

Magnetisk datering

Af lektor, lic.scient. Niels Abrahamsen,
Geologisk Institut, Aarhus Universitet

Bestemmelse af Jordens magnetfelt, registreret i sedimenter og hårde bjergarter, rummer store informationsmuligheder, bl.a. i forbindelse med datering, Jordklodens udvikling og i fremtidens miljøkortlægning.

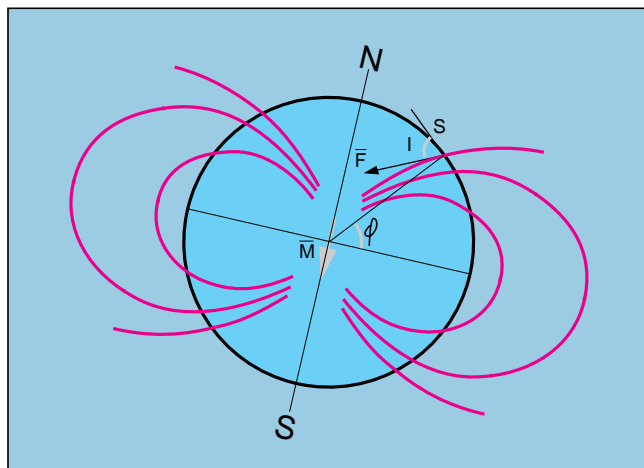
Jorden omgiver sig med et magnetisk felt. Vi kan jo ganske vist ikke se det eller sansse det med vore almindelige sanser, men ved hjælp af fintfølede moderne magnetisk måleudstyr, såkaldte magnetometre, kan vi detaljeret kortlægge feltet ved Jordens overflade, både med hensyn til retning og intensitet.

Når der ikke er lokale magnetiske forstyrrelser til stede, har magnetfeltet en forholdsvis enkel struktur: Det kan sammenlignes med feltet fra en (meget kraftig) stangmagnet, en såkaldt *dipol*, der tænkes placeret i Jordens centrum, og som har dipol-aksen nedadrettet og parallel med Jordens rotationsakse. Feltet udenfor en homogen kugle er også et dipol-felt. Til at beskrive feltet på et sted på Jorden bruger man normalt de to vinkler D og I samt feltstyrken F (*deklinationen* D er vinklen fra geografisk til magnetisk nord; *inklinationen* I er feltets vinkel med horisontalplanet). (jf. figur 1).

Opdagelsen af sekularvariationen

Kendskab til kompasset har man haft i Europa siden slutningen af 1100-tallet, så siden da har man kunnet måle den magnetiske nordretning. Med de store opdagelsesrejser i 15-1600-årene erfarede man desuden, at kompasset ikke altid pegede mod geografisk nord, og det blev derfor interessant at kortlægge den *magnetiske misvisning* (også kaldet *deklinationen*) detaljeret, så kompasset kunne bruges til støtte ved navigationen.

Gradvist opdagede man også, at misvisningen, foruden at være forskellig fra sted til sted, heller ikke var konstant i tiden. Det vil sige, at feltet foruden en rumlig variation også viser en tidslig variation, den såkaldte magnetiske *sekularvariation*. Også inklinationen viser sig at variere med både tid og sted.



Figur 1. Jordmagnetfeltet ligner med rimelig tilnærmelse et dipolfelt, somom der er en kraftig stangmagnet med momentet M i Jordens centrum. Ved måling af magnetfeltet i et punkt S ved jordoverfladen kan vi deducere os til en del oplysninger om magnetfeltets udseende inde i Jordens kappe. (Grafik: SL)

Vort direkte målte kendskab til Jordens magnetfelt strækker sig kun ca. 400 år tilbage, og er endda begrænset til ret få lokaliteter i Europa. For store dele af Jorden har man først fået udført detaljerede opmålinger ind i vort århundrede. Man kan ganske vist nu måle nutidens jordmagnetfelt langt ud i rummet vha. rumsonder, men at måle feltet i fortiden, dvs. *tilbage* i tiden kan ikke lade sig gøre på denne måde. Der må nogle helt andre metoder til, de palæomagnetiske, som det beskrives i det følgende.



Minispin er et relativt billigt, men fintfølede apparat, som benyttes til måling af magnetisme i borekerner. (Foto: Molspin Ltd.)

Stoffers magnetiske egenskaber

Alle materialer har nogle magnetiske egenskaber, men det er de færreste der af sig selv kan fungere som selvstændige magneter. Visse materialer har dog denne egenskab, at de kan blive permanent magnetiske. Det gælder de såkaldte *ferromagnetiske* materialer, som magnetit (Fe_3O_4),

hæmatit (Fe_2O_3) og f.eks. rent jern og nikkel, samt de jern-, krom- og nikkel-oxider man benytter til coating på bl.a. kassettebånd og disketter til PC-ere.

Når et kassettebånd glider hen forbi tonehovedet på en båndoptager under indspilning af en strygekvartet af Haydn, påvirkes den ferromagnetiske belægning af det varierende magnetfelt fra tonehovedet. Når båndet senere afspilles, kan de vekselende magnetiseringer på båndet genfremkalde de tidligere svingninger i tonehovedet, og vi kan efter en passende omformning gennem forstærker og højttalere høre musikken igen. Den magnetiske belægning på båndet har altså ved indspilningen fået en magnetisk hukommelse, den kan "huske" hvilke variationer i magnetfeltet den tidligere har været udsat for.

Magnetisk hukommelse i bjergarter

Nøjagtigt det samme sker i naturlige bjergarter, når de dannes under påvirkning af det lokale jordmagnetfelt. Det gælder både for sedimenter der aflejres, for metamorfe bjergarter der omkrystalliseres, og for en vulkansk bjergart der krystalliserer og afkøles.

Hvis en krystal af et ellers ferromagnetisk materiale er meget lille (for magnetits vedkommende mindre end ca. $0.1 \mu m$), kan den ikke bevare en stabil magnetisering ret længe på grund af den termiske energi; den betegnes da som superparamagnetisk. Hvis en sådan krystal vokser pga. kemisk udfældning, vil den passere en karakteristisk størrelse, over hvilken magnetiseringen bliver stabil over længere tidsrum; der dannes et såkaldt magnetisk domæne, hvilket

betyder, at krystallen er spontant og homogent magnetiseret. Den fungerer nu som en lille og meget stabil magnetisk dipol, og materialet har fået dannet en såkaldt kemisk remanent magnetisering, en CRM. Hvis krystallen vokser yderligere, vil den opdele sig i flere domæner med modsat magnetisering, da den samlede magnetiske energi derved bliver minimeret; den samlede magnetisering udefra set er nu svagere og magnetiseringen mindre stabil.

Et sediment registrerer retningen og intensiteten af det lokale jordmagnetfelt, ved at de ferromagnetiske partikler under aflejringen tvinges af jordmagnetfeltet til at orientere sin egen magnetiske akse parallelt med Jordens; ved den senere kompaktering og diagenese låses partiklernes orientering fast, og der bliver herved dannet en sedimentær eller detrital remanent magnetisering, en såkaldt DRM.

Curie-temperaturen

I en magmatisk bjergart sker magnetiseringen på en anden måde, nemlig ved at de udkrystalliserede jernoxyder køles ned forbi den såkaldte Curie-temperatur. Det er den temperatur under hvilken krystallen bliver magnetisk blokeret og den derfor bliver stabilt magnetiseret (dvs. krystallen danner magnetiske domæner). Ved nedkølingen i jordmagnetfeltet dannes derved en termo-remanent magnetisering, en såkaldt TRM. For ren magnetit og hæmatit sker denne blokering ved og tæt under hhv. 580°C og 680°C.

Måling af magnetisk hukommelse

Til beskrivelse af de magnetiske egenskaber i en bjergart (og alle andre materialer) benytter man bl.a. dels susceptibiliteten, og dels remanensen.

Den *magnetiske susceptibilitet* er en materialeegenskab, der udtrykker hvor kraftigt et givent materiale kan blive magnetiseret under påvirkning af et ydre magnetfelt; man kan sige, at susceptibiliteten er en analogi til vægtfylden, der jo kan siges at angive hvor tungt et materiale bliver under påvirkning af tyngdekraften.

Den *magnetiske remanens* derimod angiver, hvor kraftigt og i hvilken retning materialet er blevet magnetiseret; remanensen er altså ikke kun en materialeegenskab, men er også en funktion af hvordan materialet har været behandlet i fortiden, dvs. der er tale om en magnetisk hukommelse.

Den *remanente magnetisering* er en vektoriel størrelse, og derfor kan den ikke måles direkte på en tilfældig flade. Det er nødvendigt at indsamle orienterede prøver af materialet (f.eks. som håndprøver eller som små borekerner), dernæst at udforme prøver med en veldefineret geometri (normalt benyttes en standardcylinder på 1 tomme), og endelig i et specielt magnetometer at måle denne veldefinerede prøves magnetiske moment.



Hvis brændte teglsten står i deres mile, som de gjorde under brændingen, er det muligt at regne sig frem til deres alder. (foto: Steen Laursen)

Magnetisk sekularvariation

Det viser sig, at jordmagnetfeltet kun som et gennemsnit over mange tusind år har været aksial-symmetrisk og sammenfaldende med feltet fra en dipol placeret i centrum og parallelt med Jordens rotationsakse. Ser vi derimod på kortere tidsintervaller, varierer både deklination og inklinationsvinkel med tiden. De tidlige variationer i denne sekularvariation rummer forskellige perioder fra nogle få hundrede op til nogle få tusind år. Inklinationen svinger typisk $\pm 10^\circ$, mens deklinationen på vore breddegrader typisk varierer $\pm 20^\circ$ i løbet af nogle hundrede år (figur 2).



(Foto: NASA)

I de polare områder, hvor vi er tæt ved den magnetiske pol, kan deklinationen sågar dreje hele kompasset rundt. I Nordgrønland er misvisningen i disse årtier stærkt vestlig, og for steder beliggende mellem den geografiske og magnetiske pol peger kompasset mere eller mindre imod syd!

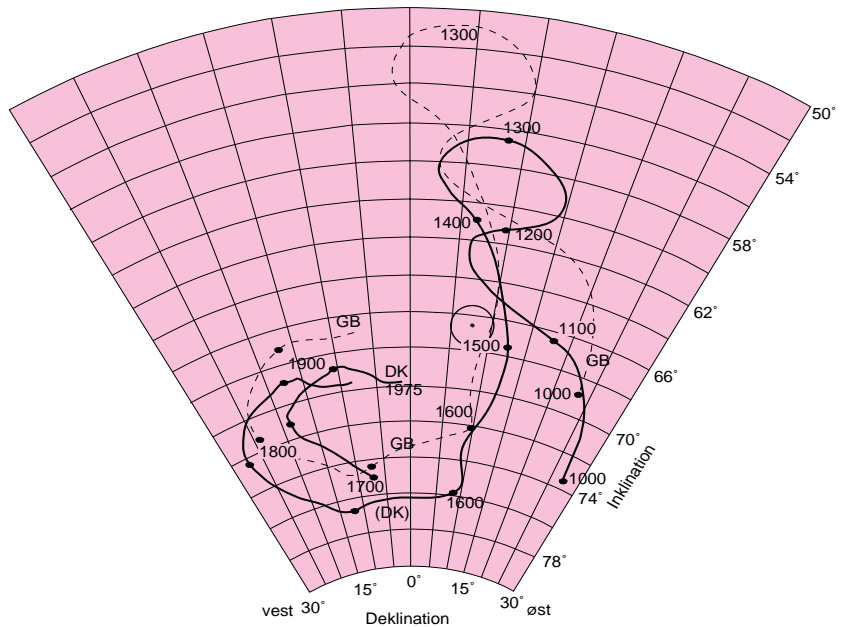
Ved de egentlig palæomagnetiske undersøgelser, ved hjælp af hvilke man bl.a. kan lave palæogeografiske rekonstruktioner af lithosfærepladernes flytning og relative placering langt tilbage i tiden (kontinentaldrift), er sekularvariationen en uønsket fejlkilde, som søges fjernet ved at man danner gennemsnitsretninger målt på mange bjergartsprøver, der dækker et langt dannelsesstidsrum, 100.000 år eller længere. Omvendt kan sekularvariationen udnyttes til mere lokal korrelation og datering f.eks. af unge aflejringer, der er dannet inden for de sidste få tusind år. Dette forudsætter, at man kender sekularvariationen for det aktuelle tidsrum og for et givet regionalt område, idet variationen er forskellig fra region til region.

Sekularvariationen kan derfor også bruges til *arkæomagnetisk datering* af arkæologiske materialer som brændte teglsten, ovne, jernalderslagge m.m., hvor materialet har ligget uforstyrret *in situ* siden brændingen, når vi kender den magnetiske masterkurve for området godt nok (figur 3).

Pamhule Skov - et eksempel

Under Fortidsmindeforvaltningens udgravning i 1978 af teglbrænderiet i Pamhule Skov, 6 km VSV for Haderslev, stødte man på et stort antal munkesten og tagtegl. Med henblik på at forsøge en palæomagnetisk datering af denne åbenbart ret betydelige teglbrændingsaktivitet, blev der under udgravningen udtaget i alt 19 velbevarede teglsten. Stenene var fra teglgulvet i en ellers velbevaret teglovn. Inden stenene blev fjernet fra deres placering i gulvet blev deres orientering omhyggeligt bestemt. Usikkerheden i nordretningen blev ved en række kontrolmålinger bestemt med en usikkerhed på under $\pm 1^\circ$. I laboratoriet blev der af hver sten udboret kerneprøver

og den naturlige remanente magnetisering (NRM) blev målt. Derefter blev prøverne let afmagnetiseret for at fjerne en eventuel yngre viskos magnetisering induceret af det nuværende jordmagnetfelt, hvilket viste sig at udgøre mellem 5 og 15 procent af feltet i prøverne. Magnetiseringsretningen blev dog ikke ændret herved, hvilket betød at den var stabil, og udfra statistiske data kunne retningen bestemmes som veldefineret. Middelretningen fra målingerne er samtidig signifikant forskellig fra det nutidige jordmagnetfelts retning på stedet. Det er værd at bemærke, at alle de magnetisk målte sten fra ovngulvet var lagt på deres store flade, mens de fleste af dem ved deres oprindelige brænding må antages at have stået på den smalle langside. Da de målte retninger har lille spredning omkring middelinklinationen, må det betyde, at alle stenene efter nedlægningen i ovngulvet er blevet effektivt remagnetiseret i forbindelse med brænding af andre sten i selve ovnen. Temperaturen i ovngulvet har derfor været mindst 6-700°C, idet magnetit og hæmatit, der tilsammen bestemmer stenes magnetiske egenskaber har Curie-temperaturer på hhv. ca. 580°C og 680°C. En øvre grænse for temperaturen ved gulvet kan (groft) estimeres ved at bemærke, at ingen af stenene var sintrede i overfladen, hvilket formentlig begrænser den maksimale temperatur til ca. 1100°C. Dette skøn vil dog være afhængigt af det lokale lers egenskaber, som har været udgangsmaterialet for stenene, og kan efterprøves ved brændingsforsøg. Ved sammenligning af den stabile magnetiske middelretning for ovngulvet ($D = 7,5^\circ$ og $I = 66,4^\circ$) med standardkurven for sekularvariation gennem middelalderen i Danmark (Fig. 3), kan



Figur 3. Eksempel på arkæomagnetisk datering af en middelalder-teglovn fra Sønderjylland (Pamhule Skov). Den magnetiske sekularvariation i Danmark efter år 1000 (fed kurve) er baseret på en omregning af en engelsk kurve, der igen er bestemt udfra magnetiske målinger på daterede arkæologiske fund (tynd streg). Magnetiseringsretningen for tegloven i Pamhule Skov er vist som en prik (med usikkerhedscirkel for 95% signifikans), og svarer til en magnetisk alder på ca. 1480±20 år (Abrahamson 1979). (Grafik: JS)

det konkluderes med 95 procent sandsynlighed at den sidste effektive opvarmning af stenene i ovngulvet har fundet sted omkring år 1480 ± 20 år. Hertil må dog yderligere regnes med en vis usikkerhed i standardkurven på måske ± 1°, svarende til ± 15 år.

Uforudsigelig variation i magnetfeltet

Har man indsamlet relevant geologisk materiale og udført relevante magnetiske laboratorieforsøg forskriftsmæssigt, og hvis materialet i øvrigt er egnet, dvs. stabilt magnetiseret og uforstyrret siden dannelsen, kan man som tidligere omtalt bruge resultaterne til at beskrive, hvordan jordmagnetfeltet har varieret på indsamlingsstedet tilbage i tiden. På denne måde har man gennem den sidste generation samlet en hel del information om jordmagnetfeltets variation i tid og rum. Det har vist sig, at feltet virkelig varierer, og det endda på ganske uforudsigelig måde - desværre og heldigvis!

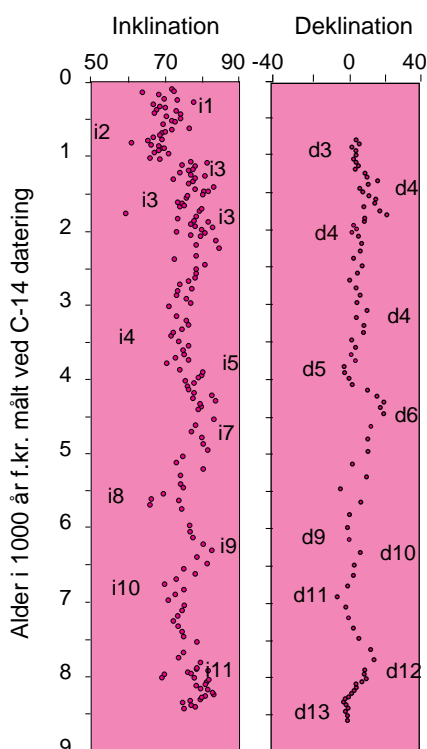
Desværre: fordi magnetfeltets store variabilitet kræver, at kortlægningen i rum og fortid udføres overalt og til alle tider; og det er naturligvis ret uoverkommeligt i praksis. Heldigvis: fordi feltets store variabilitet, når det først er tilpas kendt, kan

benyttes til mange interessante formål, på samme måde som man kan afspille mange forskellige koncerter, når de først er indspillet på forskellige kassettebånd.

Magnetiske perspektiver

Belysningen af de magnetiske og palæomagnetiske metoders mangfoldige anvendelsesmuligheder indenfor områderne geologi, geofysik, miljø, arkæologi og biologi ville kunne illustreres med en række eksempler, langt ud over den til-målte spaltepåds. F.eks. kan magnetiske data bidrage til at afklare spørgsmål omkring magnetfeltets dannelse og dynamomekanismen i Jordens kerne, pladetektoniske rekonstruktioner, palæogeografi og polaritetsskalaens datering af oceanområder, sedimenters kompaktion og diagenese, problemer omkring kulbrintedannelse og migration, C-14-variationer og korrektioner af C-14-dateringer, metamorfose, K-Ar-dateringer og afkølingstidspunkt for bjergarter, samt lokaltektoniske problemer, der involverer blokrotationer. Hvis der er tale om drejning omkring en vertikal akse, som vanskeligt kan erkendes geologisk, er palæomagnetismen måske det eneste kvantitative redskab vi har hertil.

De magnetiske metoder, der har haft stor betydning i forbindelse med vores forståelse af Jordens udviklingshistorie, må også i de kommende år forventes at vise spændende nye facetter, bl.a. i relation til miljøkortlægning og -beskyttelse, samt i forbindelse med det voksende forskningsområde omkring biomagnetisme. ■



Figur 2. Magnetisk sekularvariation målt på orienterede sedimentprøver fra bundkerner fra Skanderborg Sø. Tidsskalaen i den daterede sedimentkerne, der er ca. 5 m mægtig, strækker sig ca. 8000 år tilbage for nutiden (Grafik: AN og SL efter Readman & Abrahamson, 1988).