

En kunnskapsrevolusjon for Jordas indre bevegelser

Reidar G. Trønnes, Naturhistorisk museum, Universitetet i Oslo (r.g.tronnes@nhm.uio.no)

I FN-regi er 2008 "Planeten Jordas år". Samtidig pågår en revolusjon i vår forståelse av bevegelsene i Jordas dype indre, nærmere bestemt i grenseområdet mellom den flytende ytre jernkjernen og den overliggende mantelen av fast stein.

Varmestrømmen fra Jordas jernkjerne til nedre del av mantelen fører til termisk utvidelse av steinmassene og episoder der lett og varmt (men ikke flytende) materiale stiger mot overflaten. De stigende "boblene" utvikler seg til rør lignende strømmer med et stort hode øverst. Nær overflaten er trykket så lavt at noe av det varme materialet i hodet smelter. Dette kan resultere i korte perioder med intens vulkanisme. Jordas geologiske utvikling med episodisk dannelse av fjellkjeder og store vulkanske provinser bestemmes trolig av omveltningene nær mantel-kjerne-grensen.

Jordas indre struktur

Jordskorpa, med tykkelse som varierer fra 5 til 70 km, utgjør en meget liten del av Jordas radius på 6371 km. En fast steinmantel ligger utenfor den jern-dominerte kjernen. Den ytre kjernen (2890-5150 km dyp) er flytende, mens den indre kjernen er fast. Under trykk som svarer til mantel-kjerne-grensen er smeltepunktet for jern minst 2500 °C lavere enn for stein. Den indre kjernen er fast fordi smeltepunktet stiger når trykket øker.

Store jordskjelv gir lydbølger som forplanter seg tvers gjennom de ulike delene av Jordas indre. De to ulike bølgetypene inne i Jorda er trykkbølger (P-bølger) og skjærbølger (S-bølger). Moderne seismiske registreringer med nøyaktige tidsangivelser for bølger som beveger seg langs forskjellige baner gir god informasjon om Jordas indre struktur. Som vist i Fig. 1 øker bølgehastighetene parallelt med tettheten innover i mantelen. Skjærbølgene med svingeretning på tvers av forplantningsretningen kan bare gå gjennom fast stoff og dermed ikke gjennom den flytende kjernen. Overgangen fra fast stein nederst i mantelen til flytende jern i den ytre kjernen ledsages også av en sterk nedgang i P-bølgehastigheten.

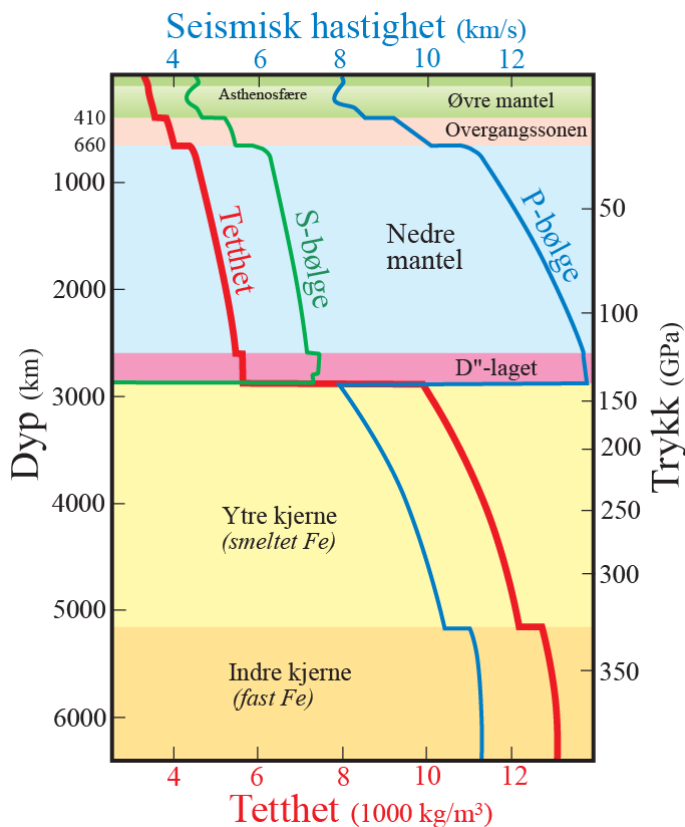


Fig 1: Seismisk bølgehastighet og tetthet som funksjon av trykk og dyp i Jordens indre. P-(trykk-) og S-(skjær)-bølge refererer til bølger der svingeretningen er langs (P) og på tvers av (S) bølgens forplantningsretning.

De brå hastighetssprangene høyt oppe i mantelen, ved 410 km og 660 km dyp (det rosa intervallet), avgrensner overgangssonen mellom øvre og nedre mantel. I den aller øverste delen av mantelen – under den stive og ca. 100

km tykke lithosfæren (jordplaten) – er det en lavhastighetszone som kalles asthenosfæren der steinen såvidt begynner å smelte.

Det nederste 200-300 km tykke laget i mantelen, direkte over kjerne-mantel-grensen, har fått betegnelsen D". Navnet har overlevd fra bokstavkodingen som ble innført av geofysikeren Keith E. Bullen i 1940. Overgangen til D" markeres ved et hastighetsprang for S-bølgene.

Mineralet olivin dominerer i den øvre mantelen (over grenseflaten på 410 km dyp). I overgangssonen (410-660 km) opptrer to ulike høytrykks-utgaver av olivin sammen med mineralet granat. Omtrent 80 % av den nedre mantelen, som igjen utgjør 58 volum% av Jorda, består av mineralet perovskitt med $MgSiO_3$ -dominert sammensetning.

Dette perovskitt-mineralet ble syntetisert av Lin-Gun Liu ved Australian National University i 1974 etter at Ted Ringwood (samme sted) hadde forutsett at det kunne være stabilt i den nedre mantelen. I de neste 30 årene trodde de fleste høytrykks-mineraloger at perovskitt ville være stabilt helt ned til Jordas kjerne. Seismologene, derimot, fant flere gåtefulle grenseflater og retningsavhengige materialeegenskaper i D"-laget. Rundt 1980 begynte de å få mistanke om andre høytrykksmineraler i dette området, men de ble møtt med likegyldighet hos mineralogene.

Mineralovergang fra perovskitt til post-perovskitt

I 2004 oppdaget japanske høytrykksmineraloger at perovskitt (pv) faktisk går over til et annet mineral ved overgangen til D"-laget. Foreløpig kalles dette mineralet post-perovskitt (ppv). Oppdagelsen ble muliggjort ved en kombinasjon av teknisk krevende eksperimenter og teoretiske beregninger. Ppv blir stabilt når trykket øker, fordi mineralet har mindre volum enn pv (Fig. 2). Trykket og dermed dypet der mineralovergangen foregår er imidlertid svært følsomt for variasjoner i temperaturen. Høye temperaturer favoriserer pv i forhold til ppv. Den store temperaturøkningen gjennom D"-sonen gjør pv stabilt igjen helt nederst mot kjernen. Overgangene fra pv til ppv og tilbake til pv svarer til seismiske observasjoner av en øvre og en nedre grenseflate. Dypet til disse grenseflatene varierer med temperaturen, og i de varmeste områdene er ikke post-perovskitt stabilt i det hele tatt (Fig. 3). Dette vil favorisere dannelsen av pv-dominert termisk oppdrift like over kjernen.

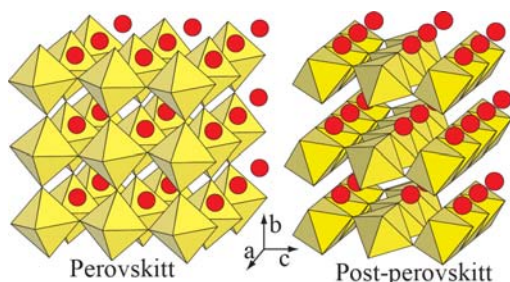


Fig 2: Krystallstrukturen hos $MgSiO_3$ -mineralene perovskitt (pv) og post-perovskitt (ppv). De gule SiO_6 -oktaedrene er felles for begge strukturene. De røde atomene er Mg^{2+} -kationene. I pv er alle oktaedrene hjørne-koblet, men i ppv er de kant-koblet langs a-aksen. Dette gir en struktur med faste ac-lag og løsere kobling langs b-aksen som dermed er lettere sammentrykkbar. Disse egenskapene forklarer de tidlige gåtefulle seismiske egenskapene i D"-sonen.

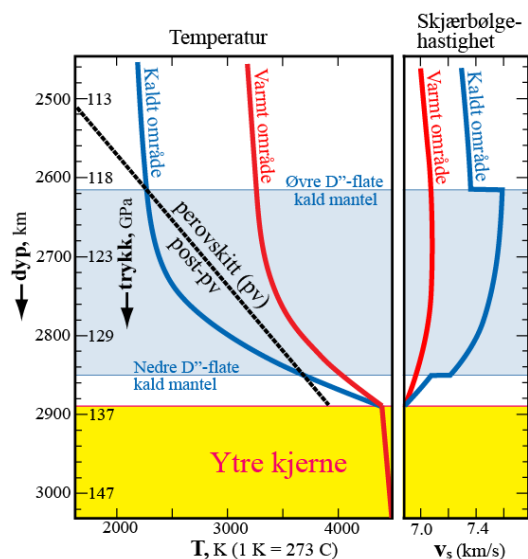


Fig 3: Temperatur og skjærbølgehastighet som funksjon av dypet (og trykket) nederst i mantelen. Faseovergangen mellom perovskitt (pv) og post-perovskitt (ppv) er vist ved den svarte stiplede linja, og temperatur og bølgehastighet er vist med blå og røde kurver for henholdsvis kalde og varme områder nederst i mantelen. Som figuren viser, er det bare den kalde (blå) temperaturkurven som krysser inn i ppv-feltet. I kalde områder er derfor ppv stabilt på 2620-2850 km dyp (lyseblått felt). I

de varmeste områdene blir ikke ppv stabilt ved noe dyp. Skjærbølgehastigheten øker ved overgangen til ppv (øvre diskontinuitet) og avtar ved overgangen tilbake til pv. Figuren er omarbeidet fra Hernlund et al. (Nature 434, 882)

Oppdagelsen av faseovergangen til post-perovskitt gjorde det mulig å forklare mesteparten av de gåtefulle seismologiske observasjonene. Dette gjennombruddet førte til en kraftig revitalisering av seismologisk og høytrykks-mineralogisk forskning. Samtidig er det gjort viktige paleogeografiske og geokjemiske observasjoner som kobler dagens varmetransport og bevegelser i D"-laget med Jordas tidlige utvikling. Det mineralogiske 2004-gjennombruddet har dermed startet en kunnskapsrevolusjon.

Planetær dynamikk

Alle planeter har indre bevegelser som bestemmes av varmeutviklingen i dypet og av måten varmen transporteres utover på. Materialelegenskapene i den nedre mantelen kontrollerer varmeoverføringen fra kjernen og dermed også strømningsmønsteret i det flytende jernet i den ytre kjernen og krystalliseringen av jern ved overflaten av den indre faste kjernen. Jordas magnetfelt blir induisert av strømmene i kjernen og styres også av denne varmeoverføringen. Vi kan si at mantelen er herren og kjernen er slaven.

Varmestrøm i form av massetransport (konveksjon) er viktigst i Jordas indre, men varmeledning (konduksjon) må foregå ved grenseflater som er ugjennomtrengelige for massetransport. Kjerne-mantel-grensen der tettheten stiger fra 5,5 til 9,9 tonn/m³ er det mest markerte grenselaget i Jorda. D"-laget nederst i mantelen har store variasjoner i tykkelse, materialer og struktur. Temperaturen stiger fra 2500 til 4000 °C, og D"-laget er derfor et nøkkelområde for Jordas indre dynamikk og geologiske utvikling. Temperatur- og tetthetskontrastene forårsaker termisk oppdrift og søylestrømmer som baner seg vei mot overflaten og danner store basaltprovinser og annen intraplate-vulkanisme.

Tetthetsvariasjoner

Overgangen fra pv til ppv innebærer en viktig kjemisk forskyvning. Der disse to mineralene er i kontakt og i likevekt vil ppv ha et høyere Fe/Mg-forhold enn pv. Dermed stabiliseres ppv lettere i Fe-rike bergarter ved et bestemt trykk- og temperaturforhold. Dette er meget viktig for bevegelsene nederst i mantelen. Fe-rike bergarter har i tillegg høyere tetthet enn de som har lavere Fe/Mg-forhold selv om de inneholder de samme typene av mineraler.

Jordas mantel domineres av peridotitt (ca. 90%) med et lavt Fe/Mg-forhold. Havbunnskorpe består imidlertid av basaltiske bergarter med et høyt Fe/Mg-forhold. Når havbunnsplatene glir ned i mantelen i under subduksjonssonene blir mantelperidotitten innblandet med basalt som har høyere tetthet enn peridotitt gjennom hele mantelen, unntatt i et lite område på 660-720 km dyp.

Paleogeografiske rekonstruksjoner av store basalt-provinser.

Helt siden 1980-tallet har det vært kjent at variasjonen i seismisk skjærbølgehastighet i den nederste delen av mantelen danner et enkelt mønster. To områder, under Stillehavet og under Afrika, har lav bølgehastighet (Fig. 4).

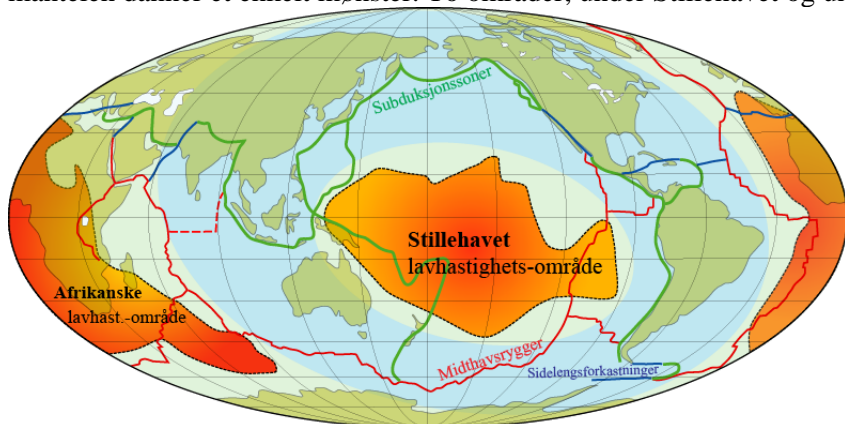


Fig 4: To antipodale lavhastighetsområder under Stillehavet og Afrika dominerer de nederste 200-400 km av mantelen.

Mellom de to lavhastighets-områdene finnes et belte med høye hastigheter under områder som har hatt subduksjon de siste 300 millioner år. Ny forskning har vist at store basalt-provinser dannet gjennom de siste 300 millioner år lå over periferien til lavhastighetsområdene da vulkanismen foregikk. Dette tyder på at disse partiene har vært stabile i lang tid og må ha høyere tetthet enn den omliggende mantelen. De er trolig anrikt på basaltisk materiale, og den lave seismiske hastigheten skyldes en kombinasjon av høy tetthet og redusert stivhet, relatert til høy temperatur.

Mineralenes volumutvidelse ved økende temperatur er grunnlaget for termisk konveksjon i mantelen. Oppvarmet materiale nederst mot kjerne-grensen vil derfor stige oppover, dersom det ikke har et innebygd "kjemisk tetthetstillegg". Kjerne-mantel-grensen representerer en kraftig "kokeplate-effekt", et såkalt termisk grenselag. Randsonene til lavhastighetslagene under Afrika og Stillehavet utgjør en ekstra kokeplate-effekt fra et skråstilt termisk grenselag. Som vist i fig. 5 vil termiske oppdriftsbobler lett dannes langs slike randsoner. Seismologiske undersøkelser støtter denne modellen.

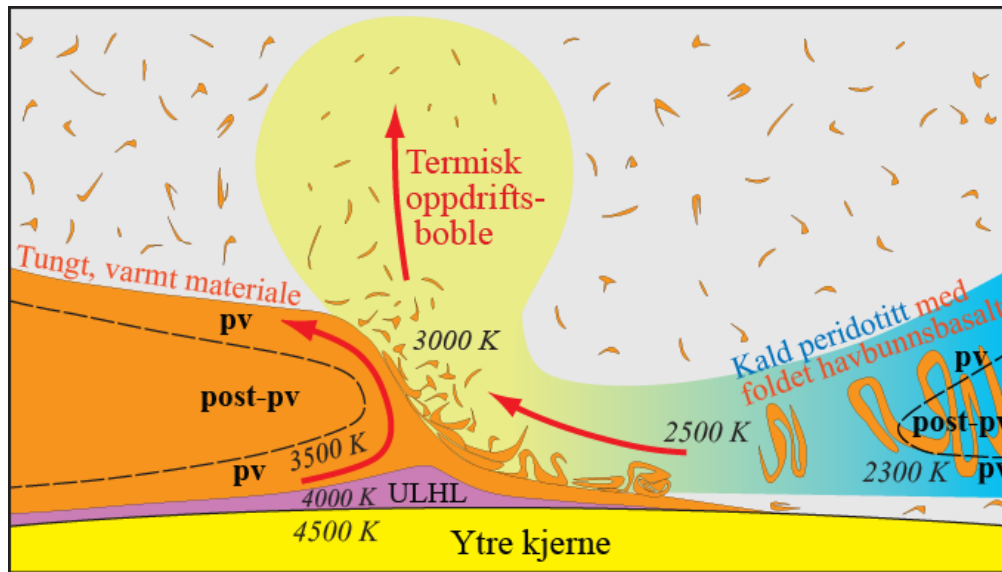


Fig 5: Skjematisert fremstilling av en termisk oppdriftsboble ved randsonen av en av de to lavhastighetsprovinserne. Den nederste tynne oransje sonen over kjernen er et ultra-lavhastighetslag (ULHL). Slike tynne (20-40 km) ULHL-soner finnes særlig, men ikke bare, innenfor områdene til de to store lavhastighetsprovinserne under Stillehavet og Afrika og kan representere partier med silikatsmelte. Den fiolette fargen er tungt basaltisk havbunnskorpe som sammen med resten av havbunnsplaten er sunket ned til kjerne-grensen. Figuren viser hvordan store temperaturforskjeller (oppgitt i kelvin) og strømninger legger forholdene til rette for termiske oppdriftssoner langs periferien til partiene med tungt og varmt materiale. Det materialet som ved termisk utvidelse skal få tilstrekkelig oppdrift til å trenge gjennom hele mantelen som en søylestrøm må ha tilstrekkelig lav "kjemisk" tetthet. Peridotitt uten for mye innblanding av tungt basaltisk materiale tilfredsstiller dette kravet. Dette innebærer også at det i de termiske oppdriftssonene trolig foregår en tetthets-basert separering av tungt basaltmateriale og lettere peridotitt. Som figuren viser er stabilitetsfeltet til ppv stort innenfor de basalt-rike lavhastighetshaugene til tross for den høye temperaturen.

Kjemiske vitnespyrd i basaltlava fra dypet

Geokjemikerne har i flere tiår forstått at den delen av mantelen som stadig blir blandet av konveksjon, og prøvetatt gjennom basaltvulkanisme, er utarmet på grunnstoffer som anrikes i silikatsmelter og dermed i basaltisk materiale. Mye av disse grunnstoffene er lagret i kontinental jordskorpe, men dette reservoaret er ikke tilstrekkelig til å forklare den kjemiske ubalansen.

Isotopforholdene for grunnstoffer som neodym, hafnium, osmium og bly tyder på at en smelte-anriket del av mantelen har vokst i omfang siden tidlig i Jordas historie. Det er sannsynlig at dette anrikete og delvis isolerte reservoaret er helt eller delvis sammenfallende med de tunge og varme lavhastighetsområdene under Stillehavet og Afrika. De tynne ultra-lavhastighetslagene (ULHL på figurene) nær kjerne-grensen kan muligens være smelterester etter krystalliseringen av et tidlig magmahav i Jordas indre. I såfall vil en betydelig del av sporelementene som liker seg i silikatsmelte oppholde seg der. I Månens indre finnes tilsvarende krystalliserte smelterester.

Betingelsen for at Jordas mantel som stort sett gjennomgår effektiv blanding og homogenisering kan inneholde delvis isolerte reservoarer er at disse har høy tetthet. Resirkulert basaltisk materiale med høyere tetthet enn peridotitt er en god kandidat. Basaltisk restsmelte er også mer sammentrykkbar enn faste mineraler og vil sannsynligvis ha høyere tetthet enn faste bergarter nederst i mantelen.

En modell for Jordas dype indre

Et forenklet og skjematisert ekvator-snitt gjennom Jorda er vist i Figur 6. Denne fremstillingen er en forenklet syntese av det bildet vi har av Jordas indre struktur og dynamikk i 2008. Forskingen på dette området er inne i en gullalder, og vi kan forvente en rask kunnskapsutvikling drevet av teknologiforbedring, nysgjerrighet, konkurranse og inter-disiplinær samvirking. På terskelen til en mer fullstendig innsikt i Jordas dype indre ser vi mer enn noen gang verdien av samarbeid og kommunikasjon mellom forskere i seismologi, geomagnetisme, mineralogi, materialfysikk og geokjemi.

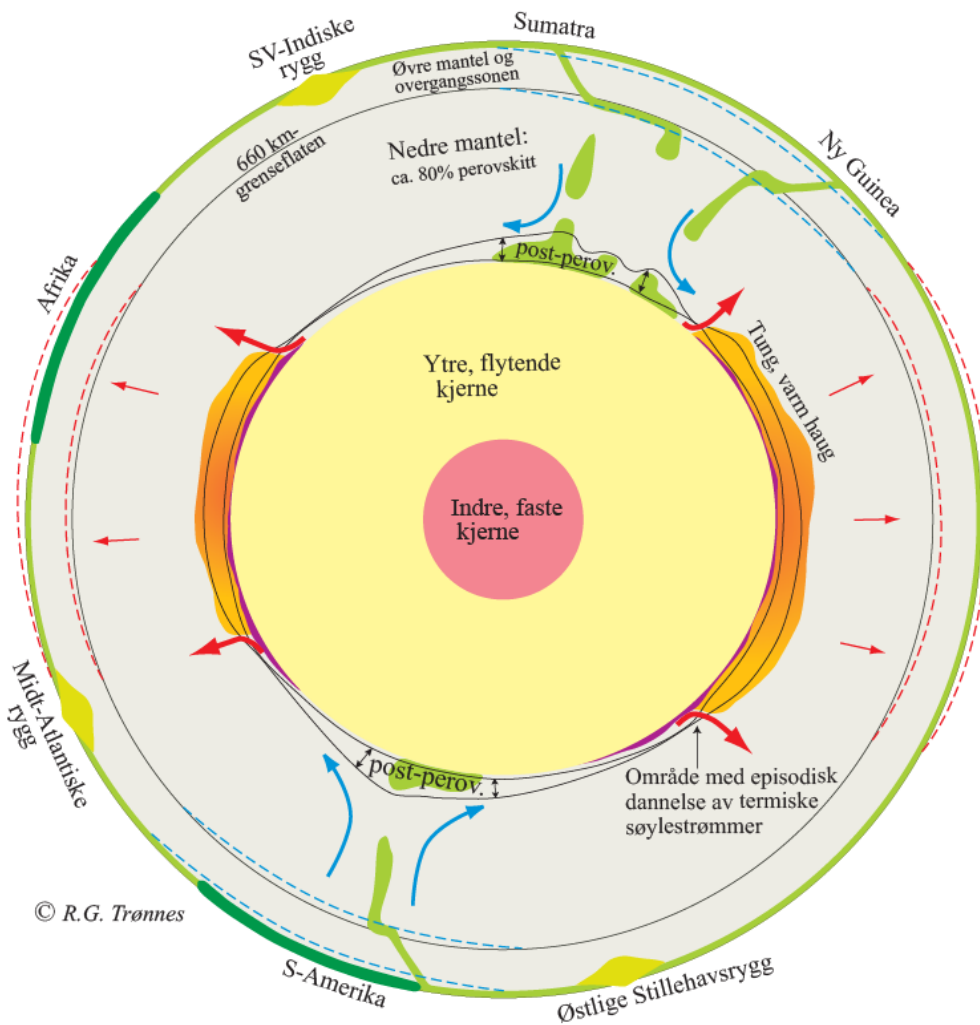


Fig 6: Forenklet og skematisk snitt gjennom jorda, litt sør for ekvator. De blå og røde stiplede linjene markerer, med overdrivelse, høyder og depresjoner på geoiden (Jordas ytre form). Mørk og lys grønn lithosfære er henholdsvis kontinental og oseaanisk. Figuren viser subduksjon ved Sumatra, NyGuinea og Equador-Peru. Tre midthavs-rygger med platespredning er også med i jord-snittet. Grenseflaten mellom overgangssonen og den nedre mantel (660 km-grenseflaten) og stabilitetsfeltet til post-perovskitt er markert med svarte linjer. For et bestemt trykkområde (d.v.s. dyp) utvides stabilitetsfeltet til post-perovskitt ved (1) lavere temperatur og (2) høyere Fe/Mg-forhold og høyere innhold av basaltisk materiale. Derfor er post-perovskittlaget ganske tykt også i de varme områdene som har høyere Fe/Mg-forhold og/eller basaltisk innslag. Blå piler viser synkende mantelstrømmer i kalde områder nær subduksjonssoner og tykke røde piler indikerer områdene der forholdene er gunstige for termisk oppdrift og dannelse av søylestrømmer. De tynne ultralav-hastighets-linsene rett over kjernegrensen har fiolett farge.

Mer informasjon om dette emnet finnes på:
http://www.nhm.uio.no/geomus/homepages/popvit_tronnes.html