

Processerne i jordens indre

Af Hans Thybo, professor, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning og Lars Nielsen, lektor, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning

Kloden udvikler sig konstant og kontinenterne bevæger sig. Jordens overflade består af en række tektoniske plader, som bevæger sig i forhold til hinanden. Nogle steder sprækker pladerne mens de kolliderer i andre regioner. Processerne, der driver bevægelserne, foregår i jordens indre i et komplekst samspil mellem fysiske og kemiske kræfter.



Keerne-kappe grænsen

Den mest markante laggrænse i jordens indre er overgangen mellem kappen og kernen, som findes i en dybde af 2960 km. Jordens kerne består primært af metallerne jern og nikkel, som findes i smeltet form i den ydre kerne og i fast form i den indre kerne. Overgangen mellem den indre og ydre kerne kaldes også Lehmann Diskontinuiteten, efter den danske seismolog Inge Lehmann. Da kernen består af tunge metaller under stort tryk, er dens massefylde omkring $9,5\text{--}11\text{ g/cm}^3$, omkring 10 gange vands massefylde. Kappen udgør ca. 80% af jordens volumen, og dækker dybdeintervallet fra 10–60 km og ned til kernen. Kappen består af bjergarter, der indholder silicium samt magnesium og jern. Tryk og temperatur ændres kraftigt fra jordens overflade til dybder af 2960 km. Disse ændringer afspejles også i en enorm variation i bjergarter. I kappens yderste del findes der relativt lette bjergarter med massefylder på ca. $3,35\text{ g/cm}^3$, hvilket er ca. 30% højere end granit ved jordens overflade. Bjergartstyperne ændres ned gennem kappen, men de dybeste bjergartstyper kan vi kun vurdere ud fra teoretiske beregninger og ved simulering i laboratorier, og vi ved ikke om bjergarterne faktisk ser ud som de laboratoriefrembragte stoffer.

Den tektoniske bevægelse

Ved overgangen mellem kappe og kerne ændres massefylden fra 6 g/cm^3 til $9,5\text{ g/cm}^3$, eller fra 'lette' bjergarter til tunge smeltede metaller. Modsat gælder det, at den seismiske lydbølgehastighed har en negativ ændring fra ca. $14,5\text{ km/s}$ til kun $8,0\text{ km/s}$, idet de seismiske P-bølger kun udbredes langsomt gennem smeltede bjergarter (se side 15).

Der er næppe tvivl om, at temperaturforskelle er den basale årsag til bevægelsen af de tektoniske plader ved jordens overflade, men der findes forskellige opfattelser af, hvad der igangsatte og siden har drevet pladetektonikken. En model anta-

ger, at opstrømmende varme, bløde og smeltede bjergarter i såkaldte kappediapirer (på engelsk 'mantle plumes') driver den tektoniske udvikling. Hvor de når de stive tektoniske plader, vil de løfte overfladen og drive ud mod siderne. Begge disse effekter vil påvirke pladerne med sideværts kræfter. Seismiske modeller, der afspejler forskelle i temperatur og bjergartssammensætning viser en del strukturer, der kan tolkes som diapirer, hvor varme tilsyneladende stiger op fra jordens kerne, fx fra under Sydafrika op til under Etiopien. Man har argumenteret for, at denne varmekoncentration under det nordlige Østafrika forårsager, at jordskorpen revner i de såkaldte riftdale. Seismologer finder ofte, at der findes en anomal overgang mellem kappe og kerne ved bunden af diapirerne. Man har dog endnu ikke kunnet påvise eksistensen af diapirerne med direkte observationer.

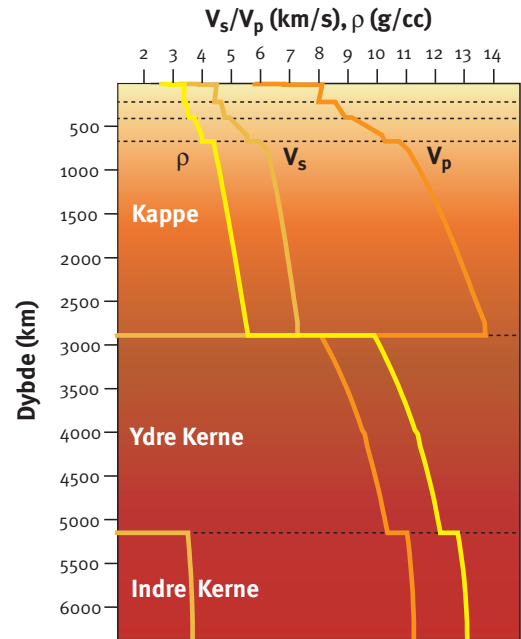
Nye resultater har vist, at minerafaseomdannelser i subduktionszoner gør bjergarterne tungere, således at de trækker pladerne nedad, hvilket har afgørende betydning for spændinger i litosfærepladerne. Subduktionszoner er de områder, hvor oceanbundsplader dykker ind under kontinenterne, fx ved randen af Stillehavet. Det er i sådanne zoner, at man finder nogle af de kraftigste jordskælv, som opstår ved at der opsamles spændinger mellem kontinent og oceansbundsplade. Jordskælvene sker, når disse spændinger udløses i gigantiske udladninger af energi. Trækket fra subduktionszonerne er nok den vigtigste drivkraft for pladetektonikken. Ved de midt-oceaniske højderygge, f.eks. i midten af Atlanterhavet, tilføres der konstant nyt materiale til de oceaniske litosfæreplader, som glider væk fra hinanden. Eksistensen af de op til 4 km høje højderygge gør, at der opstår store sideværts kræfter, som udgør en anden meget væsentlig drivkraft for pladetektonikken.

Man har med jordskælvsseismologi fundet, at ca. 12% af kernens overflade er dækket af et tyndt

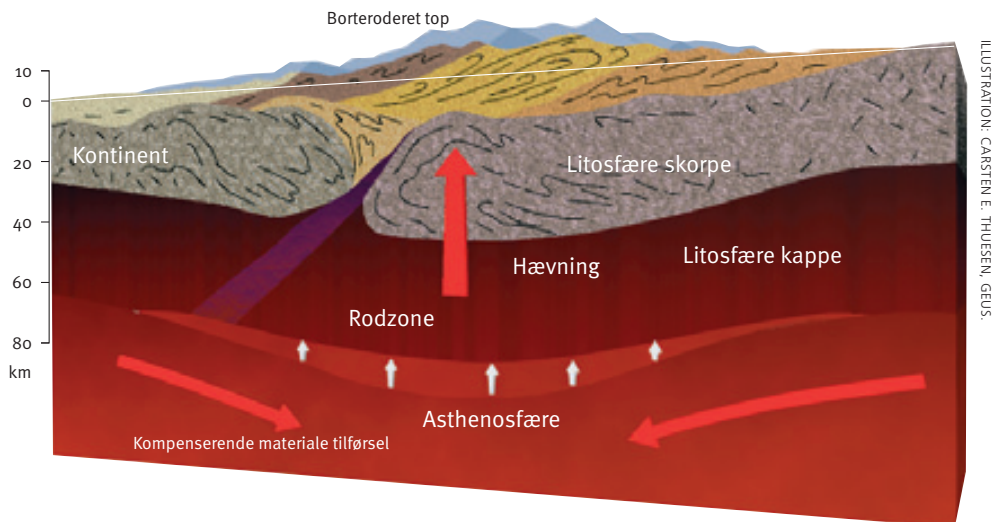
lag på 10–40 km tykkelse. Seismiske bølger udbredes langsomt gennem dette lag, hvilket gør det sandsynligt, at laget repræsenterer delvist smeltede kappebjergarter i direkte kontakt med de smeltede metaller i kernen. Dette lavhastighedslag er tykkest under det centrale Stillehav og andre steder, hvor man mener at have påvist opadstigende 'plumes'. Det er således muligt, at instabilitet i dette lag kan forårsage dannelse af plumes.

Jordens overordnede lagdeling i indre og ydre kerne, kappe og skorpe. Variation med dybden under jordoverfladen af seismiske hastigheder V_p og V_s samt massefylde.

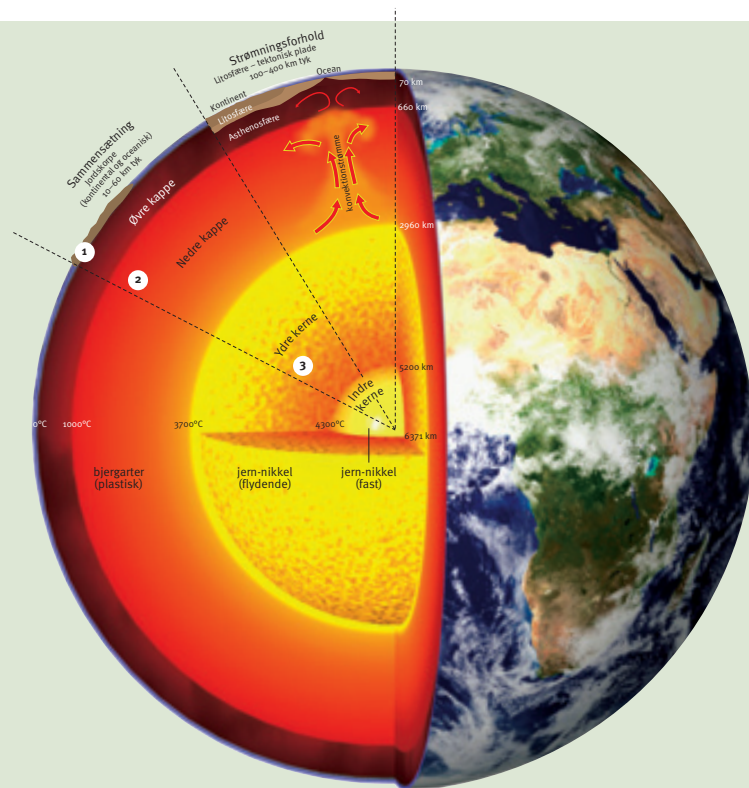
Kilde: J. Ritsema og H. J. van Heijst, 2000.



Skitse der viser, at litosfæren nedbøjes i underlaget ved bjergkædefoldning, og at den derefter hæves langsomt i takt med at toppen af bjergene bortroderes. Herved aftager belastningen på underlaget og asthenosfæreunderlaget 'flyder' tilbage i nedbøjningsfeltet og udfylder det opståede restvolumen.



Udsnit af Jorden, der viser dens opbygning efter sammensætning og efter dens dynamiske forhold. De to stiplede afsnit viser henholdsvis betegnelserne for de forskellige dele efter sammensætning og efter strømingsforhold og deformationsegenskaber i zonerne. Det skal understreges, at de to inddelinger er baseret på helt forskellige principper. Figuren illustrerer hvorledes dele af den øvre kappe – trods samme sammensætning – reagerer helt forskelligt på deformationer, afhængigt af, hvilken temperatur/tryk tilstand den forekommer i.



Klodens opbygning

Yderst findes jordskorpen, som vi lever på. Herfra henter vi råstoffer såsom metaller, olie og grus. Den yderste del af jorden er velkendt, og vi kender de forskellige bjergarter. Jordens skorpe er opbygget af bjergarter med et højt indhold af silicium, hvilket gør den relativt let. Jordskorpen når til 10–60 km dybde, og udgør en forsvindende lille del af klodens samlede størrelse.

Den underliggende kappe udgør 75–80% af jordens volumen og masse. Den består af bjergarter med mindre indhold af silicium og med højere massefylde end jordskorpen. Det er processer i jordens kappe, som styrer de fleste geologiske processer på stor skala, fx dannelse af bjergkæder og oceaner og forekomster af vulkaner.

Jordens kerne består fortrinsvis af metallerne jern og nikkel, i den ydre kerne på flydende form og i den indre kerne på fast form. Det er elektriske strømme, kombineret med materialebevægelse i kernen, som danner jordens magnetfelt.

Litosfæren er den yderste, mekanisk stabile del af jorden, som består af en række tektoniske plader, der forskydes i forhold til hinanden. Litosfærepladerne består af jordskorpen og den yderste del af kappen ned til dybder af ca. 100 km under oceanerne og 50–400 km under kontinenterne. Den underliggende asthenosfære deformeres plastisk over geologisk tid, selv om materialet er lige så hårdt og stift som bjergarter ved jordens overflade. Over millioner af år deformeres materialet som en stiv sirup. Det er processerne i denne del af jordens indre, som menes at styre den geologiske udvikling.

Jordens øvre kappe

Ved brug af mobile seismografer og kraftige sprængninger er det nu lykkedes at tolke småskala strukturer i jordens øvre kappe i en skala på ned til 500 m. Det viser sig, at der findes en såkaldt lavhastighedszone under 100 km dybde under alle kontinenter. Selv om dybden til zonen top er næsten konstant varierer dybden til dens bund betydeligt. Zonen er således kun omkring 40 km tyk i de ældste, tektonisk rolige områder, mens den er meget tykkere i de yngste, tektonisk aktive områder på jorden. Forklaringen på dette fænomen er sandsynligvis, at bjergarterne i dette dybdeinterval er nær ved smeltepunktet eller måske indeholder små mængder smeltet materiale. Dette kan også forklare de lave seismiske hastigheder i intervallet. Det er endvidere velkendt, at hvis bjergarterne i jordens kappe indeholder blot ganske små mængder væske, vil deres smeltepunkt formindskes væsentligt i et dybdeinterval under 80 til 100 km. Temperaturen i kappen er relativ lav i det indre af de gamle kontinenter, hvilket gør, at temperatur-

kurven kun nærmer sig eller krydser smeltepunktet i et kort dybdeinterval, hvorimod temperaturen ligger over smeltekurven i et langt interval i de aktive områder.

Den heterogene lavhastighedszone i 100 km dybde har kunnet forklare 5–10% af de jordskælv i Nordamerika, som sker i det indre af kontinentet. De fleste af sådanne jordskælv opstår i et ca. 400 km bredt bælte omkring overgangen mellem det tektonisk aktive og passive Nordamerika. Tolkninger af detaljerede data viser endvidere, at denne overgang i kappen sker over et mindre end 200 km bredt bælte. Beregninger viser, at forskellene i massefylde mellem de to sider vil lede til så store spændinger, at de overstiger den formodede styrke af litosfæren i dybder omkring 120–150 km. Forskerne har derfor foreslået, at det er disse spændinger, der leder til udløsningen af de gådefulde nordamerikanske jordskælv.

Se også den pladetektoniske principskitse på side 18.



FOTO: CARSTEN BRODER HANSEN

Bjergformation i Nordamerika



Carlsbergforkastningszonens udbredelse gennem København er vist med rød skravering. En undersøgelse af seismiske refleksioner lavet af Jesper Fallesen under hans specialearbejde viste tydeligt Carlsbergforkastningens geometri langs en linje markeret med den sorte streg. De orange, buede linjestykker viser, hvor der blev registreret seismiske bølger fra tre eksplosioner (gule cirkler).

Carlsbergforkastningen

Af Lars Nielsen, lektor, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Alexander Lassen,

Hyppe jordskælv minder os hele tiden om, at vores jord er dynamisk og i stadig forandring. Jordskælvene opstår som følge af bevægelser i jordens yderste, stive skal, der udgøres af en mosaik af litosfæreplader. Jordskælvene forekommer især langs de midtoceaniske rygge, hvor der dannes ny litosfære af smeltet materiale fra den underliggende kappe, og i områder, hvor litosfæreplader kolliderer. Danmark ligger i dag langt fra sådanne litosfære-pladegrænser, men alligevel forekommer der også små jordskælv her. Tidligere i Jordens historie, for millioner af år siden, har det område, som nu er Danmark, været udsat for kraftig pladetektonisk aktivitet og har ganske givet været udsat for endog store jordskælv. I undergrunden finder vi spor af tidligere tiders aktivitet. Mange steder er jordlagene blevet brudt af jordskælv langs forkastninger. En af disse forkastninger hedder Carlsbergforkastningen. Den er en flere kilometer lang brudzone, og bl.a. geofysiske målinger viser, hvordan den krydser tværs gennem København.



Forkastningens dannelse

Carlsbergforkastningen har en nord-nordvestlig til syd-sydøstlig orientering og strækker sig muligvis hele vejen fra det sydligste Kattegat til et sted ude i Øresund syd for Amager. De forskydninger af jordlagene, der kan observeres langs med Carlsbergforkastningen, blev måske sat i gang for rundt regnet 30–40 millioner år siden pga. kollisionen mellem den afrikanske plade og Europa; en kollision som førte til dannelsen af Alperne. Det er muligt, at Carlsbergforkastningen er endnu ældre, og at dens tidligste dannelse derfor relaterer til helt andre pladetektoniske kræfter. Den relative bevægelse af Afrika op mod Europa er stadig i gang. Kræfterne fra denne kollision er måske delvist ansvarlige for nogle af de små jordskælv, som vi observerer i Danmark. Der er dog ikke observeret jordskælv ved selve Carlsbergforkastningen i Københavnsområdet i den tid, man har overvåget området med seismografer. Derimod er der observeret en række jordskælv i det sydligste Kattegat, lige nord for Sjælland (find en oversigt over danske jordskælv på www.geus.dk).

Fremtidig forskning

Den seismiske kortlægning af Carlsbergforkastningen fortsætter med det formål at lokalisere forkastningen med stor nøjagtighed nord og syd for København. Specielt er det spændende at undersøge, om forkastningen løber ind i det – set med danske øjne – aktive område i det sydlige Kattegat, hvor der af og til forekommer små jordskælv. Forkastninger manifesterer sig nær overfladen i en zone af opbrudte kalklag. Denne zone er vandfyldt og relativt svag i forhold til de omkringliggende kalklag. Disse forhold har naturligvis stor betydning fx for planlægning og udførelse af anlægsarbejder samt udnyttelse af grundvandsressourcer.

FOTO: CARSTEN BRØDER HANSEN



Amager. En del af landingsbanerne i Kastrup Lufthavn i forgrunden. Sverige i baggrunden.

Rystelserne fra jordskælv forplanter sig gennem jorden, og registreres på seismologiske målestationer overalt på jorden. På deres vej gennem jorden påvirkes de af lokale forhold. Der er tre komponenter i en måling for at beskrive rystelserne i tre dimensioner: op-ned; øst-vest og nord-syd. Først ankommer P-bølgen, derefter S-bølgen, der udbreder sig lidt langsommere end P-bølgen. Til sidst kommer overfladebølgerne, der udbreder sig nogenlunde lige så hurtigt som S-bølgerne, men idet de udbreder sig langs jordens overflade har de længere vej end S-bølgen, der 'skyder genvej' igennem jorden

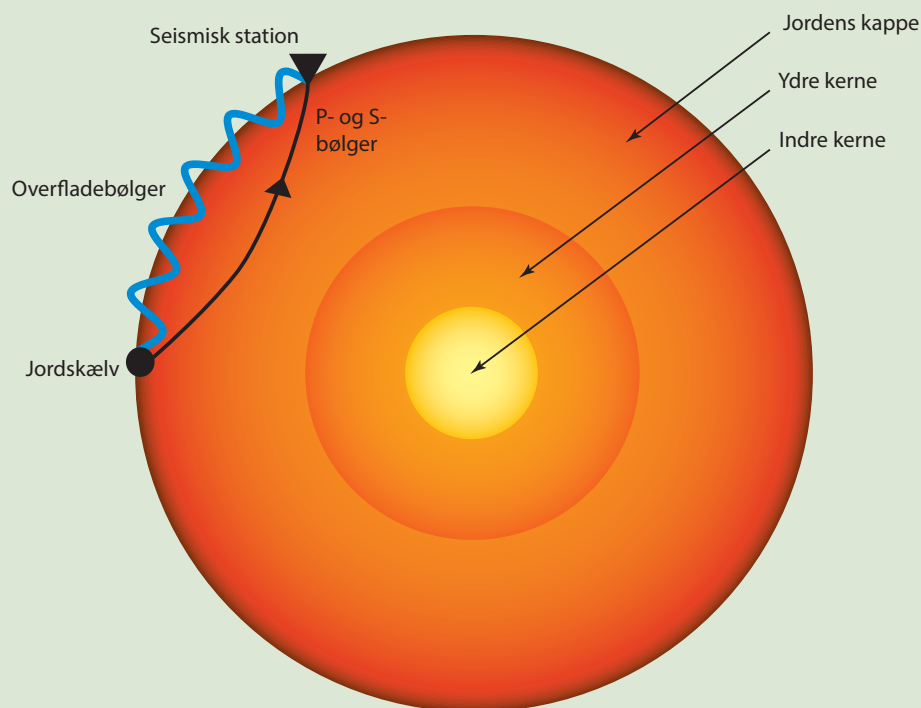


ILLUSTRATION: ANNABETH ANDERSEN, GEUS

Jordskælv registreres med P- og S-bølger

Af Trine Dahl-Jensen, seniorforsker, GEUS og
Tine B. Larsen, seniorforsker, GEUS

Der opstår jordskælv overalt på jorden – men meget ulige fordelt. Pludselig ryster jorden, og ofte får skælvet katastrofale følger for befolkningen i området. Der er derfor en meget stor interesse for at forstå, hvorfor jordskælv opstår, og hvor og hvornår det sker. Moderne mobile instrumenter der kan måle rystelser i et meget stort frekvensområde har været tilgængelige nu i ca. 15 år, og der er opsat både midlertidige og permanente stationer på mange lokaliteter. Danske forskere anvender ikke mindst stationer i Grønland til at lære mere om jordskælvs opståen og dynamik.