

Ørsted Satellit Projekt

ØRSTEDS RESULTATER

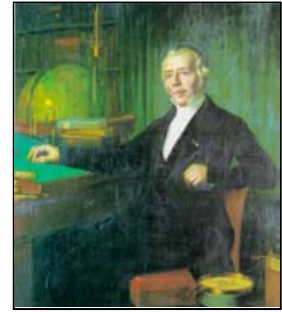
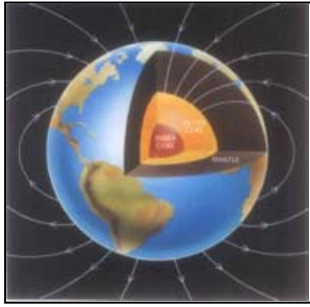
DMI Teknisk Rapport #11-2002

Peter Stauning



ISSN 0906-897X

København 1. marts 2002



Indholdsfortegnelse



1. Oversigt

- 1.1. Oversigt over Ørsted-satellittens vigtigste resultater
- 1.2. Lever Ørsted-satellitten endnu?
- 1.3. International Ørsted-konference i København 23.-27. september 2002
- 1.4. Ørsted-projektets fremtid

2. Ørsted-missionens vanskelige start.

- 2.1. Ørsted-satellittens opsendelse
- 2.2. Udfoldning af masten
- 2.3. Den vanskelige attitudekontrol

3. Kortlægning og modellering af Jordens magnetfelt.

- 3.1. Modeller af Jordens magnetfelt.
- 3.2. Global bestemmelse af kompasretningen og dens ændringer.
- 3.3. Kortlægning af anomalier i jordskorpens magnetisme.
- 3.4. Modellering af Jordens flydende kerne.

4. Ørstedes udmåling af strømsystemer i Rummet.

- 4.1. Ringstrøm og Dst indeks.
- 4.2. Ampères integral og transpolar strøm.
- 4.3. Polare feltrettede strømme.
- 4.4. NBZ strømsystem.

5. Ørstedes målinger af energirig partikelstråling.

- 5.1. Strålingens virkning på SIM stjerneamera.
- 5.2. Strålingens indvirkning på computer memory-kredse.

6. GSP-baseret atmosfæresondering fra Ørsted.

7. Ørsted i international Cusp-kampagne.

8. Fakta om Ørsted-satellitten

- 8.1. Satellitten og dens bane
- 8.2. Instrumenter på Ørsted-satellitten
- 8.3. Ørsted-projektets finansielle basis og organisation af Ørsted-satellittens bygning
- 8.5. Ledelsen af Ørsted-satellitprojektet

9. Ørsted-publikationer.

- 9.1. Videnskabelige publikationer
- 9.2. Ørsted konference-proceedings
- 9.3. Ørsted konference-præsentationer.

Forside: Billede af Ørsted-satellitten over jordkloden (Foto: Meteosat)

Vignetter: (venstre) Jorden i udsnit. Magnetfelter er vist ved feltlinier, der udgår fra den flydende kerne (gul). Inderst den faste kerne. (højre) H.C. Ørsted (fra Nationalmuseets samling på Frederiksborg Slot, Hillerød).

1.1. Oversigt over Ørsted satellittens vigtigste resultater.

Ørsted satellitten blev opsendt den 23. februar 1999 kl. 11:29:55 dansk tid og kunne således den 23. februar 2002 fejre sin 3-års fødselsdag i rummet. Ørsted satellitten er navngivet efter H.C. Ørsted og er først og fremmest udstyret med præcisionsinstrumenter til magnetiske målinger. Instrumenteringen omfatter 3 specialinstrumenter: Et "Overhauser magnetometer" (OVH), der udnytter en atomar magnetisk resonans til en meget præcis absolut måling af den magnetiske feltstyrke, et "Compact Spherical Coil" (CSC) vektor magnetometer, der med stor følsomhed måler komponenterne af magnetfeltet i 3 retninger, og et "Stjernekompass" (SIM) til retningsmåling for bestemmelse af magnetfeltets absolutte retning i rummet. Ørsted satellitten er desuden udstyret med et "Charged Particle Detector" (CPD) instrument til måling af den energirige, gennemtrængende partikelstråling i rummet. Endelig er Ørsted udstyret med en "TANS" GPS modtager for tids- og positionsbestemmelse og en "TurboRogue" præcisions GPS-modtager for atmosfæreprofilering. Se sektion 8 for detaljer.

Samlet kan Ørsted missionens hidtidige resultater opgøres således:

- **Videnskabelige publikationer og konference-foredrag baseret på Ørsteds resultater.**
 - Over 100 videnskabelige publikationer og proceedings-artikler er udgivet eller under udgivelse i internationale tidsskrifter.
 - Flere end 150 foredrag eller posters er præsenteret på internationale videnskabelige konferencer.
- **Ørsteds data har leveret basis for Internationale Geomagnetiske Reference Feltmodeller.**
 - IGRF2000 er leveret og i brug. Global præcision bedre end 10 nT (0.020% nøjagtighed).
 - "Ørsted Initial Field Model" (OIFM) er publiceret. Præcision ca. 5 nT (0.010%).
 - Præcisionsmodel med tidsmæssig variation af magnetfeltet publiceret. Nøjagtighed 3 nT (0.007%)
- **Ørsteds præcise magnetiske målinger anvendt ved kortlægning af geomagnetiske anomalier.**
 - Kortlægning af magnetiske anomalier i jordskorpen med lokal præcision bedre end 1 nT.
- **Ørsteds magnetiske målinger er anvendt til kortlægning af strømsystemer i rummet.**
 - Modellering af ringstrøm som funktion af magnetisk storm-indeks Dst og lokaltid.
 - Kortlægning af polære feltrettede strømme og deres afhængighed af solvindparametre.
 - Bestemmelse af elektro-jet strømsystemer i ionosfæren.
- **Ørsteds data har givet ny viden om strålingsproblemer for satellit computere.**
 - Den gennemtrængende partikelstråling i strålingsbælterne er stærkere end hidtil erkendt.
- **Ørsted GPS instrumentering har bidraget til udvikling af GPS-baserede atmosfæremålinger.**
 - Metoder er udviklet til atmosfæreprofilering ved GPS-målinger og assimilering af data i vejrprognoser og klimamodeller.
- **Store internationale kontrakter vundet på styrkeposition inden for satellit magnetometer og stjernekamera instrumentering.**
 - Danmarks Tekniske Universitet og danske virksomheder har fået internationale kontrakter for omkring 100 mill. kr på levering af magnetometer og stjernekamera instrumentering.
- **Interessen for naturvidenskab og ingeniørfag er styrket i skoler og på universiteter.**
 - Satellit-ingeniøruddannelse på AaU er blevet et tilløbsstykke. Satellit-ingeniøruddannelse på DTU startes. Ingeniørstuderende bygger nu mikro-satellitter.
 - Talrige skoleklasser har valgt Ørsted satellitten som projektemne og har med entusiasme søgt information om Ørsted i artikler, på hjemmesider og ved kontakt med Ørsted-holdet.
- **Stor interesse for Ørsted projektet i befolkningen.**
 - National bevidsthed om en flot dansk indsats i rummet.
 - Fremmer en positiv indstilling til naturvidenskab og ingeniørarbejde i befolkningen.

Denne rapport giver ikke en fuldstændig gennemgang af Ørsteds satellittens resultater, men skal vise den store bredde i missionen og give et indtryk af de betydelige videnskabelige og tekniske landvindinger Ørsted har bragt. Litteraturlisten i afsnit 9 giver en oversigt over de hidtidige resultater.

1.2. Lever Ørsted-satellitten endnu ?

Ja! Ørsted-satellitten fungerer godt og er i fin form. På sin 3-års fødselsdag den 23. februar kl. 11:29:55 dansk tid passerede satellitten over Auckland, hovedstaden i New Zealand på vej mod ækvator for at slutte sit 15,794^{te} omløb. Knap en time tidligere, kl. 10:34, passerede den direkte over København og havde på kommando afleveret sin opsamlede beholdning af værdifulde data, som den nu havde gjort 6895 gange tidligere. Ørsted havde på det tidspunkt fløjet mere end 700 millioner km - det er næsten 5 gange afstanden til Solen - i sine 3 års levetid.

Trods sin høje alder fungerer satellitten bedre end nogensinde. Teknikerholdet har lært dens nykker at kende og kan nu styre den tidligere så uregerlige satellit. Ældningen har kun reduceret ydeevnen lidt for solpaneler og batterier, der ikke leverer helt så megen strøm som i begyndelsen af missionen. Satellitten er lidt svag i ydeevnen, når dens bane ligger for meget i Jordens skygge. Der skal spares på strømmen, og eventuelt må der slukkes for enkelte instrumenter. Men der bliver ført nøje regnskab med satellittens tilstand på Ørsted Kontrolcenter, der ligger ved Terma Elektronik A/S i Birkerød. Når banen har drejet sig lidt videre, og satellitten ikke længere er så meget i skygge, kan man igen skruer helt op for målingerne.

Så situationen er optimal netop nu ved 3-års fødselsdagen. Og det blev fejret med en kraftig indsats sammen med de nye partnere i rummet. Det er den tyske satellit Champ, der blev opsendt den 15. juli 2000, og den argentinske SAC-C satellit, der blev opsendt den 23. november 2000. Begge de to nye satellitter er udstyret med danske instrumenter til måling af Jordens magnetfelt. Instrumenterne er bygget på Ørsted Institutet ved Danmarks Tekniske Universitet. Til SAC-C er der desuden fra Terma A/S leveret en mast som Ørsteds og et komplet computersystem til håndtering af data.

Der er etableret et tæt samarbejde mellem Ørsted-holdet og grupperne omkring Champ og SAC-C. I dagene 16.-22. februar, op til Ørsteds 3-års dag i rummet, udførtes en fælles kampagne for specialmålinger over det nordlige polarområde - specielt Svalbard og Grønland. Kampagnens formål er at undersøge den øvre atmosfære i den såkaldte Cusp-region og specielt se på indflydelsen fra den varierende solvind. Under kampagnen kørte satellitterne specialprogrammer, og desuden kørte der observationskampagner ved store ionosfære radaranlæg i Tromsø i Nordnorge, Longyearbyen på Svalbard og Kangerlussuaq (Sdr. Strømfjord) i Grønland.

Satellitterne måler bl.a. de elektriske strømme, som er særligt heftige i Cusp-regionen, hvor Jordens magnetfelt åbner sig ud mod verdensrummet og derved giver mere direkte adgang for solvindens indtrængen (se Fig.4.1.). Bestemmelsen af de elektriske strømme i rummet baseres på de magnetiske målinger, som alle tre satellitter kan udføre. Den gamle Ørsted satellit giver i øvrigt de mest præcise målinger. Desuden anvender de tre satellitter GPS præcisionsmodtagere til bestemmelse af ioniseringen af den øvre atmosfære og til måling af atmosfærens temperaturprofil og indhold af vanddamp. Disse parametre bestemmes ved analyse af signaler fra de amerikanske GPS satellitter, som har baner endnu længere ude i rummet. De tre radarsystemer udførte tilsvarende målinger fra Jorden. Det blev den hidtil største observationskampagne i Ørsted satellittens 3-årige levetid.

Det viste sig under kampagnen, at Ørsted klarede sig fint og gennemførte det ønskede observationsprogram med bl.a. detaljerede magnetiske målinger og præcisions GPS-målinger i det nordlige polarområde. I den samlede kampagneperiode var der kun et kortvarigt udfald på et tidspunkt uden for kampagnens daglige tidsplan. Kampagnen er beskrevet mere indgående i afsnit 7.

Sådanne kampagner, som vi håber at organisere gentagne gange om nye, specifikke opgaver, vil kunne give et stort koordineret multi-satellit datasæt suppleret med jordbaserede observationer, der muligvis kan give svar på mange af de spørgsmål, en enkelt satellit ikke kan klare. Specielt det vanskelige spørgsmål om adskillelse af tids og stedvariationer. F. eks. hvordan var forholdene i rummet lige før eller lige efter satellitpassagen ? Eller hvordan ser det ud 100 km til siden for banen, eller bare 100 m til siden? Så Ørsted, der plejer at være en ener (og enestående) i rummet er nu for alvor blevet partner i et stort rum-samarbejde.

1.3. International Ørsted konference i København 23. - 27. september 2002

Den 23. - 27. september 2002 skal der holdes en "Ørsted International Science Team" (OIST) konference i København. Den første OIST konference blev holdt i København i 1995, mens OIST-2 blev holdt på Scanticon i Snekkersten i Nordsjælland i 1997. De to første Ørsted konferencer blev holdt inden opsendelsen af Ørsted og havde til formål at samle en kreds af forskere om Ørsted projektet. Der blev dannet et "Ørsted International Science Team" (OIST), som bestod af mere end 200 forskere ved omkring 50 videnskabelige institutioner verden over.

Den tredje Ørsted konference, OIST-3, blev arrangeret af den franske rumforskningsorganisation "Centre National d'Etude Spatiales" (CNES), der er partner i Ørsted projektet, og som bl.a. har foreslået og betalt det ene magnetometer instrument, Overhauser magnetometret, som er leveret af det franske firma Leti. OIST-3 konferencen fandt sted 2.-4. maj 2000 i Grasse i det sydlige Frankrig. Her blev nogle af de første resultater fra Ørstedes målinger i rummet præsenteret.



OIST-4 konferencen bliver sandsynligvis den sidste store konference for Ørsted satellitprojektet, men langt fra den sidste konference med præsentation af resultater fra Ørsted. OIST-4 skal holdes i Ingeniørforeningens Mødecenter. Dette valg af konference center er også symbolsk, idet Ørsted af Ingeniørforeningens medlemmer i efteråret 2000 blev kåret til en fornem 4. plads i afstemningen om "Århundredets Danske Ingeniørbedrift".

For OIST-4 konferencen er grundlaget udvidet, idet forskerholdene bag den tyske Champ satellit opsendt i juli 2000 og den argentinske SAC-C satellit, der blev opsendt i november 2000, er inviteret til deltagelse i konferencen. Champ og SAC-C medbringer magnetometer instrumenter bygget på Danmarks Tekniske Universitet og af samme type som Ørstedes. Desuden medbringer begge satellitter præcisions-GPS modtagere til atmosfæreprofilering af samme slags som Ørstedes og også leveret fra Jet Propulsion Laboratory (JPL), NASA. Så de tre satellitters målinger kan umiddelbart sammenholdes.

OIST-4 konferencens hovedtemaer bliver:

- **Kortlægning og modellering af Jordens magnetiske felt.**
Inkluderer modellering og fysiske teorier af det tidsvarierende kernefelt (geo-dynamo), statiske anomalifelter i Jordens skorpe og induktionsfelter. Sammenhængende modellering af alle kilder.
- **Kortlægning og modellering af strømsystemer i rummet.**
Inkluderer modellering og forklaring af feltrettede strømme, ionosfære strømsystemer, ring strøm og magnetosfære grænselagsstrømme.
- **Ionosfære sondering med GPS-baserede metoder.**
Inkluderer ionosfære profileringsteknik og observationsresultater samt assimilering af GPS data i regionale og globale ionosfære modeller.
- **Atmosfære sondering med GPS-baserede metoder.**
Inkluderer atmosfære profileringsteknik og observationsresultater samt assimilering af GPS data i regionale og globale numeriske vejrprognose modeller og klima modeller
- **Avanceret instrumentering.**
Inkluderer state-of-the-art teknik for stjerne kamera, magnetometer og GPS instrumentering
- **Nye satellitmissioner.**
Planlagte satellitmissioner med stjerne kamera, magnetometer og GPS instrumentering

Der vil blive udgivet en Proceedings rapport fra OIST-4 konferencen.

1.4. Ørsted projektets fremtid

Efter 3 års vellykket mission og indsamling af et stort og værdifuldt data materiale må man spørge, hvor længe endnu Ørsted missionen skal have lov til at fortsætte. De hidtil indsamlede data giver utvivlsomt materiale til endnu nogle års frugtbart videnskabeligt arbejde, så spørgsmålet drejer sig især om drift af satellitten og fortsættelse af indsamling og processering af dens data. Svaret afhænger naturligvis af en vurdering af missionens fremtidige værdi sammenholdt med de omkostninger, der er forbundet med driften af Ørsted.

Det var under forberedelserne til bygningen af Ørsted satellitten nødvendigt at anslå en forventet levetid for satellitten af hensyn både til udformningen af ansøgninger om støtte til projektet og den tekniske dimensionering af Ørsteds forskellige systemer, valg af passende holdbare komponenter og andre hensyn. Den forventede levetid blev da anslået til 14 måneder fordelt med 2 måneders opstart og 12 måneders drift. Men Ørsted har nu fungeret i 3 år. Satellitten har overlevet mindst 5 store "Rumstorme" med kraftig stråling fra soludbrud foruden tusinder af passager gennem den hårde stråling i Jordens strålingsbælter. Og den viser kun beskedne tegn på ældning, idet de fleste instrumenter og systemer fungerer udmærket. Solpanelernes og batteriernes kapacitet er reduceret med anslået 10-20%. Stjernekameraet - et af de instrumenter, der var anset for at være høj-risiko faktor - fungerer fint, ja faktisk med en højere regularitet end nogensinde (jvf. Fig. 2.4.)

Med disse kendsgerninger som baggrund forekommer det ikke urealistisk at sætte ambitionsniveauet højt. Det er nu hensigten, at der stræbes mod at fortsætte driften af Ørsted mindst 3 år endnu, dvs. til år 2005. Herved ville Ørsteds observationer dække hele perioden fra solpletmaksimum, som vi havde i år 2000, til solpletminimum, som kan forventes i år 2005.

Den videnskabelige og praktiske værdi i en sådan plan kan sammenfattes i følgende opgaver:

- ***Undersøgelse af Geo-dynamoens tidsvariationer***

Kortlægningen af Jordens magnetiske felt fra indre kilder kunne nu få en tilstrækkelig lang periode til præcis definition af geo-dynamoens tidsvariationer. Sådanne undersøgelser er indledt, men tidsvariationer bestemmes nu i hovedsagen ved sammenligning af Ørsteds data med målinger fra Magsat satellitten fra 1979/80 og det antages, at man kan interpolere lineært. Men denne fremgangsmåde forhindrer et detaljeret studium af de såkaldte "Jerks", dvs. pludselige ændringer af hovedfeltet, og andre ikke-lineære variationer, der kunne være særdeles vigtige for vor forståelse af selv-exiterede magnetfelters opståen, polvendinger og mulige forsvinden.

- ***Kortlægning af magnetiske anomalier.***

Kortlægning og modellering af magnetiske anomalier i Jordskorpen kræver meget nøjagtige og helt uforstyrrede målinger og samtidigt mange passager over de interessante områder. Det har været vanskeligt at opnå i en periode med solpletmaksimum, så grundlaget for sådanne undersøgelser bliver utvivlsomt bedre og bedre nu, hvor solaktiviteten er aftagende. Datamaterialet forbedres markant hver eneste gang, de geofysiske forhold er optimale, dvs. på et meget lavt magnetisk aktivitetsniveau, og hvor satellitten samtidig har en langvarig stabil måleserie uden afbrydelser.

- ***Variationer i rumstrømme over solpletperioden.***

Strømsystemer i rummet er meget afhængige af Solens aktivitetsniveau, der dels ændrer ledningsevnen i den øvre atmosfære som følge af de betydelige ændringer i den ultraviolette stråling fra Solen, og dels ændrer de elektro-magnetiske forhold ved koblingen mellem solvinden og Jordens magnetosfære. Modelleringen af disse strømsystemer, f.eks. elektrojet strømme i den øvre atmosfære, feltrettede strømme ved høje bredder og ringstrømmen, som markerer styrken af magnetiske storme, kunne nu medtage Solens varierende aktivitetsniveau som parameter.

- ***Space Weather pilot projekter.***

Ørsteds anvendelse ved "Space Weather" opgaver, dvs. varsling og kortlægning af magnetiske forstyrrelser og energirig stråling i rummet, der forekommer som følge af Solens aktivitet, kan fremmes på basis af de erfaringer, vi har erhvervet fra driften. Satellitens data kan nu rutinemæssigt behandles i nær real-time, så dens målinger kunne indgå i pilotprojekter vedr. "Space Weather forecast" og "nowcast". De erfaringer, man her kunne opnå, vil utvivlsomt være af stor nytte for

udformningen af fremtidige ”Low Earth Orbiting” (LEO) satelliter i ”Space Weather projekter op til det næste Solpletmaksimum.

- ***GPS-baseret atmosfære profilering og assimilering af GPS data i vejr- og klimamodeller.***
Anvendelsen af Ørstedes præcisions GPS-modtager har hidtil været hæmmet af problemer omkring attitude kontrollen, så instrumentet har ikke været i drift ret lang tid. Det indsamlede datamateriale, der skal benyttes til bestemmelse af atmosfærens temperatur-, tætheds-, og vanddampprofiler og ioniseringsgrad, er temmelig sparsomt og giver ikke mange muligheder for validering af målinger og databehandlingsrutiner. Den seneste GPS observationskampagne, som blev gennemført i februar 2002 op til Ørstedes 3-års fødselsdag, gav meget lovende resultater, bl.a. fik vi flere okkultationsdata (atmosfære-profiler) fra Ørsted end nogensinde tidligere. Det bliver nu forsøgt at gennemføre flere GPS observationskampagner.
- ***Deltagelse i internationale koordinerede multi-satellit observationskampagner.***
Den nævnte målekampagne for Cusp undersøgelser i februar 2002 var samtidig et eksempel på et stort internationalt samarbejde baseret på anvendelsen af flere satellitter, her den tyske Champ og den argentinske SAC-C satellit, der har instrumentering svarende til Ørstedes, sammen med omfattende målinger med avancerede radarsystemer fra jorden. Sådanne kampagner kan vise sig meget nyttige for at omgå de begrænsninger, der sædvanligvis karakteriserer enkelt-satellit missioner, bl.a. adskillelse af tids og stedvariationer i de observerede fænomener. De to andre satellitter synes også at have en længere operationsperiode foran sig, så man kan nu planlægge serier af tilsvarende kampagner med specifikke formål.
- ***Udvikling af kompetence i rumteknologi.***
Ørstedes systemer og instrumenter, f.eks. solpaneler, batteri, spændingsforsyninger, radiosender/modtagere, computere osv. vil degradere og ældes under de barske vilkår i rummet. Bagende sol i den ene del af omløbet og isnende kulde i Jordens skygge i den anden del af omløbet; gennemtrængende stråling i Jordens strålingsbælter eller i polarområderne under soludbrud. Det vil uden tvivl være meget lærerigt og nyttigt for fremtidige satellit-instrumenteringsopgaver at følge degraderingen af Ørsted. Samtidigt vil det være en udfordrende opgave for satellittens kontrolteam, der skal håndtere systemerne og bl.a. økonomisere strømforbruget, at optimere instrumenternes funktion og få det bedst mulige ud af missionen.
- ***Anvendelse af Ørsted satellitten i undervisningsopgaver på skole- og universitetsniveau.***
Ørstedes-satellitten og dens instrumenter, dvs. magnetometre, partikeldetektorer og GPS modtagere og dens systemer f.eks. solpaneler, batteri, spændingsforsyninger, radiosender/modtagere og computere repræsenterer mulige undervisningsopgaver, som kunne gøre undervisning i fysik, matematik, naturvidenskab og rumteknologi nærværende og relevant. Det er indenfor mulighederne at gøre data fra Ørsted tilgængelige i nær real-time f.eks. på websider eller gennem automatisk dataoverførsel ved FTP. Desuden kunne det være en relevant opgave for satellittens instrument- og systemkonstruktører at udarbejde forenkede beskrivelser af Ørstedes forskellige delsystemer, som f.eks. kunne bruges som klassesæt. Eksempler kunne være omløbstid og baneberegninger, effektivitet af solpaneler, dataoverførsel via radio-link, magnetiske målinger i forhold til modeller, strålingsbælter, virkninger af soludbrud og magnetiske storme. Det må tages i betragtning, at motiveringen for sådanne opgaver afhænger kritisk af tidshorisonten for satellittens drift.

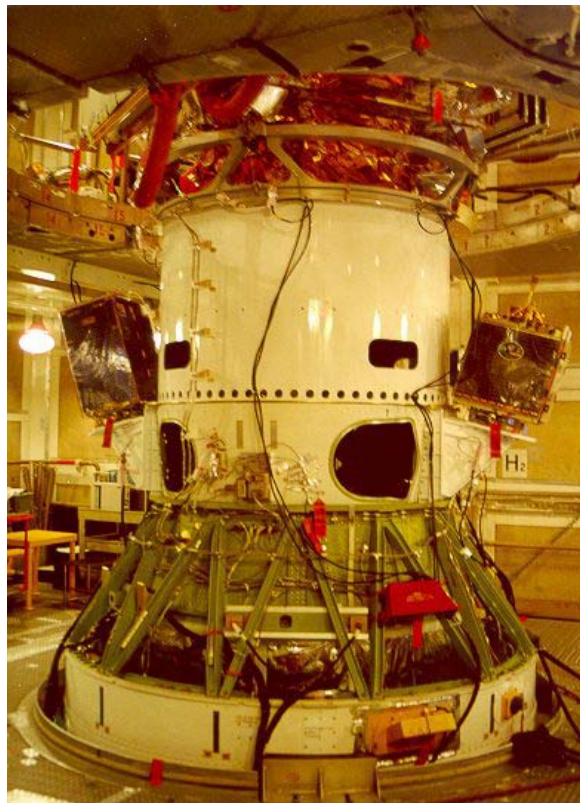
Trods disse mange positive muligheder skal det også være helt klart, at *satellitten kun skal understøttes så længe, den giver meningsfulde data af samme høje kvalitet som hidtil.* Der skal være løbende kontrol og evaluering af Ørstedes tilstand. De direkte omkostninger ved driften udgør ca. 1 mill. kr. om året. Det er et betydeligt beløb i forhold til de ressourcer, der sædvanligvis er til rådighed for forskningsprojekter. Men driftsomkostningerne kan også sammenlignes med de omkostninger på 130 mill. kr. i Danmark, samt en støtte fra NASA, CNES og DARA i form af levering af instrumenter, gratis adgang til kalibreringsfaciliteter og fri opsendelse på anslået 30-40 mill. kr., som det indebar at få Ørsted satellitten placeret i rummet. Og så er spørgsmålet, om det ikke er en rimelig omkostning for at få det optimale udbytte af en meget betydelig investering i et succesfuldt dansk rumprojekt.

2. Ørsted-missionens vanskelige start

2.1. Ørsted-satellittens opsendelse

Den 24. november 1998 startede Ørsted-satellitten første etape af sin sidste lange rejse. Indpakket i en beskyttende beholder blev satellitten sendt fra TERMA i Birkerød, hvor den var samlet og testet, til Vandenberg Air Force basen i Californien. Her skulle den opsendes med en Boeing Delta-II raket. Hoved-opgaven for raketten var opsendelsen af den 3 tons tunge Argos satellit bygget af US Air Force. Den godt 60 kg tunge Ørsted satellit og den sydafrikanske mini-satellit, Sunsat, skulle medtages ved opsendelsen, som på det tidspunkt allerede var udsat gennem næsten 3 år.

Med satellitten rejste et hold af teknikere til Vandenberg for at klargøre Ørsted og montere den på Delta raketten. I Fig. 2.1. ses Ørsted til venstre og Sunsat til højre monteret på små platforme på siden af raketten. Øverst ses lidt af Argos satellitten på hoved-plattformen. Raketten er her monteret på affyringsrampen og udenom er opstillet en bygning med 5 etager, så man kan arbejde med klargøringen i alle højder. Bygningen deles og køres til siden inden selve opsendelsen, der skulle vise sig at blive en vanskelig og langvarig operation.



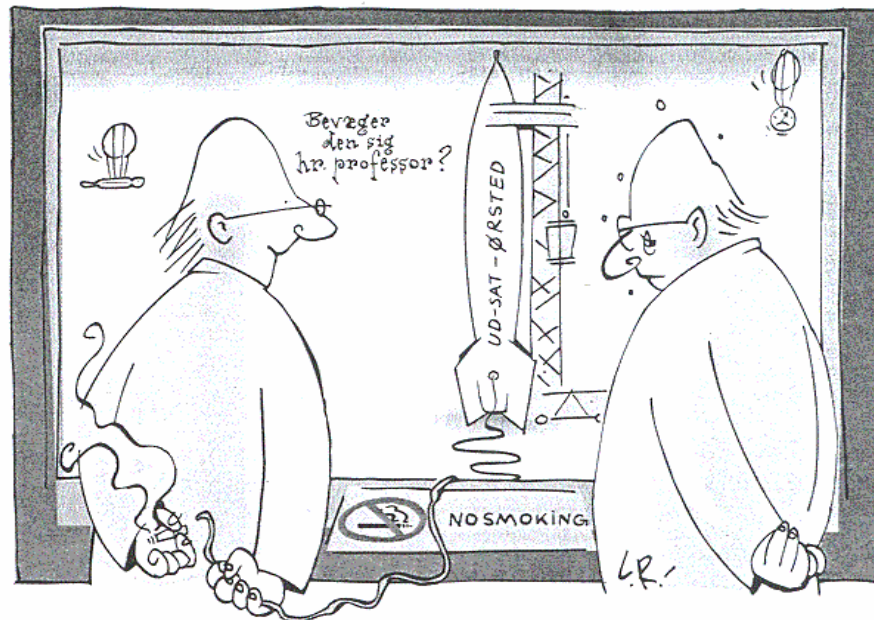
Figur 2.1. Ørsted til venstre og Sunsat til højre monteret på Delta-II raketten. (Foto fra Sunsat gruppen).

Første nedtælling fandt sted den 15. januar 1999. Opsendelsen måtte imidlertid udsættes på grund af dårlige vejrforhold med for kraftige vinde i højden. Det samme skete ved den følgende nedtælling den 16. januar, og igen den 19. januar, den 20., den 21., den 26. og den 27. januar. Ved den 8. nedtælling den 28. januar var vejret perfekt og nedtællingen kørte fint. Hoved-raketmotoren blev tændt, og affyringsrampen blev indhyllet i ild og røg.

Kun 3 sekunder før de såkaldte "fast-stof raketter" (dynamit) monteret på siden af raketten skulle have været tændt, meldte en ventil i brændstofføforslen fejl, og nedtællingen måtte afbrydes i yderste øjeblik. Var fast-stof raketterne blevet tændt kunne intet have forhindret raketten i at gå til vejrs, og

med en konstateret fejl var den blevet destrueret på kommando med det samme. Nu lykkedes det at slukke hovedmotoren, og raketten blev heldigvis stående.

Herefter fulgte en længere pause med montering af ny ventil inden næste opsendelsesforsøg den 7. februar. Dette forsøg mislykkedes også, og igen var det vejret, der drillede. I Danmark havde de mange udsættelser givet stor opmærksomhed omkring Ørsted missionen og mange humoristiske indslag i medierne som f.eks. tegningen i Fig. 2.2.



Ud-sat

Danmarks kvantespring ind i rumalderen blev først stoppet fem gange af vejrguderne. I sjette forsøg blev det så endelig de tekniske vanskeligheders tur.

Figur 2.2. Ud-sat. Danmarks kvantespring ind i rumalderen blev først stoppet fem gange af vejrguderne. I sjette forsøg blev det så endelig de tekniske vanskeligheders tur. Fra "Ingeniøren" 5. februar 1999.

Det 10. opsendelsesforsøg fandt sted den 13. februar. Denne gang måtte nedtællingen afbrydes på grund af en teknisk fejl, der havde givet en uventet strømimpuls i raketens styre-elektronik. Launchholdet rapporterede efter dagens aflyste opsendelse, at "folkene her på basen er også ved at blive godt og grundigt trætte af denne Delta-II raket; de mener, den må være forhekset." Den tekniske fejl måtte nu analyseres nøje inden nye opsendelsesforsøg. Brændstoffet i raketens tanke var desuden ved at nærme sig en kritisk alder, hvor det måtte udskiftes og tankene renses grundigt. Det ville selv i bedste fald give en langvarig udsættelse på måske mange måneder. Det var efterhånden svært at holde modet oppe og tro på, at opsendelsen af Ørsted nogensinde skulle lykkes.

Men så lykkedes det alligevel. Den 23. februar kl. 11:29:55 dansk tid, i 11'te opsendelsesforsøg, hævede Delta-II raketten sig majestætisk på sin søjle af ild, skød til vejrs hurtigere og hurtigere og var snart kun en lille prik for enden af en lang røgstribe. Ørsted blev adskilt fra raketten knap 2 timer senere, og under 2. baneomløb, kl. 14:20-14:30 samme dag, var der radiokontakt mellem Ørsted og modtagerstationerne i Aalborg og København. Det kunne konstateres, at Ørsteds basale systemer: radio-sender/modtager, computer, solpaneler, strømforsyning og magnetometer fungerede fint. **Ørsted var endelig opsendt og satellitten virkede!**



Figur 2.3. Opsendelsen af Ørsted med en Delta-II raket fra Vandenberg basen i Californien kl. 11:29:55 dansk tid den 23. februar 1999. Hovedlasten ved opsendelsen var den amerikanske Argos satellit. Foto: Boeing.

2.2. Udfoldning af masten

Men problemerne var nu ikke slut med den vellykkede opsendelse. Der var planlagt en "kommissionerings" (indkørings-) periode på 2 måneder. Og nu begyndte arbejdet med at skabe fuld kontrol over satellitten. Ørsteds mange funktioner styres af kommandoer, som udgår fra Ørsted Kontrolcenter ved Tema og opsendes til satellitten over radioforbindelsen fra sender-modtager stationen på DMI. Her nedtages tillige data, som i første omgang sendes videre til kontrolcentret, hvor teknikerne undersøger og overvåger satellittens forskellige funktioner. Herefter sendes data til Ørsted Videnskabelige Datacenter på DMI for processering og fordeling til forskerne.

I starten viste der sig adskillige større og mindre problemer med satellitten. Ørsteds to ursystemer var ikke synkrone, så de forskellige ur-styrede funktioner kom undertiden på tværs af hinanden. Endvidere talte Ørsteds to radiosendere til tider "i munden" på hinanden. Disse problemer blev dog hurtigt løst, og nu var opgaven først og fremmest at bringe satellittens tumlende bevægelse under kontrol, så den 8 meter lange mast med magnetiske måleinstrumenter kunne foldes ud.

Ørsted er udstyret med et aktivt "attitude-kontrol system", dvs. et system, der kan styre satellittens orientering i rummet. Det er baseret på et sæt af spoler monteret i satellitkroppen i tre planer. Hver spole har et stort antal vindinger, og strømmen i disse vindinger kan styres. Med strøm i en spole dannes et magnetfelt i spolens akseretning, og det påvirkes af Jordens magnetfelt, som prøver at rette det ind til sammenfaldende retning (som ved en kompasnål). Ved styring af strømmene i de tre spoler kan man i princippet dreje Ørsted til en vilkårlig orientering i rummet.

Med dette system blev Ørsted rettet ind, så masten til stadighed pegede i Jordens magnetfeltretning. Masten består af 2 sektioner. Den nederste er 6 m og afsluttes ved instrumentbeholderen (gondolen),

der rummer magnetometer og stjernekamera (stjernekompass). Fra toppen af gondolen udgår den øverste sektion på 2 m. Øverst er monteret endnu en instrumentbeholder med magnetometer.

Begge sektioner af masten er bygget af 3 glasfiber stænger (longerons), som holdes fra hinanden med plastic-afstandsstykker og afstives med et system af kryds-wirer. Fra toppen af øverste sektion går en tynd stålwire hele vejen inde i masten ned til bunden af satellitkroppen, hvor wiren er viklet på et motor-drevet spolehjul. De to sektioner af yderst bøjelige glasfiberstænger er presset og drejet ned i satellitkroppen og ligger nærmest som to kabelruller.

Ved aktivering af motoren kan wiren vikles af spolehjulet, så masten foldes langsomt ud. Indtil den er fuldt udfoldet, er masten bøjelig som en kohale, og da den er belastet med de to tunge instrumentbeholdere, var udfoldningen betragtet som en af de vanskeligste opgaver ved klargøringen af satellitten.

Den 14. marts kl. 13:05 dansk tid, mens satellitten var over ækvator, hvor magnetfeltet er vandret, blev den sammenrullede mast langsomt firet ud fra sin beholder. Udfoldningen forløb helt uden problemer og 12 minutter senere var den komplicerede manøvre vel overstået. Nu kunne stjernekompasset se himlen og tage pejling af stjernebillederne, magnetometrene var kommet væk fra forstyrrelserne i satellitkroppen. *Ørsteds hovedopgave, præcis udmåling af Jordens magnetfelt, kunne påbegyndes.*

2.3. Den vanskelige attitude kontrol.

Efter den vellykkede mast-udfoldning blev satellitten rettet op, så den lange mast kom til at stå lodret. De forskellige instrumenter blev startet op og kontrolleret. Alle Ørsteds instrumenter, CSC magnetometer, OVH magnetometer, SIM stjernekamera, CPD partikeldetektor og GPS modtagere, viste sig at fungere fint. Den eneste undtagelse var den ene af de to frekvenskanaler på den ene GPS modtager (TurboRogue), som havde noget svagere signal end ventet.

Men et stort problem stod tilbage. Satellittens attitude var ikke rigtigt under kontrol. Ørsteds nye orientering med lodret mast er grundlæggende en stabil stilling i rummet. Men satellittens drejning omkring masteretningen er ubestemt. Attituden måles af SIM stjernekameraet, der analyserer stjernebilledet i sit synsfelt og derved pejler sigteretningen. SIM kameraet sender sine data videre til attitude-kontrol systemet, der så skal rette Ørsted ind til den ønskede retning i rummet. Systemet er beregnet på at køre selvstændigt (autonomt), så en ønsket attitude fastholdes automatisk. Attituden skal vælges således, at SIM ikke ser ind i Solen, og derved blændes, på noget sted af banen.

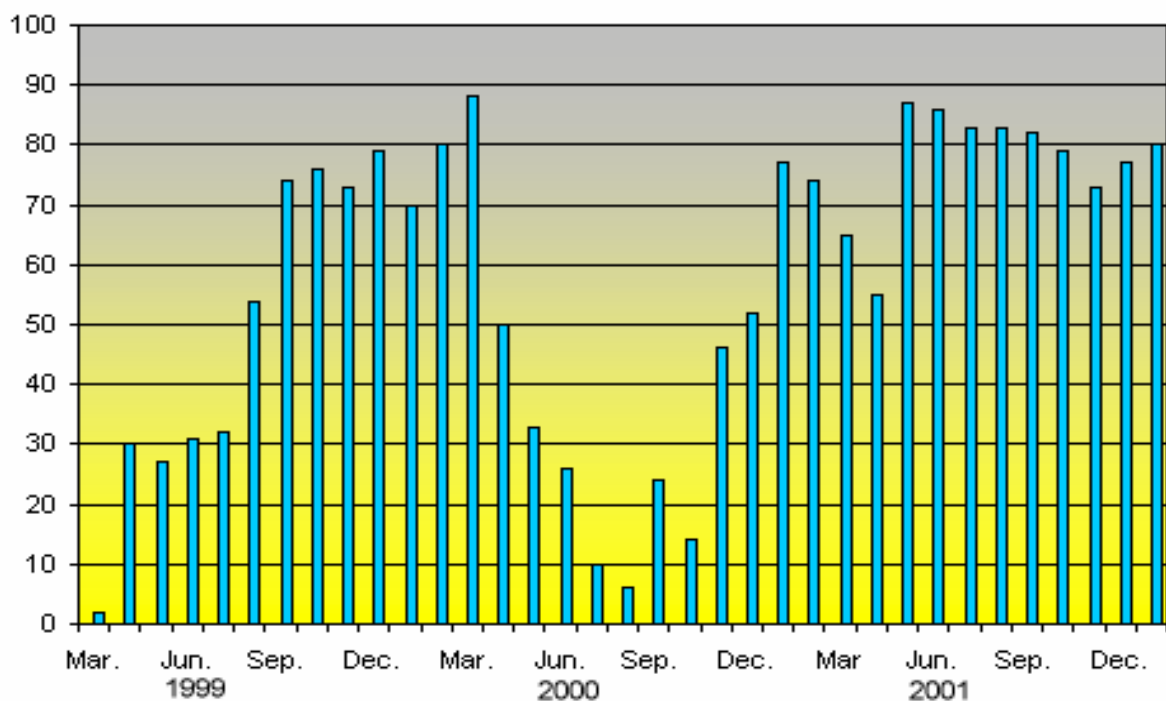
Men stjernekameraet kan også forstyrres ved hurtige bevægelser, der udtværer stjernerne i billedet. En yderligere komplikation er den energirige stråling i rummet. De mest energirige partikler kan trænge gennem afskærmningen omkring stjernekameraet og nå ind i CCD-kredsen, der danner stjernebilledet. Her skaber strålingen elektriske impulser, der opfattes som lysglimt ("sne") i billedet og kan forveksles med stjerner.

I lang tid kæmpede Ørsted-holdet med det problem, at et tilfældigt udfald af SIM attitude data fik attitude-kontrol systemet til at fejle og med store strømstyrker i spolerne satte Ørsted i hurtig rotation. Nu fejlede SIM systemet for alvor, da stjernebilledet blev udtværet ved den hurtige bevægelse. Uden attitude data kan magnetfeltets retning ikke bestemmes, kun dets styrke. Så Ørsteds data var kraftigt amputerede, og missionen var alvorligt truet.

Nu begyndte det meget vanskelige arbejde med justering af SIM kameraets følsomhed for at gøre det mere robust uden forringelse af dets fantastiske nøjagtighed. Samtidigt skulle attitude-kontrol systemet reguleres, så det ikke sendte Ørsted i spin ved tilfældige udfald af SIM data. Begge justeringer krævede indgreb i programmer og parametre i satellittens computersystemer. Nye programmer og parametre blev først testet på kontrolcentrets Ørsted-simulator og derefter sendt op til satellittens computer via radioforbindelsen. Til stadighed var risikoen, at en programfejl kunne få satellittens computersystemer til at gå helt ned, og så ville Ørsted være tabt. Efter måneders slid og flere nervepirrende tilfælde, hvor satellitten tilsyneladende døde så dens radiosignaler forsvandt, og hvor kun Ørsteds geniale overlevelsessystem reddede satellitten på strengen, så lykkedes det endelig.

I midten af august 1999, efter 6 måneders arbejde med opstarten af Ørsted, kom der styr på attitudekontrollen. Stjernekameraet kunne nu fungere i længere sammenhængende perioder og kvaliteten af de magnetiske data blev drastisk forbedret. Denne udvikling fremgår af Fig. 2.4., der viser den procentvise mængde af brugbare attitude målinger (SIM "availability") for hver måneds data. For de første 5 måneder er procenten omkring 25%. I august 1999 stiger andelen til ca. 75%. I realiteten er forbedringen endnu større, da de lave procenter dækker over en stor mængde korte, og derfor næsten ubrugelige måleserier.

Fig. 2.4. viser endnu et problem med Ørsteds målinger. I sommeren 2000 havde Ørsteds bane drejet sig, så satellitten konstant var i Solen. Temperaturen i satellittens systemer og instrumenter steg generelt 5-10 grader. Det viste sig at være meget uheldigt for stjernekameraet, idet CCD-kredsens baggrundsllys steg kraftigt, så der blev dannet en mængde "hot-spots" af samme lysstyrke som rigtige stjerner. Nu fejlede genkendelsen af stjernebillede i synsfeltet, og attitude data blev invaliderede. Da Ørsteds bane var drejet videre, så satellitten igen kom ind i Jordens skygge i en del af banen og blev kølet, forsvandt problemet



Figur 2.4. Regulariteten af attitude data (SIM availability) gennem Ørsteds første 3 år i omløb (månedlige middelværdier). De lave værdier i sommeren 2000 skyldes for høje temperaturer, da Ørsted en tid havde en bane helt i Solen. Bemærk, at regulariteten har ligget højt på omkring 80% det sidste års tid. Grafik: Søren Henriksen.

Nu efter 3 års drift er regulariteten af stjernekameraets attitude data bedre end nogensinde takket være de mange programforbedringer og finjusteringer af parametre, der er udført siden opsendelsen. Det tilsvarende gælder for andre af Ørsteds instrumenter og funktioner. Dette fantastiske resultat skyldes dels en dygtig teknisk indsats under konstruktion og bygning af Ørsted satellitten og dels en særdeles kompetent håndtering af satellitten ved Ørsted Kontrolcenter og et godt samarbejde mellem alle grupper involveret i Ørsted. *Så Ørsted satellitten er i fineste form lige nu!*

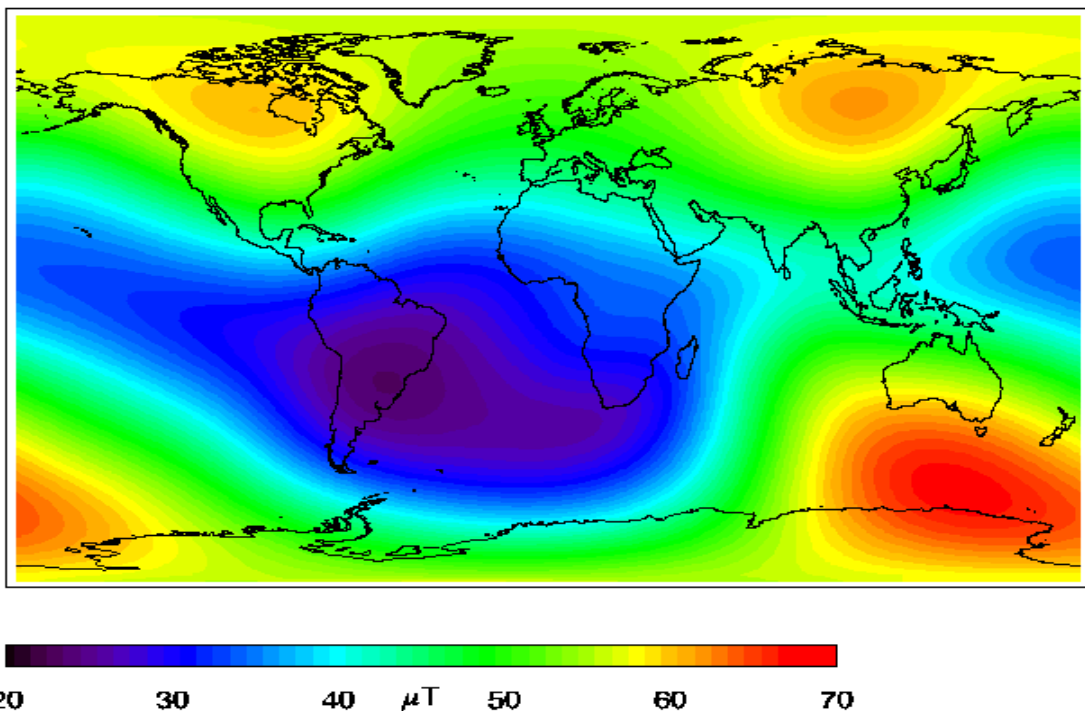
3. Kortlægning og modellering af Jordens magnetfelt

3.1. Modeller af Jordens magnetfelt.

Ørsted satellittens primære mission er udmåling og kortlægning af Jordens magnetfelt. Jordens magnetfelt er i grove træk et såkaldt dipol felt, som man kunne forestille sig dannet af en kraftig magnet inde midt i Jorden. I virkeligheden stammer hovedparten af magnetfeltet, ca. 95%, fra elektriske strømme i Jordens flydende kerne, 2-3% fra magnetiske mineraler i den størknede jordskorpe og de sidste 1-3% fra elektriske strømme i rummet.

Nøjagtige magnetiske målinger har været udført fra observatorier rundt om på Jorden i over hundrede år. Ud fra disse målinger har man forsøgt at konstruere nøjagtige modeller, som skulle gøre det muligt at bestemme feltets størrelse og retning overalt. Men der er to væsentlige begrænsninger i datamaterialet til rådighed for modelleringen. Dels er der ikke observatorier overalt på Jorden og dels giver målinger fra Jordens overflade ikke oplysninger om feltets mulige ændringer med højden - eller dybden.

Her kommer magnetiske målinger fra satellitter ind i billedet. Hvis satellitten holder tilstrækkeligt længe vil sådanne målinger give en tæt dækning over hele den del af Jorden, der omfattes af banen. For Ørsted er kun undtaget områderne indenfor 4 breddegrader fra de geografiske poler. Dels giver kombination af magnetiske målinger fra Jorden og fra satellitter oplysninger om feltets variation med højden.



Figur 3.1. Magnetfeltets varierende styrke over hele Jorden ifølge IGRF2000, som er baseret på Ørstedes målinger. Bemærk det kraftige felt ved polerne, op til næsten 70,000 nT (70 μT), og det meget svagere felt omkring ækvator, ned til 20,000 nT. Feltet er specielt svagt over det sydlige Atlanterhav (den såkaldte

De forskellige bidrag til det øjeblikkelige magnetfelt har vidt forskellige tidsvariationer. Feltet fra Jordens flydende kerne ændrer sig kun langsomt, men dog mærkbart. Disse ændringer kaldes sekular variationer (sekular = hundredårs). Ændringerne i feltets styrke udgør højst nogle få procent pr. 100 år, mens ændringerne i magnetfeltets retning kan være mere markante. Det magnetiske felt i jordskorpen kan normalt betragtes som konstant og ændrer sig kun ved væsentlige geologiske ændringer, som f.eks. større vulkanudbrud eller dannelse af nye bjergkæder. Derimod er feltet fra

strømsystemer i rummet yderst foranderligt og kan ændre sig betragteligt indenfor få timer, undertiden på få sekunder. Disse strømsystemer afhænger bl.a. af Solens stråling, af påvirkningerne fra Solvinden, og af aktivitet i Jordens strålingsbælter.

Opgaven er nu at sammensætte målingerne fra satellitterne med målingerne fra det eksisterende net af magnetiske observatorier til en model, hvormed man med kendskab til sin position, dvs. længde, bredde og højde, kan beregne den nøjagtige styrke og retning af magnetfeltet.

Den matematiske udformning af de nu anvendte modeller er udviklet af den tyske professor C.F. Gauss omkring 1830. Vor egen professor H.C. Ørsted havde i øvrigt forbindelse med Gauss og var meget inspireret af hans fremragende matematiske arbejder og magnetiske målinger.

Modellerne bygger på en beskrivelse af det magnetiske potentiale ved en formel med rækkeudvikling ved såkaldte sfæriske harmoniske funktioner. Hver funktion vægtes med en konstant faktor og de forskellige bidrag summeres. Formlen har f.eks. følgende udseende, hvor der summeres op til 19'ende grad og orden (OIST modellen):

$$\begin{aligned}
 V = a \left\{ \sum_{n=1}^{19} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} P_n^m(\cos\theta) \right. \\
 + \sum_{n=1}^2 \sum_{m=0}^n (q_n^m \cos m\phi + s_n^m \sin m\phi) \left(\frac{r}{a}\right)^n P_n^m(\cos\theta) \\
 \left. + Dst \cdot \left[\left(\frac{r}{a}\right) + Q_1 \left(\frac{a}{r}\right)^2 \right] \cdot \right. \\
 \left. [\bar{q}_1^0 P_1^0(\cos\theta) + (\bar{q}_1^1 \cos\phi + \bar{s}_1^1 \sin\phi) P_1^1(\cos\theta)] \right\}.
 \end{aligned}$$

Med formlen kan man bestemme det magnetiske potentiale og derfra magnetfeltets retning og styrke for ethvert punkt beskrevet ved koordinaterne (θ , ϕ , r). Her er θ den geografiske bredde regnet fra Nordpolen, ϕ er længdegraden, mens r er afstanden fra Jordens centrum. Faktoren a er Jordens radius. Funktionerne i formlen varierer på forudsigelig måde med geografisk længde, bredde og højde, så magnetfeltet er nu beskrevet ved et sæt vægt-faktorer (q og s) og det magnetiske storm-indeks Dst . Hver faktor (koefficient) kan i øvrigt tillægges en langsom tidsvariation. Jo flere faktorer, der indgår i modellen, des mere detaljeret kan feltet beskrives.

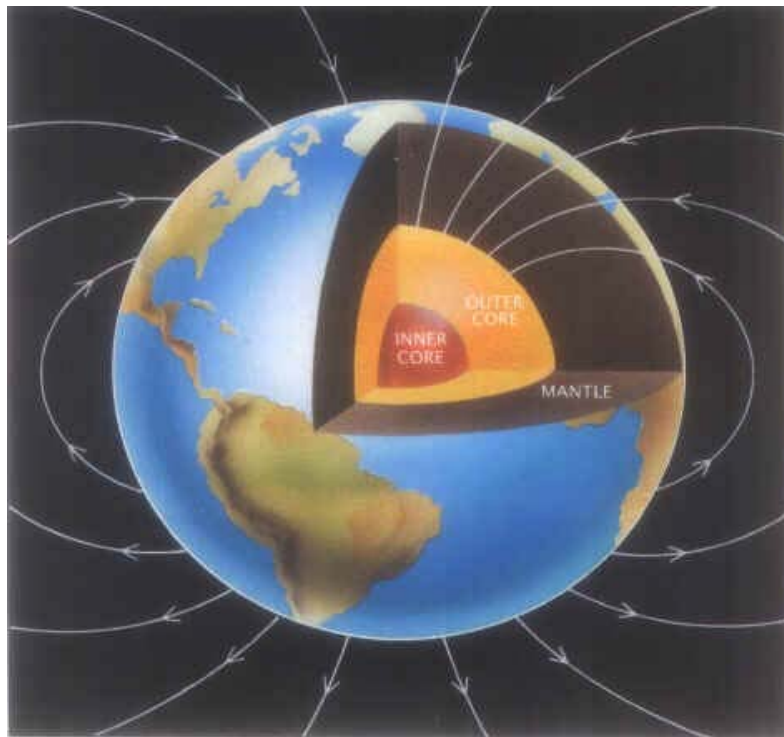
En speciel udgave af modellen, den såkaldte "*Internationale Geomagnetiske Reference Feltmodel*" (IGRF), udarbejdes gennem et internationalt samarbejde og bliver opdateret hvert 5. år. Denne model (af grad og orden 10) omfatter 120 koefficienter. Før Ørsted var den seneste udgave af IGRF modellen fra 1995, dvs. IGRF1995. Med opsendelsen af Ørsted den 23. februar 1999 var der ikke megen tid til indsamling af data for udarbejdelsen af år-2000 modellen, men det lykkedes. Den 1. november 1999 kunne Ørsted modellerings-holdet, der blev ledet af Nils Olsen fra Dansk Rumforskningsinstitut, aflevere en færdig IGRF2000 model til den internationale IAGA organisation (International Association of Geomagnetism and Aeronomy). Denne model er anvendt ved beregningerne af det globale magnetfelt vist med farvekode i Figur 3.1. ovenfor. IGRF2000 modellen beskriver feltet med en gennemsnitlig nøjagtighed (rms misfit) på ca. **10 nT**.

Med den fortsatte drift af Ørsted satellitten er datamaterialet til stadighed blevet forbedret. I 2001 kunne modelleringsholdet præsentere den endnu nøjagtigere, såkaldte "*Ørsted Initial Field Model*" (OIFM), der definerer magnetfeltet den 1. januar 2000. Denne model (af grad og orden 19) omfatter i alt 410 koefficienter og beskriver magnetfeltet med en nøjagtighed på **2 nT** i styrken og mellem **4 og 6 nT** i vektor komponenterne.

En endnu mere avanceret model er nu udarbejdet. Den er af grad/orden 29. Modellen anvender tidskorrektion på led op til grad/orden 13, og omfatter 1105 koefficienter. Den gennemsnitlige nøjagtighed (rms misfit) er nu ca. **3 nT**.

IGRF modellerne anvendes ved bestemmelse af magnetfeltet for optegning af magnetiske kort, navigation (fastlæggelse af kompasretning) for skibs- og flytrafik, manøvrering af satellitter, for styring af bore-retning dybt nede i undergrunden ved olie- og mineralefterforskning og lignende formål. De finere modeller med større præcision og flere led af højere orden er nødvendige for anvendelser som f.eks. undersøgelser af magnetiske anomalier i jordskorpen og ved bestemmelse af de små ændringer (sekular-variationer) i magnetfeltet, der stammer fra langsomme ændringer i strømmene i Jordens flydende indre. I begge de sidste anvendelser bruges de magnetiske målinger til at "se" ind i Jordens indre. Anomalierne i jordskorpen magnetfelt er knyttet til geologiske forhold, som rækker ca. 30 km ned i Jorden. Sekular-variationerne er knyttet til materialebevægelser i den flydende kærne i mere end 3000 km's dybde inde i Jorden.

Magnetfeltets forløb i forhold til Jordens struktur er vist skematisk i Fig. 3.2. Magnetfeltet er vist ved de lyse kurver, feltlinier, der viser magnetfeltets retning. Inderst har Jorden en fast kerne ("Inner Core"). Hovedparten af feltet skabes af elektriske strømme i den flydende kerne ("Outer Core"), som menes at bestå af smeltet jern og nikkel. Den såkaldte "kappe" ("Mantle"), der strækker sig fra den flydende kerne i ca. 3000 km's dybde og op til nær Jordens overflade, består af mere eller mindre tykflydende mineral. Kappen er stort set umagnetisk. Yderst er en 20-50 km tyk størknet skal ("Crust"), som kan have nogen permanent magnetisme. I rummet forløber flere betydelige, men meget variable strømsystemer, bl.a. den såkaldte ringstrøm ("Ring Current") i ækvator planet i 4-6 jordradier afstand. Disse strømsystemer behandles senere.



Figur 3.2. Jordens magnetfelt vist ved feltlinier (lyse), som viser feltets retning (kompasretningen). De udgår fra den sydlige halvkugle (magnetisk nordpol) og ender på den nordlige. Hovedparten af magnetfeltet (ca. 95%) dannes ved dynamoprocesser i Jordens flydende, elektrisk ledende kerne (her vist ved gul farvelægning). En mindre del skyldes magnetiske materialer i jordskorpen og strømsystemer i rummet.

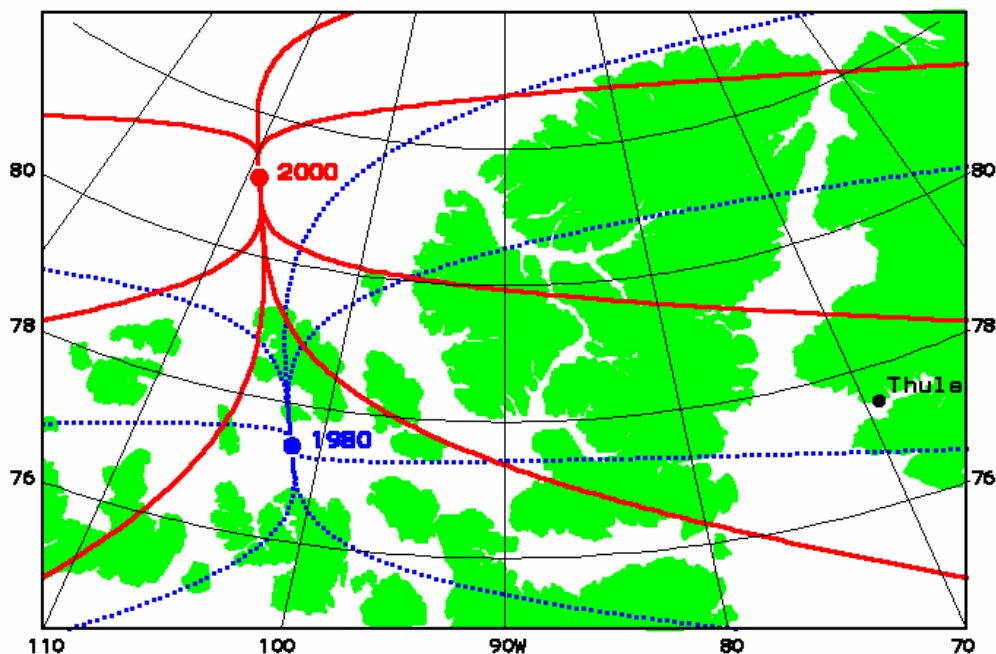
3.2. Global bestemmelse af kompasretningen og dens ændringer.

Ørsteds præcise magnetiske data anvendes bl.a. ved fastlæggelse af kompasretningen overalt på Jorden f.eks. ved udformning af søkort eller ved andre navigationsopgaver. Kompasretningen kan udtrykkes ved deklinationsvinklen mellem sand nord (geografisk nord) og kompas-nord (retningen af magnetnåls nordpol) regnet positiv mod øst. I forhold til kortlægning af kompasretningen ved magnetisk opmåling på Jordens overflade giver målingerne fra satellithøjde (Ørsted fra 640 til 840 km's højde) i højere grad den gennemsnitlige kompasretning, som er mindre afhængig af lokale magnetiske anomalier i jordskorpen.

Kompassretningen ændrer sig betydeligt med tiden som følge af ændringer i strømsystemerne i Jordens flydende kerne. Ændringerne kan bl.a. følges ud fra de absolutte magnetiske målinger af magnetfeltets styrke og retning, der udføres fra en række magnetiske observatorier verden over. Indtil Ørsted kom på banen var sådanne målinger fra Jorden de eneste, der havde tilstrækkelig præcision til fastlæggelse af magnetfeltets tidsmæssige udvikling. Men de magnetiske observatorier har en meget forskellig dækning af Jordens forskellige regioner. I Europa er dækningen generelt meget god, mens der er store områder helt uden magnetiske observatorier f.eks. på den sydlige halvkugle.

Før Ørsted var der kun udført præcisionsmålinger af Jordens magnetiske felt fra den amerikanske Magsat satellit, der blev opsendt i oktober 1979 og levede til juni 1980. Med opsendelsen af Ørsted blev det nu muligt, for første gang, at bestemme den tidsmæssige udvikling af magnetfeltets styrke og retning med god global dækning ved sammenligning af data fra de to satellitter.

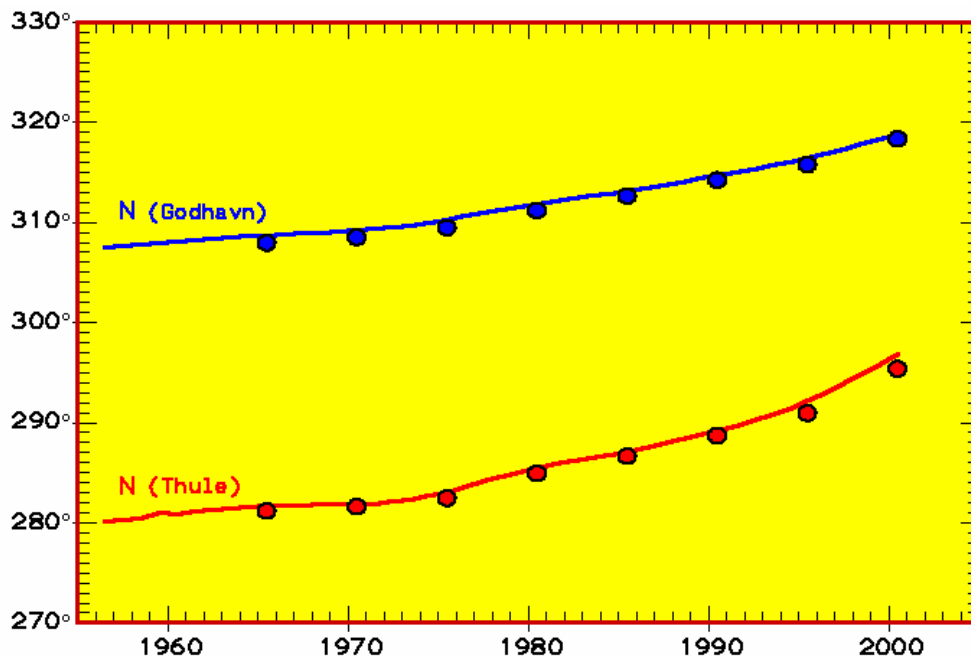
En af konsekvenserne af magnetfeltets tidsmæssige forandring er polernes vandring. Magnetpolerne på Jordens overflade (dip-polerne) kan defineres som de to steder, hvor magnetfeltets retning i et vandret plan er ubestemt. En magnetnål, der kan bevæge sig i alle retninger, vil her stille sig lodret. Den nordlige dip-pol findes i det nordlige Canada nordvest for Grønland. Denne pol vandrer for tiden mod nord med en hastighed på ca. 20 km pr år. Polens beliggenhed i 1980 bestemt ud fra Magsat's målinger (blå) og dens beliggenhed i 2000 bestemt ud fra Ørsteds målinger (rød markering) er vist i Fig. 3.3. Figuren viser et kort i geografiske koordinater over øerne, der udgør det nordligste Canada. Yderst til højre ses et lille udsnit af Grønland med beliggenheden af Thule markeret.



Figur 3.3. Den nordlige pøls vandring fra 1980 (blå) til 2000 (rød markering). Kurverne i figuren viser kompasretningen i området. Blå for 1980. Rød for år 2000. Bemærk det lille udsnit af Grønland omkring Thule til højre i figuren.

De blå og røde kurver viser magnetfeltets retning (kompasretningen) i regionen i henholdsvis 1980 og 2000. Det fremgår tydeligt af figuren, at kompasretningen har ændret sig betydeligt i løbet af de 20 år, der er gået mellem de to satellitmissioner. I nogle områder har kompasretningen drejet sig helt rundt på den forløbne tid, men også f.eks. i Grønland er ændringerne markante. I Thule ændres kompasretningen i disse år med omkring 1 grad/år. I Godhavn ændrer kompasretningen sig kun ca. halvt så hurtigt, for tiden med omkring 0.4 grad/år.

Dette forhold er beskrevet mere tydeligt i Fig. 3.4, som viser kompasretningerne i Thule og Godhavn gennem de næsten 50 år, der er præcisionsmålinger fra de magnetiske observatorier begge steder. De magnetiske målinger i Thule er udført siden 1956. Målingerne i Godhavn går helt tilbage til 1926. De fuldt optrukne kurver viser den gennemsnitlige deklination for hvert år i perioden; blå for Godhavn, rød for Thule. De runde markeringer viser beregninger af deklinationen med de internationale magnetfelt modeller, som defineres hvert 5. år. Det sidste sæt punkter markerer beregninger med IGRF2000 modellen, som er næsten udelukkende baseret på Ørstedes data.



Figur 3.4. Kompasretningens ændring gennem ca. 50 år i Thule (rød markering) i Nordgrønland og Godhavn (blå). De fuldt optrukne kurver er baserede på årsmidler fra magnetiske observatorier de to steder. De runde punkter er bestemt ved de internationale geomagnetiske feltmodeller. Punkterne for 1980 er baserede på Magsat data, mens punkterne for 2000 er hovedsageligt baserede på Ørstedes målinger.

Med de satellit-baserede magnetiske feltmodeller kan magnetfeltet beregnes overalt på Jorden og med de to satellitmissioner, Magsat og Ørsted, kan også den tidsmæssige udvikling interpoleres ret nøjagtigt mellem de to epoker. Ved ekstrapolation kan den nøjagtige kompasretning bestemmes i hvert fald i nogle år frem i tiden.

3.3. Kortlægning af anomalier i jordskorpens magnetisme.

En vigtig del af Ørsteds kortlægning af Jordens magnetfelt er analysen af de magnetiske egenskaber ved jordskorpen. Forskellige mineraltyper med indhold af jern eller nikkel har magnetiske egenskaber. Således kan magnetit (=magnetjernsten) med kemisk betegnelse Fe_3O_4 blive permanent (remanent) magnetisk, hvis det under størkning udsættes for et magnetfelt. Magnetit er almindeligt forekommende blandt de mineraler, der udgør det ydre lag af Jorden, kappen ("Mantle"), ned til den flydende kerne i ca. 3000 km's dybde. Den yderste, størknede skorpe har derfor en remanent magnetisme, hvis størrelse og retning er bestemt af magnetfeltet fra Jordens indre på det tidspunkt, temperaturen faldt under det såkaldte Curie-punkt.

Ved temperaturer over Curie-temperaturen mister magnetiske materialer deres magnetiske egenskaber. Da temperaturen stiger nedad i undergrunden er det således kun det yderste lag, skorpen ("Crust"), der kan have remanent magnetisme. Dette lag går ned til en dybde på omkring 20-40 km. Ved en detaljeret kortlægning af de magnetiske egenskaber i jordskorpen kan man således bestemme tykkelsen og sammensætningen af skorpen ned til dybden, hvor temperaturen overstiger Curie-punktet. I større dybder ned til den flydende kerne, som har et stort indhold af jern og nikkel, er materialet stort set umagnetisk og påvirker ikke magnetfeltet væsentligt.

Undersøgelser af de magnetiske forhold i jordskorpen er baseret på det forhold, at feltet fra kernen ikke kan have store variationer over afstande, der er små i forhold til dybden på ca. 3000 km ned til geo-dynamo regionen, hvor feltet skabes. Dette kommer bl.a. til udtryk i rækkeudviklingen af feltet, hvor bidrag af højere grad end ca. 14 kan antages at stamme overvejende fra uregelmæssigheder (anomalier) i skorpe-feltet.

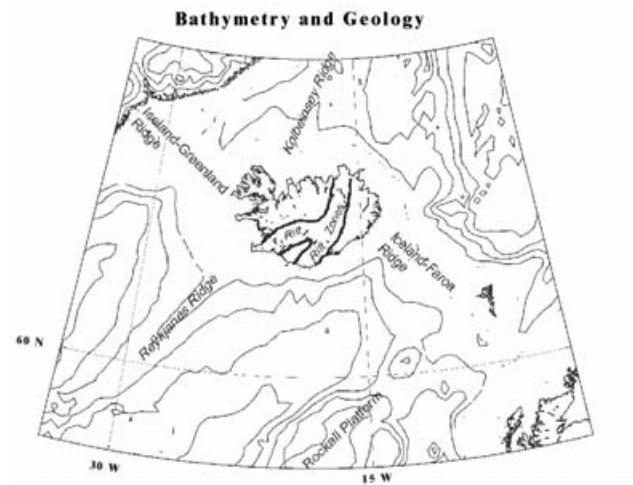
I eksemplet vises øverst i Fig. 3.5.a. en geologisk kortlægning af jordoverfladens højde over havet eller dybde under havoverfladen i den Nordatlantiske region mellem Skotland og Grønland. Der går en højderyg fra Skotland over Færøerne og Island til Grønland.

I Fig. 3.5.b. nedenunder er vist resultatet af en magnetisk kortlægning fra fly gennem aeromagnetiske målinger. Nederst viser Fig. 3.5.c. den magnetiske anomali målt fra Ørsted satellitten. Det er tydeligt, at den magnetiske anomali er nogenlunde sammenfaldende med højderyggen. Anomalien er mere udpræget på strækningen mellem Island og Grønland, dvs. på den amerikanske kontinentalsokkel, end på strækningen mellem Skotland og Island, der ligger på den europæiske kontinentalsokkel.

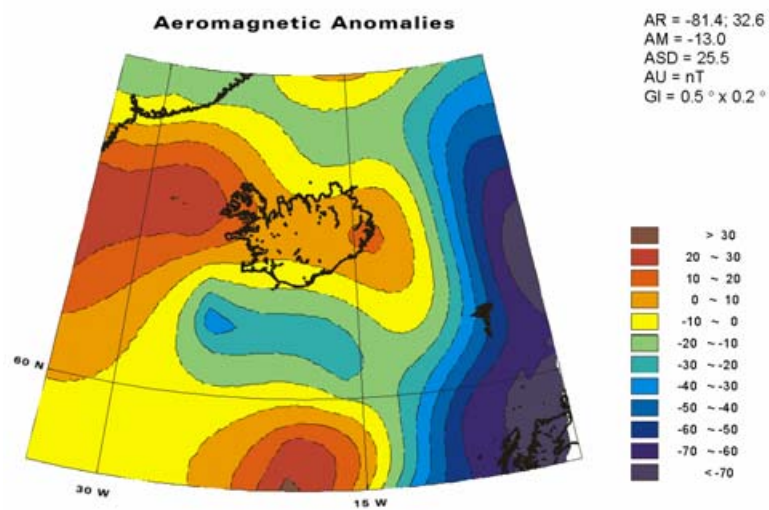
De to sokler (kontinental-plader) støder sammen i den såkaldte rift-zone, der går midt ned gennem Island, og er hjemsted for stærk vulkansk aktivitet og hyppige jordskælv. Sådanne magnetiske informationer kan være væsentlige for den geologiske kortlægning af undergrunden og spiller en stor rolle for efterforskningen af olie- og mineralforekomster. Det er endnu en forholdsvis ny videnskab og tolkningen af de magnetiske data er kun i sin spæde vorden. Bortset fra geologiske boringer, der både er kostbare og begrænsede i den opnåelige dybde, er der ikke mange andre sonderingsmuligheder end undersøgelse af de magnetiske, seismiske og tyngdemæssige forhold.

Kortlægning af magnetiske anomalier, som gennemgået i det viste eksempel, foregår ved mange lokaliteter. Bl.a. behandles anomalier i Ukraine, Sibirien, USA, Sydafrika og Antarktis indgående for tiden. I tillæg til Ørsteds data anvendes også data fra de andre magnetiske forskningssatellitter, Magsat, SAC-C og CHAMP og naturligvis data fra flybårne målinger. Fly- og satellitmålingerne, som udføres fra forskellige højder, har forskellige følsomheder for anomaliernes dybdefordeling. Dette forhold bruges til 3-D kortlægning af de magnetiske anomalier

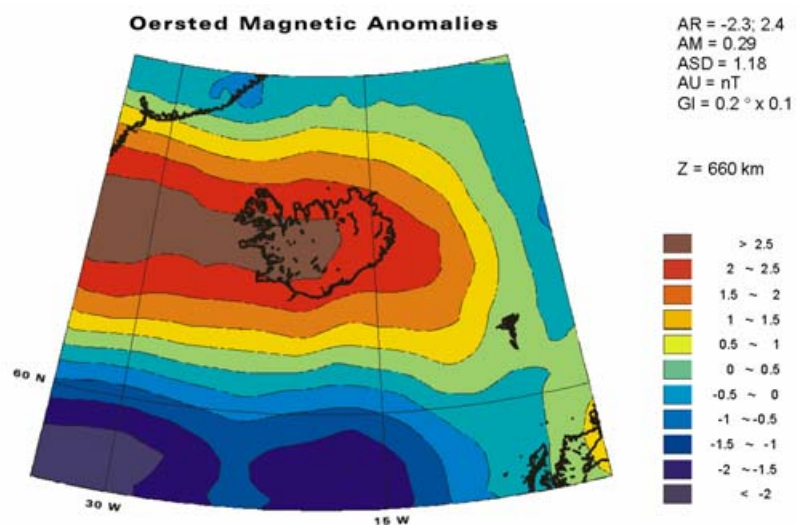
Den magnetiske kortlægning fra satellit stiller meget store krav til målingernes nøjagtighed. Bemærk i Fig.3c, at skalaen går fra -2 til +2.5 nT. Den nødvendige nøjagtighed kan ikke opnås ved global feltmodellering, men må findes ved regional detail-modellering baseret på omhyggeligt udvalgte data uden forstyrrelser fra magnetiske storme og lignende. Kravene til præcision og støjfrihed i de magnetiske målinger er således meget store, men Ørsted kan godt honorere disse krav i en grad, der gør kortlægning af magnetiske anomalier til et vigtigt redskab for geologiske undersøgelser og prospektering.



Figur 3.5.a. De bathymetriske (højde/dybde) forhold ved højderyggen fra Skotland over Færøerne til Island.



Figur 3.5.b. Kortlægning af magnetiske anomalier fra fly (Aeromagnetisk anomali-kort).



Figur 3.5.c. Kortlægning af magnetiske anomalier fra Ørsted satellitten i 600 km's højde. (Fig. 3.5.a-c er fra R.R.B. von Frese et al., 2000).

3.4. Modellering af Jordens flydende kerne

Med kombinationen af de præcise målinger af Jordens magnetfelt fra satellithøjder, f.eks. fra Ørsted i 640-840 km's højde, og ved jordoverfladen kan man udføre en modellering af magnetfeltets afhængighed af afstanden fra Jordens centrum. I jordskorpen ned til 20-40 km's dybde kan der forekomme magnetiske materialer, der påvirker feltets forløb. Dybere nede i den såkaldte kappe (Mantle) af mineraler bliver temperaturen højere end det såkaldte Curie-punkt, hvor materialer mister deres magnetiske egenskaber. De forskellige jern- eller nikkelholdige mineraltyper bliver umagnetiske ved temperaturer på nogle få hundrede grader.

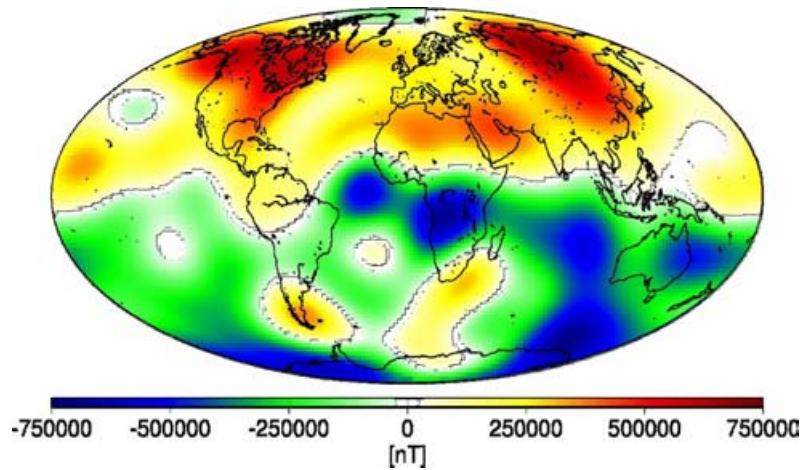
Mineralerne i kappen er ikke særlig godt ledende for elektrisk strøm, så der forekommer ikke permanente elektriske strømme i dette materiale, kun inducerede strømme, der skyldes varierende felter fra strømme i rummet. Først nede i den flydende kerne af hovedsagelig jern og nikkel er ledningsevnen så stor, at permanente strømsystemer kan eksistere. Det kan ikke siges at være afklaret hvorfra disse strømsystemer henter energi til at kompensere for de tab, der trods alt er forbundet med den ohmske modstand i mediet.

Analyse af seismiske målinger har vist, at overgangen mellem kappen og kernen, den såkaldte "Core-Mantle Boundary" (CMB), sker i ca. 3000 km's dybde. Som illustration viser Figur 3.6.a-c en analyse af mulige strømninger i den flydende kerne I Fig. 3.6.a er vist modelberegninger af den vertikale komponent af magnetfeltet (i nT) ved CMB overgangen i ca. 3000 km's dybde. Ekstrapolationen til denne dybde kræver meget nøjagtige magnetfeltmodeller. Disse modelberegninger kan nu udføres med basis i præcisionsmålingerne fra Magsat (epoch 1980) og Ørsted (epoch 2000). Fra de to modeller bestemt med 20 års mellemrum kan CMB feltets tidsmæssige ændringer beregnes. Fig. 3.6.b viser ændringshastigheden (i nT/år) af magnetfeltet i denne dybde. I en simpel model kan man antage, at magnetfeltet er "infrosset" i det flydende kernemateriale, som har stor elektrisk ledningsevne. Således vil magnetfeltændringer afspejle en transport af feltet ved strømninger i kernematerialet ved CMB. En beregning af disse strømninger er vist i Fig. 3.6.c. Bemærk skala-vektoren på 20 km/år.

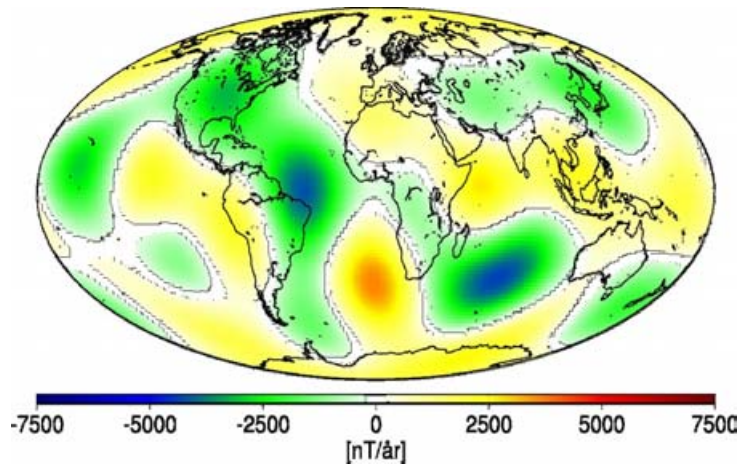
Disse modeller er i høj grad afhængige af nøjagtigheden i modelleringen af magnetfeltets højdeafhængighed, og dermed af præcisionen i de magnetiske målinger, der bl.a. udføres fra Ørsted. De magnetiske målinger udgør et af de meget få værktøjer, vi har til rådighed for udforskningen af Jordens indre. Et andet værktøj er analysen af seismiske målinger for bestemmelse af udbredelsen af seismiske signaler f.eks. fra jordskælv gennem Jordens indre. Det var således sådanne analyser, der var basis for Inge Lehmans påvisning af eksistensen af Jordens faste indre kerne i 1936. (jvf. skitsen af Jordens struktur i Fig.3.2).

Analyser af kernens struktur ved hjælp af magnetiske målinger skal bl.a. give basis for forståelsen af de dynamoprocesser, der skaber det magnetiske felt. Disse processer er meget variable, så magnetfeltet ændrer sig hele tiden i styrke og retning. Undertiden kan magnetfeltet aftage i styrke og til sidst forsvinde for senere at genopstå med modsat polaritet. Sådanne polvendinger er forekommet talrige gange i Jordens historie. De kan følges gennem de magnetiske egenskaber i f.eks. størknet lava eller søbundsaflejringer, hvor det aktuelle magnetfelt på størknings- eller aflejrings-tidspunktet har bestemt den resulterende remanente magnetisering.

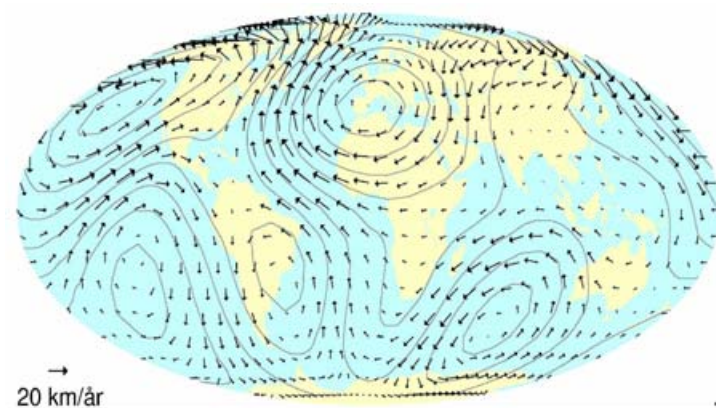
I de seneste 60 mill. år er polvendinger forekommet med et gennemsnitligt interval på ca. 250,000 år. Seneste polvending forekom for ca. 800,000 år siden. Selve polvendingen, hvor feltet aftager helt ned til nul og derpå skifter fortegn, forløber hurtigt, dvs. over nogle få hundrede år. Og det er ret heldigt, da planeten jo er udsat for den ødelæggende stråling fra Solen og fra verdensrummet i de perioder, hvor magnetfeltet ikke er på plads for at beskytte Jorden.



Figur 3.6.a. "Udfoldet" global repræsentation af den vertikale komponent af magnetfeltet modelleret ved core-mantle boundary (CMB) i 3000 km's dybde. Ligesom magnetfeltet på Jordens overflade er retningen overvejende udad (blå/grøn) på den sydlige halvkugle og indadrettet (rød/gul) på den nordlige.



Figur 3.6.b. Magnetfeltets gennemsnitlige ændringshastighed (nT/år) ved core-mantle boundary i de 20 år, der forløb mellem Magsat og Ørsted missionerne.



Figur 3.6.c. Beregnede strømninger i kernematerialet ved core-mantle boundary. Kontinenterne i den udfoldede kerne er kun medtaget for illustration af beliggenheden af hvirvelsystemerne. (Grafik i Fig.3.6.a-c: Nils Olsen)

4. Ørsteds udmåling af strømsystemer i rummet.

Ørsteds præcise magnetiske målinger kan tillige anvendes til bestemmelse af strømsystemer i rummet og til at kortlægge strømmenes afhængighed af f.eks. solvindens parametre. Strømsystemerne detekteres ved måling af de magnetfelter, der skabes af strømmene, og som bidrager til det samlede felt.

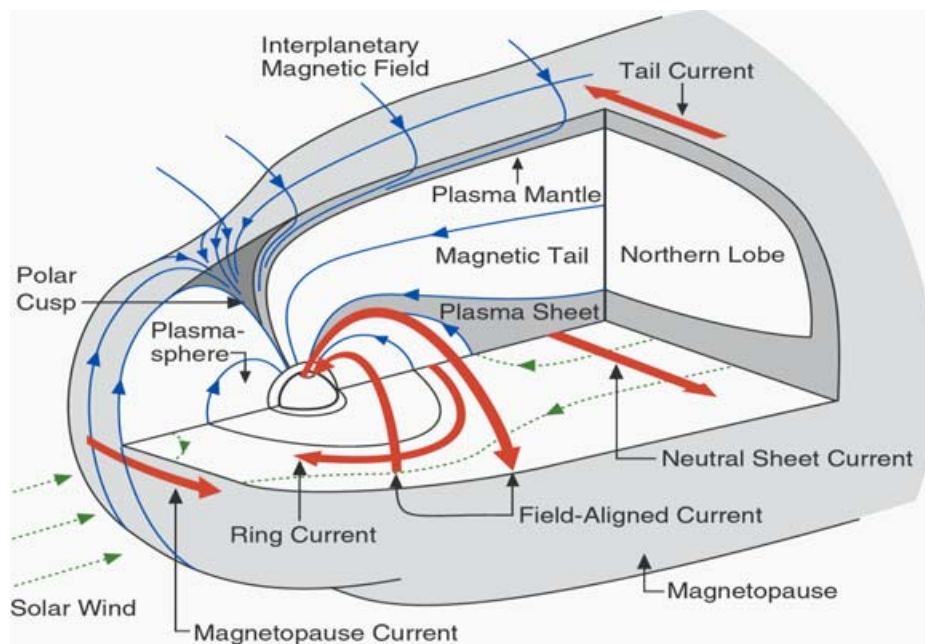
Man kan skelne mellem 3 grundlæggende typer af strømsystemer i rummet:

1. Strømme, som hovedsagelig forløber i den øvre ioniserede atmosfære under Ørsteds bane.
2. Strømme, der hovedsagelig forløber i magnetosfærens ydre regioner over Ørsteds bane.
3. Strømme langs magnetfeltet mellem magnetosfæren og ionosfæren.

Den øvre atmosfære, ionosfæren, ioniseres dels af Solens ultraviolette stråling og dels af indfaldende partikelstråling. I den elektrisk ledende ionosfære i ca. 100-200 km's højde forløber forskellige typer af strømsystemer. De såkaldte SQ ("Solar Quiet") strømme skyldes det varierende solindfald ved forskellige lokaltider. Ioniseringen følger nogenlunde Solens zenithvinkel og er maksimal kort tid efter lokal middag, SQ-strømmene danner et ret regelmæssigt mønster i forhold til solretningen.

Desuden forekommer forskellige stærkt varierende strømsystemer, bl.a. "Polar Cap Currents", der overvejende løber fra nat- til dagsiden hen over polarområdet. Hertil kommer de såkaldte "Auroral Electrojet" strømme, der forløber fra dagsiden til natsiden i ret smalle bånd i nordlyszonerne i henholdsvis morgen- og aftensektoren ved omkring 65° - 75° magnetisk bredde og på både den nordlige og den sydlige halvkugle. Disse strømme er konsekvenser af den polare ionosfærens konvektion, der igen skyldes den forbistrømmende solvind.

Blandt de vigtigste strømsystemer i rummet kan man nævne "Magnetopause Currents", som er et strømsystem i magnetosfærens grænselag til solvinden. Strømmene opstår ved solvindens afbøjning i Jordens magnetfelt. Ved magnetosfærens yderste grænselag på dagsiden afbøjes positive ioner mod aftensiden, negative ioner og elektroner mod morgensiden. Det giver en resulterende strøm fra morgensiden mod aftensiden. På magnetosfærens natside er strømretningerne modsatte.



Figur 4.1. Skitse af Jordens magnetosfære i solvinden og markering af de vigtigste strømsystemer i rummet.

Internt i magnetosfæren forekommer den såkaldte ringstrøm ("Ring Current"), der forløber i Jordens magnetiske ækvatorplan i 4-6 jordradiers afstand. Ringstrømmen skyldes forekomsten af energirige ioner og elektroner i Jordens strålingsbælter. De ladede partikler spiralisierer op og ned langs magnetfeltet og har samtidigt en drift på tværs af magnetfeltretningen. De overvejende positivt ladede ioner vil drive med uret rundt om Jorden, mens de negativt ladede elektroner driver mod uret. Den forskellige bevægelse af de positive og negative ladningsbærere frembringer en resulterende elektrisk strøm med uret rundt om Jorden.

Endelig kan nævnes "Neutral Sheet Current", som er en fladestrøm, der forløber fra morgen- til aftensiden midt i magnetosfærens haleregion. Strømmen i det såkaldte neutrale lag midt i magnetosfærens haleregion er returstrøm for "Tail Current" strømsystemet, der forløber fra aften- til morgensiden i grænseregionerne på over- og undersiden af haleregionen (se Fig. 4.1.).

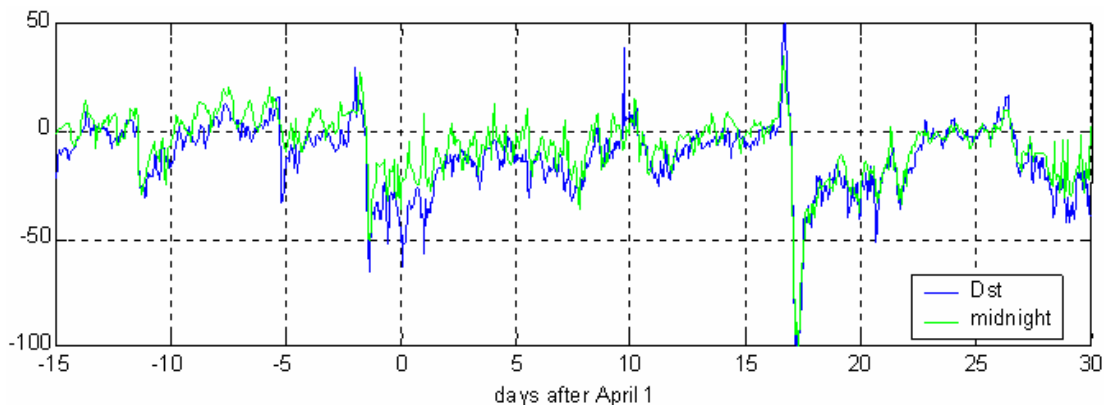
De nævnte strømsystemer i magnetosfærens ydre regioner er koblet med strømmene i ionosfæren gennem feltrettede strømme ("Field-Aligned Currents", FAC), der løber langs magnetfeltet, hvor ledningsevnen er meget stor.

Disse forskellige strømsystemer er vist skematisk med røde pile i Fig. 4.1., der viser et 3-D snit i magnetosfæren med Jorden i midten og med solvinden strømmende forbi. Figuren definerer de vigtigste regioner i magnetosfæren. Magnetfeltets forløb er skitseret med de blå feltlinier. Bevægelsen af ioniseret gas, bl.a. i solvinden, er vist ved grønne de strømmlinier.

4.1. Ringstrøm og Dst indeks

Ringstrømmen ("Ring Current") i det magnetiske ækvatorplan i 4-6 jordradiers afstand frembringer et magnetfelt, der ved Jorden i en første tilnærmelse er aksialt i dipolaksens retning. Ringstrømmens styrke beskrives ved det såkaldte Dst indeks, der baseres på magnetiske målinger på 4 stationer nær ækvator. Ved disse stationer fratrækkes fra det målte horisontale magnetfelt den tilsvarende værdi for det uforstyrrede felt bestemt ud fra de magnetisk rolige dage. Denne værdi henføres til sand ækvator, hvor den horisontale komponent er rettet i dipolaksens retning. Dst beregnes nu som en middelværdi for de 4 stationer over de således korrigerede værdier.

Med Ørsted satellitten, der med sin bane i 640-850 km's højde stadig er nær Jorden i forhold til ringstrømmen i over 30,000 km's afstand, måler også de magnetfeltændringer, der relaterer til ringstrømmen. Ved ækvator er ændringer i horisontal-komponenten med god tilnærmelse lig med tilsvarende ændringer i det totale felt, dvs. man kan sammenligne Dst med Ørsteds målinger af skalarfeltet. Denne sammenligning er udført i Fig. 4.2., hvor der kun er medtaget målinger nær lokal midnat. Som det ses, er der en ret god overensstemmelse, og dette forhold bruges nu i modellerne til at inkludere ringstrømmens effekt gennem led, hvor Dst indeks indgår som parameter.



Figur 4.2. Sammenligning af Dst indeks og Ørsteds magnetiske målinger ved midnat. Grafik: Nils Olsen

4.2. Ampères Integral og Transpolar Strøm

Den første videnskabelige publikation med data fra Ørsted behandlede anvendelsen af Ampères Integral på Ørsted-baner. Ampères lov på integralform udtrykker, at linieintegralet af den magnetiske feltstyrke langs en lukket bane er lig med den samlede elektriske strøm gennem den flade, banen omslutter. Det kan udtrykkes matematisk ved formlen:

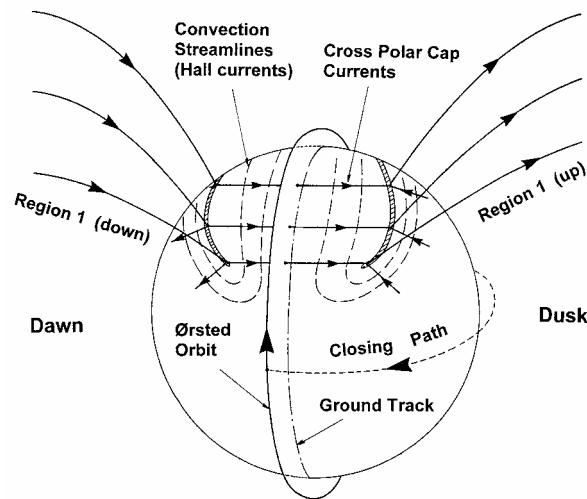
$$I_s = \mu_0^{-1} \int_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$$

hvor I_s er strømmen gennem fladen omsluttet af kurven L. \mathbf{B} er magnetfeltet og $d\mathbf{l}$ er et element af L. Vektorproduktet giver projektionen af B på kurven L.

I den aktuelle situation betragtes satellittens bane som den lukkede kurve L i formlen. Ørsted måler magnetfeltet meget nøjagtigt langs banen, og det faste indre felt fratrækkes, inden projektionen på banen beregnes. I summen af elektriske strømme gennem baneplanet forsvinder de strømme, der danner lukkede kredsløb indenfor satellittens bane, f.eks. strømmene inde i Jorden eller strømme, der helt forløber i den øvre atmosfære.

Tilbage bliver de strømbidrag, der kommer ned som feltrettede strømme fra magnetosfæren, forløber horisontalt i ionosfæren under Ørsteds bane, og forsvinder langs magnetfeltet ud til den ydre magnetosfære. Et sådant system udgøres af de såkaldte "Region-1" feltrettede strømme, der induceres i magnetosfærens yderste grænselag mod solvinden (jvf. Fig. 4.1.). Disse strømme kommer ned i morgensektoren ved høje geomagnetiske bredder. En del af strømmene forløber horisontalt hen over polarområdet og fortsætter op langs magnetfeltet i aftensektoren. Skitsen i Fig. 4.3. viser, hvorledes strømmene passerer indenfor Ørsteds bane.

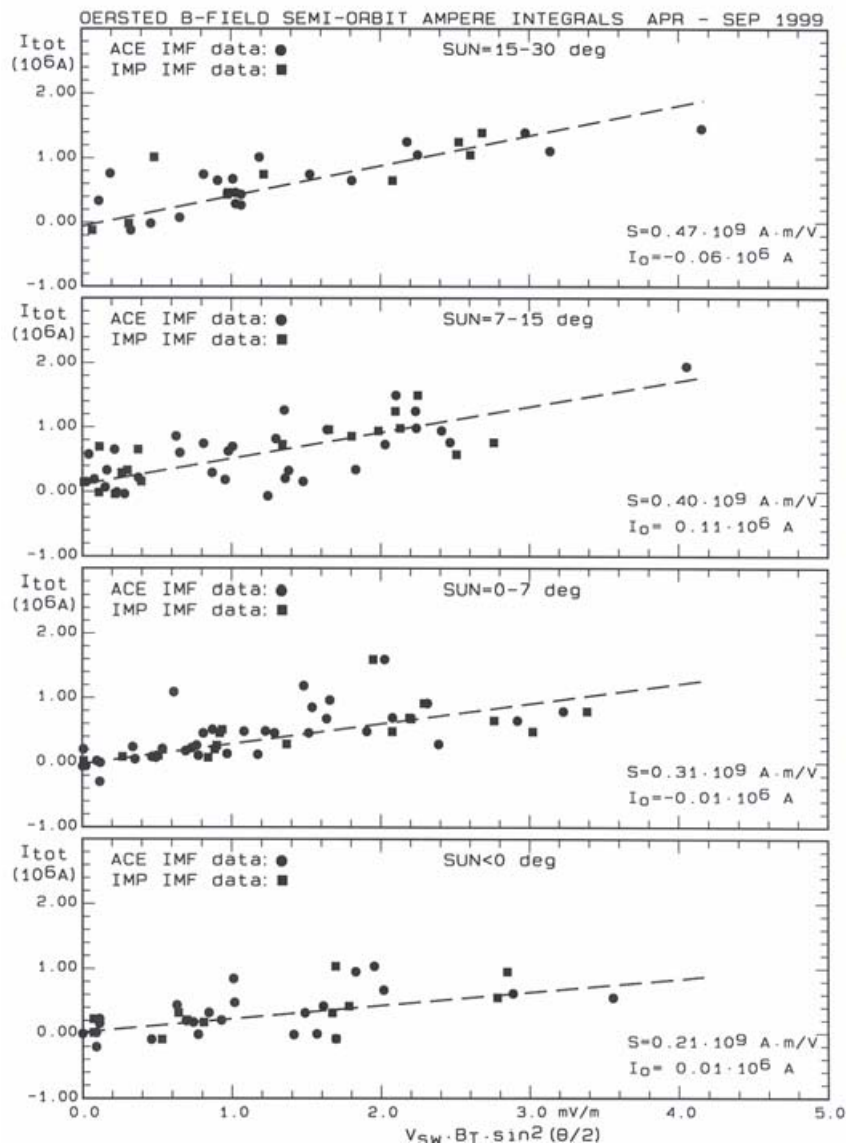
Anvendelsen af Ampères lov forudsætter stationære forhold. Det betyder her, at forholdene skal være stabile i de 100 minutter, Ørsteds omløb varer. Det kan være en noget problematisk tilnærmelse ved de meget variable forhold, der hersker i solvinden. Forskellene mellem det indre felt og det målte felt er små, og styrken af strømmen i ionosfæren er ret beskeden ved ækvator. Integrationsvejen kan omdannes til et halvt omløb suppleret med en fiktiv bane langs ækvator som vist i Fig. 4.3., og med god tilnærmelse kan bidragene til Ampères integral langs den fiktive bane negligeres. De væsentligste bidrag til integralet kommer fra pol-områderne. For anvendelsen af Ampères lov skal forholdene nu kun være nogenlunde stabile i de ca. 15 minutter, en pol-passage varer.



Figur 4.3. Skitse af Ørsteds bane og strømsystemer i den polare ionosfære.

Nu kan den totale strøm hen over polarområdet beregnes for hvert af de to polarområder uafhængigt af hinanden. Som resultat af beregningerne viste det sig, at den totale strøm i ionosfæren hen over polarområdet afhænger af det ”geo-effektive” elektriske felt i solvinden. Den totale strøm for de to polarområder tilsammen er omkring 1 million Amp. for et typisk elektrisk felt i solvinden på 2 mV/m. Med andre ord, så kan Ørstedes målinger nær Jorden fastlægge en vigtig parameter i solvinden.

Sammenhængen mellem den totale strøm (i mill. amp.) og det geo-effektive elektriske felt i solvinden (i mV/m) er vist i Fig. 4.4. De forskellige felter gælder for forskellige årstider. Det øverste for sommer, hvor Solen står højt på himlen, og hvor dens ultraviolette stråling gør ionosfæren godt ledende. Det nederste felt er for den polare vinter, hvor Solen er under horisonten dagen igennem, og hvor ionosfærens ledningsevne er minimal. Hældningen af den stiplede linie gennem punkterne i Fig. 4.4. viser den totale ledningsevne. Det er tydeligt, at strømmen stiger med stigende elektrisk felt. Men det ses også, at strømmen bliver langt kraftigere i den solbeskinnede godt ledende ionosfære end i den dårligt ledende mørkelagte vinter-ionosfære. Disse resultater kan vise sig meget nyttige for anvendelsen af satellitter som Ørsted i ”Space Weather” sammenhænge.



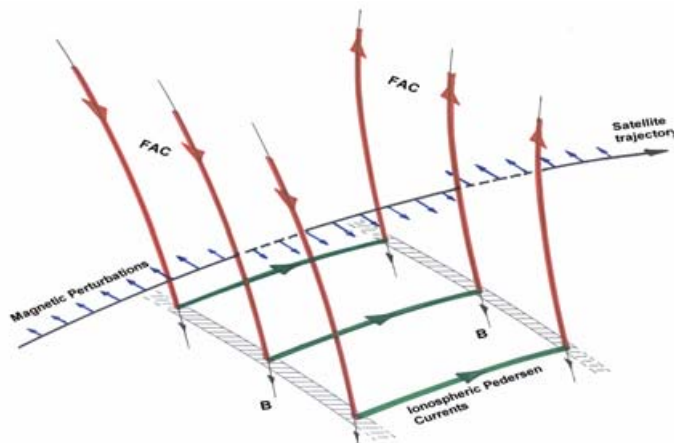
Figur 4.4. Total transpolar strøm (i mill. amp.) som funktion af solvindens ”geo-effektive” elektriske felt, E_{sw} (i mV/m).

4.3. Polare feltrettede strømme.

Figur 4.1. viser to af de karakteristiske typer af feltrettede strømme, der forekommer ved høje bredder. Fra magnetosfærens grænselag i 10-15 jordradians afstand løber feltrettede strømme ned i den øvre atmosfære ved 70° - 80° magnetisk bredde. Disse strømme kaldes "Region 1" (R1) strømme. Strømretningen er generelt fra morgen- til aftensiden, dvs. strømmene løber ned i den øvre atmosfære på morgensiden og op fra aftensiden. Mellem ringstrøm regionen i 4-6 jordradians afstand og den øvre atmosfære ved bredder mellem 60° og 70° løber de såkaldte "Region 2" (R2) feltrettede strømme. Her er strømretningen modsat af R1 strømmene, dvs. opad fra atmosfæren i morgensektoren og nedad i aftensektoren.

I rummet er den elektriske ledningsevne generelt meget høj i magnetfeltets retning, men lav på tværs af magnetfeltet. Den øvre, ioniserede atmosfære i 100-200 km's højde er elektrisk godt ledende også på tværs af magnetfeltet, der ved høje bredder er næsten lodret, så strømmen kan her forløbe horisontalt. Region 1 og region 2 strømmene er koblede således, at omkring halvdelen af R1 strømmen, der kommer ned i morgensektoren forløber horisontalt mod lavere bredder og derpå løber opad som R2 strøm til ækvatorregionen. I morgensektoren adderes R2 strømmene fra den nordlige og sydlige halvklode til ringstrømmen, der løber med uret rundt om Jorden. I aftensektoren er forløbet tilsvarende, dog med modsatte strømretninger. Den (omtrentlige) halvdel af R1 strømmen, der løber ned i morgensektoren, og som ikke fortsætter mod lavere bredder til R2 regionen, forløber hen over polarområdet (jvf. sektion 4.2.) og forlader den øvre atmosfære i aftensektoren som opadgående R1 feltrettet strøm ud til magnetosfærens yderste grænseregioner på aftensiden (jvf. Fig. 4.1. og Fig. 4.3.).

Med de fine magnetiske målinger fra Ørsted satellitten kan de feltrettede strømme detekteres. I skitsen i Fig. 4.4. er vist en idealiseret kombination af et nedadgående feltrettet strømsystem, der fortsætter horisontalt over en strækning i den øvre atmosfære for derpå at ledes opad som feltrettet strøm. Det er en almindelig konfiguration ved de koblede ionosfære-magnetosfære strømsystemer, f.eks. ved de feltrettede R1/R2 strømme. I Fig. 4.4. er vist en satellitbane gennem det feltrettede strømsystem i nogen højde over de horisontale strømme i den øvre atmosfære. Langs satellitbanen er vist de magnetiske felter, der skabes af de feltrettede strømme, og som adderes til det stationære magnetfelt, der her i eksemplet er vist nedadrettet. De magnetiske perturbationer skifter størrelse og evt. retning ved passage gennem regioner med feltrettede strømme. Ændringen afhænger af styrken af de feltrettede strømme.

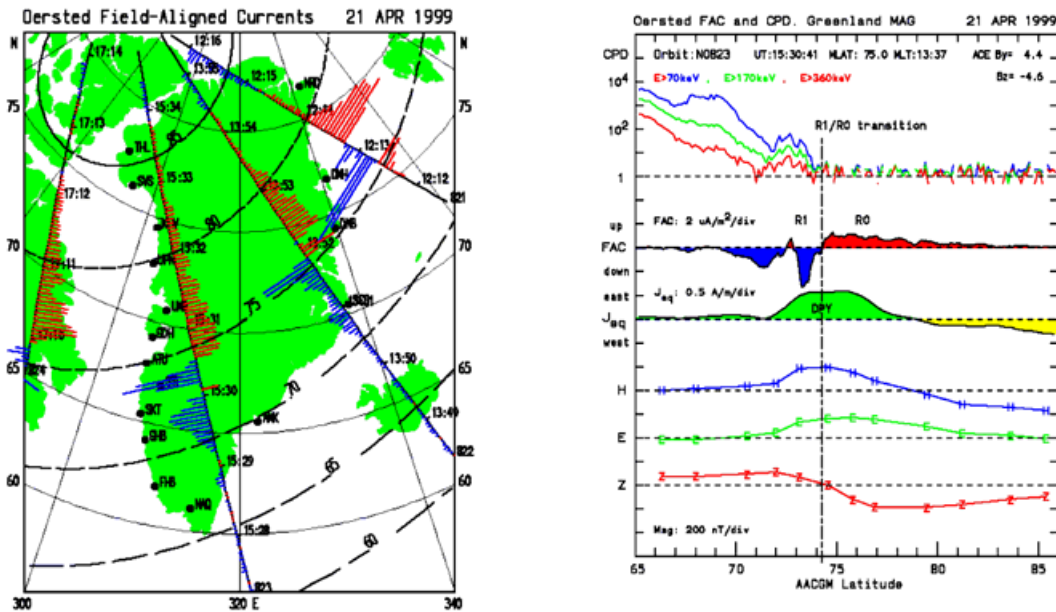


Figur 4.4. Skitse af magnetiske perturbationer langs en satellitbane tværs gennem strømlag af feltrettede strømme forbundet ved horisontale strømme i den øvre atmosfære (ionosfære).

Ved en geometri som skitseret i Fig. 4.4., dvs. med feltrettede strømme i homogene strømlag, der er langstrakte i forhold til tykkelsen, kan styrken af feltrettet strøm bestemmes ret enkelt ud fra målinger fra en satellit, der passerer tværs gennem strømlagene. Ved behandlingen af Ørsteds magnetiske data fratrækkes det stationære magnetfelt, der nu er nøjagtigt fastlagt ved præcise feltmodeller (jvf. sektion

3.1.). Herunder korrigeres tillige for mulige bidrag fra ikke-lokale kilder. Nu kan strømtætheden af feltrettede strømme bestemmes ved gradienten af de målte magnetiske perturbationer

I Fig. 4.5. er vist et eksempel på anvendelsen af denne teknik. Figuren til venstre viser et udsnit af den nordlige polarregion omkring Grønland i geografiske koordinater. Kurver for geomagnetiske bredder er indtegnet. I figuren vises 4 satellitpassager, der fandt sted mellem ca. kl. 12 og kl. 17 UT den 21.4.1999. Langs projektionen af Ørsteds baner er tiden vist ved en markering hvert hele minut. Lokal tid under satellitpassagerne er nær middag. Ved hver bane er den målte strømstyrke vist med søjler, idet farven viser strømretningen; rød for opadrettet strøm, blå for nedadrettet.



Figur 4.5. Ørsteds målinger af feltrettet strøm ved lokal middag i en periode med stabilt interplanetar magnetfelt med positiv azimuth komponent, IMF B_y , på ca. 5 nT. (a) Geografisk fordeling. (b) FAC i en enkelt orbit sammenholdt med horizontal DPY ionosfærestrøm og energirig partikelstråling.

Det ses i figuren, at de feltrettede strømme (FAC) er opadrettede i polarområdet over ca. 75° magnetisk bredde, mens der ved lavere bredder forekommer nogenlunde lige så kraftige nedadrettede strømme. Disse såkaldte DPY feltrettede strømme relaterer til azimuth komponenten, IMF B_y , af det interplanetare magnetfelt.

I figuren til højre er vist FAC strømmen (blå/rød) som funktion af magnetisk bredde ("AACGM latitude") for en af Ørsteds passager (Orbit 823). Den grøn/gule signatur for størrelsen J_{eq} , i feltet under FAC strømmen viser styrken af DPY ionosfærestrømmen bestemt fra de magnetiske perturbationer målt fra jorden ved den grønlandske magnetometer kæde. Disse målinger er vist i de nederste felter. Øverste felt viser den energirige partikelstråling ved 3 forskellige energiniveauer målt med CPD instrumentet. Strålingen falder til baggrundsniveau netop ved grænsen, hvor den feltrettede strøm skifter fortegn og hvor ionosfærestrømmen topper. Ørsteds målinger er anvendt til modellering af de feltrettede strømme styrke og beliggenhed som funktion bl.a. af det interplanetare magnetfelt.

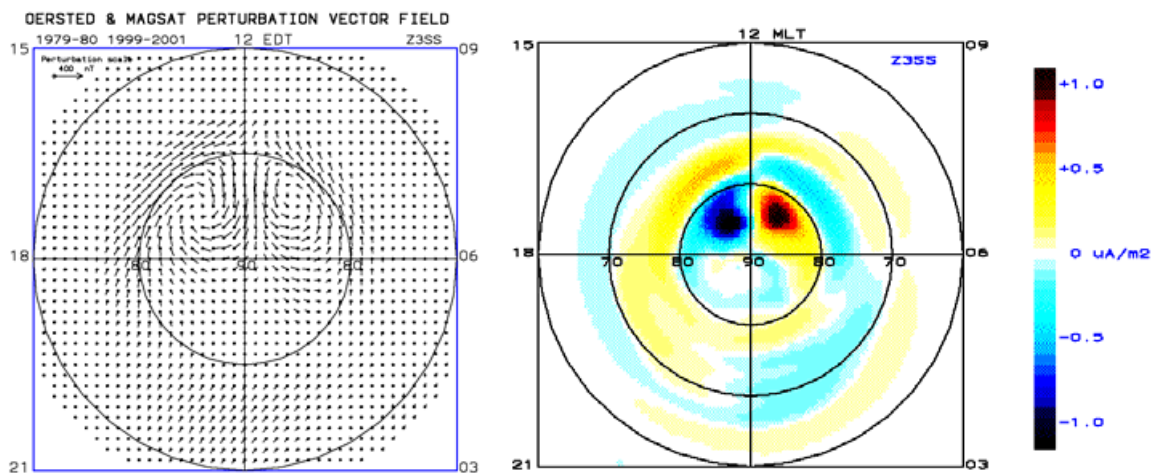
4.2. NBZ Strømsystem

Strømsystemerne vist i Fig. 4.1. omfatter ikke de specielle feltrettede strømme, der optræder i den situation, hvor det interplanetare magnetfelt er nordrettet ("Northward B_z "). I tilfælde med kraftig nordrettet (positiv) B_z komponent af det interplanetare magnetfelt (IMF) forekommer ekstra feltrettede strømme i formiddags- og eftermiddagssektorerne på dagsiden af det centrale polarområde ved magnetiske bredder på ca. 85°. Disse strømme observeres ikke når IMF er sydrettet.

De feltrettede NBZ strømme er opadrettede i formiddagssektoren og nedadrettede i eftermiddagssektoren. Disse strømme er således modsat rettede de Region 1 strømme, der forløber ved noget lavere bredder i de tilsvarende sektorer.

NBZ strømmene opfylder ikke forudsætningerne for at blive betragtet som fladestrømme i lighed med strømmene i Fig. 4.4. Således kan de ikke bestemmes ved den simple gradient-metode skitseret i figuren. For at kortlægge dette strømsystem må man gå en anden vej. For et givet sæt af solvinds-parametre, specielt med nogle snævre intervaller for det interplanetare magnetfelt, bestemmes de magnetiske perturbationer for et stort antal baner, der forekommer under disse betingelser. Banerne skal krydse polarområdet overalt og have forskellige retninger.

Med dette materiale kan man så statistisk bestemme fordelingen over magnetisk bredde og lokal tid af de magnetiske perturbationer som funktioner af solvinds-parametrene, og evt. ekstra betydende parametre som årstid, solaktivitet m.v. Et eksempel herpå er vist i Fig. 4.6.



Figur 4.6. (a) Statistisk fordeling af magnetiske perturbationer for IMF B_z mellem 5 og 10 nT, for B_y komponenten mellem + og -2 nT, for det sydlige polarområde og for sommer sæson. Magnetisk middag (12 EDT) er opad. Bemærk de to hvirvler på dagsiden og med centre ved ca. 85° bredde. (b) FAC intensiteter vist i farvekode. Strømretning: rød/gul opad, aqua/blå nedad.

Der er en skala pil for de magnetiske perturbationer i øverste venstre hjørne af Fig. 4.6.. De maksimale perturbationer i figuren er omkring 300 nT. Det mest karakteristiske træk i figuren er de to store hvirvler på dagsiden ved lokaltider på hhv. 09 og 15 EDT og ved ca. 85° magnetisk bredde. De viste perturbationer kunne dannes som magnetfeltet om to lodrette søjler af feltrettet strøm placeret i hvirvlernes centre. Ved anvendelse af Ampères lov kan FAC strømtætheder for feltrettede strømme beregnes overalt. Resultatet er vist i farvekode i Fig. 4.6.b.

De feltrettede NBZ strømme induceres ved solvindens vekselvirkning med de øverste og nederste regioner af magnetosfæren. Konturer af Region 1 og Region 2 strømsystemerne kan stadig ses i morgen og aftensektorerne ved henholdsvis ca. 75° og 67° magnetisk bredde. Disse strømsystemer forstærkes ved sydrettet IMF (negativ IMF B_z) og reduceres kraftigt ved nordrettet IMF (NBZ) som i det viste eksempel.

Ørstedes fine målinger har i stor udstrækning været anvendt til modellering af de feltrettede polare strømsystemer ved begge de her skitserede metoder, som har hver deres fordele og ulemper. Gradient-metoden forudsætter en bestemt geometri (fladestrøm). Den kan anvendes på enkelt-orbits. Den statistiske metode forudsætter eentydig sammenhæng mellem solvinds-parametre og strømbillede og kræver et stort antal baner for en tilfredsstillende dækning. Det står imidlertid stadig tilbage at kombinere metoderne. En meget lovende vej er nu åbnet med de to nye satellitter, Champ og SAC-C, der er i drift samtidig med Ørsted. Ved heldige konstellationer, f.eks. med tætliggende baner, kan man vurdere forudsætningernes gyldighed ved begge metoder og måske opnå nogle eksempler med meget sikre og præcise målinger af de feltrettede strømme i rummet.

5. Ørsteds målinger af energirig partikelstråling.

Ørsted-satellitten er udstyret med et såkaldt "High-Energy Charged-Particle Detector" (CPD) eksperiment for måling af strålingen af energirige (gennemtrængende) partikler i rummet. CPD instrumentet omfatter 6 silicium "solid-state" detektor enheder. De 6 detektor enheder har forskellige skærmminger og tykkelser, og ved analyse af målingerne kan man bestemme partiklernes energier og tillige strålingens sammensætning af elektroner, protoner (brintkerner) og α -partikler (heliumkerner). Fire enheder "ser" op langs den normalt lodrette mast, dvs. de modtager stråling, der er rettede nedad. De to andre enheder ser vandret til siden.

Detektor elementet virker som et diode-overgangslag med elektroder på begge sider og er påtrykt en spænding i spærreretningen. Energirige ladede partikler, der trænger ind i detektor enhederne, bremses og afsætter energi bl.a. i form af et ioniseret spor. De positive og negative ladninger dannet i det ioniserede spor opsamles af elektroderne og danner en lille ladningsimpuls. Det elektroniske detektorsystem forstærker impulsen og bestemmer den indsamlede ladnings størrelse. Denne ladning er en funktion af den indtrængende partikels energi. Instrumentet kan med andre ord bestemme både antallet af indtrængende partikler og energien af hver enkelt partikel.

Den energirige partikelstråling i rummet omfatter 3 hovedkomponenter. For det første magnetisk bundne partikler i de såkaldte strålingsbælter (Van Allen bælter). Denne type omfatter særdeles energirige ioner med stor gennemtrængningsevne. For det andet energirige elektroner og ioner, der er accelereret ved processer i Jordens magnetosfære i forbindelse med nordlysaktivitet. Og endelig energirige partikler, der kommer direkte fra Solen i forbindelse med soludbrud. Særligt karakteristisk er her strålingen af energirige protoner.

I Ørsteds bane i en polær orbit i ret lav højde vil satellitten især udsættes for den første type i den såkaldte "SydAtlantiske Anomali" (SAA), hvor magnetfeltet er særligt svagt, og hvor strålingsbæltet derfor kommer tæt på jorden. Nordlys-strålingen ("auroral particles") detekteres i nordlysbælterne ved høje magnetiske bredder, dog ikke i selve polarområdet. Endelig detekteres strålingen fra Solen (f.eks. "Solar Protons") kun i det egentlige polarområde og kun under de ret sjældne soludbrud.

Den energirige stråling i rummet har forskellige konsekvenser for bl.a. satellitter og for Jordens atmosfære. For satellitter kan strålingen afstedkomme strålingsskader, som afhænger af partiklernes type og energi. Den "blødere" komponent bremses i satellittens overflade, men den kan f.eks. skade solpaneler og kan tillige på isolerede dele (f.eks. i kablers isolation) akkumulere ladning ("dielectric charging"). Ophobningen af elektrisk ladning kan medføre store spændingsforskelle og mulighed for gnistudladninger og deraf følgende skadelige elektriske impulser. Den "hårde" komponent af strålingen kan gennemtrænge skærmmingen af satellittens elektroniske systemer, f.eks. måleinstrumenter og computere, og skabe problemer som f.eks. bitfejl ("single event upsets") i computeres memory kredse og falske lysimpulser i kameraers CCD kredse.

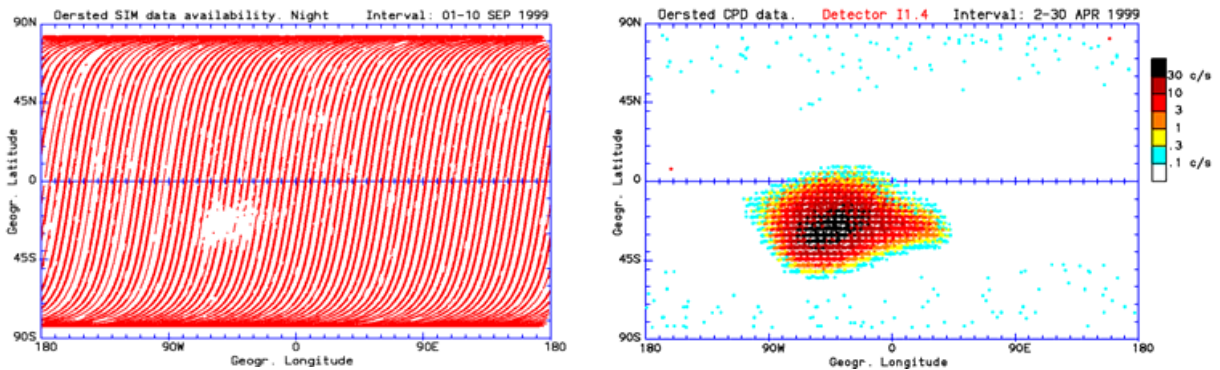
Den energirige stråling i rummet trænger ned i atmosfæren og mister energi ved exiterings- og ioniseringsprocesser. Herved skabes en forøgelse af ioniseringen i tillæg til den, der skyldes Solens ultraviolette stråling. Udover den forøgede ledningsevne medfører ioniseringen også ændringer i den kemiske sammensætning i den øvre atmosfære, f.eks. påvirkes ozonindholdet ved strålingsbegivenheder.

Ørsteds målinger af den energirige stråling har hidtil især været anvendt ved undersøgelser af strålingens indvirkning på satellittens instrumenter og computersystemer. CPD målingerne har desuden været anvendt ved undersøgelse af strålingsbælternes grænser i forhold til forekomsten af kraftige elektriske strømme langs magnetfeltet ("field-aligned currents") ved høje magnetiske bredder.

5.1. Strålingens virkning på SIM Stjernekamera.

Ørsteds stjernekompass (SIM) påvirkes af den meget gennemtrængende stråling, der forekommer i strålingsbælterne, som satellitten specielt udsættes for i SAA regionen. De meget energirige partikler, specielt protoner og tungere ioner, trænger ind i CCD kredsen og giver impulser, der tolkes som lys, og derved giver ekstra "stjerner". Når der forekommer for mange falske stjerner kan SIM

instrumentets computer forstyrres og må eventuelt opgive at bestemme sigteretningen. Denne effekt er vist i Fig. 5.1. a.

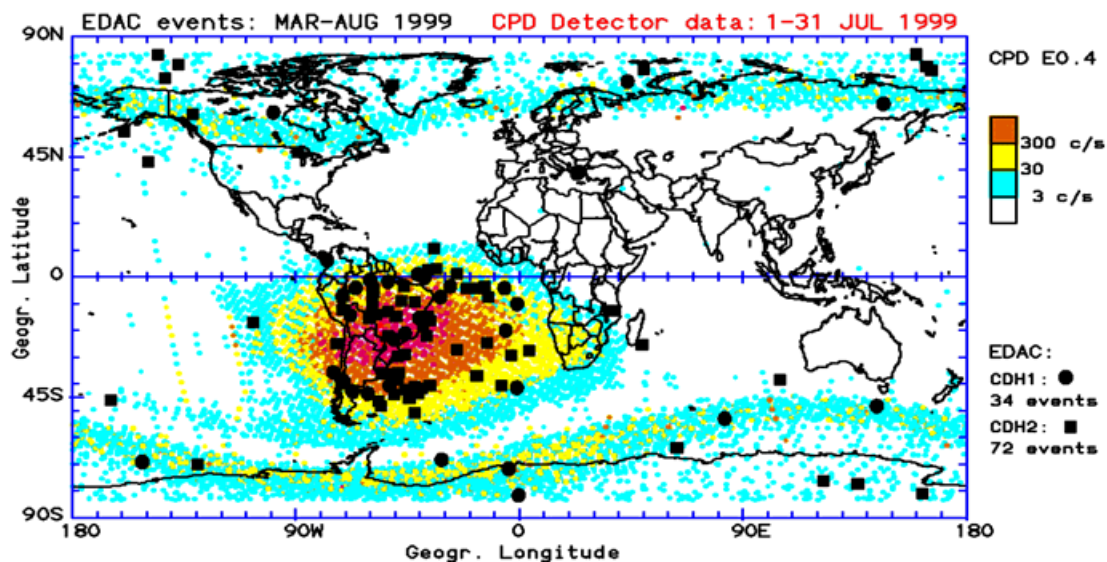


Figur 5.1. (a) SIM data regularitet gennem 1.-10. september 1999. Kurverne viser satellittens position i et geografisk koordinatsystem. Kurven er tegnet med optrukket linie, når SIM data er i orden. Det blanke område markerer positionen af den Sydatlantiske Anomali, hvor strålingen blænder SIM kameraet. (b) Strålingen målt i CPD instrumentets højeste energi-kanal. Denne stråling kan gennemtrænge flere mm Aluminium.

Den blanke plet i Fig. 5.1.a. markerer SAA regionen. Fig. 5.1.b. viser intensiteten af den meget gennemtrængende stråling, der måles i CPD instrumentets højeste energikanal. Som det fremgår af figuren måler CPD instrumentet netop i SAA regionen en særligt hård stråling, der svarer til virkningen på SIM instrumentet.

5.2. Strålingens indvirkning på computer memory kredse.

Vedrørende strålingens indvirken på computersystemer, så er Ørsted udstyret med 2 stk. "Central Data Handling" computere, CDH1 og CDH2, baseret på Intel 80C186EB processor kredse. Computersystemernes S-RAM memory anvender strålingshærdede ACS630MS kredse for "Error Detection and Correction" (EDAC).

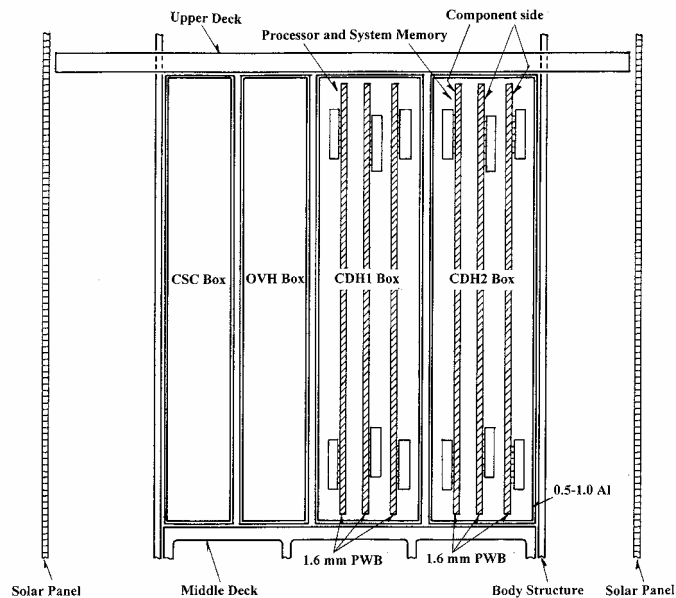


Figur 5.2. Den geografiske fordeling af EDAC events (bit-flip) i Ørsted's CDH1 og CDH2 computersystemer i perioden marts-august 1999. Strålingen målt med E0 detektorens energikanal no. 4 er også vist. Denne kanal måler den hårde elektronstråling og den meget hårde (gennemtrængende) protonstråling. Figuren viser en klar sammenhæng mellem strålingen og forekomsten af bitfejl.

EDAC systemet checker alle læse- og skriveoperationer og scanner desuden memory for bitfejl i løbet af ca. 10 min. Systemet detekterer og korrigerer enkelt-bitfejl og detekterer dobbelte bitfejl, der dog medfører reset af computeren. Når en bitfejl forekommer, bliver tidspunktet for detekteringen af fejlen registreret. Dette tidspunkt kan således være op til 10 min forsinket efter fejlen opståen f.eks. som følge af en energirig partikels indtrængen i memory kredsen.

I Fig. 5.2. er vist forekomsten af bit-fejl detekteret med EDAC systemet. Markeringen med et rundt punkt viser den geografiske position for en EDAC event i CDH1, men de firkantede punkter viser bitfejl i CDH2. Partikelstrålingens styrke langs satellittens bane er vist ved farvekoden med skala til højre i figuren. Det fremgår af Fig.5.2., at der er en dominerende forekomst af bitfejl i SAA regionen over Sydatlanten og Sydamerika. Der er dog også et antal begivenheder i nordlyszonen ved høje bredder og nogle enkelte andre steder. Partikelstrålingens intensitet er også klart maksimal i SAA regionen, mens man ser nogle svagere bånd af forhøjet stråling i den sydlige og nordlige nordlyszone.

En mere detaljeret undersøgelse af hyppigheden af bitfejl har vist en langt større stråling i SAA regionen, end man skulle vente efter de almindeligt anvendte modeller til beregning af strålingsstyrke og dimensionering af elektroniske kredsløb i satellitter. For at gennemføre sådanne beregninger må man kende skærmningen af de elektroniske enheder. Fig. 5.3. viser et lodret tværsnit af Ørsted satellitkropp, hvor memory kredsenes position er markeret. Det ses, at CDH2 er monteret yderst.



Figur 5.3. Tværsnit af Ørsted med memory kredsenes position angivet. Aluminium pladetykkelser m.v. i satellittens struktur er anført.

Ud fra satellittens struktur er den omtrentlige skærmning af memory kredsene beregnet. Til beregning af ventet hyppighed af "Single Event Upset" (SEU) anvendes den såkaldte SPENVIS (Space Environment Information System) model, der igen anvender de seneste modeller for strålingen i rummet. Resultater af beregningerne er vist i Tabel 5.1. sammen med Ørsteds målinger.

Tabel 5.1. Sammenligning af beregnet (SPENVIS) og målt (Ørsted) "Single Event Upset" hyppighed.

	Shield	Solid angle	Integ. Flux	SEU (calc)	SEU (GCR)	SEU(tot.)
CDH1	3.5 g/cm ²	1.5 π	1.8 10 ⁻² /m ² sr s	0.015 /day	0.03 /day	0.2 /day
CDH2	2.0 g/cm	2 π	2.1 10 ⁻² /m ² sr s	0.022 /day	0.07 /day	0.4 /day

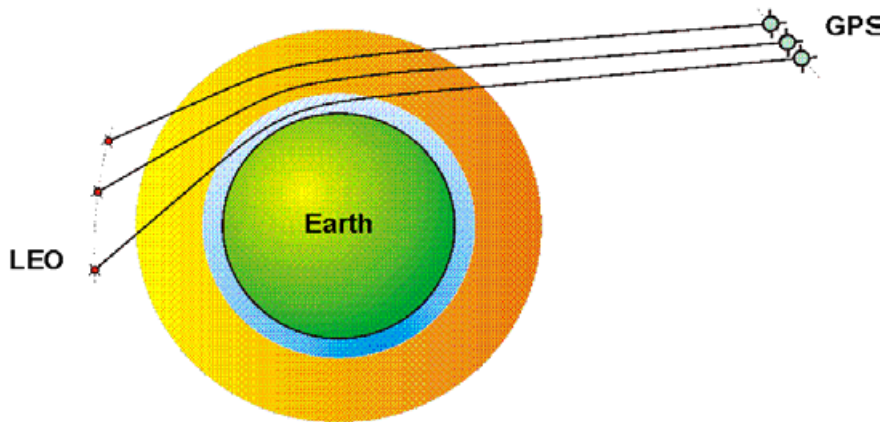
Det viser sig, at der er meget stor forskel på den beregnede hyppighed, SEU(calc), og den målte hyppighed, SEU(tot), af "Single Event Upsets". En mulig forklaring er mangelfuld modellering af den energirige stråling. Det kan Ørsted bidrage til at afhjælpe.

6. GPS Atmosfæresondering

Vejrforudsigelser er baseret på en realistisk beskrivelse af atmosfærens tilstand baseret på aktuelle målinger indsat i en numerisk vejrmodel. Modellen indeholder de fysiske eller statistiske lovmæssigheder, der bestemmer sammenhængen mellem de indgående parametre. Med disse bindinger kan modellen fremskrive vejrforholdene et stykke tid frem. Kvaliteten af fremskrivningen og dens tidsmæssige begrænsninger afhænger af det globale observationsgrundlag. Især observationer fra havområderne vil kunne forbedre statistikken for vejrforudsigelser der fremskriver atmosfærens tilstand længere end 2 dage frem. Satellitobservationer af meteorologiske standard parametre er en af måderne til opnåelse af bedre global datadækning.

Atmosfære-profilering med GPS signaler er en forholdsvis ny metode til måling af tryk og temperatur i stratosfæren og troposfæren. Metoden bygger på udnyttelse af de radiosignaler som kontinuerligt udsendes fra systemet af navigationssatellitter. Disse satellitter, det amerikanske GPS, eller det russiske GLONASS, med 24 af hver type, er i kredsløb ca. 20.000 kilometer over Jordens overflade. Radiosignaler fra en GPS-satellit påvirkes dels af elektronindholdet og dels af trykket, temperaturen og indholdet af vanddamp i atmosfæren langs signalvejen.

Set fra en satellit i en lavere bane omkring Jorden, f.eks. Ørsted i 640-850 km's højde, vil der ustandselig opstå situationer, hvor GPS-satellitter stiger op over, eller går ned bag Jordens horisont. Under en sådan radio-okkultation, hvor to satellitter lige akkurat kan "se" hinanden gennem jordens atmosfære, vil signalerne fra GPS-satellitten dels afbøjes en smule og dels forsinkes på deres vej gennem ionosfæren og atmosfæren. På den lavtgående satellit observeres denne påvirkning gennem variationer i fasen og amplituden af signalet. Figur 6.1. viser radiosignalernes vej fra GPS-satellitterne til en lavtgående satellit (LEO - Low Earth Orbit), og hvordan signalets vej vil ændre sig (afbøjes) undervejs i en okkultation.



Figur 6.1. Signalveje mellem en GPS satellit og en LEO satellit (f.eks. Ørsted) under en radio-okkultation. Den blå region viser den nedre atmosfære, mens den orange-gule region symboliserer den ioniserede øvre atmosfære. Grafik: Per Høeg.

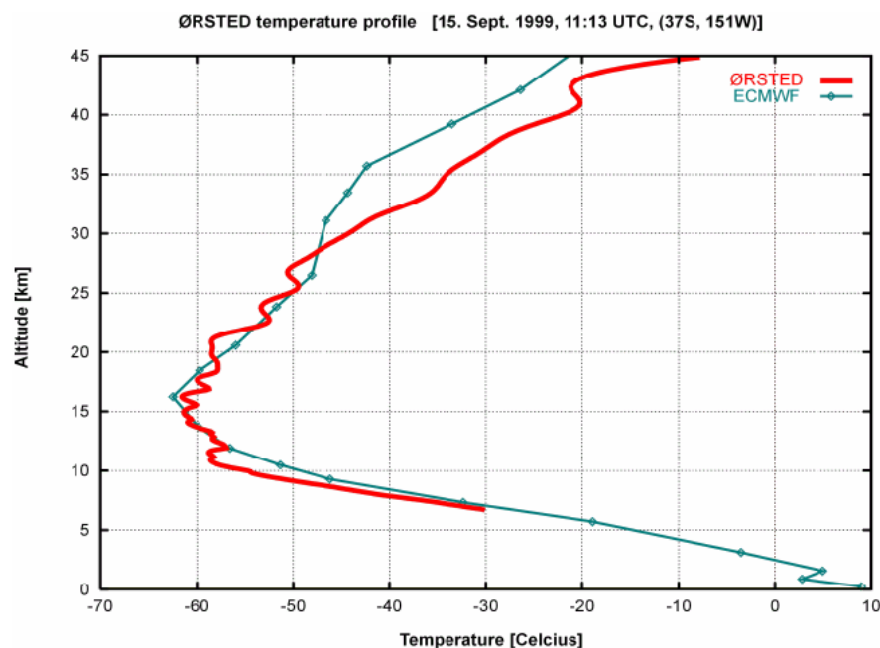
En typisk okkultation varer ca. 1 minut. I løbet af dette minut vil der på den lavtgående satellit blive modtaget signaler, som undervejs har passeret Jordens overflade i forskellige højder, fra overfladen og op til ca. 100 kilometers højde. GPS-satellitter sender på to forskellige frekvenser (1.22760 GHz og 1.57542 GHz). Med en modtage-rate på 50 Hz vil der således være information om ca. 3000 strålers vej gennem ionosfæren og atmosfæren. For hver frekvens danner disse informationer profiler af faseforskydninger langs baner op/ned gennem de laveste 100 kilometer af Jordens atmosfære.

Ud fra kendskab til de nøjagtige positioner af satellitterne, er det herfra muligt, ved hjælp af geometriske betragtninger og inversionsmetoder at komme frem til en profil af atmosfærens

brydningsindeks på det sted, hvor strålerne har passeret tættest forbi Jordens overflade. Under antagelser om hydrostatisk ligevægt, idealgasloven og en simpel sammenhæng mellem brydningsindeks og atmosfærens tæthed, kan den vertikale tryk- og temperatur-profil bestemmes her.

Den største fejlkilde i observations- og analysemetoden er påvirkningen af signalerne på vejen gennem den ioniserede øvre del af atmosfæren. Denne ionisering er meget variabel både i rum og tid. Det gælder specielt ved høje bredder, hvor ionosfæren er stærkt variabel som følge af den direkte indflydelse fra den fluktuerende solvind (jvf. afsnit 7). Disse fluktuationer har stor betydning for inversionen af observationerne.

Ved DMI er der udviklet computerprogrammer til at beregne elektrontæthedsprofiler og temperaturprofiler ud fra disse fase-data og med præcist kendskab til geometrien (position og hastighed af de involverede satellitter) i okkultationen. Fig. 6.2. viser nogle af de første resultater baseret på Ørstedes målinger. De er meget lovende, og viser overensstemmelse med radiosonde-målinger af temperaturen inden for nogle få grader Kelvin ned gennem stratosfæren og troposfæren, samt en overraskende god opløsning af små irregulariteter i temperaturen omkring tropopausen.



Figur 6.2. Temperatur profiler. Rød kurve: Baseret på Ørsted GPS målinger. Blå kurve: ECMWF værdier baseret på radiosonde data. Grafik: Stig Syndergaard og Martin B. Sørensen.

En GPS målekampagne med Ørsted blev med succes gennemført i perioden 3-22. Februar 2000 med fokus på bestemmelsen af temperaturprofiler. De ialt 921 temperaturprofiler blev efterfølgende valideret ved at sammenholde med data fra ECMWF's numeriske vejrmodel. Den bedste nøjagtighed opnåedes nær tropopausen hvor middelfejlen er mindre end 1K og standard afvigelsen er på ca. 3K.

Visionen for temperatur-, tætheds- og vanddampmålinger baseret på GPS modtagere på LEO ("Low Earth Orbiting") satellitter er bl.a. at indsamle profiler på global basis og med en jævn dækning. De nuværende målinger af atmosfærens temperatur- tætheds- og vanddamp profiler er hovedsageligt baserede på opsendelse af måleinstrumenter med radiosonde balloner. Disse målinger har en meget ujævn dækning. Dækningen er god i Europa og USA mens den i andre regioner, specielt over store havstrækninger, i polare regioner eller på den sydlige halvkugle er meget sparsom. En flåde af LEO satellitter i polare baner ville give en jævn fordeling af målingerne over hele kloden og derved udgøre et forbedret grundlag for globale numeriske vejrmodeller.

Globale GPS-baserede atmosfæremålinger kan desuden indgå i klimamodeller og kan formentlig forbedre grundlaget væsentligt for skelnen mellem regionale klimaudviklingstendenser, som ofte udviser en betydelig variabilitet, og de globale langtidsændringer af klimaet på Jorden.

7. Ørsted i international Cusp kampagne

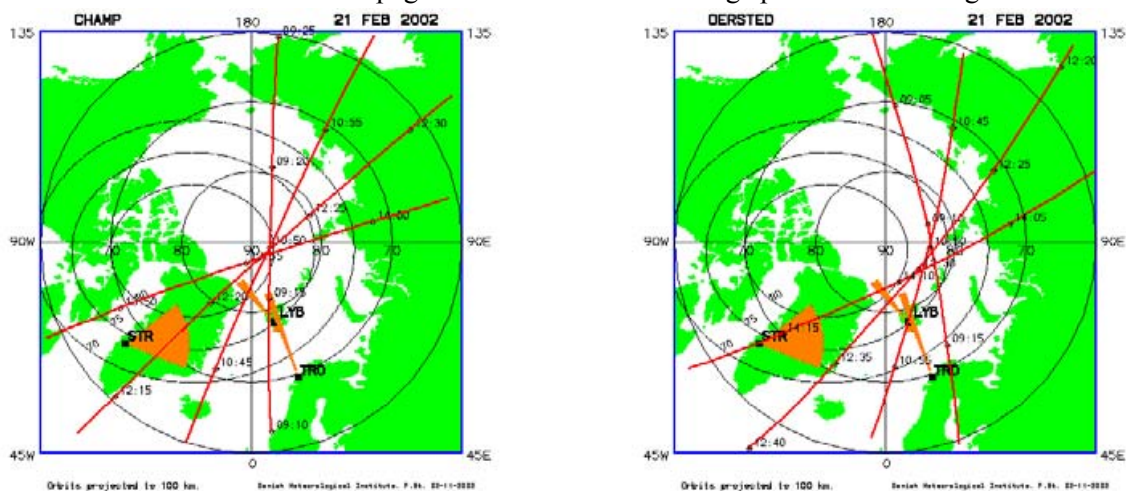
Initiativet til Cusp kampagnen blev taget af Professor Kristian Schlegel fra Max-Planck-Institute für Aeronomie, Katlenburg-Lindau og Hermann Lühr, GeoForschungsZentrum, Potsdam. I starten som en EISCAT-Champ koordineret Cusp observationskampagne, som skulle finde sted i perioden 16 - 22. februar 2002. Der skulle udføres observationer hver dag fra 08 - 13 UT med EISCAT Incoherent Scatter radar anlæggene på Svalbard og i Tromsø og fra Champ satellitten under dens passager over nordpol området. Observationerne blev udvidet til nu også at omfatte målinger fra Ørsted og SAC-C satellitterne og fra Incoherent Scatter Radar installationen i Kangerlussuaq (Sdr. Strømfjord).

Formålet med kampagnen er at undersøge den såkaldte "Cusp" region. Det er det område, hvor Jordens magnetfelt åbner sig mod solvinden, og hvor der derfor er lettest adgang for solvindens elektriske og magnetiske felter og dens energirige, ioniserede gas til at trænge ind i Jordens magnetosfære og ned til atmosfæren. Cusp regionen er beliggende på dagsiden af Jorden ved en magnetisk bredde på ca. 75° . Da regionen ligger nogenlunde fast i rummet, mens Jorden drejer rundt, vil en station på den rigtige magnetiske bredde "se" Cusp regionen en gang i døgnet. Det er for Svalbard kl. ca. 09:00 UT og for Kangerlussuaq ca. kl. 14:00 UT.

Cusp regionen er karakteriseret ved stærke strømsystemer i den øvre atmosfære og indfald af ioniserende stråling, der bl.a. giver meget variable ionosfæreforhold. Opvarmningen af den øvre atmosfære, som følge af de elektriske strømme kan være så stærk, at atmosfærens temperaturprofil ændres, og der kan forekomme udstømning både af ioner og af de neutrale atomer og molekyler fra den øvre atmosfære til de ydre magnetosfære regioner. Kampagnens hovedformål er kortlægningen af de varierende atmosfæreforhold i Cusp regionen som funktion af forholdene i solvinden.

De store Incoherent Scatter Radar anlæg i Tromsø i Nordnorge, Longyearbyen på Svalbard og i Kangerlussuaq i Grønland kan lokalt måle temperaturer, ion- og elektronindhold og elektriske felter i den øvre atmosfære. De tre satellitter Ørsted, Champ og SAC-C er udstyret med magnetiske måleinstrumenter, der kan registrere de elektriske strømme i rummet (jvf. afsnit 4), med detektorer, der kan måle den energirige partikelstråling (jvf. afsnit 5) og med GPS modtagere, der kan måle den øvre atmosfæres temperaturprofil og elektronindhold (jvf. afsnit 6). Satellitterne har alle omløbstider nær 100 minutter og vil således passere over det nordlige polarområde 4-5 gange dagligt indenfor kampagnens tidsvindue, der blev sat til 08-15 UT.

For koordineringen af kampagnen er der oprettet en "privat" web side, der ligger på DMI adressen <http://www.dmi.dk/fsweb/Esrcmp>. Den er ikke del af DMI's offentlige web, men dedikeret kampagnen, som foruden forskere ved DMI tæller deltagere fra Dansk Rumforskningsinstitut, Max-Planck-Institute für Aeronomie, GeoForschungsZentrum Potsdam, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Kommunikation und Navigation, SRI International, og NASA. For orientering om satelliternes baner under kampagnen har websiderne oversigtsplot som f.eks. Fig.7.1.

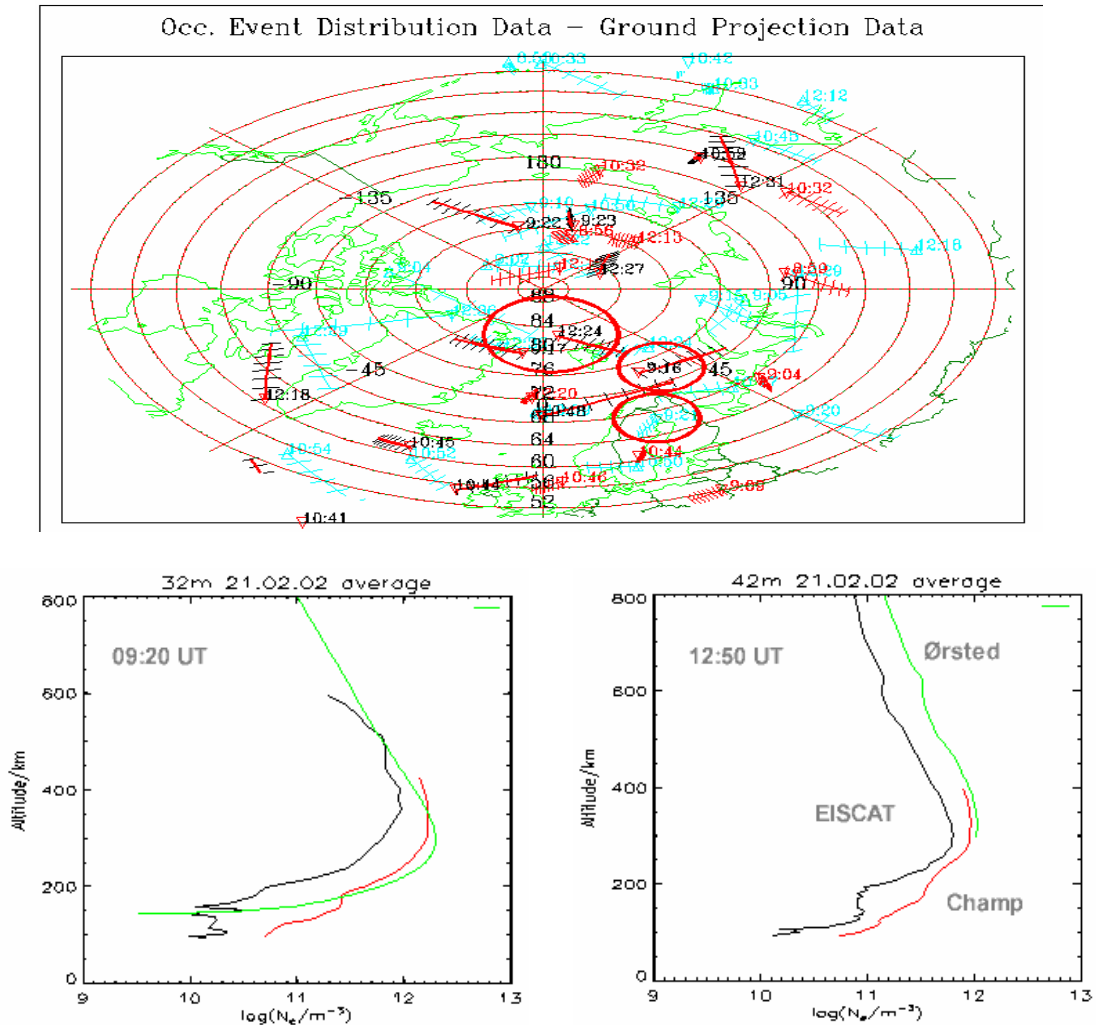


Figur 7.1. (a) Champ, (b) Ørsted satellitbaner over polarområdet den 21.2.2002. Tidsmarkering langs banerne hvert 5. minut. Kangerlussuaq, Tromsø og Svalbard Incoherent Scatter Radar beams er markeret.

Kampagnen forløb ikke uden problemer. I de første dage, fra 16. til 19. februar havde ESR radar'en på Svalbard problemer med strømmen og fungerede uregelmæssigt.. SAC-C satellitten var ikke blevet færdig med en igangsat re-programmering af GPS-modtageren, så den var helt udenfor observationsprogrammets GPS del.

Ørsted havde et kortvarigt udfald om morgenen den 18. februar, men det klarede Ørsted kontrolcenter hurtigt, og resten af kampagneperioden kørte Ørsted upåklageligt. Champ satellitten har heller ikke rapporteret om problemer. Radar systemerne i Tromsø og Kangerlussuaq gennemførte kampagnens planlagte observationsprogrammer.

De første bearbejdede data fra kampagnen er nu til rådighed på web siderne. Herunder vises resultater fra Ørsted og Champs GPS okkultationsmålinger.



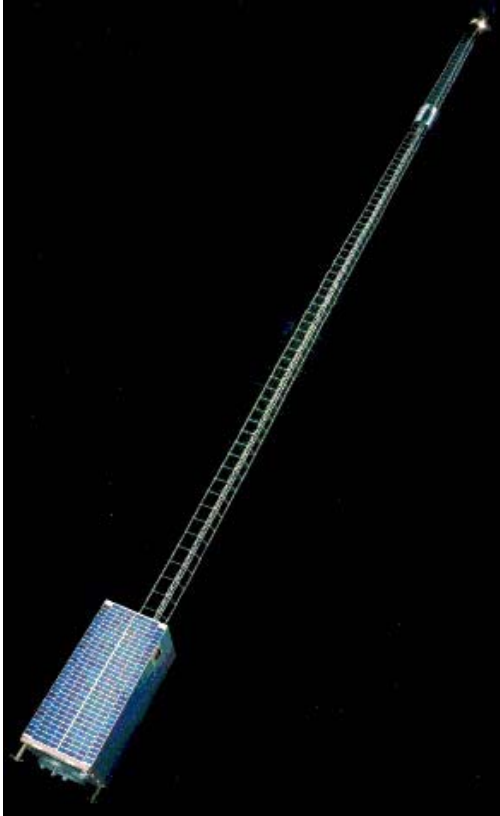
Figur 7.2. Svalbard ISR-målinger og Champ og Ørsted okkultationsmålinger af elektrontæthedsprofiler den 21. februar 2002. (a) Kort over polarområdet med radar beams og GPS signal transitveje indtegnet. (b) ESR, Champ og Ørsted profiler kl. 09:20 UT. (c) ESR, Champ og Ørsted profiler kl. 12:50 UT. Grafik: Georg B. Larsen.

Ved målingerne kl. 12:50 var Ørsteds og Champs GPS signal transit måle-områder næsten sammenfaldende, og profilerne viser også en god overensstemmelse, hvilket viser en god data kvalitet. I andre tilfælde måler instrumenterne i forskellige områder, og opnår netop derved den samtidige geografiske og tidsmæssige dækning, som kan afdække Cusp'ens position og karakteristika.

Fra denne dag og fra de andre kampagne dage er der indsamlet mange flere datasæt, som nu er under bearbejdning. De geofysiske forhold under kampagnen var meget rolige og stabile. Det er nok et godt udgangspunkt for disse første forsøg på koordinerede observationer. Der vil helt sikkert komme flere efterfølgende kampagner for undersøgelse af forstyrrede forhold.

8. Fakta om Ørsted satellitten

8.1. Satellitten og dens bane



Billedet er et foto af en model i fuld størrelse bygget af M. Genevey, DMI. Foto: DMI.

Ørsted satellitten består af en kasse med ydre mål: 72x45x34 cm. Heri ligger en sammenfoldet mast på ialt 8 meter opdelt i sektioner på 6m og 2 m. Masten, som skal udfoldes efter opsendelsen af satellitten, skal holde de følsomme magnetiske instrumenter på sikker afstand af mulige forstyrrelser fra strømme og magnetiske dele i satellitkroppen.

Satellitten inklusive instrumenter og mast vejer 60.7 kg. Den forsynes normalt med strøm fra solpaneler, der dækker 5 af siderne. Når satellitten er i jordens skygge forsynes den med opsparet strøm fra et batteri. Effektforbruget er ca. 37 watt i gennemsnit. Foruden 5 videnskabelige instrumenter er satellitten udstyret med 13 forskellige elektroniske systemer.

Struktur og mekanismer

Den primære struktur er H-formet (set ovenfra). På den ene side af midterstregen i H'et er de fleste af elektronikenhederne monteret som indstiksenheder. På den anden side er monteret en cylinder, som den 8 meter lange mast er "skruet" ned i under klarlægning og opsendelse af satellitten. (PUC, nu Terma)

Spændingsforsyning.

5 GaAs solpaneler giver omkring 37 watt i gennemsnit under et omløb. I Jordens skygge leveres effekten af et NiCd batteri. I tilfælde af fejl går

satellitten automatisk i "power save" mode for at spare mest muligt på strømmen. (TERMA)

Computer.

16 MHz 80C186 processorer med 16 Mbytes RAM-capacitet; tilstrækkeligt til mere end 12 timers observationer. Der er 0.5 Mbytes re-programmerbar PROM til software. ROM memory for permanent software til start-up. (TERMA)

Software.

Data indsamles fra alle instrumenter. Kommandoer fra Jordstationen lagres on-board og udføres på ønsket tidspunkt. Der er autonom detektering af en række fejltilstande. Om nødvendigt går satellitten i "power save" mode. (CRI, nu Terma)

Attitude-kontrol.

Primær attitude bestemmelse med stjernekompasset (star imager). Sol sensorer og magnetometer som reserve. Aktiv attitude kontrol ved anvendelse af Magneto-Torquer spoler. (AaU, DTU, Innovision). Masten med instrumenter giver passiv attitude kontrol (satellitten vender op-ned).

Positionsbestemmelse.

Positionen bestemmes ved anvendelse af modtager for GPS navigationssystem. (CRI, JPL)

Radio kommunikation.

S-bånd (2.2 GHz) sender og modtager. Data hastighed op til 256 kbits/s for transmission til Jordstation og op til 4 kbits/s for up-loading af kommandoer eller program. Transmission af data ved passager nær Danmark 5-6 gange dagligt.

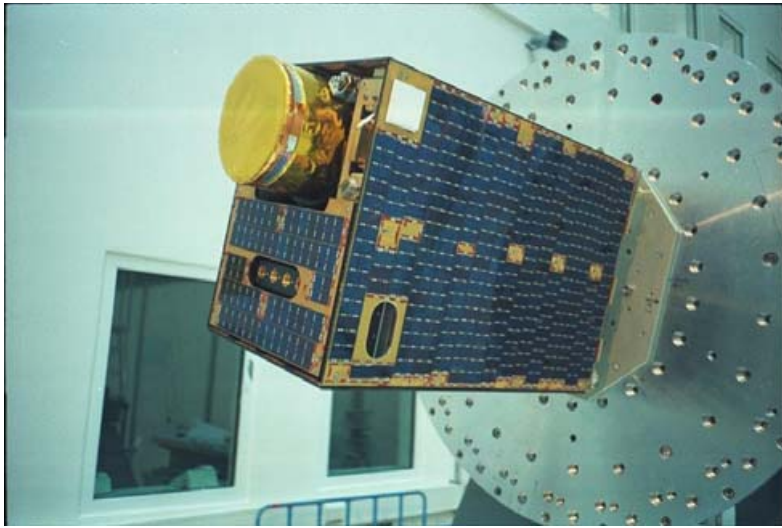
Ørstedes bane ved start

Launched from Vandenberg:	23 Februar 1999
at:	10:29:55 GMT, 11:29:55 Dansk tid
Ørsted separation:	Lift-off + 6000.000 sec
Ascending node:	14:11 LT (drifting towards noon)
Argument of perigee:	224 deg

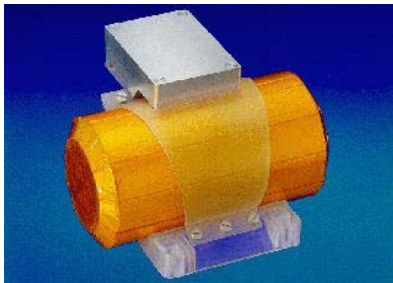
Orbit parametre 10. februar 2000

apogee:	865 km
perigee:	649 km
drift of orbit plane:	0.76 deg/day
asc. node at start of mission:	14:11 LT
mission duration:	425 days
semi major axis:	7128 km
eccentricity:	0.015
anomalistic period:	99.82 min
mean motion:	14.43
inclination:	96.48 deg
perigee drift/day:	-3.15 deg
perigee drift/orbit:	-0.22 deg
nodal period:	99.99 min
longitude increment:	-24.99 deg/orbit
local time increment:	-0.90 min/day
Asc. node February 23, 2000:	8:43 LT

8.2. Instrumenter på Ørsted satellitten



Billedet til venstre viser Ørsted satellitten monteret til vibrationstest på IABG i Tyskland. Satellittens 8 meter lange mast er drejet og skubbet ned i satellitkroppen, som kun er 72 cm høj. Satellitten har et tværsnit på 35×45 cm og vejer 60 kg. Den runde box, som delvist er dækket med gult termo-folie, sidder øverst på masten og indeholder det såkaldte Overhauser magnetometer. Gennem udskaaringerne i det øverste solpanel og foroven i solpanelet på siden af satellitten "ser" partikeldetektorerne ud i rummet (dvs. kan rammes af strålingen fra rummet). Den hvide plade i øverste hjørne af sidepanelet er en GPS modtagerantenne. I opstillingen kan Ørsted rystes i alle retninger, som det vil ske under opsendelsen. Foto: P.L. Thomsen.

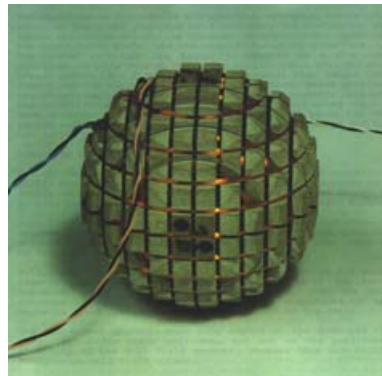


Overhauser magnetometeret, som måler styrken af det magnetiske felt med stor præcision, er bygget af Leti i Frankrig. Dansk PI for instrumentet er Ib Laursen ved Ørsted Institutet på DTU. Foto: Leti.

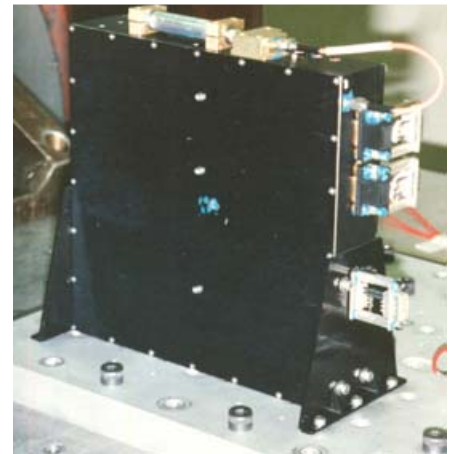


Charged Particle Detector (CPD) instrumentet er bygget af Peter Stauning, DMI, og Peter Davidsen, Terma. Instrumentet har 4 forskellige detektorer, der "ser" opad og 2, der ser til siden. Instrumentet måler den energirige (gennemtrængende) stråling i rummet, bl.a. elektroner og protoner (brintkerner).

Compact Spherical Coil (CSC) magnetometeret til højre måler magnetfeltets styrke i tre retninger med høj nøjagtighed og bestemmer derved både magnetfeltets styrke og retning. Instrumentet er bygget På Ørsted Institutet på DTU. PI for instrumentet er Fritz Primdahl DRI/DTU og Otto V. Nielsen, DTU. Foto: Fritz Primdahl.



Stjernekompasset er et video-camera, der registrerer et billede af et udsnit af stjernehimlen. Stjernernes position i billedet bestemmes ved digital billedanalyse med stor nøjagtighed og sammenlignes med et medbragt stjernekatalog. Herved kan man bestemme den præcise sigteretning for instrumentet, der er indbygget i en gondol 6 m ude på masten sammen med CSC vektor-magnetometeret. Stjernekompasset er udviklet og bygget af gruppen ved Ørsted instituttet på DTU ledet af John Jørgensen. Foto: J.L. Jørgensen.



TurboRogue GPS præcisionsmodtageren er leveret af JPL/NASA. Instrumentet modtager og analyserer signaler fra GPS-satellitterne og kan derved bestemme atmosfærens temperaturprofil, indholdet af vanddamp i de nedre atmosfære regioner og elektron-tætheden i de øvre lag. Dansk PI for instrumentet er Per Høeg, DMI. Foto: JPL/NASA.

8.3. Ørstedprojektets finansielle basis.

Ørsted satellitprojektet har kostet omkring 130 millioner kr. Projektet er finansielt baseret på aktstykke 358 fra 15. juni 1993 vedtaget i Folketingets Finansudvalg den 23. juni 1993.

Gennem dette aktstykke støttes projektet af Forskningsministeriet, Industriministeriet, og Trafikministeriet. Aktstykket blev udbygget med en "Hovedaftale" fra efteråret 1993 mellem DMI, CRI, Alcatel, Terma og PU, suppleret med delaftaler bl.a. med DRI, KU og NASA.

Tillige har Statens Teknisk-Videnskabelige Forskningsråd (STVF), Statens Naturvidenskabelige Forskningsråd (SNF), Det Offentlige Forskningsudvalg for Rummet (OFR), samt ESA's Prodex kontor ydet finansiell støtte til projektet.

Projektet er gennemført i et samarbejde mellem et antal danske virksomheder, teknologiske institutter og forsknings-institutioner, der også har støttet projektet gennem en betydelig egenfinansiering.

Desuden har den amerikanske rumfartsadministration, NASA, den europæiske rumforskningsorganisation, ESA, den franske, CNES, og den tyske rumforskningsorganisation DARA bidraget dels med instrumentering, dels med testfaciliteter, og dels med gratis opsendelse af Ørsted med en Delta-2 raket.

Organisation af Ørsted satellittens bygning.

De forskellige opgaver i forbindelse med konstruktion, bygning og test af Ørsted satellitten blev uddelegeret til industrivirksomheder og forskningsinstitutioner i form af afgrænsede arbejdsopgaver. Følgende virksomheder og institutioner har bidraget:

Danske industrivirksomheder

TERMA A/S
Hovmarken 4, 8520 Lystrup
TERMA A/S (Birkerød, tidl. CRI)
Bregnerødvej 144, 3460 Birkerød
TERMA Industries, Grenå A/S (Tidl. Per Udsen Co.) Fabrikvej 1, 8500 Grenå
Innovision (INNV)
Lindvedvej 75, 5260 Odense S
Copenhagen Optical Company (COC)
Rentemestervej 80, 2400 København NV
DDC International (DDCI)
Gl. Lundtoftevej 1B, 2800 Lyngby
Rescom A/S (RCM)
Bygstubben 12, 2950 Vedbæk
Ticra (TCR)
Kronprinsensgade 13, 1114 København K

Teknologiske institutter

Aalborg Universitet (AAU)
Afdeling for Proceskontrol
Fredrik Bajers Vej 7C, DK-9220 Aalborg

Danmarks Tekniske Universitet (DTU)
Ørsted-DTU, M&I (tidl. Institut for Automation (IAU)
Ørsted-DTU, EMI (tidl. Elektromagnetisk Institut (EMI)
Institut for Konstruktions- og styreteknik (IKS)
Institut for Produktudvikling (IPU)
Ingeniørhøjskolen Københavns Teknikum (IKT)
Elektronik Afdelingen
Lautrupvang 15, 2750 Ballerup

Forskningsinstitutioner

Danmarks Meteorologisk Institut (DMI)
Sol-Jord Fysik Sektionen
Lyngbyvej 100, 2100 København Ø
Danmarks Tekniske Universitet (DTU)
Ørsted-DTU, M&I (tidl. Institut for Automation (IAU)
DTU Bygn. 326-327, 2800 Lyngby
Dansk Rumforskningsinstitut (DRI)
Afdelingen for Solsystemets Fysik
Juliane Mariesvej 30, 2100 København Ø
Københavns Universitet (KU)
Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institutet (NBI) og
Dansk Planetcenter
Juliane Mariesvej 30, 2100 København Ø

Tests af Ørsted

Der har været udført tests af Ørsted satellittens mekaniske og elektriske systemer og instrumenter bl.a. ved Forsvarets Testanstalt i Hjørring, ved "Industrie-Anlagen Betriebs-Gesellschaft" (IABG) nær München i Tyskland (billedet nedenfor), ved ESA's testfaciliteter i ESTEC i Holland, ved NASAs Goddard Space Flight Center (GSFC) ved Washington, ved Table Mount Observatory i Californien, og ved DMI's Magnetiske Observatorium i Brorfelde.

Integrationen af satellittens tekniske systemer og dens instrumenter er foregået ved TERMA i Birkerød. Den endelige klargøring af Ørsted satellitten fandt sted på Vandenberg Air Force Test Range i Californien umiddelbart før opsendelsen af satellitten med en amerikansk Delta-2 raket.



8.4. Ledelsen af Ørsted Satellitprojekt

Ørsted Styregruppe

Den øverste ledelse af Ørsted satellitprojektet ligger hos den såkaldte "Ørsted Styregruppe", hvis medlemmer er (pr. 1.1.1999):

Jens Langeland Knudsen, Direktør for TERMA Space Division, Formand for Ørsted Styregruppe.

Lars P. Prahm, Direktør for Danmarks Meteorologiske Institut, Næstformand for styregruppen.

Mogens Blanke, Professor ved Afdeling for Proceskontrol, AUC.

Eigil Friis-Christensen, Direktør for Dansk Rumforskningsinstitut.

Jørgen Gorm Hansen, Civilingeniør, Erhvervsfremmestyrelsen.

Ole Jannerup, Institutbestyrer, Institut for Automation, DTU.

Aage Madsen, Direktør, Per Udsen Aircraft Technology.

Vibeke Schrøder, Fuldmægtig, Forskningsministeriet.

Børge Withthøft, Divisionsdirektør, TERMA A/S.

Teknisk Projektleder

Den ansvarlige tekniske projektleder for Ørsted satellitten er:

Peter Hoffmeyer, TERMA A/S.

Videnskabelig projektleder

Videnskabelig projektleder for Ørsted og koordinator af det internationale samarbejde er:

Peter Stauning, Forskningsprojektleder ved Danmarks Meteorologiske Institut.

Instrumenteringsgruppe

Leder af Ørsted instrumenteringsgruppe for de videnskabelige instrumenter er:

Fritz Primdahl, Ørsted Institut, Danmarks Tekniske Universitet/ Dansk Rumforskningsinstitut.

Ørsted Science Advisory Committee (OSAC):

Der er dannet en komité for rådgivning af Ørsted projektet i videnskabelige spørgsmål. Komitéen omfatter følgende områder og medlemmer:

Main and Crustal Field:

Jeremy Bloxham, Harvard University, USA

Catherine Constable, University of California, San Diego, USA

Marta E. Ghidella, Instituto Antartico, Argentina

Pascal Tarits, Université de Bretagne Occidentale, France

Gauthier Hulot, Institut de Physique du Globe de Paris, France

David Barraclough, British Geological Survey, Edinburgh, UK

External Field:

Arthur Richmond, NCAR High Altitude Observatory, USA

Yohsuke Kamide, Nagoya University, Japan

Catherine Senior, CEPT - Observatoire de Saint-Maur, France

Carl-Gunne Fälthammar, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, Sverige

Karl-Heinz Glassmeier, Technische Universität Braunschweig, Deutschland

GPS Investigations:

William G. Melbourne, Jet Propulsion Laboratory, NASA, USA

Ex officio members, representing:

NASA: John L. LaBrecque, NASA Headquarter, USA

CNES: Pascale Ultré-Guéraud, Centre National d'Etudes Spatiales, France.

9. Ørsted Publikationer

9.1. Ørsted Videnskabelige Publikationer

Her er en oversigt over udgivne eller indsendte videnskabelige publikationer baseret på Ørstedes målinger.

2002.

- Hulot, G.**, C. Eymin, B. Langlais, M. Manda, and N. Olsen, Small-Scale Structure of the Geodynamo Inferred from Ørsted and Magsat Satellite Data, *Nature*, accepted, 2002.
- Jadhav, G.**, M. Rajaram, and R. Rajaram, A Detailed Study of Equatorial Electrojet Phenomenon Using Ørsted Satellite Observations, *J. Geophys. Res.*, in press, 2002.
- Jadhav, G.**, M. Rajaram, and R. Rajaram, Main Field Control of the Equatorial Electrojet: A Preliminary Study from the Ørsted data. *J. of Geodynamics*, 33/1-2, 157-171, Feb. 2002.
- Moretto, T.**, N. Olsen, P. Ritter, and G. Lu, Monitoring the Auroral Electrojets with Low Altitude Polar Orbiting Satellites, in review for *Ann. Geophysicae*, 2002.
- Olsen, N.**, A Model of the Geomagnetic Field and its Secular Variation for Epoch 2000, *Geophys. J. Int.* in press, 2002.
- Olsen, N.**, E. Friis-Christensen, and T. Moretto, New Approaches to Explore and Earth's Magnetic Field, *J. of Geodynamics*, 33, 29-41, 2002.
- Purucker, M.**, B. Langlais, N. Olsen, G. Hulot, and M. Manda, The Southern Edge of Cratonic North America: Evidence from New Magnetic Satellite Observations, *Geophys. Res. Lett.*, in press, 2002.
- Stauning, P.**, Field-aligned ionospheric current systems observed from the Magsat and Ørsted satellites during northward IMF, *Geophys. Res. Lett.*, in press, 2002.
- Vennerstrøm, S.**, T. Moretto, N. Olsen, E. Friis-Christensen, A.M. Stampe, and J. Watermann, Field-Aligned Currents in the Dayside Cusp and Polar Cap Region during Northward IMF, *J. Geophys. Res.*, accepted, 2002.

2001

- Cain, J.C.**, O. Ajayi, B.B. Ferguson, D.T. Mossoni, Forecasting the Geomagnetic Field at 2005 Using Ørsted and Observatory Data, *Geophys. Res. Lett.*, accepted, 2001.
- Cain, J.C.**, D.T. Mozzoni, B.B. Ferguson, and O. Ajayi, Geomagnetic Secular Variation 1995-2000, *J. Geophys. Res.*, *Solid Earth*, accepted, 2001.
- Christiansen, F.**, V.O. Papitashvili, and T. Neubert, Seasonal Variations of High Latitude Field-Aligned Current Systems Inferred from Ørsted and MAGSAT Observations, *J. Geophys. Res.*, *Space Physics*, in press, 2001.
- Cyamukungu, M.**, P. Stauning, G. Gregoire, J. Lemaire, The Charged Particle Detector (CPD). Electron and Proton Spectra. Prodex-ESA-SSTC Contr.no. 170724 Report, January 2001.
- Jadhav, G.**, M. Rajaram, and R. Rajaram, A Detailed Study of Equatorial Electrojet Phenomenon Using Ørsted Satellite Observations, *J. Geophys. Res.*, submitted, June 2001.
- Jadhav, G.**, M. Rajaram, and R. Rajaram, Modification of Daytime Compressional Waves by the Ionosphere: First Results from Ørsted, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 28, No.1, p.103, 2001.
- Jung, H.**, and M.L. Psiaki Test of Magnetometer/Sun-Sensor Orbit Determination Using Flight Data, *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, accepted, 2001. (Also in Proceedings of the 2001 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference).
- Kim, H.R.**, R.R.B. von Frese, J.W. Kim, P.T. Taylor, and T. Neubert, Ørsted verifies regional magnetic anomalies of the Antarctic lithosphere, *Geophys. Res. Lett.*, accepted, 2001.

- Kotze, P.B.**, Modelling and Analysis of Ørsted Total Field Data over Southern Africa, *Geophys. Res. Lett.*, accepted, 2001.
- Kotze, P.B.**, Spherical Cap Modelling of Ørsted Magnetic Field Vectors over Southern Africa, *Earth, Planets and Space*, 53, 357-361, 2001.
- Langlais, B.**, M. Manda, and P. Ulte-Guerard, High-resolution magnetic field modeling: application to Magsat and Ørsted data, *Phys. Earth Planet. Inter.*, submitted, 2001.
- Manda, M.** and B. Langlais, Observatory crustal magnetic during Magsat and Ørsted satellite missions, *Geophys. Res. Lett.*, accepted, 2001.
- Manda, M.**, and B. Langlais, Improved Detection of Observatory Crustal Magnetic Biases Using Ørsted, *Geophys. Res. Lett.*, accepted, 2001.
- Merayo, J.M.G.**, F. Primdahl, P. Brauer, T. Risbo, N. Olsen, and T. Sabaka, The Orthogonalization of Magnetic Systems. *Sensors & Actuators A*, Vol. 89, p. 185-196, 2001.
- Neubert, T.**, M. Manda, G. Hulot, R. von Frese, F. Primdahl, J.L. Jørgensen, E. Friis-Christensen, P. Stauning, N. Olsen, and T. Risbo, Ørsted Satellite Captures High-Precision Geomagnetic Field Data, *EOS*, Vol. 82, No. 7, p. 81, 87, and 88, Feb. 13, 2001.
- Papitashvili, V.O.**, F. Christiansen, and T. Neubert, Field-Aligned Currents during IMF ~ 0 Derived from Ørsted and Magsat data, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 28, No. 15, p. 3055, 2001.
- Papitashvili, V.O.**, F. Christiansen, and T. Neubert, A New Model of Field-Aligned Currents Derived from High-Precision Satellite Magnetic Field Data, *Geophys. Res. Lett.*, accepted, 2001.
- Purucker, M.**, B. Langlais, N. Olsen, G. Hulot, and M. Manda, The Southern Edge of Cratonic North America: Evidence from New Satellite Observations, *Geophys. Res. Lett.*, accepted, 2001.
- Sabaka, T.**, N. Olsen, and R.A. Langel, A comprehensive model of the quiet-time, near-Earth magnetic field: Phase 3, *Geophys. J.*, submitted, 2001.
- Stauning, P.**, F. Primdahl, J. Watermann og O. Rasmussen, IMF By-related Cusp currents observed from the Ørsted satellite and from ground, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 28, p. 99, 1. jan., 2001.
- Watermann, J.**, P. Stauning, O. Rasmussen, V.O. Papitashvili, V.A. Popov, and J.P. Thayer, Observation of Field-Aligned and Ionospheric Currents during Space Weather Month, September 1999, *Adv. Space Res.*, in press, 2001.
- Yamashita, S.**, T. Iyemori, S. Nakano, T. Kamei, and T. Araki, Anti-Sunward Net Birkeland Current System Deduced from the Ørsted Satellite Observation, *J. Geophys. Res.*, submitted, 2001.

2000

- Brauer, P.**, J.M.G. Merayo, T. Risbo, and F. Primdahl, Magnetic Calibration of Vector Magnetometers: Linearity, Thermal Effects and Stability. Workshop on Calibration of Space-Borne Magnetometers, TU-Braunschweig, March 9, 1999, in: "Ground and In-Flight Space Magnetometer Calibration Techniques", eds: A. Balogh and F. Primdahl, ESA SP-490, 2002.
- Cain, J.C.**, O. Ajayi, D. Mozzoni, and C. Musat, Combined Ørsted and observatory model for 1995-2000, *Geophys. Res. Lett.*, submitted April, 2000 (revised July 2000).
- Golovkov, V. P.**, T.N. Bondar, and I.A. Burdelnaya, Spatial-temporal modelling of the geomagnetic field for 1980-2000 period and a candidate IGRF secular variation model for 2000-2005, *Earth, Planets and Space*, 52, 1125-1135, 2000.

- Holme, R.**, Modelling of Attitude Error in Vector Magnetic Data: Application to Ørsted Data. *Earth, Planets and Space*, 52, 1187-1197, 2000.
- Ivers, D.J.**, R.J. Stening, J. Turner, and D.E. Winch, Ørsted and Magsat Scalar Anomaly Fields, *Earth, Planets and Space*, 52, 1213-1225, 2000.
- Jadhav, G.**, M. Rajaram, and R. Rajaram, Modification of Daytime Compressional Waves by the Ionosphere: First Results from Ørsted. *Geophys. Res. Lett.*, accepted, Sept. 2000.
- Jadhav, G.**, M. Rajaram, and R. Rajaram, Equatorial Electrojet: A Preliminary Study Based on the Ørsted data. *J. of Geodynamics*, submitted, 2000.
- Langlais, B.**, and M. Manda, An IGRF Candidate Main Geomagnetic Field Model for Epoch 2000 and a Secular Variation Model for 2000-2005. *Earth, Planets and Space*, 52, 1137-1144, 2000.
- Lowes, F.J.**, An Estimate of the Errors of the IGRF/DGRF Fields 1945-2000. *Earth, Planets and Space*, 52, 1207-1211, 2000.
- Lowes, F.J.**, The Working of the IGRF 2000 Task Force. *Earth, Planets and Space*, 52, 1171-1174, 2000.
- Lowes, F.J.**, T. Bondar, V.P. Golovkov, B. Langlais, S. Macmillan, and M. Manda, Evaluation of the Candidate Main Field Model for IGRF 2000 Derived from Preliminary Ørsted Data. *Earth, Planets and Space*, 52, 1183-1186, 2000.
- Macmillan, S.**, An Evaluation of Candidate Geomagnetic Field Models for IGRF 2000, *Earth, Planets and Space*, 52, 1149-1162, 2000.
- Macmillan, S.**, and J.M. Quinn, The 2000 Revision of the Joint UK/US Geomagnetic Field Models and an IGRF2000 Candidate Model, *Earth, Planets and Space*, in press, Sept. 2000.
- Manda, M.**, and S. Macmillan, International Geomagnetic Reference Field - the Eighth Generation. *Earth, Planets and Space*, 52, 1119-1124, 2000.
- Manda, M.**, and B. Langlais, Use of Ørsted Scalar Data in Evaluating the Pre-Ørsted Main Field Candidate Models for the IGRF 2000. *Earth, Planets and Space*, vol.52, pp. 1167-1170, 2000.
- Merayo, J.M.G., P. Brauer, F. Primdahl, J.R. Petersen and O.V. Nielsen, Scalar Calibration of Vector Magnetometers, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 11, 120-132, 2000. (Selected "Featured Article" by MS&T).
- Merayo, J.M.G.**, P. Brauer, F. Primdahl, and J.R. Petersen, Absolute Calibration and Alignment of Vector Magnetometers in the Earth's Field. Workshop on Calibration of Space-Borne Magnetometers, TU-Braunschweig, March 9, 1999, in: "Ground and In-Flight Space Magnetometer Calibration Techniques", eds: A. Balogh and F. Primdahl, ESA SP-490, 2002.
- Olsen, N.**, T. Risbo, P. Brauer, J.M.G. Merayo, F. Primdahl, and T. Sabaka, In-flight Calibration Methods Used for the Ørsted Mission. Workshop on Calibration of Space-Borne Magnetometers, TU-Braunschweig, March 9, 1999, in: "Ground and In-Flight Space Magnetometer Calibration Techniques", eds: A. Balogh and F. Primdahl, ESA SP-490, 2002.
- Olsen, N.**, T. Sabaka, and L. Tøffner-Clausen Determination of the IGRF 2000 Model, *Earth, Planets and Space*, 52, 1175-1182, 2000.
- Olsen, N.**, R. Holme, G. Hulot, T. Sabaka, T. Neubert, L. Tøffner-Clausen, F. Primdahl, J. Jørgensen, J.-M. Leger, D. Barraclough, J. Bloxham, J. Cain, C. Constable, V. Golovkov, A. Jackson, P. Kotze, B. Langlais, S. Macmillan, M. Manda, J. Merayo, L. Newitt, M. Purucker, T. Risbo, M. Stampe, A. Thomson, and C. Voorhies, Ørsted Initial Field Model. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3607, 2000.
- Papitashvili, V.O.**, C.R. Clauer, F. Christiansen, V.A. Pilipenko, V.A. Popov, O. Rasmussen, V.P. Suchdeo, and J.F. Watermann, Geomagnetic disturbances at high latitudes during very low solar wind density event, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 12, pp. 3785-3788, 2000.
- Primdahl, F.**, P. Brauer, J.M.G. Merayo, J.R. Petersen, and T. Risbo, Determining the Direction of a Geometrical/Optical Reference Axis in the Coordinate System of a Tri-Axial Magnetic Sensor. Workshop on Calibration of Space-Borne Magnetometers, TU-Braunschweig, March 9, 1999, in: "Ground and In-Flight Space Magnetometer Calibration Techniques", eds: A. Balogh and F. Primdahl, ESA SP-490, 2002.
- Purucker, M.E.** and J. Dymont, Satellite magnetic anomalies related to seafloor spreading in the South Atlantic Ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 2765-2768, 2000.
- Risbo, T.**, P. Brauer, J.M.G. Merayo, and F. Primdahl, Ørsted Calibration Mission: The Thin Shell Method and Spherical Harmonic Analysis. Workshop on Calibration of Space-Borne Magnetometers, TU-Braunschweig, March 9, 1999, in: "Ground and In-Flight Space Magnetometer Calibration Techniques", eds: A. Balogh and F. Primdahl, ESA SP-490, 2002.
- Stauning, P.**, and F. Primdahl, First detection of global dawn-dusk ionospheric current intensities using Ampère's integral law on Ørsted satellite orbits, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3273-3276, 15 Oct. 2000.
- Thomson, A.W.P.**, Improving the Modelling of the Geomagnetic Main-Field: Isolating the Average Ionospheric Field in Satellite Data. *Earth, Planets and Space*, 52, 1199-1206, 2000.
- Thomson, A.W.P.**, Geomagnetic Main Field Models, Rept. RAS Discussion Meeting, London, Astronomy & Geophysics, 41, 3.32-3.33, 2000.
- Watermann, J.**, P. Stauning, O. Rasmussen, V.O. Papitashvili, V.A. Popov, and J.P. Thayer, Observation of Field-Aligned and Ionospheric Currents during Space Weather Month, September 1999, submitted to *Adv. Space Res.*, July 2000.
- Yamashita, S.**, T. Iyemori, S. Nakano, T. Araki, and T. Kamei, Birkeland Current Effects at Mid- and Low- Latitudes Observed by the Ørsted Satellite, *Geophys. Res. Lett.*, submitted, 2000.
- Zheng, Y.**, K.A. Lynch, and M. Bohm, Magnetic Field Data Analysis of 4 Free-Flyer Magnetometers. Workshop on Calibration of Space-Borne Magnetometers, TU-Braunschweig, March 9, 1999, in: "Ground and In-Flight Space Magnetometer Calibration Techniques", eds: A. Balogh and F. Primdahl, ESA SP-490, 2002.
- 1999 and earlier.**
 Brauer, P., J.M.G. Merayo, O.V. Nielsen, F. Primdahl and J.R. Petersen, Transverse Field Effect in Fluxgate Sensors, Sensors and Actuators A, *Physical*, Vol. 59, 70-74, 1997.
 Nielsen, O.V., J.R. Petersen, F. Primdahl, P. Brauer, B. Hernando, A. Fernandez, J.M.G. Merayo, and P. Ripka, Development, Construction and Analysis of the "ØRSTED" Fluxgate Magnetometer, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 6, 1099-1115, 1995.
 Nielsen, O.V., P. Brauer, F. Primdahl, T. Risbo, J.L. Jørgensen, C. Boe, C. Deyerle and S. Bauereisen, A High-precision Triaxial Fluxgate Sensor for Space Applications: Layout and Choice of Materials, Sensors and Actuators A *Physical*, Vol. 59, 168-176, 1997.

9.2. Ørsted Conference Proceedings.

3'rd Oersted International Science Team Meeting, Grasse, France, 2-4 May, 2000. Conference Proceedings: Editors: *Neubert, T.*, and *P. Ultré-Guerard*, ISSN-0906-897x., 2000.

Proceedings artikler heri:

Bondar, T.N., I.A., Burdelnaja, V.P. Golovkov, T.I. Zvereva, Main geomagnetic field model and space-time structure of external internal and induced geomagnetic variations derived from satellite magnetic survey.

Cain, J.C., O. Ajayi, D. Mozzoni, and C. Musat, Comparing an Ørsted-Observatory magnetic field model with the IGRFs.

Cerisier, J.-C., C. Senior, and A. Marchaudon, Plasma convection and currents parallel to the earth magnetic field at the Ørsted orbit.

Christensen, T., P. Stauning, F. Christiansen, and J. Thayer, Event study of high-energy electron precipitation by comparison of Ørsted data and ground-based observations.

Cohen, Y., V. Doumouya, B. Langlais, and P.Ultré-Guéard, Monitoring and reducing the magnetic contribution of the equatorial electrojet to Ørsted data.

Constable, C. and S. Constable, Observing geomagnetic induction in magnetic satellite measurements.

Cyamukungu, M., Gh. Grégoire, P. Stauning and J. Lemaire, The charged particle detector (CPD): Data Analysis Methodology.

Friis-Christensen, E., T. Moretto, and N. Olsen, Direct Estimation of Average Field-Aligned Current Patterns From High-Precision Magnetic Satellite Data .

Gjerloev, J.W., R. Fujii, M. Sugino, and Y. Ogawa, The Ørsted-EISCAT Conjunction Study

Grammatica, N., M. Menvielle, and P. Tarits, Study of the diurnal variation at a global scale.

Holme, R., Modelling of attitude error in Ørsted vector data.

Hulot, G., A., A. Chulliat, A. Pais, B. Langlais, and M. Mandea, Core surface flows derived from Ørsted data, tests and first estimates.

Høeg, P., H.-H. Benzon, J. Grove-Rasmussen, G. B. Larsen, K. B. Lauritsen, M. D. Meincke, L. Olsen, F. Rubek, A. Schlesier, S. Syndergaard and M. B. Sørensen, Atmosphere and ionosphere profiling results from the Ørsted mission.

Jadhav, G., M. Rajaram and R. Rajaram, Identification of external current variations in Ørsted data.

Kotzé, P.B., Modelling and Analysis of Ørsted Magnetic Field Data over southern Africa.

Langlais, B., M. Mandea, G. Hulot, A. Chulliat, P. Ultré-Guerard and Y. Cohen, From Magsat to Ørsted: Comparison of the 1980 and 1999 main magnetic field models.

Lowes, F., The explanation of some covariances in the Ørsted model (9/99).

Larsen, G.B., X. Zhang, P. Høeg, S. Syndergaard , M.B. Sørensen, J. Grove-Rasmussen, S. Fukao, K. Igarashi, and S. Kawamura, Comparison of electron density profiles from Ørsted GPS occultation data and ground-based radar observations.

Macmillan, S. and A. Thomson, Main field modelling at BGS using Ørsted satellite data.

Menvielle, M., About the meaning of longitude sector indices.

Moretto, T. and N. Olsen, Investigating the Auroral Electrojet with Ørsted data.

Moretto, T., F. Christiansen, and N. Olsen, Detection of ionospheric and field-aligned current patterns - A comparison of different methods.

Newitt, L.R., The use of Ørsted data in regional magnetic field modeling.

Neubert, T. Ørsted Commissioning, Status and Future.

Olsen, N., ØRSTED-2/SAC-C

Papitashvili, V., F. Christiansen, and T. Neubert, Field-aligned currents patterns from Ørsted observations.

Paris, J. and M. Menvielle, Derivation and dissemination of the longitude sector indices.

Purucker, M.E., Evidence for a new current system at the geomagnetic poles in summer (or) the longest magnetic anomaly in the world explained: The Pacific margin of early paleozoic Gondwana.

Schlesier, A.C., A. Rius, A. Escudero, F. Rubek, G.B. Larsen, S. Syndergaard and P.Høeg., Ionosphere tomography using Ørsted GPS occultation data and comparisons with ground-based radar observations.

Stampe, A.M., S. Vennerstrøm, N. Olsen, Contamination of models by ionospheric polar cap currents: A study in data selection.

Stauning, P., F. Primdahl, J. Watermann, O. Rasmussen, Correlation of field-aligned currents derived from Ørsted magnetometer data and polar dayside ionospheric convection patterns.

Stauning, P., P. Davidsen, and M. Cyamukungu, Ørsted CPD High-energy particle observations and radiation effects in Ørsted instruments and systems.

Tarits, P., Preliminary investigation of the Ørsted data for induction studies.

Taylor, P., R. R. B. von Frese and H. R. Kim, Results of a comparison between Ørsted and Magsat anomaly fields over the Kursk magnetic anomaly.

Toeffner-Clausen, L. Ørsted data products.

von Frese, R.R.B., H. R. Kim, T. E. Leftwich and J. W. Kim, Ørsted magnetometer constraints on the crustal structure of the Greenland-Scotland Ridge.

Watermann, J.W., O. Rasmussen, P. Stauning, V. Papitashvili and J. Thayer, Observations of field-aligned and ionospheric currents during space weather month, September 1999.

Yamashita, S., T. Iyemori, S. Nakano, M. Takeda, T. Kamei, A. Saito, T. Araki and M.Sugiura, Middle latitude field-aligned current effects observed by Ørsted and a comparison with the Magsat and DE-2 observations.

9.3. Ørsted Conference Præsentationer

Nedenfor gives en oversigt over foredrag og posters baseret på Ørstedes målinger og præsenteret på internationale videnskabelige konferencer.

Conferecer 2002.

Champ First Science Meeting. Potsdam 22-25 Jan 2002.

Cerisier, J.-C., and A. Marchaudon, Currents parallel to the Earth magnetic field at the Champ orbit: application to the electrodynamic of the ionosphere.

Christiansen, F., et al., Modeling field-aligned currents derived from high-precision satellite magnetic field data.

Grove-Rasmussen, J., Comparison of DMI retrieval of Champ occultation data with ECMWF.

Hemant, K. and S. Maus, A comparison of global lithospheric models derived from satellite data.

Hulot, G., et al., Small-scale structure of the geodynamo inferred from Oersted and Magsat data.

Jackson, A., New views of the core magnetic field from Champ and other satellites.

Larsen, G.B., et al., GPS atmosphere and ionosphere profiling methods used on Ørsted data and application on Champ data.

Lesur, V. and A. Thomson, A comparison of Champ and Oersted main and external field models for 2001.

Martinez, Z. Two-dimensional spatio-temporal electromagnetic induction along a satellite trajectory.

Mozzoni, D., et al., Combined modelling of Ørsted and Champ magnetic field data with help from observatory secular change.

Olsen, N., et al., Monitoring the magnetic signature of the magnetospheric ring-current with Ørsted, Champ and Oersted-2/SAC-C.

Stampe, A.M., et al., Current systems in the polar region during quiet geomagnetic conditions- Multi-satellite observations.

Stauning, P. et al., Detection of fine-scale field-aligned current structures from Ørsted.

Stauning, P., et al., Mapping of field-aligned current patterns during northward IMF.

Tarits, P., Preliminary investigation of the Champ magnetic data for induction studies.

Taylor, P., et al., Comparing Magsat, Ørsted and Champ crustal magnetic anomaly data over the Kursk magnetic anomaly, Russia.

Vennerstrom, S., et al., Multi-satellite observations of currents in the day-side cusp and polar cap.

von Frese, R.R.B., et al., Champ, Ørsted and Magsat magnetic anomalies of the Antarctic lithosphere.

Wardinski, I. and R. Holme, Decadal and subdecadal secular variation of main geomagnetic field.

Watermann, J., et al., Field-aligned currents inferred from low-altitude Earth-orbiting satellites and ionospheric currents inferred from ground-based magnetometers - do they render consistent results?

Conferecer 2001.

AGU Meeting in San Francisco, December 10-14, 2001.

Christiansen, F., et al., Storm Time Field-Aligned Currents Detected by the Ørsted Satellite.

Stauning, P., et al., Observations of Field-Aligned Currents and Particle Precipitation Patterns During Events of Strongly Northward IMF.

Watermann, J., et al., Are Field-Aligned Currents Inferred From the Ørsted Satellite Consistent With Ionospheric Currents Inferred from Greenland Ground-Based Magnetometers?

SunSpa Euroconference, Napoli, 24-29 September, 2001.

Stauning, P., and J. Watermann, High-voltage power-line disturbances and electrojet modelling during large geomagnetic storms.

IAGA-IASPEI Joint Scientific Assembly, Hanoi, Vietnam, 19-31 August, 2001.

Papitashvili, V.O., et al., Maps of field-aligned currents for various IMF conditions derived from Ørsted magnetic field observations.

EGS Meeting, Nice, April 25-30, 2001.

Stauning, P. and F. Primdahl, Detection of global dawn-dusk ionospheric current intensities by using Ampère's integral law on Ørsted satellite orbits.

Stauning, P., et al., IMF By-related Cusp currents observed from the Ørsted satellite and from ground.

Stauning, P., Investigations of high-latitude ionospheric disturbances detected from Ørsted and other satellites and from ground.

Conferecer 2000.

ESA Utilization Workshop, ESTEC, 12 December 2000.

Stauning, P., et al., High-Energy Particle Radiation Effects in the Instruments and Memory Circuits of Low-altitude Satellites

AGU Fall, Meeting, San Francisco, 15-19 December 2000.

Bloxham, J. Insights into the Geodynamo from Ørsted Magnetic Field Observations and Numerical Modelling.

Christiansen, T., et al., Ørsted and Ground-Based Observations of High-Energy Electron Precipitation.

Christiansen, F., and T. Neubert, Performance and Status of the Ørsted Geomagnetic Satellite Mission.

Constable, S.C., and C.G. Constable Global Electromagnetic Induction from Satellite Magnetic Field Observations.

Doumouya, V., and Y. Cohen Correction of Satellite Magnetic Data from the EEJ Contribution Using Ground Based Data and an Empirical EEJ Model.

Friis-Christensen, E., et al., Maps of High-Latitude Field-Aligned Currents as Derived from High-Precision Magnetic Satellite Data.

Kim, H.R., et al., Ørsted Lithospheric Anomaly Components

Macmillan, S., and A.W. Thomson Aspects of Main-Field and Secular Variation Models Derived from Ørsted and Contemporary Ground-Based Data.

Mandea, M., et al., Main Field, Secular Variation, and Core Flows. Improvement Brought by the Ørsted Satellite Mission

Merayo, J.M.G., et al., The Ørsted Satellite High-Precision Magnetic Vector Measurements

Mozzoni, D.T., et al., A Model of the Geomagnetic Field from 1995 - 2000.

Olsen, N., et al., Combined Interpretation of Internal and External Magnetic Sources Using Observatory and Satellite Data.

Olsen, N., A Model of the Main Field and its Secular Variation for Epoch 2000 Estimated from Ørsted Data.

Papitashvili, V.O., et al., Quiet Time Field-Aligned Currents Detected by Ørsted Satellite.

Parker, R.L., and C.G. Constable, Spatial Resolution of Ørsted Vector Magnetic Observations.

Purucker, M., et al., Magnetic Fields of High Degree Measured by Ørsted and their Interpretation.

Schlesier, A., et al., Ionosphere Tomography using Ørsted GPS Occultation Data and Comparisons with Ground-Based Radar Observations.

Stampe, A.M., et al., Field-aligned Currents Associated with the Auroral Electrojets.

Stauning, P., et al., Observations from ground and from satellites of polar ionospheric effects of the 14 July 2000 solar storm event.

Syndergaard, S., et al., Validation of Ørsted-GPS Occultation Data in the Lower Atmosphere.

Vennerstrom, S., et al., Cusp Currents Observed with Ørsted

Voorhies, C.V. The Radius of Earth's Core from Ørsted, Magsat, or SV.

Walker, M.R., et al., Magnetic Field Model for Core-Motion Studies

S-RAMP conference, Sapporo, 2-6 October 2-6, 2000.

Neubert, T., et al., Field-aligned Current Distributions Observed from Ørsted.

Stauning, P., et al., Correlation of radiation effects in Ørsted satellite instruments and systems with high-energy particle observations.

Stauning, P., et al., Statistical and case studies of DPY currents based on Ørsted satellite and polar ground-based observations.

Yamashita S., et al., An Effect of Anti-sunward Current System Observed by the Ørsted satellite.

SEDI 2000 meeting, Exter, UK, 30 July-4 August, 2000.

Thomson, A., and S. Macmillan, Geomagnetic models derived from ground-based observations and satellites.

COSPAR Meeting, Warsaw, Poland, 16-23 July, 2000.

Stauning, P., Observations of Field-Aligned Currents and High-Energy Particle Radiation Associated with Small-Scale High-Latitude Disturbances.

Stauning, P., and P. Davidsen Detection of Radiation-Induced Anomalies in the Memory Circuits of the Ørsted Satellite Using EDAC.

Stauning, P., et al., IMF Dependence of Ionospheric and Field-Aligned DPY Currents.

Stauning, P., et al., Morphology of Ionospheric and Field-Aligned DPY Currents as Detected by Ground-Based Instruments and from the Ørsted Satellite.

Stauning, P., et al., Magnetospheric Structure and Polar Ionospheric Convection during Northward IMF Conditions.

Watermann, J., et al., Observations of Field-Aligned and Ionospheric Currents During Space Weather Month, Sept. 99.

SCAR Meeting, Washington, 10-14 July, 2000.

Papitashvili, V.O., et al., Field-Aligned Currents Distributions Observed from Ørsted and Magsat.

PIERS 2000, Cambridge, Massachusetts, 5-14 July, 2000.

Syndergaard, S., et al., Results from the Ørsted-GPS Occultation Experiment,

GEM workshop, Snowmass, USA, 19-23 June, 2000.

Watermann, J., et al., Magnetic Field Measurements from the Ørsted Satellite and from Greenland Ground Stations: Do Field-Aligned and Ionospheric Electric Currents Match?

Danish Physical Society, 8-9 June, 2000.

Christensen, T., et al., High-energy Electron Precipitation Study Using Ørsted Satellite and Ground-based Data,

AGU Meeting, Washington, 30 May-3 June, 2000.

Cain, J.C., et al., Virtues and Problems of the IGRF2000

Langlais, B., et al., From Magsat to Ørsted: Comparison of the 1980 and 1999 Main Magnetic Fields.

Papitashvili, V., et al., Parameterization of Field-Aligned Currents Detected at the Ørsted Satellite by the IMF Strength and Direction

Ørsted Science Team Conference, Grasse, 2-4 Maj, 2000.

Bloxham, J., Ørsted magnetic field observations and geodynamo modelling.

Cain, J.C., et al., Combined Ørsted and observatory model for 1996-2000.

Cerisier, J.-C., The SuperDARN network of HF radars.

Cerisier, J.-C., and C. Senior, Currents parallel to the earth magnetic field at the Ørsted orbit.

Christensen, T., et al., Event study of high-energy electron precipitation by comparison of Ørsted data and ground-based observations.

Cohen, Y., et al., Monitoring and reducing the magnetic contribution of the equatorial electrojet to Ørsted data.

Cohen, Y., et al., Monitoring and reducing the magnetic contribution of the equatorial electrojet to Ørsted data.

Constable, C. and S. Constable, Observing geomagnetic induction in magnetic satellite measurements.

Cyamukungu, M., et al., The charged particle detector (CPD): Data Analysis Methodology.

Fedorova, N., et al., Long wavelength magnetic anomalies produced by lithosphere according to airborne and satellite data.

Friis-Christensen, E., SWARM - A necessary continuation of high-precision magnetic measurements.

Friis-Christensen, E. and T. Moretto Direct Estimation of Average Field-Aligned Current Patterns From High-Precision Magnetic Satellite Data .

Gjerloev, J.W., et al., The Ørsted-EISCAT Conjunction Study

Golovkov, V.P., et al., Main geomagnetic field model and space-time structure of external internal and induced geomagnetic variations derived from satellite magnetic survey.

Grammatica, N., et al., Study of the diurnal variation at a global scale.

Holme, R., Modelling of attitude error in Ørsted vector data.

Hulot, G., A., et al., Core surface flows derived from Ørsted data, tests and first estimates.

Hoeg, P., et al., Atmosphere and ionosphere profiling results from the Ørsted mission.

Jadhav, G., et al., Identification of external current variations in Ørsted data.

Kotzé, P.B., Modelling and Analysis of Ørsted Magnetic Field Data over southern Africa.

Langlais, B., et al., From Magsat to Ørsted: Comparison of the 1980 and 1999 main magnetic field models.

Larsen, G.B., et al., Comparison of electron density profiles from Ørsted GPS occultation data and ground-based radar observations.

Loves, F., The explanation of some covariances in the Ørsted model (9/99).

Lühr, H. and Richard Holme The Champ satellite: A progress report.

Macmillan, S. and A. Thomson, Main field modelling at BGS using Ørsted data.

Menvielle, M., About the meaning of longitude sector indices.

Moretto, T. and N. Olsen Investigating the Auroral Electrojet with Ørsted data.

Moretto, T., F. Christiansen, and N. Olsen, Detection of ionospheric and field-aligned current patterns - A comparison of different methods.

Newitt, L.R., The use of Ørsted data in regional magnetic field modeling.

Neubert, T. Ørsted Commissioning, Status and Future.

Olsen, N., ØRSTED-2/SAC-C

Papitashvili, V., et al., Field-aligned currents patterns from Ørsted observations.

Paris, J. and M. Menvielle, Derivation and dissemination of the longitude sector indices.

Prindahl, F. The Ørsted Science Instruments.

Purucker, M.E., Evidence for a new current system at the geomagnetic poles in summer.

Rasmussen, O., et al., Ground-based geomagnetic data to support the Ørsted mission.

Schlesier, A.C., et al., Ionosphere tomography using Ørsted GPS occultation data and comparisons with ground-based radar observations.

Stampe, A.M., et al., Contamination of models by ionospheric polar cap currents: A study in data selection.

Stauning, P., et al., Correlation of field-aligned currents derived from Ørsted magnetometer data and polar dayside ionospheric convection patterns.

Stauning, P., et al., Ørsted CPD High-energy particle observations and radiation effects in Ørsted instruments and systems.

Tarits, P., Preliminary investigation of the Ørsted data for induction studies.

Tarits, P., et al., AMPERE and French contribution to the 'Decade of Geopotential Research'.

Taylor, P., et al., Results of a comparison between Ørsted and Magsat anomaly fields over the region of Kursk magnetic anomaly.

Toeffner-Clausen, L. Ørsted data products.

von Frese, R.R.B., et al., Ørsted magnetometer constraints on the crustal structure of the Greenland-Scotland Ridge.

Watermann, J.W., et al., Observations field-aligned and ionospheric currents during space weather month, September 1999.

Yamashita, S., et al., Middle latitude field-aligned current effects observed by Ørsted and a comparison with the Magsat and DE-2 observations.

EGS Meeting, Nice, 25-29 April, 2000.

Christiansen, F. and V.O. Papitashvili, High-latitude Field-aligned Currents from Ørsted Observations for Various IMF Conditions.

Cohen, Y., et al., Estimating ABD Reducing the Effect of the Equatorial Electrojet.

Neubert, T., et al., The Ørsted Geomagnetic Satellite: Mission Status and First Results.

Stauning, P., et al., Polar ionospheric convection patterns and magnetic field morphology during northward IMF conditions.

Stauning, P., et al., Morphology of Ionospheric and Field-aligned DPY Currents as Detected by Ground-based Instruments and from the Ørsted Satellite.

Stauning, P., Structure of Field-aligned Currents and High-energy Particle Radiation Associated with Small-scale High-latitude Ionospheric Disturbances.

Stauning, P., and P. Davidsen, Observations of Radiation-induced Anomalies in the Memory Circuits of the Ørsted Satellite.

Watermann, J., et al., Storm-time Observations of Field-aligned and Ionospheric Currents Limited in Space and Time.

Royal Astronomical Society, London, 10 March, 2000.

Stauning, P., The Ørsted Satellite. A Real Danish Fairy Tale,

Thomson, A.W.P., Geomagnetic Main Field Models.

Conferecer 1999.

AGU Meeting, San Francisco, December 1999.

Kursinski, E. and R. Hajj, G, Status Report on the Oersted and SUNSAT GPS Occultation Experiments.

Langlais, B., et al., The Earth's magnetic field in 1999: preliminary results from the Ørsted Satellite.

Neubert, T., et al., The Ørsted Geomagnetic Satellite: Mission Status and First Results.

Popov, V.A., et al., Geomagnetic Disturbances and Equivalent Ionospheric Currents over Greenland and Antarctica during Very Low Solar Wind Density Event.

URSI General Assembly, Toronto, 13-21 August, 1999.

Syndergaard, S., et al., Improved Method for Measuring the Satellite to Satellite TEC in the Ionosphere.

IUGG99 Conference, Birmingham, UK, 19-30 July, 1999.

Cain, J., and D. Mozzoni, Fine Tuning Global Models Based on Satellite Magnetic Observations.

Cain, J., and D. Mozzoni, How Can Global Spherical Harmonics Assist in Map Constructions?

Christensen, T., et al., High-Energy Electron Precipitation and Field-aligned Currents in the Cusp Region Measured from Ørsted Satellite and Correlated Ground-based Observations of Ionospheric Convection and Absorption.

Christiansen, F., et al., High-Latitude Ionospheric Convection and Field-aligned Currents Detected from Ground Magnetometers and from the Ørsted Satellite during Northward IMF Conditions.

Cohen, Y., et al., Monitoring the Equatorial Electrojet Activity using Ground Stations During the Oersted Mission, 1999.

Cohen, Y., et al., Preliminary Results from the Danish Satellite OERSTED, a Report from the IGP Group, 1999

Mortensen, M. D., Vertical Resolution of GPS Occultation Data from OERSTED/SUNSAT.

Golovkov, V.P., et al., Spherical Cap Harmonics Analysis of Geomagnetic Variations over High Latitudes

Mozzoni, D., and J. Cain, Adjusting SHC Coefficients to N # 15 for Epoch 2000.

Neubert, T., et al., The Ørsted Geomagnetic Satellite Mission. Instrumentation and Data Handling. Presentation of Initial Results.

Papitashvili, V., et al., Comparisons of Magnetic Fields Measured by Ørsted Satellite with Modeled High-Latitude Field-aligned Current Systems.

Stauning, P., et al., Comparison of the Cusp/Cleft DPY Current Obtained from the Ørsted Satellite and from Ground-Based Instruments.

EGS Meeting, Haag, 19-23 April, 1999

Christensen, T., et al., Correlated Measurements of High-energy Electrons Precipitation and Field-aligned Currents from Ørsted Satellite and Convection and Absorption Observations from Ground.

Christiansen, F., et al., Polar Convection Patterns Detected from Ground and Field-aligned Currents Systems Detected from Ørsted and other Satellites during Northward IMF Conditions.

Neubert, T., et al., Ørsted Geomagnetic Satellite Mission. Instrumentation and Data Handling. Presentation of Initial Results.

Stauning, P., et al., Correlated Observations of DPY Current Systems from the Ørsted Satellite and from Ground-based Instrumentation.

Stauning, P., et al. On the Detection of Field-aligned Current Systems associated with Small-Scale High-Latitude Convection Disturbances.