Myndigheten för samhällsskydd och beredskap

FORSKNING/STUDIE

Forskning för att skydda samhällskritisk infrastruktur mot extrema solstormar

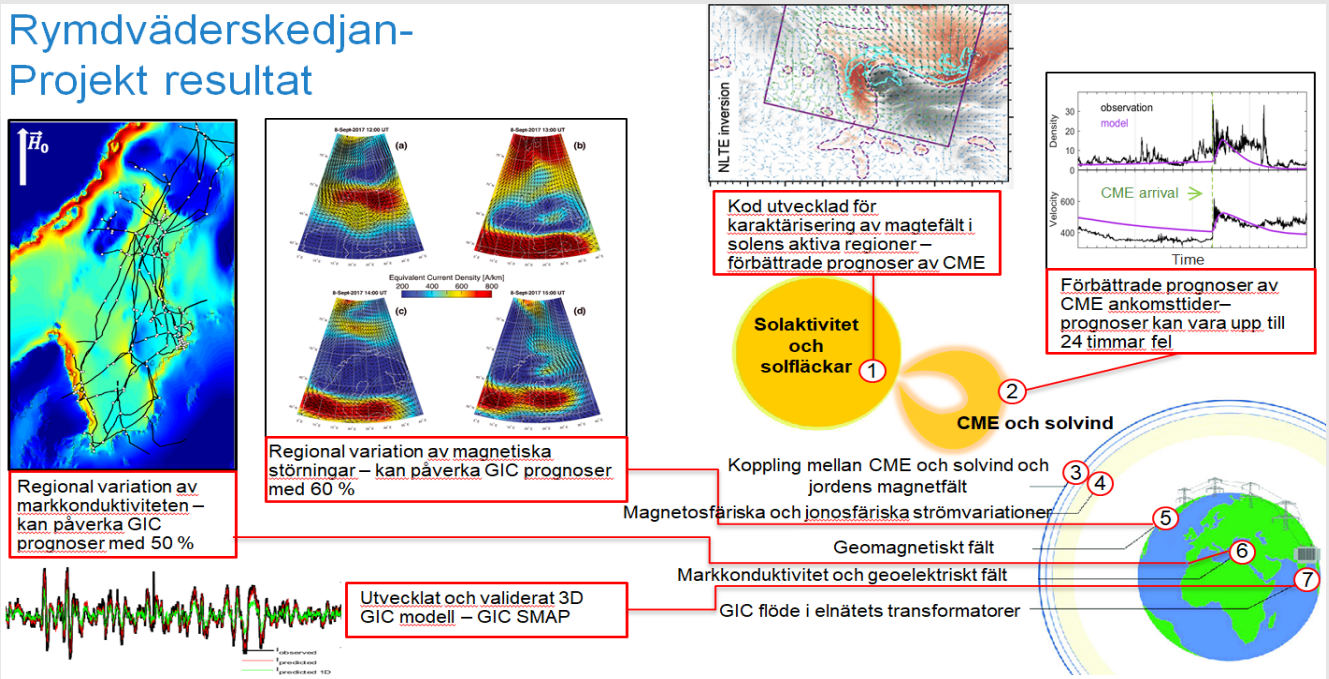

Bild 1 Områden i rymdväderkedjan som studerades i projektet

Forskning för att utveckla, verifiera och kvalitetssäkra underlaget för varning inför extremt allvarliga solstormar

Tidsperiod: 5 år
Utförare: Institutet för Rymdfysik
Ansvarig: forskare/författare Emiliya Yordanova

Kort sammanfattning: Forskningsprojektets huvudsyfte var att bedriva forskning i syfte att kunna förbättra prognoser av extremt rymdväder som kan leda till konsekvenser för samhällsviktig verksamhet och kritisk infrastruktur. En av de mest allvarliga konsekvenserna av ett extremt solutbrott är långvariga och omfattande avbrott i eltillförseln i och med samhällets allt större beroende av elektricitet. För att kunna skydda kraftnätet mot störningar är det viktigt att få förståelse för hela den händelsekedja som startar vid aktiviteterna i solens inre, som solutbrottet, solvinden, hur magnetfältet runt jorden påverkar partiklarnas färd samt uppkomsten av de inducerade strömmarna i marken som kan påverka elnätet. Därför tog sig projektet an olika forskningsområden i denna kedja för att öka vår kunskap för att i slutändan nå bättre och mer tillförlitliga prognoser.

© Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)
MSB:s Kontaktpersoner: Kristoffer Hultgren, 010-240 4105, Ulrika Postgård, 010-240 5033

Text: Emiliya Yordanova
Tryck: DanagårdLiTHO

Publ. nr: MSB1849 – oktober 2021
ISBN: 978-91-7927-191-6

MSB har beställt och finansierat genomförandet av denna forskningsrapport. Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll.

Förord

För att kunna göra bra prognoser av effekterna av ett solutbrott måste man ha god förståelse för den kedja av händelser som ger upphov till effekten. Trots att gedigen kunskap redan finns inom detta område fattas det fortfarande en del pusselbitar i vår kunskap kring de grundläggande fysikaliska processerna. I det här projektet har vi valt ut några av dessa pusselbitar i kedjan där vi behöver öka vår kunskap för att kunna ge trovärdiga prognoser (Bild 1).

I det här dokumentet rapporterar vi projektets forskningsresultat. Studierna har organiserats i fyra arbetspaket. Arbetet har utförts av en grupp svenska experter inom respektive område från: Institutet för solfysik, Stockholms universitet (ISP-SU), Institutet för rymdfysik, Uppsala (IRF) och Totalförsvarets forskningsinstitut (FOI), i nära samarbete med internationella partner. I kapitel 1 presenterar vi våra förbättringar av förståelsen och modelleringen av källregioner för solutbrott. Detta arbete genomfördes av SPI-SU. I kapitel 2 diskuterar vi förbättringar av förutsägelsen av solstormars ankomst till jorden och framstegen när det gäller hur de växelverkar med solvindens partiklar och magnetfält. Dessa studier utfördes av IRF. I kapitel 3 rapporterar vi om undersökningar och förutsägelser av geomagnetiskt inducerade strömmar (GIC) i Fennoskandia orsakade av solstormar. Denna forskning utfördes av IRF. Slutligen presenterar vi i kapitel 4 resultaten från analysen av den lokala geologins påverkan på GIC, samt föreslår en ny metod för GIC-prognos, som utvecklades av FOI.

Uppsala, 2021-05-10

Dr. Emiliya Yordanova

Institutet för Rymdfysik

Innehåll

ARBETSPAKET 1 (AP1) SOLATMOSFÄRENS MAGNETFÄLT 5
Inversionskoden 5
Resultat 6
Framtida utveckling och tillämpningar 7

ARBETSPAKET 2 (AP2) CME-UTVECKLING OCH GEOEFFEKTIVITET 7
Förbättring av CME:ers ankomsttid 8
Bedömning av CME-effektivitet 10

ARBETSPAKET 3 (AP3) MAGNETOSFÄRENS ENERGILAGRING OCH UTSLÄPP 11
Stora GIC dyker inte alltid upp när vi förväntar oss 11
Hur mycket varierar jordmagnetiska störningar, och vad orsakar dessa variationer? 13
Kan vi modellera mycket strukturerade geomagnetiska störningar? 14
Vidareutveckling av projektresultat 15

ARBETSPAKET 4 (AP4) PREDIKTION AV INDUCERADE STRÖMMAR I SVERIGE ... 15
Ny metod för skydd mot extrema solstormar 16

REFERENSER 18

Arbetspaket 1 (AP1) Solatmosfärens magnetfält

Solstormarnas ursprung kan sökas i det magnetfält som finns i solens atmosfär. Plötsliga och våldsam destabilisering och rekonfigurering av magnetfältet kan ge upphov till flares och koronamassutkastningar vilka kan ha en negativ påverkan på jorden och vårt samhälle. Mätningar av magnetfält i solens atmosfär har huvudsakligen två syften. För det första bidrar de till vår allmänna förståelse och därmed i förlängningen till målet att förutsäga flares och koronamassutkastningar (på engelska förkortat CME) innan de inträffar. För det andra möjliggör de, om de kan nå tillräckligt högt i solatmosfären, förutsägelser av magnetfältets konfiguration i den interplanetära rymden. Magnetfältsmätningar är en indirekt process som kräver observationer av hög kvalitet, något som ännu är ovanligt, samt datorprogram som tolkar dessa observationer och producerar kartor över magnetfältets styrka och riktning i varje pixel. AP1 fokuserade på utvecklandet och testandet av ett sådant datorprogram, som vi kallar en inversionskod. Denna tillämpades sedan på observationsdata och dessa resultat jämfördes med sådana beräknade med existerande verktyg vilka genom extrapolationer från lägre lager försöker skatta magnetfälten i den övre solatmosfären och därifrån förutsäga flares.

Inversionskoden

Som en del av AP1 tog vi fram en inversionskod (De la Cruz Rodriguez et al., 2019) som kan härleda magnetfält givet lämpliga observerade indata. Koden inkluderar så mycket fysik som möjligt och introducerar matematiska tekniker för att möjliggöra rimliga resultat även om observationsdata är brusiga och inte perfekta (vilket alltid är fallet). Illustrationen nedan förklarar principen (Bild 2).

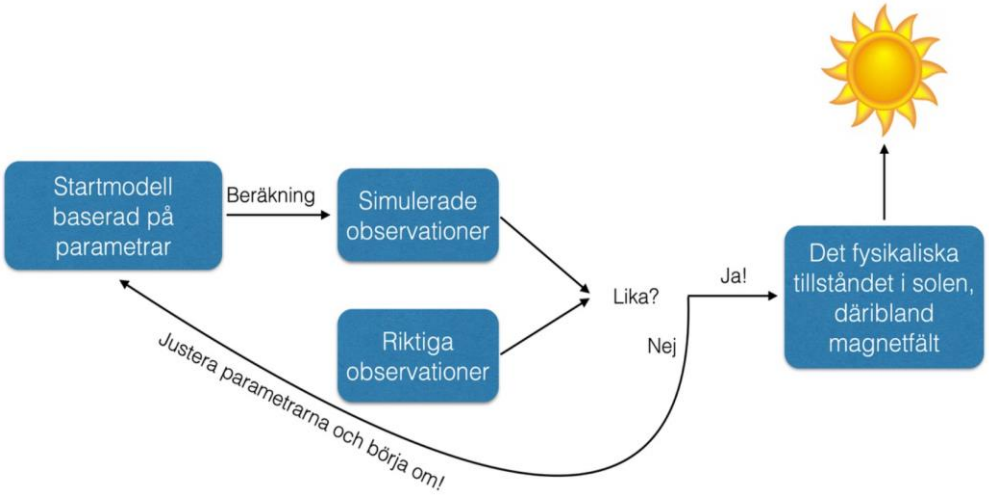

Bild 2

Vi börjar med en observation av solen och gissar en startmodell som inkluderar magnetfält. Sedan förutsäger vi hur denna modell skulle se ut om vi ”observerar” denna på samma sätt som i de riktiga observationerna. Om resultatet liknar observationsdata så är vi nöjda. I annat fall justeras modellen. Denna process upprepas till vi inte kan förbättra överensstämmelsen och då anser vi att magnetfältet i modellen motsvarar det i den verkliga solen.

Resultat

Vi använde vår inversionskod på observationer av en aktiv region på solen, där magnetfältet är starkt, och där flares och CME:er kan väntas inträffa (Vissers et al. 2021). Den vänstra panelen i bild 3 visar observationen av den aktiva regionen. Den är gjord i infrarött ljus med det svenska solteleskopet SST. Uppe till höger visar magnetfältet i den övre solatmosfären så som det beräknas av vår

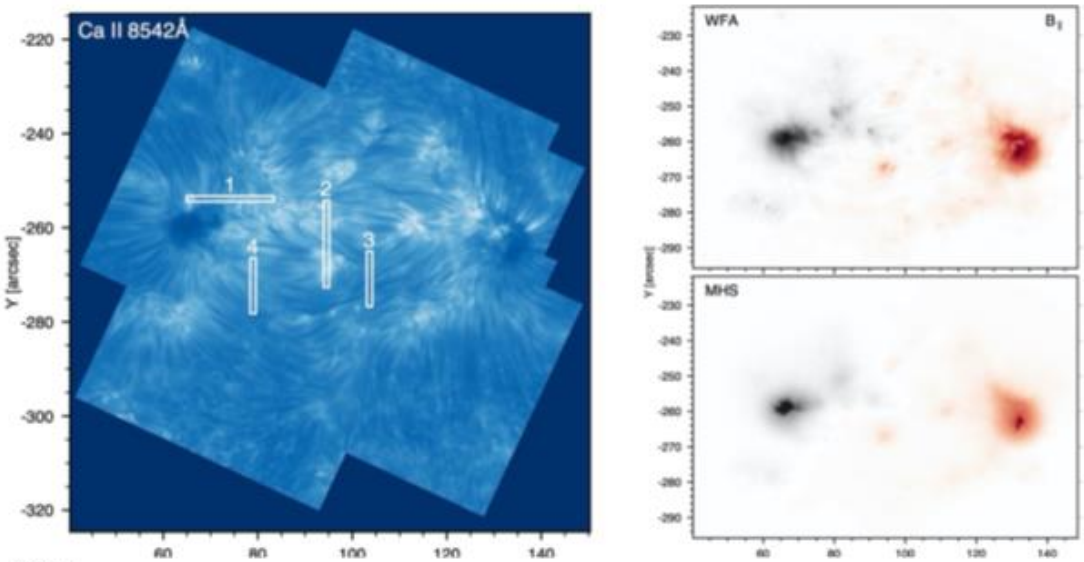

Bild 3

inversionskod. Grått indikerar starka fält riktade ner mot solen och röda färger magnetfält som pekar uppåt. Man ser tydligt de två stora solfläckarna. Nere till höger visas resultatet av en modellberäkning som genom extrapolation försöker förutsäga samma magnetfält utan direkta mätningar. Det är tydligt hur den senare modellen förutsäger ett svagare magnetfält med mer diffusa strukturer. Svaga och utspridda magnetfält är mindre troliga att producera en flare eller en koronamassutkastning. Detta indikerar att extrapolationsmodellerna ifråga måste förbättras eller att de ersätts med den sortens mätningar och analys som vi utvecklat i AP1.

Framtida utveckling och tillämpningar

I AP1 utvecklade vi ett datorprogram som kan bestämma magnetfält i solens övre atmosfär och visade att nuvarande modellering genom extrapolationer ger resultat som inte är tillräckligt noggranna. Vår förhoppning för framtiden är att rutinobservationer av den övre solatmosfären blir norm så att vår kod kan användas för att förbättra mätningar av magnetfältet i solatmosfären och den interplanetära rymden.

Arbetspaket 2 (AP2) CME-utveckling och geoeffektivitet

CME:er är enorma explosioner av plasma (elektriskt laddad gas) från solen ut i rymden och betraktas som primära drivkrafter för geomagnetiska stormar och flera andra rymdvädereffekter. I arbetspaket 2 (AP2) adresserar vi huvudfrågan: Hur snabbt kommer en CME till jorden och hur stor skulle dess påverkan vara?

Den första delen av frågan gäller CME:ers utbredning genom den interplanetära rymden på väg mot jorden, där de utsätts för en serie fysiska processer, eftersom rymden mellan solen och jorden inte är tom, t.ex.: 1) CME:er stöter på omgivande plasma i koronan (solens yttersta atmosfär) och kan då roteras eller böjas av från sin ursprungliga utbredningsriktning; 2) Längre bort från solen upplever CME:er motstånd från plasma och magnetfält i den redan existerande solvinden, och beroende på egenskaperna hos den interplanetära rymden kan en CME accelereras eller bromsas; 3) när solen är aktiv kan det uppstå serieutbrott från samma plats på solytan, så att en CME interagerar med en eller

flera andra CME:er, vilket leder till att en ny struktur bildas som så småningom kommer att färdas genom rymden.

Den andra delen av frågan gäller CME:ers geoeffektivitet, dvs hur farliga rymdvädereffekter vi kan förvänta oss. Geoeffektiviteten hos en CME beror mest på dess plasmahastighet, magnetiska fältstyrka och orientering. Dessa parametrar observeras från satelliter som är "parkerade" vid en så kallad Lagrangepunkt (L1). Denna punkt är dock placerad utanför jordens skyddande bubbla, vilket ger oss kort tid att vidta beredskapsåtgärder. CME-geoeffektiviteten kan till exempel förändras om en CME med rätt magnetfältsriktning följs av en snabb solvind som komprimerar CME:n och ökar dess geoeffektivitet. En process som i stället skulle minska effekten av CME:er på jorden är förlust av magnetiskt flöde, vilket inträffar när en CME interagerar med andra CME:er eller solvinden.

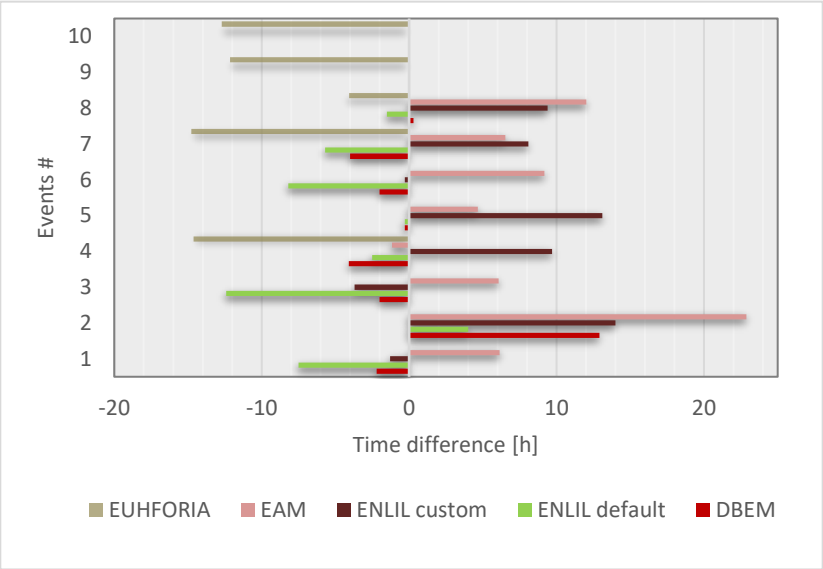

Bild 4

Förbättring av CME:ers ankomsttid

Den typ av CME som syns i form av en halo i koronagraf-bilder är starkt geoeffektiv eftersom den färdas rakt mot jorden. Därför är det av avgörande betydelse att korrekt kunna förutspå dess ankomsttid. Detta är en utmanande uppgift på grund av ständigt föränderliga egenskaper hos det interplanetära plasmat som CME:er färdas genom. Uppskattningen av CME:ers hastighet och geometri försvåras även av att vi bara mäter projektionen på himmelplanet och inte från alla riktningar. För närvarande används olika metoder för ankomsttidsprognos – antingen baserad på numerisk modellering eller på empiriska förhållanden mellan parametrar uppmätta från bilder av synligt ljus från

koronagrafer och rymdsondsmätningar vid L1. I nära samarbete med utvecklarna och prognosmakarna har vi undersökt prestanda för två empiriska modeller: Effective Acceleration Model (EAM) [Pauris et al. 2017] och Drag-based Ensemble Model (DBEM) (Dumbović et al., 2018; Žic et al., 2015, Vršnak et al., 2013), samt två numeriska modeller: ENLIL (Odstrćil, 2003) och EUHFORIA (Pomoell och Poedts, 2018). Bild 4 visar resultaten från olika modellkörningar för den förutspådda ankomsttiden. Färgstaplarna visar skillnaden mellan modellernas förutsägelser och observationer vid ankomst till L1 för olika CME-tillfällen. Sammantaget är modellernas förutsägelser bra; felet är för det mesta begränsat till inom ± 10 timmar, vilket anses vara standard för CME-ankomsttidsprognoser. Vi har lyckats förbättra den förutspådda ankomsttiden upp till 22 timmar i vissa fall genom att ta hänsyn till bakgrundsolvindens effekt på CME:ers utbredning. Detta gjordes enligt följande: 1) EAM (rosa staplar) använde en ny effektiv accelerationsfunktion där osäkerheterna minimerades i bestämningen av CME-starthastigheten samt solvindhastigheten framför CME:n (Paouris et al. 2021); 2) DBEM (röda staplar) förbättrades genom att sätta motståndsparametern γ, som karakteriserar motståndet från solvindplasmat, till γ = 0,2; och 3) ENLIL

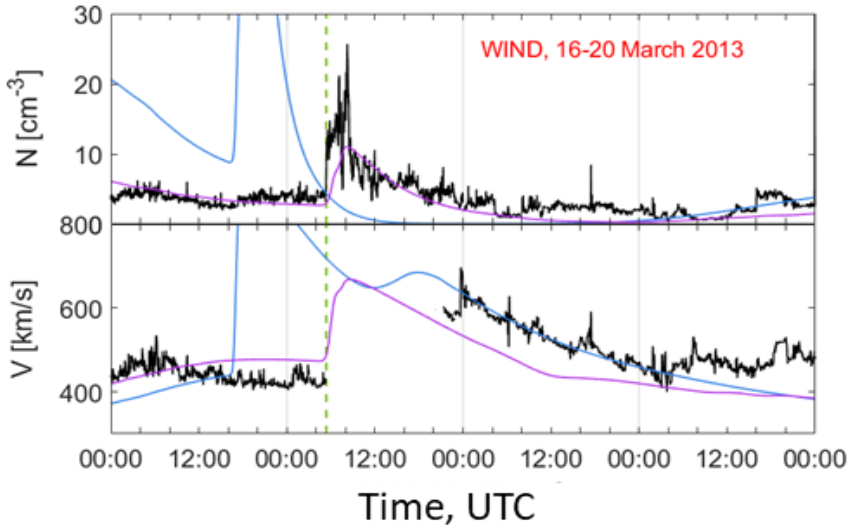

Bild 5

förbättrades avsevärt i fallet med snabba CME:er genom att använda anpassad inmatning (bruna staplar) av proxyn för förhållandet mellan plasmats densitetsökning i CME:ns främre front i förhållande till plasmadensiteten i bakgrunds-solvinden, jämfört med standardinmatningen för modellen (gröna staplar) (Werner et al., 2019). Ett sådant exempel visas i Bild 5, där anpassad ENLIL-utdata (lila) jämförs med ENLIL-standardprognosen (blå) och de faktiska CME-observationerna från WIND-rymdfarkosten (svart; den streckade gröna linjen markerar chocken som orsakades av CME:n).

Vi har även bedömt prestanda för den senaste numeriska modellen EUHFORIA (mörkbeige i Bild 4), där det har visat sig modellen totalt sett förutspår för tidig ankomst för CME:er. Vad som orsakar detta beteende behöver undersökas ytterligare. Preliminära resultat har indikerat att de sämre

förutsägelserna tillhör komplexa händelser där den interplanetära rymden var påverkad av tidigare CME:er.

Bedömning av CME-effektivitet

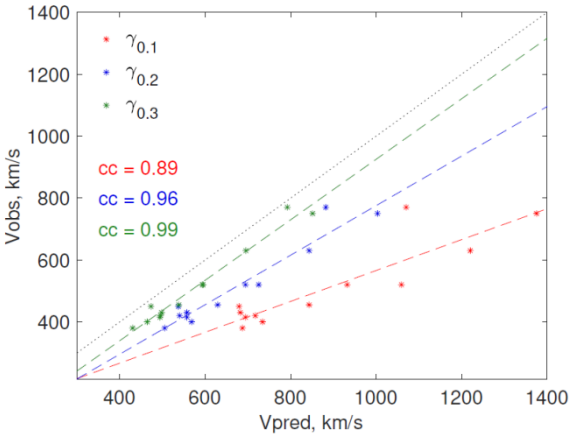

Bild 6

För CME:ers påverkan på jorden är det också viktigt att förutsäga deras hastighet vid L1 med hög noggrannhet. Bild 6 visar CME-hastigheter förutsagda av DBEM-modellen, som funktion av den observerade hastigheten av WIND-rymdfarkosten vid L1 för olika motstånd (färgade stjärnor; streckade linjer visar medianen; korrelationskoefficienter cc är angivna i bilden; grå prickad linje motsvarar perfekt överensstämmelse mellan förutspådda och observerade hastigheter). Medan bästa förutsägelsen av ankomsttiden uppnåddes med $\gamma = 0{,}2$ (Bild 4), fås här den bästa matchningen mellan förutsagd och observerad kollisionshastighet med $\gamma = 0{,}3$. Detta innebär att det finns en kompromiss för att uppnå bättre förutsägelser av både ankomsttiden och hastigheten (Jaklovsky, avhandling, 2020).

Responsen från jordens magnetosfär skiljer sig mellan de olika regionerna, manteln och det magnetiska molnet, i interplanetära CME:er. Båda har liknande storlek på plasmahastighet och magnetfält, men deras densitet och temperatur, samt fluktuationsnivå, skiljer sig åt. Först anländer chocken som skapas av CME:n och den tillhörande manteln, som komprimerar magnetosfären och påverkar främst högre latituder, där Sverige ligger. De interplanetära CME-mantlarnas geoeffektivitet har bedömts i en stor statistisk studie, där det visade sig att mantelregionen nära chockerna hos snabba CME:er är mest geoeffektiva (Kilpua et al., 2019). Mantelregionen är också mycket strukturerad och dynamisk, och innehåller bubblor av lokalt uppvärmt plasma (Yordanova et al. 2021) vilket gör mantlarnas geoeffektivitet mycket svår att förutse. I en annan studie där vi tillämpade en ny metod för lokal energiöverföring har vi visat att det verkligen finns mycket starkare global energiomvandling i manteln än i molnet, och att energiinnehållet i fluktuationerna i manteln är mycket högre än i det jämnare magnetiska molnet [framtida publikation]. Satelliten Solar Orbiter, som sköts upp 2020, var på ett avstånd halvvägs till solen när den observerade en pågående interaktion mellan två CME:er [Telloni et al., 2021]. Strukturen som senare

anlände till jorden var redan sammanslagen och kraftigt modifierad med en ändrad magnetfältsriktning så att den inte producerade betydande geomagnetisk störning. I en annan studie utförde vi multi-satellit-observationer av så kallad magnetisk omkoppling som inträffade mellan ett magnetiskt moln och solvinden, där interaktionen resulterade i en förändring i magnetfältet som minskade styrkan hos den interplanetära CME:n och därmed endast utlöste en mindre geomagnetisk storm.

Arbetspaket 3 (AP3) Magnetosfärens energilagring och utsläpp

När interplanetära CME:ers når jorden interagerar de med jordens närområde i rymden, mer specifikt med vår så kallade magnetosfär. Denna interaktion orsakar starka elektriska strömmar i jonosfären (gränsen mellan vår atmosfär och rymden) vilket resulterar i förändringar i jordens magnetfält (jordmagnetiska störningar) som vi kan mäta på marken. Jordmagnetiska stormar är perioder med långvariga jordmagnetiska störningar. Det finns också kortvariga fenomen som kallas substormar, som är explosiva utsläpp av energi från magnetosfären. De driver vanligtvis stora jordmagnetiska störningar vid höga breddgrader, som t.ex. i Norden. I vissa fall leder dessa jordmagnetiska störningar till oönskade strömmar i människogjorda marksystem som rörledningar och kraftnät. Dessa oönskade strömmar kallas ”jordmagnetiskt inducerade strömmar” (med förkortningen GIC, efter engelskans ”Geomagnetically Induced Currents”) och de kan skada dessa system. Målet med detta arbetspaket är att förstå fysiken i hur GIC drivs av processer i magnetosfären, och om vi kan förutsäga och modellera dem tillräckligt bra för att förhindra skador på viktiga tekniska system, samt undvika kostsamma störningar i samhället.

Stora GIC dyker inte alltid upp när vi förväntar oss.

Mellan 7e och 9e september 2017 upplevde Sverige, Norge och Finland geomagnetiska stormar som visas nedan i Bild 7 paneler (c) och (f) i form av mätningar av magnetfältet vid marken i olika platser. De två översta panelerna är mätningar av solvinden gjorda av rymdfarkoster mellan jorden och solen. Nyckelparametern är den röda linjen i panel (a), som är magnetfältkomponenten som pekar nedåt från sol-jordplanet. När denna sjunker under 0, alltså när

magnetfältet har en sydlig komponent, lagras stora mängder energi i magnetosfären och vi förväntar oss att se jordmagnetiska stormar, substormar och intensivt rymdväder. Detta är också precis vad vi ser i de tre markerade regionerna.

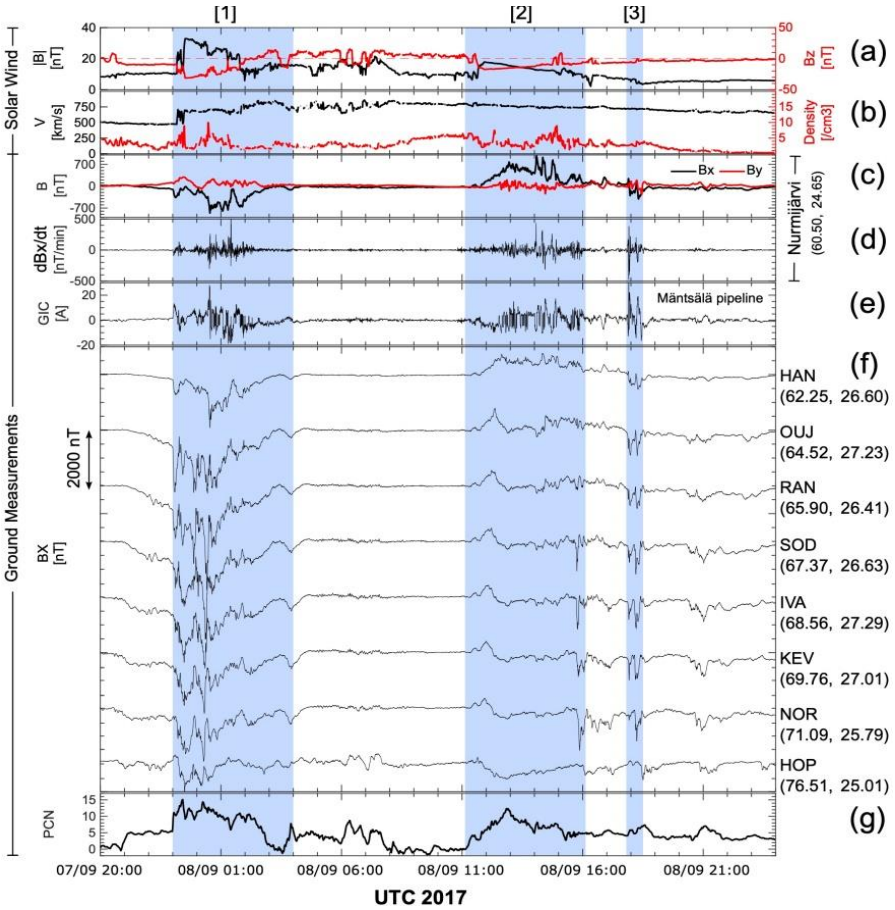

Bild 7

Panel (e) visar GIC i en naturgasrörledning i Finland som ett resultat av denna jordmagnetiska aktivitet, och detta är korrelerat med panel (d) som visar hur snabbt det magnetfältet i närheten förändras. Vi skulle förvänta oss att de största GIC ska inträffa i intervall 1 eller 2, där de jordmagnetiska störningarna är som störst (panel c), men överraskande nog inträffar de i intervall 3. Vår undersökning visar att detta berodde på snabba småskaliga strukturer i jonosfärens storskaliga strömsystem. Förklaringen ligger i fysiken bakom strömmarna. Det är nämligen så att hur snabbt magnetfältet förändras (panel d) ibland är viktigare än den magnetiska störningens storlek. Det viktiga resultatet här är att farliga GIC kan uppstå i situationer som vi inte förväntar oss, och dessa typer av störningar är extremt svåra att förutspå med våra rymdvädermodeller. Vi måste förbättra dessa modeller för att kunna förutse dessa händelser och skydda samhället mot deras negativa effekter. Detta är extra viktigt i Sverige eftersom vi vid dessa breddgrader förväntar oss ett dynamiskt beteende hos strömmar i jonosfären under jordmagnetiska stormar (Dimmock et al. 2019).

Hur mycket varierar jordmagnetiska störningar, och vad orsakar dessa variationer?

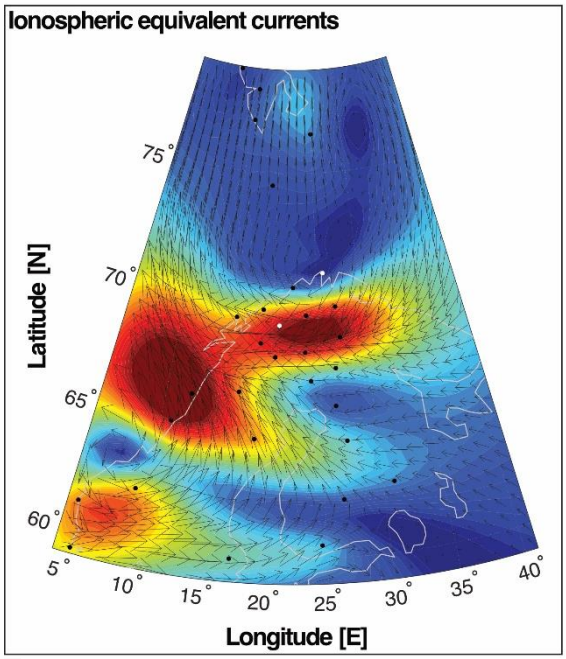

Bild 8

I panel (f) i föregående bild kan vi se att markmagnetfältmätningarna förändras mycket mellan de olika stationerna. Bild 8 visar de jonosfäriska strömmar som krävs för att återskapa magnetfälts-mätningarna i intervall 3. Det viktiga budskapet i bilden är att strömmarna i jonosfären blir mycket komplicerade, och att det inte finns en jämn storskalig struktur. Strömmarna är även väldigt dynamiska, så denna bild ändras mycket på bara några minuter. Det är precis detta komplicerade och dynamiska beteende som får markmagnetfältet att förändras mycket snabbt, vilket orsakar GIC. Om vi betecknar hur snabbt markmagnetfältet förändras som dB/dt, var vår andra studie att: 1) analysera 17 års data för att mäta hur mycket dB/dt varierar över 100-tals kilometer, 2) ta reda på vilken process i rymden som orsakar denna dB/dt-variation, och 3) om dessa variationer i dB/dt är viktiga för GIC. Våra resultat visade att dB/dt kan variera med mer än en faktor 3 i storlek över regionala avstånd. De största förändringarna inträffade vid midnatt, vilket är den tid på dagen vi förväntar oss att se effekterna av substormar. Detta tyder på att substormar är viktiga drivkrafter för GIC. Nätverk av GIC kan också ha samma storlek som denna regionala variabilitet, så det vanliga antagandet att dB/dt är konstant över ett helt nätverk är ofta ogiltigt. Detta innebär att vi behöver ta hänsyn till förändringarna av dB/dt över sådana nätverk för att förutsäga GIC. Till exempel, att ignorera hur mycket dB/dt varierar över dessa avstånd kan resultera i 60% skillnader i GIC-värden. Dessa effekter verkar också vara beroende av hur mycket energi som injiceras i magnetosfären, och nyckelparametrarna är solvindens hastighet och att solvindens magnetfält har en komponent som pekar i sydlig riktning (Dimmock et al. 2020).

Kan vi modellera mycket strukturerade geomagnetiska störningar?

Nästa fråga vi tog upp var, hur väl rymdvädermodeller reproducerar markstörningar, och om modellens prestanda kan förbättras? För att göra detta använde vi en simulering av magnetosfären som heter ”Space Weather Modeling Framework” (SWMF) (Tóth et al., 2005). Med denna simulering kunde vi undersöka hur en interplanetära CME:er interagerar med magnetosfären, och bestämma hur markmagnetfältet skulle påverkas. Bild 9 visar GIC som mättes i september 2017 (a) samt GIC beräknade från ett magnetfält som inte mättes, utan modellerades (b-c). En viktig modellparameter är den rumsliga upplösningen av magnetosfären. En låg upplösning gör magnetosfären kantig och ”grovkornig”, så ju högre upplösning, desto bättre. När vi ökar upplösningen kan vi se mycket mer detaljer, men det tar också mycket längre tid att köra modellen - vilket är ett problem eftersom dessa modeller måste köras i realtid för att ge användbara förutsägningar. Det viktigaste resultatet av denna studie var att prestandan kan bli mycket bättre om den rumsliga upplösningen är hög. Lägg märke till att GIC-amplituderna i panel (c), där vi använde en hög upplösning, är mycket högre än panel (b) där upplösningen var låg. Vi ser även att den högupplösta modellen är en

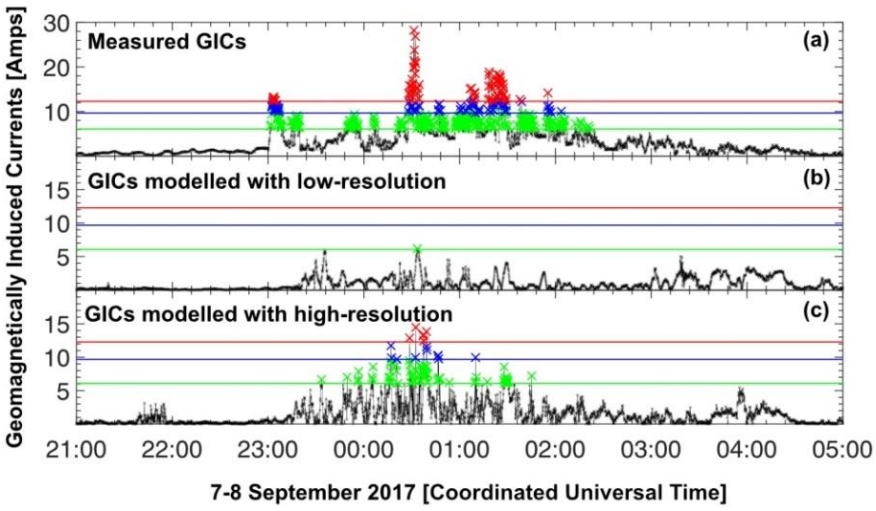

Bild 9

bättre matchning till panel (a). Men vi kan fortfarande inte reproducera substormar vilka, som vi nämnde tidigare, är mycket viktiga för GIC i Sverige. Så även om tydliga modell-förbättringar är möjliga inom vissa områden, behövs mycket mer arbete för att förbättra modeller så att de kan fånga viktiga händelser som substormar.

Vidareutveckling av projektresultat

Även om det finns mycket arbete kvar att göra för att fullt ut förstå dessa effekter kan vi identifiera tre viktiga möjligheter för vidareutveckling. För det första kan metoden för att kvantifiera den regionala variabiliteten för dB/dt vidareutvecklas för att ge felstaplar på en-stationsprognoser, vilket för närvarande inte är tillgängligt. Det är också möjligt, med mer arbete, att detta kan utvecklas vidare till ett dB/dt-index (en enkel storhet för att bestämma om GIC förväntas) som också inkluderar effekter av regional variation. Ett sådant index skulle indikera när GIC är stora, och det skulle dessutom kunna ge feluppskattningar för en-stationsmätningar. Nuvarande rymdväderindex gör inte detta, och därför saknas viktig information för länder på hög latitud. Detta index kan också vara mycket fördelaktigt för att lära upp rymdvädermodeller baserade på maskininlärning. För det andra tyder våra resultat på att förbättrad rumslig upplösning kan ge bättre GIC-förutsägelser, men det krävs mer arbete för att förstå när och var denna förändring är tillämplig. Detta måste också utvärderas med den ständigt ökande utvecklingen av SWMF och till och med utvidgas till modeller som tar hänsyn till ännu mer fysik i magnetosfären.

Arbetspaket 4 (AP4) Prediktion av inducerade strömmar i Sverige

AP4 studerade den senare delen som rör förståelsen för hur strömmarna, som induceras i jordskorpan av störningarna i jordens magnetfält kopplade till solutbrottet, påverkas och sprids beroende på berggrundens uppbyggnad samt den omgivande miljön. I tidigare svenska modeller av hur strömmarna sprids hade man enbart tittat på berggrunden ur ett endimensionellt perspektiv. Det vill säga att man har utgått från att jordskorpan har samma ledningsförmåga över hela landet och att den endast varierar med djupet i berggrunden. Men i verkligheten finns det stora lokala variationer i Sverige, både i form av olika typer av berggrund men också i form av långa kuster med närliggande vatten som har en högre förmåga att leda strömmar än marken. Om man arbetar med en tredimensionell bild så kan man få en förstärkning av strömmar i olika områden vilket kan peka på eventuella riskområden där kraftnätet kan bli mer påverkat.

Ny metod för skydd mot extrema solstormar

Arbetspaket fyra har utarbetat en metod för prediktion av inducerade strömmar i Sverige (Rosenqvist och Hall, 2019). Metoden baseras på en realistisk tredimensionell modell över ledningsförmågan i Sveriges berggrund samt omgivande vatten baserad på befintliga och aktuella mätningar och geologiska kartor som har tagits fram i samarbete med Luleå Tekniska Universitet. Modellen som kallas GIC-SMAP visar att det geoelektriska fältet är starkare i södra Sverige (se Bild 10). Det vill säga risken för starkare inducerade strömmar är större där på grund av en kombinerad effekt från en lägre ledningsförmåga i detta område och effekten av kuster på båda sidor.

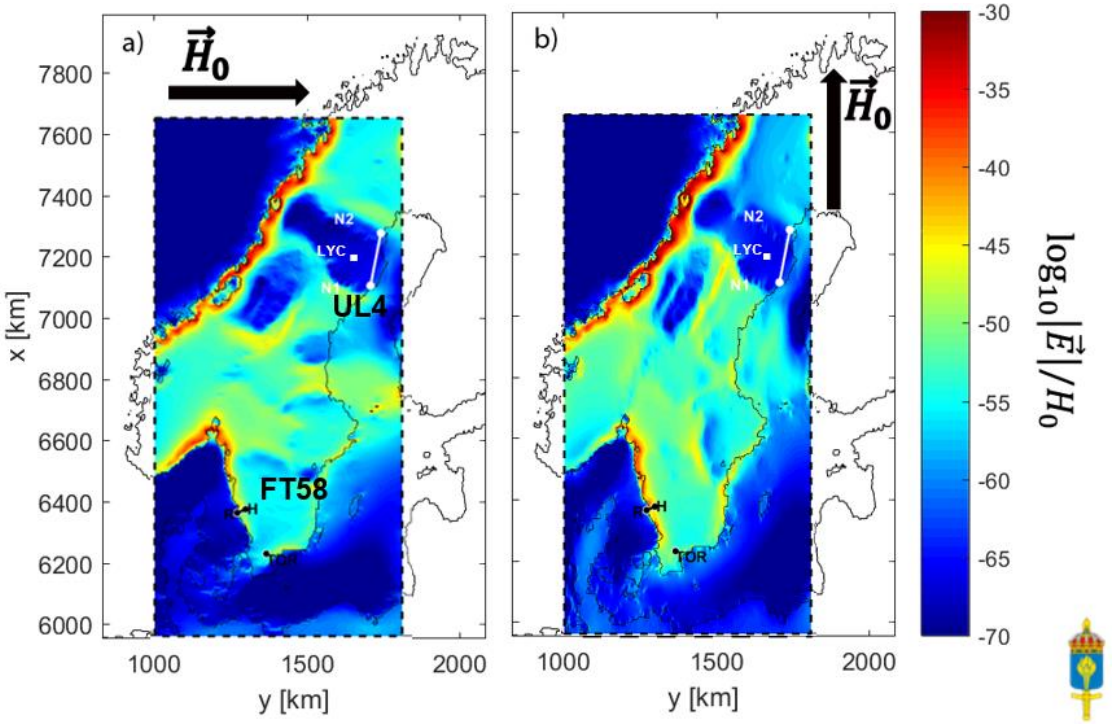

Bild 10 Modellering av det elektriska fältet över Sverige med GIC-SMAP. Där det elektriska fältet är starkt är det störst risk för kraftiga inducerade strömmar, om det skulle inträffa en kraftig magnetisk störning över området. Figuren visar det geoelektriska fältet på marken och hur det varierar över landet. Det elektriska fältet är starkare i områden markerat med grönt, gult och rött, till exempel i södra Sverige samt i områden där det är stora lokala variationer i ledningsförmåga, som vid kuster.

Tillsammans med Svenska Kraftnät har tester utförts på en kraftledning i norra Sverige (UL4) samt en i södra Sverige (FT58) som visar att modellen stämmer väl överens med faktiska mätningar. Dessutom visar mätningarna i södra Sverige på kraftlinjen i ett kustnära område att modellen kan fånga den

förstärkning av strömmar som uppkommer i och med det närliggande konduktiva vattnet (Rosenqvist et al, 2021). Detta till skillnad från endimensionella metoder som inte kan fånga den tredimensionella effekten och därmed gav hälften så stora strömmar som de uppmätta. Under de två testerna på kraftledningarna så befann sig solen i en lugn period och den geomagnetiska aktiviteten var inte så hög. Vi har illustrerat hur GIC-SMAP modellen kan vara ett kraftfullt verktyg för att analysera effekten av extremt rymdväder genom att undersöka inducerade strömmar i den södra kraftlinjen för historiskt starka geomagnetiska stormar samt ett ”worst-case scenario” i form av en hypotetiskt extrem solstorm. Tidpunkten för den högsta beräknade strömmen enligt GIC-SMAP sammanföll med rapporterade störningar i kraftnätet för tre av de historiska geomagnetiska stormarna. För dessa tre stormar var även strömmarna kraftigast, upp emot 200 A som mest vilket är gränsen för vad svenska transformatorer ska klara i dagsläget. ”Worst-case” stormen ledde till strömmar så höga som 300 A.

Utöver effekterna av geologin på det geoelektriska fältet så kan även rumsliga variationer i magnetfältet vara viktiga att ta hänsyn till, något som har studerats i AP3. Genom att koppla GIC-SMAP med en realistisk modell av källströmmarna i jonosfären kan man få en ännu mer noggrann uppskattning av de inducerade strömmarna i kraftnätet. Detta har gjorts i samarbete med FMI i Finland och validering av resultaten pågår i samarbete med ETH-Zürich. Projektet har även samarbetat med NASA för validering av resultat med befintliga globala modeller för rymdväder (Welling et al., Rosenqvist 2017).

GIC-SMAP metoden kan utvecklas till att innefatta real-tids modellering av det geoelektriska fältet (och inducerade strömmar) genom att koppla ihop den med prognoser av jonosfärsströmmar från t.ex. BATS-R-US modellen (global kopplad magnetosfär-jonosfärs-termosfärs modell). I ett möte med svenska kraftnät 19 juni 2019 pekades just detta ut som en av de saknade pusselbitarna för en operationell prognosmodell för markinducerade strömmar anpassat för Sverige. Ett exempel på hur GIC-SMAP kan passa in i ett framtida prognossystem för markinducerade strömmar visas i Bild 11.

Sammanfattningsvis har arbetspaket fyra genom sin forskning tagit fram ett unikt och flexibelt verktyg som kan användas för prognoser av markinducerade strömmar i svenska kraftledningar. Tekniken medger beräkning av strömmar för en godtycklig design av kraftnätet och kan användas för att utreda sårbarhet samt utarbeta strategier för att begränsa effekterna vid särskilt kraftiga solstormar. Modellen kan även utvecklas till ett fullskaligt prognossystem för markinducerade strömmar genom att koppla ihop den med befintliga prognosmodeller för geomagnetiska variationer.

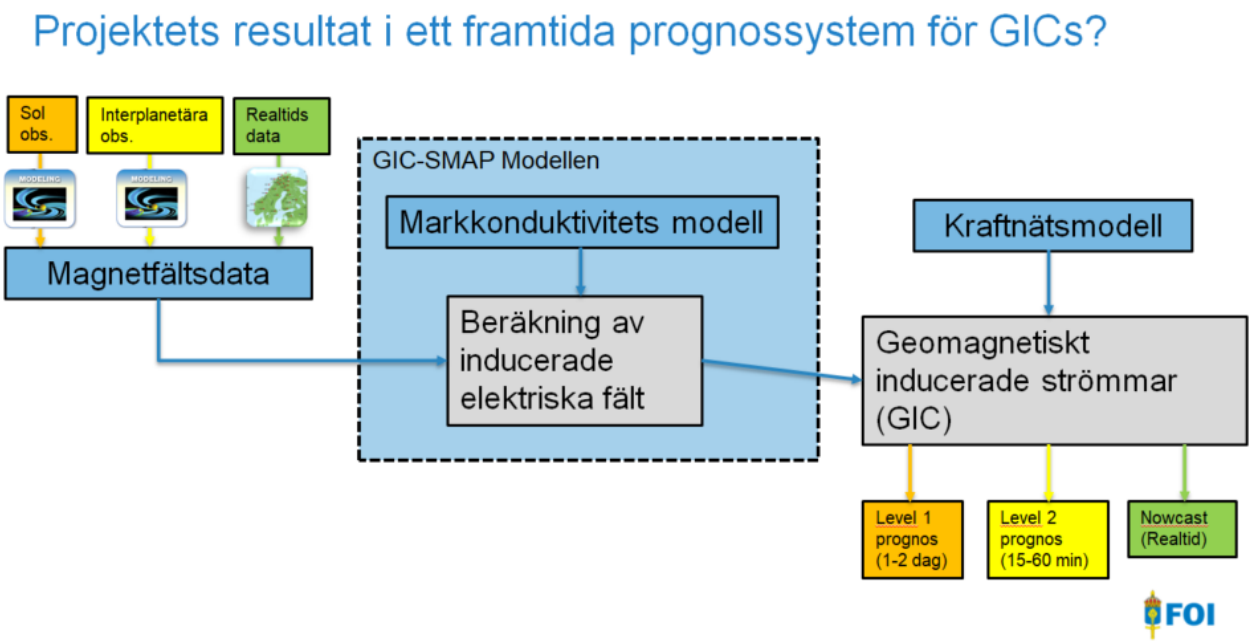

Bild 11 Flödesschema om hur resultaten av arbetspaket fyra, GIC-SMAP modellen, kan ingå i ett framtida prognossystem för markinducerade strömmar.

Referenser

De la Cruz Rodriguez et al., (2019), STiC: A multiatom non-LTE PRD inversion code for full-Stokes solar observations, Astronomy and Astrophysics, 623, 74

Vissers et al., (2021), Non-LTE inversions of a confined X2.2 flare. The vector magnetic field in the photosphere and chromosphere, Astronomy and Astrophysics, 645, 1

Dimmock, A. P. et al. (2019), The GIC and geomagnetic response over Fennoscandia to the 7–8 September 2017 geomagnetic storm. Space Weather Space Weather, 17, 989– 1010.

Dimmock, A. P., et al. (2020), On the regional variability of dB/dt and its significance to GIC. Space Weather, 18, e2020SW002497.

Dumbović, M., et al., (2018), The Drag-based Ensemble Model (DBEM) for Coronal Mass Ejection Propagation. Astrophys. J., 854:180

Jaklovsky bachelor thesis (2020) - http://uu.diva-ortal.org/smash/get/diva2:1451427/FULLTEXT01.pdf

Kilpua, E. K. J., et al. 2019, Solar wind properties and geospace impact of coronal mass ejection-driven sheath regions: Variation and driver dependence, Space Weather, 17, 1257–1280

Odstrcil, D. (2003) Modeling 3-D solar wind structure. Advances in Space Research 32, 497 – 506

Paouris, E. & H. Mavromichalaki (2017), Effective Acceleration Model for the Arrival Time of Interplanetary Shocks driven by Coronal Mass Ejections, Solar Phys, 292:180

Paouris, E. et al., (2021) Propagating Conditions and the Time of ICME Arrival: A Comparison of the Effective Acceleration Model with ENLIL and DBEM Models, Solar Phys. 296:12

Pomoell, J. & Poedts, S. (2018), J. Space Weather Space Clim., 8, A35

Rosenqvist L. och Hall J.-O., Lägesrapport i projektet ”Förbättrade prognoser av allvarliga solstormar”, FOI Memo 5842, 2016.

Rosenqvist L. och Hall J.-O., Lägesrapport i projektet ”Förbättrade prognoser av allvarliga solstormar”, FOI Memo 5842, 2016.

Rosenqvist L., Reserapport FMI workshop, FOI Memo 6402, 2018.

Rosenqvist L. och Hall J.-O. (2019), Regional 3-D modelling and verification of geomagnetically induced currents in Sweden, Space Weather Journal

Rosenqvist L., T. Fristedt, A. P. Dimmock, D. T. Welling, J. Kjäll, P. Wintoft, J-O. Hall, M. Yu. Smirnow (2021), 3-D Modelling of Ground Induced Currents in Sweden - verification and extreme event analysis, under förberedelser till Space Weather journal

Rosenqvist L., Reserapport international ILWS-ICCMC workshop, FOI Memo 6134, 2017.

Welling, D.T., C. M. Ngwira, H. Opgenoorth, J. D. Haiducek, N. P. Savani, S. K. Morley, C. Cid, R.S. Weigel, J. M. Weygand, J. R. Woodroffe, H.J. Singer, L. Rosenqvist, M.W. Liemohn (2018), Recommendations for Next-Generation Ground Magnetic Perturbation Validation, Space Weather

Telloni D. et al., (2021) Study of two interacting Interplanetary Coronal Mass Ejections encountered by Solar Orbiter during its first perihelion passage. Observations and modeling, Astronomy & Astrophysics, minor revisions.

Vršnak, B., et al., Propagation of Interplanetary Coronal Mass Ejections: The Drag-Based Model, Solar Phys. 285:295–315, 2013

Werner, A. L. E., et al. (2019) Modeling the multiple CME interaction event on 6–9 September 2017 with WSA-ENLIL+Cone. Space Weather, 17, 357–369

Yordanova et al. (2021), A link between turbulence and plasma heating, ApJ, minor revisions.

Žic, M. et al., (2015) Heliospheric Propagation of Coronal Mass Ejections: Drag-based Model Fitting. Astrophys. J. Suppl., 218:32

Schrijver et al. (2015), Advances in Space Research, Volume 55, Issue 12, p. 2745-2807

Tóth, G., et al. (2005), Space Weather Modeling Framework: A new tool for the space science community, J. Geophys. Res., 110, A12226, doi:10.1029/2005JA011126.

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap

I samarbete med:

INSTITUTET FÖR RYMDFYSIK
Swedish Institute of Space Physics

Stockholm University

FOI

© Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)
651 81 Karlstad Tel 0771-240 240 **www.msb.se**
Publ.nr MSB1849 – oktober 2021 ISBN 978-91-7927-191-6