kan ge tidigare förvarning för stora aktiva regioner. Exempel på detta är den amerikanska missionen STEREO [79] som sköts upp 2006. Den europeiska rymdorganisationen ESA planerar också en rymdvädersmission vid namn Vigil [80, 81] som kommer att placeras i den femte Lagrangepunkten (L5) som befinner sig efter jorden i dess omloppsbana kring solen vilket illustreras i Figur 15. Lagrangepunkter är punkter där gravitationen från två himlakroppar, i det

här fallet solen och jorden, samverkar och där ett mindre objekt kan hålla relativ position utan aktiv styrning.

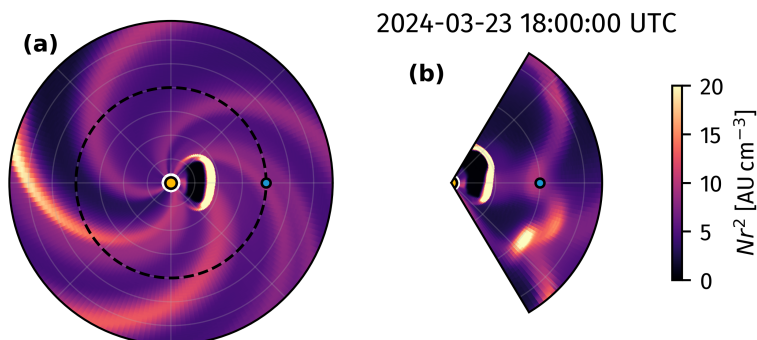


Figur 15: Jordens omloppsbana kring solen med Lagrangepunkterna i jord-sol-systemet utritade. Avstånden mellan jorden och L1 respektive L2 är överdrivna för tydlighet [82]. Solen roterar moturs i figuren, vilket även är riktningen för jordens omloppsbana.

4.2 Solstrålningsstormar

Ultraviolett- och röntgenstrålning från solutbrott färdas obehindrat genom rymden så länge solflamman är synlig från jorden. Strålning i form av laddade partiklar och plasmamoln från koronamassutkastningar måste däremot färdas genom den interplanetära rymden och kan hindras på olika sätt innan de når jorden. Prognoser av solstrålningsstormar kräver därför kunskap om hur de laddade partiklarna accelereras och hur de transporteras genom den interplanetära rymden, vilket sammantaget gör dessa prognoser mycket utmanande.

Vid solstormar accelereras protoner till mycket höga energier nära solens yta och färdas därefter genom solsystemet längs magnetfältet i solvinden [34]. För att strålningen ska nå jorden och orsaka en solstrålningsstorm krävs därför att en magnetfältslinje knyter ihop solflamman eller koronamassutkastningen med jorden. Det är fullt möjligt att solutbrottet som genererar strålningen sker på solens baksida och inte syns från jorden [83] vilket gör prognoser av dessa stormar omöjliga utan rymdfarkoster i omloppsbana kring solen.

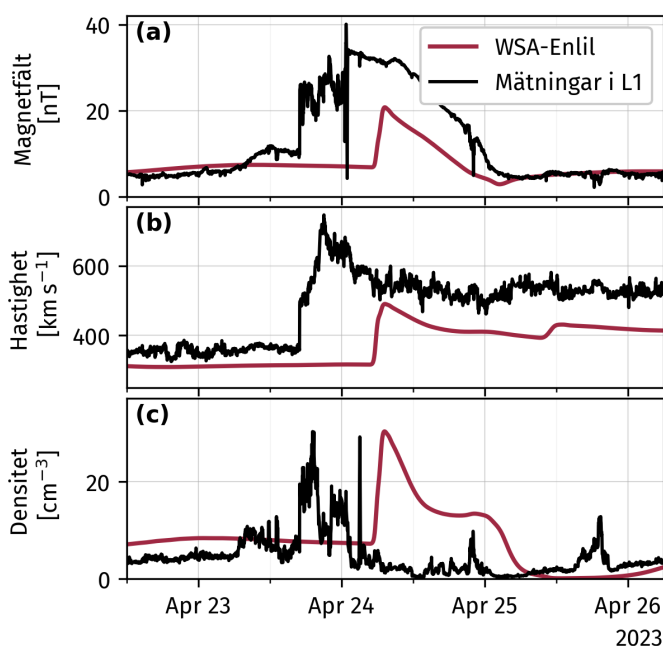


Figur 16: Simulering av solvinden med modellen WSA-Enlil [84] under en koronamassutkastning. (a) Normaliserad partikeldensitet i ett tvärsnitt i planet för jordens omloppsbana. Jorden är markerad med en blå punkt och dess omloppsbana med en streckad svart linje. (b) Ett tvärsnitt sett från sidan i ett plan som inkluderar jorden.

Det finns ett flertal prognosmodeller för energetiska protoner från solen [85]. Vissa av dessa modeller baseras på empiriska samband mellan strålningsnivåer vid jorden och egenskaper hos solflammar och koronamassutkastningar [till exempel, 86]. Andra, fysikbaserade, modeller för solstrålningsstormar är i nuläget främst framtagna för forskningssyften och är inte ännu operationellt implementerade. Sådana modeller behöver modellera accelerationsprocesserna, solutbrottets utveckling och magnetfältet mellan källan och jorden. Dessa modeller kan använda den amerikanska modellen WSA-Enlil (Wang-Sheeley-Arge) eller europeiska EUHFORIA (*European Heliospheric FORecasting Information Asset*), vilka är fysikbaserade modeller för solvinden och koronamassutkastningar. Figur 16 visar två tvärsnitt av en tredimensionell simulering av solvinden under en koronamassutkastning med WSA-Enlil i mars 2024. Vid tiden som visas i Figur 16 uppnådde strålningsnivåerna vid jorden en solstrålningsstorm av styrkan S2.

4.3 Geomagnetiska stormar

Att göra prognoser för geomagnetiska stormar handlar till stor del om att förutsäga solvinden och koronamassutkastningar. För detta har rymdvädersoperatörer en rad olika verktyg och instrument i rymden och på jorden. Eftersom det är osäkert om en aktiv region kommer att ge upphov till en koronamassutkastning görs prognoser för geomagnetiska stormar oftast efter att ett utbrott har registrerats på solens yta. Viktiga parametrar för koronamassutkastningen är dess hastighet och i vilken riktning den propagerar ut i solsystemet, vilket bestäms med bland annat koronagrafer [87]. Rikningen på magnetfältet i koronamassutkastningen är en annan mycket viktig parameter men går i nuläget inte att beräkna eller observera förrän koronamassutkastningen når en rymdsond. Koronamassutkastningar har generellt högre hastighet än den övriga solvinden vilket betyder att de bromsas in och omdirigeras till viss grad. För att uppskatta denna interaktion mellan koronamassutkastningar och solvinden används ofta, likt för solstrålningsstormar, modeller för solvinden, se Figur 16. Det tar generellt en koronamassutkastning en eller några dagar att nå jorden. I detta steg är målet med prognoserna att bestämma om och när koronamassutkastningen faktiskt når jorden och hur stark den kommer att vara [78].



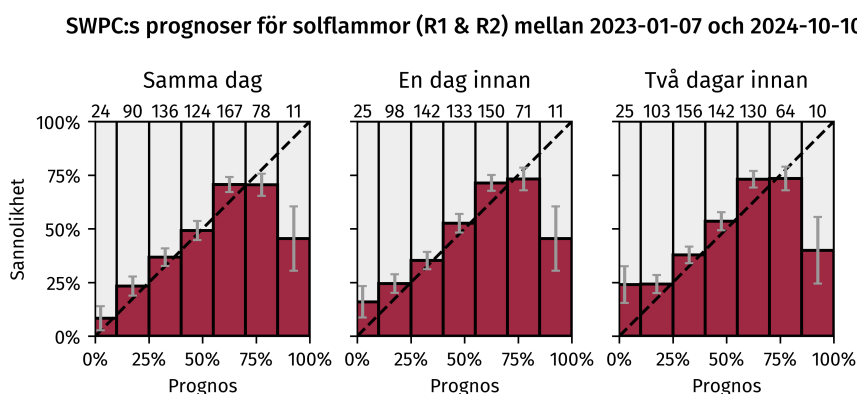
Figur 17: Jämförelse mellan en prognosmodell för en koronamassutkastning i rött och faktiska uppmätta värden från rymdfarkosten *Wind* i svart. Rymdfarkosten befinner sig i den första Lagerangepunkten, L1.

Efter denna första prognos så kan en förvarning på att utkastningen kommer att träffa jorden fås från de rymdfarkoster som övervakar solvinden från L1 mellan jorden och solen, se Figur 15. Dessa rymdfarkoster inkluderar de amerikanska *Wind*, *Advanced Composition Explorer (ACE)* och *Deep Space Climate Observatory (DSCOVR)* samt den nya indiska rymdfarkosten *Aditya-L1*. Från L1 tar det cirka en timme för koronamassutkastningen att nå jordens magnetosfär där den kan utlösa geomagnetiska stormar. Figur 17 visar en sådan prognosmodell från WSA-Enlil-modellen jämfört med data från *Wind* i L1 [88, 89]. I det här fallet anlände koronamassutkastningen cirka 13 timmar tidigare än prognosen förutsåg, vilket är en relativt typisk osäkerhet vid dessa prognoser [90].

Hur stark en geomagnetisk storm kommer att bli beror på hastigheten och partikeldensiteten men är också mycket starkt beroende av styrkan och riktningen på magnetfältet i koronamassutkastningen och den kringliggande solvinden [91, 18]. I fallet som visas i Figur 17 orsakade kombinationen av den höga hastigheten och partikeldensiteten samt riktningen på magnetfältet en geomagnetisk storm av klass G4 [92]. Fysikbaserade simuleringsprogram kan modellera interaktionen mellan solvinden och jordens magnetosfär i realtid för att utvärdera det resulterande rymdvädret på jorden, [till exempel 93, 94]. Dessa modeller är relativt beräkningstunga och kan inte modellera alla fysikaliska processer som styr geomagnetiska stormar [95], därför används även empiriska modeller som använder historiska data från solvinden och maskininläring för att göra prognoser på resulterande geomagnetiska stormar från bland annat koronamassutkastningar [till exempel 96, 97]. Prognosmodeller som baseras på observationer från L1 är generellt relativt pålitliga men är begränsade till tiden det tar solvinden att nå jorden från L1.

4.4 Pålitlighet av prognoser

Alla prognosmodeller för rymdväder behöver valideras för att få ett mått på pålitlighet och precision. NOAA:s egna rymdvädersprognoser, som även används av Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) som en del av det civila varningssystemet för solstormar [98, 6], har utförligt validerats och testats under perioden 1999-2013 [99]. FOI sparar sedan 2023 NOAA:s prognoser för solstormar på R, S och G-skalan i sin interna databas för rymdlägesbild: El Corazon [13]. Prognoserna som sparas är de som utfärdas 00:30 universell tid och täcker innevarande dag, en dag senare och två dagar senare [100]. Resultaten av en validering av detta dataset ger i stort sett samma bild av NOAA:s egen långtidsanalys och presenteras nedan.



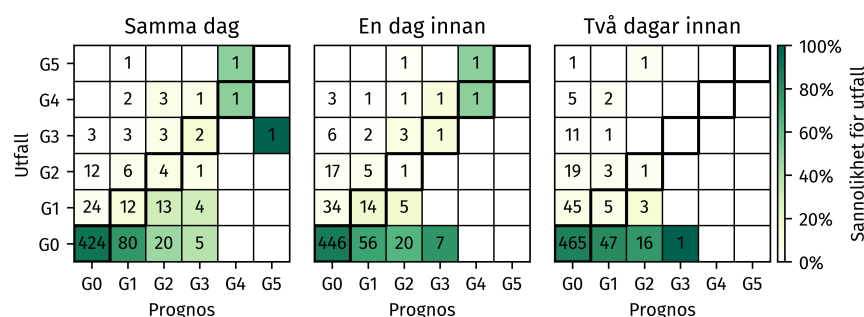
Figur 18: Prognoser för solflammar (R1-R2). Den horisontella axeln i de tre panelerna visar sannolikhet för en solflamma enligt prognosen för samma dag, nästa dag och om två dagar respektive medan de vertikala axlarna visar andel dagar där utfallet var en solflamma. Antalet dagar som ingår i varje stapel indikeras med siffror ovanför.

Figur 18 visar utfallet för prognoser av solflammar som ger upphov till avbrott i radiokommunikation av klasserna R1 eller R2, alltså solflammar i M-klass. SWPC förlitar sig främst på manuell klassificering av aktiva regioner, tabeller och *know-how* hos operatören [101]. Prognoserna är pro-

babilistiska och ger en sannolikhet att en solflamma kommer att inträffa under en 24-timmars period vilket visas på de horisontella axlarna i figuren. De vertikala axlarna visar utfallet, alltså i vilken andel av dagarna som en solflamma av den specificerade klassen faktiskt uppmättes. Vi kan tydligt se att prognoserna är mycket nära utfallet och att de därför med hög precision kan förutsäga sannolikheten för en solflamma, även om den exakta tidpunkten inte går att förutsäga.

Solstrålningsstormar sker betydligt mer sällan än de andra typerna och prognoser av dessa är därför svårare att validera. Generellt sett är både tidpunkt och styrka för solstrålningsstormar utmanande att förutsäga och prognoserna är kopplade till stora osäkerheter. Prognoser från NOAA visar däremot över lång tid att det går med viss säkerhet att förutsäga sannolikheten för att en solstrålningsstorm av någon stryka kommer att ske [99].

SWPC:s prognoser för geomagnetiska stormar mellan 2023-01-07 och 2024-10-10



Figur 19: Utfallsmatris för NOAA:s prognoser av geomagnetiska stormar på G-skalan. Den horisontella axeln i de tre panelerna visar prognoser för G-skalan för samma dag, nästa dag och om två dagar respektive medan de vertikala axlarna visar det faktiska utfallet. Antalet dagar i varje matrisfält är indikerat med en siffra och färgen visar sannolikhet för utfallen för en given prognos.

För geomagnetiska stormar tillhandahåller SWPC både probabilistiska och deterministiska prognoser. De deterministiska prognoserna är den huvudsakliga produkten och här ges endast ett värde på G-skalan som är en bästa uppskattning för det högsta värdet som kommer uppnås över dagen. Figur 19 visar SWPC:s prognoser för geomagnetiska stormar på G-skalan tillsammans med utfallet. Vi kan direkt se att även prognoser utfärdade samma dag är relativt osäkra, med en stor spridning i utfallsmatrisen. För en och två dagar fram i tiden är prognoserna ännu mer osäkra. Som vi kan se i Figur 19 inträffade två dagar med en G5-storm, nämligen 10-11 maj, 2024 [102]. Prognoserna som utfärdades i början på de dagarna förutspådde G1 respektive G4, vilket visar svårigheterna med att förutspå både vilken tid koronamassutkastningen kommer att nå jorden och styrkan på den efterföljande stormen.

5 Försvarsmaktens behov och utveckling av rymdväderstjänst

5.1 Försvarsmaktens nuvarande prognoser

Försvarsmakten använder information om rådande och kommande rymdvädersförhållanden i planering och genomförande av operationer i sjö-, luft- och markdomänerna [103, 104]. Det är också viktigt med en nulägesbild av rådande rymdväder för att utvärdera störningar på tekniska system. Prognoser och varningar för rymdväder och solstormar distribueras idag på flera nivåer inom Försvarsmakten. Ansvariga för insamlandet av data och distribution inom organisationen är Försvarsmaktens Meteorologiska och Oceanografiska Centrum (METOCC). Underlaget kommer bland annat från brittiska *Met Office* och det amerikanska flygvapnet. Informationen kring rymdväder skickas idag ut till flera staber samt operationsledningen och utgår ifrån störningar på

- samband via kortvågsradio
- satellitkommunikation
- satellitbaserad positionering, navigation och tidsangivelse.

Prognoserna inriktar sig därmed på direkta effekter på operationskritiska system snarare än detaljerade beskrivningar av solens aktivitet eller på NOAA:s kategorier av solstormar som diskuteras i Kapitel 2.

Innehållet och utformningen av rymdvädersprognoserna skiljer sig åt mellan olika avsedda mottagare. Målbilden för tjänsterna är alltid att de snabbt ska ge en översikt av relevant information för beslutsunderlag utan att ge för mycket detaljer. En utmaning ligger i att utforma lättförståeliga produkter som samtidigt förmedlar all nödvändig information, vilket är ett pågående utvecklingsarbete inom Försvarsmakten.

5.2 Framtida behov och rekommendationer

Inom en snar framtid planerar Försvarsmakten att operera egna satelliter och kommer då att möta en ny operationsmiljö i rymddomänen. Detta ställer nya krav inom rymdlägesbild och rymdväder på organisationen för att försäkra handlingsfrihet i rymddomänen. Som satellitoperatör kan Försvarsmakten behöva beakta nya aspekter av rymdvädet som inte täcks in av dagens prognoser och tjänster. Två sådana aspekter är atmosfärsfriktion och strålningsförhållanden i rymden.

Dessa kan i sin tur påverka en rad system viktiga för operationer i rymddomänen som:

- **Manövrering och positionsstabilisering**
Förändrad densitet påverkar satellitens bana och förutsättningar för att upprätthålla positionsstabilisering. Detta medför en särskilt stor påverkan på satelliter som befinner sig i riktigt låga jordbanor, vilket kan vara specifikt aktuellt för spanande system som kräver hög peknoggrannhet.
- **Övervakning och inmätning av rymdobjekt**
Solstormar gör att baninformationen degraderas snabbare. Därför krävs mer frekvent inmätning av objekt av intresse för att upprätthålla aktuell baninformation under en storm. Det finns också större risk att "tappa" objekt i katalogen, något som hänt historiskt vid större solstormar. Satelliter i olika banor påverkas olika mycket, och det är främst låga omloppsbanor som drabbas. Det finns därför behov att genom forskning och utveckling ta fram tillämpade modeller för realtidsprognoser för hur olika satelliters banor påverkas.

- **Kollisionsbedömningar**

Förändrade rymdvädersförhållanden gör att det blir svårare att göra kollisionsbedömningar med hög säkerhet. Solstormar höjer risken för oväntade kollisioner, och kan ställa högre krav på att genomföra förebyggande manövreringar för att undvika svårberäknliga kollisioner. Även detta ställer behov på bättre tillämpade modeller för hur rymdväder påverkar banorna.

- **Uppsändning av satelliter**

Satelliter kan påverkas även under uppsändning och idrifttagande då de riskerar att inte ha tillräckligt bränsle eller drivkraft för att nå önskad banhöjd.

- **Påverkan på satelliter, instrument och solpaneler**

Strålning från rymdväder kan tillfälligt störa ut funktionaliteten på satelliter samt till och med permanent skada instrument, datorer och solpaneler. Vid solstormar kan det finnas behov av att stänga av system på satelliten som inte är kritiska för operationer i ett så kallat *safe mode*. Organisationen kan också behöva förbereda för en temporär förlust av rymdförmågorna som berörs.

Dessa är alla viktiga delar i en operativ militär rymdlägesbild och kommer behöva tas i beaktning när Försvarmakten sänder upp och har operativa satelliter. Fortsatt arbete för att vidareutveckla rymdväderstjänster som är relevanta för användarna är viktigt. Det är viktigt att rätt nivå av information når olika användare, beroende på vilka system de är intresserade av. Denna utveckling kan exempelvis ske hos Försvarmakten i samarbete med FOI och institutet för rymdfysik (IRF). Det innebär både enklare prognoser för de som behöver en överblick och mer utförliga prognoser för andra.

6 Slutsatser

Rymdväder påverkar en lång rad militära och civila tekniska system på jorden samt i rymden. Den elvaåriga solcykeln styr solens aktivitet och påverkar sannolikheten för allvarliga solstormar. Utbrott på solen kan innebära en solflamma, en koronamassutkastning eller båda två. Dessa utbrott ger sedan upphov till bland annat röntgen-, och ultraviolett strålning, protoner och elektroner med hög energi samt plasma som när de når jorden kan ha negativa effekter på tekniska system.

Prognoser av solstormar är relativt osäkra. Olika prognosmetoder används beroende på vilken typ av solstorm som har skett och vilka effekter som är intressanta. För en del effekter, som orsakas av solflammar och solstrålningsstormar, är det i dagsläget endast möjligt att göra probabilistiska prognoser där sannolikheten, med viss osäkerhet, för solstormar bestäms. För geomagnetiska stormar kan prognoser med viss säkerhet utfärdas med cirka en timmes förvarning. Prognoser längre in i framtiden har stora inneboende osäkerheter. Utöver prognoser, finns det ett värde i att ha en uppdaterad nulägesbild av rymdvädret. Detta gör det möjligt att först utesluta rymdväder vid potentiella störningar på satelliter och andra militära system.

Försvarsmakten hanterar idag rymdväderprognoser och -tjänster som relaterar till störningar på radiokommunikation, satellitkommunikation och satellitbaserad positionering, navigering och tid. När myndigheten i framtiden blir en satellitägare och -operatör kommer nya rymdväderstjänster att behövas. Vi identifierar framtida behov av rymdväderstjänster som relaterar till atmosfärsfriktion i låga jordbanor och strålningsförhållanden i rymden som särskilt relevanta.

Därför rekommenderar vi att Försvarsmakten, som en del i att etablera en operativ rymdlägesbild och rymdoperationscentral, i framtiden kompletterar de befintliga tjänsterna inom rymdväder med de ovan nämnda aspekterna. Vi rekommenderar vidare fortsatt arbete för att identifiera lämpliga data- och prognoskällor samt att utforska möjligheter för samarbete med andra myndigheter, akademien samt kommersiella aktörer inom rymdlägesbild och rymdväder.

Litteraturförteckning

- [1] S. Lindström och M. Waldenvik. Rymdväder - effekter på militära och civila system. Rapport FOI-R--1464--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI (2004).
- [2] S. Lindström och M. Waldenvik. Prognosmetoder för rymdväder. FOI Memo 1851, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI (2006).
- [3] S. Lindström. En rymdvädertjänst åt Försvarsmakten. Ett förslag till utformning. Rapport FOI-R--2569--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI (2008).
- [4] S. Lindström och M. Waldenvik. Behov och verktyg för rymdväderprognos. FOI Memo 2264, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI (2008).
- [5] L. Rosenqvist, T. Fristedt, A. P. Dimmock, P. Davidsson, R. Fridström, J. O. Hall, L. Hesselow, J. Kjäll, M. Y. Smirnov, D. Welling och P. Wintoft. 3D Modeling of Geomagnetically Induced Currents in Sweden—Validation and Extreme Event Analysis. *Space Weather*, 20(3):e2021SW002988 (2022). <http://dx.doi.org/10.1029/2021SW002988>
- [6] L. Rosenqvist, A. Johlander, S. Molenkamp och F. Thunström. Larmtjänst för extrema solstormar – stöd till MSB. FOI Memo 8439, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI (2024).
- [7] A. Johlander. Konferensrapport European Space Weather Week 2023. FOI Memo 8481, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI (2024).
- [8] Doktrin: Gemensamma operationer. FM2018-18369:30, Försvarsmakten (2020).
- [9] Rymdens roll i ett nytt säkerhetspolitiskt läge - Sveriges försvars- och säkerhetsstrategi för rymden. Regeringskansliet - Försvarsdepartementet (2024).
- [10] NATO's overarching Space Policy. Nato (2019). https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_190862.htm
- [11] Tillsammans försvarar vi Sverige: Försvarsmaktens årsredovisning 2023. FM2023-9190:34, Försvarsmakten (2024).
- [12] M. Balkander. Sverige storsatsar – ska skjuta upp militära satelliter. *Göteborgs-Posten* (2024). <https://www.gp.se/39922133-6335-432a-96fb-37d80c5eafc8>
- [13] S. Papadogiannakis och A. Johlander. Slutrapport - genomfört arbete inom rymdlägesbild 2021-2023. FOI Memo 8362, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI (2023).
- [14] S. Papadogiannakis, K. Andersson, M. Dahlman, R. Farid, E. Gröndahl, L. Mattsson, M. Nylund, O. Rasmusson och R. Ragnarsson. Karakterisering av satelliter: En komponent i den militära rymdlägesbilden. Rapport FOI-R--5507--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI (2023).
- [15] M. Nylund, P. Hägg, B. Jakobsson, R. Farid, R. Ragnarsson, O. Rasmusson, S. Papadogiannakis och A. Tryblom. Inmätning av rymdobjekt: Rymdlägesbild med egen rådighet. Rapport FOI-R--5325--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI (2022).
- [16] D. H. Hathaway. The Solar Cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 12(1):4 (2015). <http://dx.doi.org/10.1007/lrsp-2015-4>

- [17] E. R. Priest. Chapter 7 - Magnetohydrodynamics and Solar Dynamo Action. I O. Engvold, J.-C. Vial och A. Skumanich, redaktörer, *The Sun as a Guide to Stellar Physics*, 239–266. Elsevier (2019). ISBN 978-0-12-814334-6. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-814334-6.00009-1>
- [18] T. Pulkkinen. Space Weather: Terrestrial Perspective. *Living Reviews in Solar Physics*, 4(1):1 (2007). <http://dx.doi.org/10.12942/lrsp-2007-1>
- [19] H. W. Babcock. The Topology of the Sun's Magnetic Field and the 22-Year Cycle. *The Astrophysical Journal*, 133:572 (1961). <http://dx.doi.org/10.1086/147060>
- [20] The observation of sunspots | UNESCO Courier | Find Articles at BNET. UNESCO (1988). https://web.archive.org/web/20110702095337/http://findarticles.com/p/articles/mi_m1310/is_1988_Oct/ai_6955852/
- [21] D. V. Hoyt och K. H. Schatten. Group Sunspot Numbers: A New Solar Activity Reconstruction. *Solar Physics*, 181(2):491–491 (1998). <http://dx.doi.org/10.1023/A:1005056326158>
- [22] D. Nandy. Progress in Solar Cycle Predictions: Sunspot Cycles 24–25 in Perspective. *Solar Physics*, 296(3):54 (2021). <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-021-01797-2>
- [23] M. Miesch. Solar Cycle Progression Updated Prediction (Experimental): Validation Document. NOAA Space Weather Prediction Center (2024). <https://testbed.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression-updated-prediction-experimental>
- [24] E. I. Tanskanen, T. I. Pulkkinen, A. Viljanen, K. Mursula, N. Partamies och J. A. Slavin. From space weather toward space climate time scales: Substorm analysis from 1993 to 2008. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116(A5) (2011). <http://dx.doi.org/10.1029/2010JA015788>
- [25] T. Asikainen och J. Mantere. Prediction of even and odd sunspot cycles. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 13:25 (2023). <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2023024>
- [26] A. O. Benz. Flare Observations. *Living Reviews in Solar Physics*, 5(1):1 (2008). <http://dx.doi.org/10.12942/lrsp-2008-1>
- [27] B. Vršnak, D. Sudar och D. Ruždjak. The CME-flare relationship: Are there really two types of CMEs? *Astronomy & Astrophysics*, 435(3):1149–1157 (2005). <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20042166>
- [28] D. F. Webb och T. A. Howard. Coronal Mass Ejections: Observations. *Living Reviews in Solar Physics*, 9(1):3 (2012). <http://dx.doi.org/10.12942/lrsp-2012-3>
- [29] The NOAA space weather scales. I *The Sun and Space Weather*, 193–200. Springer Netherlands, Dordrecht (2002). ISBN 978-0-306-48211-3. http://dx.doi.org/10.1007/0-306-48211-8_10
- [30] SWPC Data Service Archive. <ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>. [Datum för åtkomst: 2024-08-07].
- [31] J. Matzka, C. Stolle, Y. Yamazaki, O. Bronkalla och A. Morschhauser. The Geomagnetic *Kp* Index and Derived Indices of Geomagnetic Activity. *Space Weather*, 19(5):e2020SW002641 (2021). <http://dx.doi.org/10.1029/2020SW002641>
- [32] J. W. Reep och K. J. Knizhnik. What Determines the X-Ray Intensity and Duration of a Solar Flare? *The Astrophysical Journal*, 874(2):157 (2019). <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ab0ae7>

- [33] Laboratory for Atmospheric and Space Physics. University of Colorado Boulder and Space Weather Technology, Research, and Education Center - SWx TREC Space Weather Data Portal. <http://dx.doi.org/10.25980/NMFX-XX89>. [Datum för åtkomst: 2024-09-04].
- [34] M. Desai och J. Giacalone. Large gradual solar energetic particle events. *Living Reviews in Solar Physics*, 13(1) (2016). <http://dx.doi.org/10.1007/s41116-016-0002-5>
- [35] D. V. Reames. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere. *Space Science Reviews*, 90(3):413–491 (1999). <http://dx.doi.org/10.1023/A:1005105831781>
- [36] V. Lanabere, A. P. Dimmock, L. Rosenqvist, L. Juusola, A. Viljanen, A. Johlander och E. Odelstad. Analysis of the Geoelectric Field in Sweden Over Solar Cycles 23 and 24: Spatial and Temporal Variability During Strong GIC Events. *Space Weather*, 21:e2023SW003588 (2023). <http://dx.doi.org/10.1029/2023SW003588>
- [37] T. Bridgman. NASA Scientific Visualization Studio | Halloween Solar Storms - 2003. <https://svs.gsfc.nasa.gov/3956/>. [Datum för åtkomst: 2024-09-30].
- [38] A. Pulkkinen, S. Lindahl, A. Viljanen och R. Pirjola. Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: Geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system. *Space Weather*, 3(8) (2005). <http://dx.doi.org/10.1029/2004SW000123>
- [39] L. Rosenqvist, H. Opgenoorth, S. Buchert, I. McCrea, O. Amm och C. Lathuillere. Extreme solar-terrestrial events of October 2003: High-latitude and Cluster observations of the large geomagnetic disturbances on 30 October. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A9) (2005). <http://dx.doi.org/10.1029/2004JA010927>
- [40] N. A. Tsyganenko. Effects of the solar wind conditions in the global magnetospheric configurations as deduced from data-based field models (Invited). 389:181 (1996).
- [41] M. Menvielle och A. Berthelier. The K-derived planetary indices - Description and availability. *Reviews of Geophysics*, 29:415–432 (1991). <http://dx.doi.org/10.1029/91RG00994>
- [42] NOAA Space Weather Scales | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center. <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>. [Datum för åtkomst: 2024-09-06].
- [43] J. P. Eastwood, E. Biffis, M. A. Hapgood, L. Green, M. M. Bisi, R. D. Bentley, R. Wicks, L.-A. McKinnell, M. Gibbs och C. Burnett. The Economic Impact of Space Weather: Where Do We Stand? *Risk Analysis*, 37(2):206–218 (2017). <http://dx.doi.org/10.1111/risa.12765>
- [44] R. B. Horne. Rationale and requirements for a European space weather programme. I *Space Weather Workshop: Looking Towards a European Space Weather Programme*, 139–144. European Space Agency, ESTEC, Noordwijk (2003). <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=4feb08320a1228aea8b6f4235c8f85adb6831a19>
- [45] G. Sharpe och K. Rich. True Impacts of Space Weather on a Ground Force. *Air Land Sea Bulletin*, (2017-1):30–41 (2017). <https://usacac.army.mil/organizations/mccoe/call/publication/2017-1>
- [46] Satellite frequency bands. https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/Satellite_frequency_bands. [Datum för åtkomst: 2024-08-19].
- [47] J. Paziewski, P. Høeg, R. Sieradzki, Y. Jin, W. Jarmolowski, M. M. Hoque, J. Berdermann, M. Hernandez-Pajares, P. Wielgosz, H. Lyu, W. J. Miloch och R. Orús-Pérez. The implications of ionospheric disturbances for precise GNSS positioning in Greenland. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 12:33 (2022). <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2022029>

- [48] V. L. Pisacane. *Fundamentals of Space Systems*. Oxford University Press (2005). ISBN 978-0-19-516205-9.
- [49] T. E. Berger, M. J. Holzinger, E. K. Sutton och J. P. Thayer. Flying Through Uncertainty. *Space Weather*, 18(1):e2019SW002373 (2020). <http://dx.doi.org/10.1029/2019SW002373>
- [50] R. J. Smith. The Skylab Is Falling and Sunspots Are Behind It All. *Science*, 200(4337):28–33 (1978). <http://dx.doi.org/10.1126/science.200.4337.28>
- [51] T. E. Berger, M. Dominique, G. Lucas, M. Pilinski, V. Ray, R. Sewell, E. K. Sutton, J. P. Thayer och E. Thiemann. The Thermosphere Is a Drag: The 2022 Starlink Incident and the Threat of Geomagnetic Storms to Low Earth Orbit Space Operations. *Space Weather*, 21(3):e2022SW003330 (2023). <http://dx.doi.org/10.1029/2022SW003330>
- [52] M. D. Hejduk och D. E. Snow. The Effect of Neutral Density Estimation Errors on Satellite Conjunction Serious Event Rates. *Space Weather*, 16(7):849–869 (2018). <http://dx.doi.org/10.1029/2017SW001720>
- [53] J. L. Lean, T. N. Woods, F. G. Eparvier, R. R. Meier, D. J. Strickland, J. T. Correia och J. S. Evans. Solar extreme ultraviolet irradiance: Present, past, and future. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 116(A1) (2011). <http://dx.doi.org/10.1029/2010JA015901>
- [54] K. D. Cole. Joule Heating of the Upper Atmosphere. *Australian Journal of Physics*, 15(2):223–235 (1962). <http://dx.doi.org/10.1071/ph620223>
- [55] J. P. Thayer. High-latitude currents and their energy exchange with the ionosphere-thermosphere system. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 105(A10):23015–23024 (2000). <http://dx.doi.org/10.1029/1999JA000409>
- [56] J. M. Picone, A. E. Hedin, D. P. Drob och A. C. Aikin. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 107(A12):SIA 15–1–SIA 15–16 (2002). <http://dx.doi.org/10.1029/2002JA009430>
- [57] E. Doornbos, S. Bruinsma, M. D. Pilinski och B. Bowman. The Need for a Standard for Satellite Drag Computation to Improve Consistency Between Thermosphere Density Models and Data Sets. I *6th European Conference on Space Debris* (2013). <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc6/paper/130>
- [58] D. King-Hele. *Satellite Orbits in an Atmosphere. Theory and Applications*. (1987). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1987soaa.book.....K>
- [59] J. Wertz och W. J. Larson. *Space Mission Analysis and Design*. Space Technology Library. Microcosm Press, 3 utgåva (2005). ISBN 978-1-881883-10-4. <https://link.springer.com/book/9780792359012>
- [60] P. Magee, M. K. Jah och W. J. Larson. *Space Domain Awareness*. Cei (2022). ISBN 978-1-73316-792-5.
- [61] D. A. Vallado och D. Finkleman. A critical assessment of satellite drag and atmospheric density modeling. *Acta Astronautica*, 95:141–165 (2014). <http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.10.005>
- [62] J. T. Emmert, D. P. Drob, J. M. Picone, D. E. Siskind, M. Jones Jr., M. G. Mlynczak, P. F. Bernath, X. Chu, E. Doornbos, B. Funke, L. P. Goncharenko, M. E. Hervig, M. J. Schwartz, P. E. Sheese, F. Vargas, B. P. Williams och T. Yuan. NRLMSIS 2.0: A Whole-Atmosphere Empirical Model of Temperature and Neutral Species Densities. *Earth and Space Science*, 8(3):e2020EA001321 (2021). <http://dx.doi.org/10.1029/2020EA001321>

- [63] B. R. Bowman, W. K. Tobiska, F. Marcos och C. Huang. The Thermospheric Density Model JB2008 using New EUV Solar and Geomagnetic Indices. 37:367 (2008). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008cosp...37..367B>
- [64] M. F. Storz, B. R. Bowman, M. J. I. Branson, S. J. Casali och W. K. Tobiska. High accuracy satellite drag model (HASDM). *Advances in Space Research*, 36(12):2497–2505 (2005). <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2004.02.020>
- [65] J. T. Emmert, M. S. Dhadly och A. M. Segerman. A Globally Averaged Thermospheric Density Data Set Derived From Two-Line Orbital Element Sets and Special Perturbations State Vectors. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(8):e2021JA029455 (2021). <http://dx.doi.org/10.1029/2021JA029455>
- [66] A. Johlander, S. Papadogiannakis och O. Rasmusson. Thermospheric mass density derived from tracking space debris, FOI-S--6722--SE.
- [67] I. Jun, H. Garrett, W. Kim, Y. Zheng, S. F. Fung, C. Corti, N. Ganushkina och J. Guo. A review on radiation environment pathways to impacts: Radiation effects, relevant empirical environment models, and future needs. *Advances in Space Research*, S0273117724003296 (2024). <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2024.03.079>
- [68] P. Blasi. The origin of galactic cosmic rays. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 21(1):70 (2013). <http://dx.doi.org/10.1007/s00159-013-0070-7>
- [69] R. M. Millan och D. N. Baker. Acceleration of Particles to High Energies in Earth's Radiation Belts. *Space Science Reviews*, 173(1):103–131 (2012). <http://dx.doi.org/10.1007/s11214-012-9941-x>
- [70] A. D. P. Hands, K. A. Ryden, N. P. Meredith, S. A. Glauert och R. B. Horne. Radiation Effects on Satellites During Extreme Space Weather Events. *Space Weather*, 16(9):1216–1226 (2018). <http://dx.doi.org/10.1029/2018SW001913>
- [71] D. M. Sawyer och J. I. Vette. AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum. NSSDC/WDC-A-R/S-76-06 (1976). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19770012039>
- [72] H. B. Garrett. The charging of spacecraft surfaces. *Reviews of Geophysics*, 19(4):577–616 (1981). <http://dx.doi.org/10.1029/RG019i004p00577>
- [73] D. Ferguson, B. Vayner, J. Galofaro och G. B. Hillard. Arcing in LEO - Does the Whole Array Discharge? I 43rd ALAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reno, Nevada (2005). ISBN 978-1-62410-064-2. <http://dx.doi.org/10.2514/6.2005-481>
- [74] D. N. Baker, P. J. Erickson, J. F. Fennell, J. C. Foster, A. N. Jaynes och P. T. Verronen. Space Weather Effects in the Earth's Radiation Belts. *Space Science Reviews*, 214(1):17 (2017). <http://dx.doi.org/10.1007/s11214-017-0452-7>
- [75] E. Camporeale. The Challenge of Machine Learning in Space Weather: Nowcasting and Forecasting. *Space Weather*, 17(8):1166–1207 (2019). <http://dx.doi.org/10.1029/2018SW002061>
- [76] M. G. Bobra och S. Couvidat. Solar Flare Prediction Using SDO/HMI Vector Magnetic Field Data with a Machine-learning Algorithm. *The Astrophysical Journal*, 798:135 (2015). <http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/798/2/135>
- [77] R. K. Ulrich och J. E. Boyden. Carrington Coordinates and Solar Maps. *Solar Physics*, 235(1):17–29 (2006). <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-006-0041-5>

- [78] S. S. W. F. B. Muhlestein. The Evolution and Impact of Active Region 13664. <https://storymaps.arcgis.com/stories/0c501560633549b69dbd01c4c725b2b3>. [Datum för åtkomst: 2024-09-04].
- [79] M. L. Kaiser, T. A. Kucera, J. M. Davila, O. C. St. Cyr, M. Guhathakurta och E. Christian. The STEREO Mission: An Introduction. *Space Science Reviews*, 136(1):5–16 (2008). <http://dx.doi.org/10.1007/s11214-007-9277-0>
- [80] E. Gibney. Space-weather forecast to improve with European satellite. *Nature*, 541(7637):271–271 (2017). <http://dx.doi.org/10.1038/541271a>
- [81] N. Lugaz. Future Interplanetary Space Weather Assets. *Space Weather*, 18(6):e2020SW002518 (2020). <http://dx.doi.org/10.1029/2020SW002518>
- [82] H. D. Curtis. *Orbital Mechanics: For Engineering Students*. Elsevier Science (2005). ISBN 978-0-7506-6169-0.
- [83] I. G. Richardson, T. T. von Rosenvinge, H. V. Cane, E. R. Christian, C. M. S. Cohen, A. W. Labrador, R. A. Leske, R. A. Mewaldt, M. E. Wiedenbeck och E. C. Stone. > 25 MeV Proton Events Observed by the High Energy Telescopes on the STEREO A and B Spacecraft and/or at Earth During the First ~ Seven Years of the STEREO Mission. *Solar Physics*, 289(8):3059–3107 (2014). <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-014-0524-8>
- [84] Space Weather Prediction Center (SWPC): Wang-Sheeley-Arge (WSA)-Enlil Solar Wind Prediction. <http://dx.doi.org/10.7289/V5445JGH>. [Datum för åtkomst: 2024-05-29].
- [85] K. Whitman, R. Egeland, I. G. Richardson, C. Allison, P. Quinn, J. Barzilla, I. Kitiashvili, V. Sadykov, H. M. Bain, M. Dierckxsens och et al. Review of Solar Energetic Particle Prediction Models. *Advances in Space Research*, 72(12):5161–5242 (2023). <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2022.08.006>
- [86] A. Bruno och I. Richardson. Empirical Model of 10 – 130 MeV Solar Energetic Particle Spectra at 1 AU Based on Coronal Mass Ejection Speed and Direction. *Solar Physics*, 296(2) (2021). <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-021-01779-4>
- [87] G. E. Brueckner, R. A. Howard, M. J. Koomen, C. M. Korendyke, D. J. Michels, J. D. Moses, D. G. Socker, K. P. Dere, P. L. Lamy, A. Llebaria, M. V. Bout, R. Schwenn, G. M. Simnett, D. K. Bedford och C. J. Eyles. The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO). *Solar Physics*, 162(1):357–402 (1995). <http://dx.doi.org/10.1007/BF00733434>
- [88] R. Harten och K. Clark. The design features of the GGS wind and polar spacecraft. *Space Science Reviews*, 71(1):23–40 (1995). <http://dx.doi.org/10.1007/BF00751324>
- [89] L. B. Wilson III, A. L. Brosius, N. Gopalswamy, T. Nieves-Chinchilla, A. Szabo, K. Hurley, T. Phan, J. C. Kasper, N. Lugaz, I. G. Richardson, C. H. K. Chen, D. Verscharen, R. T. Wicks och J. M. TenBarge. A Quarter Century of Wind Spacecraft Discoveries. *Reviews of Geophysics*, 59(2):e2020RG000714 (2021). <http://dx.doi.org/10.1029/2020RG000714>
- [90] A. M. Wold, M. L. Mays, A. Taktakishvili, L. K. Jian, D. Odstrcil och P. MacNeice. Verification of real-time WSA-ENLIL+Cone simulations of CME arrival-time at the CCMC from 2010 to 2016. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 8:A17 (2018). <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2018005>
- [91] J. W. Dungey. Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones. *Physical Review Letters*, 6(2):47–48 (1961). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.47>
- [92] P. Vemareddy. Filament Eruption from Active Region 13283 Leading to a Fast Halo-CME and an Intense Geomagnetic Storm on 2023 April 23. *The Astrophysical Journal*, 961(2):199 (2024). <http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/ad1662>

- [93] T. I. Gombosi, Y. Chen, A. Gloer, Z. Huang, X. Jia, M. W. Liemohn, W. B. Manchester, T. Pulkkinen, N. Sachdeva, Q. A. Shidi, I. V. Sokolov, J. Szente, V. Tenishev, G. Toth, B. van der Holst, D. T. Welling, L. Zhao och S. Zou. What sustained multi-disciplinary research can achieve: The space weather modeling framework. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 11:42 (2021). <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2021020>
- [94] A. LaMoury, M. Heyns, J. W. Eggington, N. K. Kwagala, M. O. Archer, C. Cave-Ayland, R. T. Desai, H. Kelly, L. Mejnertsen, J. Chittenden, J. P. Eastwood och J.-T. G. Hagen. Operational Modelling of Space Weather Ground Effects with the GorgonOps Simulation Suite. I AGU23. AGU (2023). <https://agu.confex.com/agu/fm23/meetingapp.cgi/Paper/1340368>
- [95] M. Palmroth, U. Ganse, Y. Pfau-Kempf, M. Battarbee, L. Turc, T. Brito, M. Grandin, S. Hoilijoki, A. Sandroos och S. von Alftan. Vlasov methods in space physics and astrophysics. *Living Reviews in Computational Astrophysics*, 4(1):1 (2018). <http://dx.doi.org/10.1007/s41115-018-0003-2>
- [96] S. Wing, J. R. Johnson, J. Jen, C.-I. Meng, D. G. Sibeck, K. Bechtold, J. Freeman, K. Costello, M. Balikhin och K. Takahashi. Kp forecast models. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110(A4) (2005). <http://dx.doi.org/10.1029/2004JA010500>
- [97] P. Wintoft, M. Wik, J. Matzka och Y. Shprits. Forecasting Kp from solar wind data: Input parameter study using 3-hour averages and 3-hour range values. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 7:A29 (2017). <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2017027>
- [98] Årsredovisning 2023. MSB2269, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB) (2024). <https://www.msb.se/contentassets/10f35fe98735472097d9ee5963d18a45/msb-arsredovisning-2023.pdf>
- [99] Forecast Verification | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center. <https://www.swpc.noaa.gov/content/forecast-verification>. [Datum för åtkomst: 2024-06-10].
- [100] A. Macpherson. Space Weather Products. 10-1101, Space Weather Services (2024). <http://www.nws.noaa.gov/directives/>
- [101] M. D. Crown. Validation of the NOAA Space Weather Prediction Center's solar flare forecasting look-up table and forecaster-issued probabilities. *Space Weather*, 10(6) (2012). <http://dx.doi.org/10.1029/2011SW000760>
- [102] S. S. W. F. B. Muhlestein. The Evolution and Impact of Active Region 13664. <https://storymaps.arcgis.com/stories/0c501560633549b69dbd01c4c725b2b3>. [Datum för åtkomst: 2024-07-29].
- [103] Reglemente Taktik för marina operationer – Del 1. FM2021-8312:1, Försvarmakten (2021).
- [104] Reglemente Underrättelsetjänst. FM2019-23613 R, Försvarmakten (2022).

