

# Ørsted - 5 års succes i rummet

Af Peter Stauning, DMI

*Nye forskningsresultater om strømningerne i Jordens kerne af flydende metal, indsigt i de elektriske forhold i den sejtflydende mineralmasse i kappen, udmåling af anomalier i jordskorpen, registrering af havstrømme, sondering af atmosfærens temperatur og indhold af vanddamp, måling af elektronindholdet i den øvre atmosfære, kortlægning af strømsystemer i rummet, detektering af energirige partikler i strålingsbælterne, bestemmelse af elektriske felter i solvinden. Nej, det er ikke indholdsfortegnelsen i et opslagsværk om rumforskning og geofysik. Det er uddrag af Ørstedsatellitens resultatliste.*

Da Ørsted den 23. februar 2004 kl. 11:29:55 passerede hen over Sydpolen i sit omløb nummer 26.335, så havde den lille danske satellit nået en bemærkelsesværdig milepæl: 5 år i rummet og stadig i fuld drift. I sine 5 år har Ørsted tilbagelagt over en milliard km, hvilket er mere end syv gange afstanden til Solen, som »kun« er 150 mill. km borte. Ved mere end 11.000 passager over Danmark har Ørstedsatellitens gennem den forløbne tid sendt data fra sine fremragende målinger ned til modtagerstationen på DMI.

Efter en problemfyldt start er Ørsted nu blevet en succes af formidabelt internationalt format.

## Ørstedprojektets baggrund

Ved sin oprettelse i 1872 blev Meteorologisk Institut pålagt at udføre magnetiske opmålinger i Danmark, dvs. at bestemme magnetfeltets nøjagtige retning overalt i riget. Opgave blev udført af magister Adam F.W. Paulsen, som siden blev direktør for instituttet. Med inspiration fra H.C. Ørsted og

andre store fysikere i samtiden fik Adam Paulsen dyb interesse for geomagnetiske forhold. I 1889 genoptog DMI således de rutinemæssige magnetiske målinger, som i 1842 var startet af H.C. Ørsted.

Samtidig opstod en interesse for nordlys, som man på den tid betragtede som et meteorologisk fænomen. Dette førte til udsendelse af en ekspedition til Godthåb (Nuuk) i Grønland under det første internationale polarår i 1882-83 for studier af nordlys og geomagnetisme.



Figur 1. Moltkes nordlysmaleri fra Akureyri, 1899. (foto på [www.dmi.dk](http://www.dmi.dk))

Videre udsendte Meteorologisk Institut ekspeditioner til Island i 1899-1900 og til Finland i 1900-1901 for nordlysundersøgelser. I ekspeditionerne deltog maleren Harald Moltke, som har fremstillet de fine nordlysmalerier, der er ophængt flere steder på DMI. På opfordring fra den internationale videnskabelige union for geomagnetisme, IAGA, opførte DMI i 1925 et magnetisk observatorium i Godhavn (Qeqertarsuaq), hvorfra rutinemæssige målinger blev startet i 1926. Gennem deltagelsen i det 2. Internationale Polarår (1932-33) og i det Internationale Geofysiske År (1957-58), hvor DMI havde en ledende rolle, blev det geofysiske observationsarbejde i Grønland udviklet til et højt niveau, der siden er videreført.

Gennem udviklingen af fine magnetiske måleinstrumenter, omfattende geomagnetiske observationer i polarområdet og ikke mindst gennem indsatsen fra en række fremragende forskere ved DMI, har instituttet gennem årene markeret sig meget stærkt internationalt på det geomagnetiske område. Samtidig har DMI satset på omfattende anvendelse af satellitbaserede observationer i den meteorologiske tjeneste, for kortlægning af isforholdene i polarområdet, ved oceanografiske undersøgelser og andre anvendelser. Instituttet er derved blevet Danmarks uden sammenligning største bruger af rumbaserede observationer.

### Ørstedprojektets start

Da Ørstedprojektet udviklede sig som en geomagnetisk mission i

begyndelsen af 1990'erne, var det derfor naturligt, at DMI påtog sig en ledende rolle ved den første danske satellit. Ørstedssatellitens hovedformål skulle være en nøjagtig kortlægning af Jordens magnetfelt. Blandt satellittens andre opgaver skulle være kortlægning af elektriske strømsystemer og energirig stråling i rummet og undersøgelser af atmosfæren med GPS-baserede sonderinger. Finansieringen af projektet kom på plads i juni 1993 ved en bevilling fra regeringen på 71 mill. kr. fordelt på Erhvervs-, Forsknings- og Trafikministerierne. Bevillingen blev i efteråret 1993 fulgt op af en »Hovedaftale« mellem de implicerede danske forsknings- og industrivirksomheder, hvor der bl.a. blev tilført projektet yderligere ressourcer gennem egenfinansieringsbidrag, og ved aftaler med udenlandske rumforskningsinstitutioner, NASA, ESA, CNES (fransk) og DLR (tysk). NASA bevilgede en gratis opsendelse af Ørsted

som passager på en Delta-II raket, der skulle opsende en stor amerikansk ARGOS-satellit i samme bane, som var ønsket for den danske satellit. Opsendelsen skulle efter planen ske i 1995.

### Ørstedssatellitens lange vej til succes

Ørstedssatellitten har været hårdt ramt af forsinkelser og andre problemer. ARGOS-satellitten havde uheldigvis store konstruktionsproblemer og var slet ikke klar i 1995, så Ørsted måtte lægges i »mølpose«. Først i slutningen af 1998 kom der klarmelding fra ARGOS-holdet. Ørsted blev klargjort og sendt til Vandenberg Air Force base med henblik på opsendelse i begyndelsen af januar 1999. Den første nedtælling fandt sted den 15. januar 1999, men opsendelsen måtte opgives på grund af uheldige meteorologiske forhold (kraftige vinde i store højder).

Så fulgte en tilsyneladende endeløs række af opsendelsesforsøg, hvor skiftevis tekniske



Figur 2. Ørstedssatellitten testes i IABG. Masten er sammenfoldet i kroppen (foto: Per L. Thomsen)

og meteorologiske forhold førte til aflysning. Men endelig, den 23. februar 1999 kl. 11:29:55, ved den 11'te nedtælling lykkedes det. Den store Delta-raket løftede sig majestætisk fra affyringsrampen på sin søjle af ild fra de brølende raketmotorer, og snart forsvandt raketten ud af syne med sin last af tre satellitter, den amerikanske ARGOS, den sydafrikanske Sunsat og den danske Ørsted-satellit. Kl. 13:10, efter 100 minutters flugt, blev Ørsted frigjort fra løfteraketten, og så kl. 14:20, næsten 3 timer efter opsendelsen modtog vi de første radiosignaler fra Ørsted over antennen på DMI. Ørsted var i rummet og fungerede!

Nu har satellitten så fungeret i 5 år. Trods sin høje alder fungerer satellitten stadig godt. Ældningen har reduceret effektiviteten lidt for solpaneler og batterier, der ikke leverer helt så megen strøm som i begyndelsen af missionen. Et af instrumenterne, det såkaldte stjerne-kamera, er noget medtaget af den hårde stråling, satellitten har været udsat for i strålingsbælterne og under soludbrud. Men satellitten passes omhyggeligt, og instrumenterne finjusteres til den bedst mulige funktion og leverer stadig værdifulde data.

### **Ørstedes instrumenter**

Målingerne af retningen og styrken af Jordens magnetfelt udføres med Ørstedes hovedinstrument, et CSC («Compact Spherical Coil») vektor-magnetometer kombineret med et SIM («Star Imager») stjernekompass, som er bygget på Danmarks Tekniske Universitet (DTU) og er satellit-instrumenter af verdensklasse

med præcision og stabilitet, som er uovertruffen. Magnetfeltets styrke måles absolut med et Overhauser (OVH) skalar-magnetometer leveret af CNES.

Den energirige stråling i rummet måles af CPD («Charged Particle Detector») instrumentet bygget på DMI. Det har leveret spændende data om den energirige (gennemtrængende) stråling af elektroner og atomkerner, som satellitten udsættes for bl.a. i den såkaldte Sydatlantiske Anomali, hvor magnetfeltet er særligt svagt, og hvor strålingsbælterne - de såkaldte Van Allen bælter - kommer tættest på Jorden.

Ørsted er desuden udrustet med en TurboRogue GPS præcisionsmodtager leveret fra NASA. Instrumentet anvendes ved GPS-baserede sonderinger af atmosfærens temperatur og indhold af vanddamp og ved målinger af elektronindholdet i den øvre atmosfære.

En særligt fremragende indsats ligger bag konstruktionen af den 8 m lange, sammenfoldelige mast, der holder de magnetiske instrumenter på forsvarlig afstand af mulige forstyrrende magnetfelter fra materialer og strømkanaler i satellittens krop. Satellittens øvrige systemer omfatter bl.a. solpaneler til levering af elektrisk strøm til satellitten, genopladelige batterier til strømforsyning ved banesegmenter i Jordens skygge, telemetrisender og modtager til nedtagning af data og opsendelse af kommandoer, samt to CDH («Control and Data Handling») computere. Forskellige finesser indlagt i styreprogrammet har sikret satellittens genstart under

omstændigheder, der ville have fået almindelige computere til at gå helt i stå.

### **Ørstedes satellittens mange opgaver**

Ørsted er en jordobservationssatellit, som indgår i udforskningen og overvågning af miljø, ressourcer og andre forhold på vor planet. Foruden de mange forskningsmæssige aspekter ved projektet har satellittens observationer mange praktiske og samfundsrelevante anvendelser. De magnetiske målinger skal give forskerne data til forskellige teoretiske undersøgelser af indre og ydre kilder til Jordens magnetfelt, men den præcise kortlægning af magnetfeltet har talrige praktiske anvendelser i forbindelse med forskellige former for navigation. Kompas-navigering er stadig et billigt og pålideligt hjælpemiddel til at finde vej, såfremt man på forhånd kender magnetfeltets retning, dvs. den lokale misvisning. Således anvendes kompas-navigering ved præcis styring af borehovedet ved produktionsboringer i olieførende lag, hvor der ofte skal bores mange parallelle borehuller for at ramme alle mulige olielommer. Også andre sider af de præcise magnetiske målinger har praktiske anvendelser, som spænder fra kortlægning af havstrømme til udnyttelse af viden om jordskorpens magnetiske forhold i geologiske undersøgelser af olie- og mineralforekomster.

### **Hovedfelt modellering**

Ørstedes hovedopgave er at levere data som basis for

præcise magnetfeltmodeller. Første gang skulle være til den nye »International Geomagnetic Reference Field Model« (IGRF), som skulle gælde fra 1. januar år 2000. IGRF modellen opdateres hvert 5'te år og anvendes overalt i verden ved talrige tekniske og praktiske opgaver. Med den stærkt forsinkede opsendelse blev det et hektisk kapløb for at nå at samle tilstrækkelige data til en præcis modellering af Jordens magnetfelt. Men det lykkedes, og koefficienterne i IGRF2000 modellen er hovedsageligt baseret på Ørsteds data. Den gennemsnitlige præcision ved modellen er omkring 10 nT (nanoTesla). Det skal ses i forhold til feltets styrke, som globalt varierer mellem 20.000 og 50.000 nT ved Ørsteds bane.

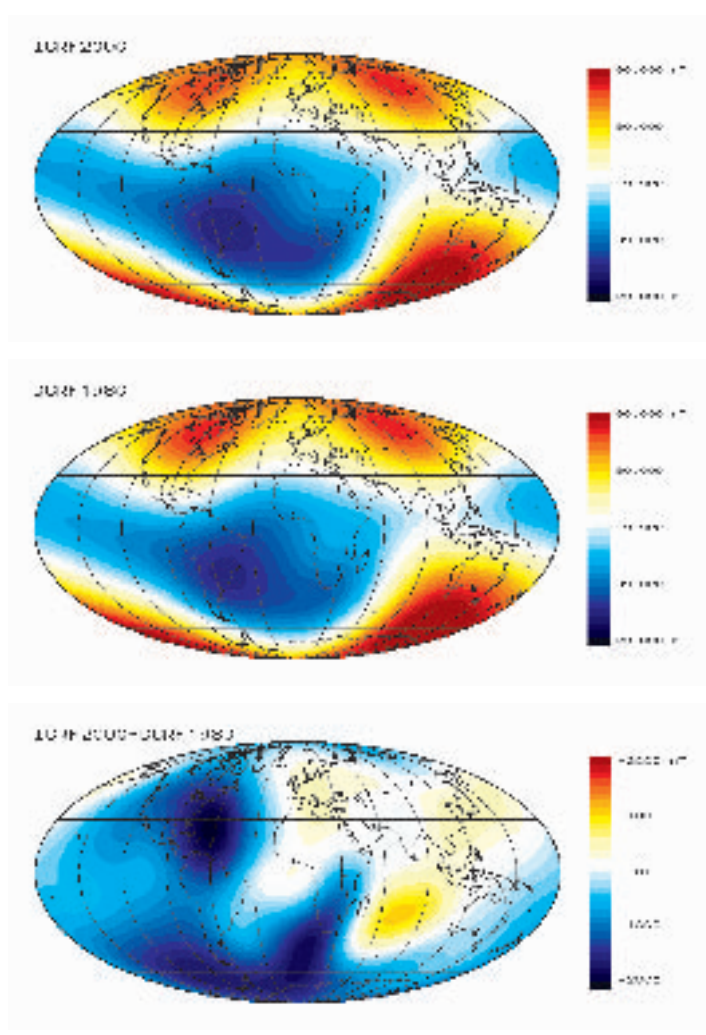
Modellerne for Jordens magnetfelt forfines til stadighed med data fra de seneste målinger. Således er en »Ørsted Initial Field Model« (OIFM) udviklet med en nøjagtighed på ca. 5 nT. Senest er en »Ørsted Secular Variation Model« præcisionsmodel (OSVM) med koefficienter for den tidsmæssige variation (sekularvariationen) af magnetfeltet publiceret. Denne models nøjagtighed er ca. 3 nT. Ved specialbehandling af data har man udført kortlægning af magnetiske anomalier i jordskorpen med lokal præcision på omkring 1 nT.

### Sekularvariationer

På dette grundlag kan man nu give sig i kast med en lang række videnskabelige og praktiske opgaver. En af de vigtigste opgaver er at studere

magnetfeltets ændringer med tiden. Jordens magnetfelt ændres både i retning og i styrke. Ved sammenligning med modelleringen af Jordens magnetfelt baseret på data fra Magsat (1979-80) - den eneste satellit før Ørsted med magnetiske præcisionsmålinger - kan man nu vurdere udviklingen i de 20 års interval mellem de to missioner.

Figur 3 viser magnetfeltmodellerne i henholdsvis år 2000 (Ørsted) og 1980 (Magsat) i en Mollweide projektion. Den globale fordeling af magnetfeltets styrke ved jorden er vist i farvekode på en skala fra 20.000 til 60.000 nT til højre. Man kan bemærke de stærkere felter ved polerne og det specielt svage felt i det Syd-Atlantiske område og over Sydamerika. Forskellen



Figur 3. Øverst: Ørsted-baseret IGRF2000 magnetfeltmodel. Midten: Magsat-baseret DGRF1980 model. Nederst: Magnetfeltets ændring 1980-2000. (grafik: P. Stauning)

mellem de to modeller er vist i nederste figur på en mere følsom skala fra -2.000 til +2.000 nT. Her ser man områder med gul/rød farvekode, hvor magnetfeltet er styrket gennem de 20 år. Men områderne med blå/sort farve, som viser aftagende magnetfelt, er dominerende på global basis. Jordens magnetfelt er i middel aftaget med ca. 2% mellem de to missioner. I nogle områder, bl.a. i Bermuda-trekanten, er svækkelsen på over 6% i løbet af de blot 20 år, der er gået mellem Magsat og Ørsted.

### Modellering af Jordens indre.

#### Polvandring.

Modellerne indeholder en variation i magnetfeltet med afstanden fra Jordens centrum. En model af Jordens indre og

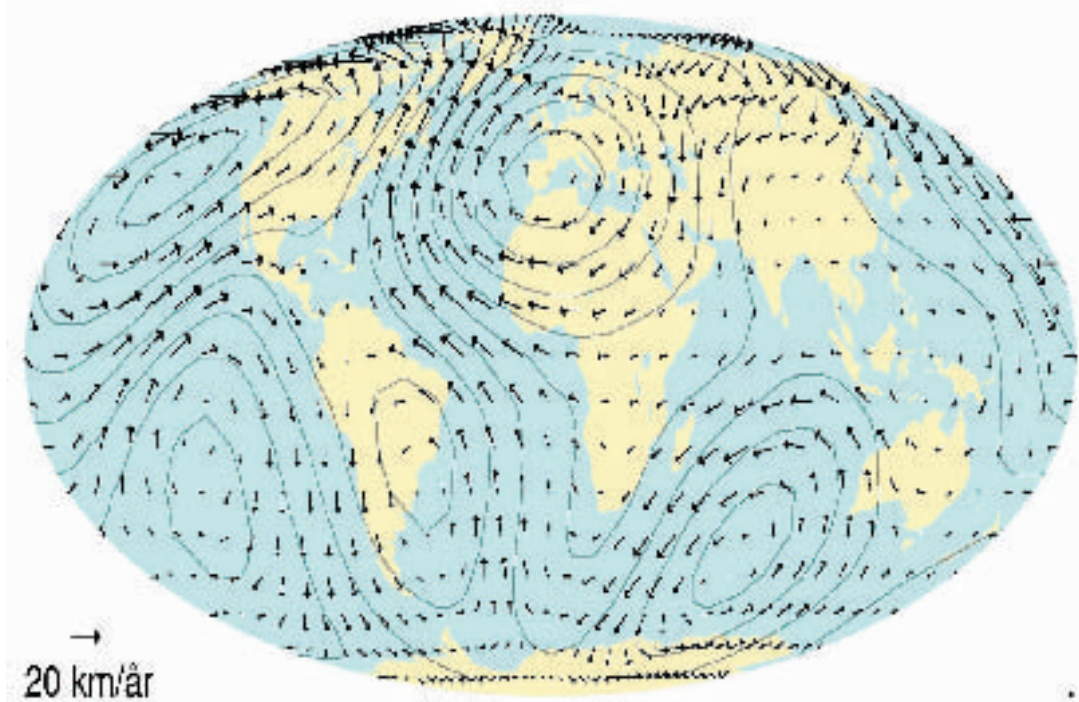
magnetfeltet er vist i figur 4. De første ca. 3000 km i dybden består af sejtflydende smeltede bjergarter (magma), der udgør den såkaldte kappe («Mantle»). Dette medium er dårligt ledende for elektriske strømme. Tillige er temperaturen så høj, at mineralerne mister eventuelle magnetiske egenskaber. Der kommer således ikke noget særligt nyt bidrag til Jordens magnetfelt fra denne region, og man kan derfor anvende modellerne til at ekstrapolere magnetfeltet indad mod den flydende kerne af smeltet metal, især jern og nikkel. Herved kan man få et billede af magnetfeltet ved den såkaldte »Core-Mantle Boundary« (CMB) ved overgangen mellem kappen og den flydende kerne.

Ved at sammenligne Magsat og Ørsted modellerne kan man tillige bestemme ændringerne i de mellemliggende 20 år. Ændringerne kan tilskrives strømninger i materialet, og omsat på denne måde får man et billede af bevægelserne ved CMB som vist i figur 5. Figuren er igen en Mollweide projektion, og selv om kontinenterne er indtegnet til orientering, så viser den et billede i 3000 km's dybde af strømninger, som har hastigheder på op til ca. 40 km/år. Strømningerne danner hvirvler, som man med lidt god vilje kan omsætte til projektionen af roterende cylindre i det flydende kernemateriale.

Disse data har sammen med de seneste teorier for den selvagnetiserende geodynamo givet en helt ny indsigt i forholdene i Jordens indre. Man er begyndt at forstå de processer, der skaber de elektriske strømme i Jordens flydende kerne, som frembringer det variable magnetfelt, vi måler på Jordens overflade og i det omgivende rum. I de nyeste og mest realistiske modeller har man endog været i stand til at frembringe variationer, som svarer til polvendingerne i Jordens magnetfelt, der har foregået med ca. 250.000 års mellemrum i Jordens historie gennem de seneste 70 millioner år tilbage til Kridt-tiden, hvor de store dinosaurer herskede på Jorden. Den seneste polvending foregik for ca. 700.000 år siden, hvor magnetfeltet først tabte styrke og forsvandt for senere at gendannes med modsat retning. I mindre skala er disse dynamiske processer



Figur 4. Model af jorden. Magnetfeltet udgår fra den flydende kerne.



Figur 5. Strømning i jordens flydende kerne ved Core-Mantle overgangen. (grafik: G. Hulot, 2000)

i Jordens kerne ansvarlige for ændringerne i beliggenheden af de magnetiske poler. Denne såkaldte »polvandring« foregår med en hastighed på omkring 30 km/år netop i denne tid. Figur 6 viser beliggenheden af den nordlige magnetpol fra 1980 (baseret på Magsat model) og i år 2000 og frem til 2030 ud fra modeller baseret på Ørsteds målinger.

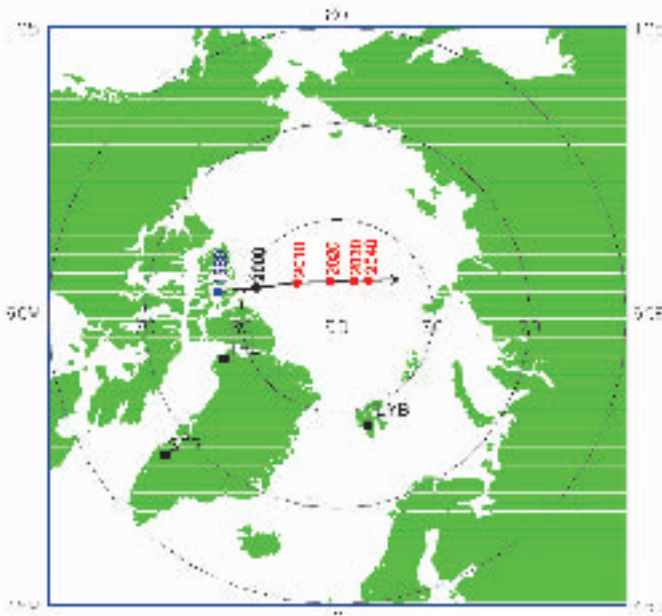
### Magnetiske forhold i jordskorpen

Men Ørsted har også på flere måder bidraget til væsentlige landvindinger ved kortlægningen af magnetiske anomalier i Jordens faste skorpe (»Crust«) på 30-50 km's tykkelse. Den detaljerede magnetiske kortlægning foregår oftest med skibs- eller

flybårne magnetometre. Men da magnetfeltet fra de magnetiske materialer (især jernholdige mineraler som magnetit) i jordskorpen kun udgør nogle få procent af det samlede magnetfelt, er det af afgørende betydning at have en præcis model for feltet fra kilder dybere i Jordens indre. Og det har Ørsted leveret. Men tillige kan de satellit-baserede målinger give et billede af de magnetiske anomalier i en stor skala, som jo skal passe med de detaljerede målinger, når de sammenstykes over store afstande. Figur 7 viser resultatet fra en global kortlægning af de magnetiske forhold i jordskorpen, hvor Ørsteds data har haft en væsentlig rolle. Figuren illustrerer den totale magnetisme i jordskorpen,

dvs. summen af permanent magnetisme i magnetisk »hårde« materialer og den øgede magnetisme i magnetisk »bløde« materialer induceret af det tilstedeværende felt.

I figur 7 viser farvekoden generelt større magnetisme i kontinenterne - specielt i bjergkæderne - end i oceanerne. Det skyldes især den større tykkelse af jordskorpen ned til den grænse, hvor temperaturen overstiger Curie-temperaturen på typisk nogle få hundrede grader, hvor materialer mister deres magnetiske egenskaber og ikke længere kan bidrage væsentligt til magnetiseringen. I ocean-områderne ses tillige en stribet struktur. Den opstår ved overgangen (»brudzonen«) mellem kontinentalplader, som

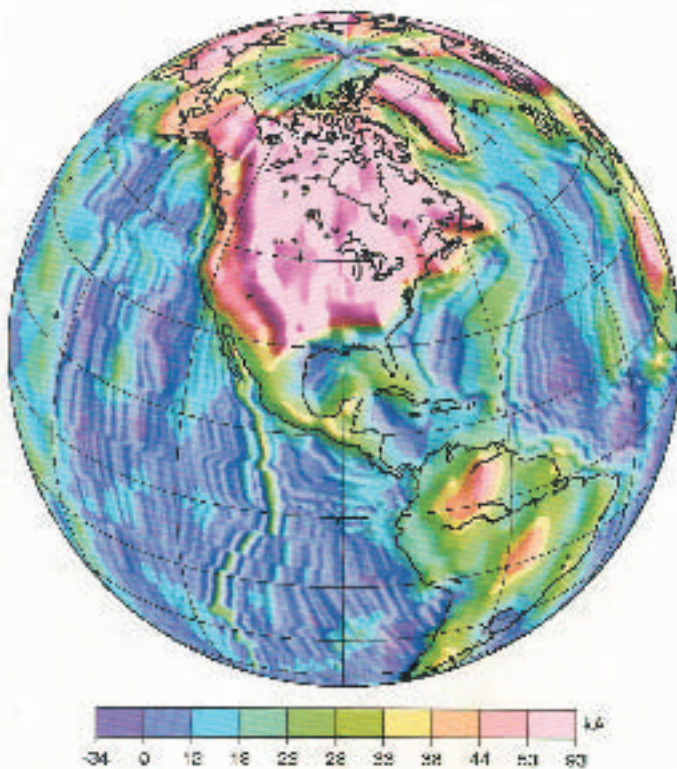


Figur 6. Den nordlige magnetpols vandring over polarområdet. (grafik: P. Stauning)

bevæger sig væk fra hinanden, og hvor frisk magma fra tid til anden flyder op, afkøles og bliver magnetiseret i forhold til det aktuelle magnetfelt. Da Jordens magnetfelt til stadighed ændrer sig og eventuelt skifter polaritet kan disse striber af størknet magma blive magnetiseret i forskellige retninger. I figur 7 er de langstrakte strukturer specielt iøjnefaldende ved brudzonen, der udgår fra Californien, men man kan også se tilsvarende strukturer i Atlanterhavet på begge sider af brudzonen mellem de europæisk/afrikanske og de amerikanske kontinentalplader. Ved undersøgelser af sådanne strukturer kan man kortlægge polvendingerne i Jordens magnetfelt gennem millioner af år. Disse brudzoner er i øvrigt også hjemsted for vulkansk aktivitet og jordskælv.

### Elektriske strømme i rummet

Ørstedes magnetiske målinger anvendes også ved kortlægningen af elektriske strømme i rummet. I Jordens omgivelser findes en række strømsystemer, hvis magnetiske virkninger kan måles fra Ørsted satellitten. Ofte kan disse strømme også detekteres fra Jorden. I perioder med heftig solaktivitet er det sådanne strømme, der giver »magnetisk storm«. Satellitmålingerne anvendes sammen med jord-baserede målinger for at adskille og analysere de forskellige kilder til magnetiske forstyrrelser. De vigtigste strømsystemer i rummet er skitseret i figur 8. Foruden horisontale strømsystemer i ionosfæren i 100-150 km's højde, bl.a. i form



Figur 7. Model af remanent og induceret magnetisme i jordskorpen. (Cover page, *Geophys. Res. Lett.*, 29(15), 2002. Grafik: M. Purucker)

af lokaliserede kraftige strømme («Electrojets»), findes i rummet den såkaldte ringstrøm («Ring Current») i Jordens ækvatorplan i 30-40.000 km's afstand. Der er desuden strømme i grænselaget («Magnetopause Current») mellem solvinden og Jordens magnetfelt, og strømsystemer i magnetosfærens haleregion («Tail Currents, Neutral Sheet Currents») i afstande på op til flere hundrede tusinde km fra Jorden. Disse strømsystemer er indbyrdes forbundet med strømme langs magnetfeltet («Field-Aligned Currents», FAC).

### Første Ørsted publikation: Anvendelse af Ampères lov

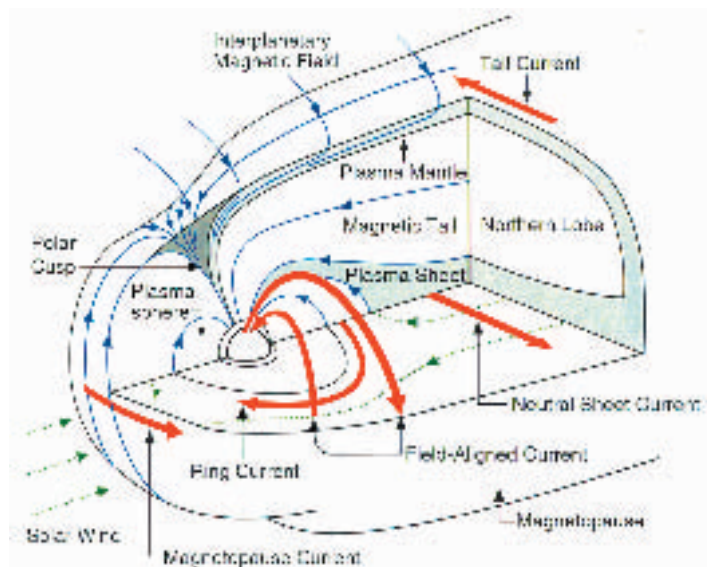
Ørsteds magnetiske målinger har bragt betydelige fremskridt ved kortlægningen af disse strømme og ved analysen af strømmenes afhængighed af solvinden, strømmen af glødende gas fra solen, og andre forhold som

f.eks. solpletal og årstid. Den første videnskabelige publikation baseret på Ørsteds målinger blev netop en artikel om sådanne strømsystemer (Stauning and Primdahl, *Geophys. Res. Lett.*, 15. Oct., 2000). Artiklen behandler de strømme, der induceres ved vekselvirkningen mellem solvinden og Jordens magnetfelt i 50-150.000 km's afstand. Disse strømme ledes fra morgensiden af magnetosfæren langs magnetfeltet ned i den øvre atmosfære (ionosfæren) ved høje nordlige og sydlige bredder. Herfra forløber strømmene hen over polarområderne i højder på 100-200 km og forsvinder op langs magnetfeltet på aftensiden (se figur 8). Når Ørsteds bane er nær middag-midnat sektoren, vil strømmene i ionosfæren forløbe indenfor banen, der ligger i 650-880 km's højde. Ved anvendelse af Ampères integrallov på Ørsteds bane kan strømmen

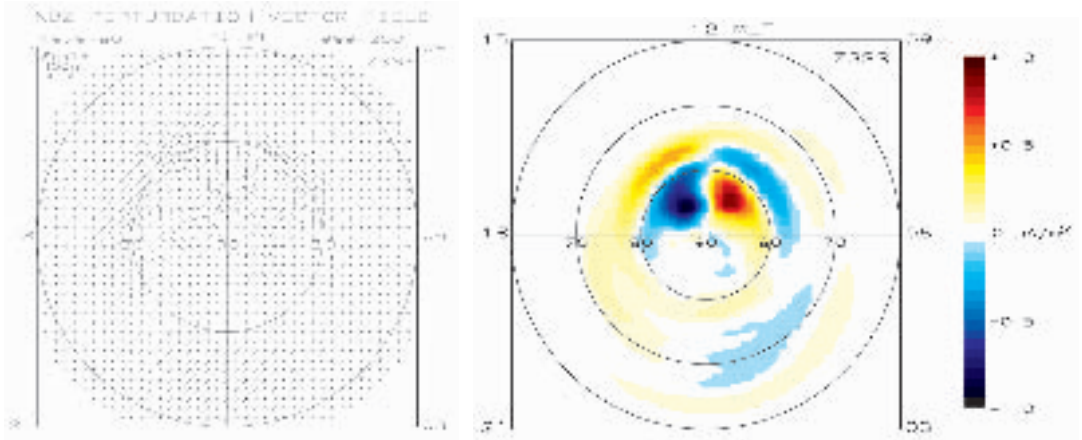
indenfor banen bestemmes. Det viste sig, at strømmen var proportional med det elektriske felt i solvinden, som blev bestemt ved satellitmålinger derude (ACE og IMP). Det viste sig desuden, at strømmene til de nordlige og sydlige polarområder kunne være forskellige og afhæng af den elektriske ledningsevne i den øvre atmosfære. Ledningsevnen i den øvre atmosfære er en funktion af den sæson-afhængige solbelysning (UV-stråling) og af aktivitetsniveauet beskrevet ved solpletallet i solens 11-årige cyclus.

### Kortlægning af feltrettede strømsystemer.

Ørsteds nøjagtige magnetiske målinger gennem den lange driftperiode har gjort det muligt at kortlægge strømsystemerne med en hidtil uset nøjagtighed og detaljeringsgrad. Således er fordelingen og styrken af de feltrettede strømme i polarområdet, og deres afhængighed af solvinden og andre forhold behandlet i talrige publikationer baseret på Ørsteds data. Der er anvendt en række forskellige metoder i disse videnskabelige arbejder. En metode anvender sammensætning af målinger udført under samme omstændigheder. Fra den målte styrke af magnetfeltet trækkes det (i denne sammenhæng) konstante felt bestemt ved den præcise modellering af hovedfeltet. Herved bestemmes de magnetiske afvigelser langs Ørsteds bane. Med målinger fra et stort antal baner kan man nu danne et samlet billede af de magnetiske afvigelser under



Figur 8. Jordens magnetosfære og strømsystemer i rummet. (fra Kivilson and Russell, 1995)



Figur 9. Magnetiske afvigelser og beregnede feltrettede strømme i det nordlige polarområde ved kraftigt og nordrettet magnetfelt i solvinden. (grafik: P. Stauning)

ens forhold. Et eksempel er vist i figur 9.

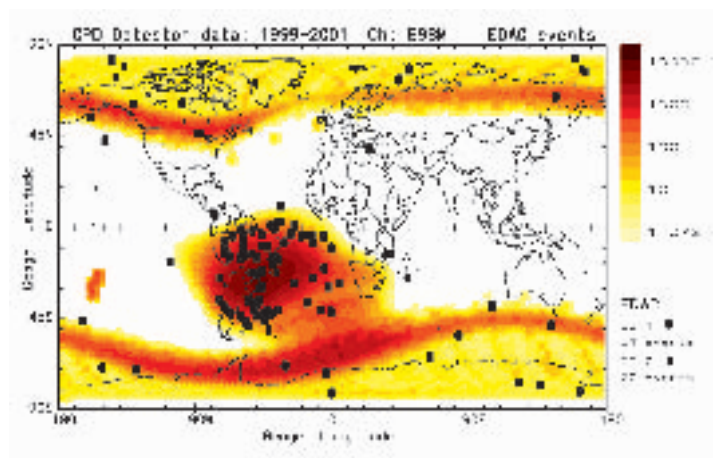
Polardiagrammet til venstre viser det resulterende felt i satellithøjde dannet af de magnetiske afvigelser fra modellen ved stærkt og nordrettet magnetfelt i solvinden. Feltet danner bl.a. to store hvirvler. Dette billede af de magnetiske variationer indebærer, at der i hvirvelområderne er opad- eller nedadrettede strømme afhængige af hvirvlernes om-løbsretning. Styrken af disse feltrettede strømme mellem den øvre atmosfære og rummet er vist i farvekode i diagrammet i højre side af figur 9, hvor den gull/røde signatur betyder opadrettede strømme og blå/sort farve viser nedadrettede strømme. Den samlede strøm i hver af de to »søjler« i den centrale polzone kan være op til nogle millioner ampère.

instrumentet har bidraget til kortlægning af den energirige stråling i rummet. Instrumentet omfatter seks detektoreheder, som hver anvender en silicium-detektor, hvori en indtrængende partikel laver et ioniseret spor. De dannede ioner opsamles og giver en lille elektrisk impuls, der forstærkes, måles og tælles. Herved kan man bestemme partiklernes energi og intensitet. I Ørsteds CPD instrument har

detektorehederne forskellig skærmning og tykkelse, så man kan skelne mellem forskellige typer stråling. Fire detektoreheder »ser« op langs masten, mens de to resterende ser ud til siden. Et eksempel på kortlægningen af strålingen med CPD instrumentets målinger er vist i figur 10. Figuren viser med farvekode den globale fordeling i ca. 760 km's højde af den gennemsnitlige

### Gennemtrængende partikler i strålingsbælterne

Ørsteds målinger med CPD (»Charged Particle Detector«)



Figur 10. Måling af energirig stråling og forekomst af computerfejl (grafik: P. Stauning).

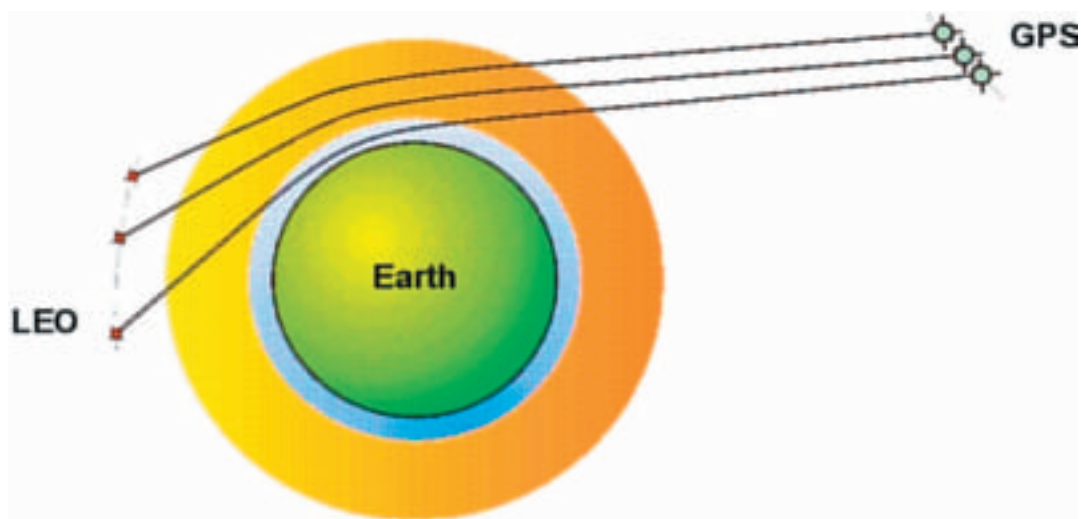
stråling over en to års periode. Strålingen er lejlighedsvis stærk over polarområderne under soludbrud. Ofte forekommer der stærk stråling i nordlyszonerne, der ses som slyngede bånd i både den nordlige og den sydlige halvkugle. Det er magnetfeltet, der styrer strålingen og dermed dens geografiske fordeling. Stærkest er strålingen dog i den såkaldte »Syd-Atlantiske Anomali«, hvor Jordens magnetfelt er særligt svagt (se figur 3). Strålingbælterne holdes på plads af magnetfeltet og kommer her tættere på Jorden og dermed stærkere ind i Ørsteds bane.

Men CPD instrumentet er ikke det eneste system i satellitten, der udsættes for denne stråling. Faktisk er strålingen et problem for andre instrumenter og især for satellittens computere. Strålingen kan trænge gennem de flere mm tykke aluminiumplader, som ellers beskytter elektronikken

ombord, og trænge ind i de integrerede kredse. Det kan f.eks. gå ud over hukommelseskredse, hvor bits kan skifte uventet. Ørsteds memory-system er udstyret med en beskyttelse i form af et EDAC (»Error Detection And Correction«) system, der adderer nogle kontrol-bits til hvert computer-ord. Systemet overvåger alle læsninger og skrivninger i memory og gennemløber desuden alle memory-enheder i en rutinemæssig skanning. I en normal computer vil en memory-fejl få computeren til at gå i stå. Hvis der i et computer-ord i Ørsteds memory kun er een fejlbit kan systemet gendanne den oprindelige værdi. Fejlen registreres, men computeren kører videre. Er der flere fejl i samme computer-ord, går computeren ned, og alle data lagret i memory går tabt.

Diagrammet i figur 10 viser forekomsten af bitfejl korrigeret af EDAC systemet i memory for

de to CDH-computere gennem ca. et år. Det ses, at bitfejl forekommer i polarområdet og nordlyszonerne, men langt det største antal forekommer i den Syd-Atlantiske Anomali, hvor strålingen jo også er særligt stærk. Der er forskel på antallet af »EDAC events« i de to computere med 34 events i CDH1 og 72 events i CDH2. Det skyldes at CDH1 sidder længst inde i satellitkroppen og er beskyttet bl.a. af CDH2. Der er også stor forskel i antallet af EDAC event med satellittens højde. Når banens laveste højde på ca. 650 km forekommer i den Syd-Atlantiske Anomali, så »sniger« Ørsted sig netop under strålingsbæltet, og der forekommer næsten ingen bitfejl. Dette forhold kan have stor indflydelse på valg af bane for andre satellitter. I det hele taget tjener Ørsteds CPD målinger til opbygningen af realistiske modeller for strålingen. Tidligere modeller (amerikanske AP8 og



Figur 11. Princip for GPS occultationsmåling (grafik: Per Høeg)

AE8 modeller for henholdsvis proton- og elektronstrålingen) har vist sig at være næsten en størrelsesorden forkert i dette højdeområde. Realistiske modeller er vigtige redskaber ved konstruktionen af pålidelige satellitsystemer.

### GPS-baserede atmosfæresonderinger

Ørstedes TurboRogue GPS præcisions-modtager kom med i sidste øjeblik, og Ørsted blev den anden satellit (efter GPS-MET eksperimentet opsendt i 1995) udstyret med et instrument beregnet på at udnytte radiosignalerne fra de amerikanske GPS satellitter til sonderinger af atmosfæren. Så også på dette vigtige område er Ørsted blevet en pionersatellit. Princippet i målingen er illustreret i figur 11. GPS-satellitterne befinder sig i baner i mere end 20.000 km's afstand og har en omløbstid på 12 timer. En lavtgående satellit («Low Earth

Orbiting«, LEO) som Ørsted har en omløbstid på ca. 100 min og bevæger sig derfor forholdsvis hurtigt rundt om Jorden. Set fra LEO-satellitten kan en GPS-satellit gå ned under eller stige op over horisonten på kort tid som skitseret i figuren. Radiosignaler fra GPS satellitterne vil bøjes en smule ved brydning i atmosfæren og signalernes fase og amplitude ændres i forhold til udbredelsen ved en tilsvarende strækning i perfekt vacuum. Disse ændringer afhænger af atmosfærens tæthed og især af dens indhold af vanddamp. Med nøjagtigt bestemte satellitbaner kan man beregne ændringernes størrelse og dermed udlede atmosfærens samlede indflydelse langs signalvejen.

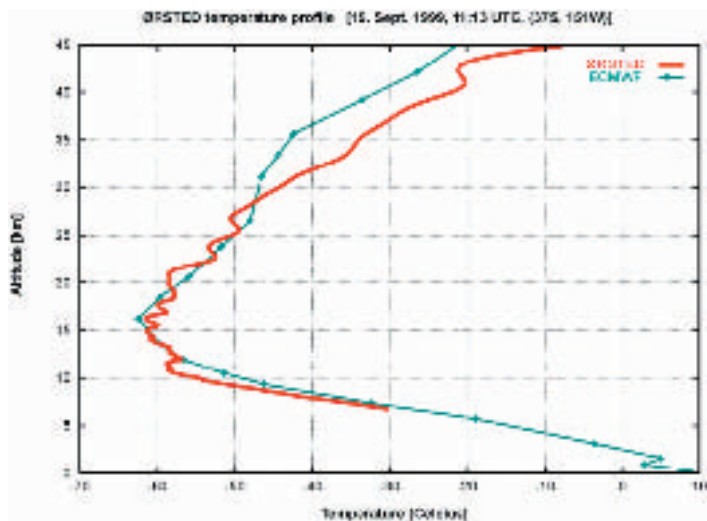
Med passende antagelser kan målingerne omsættes til en lodret temperaturprofil i det centrale område, hvor strålen kommer tættest på Jorden. Et eksempel herpå er vist i figur 12. Den røde

bestemt ved Ørstedes GPS målinger mens den blå kurve viser temperaturprofilen i samme geografiske område og til samme tid beregnet ved ECMWF vejrcentret. Centrets temperaturdata er især baseret på målinger med radiosondeballoner.

Observationer baseret på anvendelse af GPS/Galileo radiosignaler ventes at blive et meget vigtigt værktøj for atmosfæremålinger og kan få stor betydning for meteorologi og klimaundersøgelser. Foruden resultaterne fra Ørstedes GPS sonderinger, der er beskrevet i flere publikationer, har erfaringerne fra Ørstedprojektet ført til adskillige perspektivrige initiativer. Således er der ved DMI dannet en kompetent gruppe vedrørende anvendelse af radiosignalerne fra de eksisterende amerikanske GPS-satellitter, og til sin tid også de europæiske Galileo-satellitter, til sondering af atmosfærens temperaturprofil og sammensætning. Gruppen leder et EU-støttet »Satellite Application Facility« (SAF) projekt for behandling og validering af GPS målinger fra fremtidige EUMETSAT satellitter.

### Ørsted som forbillede for nationalt og internationalt samarbejde

Ørstedesatellitten er en betydelig teknisk bedrift - satellitten blev kåret af Ingeniørforeningen til en ærefuld 4. plads i konkurrencen om »Det 20. århundredes største danske ingeniørbedrift« (efter Valdemar Paulsens radiosender, Storebæltsforbindelsen og den



Figur 12. Atmosfæreprofiler bestemt ved Ørstedes occultationsmålinger og ved ECMWF. (grafik: Stig Syndergaard)

Transiranske jernbane) - og dens forskningsmæssige resultater er enestående. Men satellitprojektet kan også fremhæves som en organisatorisk bedrift. Det er på enestående vis lykkedes at få universiteter og andre offentlige institutioner og en række private virksomheder til at arbejde tæt sammen på et stort fælles projekt. Det nationale samarbejde har omfattet tre universiteter (Danmarks Tekniske Universitet, Københavns Universitet, Aalborg Universitet), en Ingeniørhøjskole (Københavns Teknikum), og otte private industrivirksomheder (Terma A/S, CRI, Copenhagen Optical Company Aps, DCC International, Innovision, Per Udsen Co, Rescom og Ticra) foruden to offentlige institutioner (Dansk Rumforskningsinstitut og Danmarks Meteorologiske Institut). Det internationale samarbejde har omfattet de store rumforskningsorganisationer NASA, ESA, CNES og DLR samt mere end 40 universiteter og

forskningsinstitutioner verden over.

Foruden sin egen indsats i Ørstedes instrumentering og forskningsopgaver samt varetagelse af datanedtagning, videnskabeligt datacenter og det internationale samarbejde har DMI gennem den videnskabelige ledelse af projektet haft en væsentlig andel i det forbilledlige samarbejde mellem offentlig og privat virksomhed i Danmark. Dette samarbejde er nok en af de væsentlige grunde til Ørstedprojektets succes. Samarbejdet har tillige sikret, at de mange erfaringer, der er indhøstet i Ørstedprojektet, er kommet til nytte ved såvel de teknisk-naturvidenskabelige uddannelser som for den teknologiske udvikling i industrien. Denne indsats tjener DMI til stor ære og Ørstedprojektet vil bestå som en milepæl i instituttets historie.

Ørstedprojektet har givet Danmark stor anerkendelse i den

internationale forskningsverden. Mere end hundrede forskere verden over har arbejdet med de fremragende data fra Ørstedesatellitten. Over 200 videnskabelige publikationer og proceedings-artikler baseret på Ørsted-data er indtil nu udgivet eller er under udgivelse i internationale tidsskrifter og mange flere vil følge.

### Kilder

En DVD video om Ørstedprojektet: »Den lille seje« (50 min) kan købes ved henvendelse til STV A/S, Kratholmvej 36, 5260 Odense. E-mail: Charlotte Høgh <charlotte@stv.dk> Yderligere materiale og beskrivelser af Ørstedesatellitens mange resultater samt udførlige lister over publikationer og konferencepræsentationer baseret på Ørsted kan findes i rapporten: P. Stauning: Ørstedes resultater. 5 år i Rummet. DMI rapport #04-12, 2004. Publikationen findes på [www.dmi.dk](http://www.dmi.dk).

## Meddelelse fra kassereren

Vores aftale med Post Danmark er ophørt, og det betyder to ting.

1. Flytninger og adresseændringer ikke længere automatisk meddelt til mig af Post Danmark. Det er derfor nødvendigt at meddele flytninger og adresseændringer direkte til kassereren, hvis Vejret stadig med usvigelig sikkerhed skal dumpe ind af brevsprækken fire gange om året.

2. Ophøret af aftalen med Post Danmark betyder, at det bliver dyrere for foreningen at udsende Vejret til medlemmerne. Kassereren vil gerne sende en opfordring til de udenlandske medlemmer, om at betale deres kontingent via en bankoverførsel i stedet for at sende en check. Det koster så mange penge at få disse checks indløst, at det er tæt på, at det ikke er rentabelt at indløse dem.

I forbindelse med udsendelsen af det fjerde nummer af Vejret i 2004 vil der blive vedlagt en seddel, der angiver de enkelte koder, der er nødvendige for en bankoverførsel fra en udenlandsk bank. Denne vil også stå i starten af Vejret.

*Brian Broe*