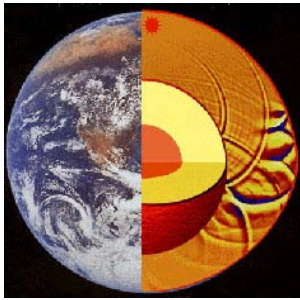


# Et klarere bilde av Jordas indre struktur og dynamikk

Reidar G. Trønnes, Naturhistorisk museum, UiO

En litt kortere versjon av denne artikkelen er publisert i [www.forskning.no](http://www.forskning.no)

([www.forskning.no/artikler/2010/januar/239069](http://www.forskning.no/artikler/2010/januar/239069))



**Vårt bilde av Jordas indre struktur og bevegelser har blitt mer detaljert i det første tiåret i det nye millenniumet. Informasjonstilgangen fra seismologi, eksperimentell mineralogi, geokjemi og geodynamikk er stor, men det er likevel langt til en entydig og komplett geodynamisk forståelse** (Trønnes 2009, Mineralogy and Petrology, [www.nhm.uio.no/om-museet/seksjonene/forskning-samlinger/ansatte/rtronnes/public\\_tronnes.html](http://www.nhm.uio.no/om-museet/seksjonene/forskning-samlinger/ansatte/rtronnes/public_tronnes.html)).

Eksperimentelle mineraloger oppdaget nylig en overgang fra Jordas mest utbredte mineral, Mg-perovskitt, til et nytt mineral ved trykk og temperaturer som svarer til den nederste delen av mantelen. Oppdagelsen kom fra høytrykksekspesimenter, men ble nesten umiddelbart bekreftet av teoretiske beregninger. Det nye mineralet, post-perovskitt, opptrer helst i kjølige områder nederst i mantelen, men også i varme områder med et stort innslag av basaltiske eller jern-rike peridotittiske bergarter ([www.forskning.no/artikler/2008/april/179779](http://www.forskning.no/artikler/2008/april/179779)).

## Seismologi

Seismologer har i flere tiår registrert gåtefulle grenseflater, uvanlige mekaniske egenskaper og store variasjoner i temperatur og sammensetning like over grensen mellom den flytende jernkjernen og den faste mantelen. Geodynamikere og seismologer spekulerte i mulige mineraloverganger, men mineralogene kunne ikke forklare observasjonene før den nærmest tilfeldige oppdagelsen av post-perovskitt. Dette gjennombruddet vitaliserte kommunikasjonen og samarbeidet mellom seismologer, mineraloger, geokjemikere og geodynamikere.

Nederst i mantelen finnes også to store områder, 200-400 km tykke og 4500 km i diameter, med lavere seismisk hastighet enn den omliggende mantelen. Sentrum i disse sonene ligger nær ekvator og 180° fra hverandre (= anti-podal), under Afrika og under Stillehavet.

## Geokjemi og kosmokjemi

Det siste tiåret har frembrakt nye og tankevekkende resultater fra målinger av isotop-forhold i bergarter og meteoritter fra Jorda, Månen, Mars og asteroidene. For grunnstoffer som Nd, Pb og Os gir forholdet mellom radiogene (= dannet ved radioaktiv nedbrytning) og andre isotoper informasjon om den kjemiske utviklingen av mantelen og massebalansen i Jorda og naboplanetene.

Innholdet av ulike grunnstoffer i Jorda kan beregnes fra sammensetningen av Sola og meteoritt-grupper som representerer det opprinnelige materialet i Solsystemet. Oppsmelting i planetære mantler er utgangspunktet for basaltisk vulkanisme, og basaltlava kan dermed benyttes som et geokjemisk "vindu" mot planetenes indre. Jordas sammensetning er godt fastlagt, men noen grunnstoff-forhold er usikre.

Det siste stadiet av planetveksten førte til nesten total oppsmelting av steinmaterialet rundt de flytende kjernene. Krystalliseringen av slike magmahav produserte en opprinnelig lagdeling som delvis var tyngdemessig ustabil og senere ble omrørt ved konveksjonsstrømmer ([www.forskning.no/artikler/2009/juli/225478](http://www.forskning.no/artikler/2009/juli/225478)).

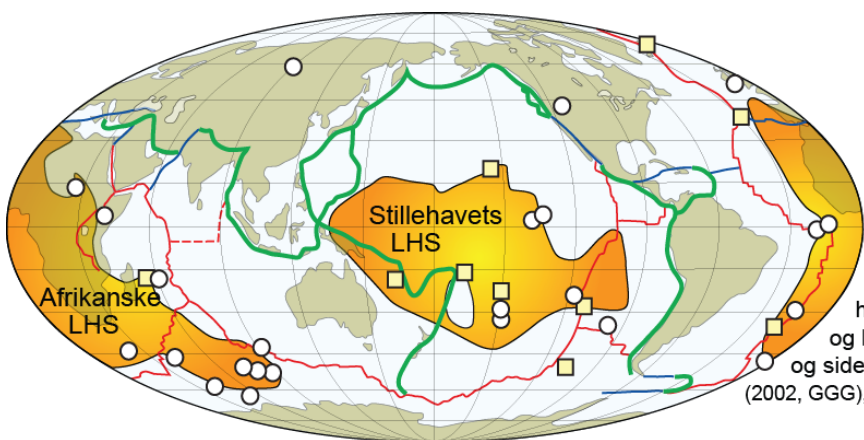
Steinmaterialet i Jordas mantel er i sakte bevegelse, og det foregår en kontinuerlig utsmelting og oppflytning av basalt til overflaten. Samtidig blir resirkulert havbunnsbasalt og sedimenter som tilføres mantelen ved subduksjon av havbunnsplater delvis innblandet i mantelen. Enkelte partier kan ha vært isolert fra den omrørte mantelen siden starten av Jordas historie, spesielt hvis noen av bergartslagene som krystalliserte dypest nede i mantelen fra magmahavet var så tunge at de unngikk termisk oppdrift.

Nye målinger av isotopforholdene  $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  og  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  i bergarter fra Jordas mantel viser at begge forholdene er høyere enn i chondritter (= primitive meteoritter). Chondritt-sammensetningen regnes som representativ for Solsystemet.  $^{142}\text{Nd}$  og  $^{143}\text{Nd}$  dannes ved nedbrytning av hhv.  $^{146}\text{Sm}$  og  $^{147}\text{Sm}$  med halveringstider på hhv. 0,103 og 106 milliarder år. Dersom Sm/Nd-forholdet i Jorda som helhet er chondrittisk, må vi ha et reservoar med lavere Sm/Nd-forhold som har vært isolert fra den omrørte mantelen de siste 4 milliarder år. Dette skyldes at den radioaktive isotopen  $^{146}\text{Sm}$  var nesten borte etter ca. 500 millioner år eller ca. 5 halveringstider (Jordas alder er 4,57 milliarder år). Det er likevel mulig at Jorda har et høyere Sm/Nd-forhold.

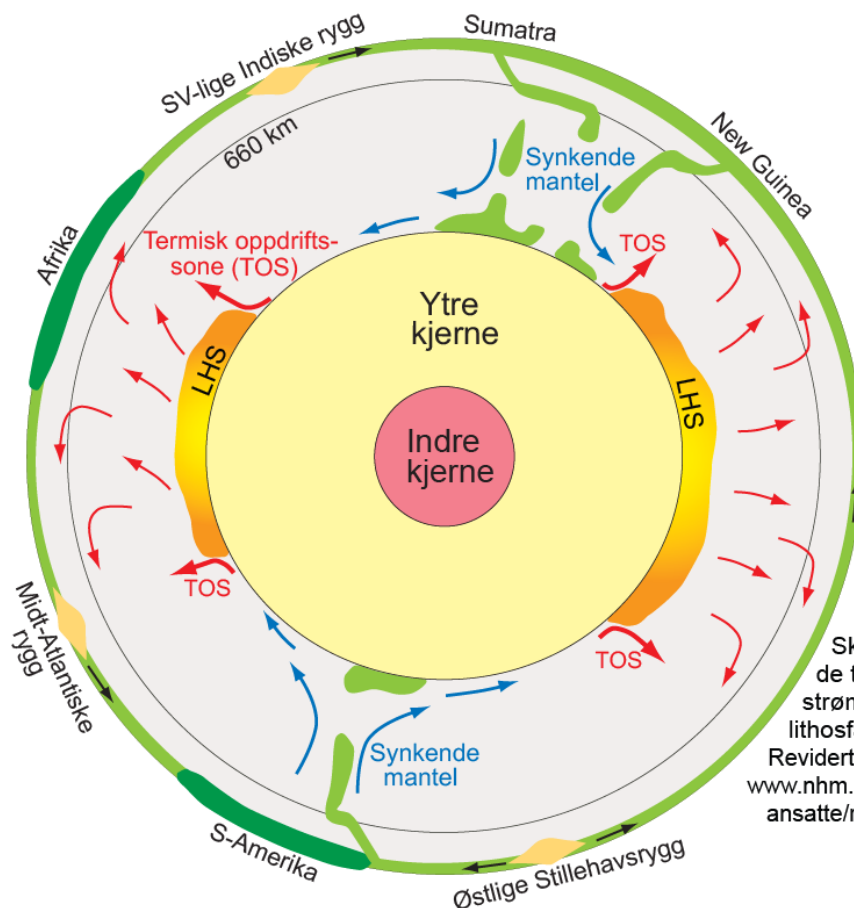
## Geodynamikk

Jordas mantel utvikler 32 terawatt (TW) radioaktiv varme fra kalium, thorium og uran, og kjernen utvikler ca. 6 TW krystallasjonsvarme fordi den indre faste kjernen vokser sakte. Varmen må ut, og den mest effektive transportmåten er konveksjon (omrøring) som følge av termisk oppdrift. Jernkjernen er så tung at den ikke kan blande seg med mantelen selv om den er flytende. Temperaturen synker meget raskt fra 3500-4000 °C ytterst i kjernen til mindre enn 2500 °C bare 200-300 km over kjernegrensen. Den flytende kjernen virker dermed som en glovarm kokeplate under steinmantelen, og termiske oppdrifts-bobler dannes i kontakten med denne kokeplata. Mantelen under subduksjonssonene rundt Stillehavet er kald og synker. Over de to store anti-podale lavhastighetssonene under Stillehavet og Afrika er mantelen varm og stigende.

Forskningsgruppen til Trond Torsvik ([www.geodynamics.no/indexOld.htm](http://www.geodynamics.no/indexOld.htm)) har nylig bidratt med viktige geodynamiske rekonstruksjoner av store basalt-provinser i forhold til lavhastighetssonene nederst i mantelen. De rekonstruerbare basaltprovincene fra de siste 300 millioner år ligger nær yttergrensene til dagens lavhastighetssoner. Dette tyder på at sonene har vært stabile i minst 300 millioner år og at yttergrensene er gunstige steder for dannelse av termiske oppdrifts-bobler som kan stige til overflaten og gi opphav til stor-skala smelting og vulkanisme. Andre seismiske og geodynamiske studier bekrefter at yttergrensene til de 200-400 km tykke lavhastighetssonene kan være bratte og at de er gunstige for utviklingen av termiske oppdrifts-bobler.



De to anti-podale lavhastighets-sonene (LHS) nederst i mantelen. Dype termiske søylestrømmer og relokaliserte store basalt-provinser er vist ved hhv. gule kvadrater og hvite sirkler. Røde, grønne og blå linjer er hhv. midthavsrygger, subduksjonssoner og sidelengs-forkastninger. Basert på Becker and Boschi (2002, GGG), Montelli et al. (06, GGG) og Torsvik et al. (06, GJI).



Skjematisk ekvatorsnitt gjennom Jorda som viser de to anti-podale lavhastighetssonene (LHS) og strømningsmønsteret i mantelen. Mørk og lys grønn lithosfære er hhv. kontinental og oceanisk. Revidert fra Trønnes (2009, Mineral. Petrol., [www.nhm.uio.no/om-museet/seksjonene/forskning-samlinger/ansatte/tronnes/public\\_tronnes.html](http://www.nhm.uio.no/om-museet/seksjonene/forskning-samlinger/ansatte/tronnes/public_tronnes.html))

## Mineralogiske beregninger

Det siste tiåret har vært preget av store fremskritt i teoretisk beregningsmineralogi, muliggjort av superdatamaskiner. Slike første-ordens beregninger (omtrentlig løsning av Schrödinger-ligningen) er uavhengige av eksperimentelle data og gir dermed et korrektiv til høytrykks-eksperimenter. Jordas nederste mantel og kjerne har trykk og temperaturer som vår eksperimentelle teknologi bare nesten kan håndtere, og mineralogiske beregninger er derfor kjærkomne.

I 2007-09 kom indikasjoner på at temperatur-stigningen nedover i Jorda er omtrent parallell med smeltekurvene for stein og at steinsmelte er tyngre enn stein nederst i mantelen (Labrosse et al. 2007, Nature 450, 866; Stixrude et al. 2009, Earth and Planetary Science Letters 278, 226).

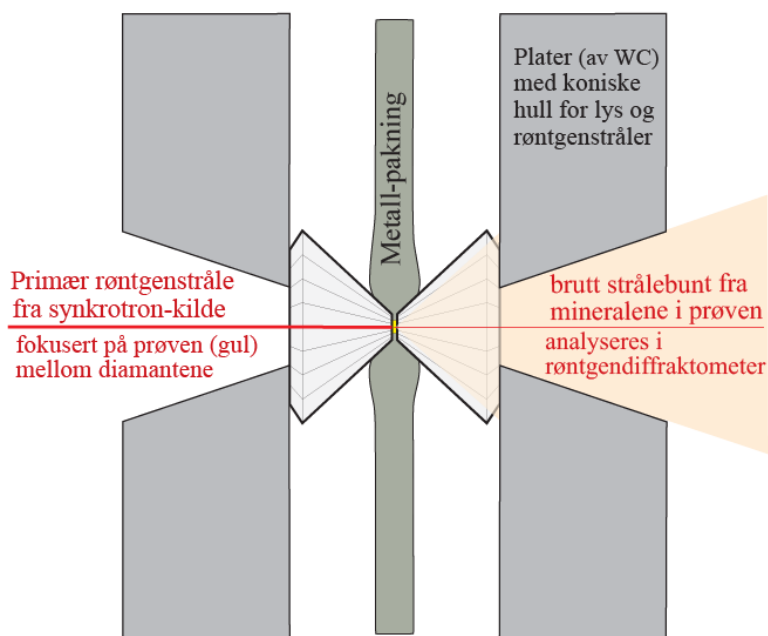
Dette har viktige følger for krystalliseringen av en opprinnelig flytende mantel. I en planet med Jordas størrelse (2900 km tykk mantel) vil mantelen begynne å krystallisere midtveis mot kjernen (ca. 1500 km dyp) og øverst mot overflaten. De første krystallene vil være perovskitt midt i mantelen og olivin nær overflaten. Krystallene har lavere Fe/Mg-forhold enn den jernrike steinsmelten. Etterhvert oppstår to adskilte magmahav: nederst mot kjernegrensen og nær overflaten.

Det dype magmahavet vil krystallisere fra topp til bunn, og krystall-lagene blir gradvis mer jern-rike og tunge nedover mot kjernegrensen. Slike tunge lag kan ha vært utgangspunktet til de to anti-podale lavhastighetssonene. Helt nederst mot kjernegrensen finnes også tynne (10-30 km) ultra-lavhastighetslinser som kan representere delvis krystallisert og tung restsmelte fra det nederste magmahavet.

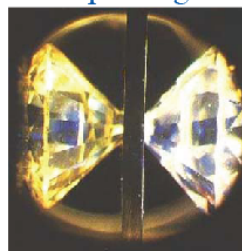
Indikasjonene på at Jordas massebalanse ikke går opp uten et eller flere mantelområder som må ha vært isolerte fra den omrørte mantelen er i overensstemmelse med tunge isolerte linser og lag anrikt på restsmelte-stoffene.

## Prinsippskisse av diamantcellen

- et viktig verktøy for høytrykksmineraloger



Diamantene og metallpakningen



Diamantcellen



## Fremtidsutsiktene

I det neste tiåret vil vi trolig få ytterligere forbedret høytrykksteknologi og numerisk beregningskraft. En ny generasjon av diamantcellen for generering av høye trykk og temperaturer vil kunne benytte super-harde diamantkrystaller produsert ved kjemisk damputfelling og herdet ved høye trykk og temperaturer. Nye synkrotron-anlegg for røntgendiffraksjon og spektroskopi vil forbedre diamantcelle-teknologien ytterligere.

Selv om mange konkrete forskningsgjennombrudd skjer som følge av teknologiske forbedringer, er en effektiv interdisiplinær kommunikasjon mellom seismologer, mineraloger, geokjemikere og gedynamikere helt nødvendig for å oppnå et mer fullstendig og korrekt bilde av Jordas indre struktur og bevegelser.

Utviklingen av et hensiktsmessig referansesystem i tid og rom som kan brukes til å knytte sammen geologiske overflateobservasjoner med geofysiske data er en viktig geodynamisk utfordring. En ny forskningsgruppe ved Universitetet i Oslo, ledet av Prof. Trond Torsvik, arbeider med denne målsetningen.

De geologiske overflateobservasjonene omfatter utbredelse av og strukturer i eldre bergartsenheter. Måling av eldre bergarters magnetiseringsretninger gir informasjon om kontinentenes beliggenhet i forhold til polene og ekvator

(tilbake til 500-700 millioner år) og om utviklingen i tid og rom av dagens havbunnskorpe (tilbake til 150 millioner år). Målbare geofysiske parametre gir et øyeblikksbilde av Jordas tilstand i dag. Dette omfatter bl.a. platebevegelser og tredimensjonale bilder av seismiske hastighetsvariasjoner i mantelen som viser termiske søylestrømmer, nåværende subduksjonssoner og gamle synkende plater i nedre mantel. De sistnevnte kan knyttes til subduksjonssoner som er inntil 300 millioner år gamle, og dermed bidra til å rekonstruere platebevegelser og manteldynamikk.

Dersom de to store lavhastighetsprovinsene helt nederst i mantelen viser seg å være tilnærmet stabile, f.eks. i 500-700 millioner år, kan de også bidra til et mer langvarig globalt referansesystem for mantelen. Sammenkobling og relokalisering av geologiske overflateobservasjoner i et slikt utvidet referansesystem, kan gi et mer nøyaktig bilde av Jordas dynamiske utvikling.

## Bakgrunnsinformasjon

Jorda og naboplanetene har en overveiende flytende og jern-dominert kjerne (20-65% av massen) omgitt av en mantel av fast stein. Steinen er hovedsakelig bergarten peridotitt, som inneholder mineralene olivin og pyroksen ved lavt trykk. Delvis smelting av peridotitt gir steinsmelte med basaltisk sammensetning. Overflatene (skorpene) på planeter med steinmantler er hovedsakelig bergarten basalt som har størket fra en steinsmelte som har flytt opp og utover overflaten.

I en stor planet som Jorda er trykket høyere enn 24 gigapascal i mer enn halvparten av mantelen (nedre mantel). Under slike forhold er mineralet perovskitt stabilt på bekostning av olivin og pyroksen og utgjør 80% av peridotittisk og 20% av basaltisk materiale.

**Grunnstoff-symboler:** O, oksygen; Fe, jern; Mg, magnesium; Sm, samarium; Nd, neodym; Pb, bly; Os, osmium

**Isotoper av et grunnstoff:** Isotoper er ulike atomer med samme atomnummer (= antall protoner, definerer grunnstoffet), men ulikt antall nøytroner. Protoner og nøytroner har omtrent samme masse (masseenhet = 1). Eksempel: Grunnstoffet med atomnummer 8 er oksygen som har tre ulike isotoper med masse 16 (8 protoner + 8 nøytroner, skrives:  $^{16}\text{O}$ , utgjør 99,76% av oksygenet i og på Jorda), 17 ( $^{17}\text{O}$ ) og 18 ( $^{18}\text{O}$ ).

**Schrödinger-ligningen:** Grunnleggende fysisk ligning som beskriver elektronenes posisjoner og bevegelser rundt atomkjernen

**Kjemisk damputfelling av diamant:** Produksjonsmetode som innebærer vekst av diamantkrystaller (som er termodynamisk meta-stabile, d.v.s. "halv"-stabile) fra en meget fortynnet gassblanding av bl.a. metan, hydrogen og nitrogen under mikrobølge-bestråling i tilnærmet vakuum. Under optimale forhold kan cm-store og nesten perfekte enkeltkrystaller vokse i løpet av 10-30 timer. Krystallene kan senere herdes under høye trykk og temperaturer (der diamant er stabil) for å øke hardheten.

**Synkrotron-anlegg** for undersøkelser av krystallstrukturer ved intens røntgenstråling er elektron-akseleratorer med magnetfelt som varierer syklisk. Elektronene genereres og akselereres nesten opp til lyshastigheten før elektronstrålen sendes inn i en stor "lagringsring" med omkrets opp til 1436 m (SPring-8 i Japan). Lagringsringen er egentlig en mangelkant der elektronstrålen skifter retning ved hjelp av akselerasjons-magneter. Fra hvert av hjørnepunktene der strålen skifter retning produseres kraftig røntgenstråling som kan fokuseres til en intens stråle som treffer prøven. Verdens største synkrotron-anlegg for småbrukere fra biologi, medisin, geologi, fysikk, kjemi og materialvitenskap er SPring-8 (Super Photon ring, 8 GeV) i Japan med 55 ulike strålelinjer og tilhørende eksperimentelle stasjoner.

**Røntgendiffraksjon:** Metode for å registrere nettverket av atomer i mineralstrukturer (krystaller) og måle avstanden og vinklene mellom de ulike atomlagene.