

Romvær – et eksempelstudium

Knut Svenes

Forsvarets forskningsinstitutt/Norwegian Defence Research Establishment (FFI)

7. desember 2009

FFI-rapport 2009/02112

1104

P: ISBN 978-82-464-1676-2

E: ISBN 978-82-464-1677-9

Emneord

Romvær

Romforskning

Rommet – Utnytting

Romfart – Økonomiske virkninger

Romfart – Navigasjon

Godkjent av

Richard Olsen

Prosjektleder

Johnny Bardal

Avdelingssjef

Sammendrag

Denne rapporten inneholder en beskrivelse av prosesser i det nære verdensrom drevet av noen usedvanlig sterke geomagnetiske stormer i oktober/november 2003. Hovedvekten her er lagt på de effekter disse hadde på flere moderne teknologiske systemer. Disse effektene, gjerne kalt romværeffekter, har sitt utspring fra variasjoner på solen, og kan i perioder påvirke samfunnskritiske systemer på en svært negativ måte. Dette kan dreie seg om både kommunikasjon-, navigasjon- og posisjoneringssystemer så vel som luftfart og kraftdistribusjon samt annet elektronisk utstyr på bakken.

I rapporten er det gjengitt en oversikt over konkrete innmeldte problemer under disse såkalte "halloween"-stormene, som var den perioden med de sterkeste geomagnetiske forstyrrelsene under forrige solsykel. Rapporten bygger utelukkende på opplysninger fra den åpne litteraturen. Her kan en se et mønster av globale effekter på forskjellige teknologiske systemer som må betraktes som signifikante operative problemer gjennom en periode på mer enn en uke.

Som det går fram av beskrivelsene her kan romværeffekter ennå stort sett bare forutsies i statistisk forstand. Dette gir likevel grunnlag for øket årvåkenhet og for å ta passende forhåndsregler i spesifikke perioder. Derfor er også en korrekt nåtidsbeskrivelse av situasjonen i det nære verdensrom av stor betydning for operatører. Den mest omfattende kilde for både prediksjoner og nåtidsbeskrivelser er nok det amerikanske Space Weather Prediction Center (SWPC), som til en hver tid har detaljert oppdatert informasjon tilgjengelig på nettet. Imidlertid er det klart at også den europeiske romfartsorganisasjonen ønsker å bygge opp en slik kapasitet.

Fra denne gjennomgangen kan vi her til lands merke oss at forstyrrelser på signalgang helt opp i mikrobølgeområdet samt innvirkning på kraftdistribusjonssystemer er spesielle problemer på høye breddegrader. I tillegg bør vi som rykende ferske satellittoperatører være oppmerksom på at også satellitter i lav jordbane er utsatt for signifikant fare fra energetiske partikler under geomagnetiske stormer. Derfor bør vi søke å utvide vårt erfaringsgrunnlag på romværeffekter i tide til å være forberedt til neste aktivitetstopp i inneværende solsykel.

English summary

This report contains a description of processes in near-Earth space during some particularly strong geomagnetic storms in October/November 2003. The emphasis is on their effects on several modern technological systems. Those effects, usually termed space weather effects, have their origin in variations on the sun, and they may at times influence critical systems in a very negative way. Among these are communication, navigation and positioning systems as well as air traffic and power distribution systems and various other types of electronic ground equipment.

The report contains an overview of specific problems arising during the so called “Halloween”-storms in the autumn of 2003, which was the period of strongest geomagnetic disturbances during the previous solar cycle. This report builds exclusively on information from open sources. Here it is possible to discern a pattern of global effects on various technological systems which will have to be termed as significant operating problems during a period of more than a week.

As is clear from these descriptions, space weather effects may at the moment really be predictable only in a statistical sense. However, this is still a basis for increasing alertness and taking precautions during particular periods. Hence, an accurate description of the prevailing situation in space is of great importance for operators. The most extensive source of both predictions as well as now-casting is the American Space Weather Prediction Center (SWPC), which at all times keeps comprehensive revised information available on the net. However, it is clear that the European Space Agency also wants to develop such capacity.

From the material contained herein it can be noticed that signals even in the micro wave region as well as power distribution systems suffer particular problems at high latitudes. In addition, we should as fairly new satellite operators be aware that even spacecraft in low Earth orbit are vulnerable to energetic particle precipitation during geomagnetic storms. Hence, we should seek to extend our experience of space weather effects in time to be prepared for the next activity maximum of the present solar cycle.

Innhold

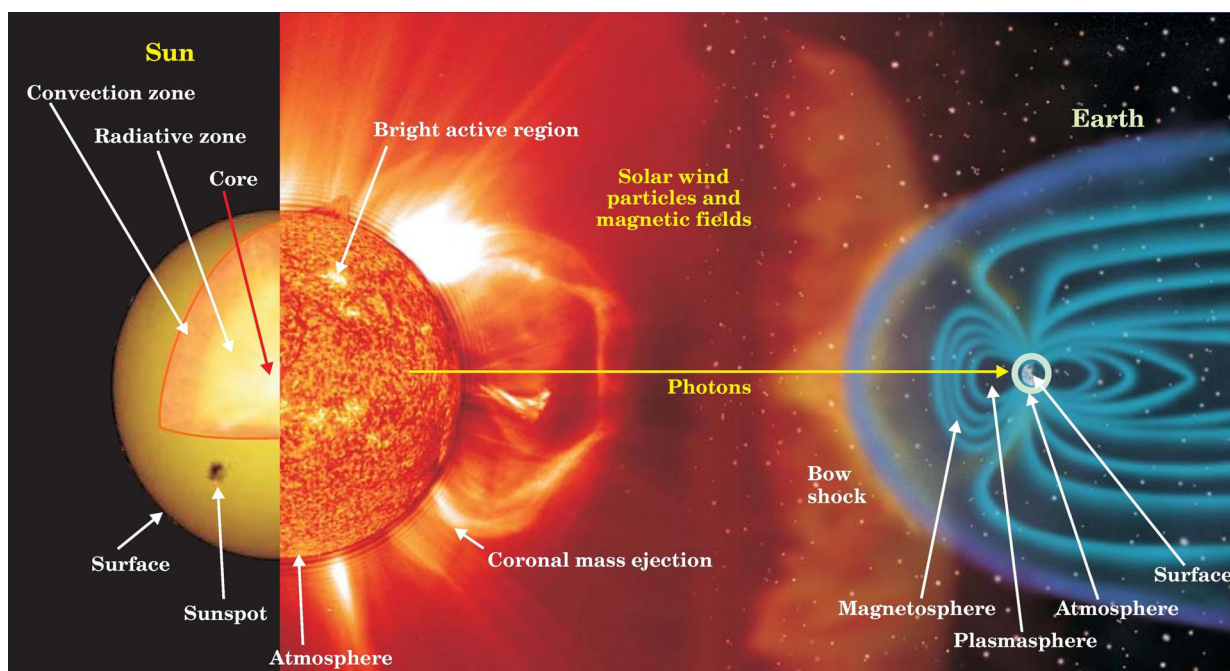
	Forord	6
1	Innledning	7
2	Tidsforløp av romværuviklingen	8
3	Tidsforløp av teknologiske konsekvenser	15
4	Oppsummering av prediksjonsresultater	24
5	Konklusjon	29
	Referanser	31
	Akronymliste	32

Forord

Denne rapporten gir en konkret beskrivelse av tidslinjen, både for prosesser og effekter, under en periode med spesielt sterke geomagnetiske forstyrrelser. Hensikten med rapporten er å gå gjennom en konkret romvær-hendelse for å gi en bedre forståelse for hvilke problemer vi kan risikere å bli stående ovenfor. Dermed vil det også foreligge et bedre grunnlag for å vurdere tiltak. Rapporten er en del av utredningsarbeidet under FFI's INNOSAT-prosjekt, og den er komplementær til FFI-rapport 2009/01071 Romvær – prosesser og effekter.

1 Innledning

Det har lenge vært kjent at antall solflekker varierer i sykler på omtrent 11 år. I vår egen tid har det også blitt mer og mer klart at denne solflekksykel bare representerer en signatur på mer fundamentale variasjoner i solens energiutstrømning [1]. Det er mange måter å framstille slik solaktivitet på, og en av dem er gjengitt skjematisk i Figur 1.1 under. Her sees de forskjellige lag av solen samt de energetiske overflatefenomenene som modifierer energistrømmen mot jorden og dens nære verdensrom.



Figur 1.1 Skjematisk framstilling av solens innvirkning på det nære verdensrom (hentet fra [1]).

Som fremstilt her blir energi overført gjennom sol-jord systemet via stråling, energetiske partikler og solvinden (plasma og magnetfelt). Disse forskjellige energibærerne representerer både separate tidskonstanter og vekselvirkningsnivåer for prosessene energiavsetningen går gjennom. Imidlertid vil tilstedeværelsen av solflekker alltid være en sentral signatur i aktive perioder.

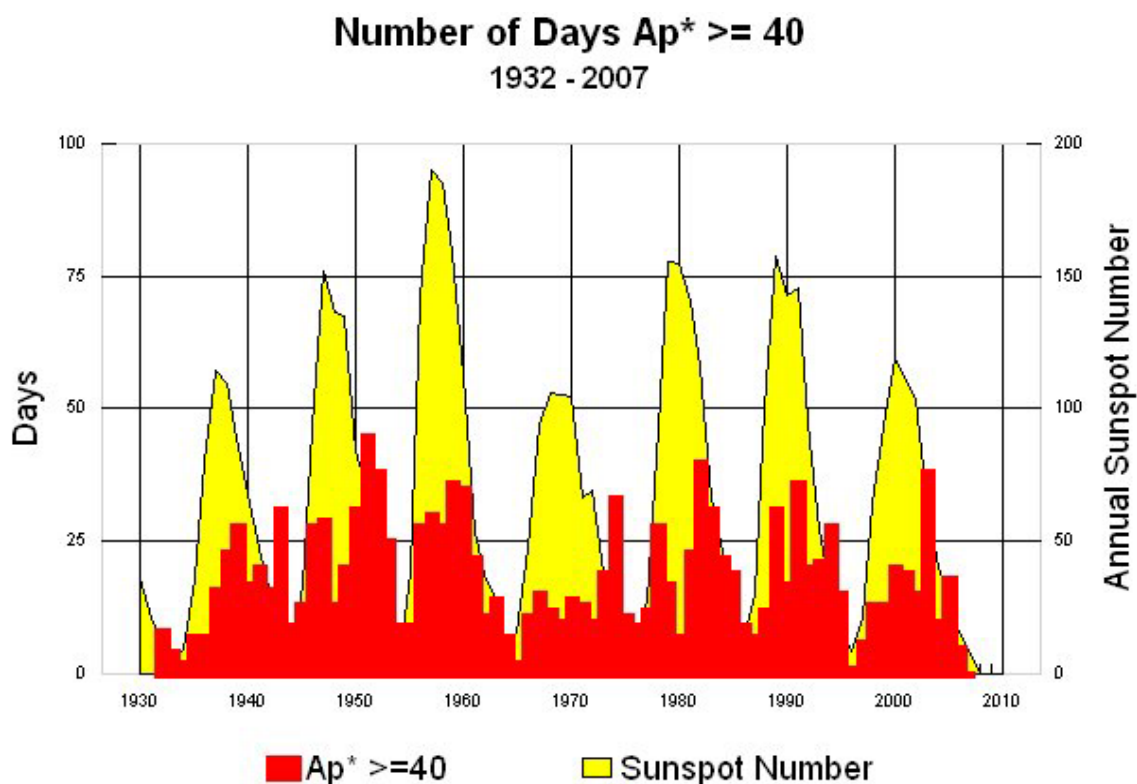
Det generelle bildet av en solsykel er da at den starter med få solflekker på høye breddegrader. Etter hvert vokser så antallet solflekker (og de blir ofte større) samtidig som de opptrer nærmere ekvator. Maksimum solflekketall får en gjerne ved midlere bredder før antallet igjen faller med tiden (og ytterligere bevegelse mot ekvator). Den korresponderende geomagnetiske aktiviteten i jordens nære verdensrom vil følge en tilsvarende tidsutvikling. Lengden på en slik sykel er i gjennomsnitt elleve år, men det kan være betydelige avvik fra dette. Solsyklusen er sjelden symmetriske. Det er som regel mer aktivitet i den nedadgående fasen, og de kan også overlappe hverandre.

Den forrige solsykelen, nummer 23 siden den systematiske registreringen startet i det nittende århundret, var ikke spesielt sterk. Siden utviklingen av flere moderne teknologiske systemer nå fordrer virksomhet i rommet har likevel antall problemer som følge av romværaktivitet skutt i været i løpet av den tiden [2].

Det kan derfor være instruktivt å gå gjennom et konkret hendelsesforløp under en forstyrret periode for å få en klarere oppfatning av potensielle trusler når den inneværende solsykelen (sykel 24) nå beveger seg mot sitt maksimum som er ventet rundt 2013.

2 Tidsforløp av romværutviklingen

For å kunne plukke ut en relevant studieperiode kan en oversikt som den gitt i Figur 2.1 (hentet fra hjemmesiden til NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration)) være til hjelp. Her vises den geomagnetiske Ap^* -indeksen (rød) overlagt på solflekktalet (gul) gjennom de syv siste solsyklene. Denne Ap^* -indeksen er spesielt egnet til å identifisere geomagnetisk aktive dager, og den er basert på bakkemålinger av jordens magnetfelt. Som figuren viser, er det generelt en tydelig overvekt av sterkt aktive dager i den avtagende delen av solsyklene.

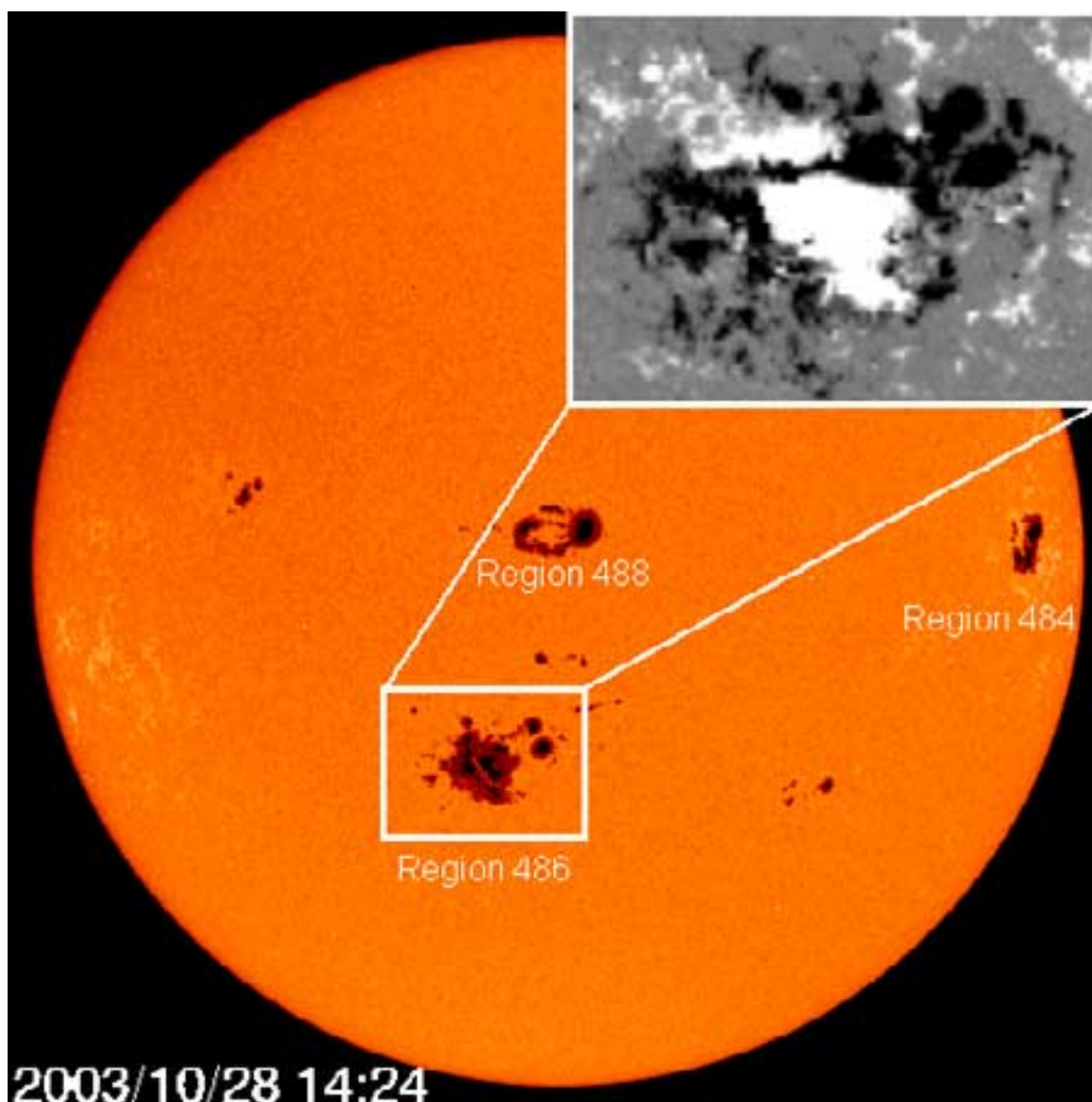


Figur 2.1 Plott av solflekktalet og den geomagnetiske Ap^* -indeksen gjennom de syv siste solsyklene.

Fra figuren kan man også se at solsykel 23 hadde sin maksimum like etter århundreskiftet, men at den sterkeste geomagnetiske aktiviteten forekom først mot slutten av 2003. I løpet av noen uker den høsten førte en serie kraftige solstormer til store forstyrrelser i vårt nære verdensrom, og noen

steder på kloden også på bakkenivå. Siden tidspunktet for de sterkeste forstyrrelsene var i månedesskiftet oktober/november er disse gjerne kjent som "halloween"-stormene.

Denne perioden ble innledet med at den første av tre meget aktive solflekkgrupper kom til syne fra jorden den 18. oktober. Disse tre solflekkområdene hadde alle et komplisert system av magnetfeltstrukturer knyttet til seg, og de var således helt fra starten av sannsynlige opphav til eksplosive prosesser på soloverflaten. I Figur 2.2 vises et bilde av soloverflaten, tatt fra SOHO-satellitten, med alle disse tre regionene synlige (nummerert i systemet til NOAA). Her er også overlagt et magnetogram for den av solflekkgruppene som gav opphav til de sterkeste flarene, det vil si eksplosjoner nær soloverflaten som gir opphav til energetiske partikler og Røntgen-stråling [2].



Figur 2.2 Soloverflaten med alle tre aktive solflekkgrupper samt magnetogram for den mest aktive av disse. Solflekkene er områder med lavere temperatur enn omgivelsene, og de deltar i den differensielle rotasjonen av soloverflaten. (På bildet her betyr dette at de beveger seg fra venstre mot høyre. Det tar omlag to uker fra de kommer til syne til de forsvinner igjen.)

Magnetogrammet er basert på observasjoner med SOHO's Michelson Doppler spektrograf. Som en ser er regionen preget av områder med motsatt polarisert magnetisk fluks (lyse og mørke områder) som delvis er innvevd i hverandre. Denne situasjonen kan betraktes som en form for potensiell energi lagret i magnetfeltstrukturen, som ved en utløsende faktor kan konverteres til kinetisk- og/eller strålingsenergi. En slik utløsende faktor kan for eksempel være den prosessen som kalles en magnetisk rekonfigurasjon, men nøyaktig hvordan dette skjer er fremdeles ikke fullt ut forstått.

En rekke studier av de påfølgende geomagnetiske stormene som denne solaktiviteten gav opphav til er blitt presentert i litteraturen. I løpet av perioden 18. oktober til 8. november (da den siste solfleck-gruppen forsvant ut av syne) ble det identifisert hele 80 såkalte Coronal Mass Ejections (CME) [3]. Disse kunnes nesten alle knyttes til de tre aktive solfleckgruppene vist i Figur 2.2. En CME er en plasmasky som frigjøres fra soloverflaten i forbindelse med rekonfigurasjoner av magnetfeltet der. For at en slik CME skal ha en effekt i jordens nære verdensrom må den for det første være rettet mot jorden, og for det andre effektivt overføre energi fra solvinden til magnetosfæren [2].

Normalt vil en CME bevege seg med hastigheter i området 500-1000 km/s, og den vil da kunne tilbakelegge avstanden mellom solen og jorden på 2-3 døgn. Imidlertid viste det seg at mange av CME'ene i denne perioden beveget seg meget hurtig. Faktisk forekom omtrent 20% av alle de ultrahurtige (> 2000 km/s) CME'ene i solsykel 23 i løpet av disse tre ukene. En slik CME vil også kunne drive sjokk i solvinden foran seg, og to av disse sjokkfrontene fra perioden nådde jorden på mindre en 24 timer [3]. Dette er meget sjeldent, og det skjer gjerne bare med flere solsyklers mellomrom.

Siden mange av disse CME'ene faktisk var ganske geoeffektive, gav den resulterende energioverføringen til magnetosfæren opphav til noen av de mest intense magnetiske stormene i solsykel 23. Dette gjaldt i særlig grad dagene 28.-31. oktober, men også andre deler av denne perioden var temmelig geomagnetisk aktive. I løpet av denne studieperioden ble det da også observert hele 143 flares. Mange av disse kunne assosieres med CME'er, men siden det er kjent fra tidligere at CME'er kan være vanskelig å observere nær solen er det ikke å vente en fullstendig sammenheng her.

I løpet av tre uker utgikk det blant disse faktisk hele tolv X-klasse solare flares fra disse områdene. Dette er en svært uvanlig produksjonsrate for så energirike prosesser. Klassifiseringen av slike hendelser bygger på styrken i utsendt Røntgen-stråling, og X er den mest intense av fire klasser. I Tabell 2.1 er det gitt en liste over disse (med starttidspunkt og opprinnelsesområde). Legg spesielt merke til at hele to tredjedeler av disse hadde sin opprinnelse fra region 0486 (det er magnetogrammet fra denne regionen som er vist i Figur 2.2).

De utheverte flarene i Tabell 2.1 kan også knyttes til de sterkeste Solar Proton Events (SPE) i perioden. Disse ble observert i geostasjonær bane en til tre timer senere enn starttidspunktet for de respektive flares. Bildet i Figur 2.2 ble tatt 28. oktober like etter en flare klassifisert som X17, og denne viste seg å være assosiert med den sterkeste SPE'en i forrige solsykel.

<i>Starttid (UT)</i>	<i>Klassifisering</i>	<i>Region nummer</i>	<i>Posisjon</i>
19. okt – 16:29	X1	0484	N08 E58
22. okt – 19:50	X1	0486	S22 E90
23. okt – 08:19	X5	0486	S21 E88
23. okt – 19:50	X1	0486	S17 E44
26. okt – 05:57	X1	0486	S15 E44
26. okt – 17:21	X1	0484	N02W38
28. okt – 09:51	X17	0486	S16 E08
29. okt – 20:37	X10	0486	S15 W02
02. nov – 17:30	X8	0486	S14 W56
03. nov – 01:09	X3	0488	N10 W83
03. nov – 09:43	X4	0488	N08 W77
04. nov – 19:29	X28	0486	S19 W83

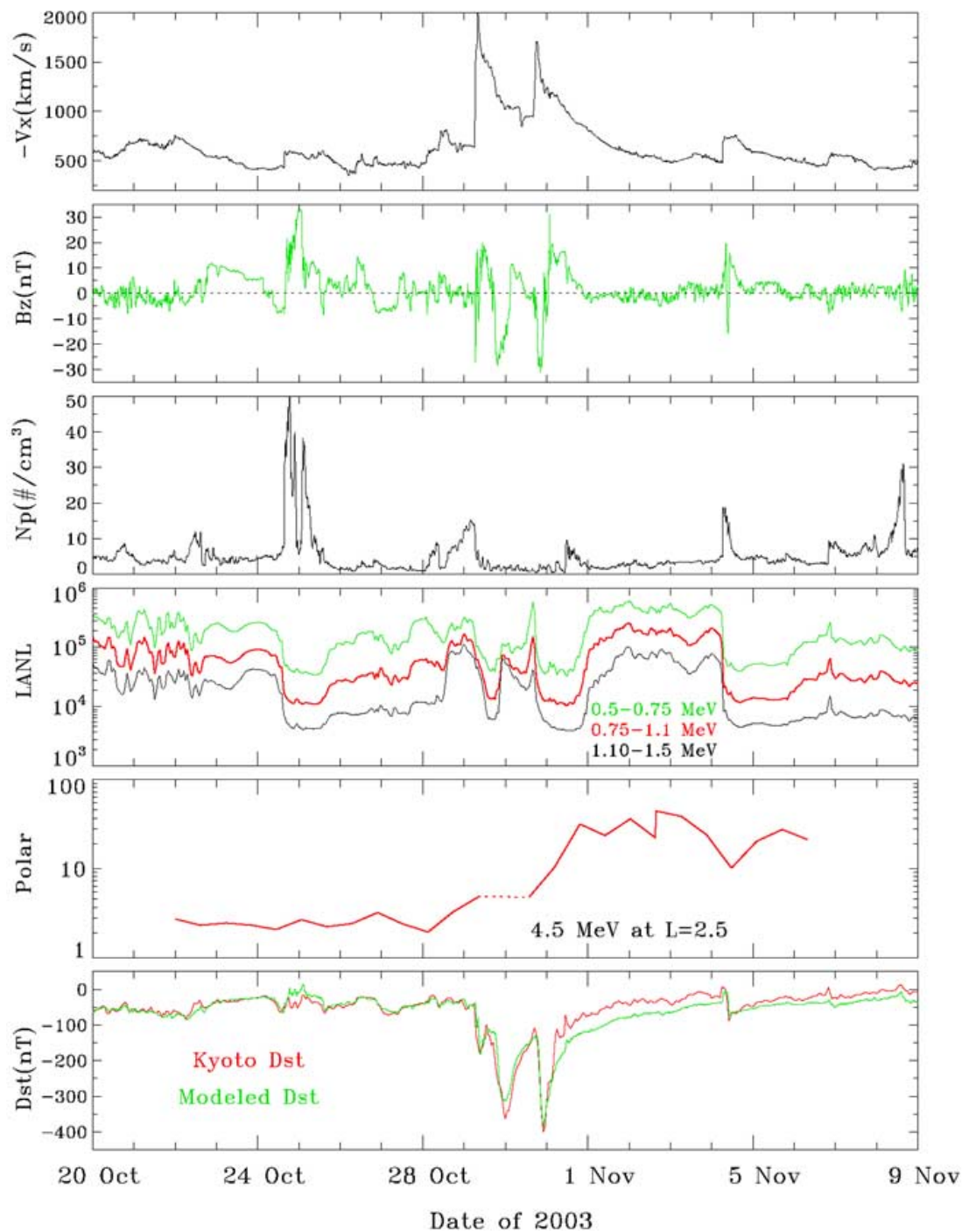
Tabell 2.1 Dette er en liste over et dusin X-klasse flares (tidspunkt, solflekkgruppe og posisjon) som ble observert i løpet av en tre ukers periode fra 18. oktober til 8. november 2003 i følge NASA.

Varigheten av slike hendelser er gjerne i overkant av et døgn, men her overlappet de flere ganger. Røntgen-stråling blir ofte assosiert med akselerasjon av elektrisk ladete partikler, og det er derfor rimelig å anta at SPE'er og flares er produkter av samme prosess. Men siden utsendelsen av partikler er mye mer direktiv enn stråling er det ikke særlig overraskende at det ikke alltid er en direkte sammenheng mellom observasjoner av flares og SPE her på jorden.

Som tidligere nevnt førte solaktiviteten i perioden til at en rekke CME'er beveget seg mot jorden, og disse modifiserte i sin tur ofte solvinden. I Figur 2.3 (hentet fra [4]) vises øverst de vanligste parametrene som brukes til å beskrive solvinden og dens effekt på jordens nære verdensrom. Solvindparametrene er basert på målinger fra ACE-satellitten, som er posisjonert i nærheten av Lagrange-punktet (dvs. der hvor solen og jordens gravitasjonskraft opphever hverandre - ca. 1 million km fra jorden).

Øverst sees den jordrettete solvindhastigheten som i perioden 29-31 oktober nådde opp i ekstreme verdier. Slike hastigheter, i området 1000-2000 km/s, er meget sjeldent observert [5], og dette var resultat av sjokk knyttet til CME'er assosiert med to ekstraordinært kraftige flares (henholdsvis klasse X10 og X17). Disse var forøvrig også ledsaget av en sterk negativ z-komponent i det interplanetare magnetiske feltet (nest øverst), og de ble følgelig svært geoeffektive.

Solvindtettheten (i midten) derimot er i denne perioden for det meste mindre en 10 cm^{-3} , bortsett fra en sterk økning til nesten 50 cm^{-3} i perioden 24-25 oktober. Denne økningen var resultatet av en CME fra solfleckgruppe 486 (se Figur 2.2) omtrent 61 timer tidligere. I dette tilfellet bygget sjokkfronten seg her opp til en trykkpuls, og gav opphav til en midlertidig sammenpressing av hele magnetosfæren som igjen medførte partikkelnedbør fra strålingsbeltene.

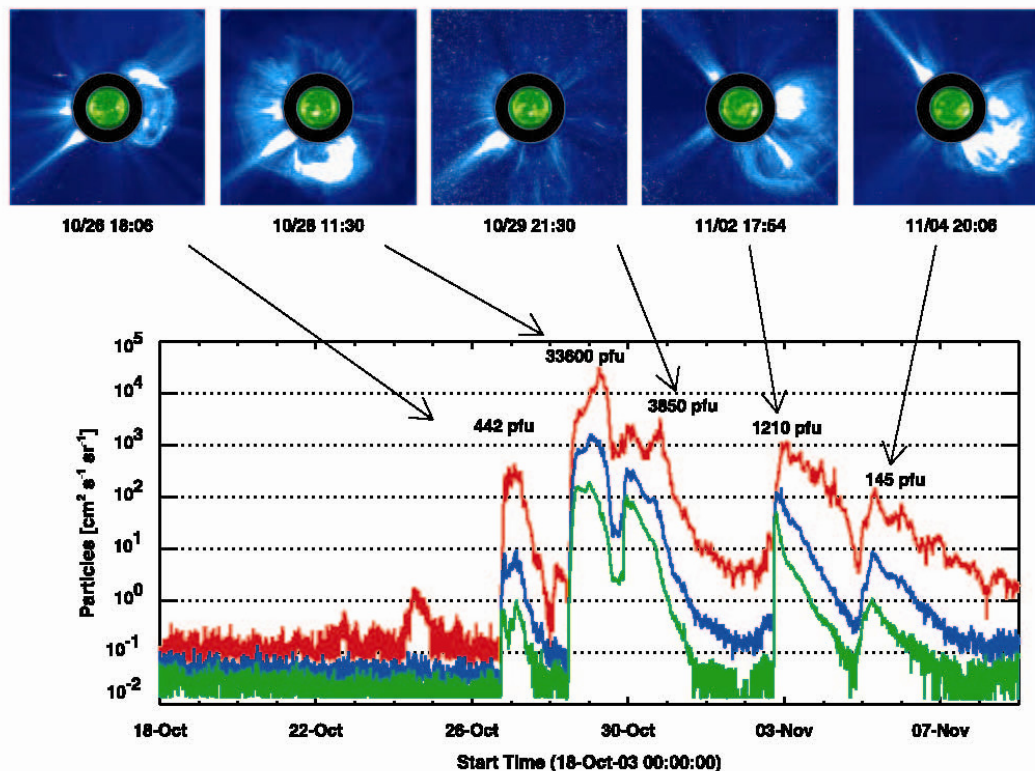


Figur 2.3 Solvindparametere, elektronflukser og Dst- indeks målt under "Halloween"-stormene høsten 2003. Solvindhastighet (øverst), z-komponenten av det interplanetare magnetiske feltet (nest øverst) og solvindtettheten (tredje øverst) er de viktigste solvindparametere. De to plottene av høyenergi elektronflukser bygger på målinger fra geostasjonær bane (LANL – tredje nederst) samt MEO Polar-satellitten (nest nederst). Dst-indeksen (nederst) beskriver magnetosfærens respons først og fremst gjennom variasjoner i den såkalte ringstrømmen (som delvis tilsvare strålingsbeltene). Figuren er hentet fra [4].

Denne figuren viser også to målinger som beskriver variasjoner av strålingsbeltene i samme periode. Tredje nederst sees målinger fra geostasjonær bane av flukser av energetiske elektroner (satt sammen fra seks forskjellige satellitter tilhørende Los Alamos National Laboratory (LANL)). Disse viser stor dynamikk gjennom hele perioden. Nest nederst vises så målinger av elektroner på enda høyere energier fra Polar-satellitten som i denne tiden var i såkalt Medium Earth Orbit (MEO), ikke så langt unna de baner som GPS-satellittene (og de framtidige Galileo-satellittene) befinner seg. Her vises det at et helt nytt strålingsbelte vokser frem i løpet av perioden under og etter den at ekstreme solvinden omsluttet jorden.

Som man ser gav periodene med ekstrem høy solvindhastighet og sterk negativ z-komponent i det interplanetare magnetfeltet 29-31 oktober store utslag i Dst-indeksen (nederst). Dette er en signatur for globale geomagnetiske stormer, dvs. at det er sterk aktivitet både på høye og lave bredder samt i hele det nære verdensrom. Under slike forhold modifiseres gjerne strålingsbeltene i betydelig grad, noe som da også skjedde her. Observasjoner fra flere satellitter tyder på at partikkeltettheten, særlig i det ytre beltet, øket betraktelig samtidig som det ble sterkt sammenklemt [6].

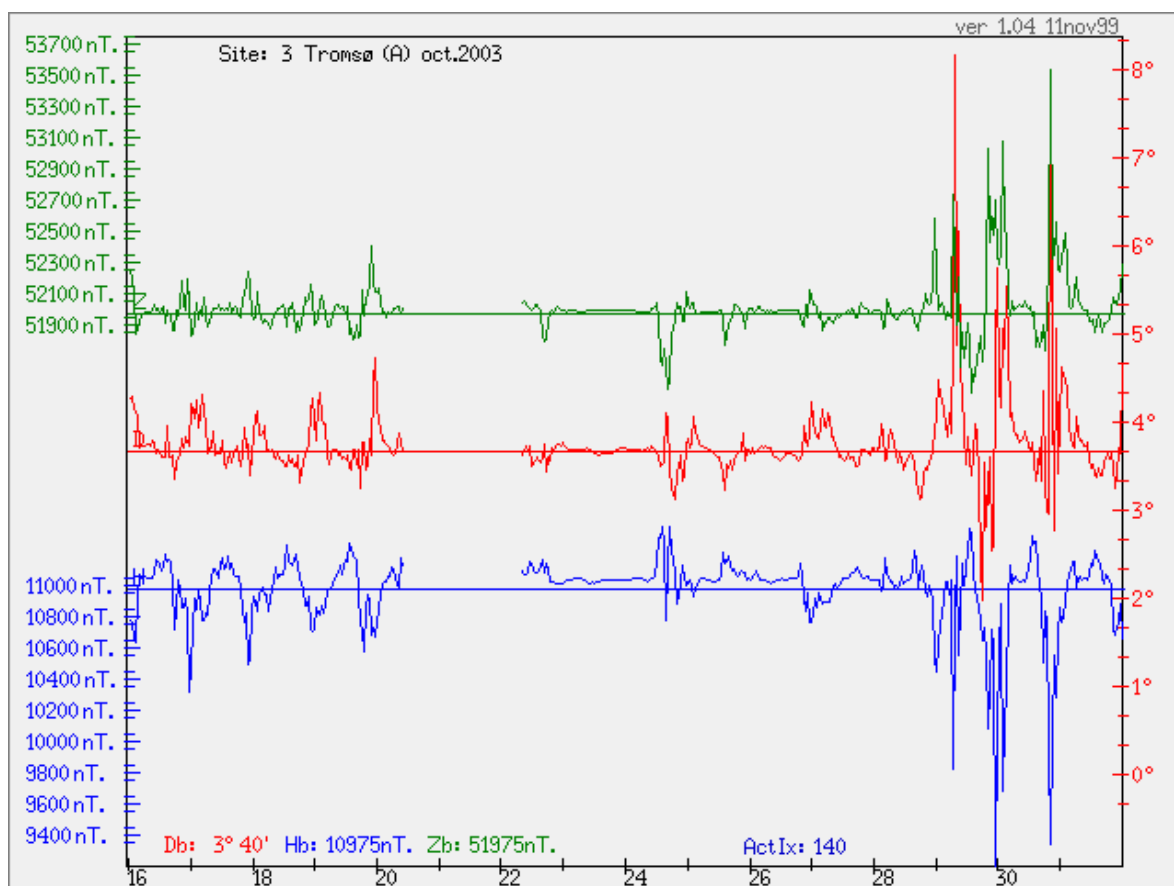
En ytterligere illustrasjon av utviklingen av strålingsbeltene gjennom perioden er gitt i Figur 2.4 (som er hentet fra [3]). Denne består av et plott basert på målinger av partikkelfluks fra GOES-satellittene, som går i geostasjonær bane, for perioden 18. oktober til 9. November. De tre kanalene som er brukt her er protoner med energi større enn 10 MeV (rød), større en 50 MeV (blå) og større enn 100 MeV (grønn). De fem toppene som er markert i plottet kan knyttes til de uthevede flarene i Tabell 2.1. I Figur 2.4 er det også montert bilder tatt fra SOHO-satellitten av de korresponderende CME'er som kan knyttes til disse flarene.



Figur 2.4 Variasjoner i strålingsintensiteten i geostasjonær bane som følge av solar flares [3].

Som en ser er det ytre strålingsbeltet, som geostasjonær bane går i ytterkant av, temmelig dynamisk i denne tiden. SPE'er assosiert med CME'ene trenger inn i magnetosfæren på åpne feltlinjer ved høye breddegrader og ender så raskt opp i strålingsbeltene (toppene) som følge av radiell diffusjon. I løpet av en dag eller to tømmes så beltet igjen ved at partikler tapes i atmosfæren. Begge disse prosessene involverer vekselvirkninger mellom partikler og elektromagnetiske bølger som settes opp i magnetosfæren [4]. Partiklene som tapes vil en se igjen som partikkelnedbør i lav jordbane og, som vi senere skal se, kan følgelig være en trussel også mot satellitter her.

I jonosfæren ser en også resultater av den økete geomagnetiske aktiviteten i form av nordlys. Dette gir også opphav til store magnetisk variasjoner på bakken, som for eksempel i Tromsø, som vist i Figur 2.5. Fra denne figuren er det ganske åpenbart at den magnetiske aktiviteten i Tromsø-området er mye mer intens og dynamisk de tre til fire siste dagene i måneden (da Dst-indeksen var høy) enn den var resten av perioden.



Figur 2.5 Magnetfeldmålinger fra Tromsø i oktober 2003 (alle tre komponenter). Plottet her er hentet fra hjemmesiden til Tromsø's geofysiske observatorium.

Det er imidlertid viktig å merke seg at slike lokale effekter av geomagnetiske stormer kan endre seg mye både i tid og rom avhengig av det totale hendelsesforløpet under en geomagnetisk storm.

3 Tidsforløp av teknologiske konsekvenser

Som det framgår av beskrivelsen av de geomagnetiske forholdene i disse tre ukene, var det mye aktivitet i hele perioden med en klar topp rundt månedsskiftet. Dette fikk i sin tur også store konsekvenser for en rekke teknologiske systemer. Siden de geomagnetiske effektene i deler av perioden overlappet hverandre kan det imidlertid ofte være vanskelig å etablere en til en sammenheng mellom spesifikk solaktivitet og en konkret teknologisk svikt. Disse vil derfor bli presentert i kronologisk rekkefølge her.

Parametrene som vanligvis brukes til å beskrive geofysiske prosesser kan ikke på en lett måte relateres til teknologisvikt. Derfor kan det være nyttig å gå veien via NOAA's romværskala. Denne er gjengitt i Tabell 3.1 A, B og C. Her er de geomagnetiske forstyrrelser delt opp i tre kategorier som igjen består av fem nivåer hver. Kategoriene dekker henholdsvis geomagnetiske stormer (G1-5), solstormer (S1-5) og radioforstyrrelser (R1-5). Disse kan opptre samtidig så vel som helt eller delvis uavhengig av hverandre. Skalaen i hver av kategoriene er delt opp i fem

nivåer av aktivitet hvor fokus er på de viktigste teknologiene som blir påvirket innen hvert område. Som en ser er det også en god del kryssende effekter her. Det vil si at flere kategorier kan ha en effekt på det samme teknologiske systemet.

Denne måten å knytte sammen geofysiske prosesser og samfunnsmessige konsekvenser er analog til Richter's skala for jordskjelv, og derfor brukes gjerne denne skalaen i forbindelse med romvær-prediksjoner. Dette er for eksempel tilfelle med de daglige varslene fra Space Weather Prediction Center (SWPC), som har den lengste operative historien på området. Derfor vil vi knytte både denne skalaen og varslene til de dokumenterte effektene i det følgende. Se forøvrig Tabell 3.1 A-C for en mer detaljert beskrivelse av skalaen.



NOAA Space Weather Scales

Category		Effect	Physical measure	Average Frequency (1 cycle = 11 years)
Scale	Descriptor	Duration of event will influence severity of effects		
Geomagnetic Storms			Kp values* determined every 3 hours	Number of storm events when Kp level was met; (number of storm days)
G 5	Extreme	Power systems: widespread voltage control problems and protective system problems can occur, some grid systems may experience complete collapse or blackouts. Transformers may experience damage. Spacecraft operations: may experience extensive surface charging, problems with orientation, uplink/downlink and tracking satellites. Other systems: pipeline currents can reach hundreds of amps, HF (high frequency) radio propagation may be impossible in many areas for one to two days, satellite navigation may be degraded for days, low-frequency radio navigation can be out for hours, and aurora has been seen as low as Florida and southern Texas (typically 40° geomagnetic lat.)**.	Kp=9	4 per cycle (4 days per cycle)
G 4	Severe	Power systems: possible widespread voltage control problems and some protective systems will mistakenly trip out key assets from the grid. Spacecraft operations: may experience surface charging and tracking problems, corrections may be needed for orientation problems. Other systems: induced pipeline currents affect preventive measures, HF radio propagation sporadic, satellite navigation degraded for hours, low-frequency radio navigation disrupted, and aurora has been seen as low as Alabama and northern California (typically 45° geomagnetic lat.)**.	Kp=8, including a 9-	100 per cycle (60 days per cycle)
G 3	Strong	Power systems: voltage corrections may be required, false alarms triggered on some protection devices. Spacecraft operations: surface charging may occur on satellite components, drag may increase on low-Earth-orbit satellites, and corrections may be needed for orientation problems. Other systems: intermittent satellite navigation and low-frequency radio navigation problems may occur, HF radio may be intermittent, and aurora has been seen as low as Illinois and Oregon (typically 50° geomagnetic lat.)**.	Kp=7	200 per cycle (130 days per cycle)
G 2	Moderate	Power systems: high-latitude power systems may experience voltage alarms, long-duration storms may cause transformer damage. Spacecraft operations: corrective actions to orientation may be required by ground control; possible changes in drag affect orbit predictions. Other systems: HF radio propagation can fade at higher latitudes, and aurora has been seen as low as New York and Idaho (typically 55° geomagnetic lat.)**.	Kp=6	600 per cycle (360 days per cycle)
G 1	Minor	Power systems: weak power grid fluctuations can occur. Spacecraft operations: minor impact on satellite operations possible. Other systems: migratory animals are affected at this and higher levels; aurora is commonly visible at high latitudes (northern Michigan and Maine)**.	Kp=5	1700 per cycle (900 days per cycle)

* Based on this measure, but other physical measures are also considered.

** For specific locations around the globe, use geomagnetic latitude to determine likely sightings (see www.sec.noaa.gov/Aurora)

Tabell 3.1A Definisjonene brukt i NOAA's romværskala, hentet fra deres egen web-side.

Solar Radiation Storms			Flux level of ≥ 10 MeV particles (ions)*	Number of events when flux level was met**
S 5	Extreme	Biological: unavoidable high radiation hazard to astronauts on EVA (extra-vehicular activity); passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk.*** Satellite operations: satellites may be rendered useless, memory impacts can cause loss of control, may cause serious noise in image data, star-trackers may be unable to locate sources; permanent damage to solar panels possible. Other systems: complete blackout of HF (high frequency) communications possible through the polar regions, and position errors make navigation operations extremely difficult.	10^5	Fewer than 1 per cycle
S 4	Severe	Biological: unavoidable radiation hazard to astronauts on EVA; passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk.*** Satellite operations: may experience memory device problems and noise on imaging systems; star-tracker problems may cause orientation problems, and solar panel efficiency can be degraded. Other systems: blackout of HF radio communications through the polar regions and increased navigation errors over several days are likely.	10^4	3 per cycle
S 3	Strong	Biological: radiation hazard avoidance recommended for astronauts on EVA; passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to radiation risk.*** Satellite operations: single-event upsets, noise in imaging systems, and slight reduction of efficiency in solar panel are likely. Other systems: degraded HF radio propagation through the polar regions and navigation position errors likely.	10^3	10 per cycle
S 2	Moderate	Biological: passengers and crew in high-flying aircraft at high latitudes may be exposed to elevated radiation risk.*** Satellite operations: infrequent single-event upsets possible. Other systems: effects on HF propagation through the polar regions, and navigation at polar cap locations possibly affected.	10^2	25 per cycle
S 1	Minor	Biological: none. Satellite operations: none. Other systems: minor impacts on HF radio in the polar regions.	10	50 per cycle

* Flux levels are 5 minute averages. Flux in particles \cdot s $^{-1}$ ster $^{-1}$ cm $^{-2}$ Based on this measure, but other physical measures are also considered.

** These events can last more than one day.

*** High energy particle measurements (>100 MeV) are a better indicator of radiation risk to passenger and crews. Pregnant women are particularly susceptible.

Tabell 3.1B Definisjonene brukt i NOAA's romværskala, hentet fra deres egen web-side.

Radio Blackouts			GOES X-ray peak brightness by class and by flux*	Number of events when flux level was met; (number of storm days)
R 5	Extreme	HF Radio: Complete HF (high frequency**) radio blackout on the entire sunlit side of the Earth lasting for a number of hours. This results in no HF radio contact with mariners and en route aviators in this sector. Navigation: Low-frequency navigation signals used by maritime and general aviation systems experience outages on the sunlit side of the Earth for many hours, causing loss in positioning. Increased satellite navigation errors in positioning for several hours on the sunlit side of Earth, which may spread into the night side.	X20 (2×10^{-3})	Fewer than 1 per cycle
R 4	Severe	HF Radio: HF radio communication blackout on most of the sunlit side of Earth for one to two hours. HF radio contact lost during this time. Navigation: Outages of low-frequency navigation signals cause increased error in positioning for one to two hours. Minor disruptions of satellite navigation possible on the sunlit side of Earth.	X10 (10^{-3})	8 per cycle (8 days per cycle)
R 3	Strong	HF Radio: Wide area blackout of HF radio communication, loss of radio contact for about an hour on sunlit side of Earth. Navigation: Low-frequency navigation signals degraded for about an hour.	X1 (10^{-4})	175 per cycle (140 days per cycle)
R 2	Moderate	HF Radio: Limited blackout of HF radio communication on sunlit side, loss of radio contact for tens of minutes. Navigation: Degradation of low-frequency navigation signals for tens of minutes.	M5 (5×10^{-5})	350 per cycle (300 days per cycle)
R 1	Minor	HF Radio: Weak or minor degradation of HF radio communication on sunlit side, occasional loss of radio contact. Navigation: Low-frequency navigation signals degraded for brief intervals.	M1 (10^{-5})	2000 per cycle (950 days per cycle)

* Flux, measured in the 0.1-0.8 nm range, in W \cdot m $^{-2}$. Based on this measure, but other physical measures are also considered.

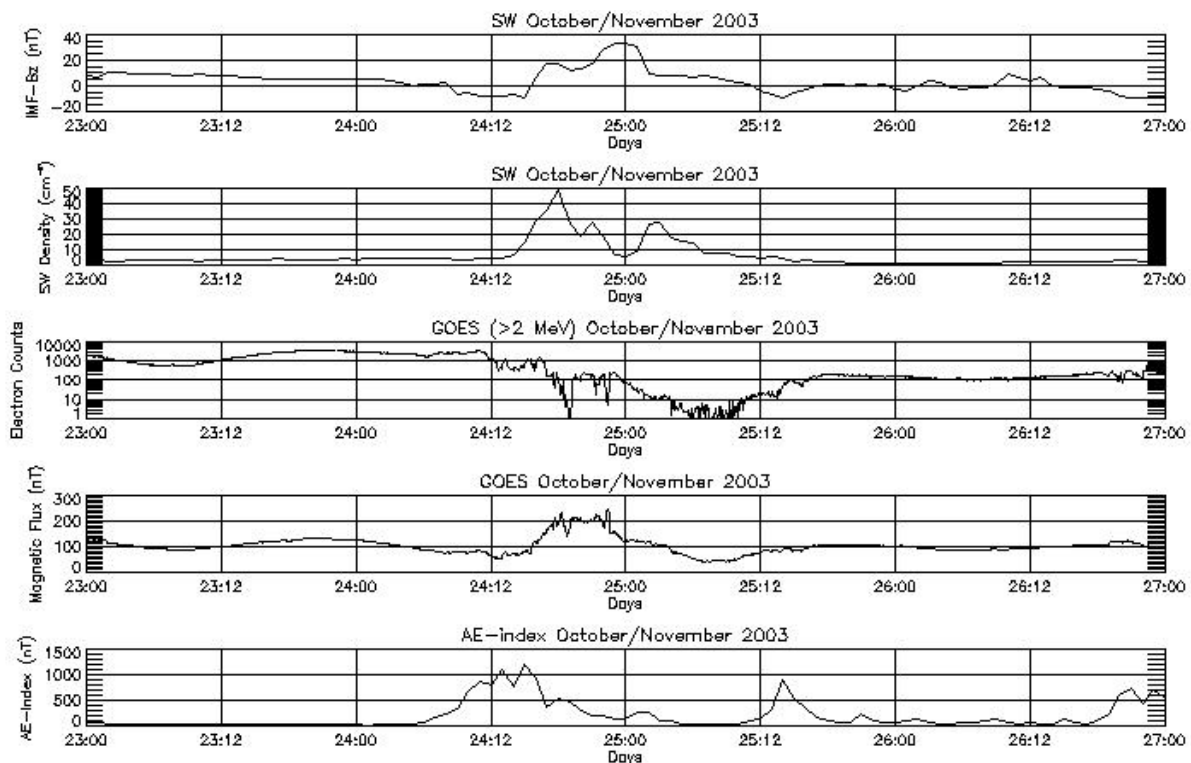
** Other frequencies may also be affected by these conditions.

Tabell 3.1C Definisjonene brukt i NOAA's romværskala, hentet fra deres egen web-side.

Den første skademeldingen fra perioden kom 23. oktober, og den dreide seg om NASA's Genesis-satellitt. Denne satellitten tok prøver av solvinden ved Lagrange-punktet da den gikk i sikringsmodus, høyst sannsynlig på grunn av sterke flukser av høyenergi partikler knyttet til en sterk flare [7]. (Det var både en kategori X1 og kategori X5 flare denne dagen – se Tabell 2.1.)

Flare av denne styrken tilsvarer R3 (sterke radioforstyrrelser) på romværskalaen, men disse ble ikke forhåndsvarslet. Derimot ble det for neste dag varslet om både sterke geomagnetiske stormer (G3) samt såkalte type IV radioforstyrrelse (bredbåndstråling i HF/VHF-båndet knyttet til solare flares). Derfor ble det 24. oktober sendt ut advarsel om sannsynlige kommunikasjonsproblemer på HF/VHF, og polare flyruter ble dermed omdirigert.

Som en kan se av Figur 3.1 (nederst) var det også ganske riktig sterk geomagnetisk aktivitet 24. oktober (AE-indeksen nådde rundt 1000 nT både 24. og 25. oktober). Denne aktiviteten kan knyttes til den negative z-komponenten i det interplanetære magnetfeltet i to perioder disse dagene som vist i Figur 3.1 (øverst). I tiden mellom disse periodene ankom imidlertid, som tidligere nevnt (se også Figur 2.2), en sjokkdrevet trykkpuls [3]. Tettheten i denne nådde opp i omtrent ti ganger den forutgående tettheten som vist i Figur 3.1 (nest øverst). Siden z-komponenten av det interplanetære magnetfeltet var positiv i perioden resulterte dette ikke i en direkte energioverføring til magnetosfæren, men denne ble i stedet klemt sammen av trykkøkningen.



Figur 3.1 Figuren viser først tetthetsmålinger (øverst) og magnetfeltmålinger (nest øverst) fra ACE-satellitten tatt opp i solvinden. Så følger fluks av energirike elektroner (midten) og magnetfelt (nest nederst) fra geostasjonær bane hentet fra en GOES-satellitt (værsatellitt). Nederst er så AE-indeksen fra det geomagnetiske datasenteret i Kyoto, Japan vist.

Denne sammentrykningen ga seg uttrykk i en sterk økning av magnetfeltet i geostasjonær bane som vist i Figur 3.1 (nest nederst). Som en følge av dette økte tapet av energirike elektroner til atmosfæren i betydelig grad, og fluksen i geostasjonær bane var betydelig mindre etter denne perioden som illustrert i Figur 3.1 (midten). Dette tapet medførte i sin tur en sterk økning av høyenergi partikkelfluks på høye breddegrader.

Det er velkjent at slike hendelser kan utgjøre en trussel mot satellitter i lav jordbane [2]. I dette tilfellet ble det aktualisert ved at JAXA (Japanese Aerospace Exploration Agency) mistet kontakt

med sin nye jordobservasjonssatellitt Midori-2 i løpet av 24. oktober. Senere ble da faktisk denne satellitten også deklart som tapt [7].

I de påfølgende dagene var det framdeles en varierende grad av geomagnetisk aktivitet med tilhørende høyenergi partikkelnedbør. Flere satellittoperatører meldt i løpet av denne perioden om anomalier som høyst sannlig kan knyttes til variasjoner i strålingsmiljøet. Blant annet meldte NASA om at Rhessi-satellitten (en Røntgen-satellitt), som går i lav jordbane, opplevde en spontan "cpu-reset" 25. oktober. Neste dag ble ESA's Smart-1 satellitt (i overføringsbane til månen) utsatt for tre automatiske midlertidige nedstegninger av jonemaskinen som var under uttesting på denne ferden. Den 27. oktober rapporterte så NOAA at en Røntgen-sensor på GOES-8 (værsatellitt i geostasjonær bane) ble slått ut for godt.

Selv om det foregående vitner om en relativt hektisk periode for satellittoperatører, blekner det likevel i forhold til de påfølgende dager. I denne perioden forekom de høyeste solvindhastighetene (~2000 km/s) noen sinne som er blitt direkte målt [5]. Samtidig ble to meget sterke flare (X10 og X17) observert på solen. Siden alle disse hendelsene var svært geoeffektive (dvs. at energioverføringen til det nære verdensrom var meget effektiv), ble døgnene 28.-31. oktober de meste geomagnetiske aktive i hele solsykel 23.

For den 28. oktober ble det riktignok bare varslet om sterke solstormer (S3), men allerede for dagen etter ble varslene oppgradert til alvorlige solstormer (S4) samtidig som det også ble varslet om ekstreme geomagnetiske stormer (G5). Dette er meget sjeldne varsler. Faktisk varsles G5 statistisk sett bare fire ganger per solsykel. Konsekvensene for forskjellige teknologiske systemer som ble utsatt for romværeffekter i denne perioden ble da også ganske alvorlige.

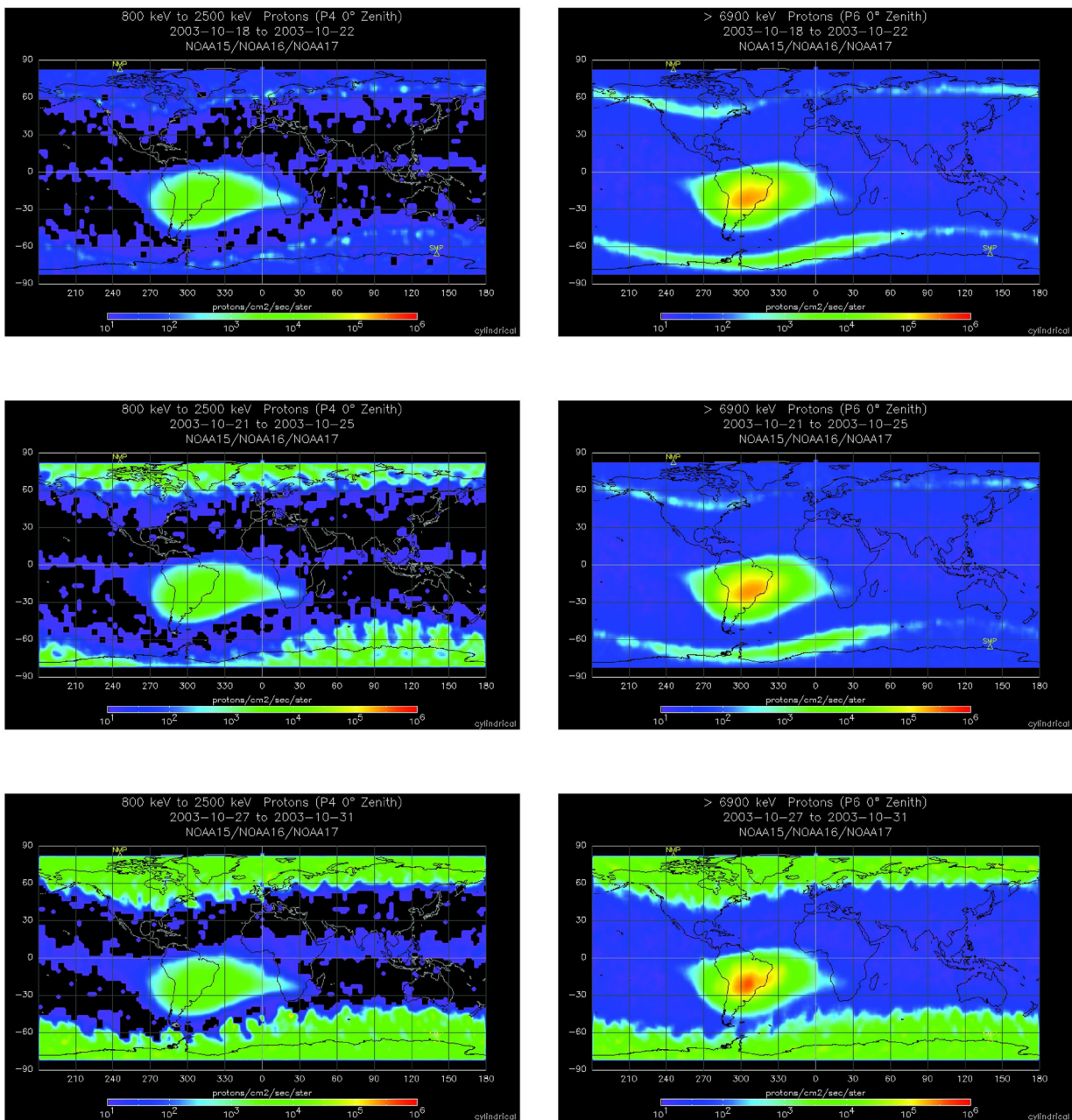
Heldigvis ble det på bakgrunn av disse varslene også tatt konkrete forholdsregler som uten tvil bidro til å begrense skadene. Spesielt viktig var det selvfølgelig å eliminere mulige direkte trusler mot mennesker, og derfor ble astronautene på den internasjonale romstasjonen (ISS) bedt om å oppholde seg i de mest strålingssikre delene for en lengre periode. I tillegg sendte amerikanske luftfartsmyndigheter (FAA) ut sitt første strålingsvarsel noen sinne. Dette medførte at polare flyruter igjen ble omdirigert.

Når det gjelder den generelle geomagnetiske situasjonen ser en fra Figur 2.3 at Dst-indeksen hadde høye verdier i flere påfølgende dager bortsett fra en kort relaksjonsperiode. Dette betyr at det var sterk aktivitet i hele det nære verdensrom denne tiden. Et utslag av all denne aktiviteten var store variasjoner i partikkelfluksen i geostasjonær bane, som illustrert i Figur 2.4, så vel som en forstyrret nordlyssone som illustrert i Figur 2.5.

Videre sees fra Figur 2.4 at det over flere dager var en nær sammenheng mellom oppbygging av partikkelfluks i geostasjonær bane knyttet til solare flares, samt forbigående perioder med nedbrytning knyttet til den lokale geomagnetisk aktiviteten. Denne uttømmingen av partikkelfluks på lukkede magnetiske feltlinjer foregår hovedsakelig ved tap til atmosfæren. Dermed betyr dette selvfølgelig også en sterk økning av høyenergi partikkelnedbør i denne tiden."

Et oversikt-bilde av partikkelnedbøren på høye energier i denne perioden er gitt i Figur 3.2. Her er protonfluks i energiområdet 0.8-2.5 MeV (til venstre) og på energier over 6.9 MeV (til høyre)

plottet overlagt på en geografisk kartprojeksjon. Plottene bygger på målinger fra amerikanske værsatellitter i polare baner. Hver kolonne er i sin tur delt opp i tre perioder (18-22 oktober øverst, 21-25 oktober i midten og 27-31 oktober nederst) som målingene er integrert over. Dette er gjort for å oppnå full dekningsgrad over hele kloden. Det store området med permanent partikkelnedbør omtrent midt på hvert plott er den såkalte søratlantiske anomali. Dett er et område med noe svekket magnetfelt som medfører at partikler tapes til atmosfæren her før de reflekteres som ellers i strålingsbeltene.



Figur 3.2 Globale målinger av partikkelnedbør i energiområdet 0.8-2.5 MeV (venstre kolonne) samt energier over 6.9 MeV (høyre kolonne). Hvert plott er gitt i geografiske bredde- og lengdegrader. Legg merke til den vertikale tidsutviklingen (fra topp til bunn) her. Disse data bygger på målinger fra amerikanske værsatellitter i polar baner (NOAA).

Den meste øyenfallende forskjellen mellom disse målingene er nok tidsutviklingen i de to energikanalene. Som en ser var partikkelfluksen mye høyere i siste del av perioden, men økningen begynte først på de lave energiene (til venstre). Dette reflekterer at forskjellige prosesser var involvert. Protonfluksen på de laveste energiene var nok i stor grad resultat av den tidligere nevnte magnetosfæriske kompresjonen 24. og 25. oktober. På høyere energier derimot, var nok kilden populasjoner av protoner knyttet til solare flares bygget opp på lukkede magnetiske feltlinjer i strålingsbeltene. Den medfølgende økningen av protonenergi betydde i tillegg at trusselen denne partikkelnedbøren utgjorde også mot satellitter i lave jordbaner økte vesentlig i løpet av perioden.

Denne tolkningen støttes av at Dst-indeksen først øket fra 28. oktober som vist i Figur 2.3. Den magnetiske aktiviteten på bakkenivå begynte imidlertid å øke allerede 24. oktober, og økte så ytterligere i styrke 28. oktober som illustrert i Figur 2.5. Dette betyr at hele det nære verdensrom var sterkt preget av geomagnetisk aktivitet mot slutten av perioden. I sin tur medførte denne partikkelnedbøren at en rekke satellitter opplevde anomalier disse siste dagene i oktober. Dette tross for at NASA allerede på forhånd hadde plassert fem dyre jordobservasjons-satellitter i sikringsmodus.

En detaljert oversikt over anomaliene fra hele perioden er gitt i Tabell 3.2 (hentet fra [7]). Som det fremgår her oppstod nærmere 60% av alle innrapporterte satellittanomalier i tre-ukers perioden i løpet av tre dager i slutten av oktober. I tillegg viste det seg at en like stor del av de berørte satellittene gikk i lav jordbane. Begge disse forholdene peker i retning av at de økte fluksene av protoner med mer enn 6.9 MeV energi observert i denne perioden forårsaket anomaliene.

Skader og anomalier som følge av høyenergi partikler antar enten form av såkalt "deep dielectric discharge (DDD)" eller "single event upset (SEU)". DDD er resultat av oppbygging av ladning elektroniske strukturer eller ledninger som i sin tur fører til overslag, mens SEU er resultat av endringer i tilstanden til hukommelsesceller eller halvlederenheter som følge av direkte partikkeltreff.

Alvorsgraden av disse effektene er i sin natur statistisk, men øker generelt med økende partikkelfluks. Det må dog understrekes at den alvorligste hendelsen, tapet av den nye jordobservasjonssatellitten Midori-2, jo skjedde før perioden med den mest energetiske partikkelnedbøren. Dette viser hvor vanskelig trusselvurdering er under perioder med høy solaktivitet, og at det kan være på sin plass å innta en konservativ holdning til operasjoner under slike forhold.

Imidlertid er det ikke bare selve satellittplattformen som blir påvirket av romværet, men også signalgangen til bakken [2]. I denne sammenhengen er det som regel variasjonene i jonsofæren som utgjør hovedproblemet. Disse var da også betydelige i dagene 28.-30. april, som det kan sluttes både fra de høye verdiene av forskjellige geomagnetiske indekser og lokale magnetfeltmålinger på bakken i perioden.

For GPS-brukere falt mottagere på høye bredder ut på grunn av signaltap knyttet til jonsfærisk scintillasjon [8]. I tillegg falt WAAS-tjenesten i store deler av USA bort fordi denne er avhengig av en statisk modellering av jonsfæren [7]. Dette får konsekvenser for mange samfunnsområder fordi presisjonsnavigasjon dermed ikke er mulig over en lengre periode.

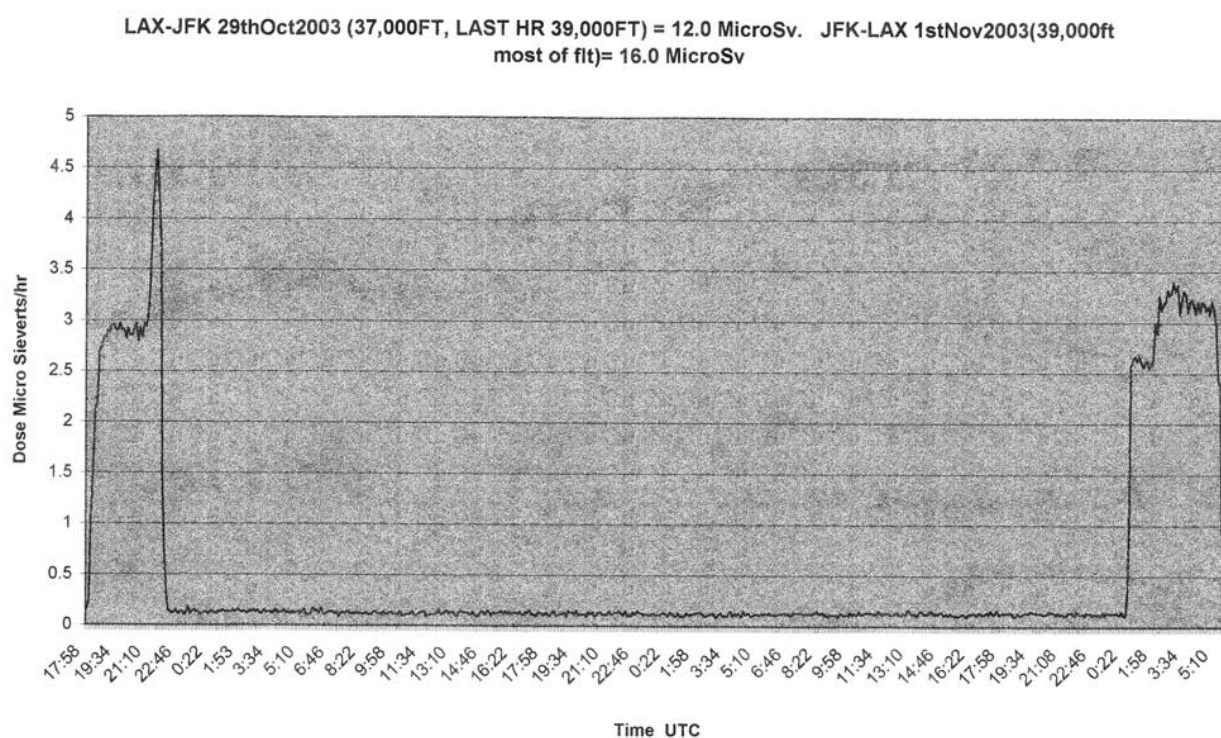
Også Loran-C systemet, som opererer i LF-området, blir påvirket av jonsfæriske variasjoner. Under denne perioden var det særlig stasjonen på Newfoundland som meldte om interferensproblemer [7]. Dermed var også backup-systemet for GPS utilgjengelig denne tiden.

DATO	SATELLITT	BANE	FEILMELDING
23. oktober	Genesis	L1	Sikkerhetsmodus (gjennomrettet etter 1 uke)
24. oktober	Midori 2	LEO	Deklarert tapt
	Stardust	Interplanetær	Sikkerhetsmodus (gjenopprettet)
	Chandra	LEO	Observasjoner stoppet pga. for mye stråling
	GOES 9,10,12	GEO	Høy BER og mistet magnetotorquer (12)
25. oktober	Rhessi	LEO	CPU resatt (stråling)
26. oktober	Smart 1	LTO	Autostopp på jonemaskin tre ganger
	Integral	LEO	Sikkerhetsmodus for et instrument
	Chandra	LEO	Observasjoner stoppet pga. for mye stråling
27. oktober	GOES 8	GEO	Mister et Røntgeninstrument
28-30. oktober	NOAA 17	LEO	Instrumenttap
	Ace, Wind	L1	Datatap
	Chandra	LEO	Observasjoner stoppet pga. for mye stråling
	Kodama	GEO	Sikkerhetsmodus
	DMSP F14	LEO	Datatap
	Rhessi	LEO	CPU resatt (stråling)
	Chips	LEO	Kommunikasjonsavbrudd (1 døgn)
	SOHO	L1	Sikkerhetsmodus for et instrument
	Mars Odyssev	Interplanetær	Sikkerhetsmodus
	Mars Explorer	Interplanetær	Midlertidig tap av stjernetracker
	Spitzer	Heliosentrisk	Sikkerhetsmodus (4 døgn)
	RXTE	LEO	Instrumenter resatt
	WMAP	L2	Midletidig tap av stjernetracker
	GALEX	LEO	Datatap
	Polar	MEO	Datatap
	Cluster	MEO	CPU resatt
	FedSat	LEO	Midlertidig tap av plattformstabilisering
	ICESat	LEO	GPS resatt
	UARS	LEO	Datatap
2. november	Chandra	LEO	Observasjoner stoppet pga. for mye stråling
6. november	Polar	MEO	Instrument resatt
6. november	Mars Odyssev	Interplanetær	Ut av sikkerhetsmodus

Tabell 3.2 Oversikt over satellittanomalier rapportert i perioden 18. oktober til 8. november 2003.

Som tidligere nevnt var denne perioden også preget av flere SPE's (se Figur 2.4). I noen tilfeller er disse sterke nok til å bli observert på bakken, og bli en såkalte Ground Level Event (GLE). Nettopp en slik opptrådte 29. oktober, og effekten av denne ble direkte målt under en amerikansk transkontinental flyreise [9]. I Figur 3.3 er den resulterende doseraten målt i selve flyet plottet som funksjon av lokal tid.

Senere analyser viste at den tilleggsstråling, utover effekten fra vanlig kosmisk bakgrunnsstråling, dette medførte for flypersonellet var av signifikant karakter. Dette vil ha enda større betydning for transpolare ruter hvor jordens magnetfelt ikke har samme skjermingsvirkning som på lavere bredder.

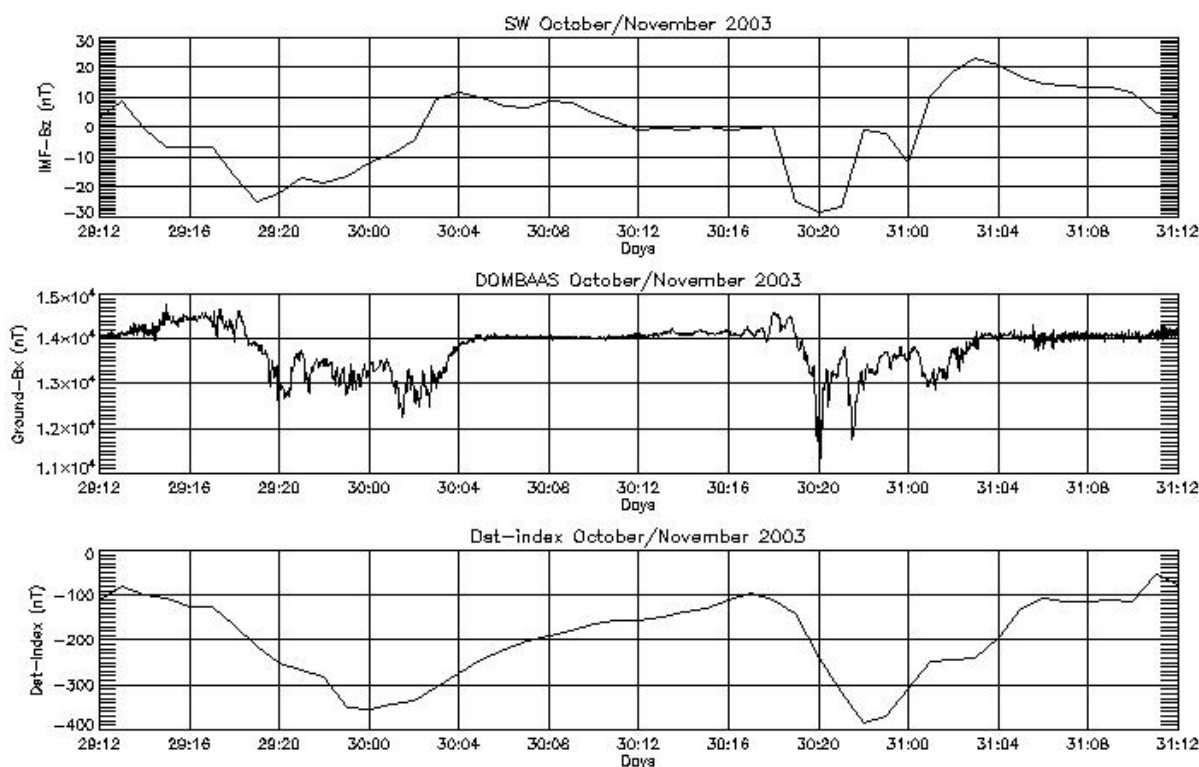


Figur 3.3 Doserate målt som funksjon av lokal tid under en tur-retur flygning mellom Los Angeles og New York. Den lange perioden med lav intensitet på midten er bakketid. Legg merke til den ekstra toppen (til venstre) under flygning 29. oktober da effekten av en veldig sterk SPE kunne merkes selv på så lave breddegrader som her (figuren er hentet fra [9]).

Det er kjent fra tidligere at jonosfæriske strømsystemer kan indusere elektriske felt i kraftdistribusjons-systemer, og på den måten overbelaste dem [2]. Slike eksterne induerte strømmer ble registrert i kraft-linjer i løpet av denne perioden både i Wisconsin og New York uten at det førte til overbelastninger [7]. Imidlertid gikk det samtidig verre i Malmø, noe som godt illustrerer den globale naturen av disse fenomenene.

Om kvelden 30. oktober svingte igjen z-komponenten av det interplanetære magnetfeltet sterkt sørover (se Figur 3.4), og de resulterende geomagnetiske forstyrrelsene gav opphav til sterke

såkalte "Ground Induced Currents (GIC)" i hele det sørlige Skandinavia. Dette er strømmer i bakken som blir indusert av sterke jonsfæriske strømmer som flyter parallelt med bakken i nordlyssonen.



Figur 3.4 Figuren viser z-komponenten av det interplanetare magnetfeltet (øverst), den nordover rettede komponenten av magnetfeltet målt på bakken ved Dombås (midten) og Dst-indeksen (nederst).

Som man ser skjedde dette både 29. oktober og 30. oktober, men strømmen den siste kvelden var sterkere som illustrert av det større magnetfeltutslaget da. I sin tur førte dette til at en 130 kV kraftlinje i Malmø-området falt ut rundt kl. 21 lokal tid [10]. Dette medførte at omtrent 50.000 mennesker var uten strømforsyning i nesten en time.

Fra denne gjennomgangen ser en at et ganske vidt spekter av teknologier kan bli rammet av slike stormer i rommet. Dette bunner i at effektene av en enkelt opprinnelig hendelse på solen kan gi opphav til nye prosesser i hele det nære verdensrom så vel som på bakken. Siden samfunnet med tiden også blir stadig mer avhengig av teknologier som inkorporerer et romsegment, er det viktig å utvikle vår evne til å varsle disse hendelsene.

4 Oppsummering av prediksjonsresultater

I denne sammenheng kan det være nyttig å gå tilbake å se litt på de faktiske varslene som ble utstedt fra SWPC i denne perioden. Tradisjonelt har disse varslene blitt gitt for tre dager om gangen med daglige oppdateringer. Et slikt varsel, fra 28. oktober, er gjengitt i Figur 4.1 i sin helhet. Som en ser er slike varsler i stor grad preget av statistiske prediksjoner basert på empiriske observasjoner.

SDF Number 301 Issued at 2200Z on 28 Oct 2003

IA. Analysis of Solar Active Regions and Activity from 27/2100Z to 28/2100Z: Solar activity continues at high levels. Region 486 (S17E04) produced one of the largest flares of this solar cycle, an X17/4B proton flare peaking at 28/1110Z. This flare had intense radio bursts including a 245 MHz burst near 500,000 sfu and a Tenflare of 13,000 pfu. A very fast (near 2000 km/s), earthward directed full halo CME was observed on SOHO/LASCO imagery. Region 486, a beta-gamma-delta group with over 2100 millionths of white light areal coverage, is now one of the largest and most complex active regions of solar cycle 23. Region 484 (N03W68) maintains considerable size and complexity as it approaches the west limb. It produced occasional C-class activity and a low M-class flare at 28/1613Z. Region 488 (N08W04) continues its rapid growth and now exceeds 800 millionths of coverage in a beta-gamma-delta configuration. Frequent C-class flare activity was observed in this region throughout the period. New region 493 (N09E05) was numbered today.

IB. Solar Activity Forecast: Solar activity is expected to continue at high levels. Region 486 in particular, has potential to produce further major flare activity. An isolated major flare is possible from Regions 484/488.

IIA. Geophysical Activity Summary 27/2100Z to 28/2100Z: The geomagnetic field was quiet to active. A CME was observed to pass the ACE spacecraft at around 0130Z. Solar wind speed rose to near 800 km/s, but Bz stayed northward, thwarting a significant geomagnetic response. The X17 flare that occurred at 28/1110Z produced proton events at greater than 10 and greater than 100 MeV, which remain in progress at this time. The greater than 100 MeV event began at 28/1145Z with a maximum so far of 176 pfu. The greater than 10 MeV proton event began at 28/1215Z with a maximum so far of 6020 pfu. A polar cap absorption began at 28/1237Z and remains in progress.

IIB. Geophysical Activity Forecast: The geomagnetic field is expected to range from unsettled to potentially severe storming in the next 24 to 48 hours. Today's X17 flare produced a large and fast halo CME that will likely impact the Earth's magnetic field by midday on day one. Past events of this magnitude have almost always produced severe storming. The storm is expected to continue through at least the first half of day two. Unsettled to minor storm levels are expected on day three. The greater than 100 MeV proton event is expected to end by day two. The greater than 10 MeV proton event will likely persist through day three.

III. Event Probabilities 29 Oct-31 Oct

Class M 90/90/90
Class X 50/50/50
Proton 99/99/75
PCAF in progress

IV. Penticton 10.7 cm Flux

Observed 28 Oct 274
Predicted 29 Oct-31 Oct 270/260/250
90 Day Mean 28 Oct 124

V. Geomagnetic A Indices

Observed Afr/Ap 27 Oct 013/015
Estimated Afr/Ap 28 Oct 015/018
Predicted Afr/Ap 29 Oct-31 Oct 080/100-100/120-015/025

VI. Geomagnetic Activity Probabilities 29 Oct-31 Oct

A. Middle Latitudes

Active 15/15/50
Minor storm 25/25/15
Major-severe storm 60/60/05

B. High Latitudes

Active 10/10/50
Minor storm 20/20/25
Major-severe storm 70/70/10

Figur 4.1 Romværvarsel fra SWPC utstedt 28. oktober 2003, og gyldig for de tre neste dagene.

Varslet fra starten av perioden, 18. oktober, viser derimot at bare relativt lav solaktivitet var forventet på dette tidspunktet. Siden dette generelt var en periode med stor solflekkaktivitet, ble det likevel tatt høyde for omtrent 30% sjanse for noe geomagnetiske aktivitet alle de tre kommende dagene. Det viste seg da også at AE-indeksen ble liggende mellom 500 og 1000 nT i deler av denne tiden.

Varselet fra 22. oktober viser så at mye mer aktive forhold ble forventet. Grunnen til dette var at solflekke-region 486, som allerede hadde vært kilde for flere X-klasse flares på dette tidspunktet, nå var i en slik posisjon at tilhørende CME sannsynligvis ville bevege seg i retning jorden. Dermed var det også grunn til å forvente mer geomagnetisk aktivitet. Faktisk ble det da også observert en X1-klasse flare fra region 486 denne samme dagen. Siden denne også genererte en CME som ble antatt å nå jorden 24. oktober ble det varslet hele 30% sjanse for en sterk geomagnetisk storm denne dagen (og 40% for liten).

Sjokket fra denne CME nådde da også ganske riktig jorden på den anslåtte dagen. Imidlertid endte dette opp med bare middels geomagnetisk aktivitet og AE-indeksen lå mellom 500 og 1000 nT igjen. Sannsynligvis ble ikke aktiviteten høyere fordi IMF-Bz var nordover mesteparten av tiden. Solvindtettheten var derimot usedvanlig høy (se Figur 2.3), og det resulterende økte trykket mot magnetosfæren førte til en sammenpressing av magnetfeltlinjene. Dette gav i sin tur opphav til partikkelnedbør på midlere (<2.5 MeV) energier (se Figur 3.2).

Som det framgår av Tabell 3.2 ble den japanske satellitten Midori-2, som gikk i lav jordbane, erklært tapt i denne perioden. Dette illustrerer godt den statiske naturen av denne trusselen, siden dette skjedde på et tidspunkt da partikkelnedbøren ennå ikke var på sitt kraftigste.

Den 28. oktober var varselet blitt atskillig mer alvorlig, og dette er gjengitt i Figur 4.1 i sin helhet. På dette tidspunktet var det allerede observert en meget sterk flare fra solflekkegruppe 486. Denne ble klassifisert som X17, og var inntil da den sterkeste flare i hele solflekk-syklus 23. En hurtig CME var også observert i denne tiden, og det var derfor grunn til å varsle store geomagnetiske forstyrrelser framover. Derfor ble det varslet hele 70% sjanse for sterke stormer på høye breddegrader de neste to dagene.

Som en ser fra Figur 2.3 oppstod det også sterke geomagnetiske stormer denne tiden med en Dst-indeks som nådde nesten -400 nT. I tillegg økte partikkelnedbøren betydelig (se Figur 3.2) både i form av total fluks og høyere energi. Det er i løpet av denne tiden at de fleste satellittanomalierne blir rapportert (se Tabell 3.2), og mange av disse var i lav jordbane. Det er altså åpenbart at partikkelnedbør fra strålingsbeltene kan utgjøre en betydelig trussel for slike satellitter.

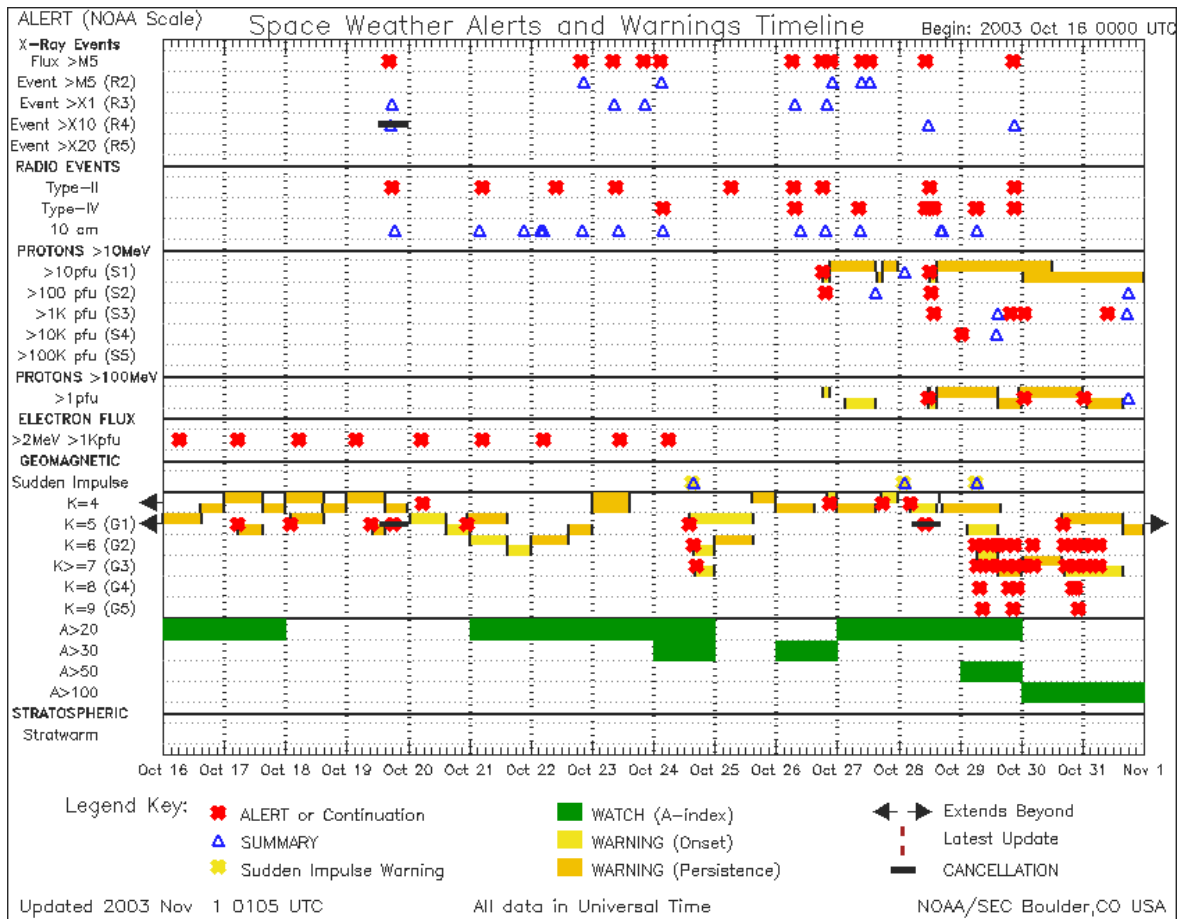
Dessuten kan tilstrekkelig sterke SPE'er gi opphav til umiddelbare effekter direkte på bakkenivå som illustrert ved den tidligere nevnte strålingen målt på en flyrute over sørlige deler av USA [9]. Faktisk kom alle såkalte GLE i løpet av denne perioden (nemlig 28. og 29. oktober samt 2. november). Alle disse tre var knyttet til X-klasse flares som vist i Tabell 2.1.

I tillegg ble det også observert store tetthetsvariasjoner i jonosfæren samt sterke magnetisk variasjoner på bakken i nordlyssonen som illustrert i Figur 2.5. Dette skjedde på bakgrunn av prosesser som er spesifikke for jonosfæren, og er således i prinsippet ikke nødvendigvis direkte knyttet til partikkel-nedbøren. Imidlertid er det ofte sammenfall i tid av slike hendelser siden alle er en del av energi-avsetning drevet av solare prosesser. Derfor opptrer både GPS-forstyrrelser og brudd på kraftdistribusjon gjerne samtidig med satellittproblemene.

Alle varslene som har blitt omtalt her har bare tidsopløsning på et døgn. Dette kommer av at de i stor grad er basert på statistikk og empirisk kunnskap. Et av de store usikkerhetsmomentene her er overføringen av masse og energi via CME, som ennå ikke kan modelleres ut fra fysiske prinsipper. I tillegg ble det gjort en vurdering av fem forskjellige empiriske modeller [11], hvor det vist seg at prediksjonsusikkerheten for de fem største CME i perioden var i størrelsesorden et halvt døgn.

For å forbedre dette, trengs det ytterligere forståelse for hvordan en CME beveger seg gjennom koronaen samt dens vekselvirkning med solvinden. I tillegg er det vanskelig å prediktere magnetfeltretningen som har stor betydning for effektiviteten i energioverføringen til magnetosfæren. Alle disse elementene må forbedres hvis prediksjonene av geomagnetiske forstyrrelser skal bli mer nøyaktige [12].

Nåtidsvarsling er derfor et viktig element for alle som er avhengig av romværforhold. En fullstendig oversikt over slike varsler for siste halvdel av oktober er vist i Figur 4.2. Disse er igjen relatert til NOAA's romværskala gjengitt i Tabell 3.1.

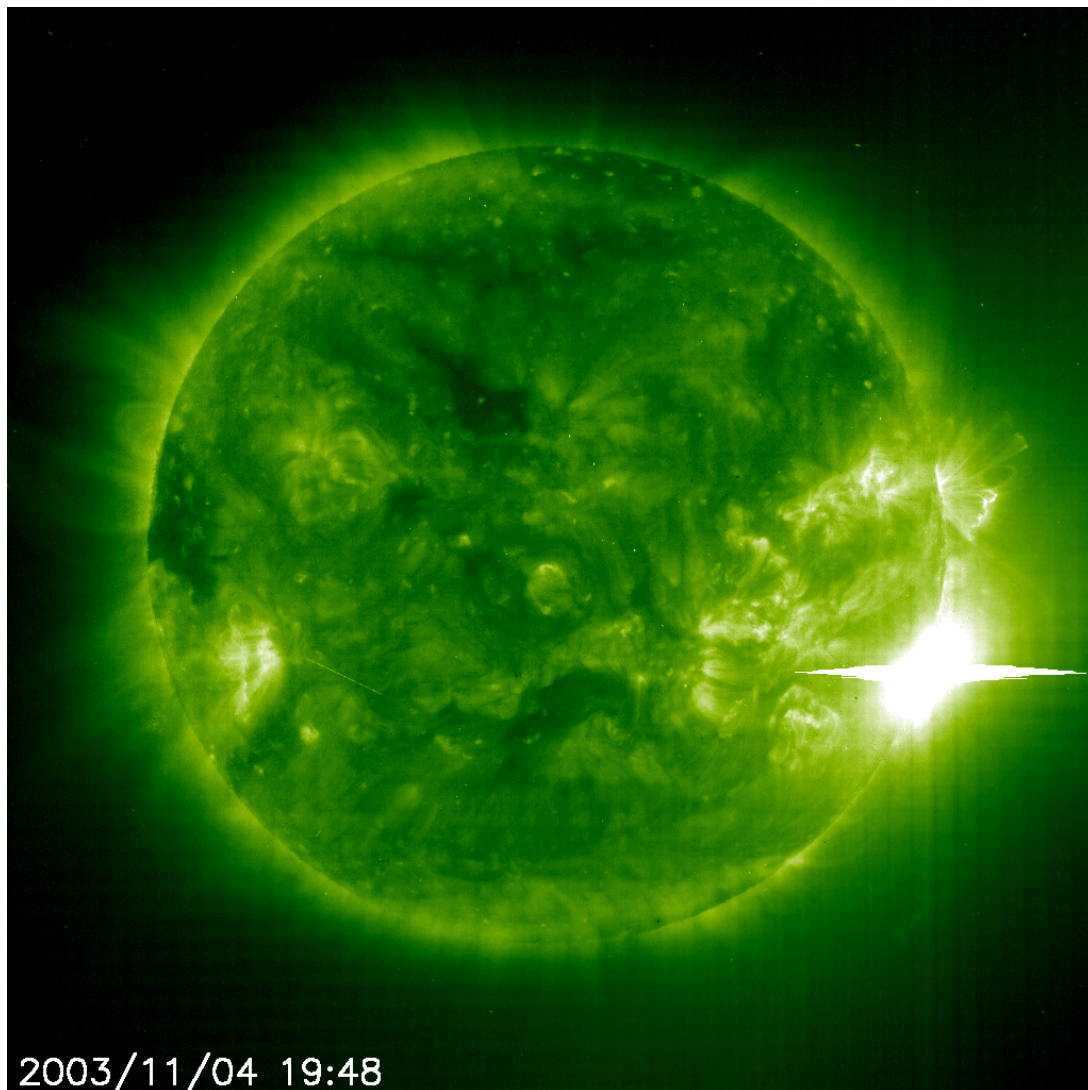


Figur 4.2 Nåtidvarsler fra SWPC sendt ut i siste halvdel av oktober 2003.

Man ser her at natt til 29. oktober var fluksen av høyenergi joner (>10 MeV) i geostasjonær bane så høy at en alvorlig strålingsstorm (S4) ble meldt. Dette betyr at satellittanomalier måtte forventes samtidig som HF-kommunikasjon i polområdene ble slått ut (polar cap absorption (PCA) event). Senere samme dag ble både alvorlig (G4) og ekstrem (G5) geomagnetisk storm meldt. Denne situasjon vedvarte i nesten et døgn, og i tillegg gjentok den seg neste dag.

Det er verdt å merke seg at begge disse varslene faktisk slo til. Slike ekstreme geomagnetiske stormer forventes statistisk sett bare fire dager per solsykel, men opptrådte altså to dager på rad her. Under slike forhold måtte en forvente store problemer med satellittkontroll (se Tabell 3.1) samt problemer med kraftdistribusjonssystemer (Malmø var her bare det mest ekstreme eksempelet). I tillegg til HF-blackout på høye breddegrader måtte man også forvente forstyrrelser på høyere frekvenser. Dette medførte for eksempel problemer med scintillasjon på GPS-signaler over Europa [13] i denne tiden.

Som en kuriositet kan det til slutt nevnes at like etter denne perioden opptrådte den sterkeste flare som noen sinne er blitt observert instrumentelt. Denne er vist i Figur 4.3, og den ble observert 4. november.



Figur 4.3 Flaren av klasse X28 observert i UV fra Soho like etter utbruddet 4. november.

Styrken ble estimert til klasse X28, men dette er noe usikkert siden flere sensorer gikk i metning. Utbruddet kom fra den meget aktive solflekkgruppen 0486, men som en ser skjedde dette heldigvis da området var nådd helt til solranden sett fra jorden. Derfor ble konsekvensene for jorden og det nære verdensrom ikke særlig alvorlige denne gang.

5 Konklusjon

Den teknologiske utviklingen gjennom de siste tiår har ført til at jordens nære verdensrom er blitt en sentral samfunnsarena i den forstand at mange av våre viktige teknologiske systemer er blitt avhengig av de til en hver tid rådende forhold der. Derfor kan såkalt romvær, det vil si sterke og brå endringer i energioverføringen fra solen, skape situasjoner som vil utgjøre en trussel mot den regulære operasjonen av slike systemer. Dette kan dreie seg om både kommunikasjon-, navigasjon- og posisjoneringssystemer så vel som luftfart og kraftdistribusjon samt annet elektronisk utstyr på bakken.

I denne rapporten er det gjengitt en oversikt over konkrete innrapporterte problemer under de såkalte "halloween"-stormene høsten 2003, som var den perioden med de sterkeste geomagnetiske forstyrrelsene under forrige solsykel. Rapporten bygger utelukkende på opplysninger fra den åpne litteraturen. Her kan en se et mønster av globale effekter som må betraktes som signifikante operative problemer gjennom en periode på mer enn en uke.

Som det går fram av beskrivelsene her kan romværeffekter egentlig stort sett bare forutsies i statistisk forstand. Dette gir likevel grunnlag for øket årvåkenhet og for å ta passende forhåndsregler i spesifikke perioder. Derfor er også en korrekt nåtidsbeskrivelse av situasjonen i det nære verdensrom av stor betydning for operatører.

Den mest omfattende kilde for både prediksjoner og nåtidsbeskrivelser er nok det amerikanske Space Weather Prediction Center (SWPC) som til en hver tid har omfattende oppdatert informasjon tilgjengelig på nettet. I tillegg finnes det en del regionale og bransjespesifikke tjenester som delvis er abonnementsbasert. Det foreligger imidlertid også planer om å bygge opp en egen europeisk kapasitet på området under ESA's Space Situational Awareness (SSA) program [14]. Her er det viktig å merke seg på norsk side at det akkurat nå foreligger en mulighet til å influere på oppbygningen av et slikt system i henhold til våre egne prioriteringer.

Fra denne gjennomgangen kan en merke seg at forstyrrelser på signalgang helt opp i mikrobølgeområdet samt innvirkning på kraftdistribusjonssystemer er spesielle problemer på høye breddegrader. I tillegg bør vi som rykende ferske satellittoperatører merke oss at både satellitter i geostasjonær bane og i lav jordbane er utsatt for signifikant fare fra energetiske partikler under geomagnetiske stormer. Dette er derfor et forhold som man må ta hensyn til både under risikovurderingen og i den operative fasen så vel for AISat-1 som for forsvarets nye kommunikasjonssatellitt. Følgelig bør vi søke å utvide vårt erfaringsgrunnlag på romværeffekter i tide til å være forberedt på neste aktivitetstopp i solsykelen.

Referanser

- [1] Lean, J (2005): Living with a variable sun, *Physics Today*, 32-38.
- [2] Svenes, K (2009): Romvær – prosesser og effekter, FFI-rapport 2009/01071.
- [3] Golpalswamy, N, S Yahiyo, Y Liu, G Michalek, A Vourlidas, M L Kaiser and R A Howard (2005): Coronal mass ejections and other extreme characteristics of the 2003 October-November solar eruptions, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2004JA010958.
- [4] Li, X, A B Barker, D N Baker, W C Tu, T E Sarris, R S Selesnick, R Friedel and C Shen (2009) : Modelling the deep penetration of outer belt electrons during the "Halloween" magnetic storm in 2003, *Space Weather*, doi:10.1029/2008SW000418.
- [5] Skoug, R M, J T Gosling, J T Steinberg, D J McComas, C W Smith, N F Næss, Q Hu and L F Burlaga (2004): Extremely high speed solar wind: 29-30 October 2003, *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2004JA010494.
- [6] Baker, D N, S G Kanekal, X Li, S P Monk, J Goldstein and J L Burch (2004): An extreme distortion of the Van Allen belt arising from the "Halloween" solar storm in 2003, *Nature*, doi.10.1038/nature03116.
- [7] Webb, D F and J H Allen (2004): Spacecraft and ground anomalies related to the October-November 2003 solar activity, *Space Weather*, doi: 10.1029/2004SW000075.
- [8] Kintner, jr., P M, T Humphreys and J Hinks (2009): GNSS and ionospheric scintillation, *Insidegnss*, July/August, 22-30.
- [9] Getley, I L (2004): Observation of solar particle event on board a commercial flight from Los Angeles to New York on 29 October 2003, *Space Weather*, doi: 10.1029/2003SW000058.
- [10] Lundstedt, H (2005): The sun, space weather and GIC effects in Sweden, *Adv. Space Res.*, doi:10.1016/j.asr.2005.10.023.
- [11] Oler, C (2004): Prediction performance of space weather forecast centers following the extreme events of October and November 2003, *Space Weather*, doi:10.1029/2004SW000076.

- [12] Tóth, G, I V Sokolov, T I Gombosi, D R Chesney, C R Clauer, D L De Zeeuw, K C Hansen, K J Kane, W B Manchester, R C Oehmke, K G Powell, A J Ridley, I I Roussev, Q F Stout, O Volberg, R A Wolf, S Sazykin, A Chan, B Yu, and J Kóta (2005): Space Weather Modeling Framework: A new tool for the space science community, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2005JA011126.
- [13] Spogli, L, L Alfonsi, G De Franceschi, V Romano, M H O Aquino and A Dodson (2009): Climatology of GPS ionospheric scintillations over high and mid-latitude European regions, *Ann Geophys.*, 27, 3429-3437.
- [14] Draft Declaration on the Space Situational Awareness (SSA) Program, ESA, 2008.

Akronymliste

BER	-	Bit Error Rate
CME	-	Coronal Mass Ejection
CPU	-	Central Processing Unit
DDD	-	Deep Dielectric Discharge
ESA	-	European Space Agency
FAA	-	Federal Aviation Administration
GIC	-	Ground Induced Current
GLE	-	Ground Level Event
GPS	-	Global Positioning System
IMF	-	Interplanetary Magnetic Field
ISS	-	International Space Station
JAXA	-	Japanese Aerospace Exploration Agency
LEO	-	Low Earth Orbit
LANL	-	Los Alamos National Laboratory
MEO	-	Medium Earth Orbit
NASA	-	National Aeronautical and Space Administration
NOAA	-	National Oceanographic and Atmospheric Administration
PCA	-	Polar Cap Absorption
SEU	-	Single Event Upset
SOHO	-	Solar Heliospheric Observatory
SPE	-	Solar Proton Event
SSA	-	Space Situational Awareness
UV	-	Ultra Violet
SWPC	-	Space Weather Prediction Center
WAAS	-	Wide Area Augmentation System