

Jordens indre varme

af P.V.Sharma

Den varme vi mærker ved Jordens overflade kommer hovedsagelig fra Solen. Imidlertid bliver solvarmen for det meste kastet tilbage i rummet, og kun en meget lille brøkdel er i stand til at trænge mere end en snes meter ned. Således er dens indflydelse på Jordens indre minimal i sammenligning med den varme, der kommer inde fra Jorden.

Hovedvarmekilden i Jorden antages i øjeblikket at være de radioaktive nedbrydningsprocesser, men andre kilder som for eksempel den oprindelige temperatur og varmen opsamlet ved materialesammenpresning kan have været betydningsfuld tidligt i Jordens historie.

Varme omdannes gradvis og undertiden dramatisk på vejen fra Jordens indre ud til overfladen. De mest slående eksempler er vulkaner og varme kilder. Under undvigelsen fra Jordens indre påvirker den termiske energi, direkte eller indirekte, processer knyttet til vulkanisme, foldninger og forskydninger samt omkrystallisation af jordskorpen bjergarter.

Studiet af Jordens varmeregnskab er en af geofysikens mest filosofisk prægede grene. Ikke desto mindre er emnet vigtigt, fordi studierne kan skaffe interessante oplysninger om Jordens oprindelse og udvikling.

Lad os begynde med at undersøge hvor varmt Jordens indre er!

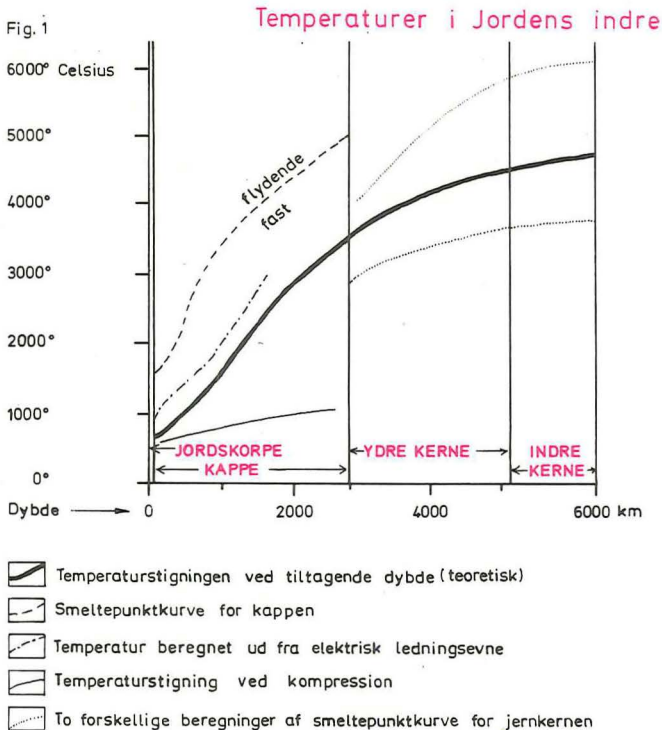
MÅLING AF JORDENS TEMPERATUR

Den simpleste metode til at studere Jordens temperatur er at bore et hul og bruge et følsomt termometer. Det er ikke altid nødvendigt at bore bare med det formål. Allerede eksisterende minegange, tunneler og oliekluder kan udmærket benyttes. Sådanne målinger viser, at Jordens temperatur på et hvilket som helst sted tiltager med dybden, idet den gennemsnitlige temperaturstigning, som kaldes den geotermiske gradient, er omkring 3° Celcius per 100 m dybde i ikke-vulkanske områder.

Et borehul er højst nogle få kilometer dybt. Hvordan kan vi beregne Jordens temperatur ud over den begrænsede dybde? Temperaturen i jordskorpen kan belyses af varmeafgivelsen fra jordoverfladen. Hvis vi antager, at den termiske gradient (3° Celcius per 100 m) er konstant lige til bunden af skorpen i godt 33 km dybde, vil temperaturen der være omkring 1000° C. Imidlertid må den termiske gradient i en hvilket som helst given dybde i jordskorpen være mindre end overflademålet, idet forskellen skyldes den radioaktive varme, der frembringes oven over den dybde. Under hensyntagen hertil er temperaturen ved bunden af kontinentsskorpen anslået til $600 - 800^{\circ}$ C. I oceanerne må temperaturen ved bunden af skorpen være omkring $150 - 200^{\circ}$ C - da jordskorpen her kun er omkring 5 km tyk.

TEMPERATUREN I KAPPEN OG KERNEN

Hvad nu med temperaturen under jordskorpen - det vil sige i kappen og kernen? Her må vi tage tilflugt til indirekte metoder. Slutninger om temperaturforholdene på større dybder er baseret på målte hastigheder af jordskælvsbølger og variationer i elektrisk ledningsevne, men her opereres med flere postulerede fysiske egenskaber ved høje temperaturer og tryk hos kappematerialet, som tænkes at svare til en sort vulkansk bjergart, som kaldes peridotit. Alligevel kan disse faktorer angive de øvre og nedre grænser for temperaturberegningerne.



Jordskælvsdata antyder, at kappen overvejende er krystalliseret og dermed fast, samt at den ydre jernkerne er flydende. Temperaturen i kappen er derfor under kappens smeltepunktskurve. Med hensyn til den ydre kerne vil beregninger for jerns smeltepunkt ved det store tryk, der er i kernen, give en minimumstemperatur. På samme måde vil jerns smeltepunkt give maksimumstemperatur for den faste indre kerne.

Beregninger af Jordens temperatur opnået ved forskellige metoder vises i figur 1. Til trods for de usikkerhedsmomenter der er i de forskel-

lige beregninger kan dybde/temperaturkurven give et generelt billede af temperaturfordelingen i Jorden.

MÅLINGER AF JORDENS VARMETAB

Efter at have studeret Jordens indre temperatur går vi nu over til at inspicere dens varmembudget. Den varmemængde der strømmer fra Jordens indre ud til overfladen og forsvinder ud i rummet er et direkte varmetab, og det er med andre ord udgiften på Jordens varmembudget.

En bestemmelse af varmetabet kræver to separate målinger: temperaturgradienten (r) og varmeledningsevnen (K) i de bjergarter, hvori temperaturerne måles. Varmetabet over en enhed af overfladeareal beregnes så ved formlen $Q = K \times r$.

På landjorden startede målingerne af varmeafgivelsen i 1930'erne, og indtil for nylig er nogle få hundrede målinger publiceret. Skønt målinger på oceanbunden først startede i 1952 med Bullard's og andres pionerarbejde, er der nu et større antal data fra oceanbunden end fra landjorden. Det skyldes den kendsgerning, at målinger på oceanbunden er langt simplere end på landjorden.

En generel sammenhæng mellem varmetab og bjergarter samt geologiske strukturer fremgår klart af tabel 1. I den for både kontinenter og oceaner kan områder med større varmeafgivelse afgrænses. På kontinenterne har de Prækambriske skjolde et ringe varmetab. Områder med ung vulkanisme eller som i nyere geologisk tid har deltaget i bjergkædefoldninger viser en større varmeafgivelse - jo yngre begivenhederne er, jo større er varmetabet. I havene er oceanryggene områder med høj, men varierende varmeafgivelse. Den egentlige havbund karakteriseres af et moderat og ensartet varmetab, og dybgravene afgiver ikke meget varme.

TABEL 1. JORDENS VARMEAFGIVELSE I CALORIER: 1000^2 PER CM^2 SEKUND

KONTINENTER	
Prækambriske skjoldområder	0.92
Post-Prækambriske ufoldede områder	1.54
Post-Prækambriske bjergkæder	1.48
Vulkanske områder i Tertiær- og Kvartærtid	2.16
Gennemsnit for alle kontinentområder	1.43
OCEANER	
Bassiner	1.28
Oceanrygge	1.82
Dybgrave	0.99
Øvrige oceanområder (shelf etc.)	1.71
Gennemsnit for hele oceanbunden	1.60
Gennemsnit for hele Jorden	1.58

HVAD FORTÆLLER MÅLINGERNE OM JORDENS VARMEBUDGET?

Det vigtigste og mest uventede resultat af målingerne (tabel 1) er, at det gennemsnitlige varmetab er næsten ens for kontinenter og oceaner. Det blev en stor gåde for geofysikerne.

Før målingerne blev foretaget mente man, at oceanerne med deres tynde skorpe (cirka 5 km) bestående af den vulkanske bjergart basalt med en lav koncentration af radioaktive stoffer måtte have en meget lavere varmeafgivelse end den tykke (30-35 km) granitiske kontinentsskorpe med et betydeligt indhold af radioaktive stoffer (se tabel 2). Når kontinenternes og oceanernes varmetab nu viser sig at have samme størrelsesorden, må det afspejle en grundlæggende forskel mellem kappen under kontinenter og oceaner.

TABEL 2. GENNEMSNIKSKONCENTRATIONER AF NOGLE RADIOAKTIVE STOFFER

	Bjergart	Vægtenheder per million enheder		
		Uran	Thorium	Kalium
JORDSKORPEN	Granit	5	20	37000
	Basalt	0.8	2.7	6000
ØVRE KAPPE ?	Eklogit	0.052	0.22	500
	Peridotit	0.006	0.02	10
STENMETEORITER	(Kondritter)	0.013	0.04	850

De mest nærliggende slutninger er, at oceankappen har højere temperatur og højere koncentration af radioaktive stoffer end kontinentkappen. En forklaring fremsat af Macdonald foreslår, at bogstaveligt talt alle de radioaktive stoffer i kontinentsskorpen er steget op fra kappen sammen med granitiserende stoffer, der dannede kontinenterne, mens de radioaktive stoffer stadig er jævnt fordelt gennem den oceaniske øvre kappe ned til måske 500 km dybde. Hvis denne antagelse er rigtig, indebærer det, at kontinenter og oceaner er permanente, og at den øvre del af kappen undergik en kemisk opdeling tidligt i Jordens historie. Dette er imidlertid særdeles vanskeligt at bringe i overensstemmelse med den voksende bevismængde for kontinentdrift og oceanbundsspredning og vækst bort fra de oceaniske midt-rygge (se Varv 1972, 3). Af denne grund er det påkrævet at søge efter en alternativ forklaring.

Den alternative forklaring på ocean-kontinent varmetabproblemet, først fremsat af Bullard, er baseret på transport af varme i den øvre kappe ved konvektion, det vil sige den samme mekanik, som fører vandet rundt i et centralvarmeanlæg. Hypotesen går ud fra, at det meste af varmetabet i oceanerne formidles gennem den øvre kappe til jordskorpen ved konvektion. I den øvre kappe under kontinenterne antages konvektion at mangle eller kun at kunne overføre en langt mindre varmemængde til kontinentsskorpen.

Model af konvektion i kappen

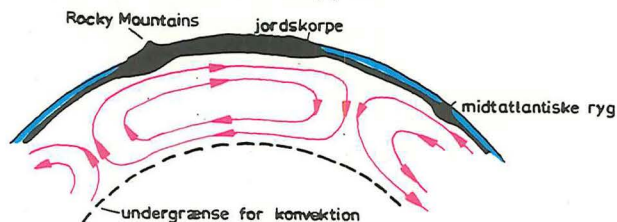


Fig. 2

Det generelle billede er, at konvektionsstrømme stiger op nær ved oceanryggene og afgiver varme på vej videre mod kontinenterne (se figur 2). Den nøjagtige mekanisme i forbindelse med varmeoptagelsen er stadig genstand for megen spekulation. Imidlertid passer konvektionsteorien meget bedre ind i de moderne ideer om kontinentdrift og oceanbundsspredning. Selve ideen om varmestrømning ved konvektion i den øvre kappe har sat skub i studiet af oceanbunden. Med nogle begrænsninger synes ideen også at være forenelig med den nye opfattelse af pladetektonik (se Varv 1972, 3).

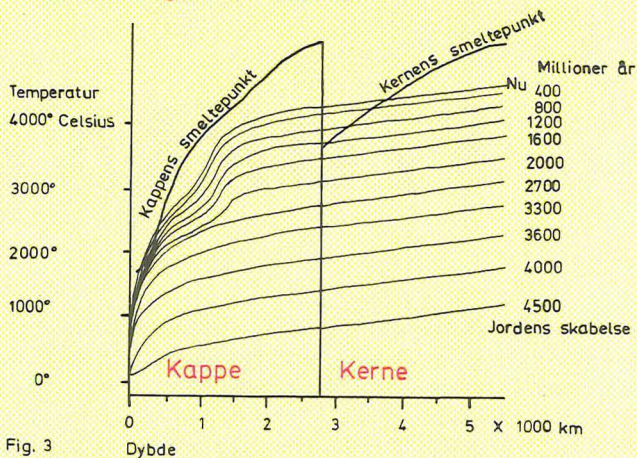
BLIVER JORDEN VARMERE ELLER KOLDERE ?

Før opdagelsen af fænomenet radioaktivitet troede man, at Jordens varmeafgivelse var resultatet af afkølingen af et oprindeligt varmt legeme. Fordi Jorden er varmere i sit indre end på overfladen havde man en vag forestilling om, at hele Jorden var varmere ved skabelsen og efterhånden er blevet afkølet. Hvis denne hypotese skulle akcepteres, ville Jorden på grund af efterfølgende radioaktiv opvarmning være smeltet igen i stedet for at afkøles!

Det moderne synspunkt er, at Jorden dannedes som et oprindeligt koldt legeme ved tiltrækning og samling af kolde partikler, og at den oprindelige Jords masse var af en lignende sammensætning som visse meteoritter. Jordmaterialet og meteoritmaterialet er helt ensartet i sammensætningen af grundstoffer. Den kemiske sammensætning af Jordens bjergarter kan være ændret i forhold til det oprindelige partikelmateriale ved forskellige kemiske forandringer, men den isotopiske sammensætning af grundstofferne må være forblevet forholdsvis uændret.

Hvis vi nu med rimelighed antager, at Jorden blev dannet gennem en samling meteoritmateriale ved lav temperatur for cirka 4500 millioner år siden, burde vi være i stand til at beregne klodens senere termiske historie. Denne er faktisk udarbejdet på matematisk grundlag under den forudsætning, at de radioaktive stoffer oprindeligt var jævnt fordelt gennem hele jordkloden. Den temperaturfordeling, man således kom til (figur 3), er i rimelig overensstemmelse med beregningerne for de nuværende temperaturforhold i Jordens indre, og som tidligere er vist i figur 1.

Jordvarmen gennem tiderne.



En anden interessant iagttagelse i denne forbindelse er, at det totale årlige varmetab målt ved Jordens overflade (2.4×10^{20} cal.) stort set modsvarer den årlige radioaktive varmeudvikling, som ville blive udviklet af en meteorit på størrelse med Jorden og med en jævn fordeling af de radioaktive stoffer.

Hvad betyder det? Hvis hypotesen om en "meteoritisk" Jord er korrekt, taber Jorden lige så megen varme som den udvikler. Derfor er der ikke nogen varme til stede til opvarmning af Jorden. Med andre ord kan vi idag sige, at Jorden hverken bliver varmere eller koldere. Det er det noget uventede svar på det spørgsmål vi stillede tidligere. Den oprindelig kolde Jord er gradvis blevet opvarmet, men på nuværende tidspunkt synes den at have nået en tilstand af varmemæssig ligevægt.

Da forrådet af radioaktive stoffer daler med tiden, vil Jorden utvivlsomt til syvende og sidst begynde at blive koldere.

A. V. Shering

