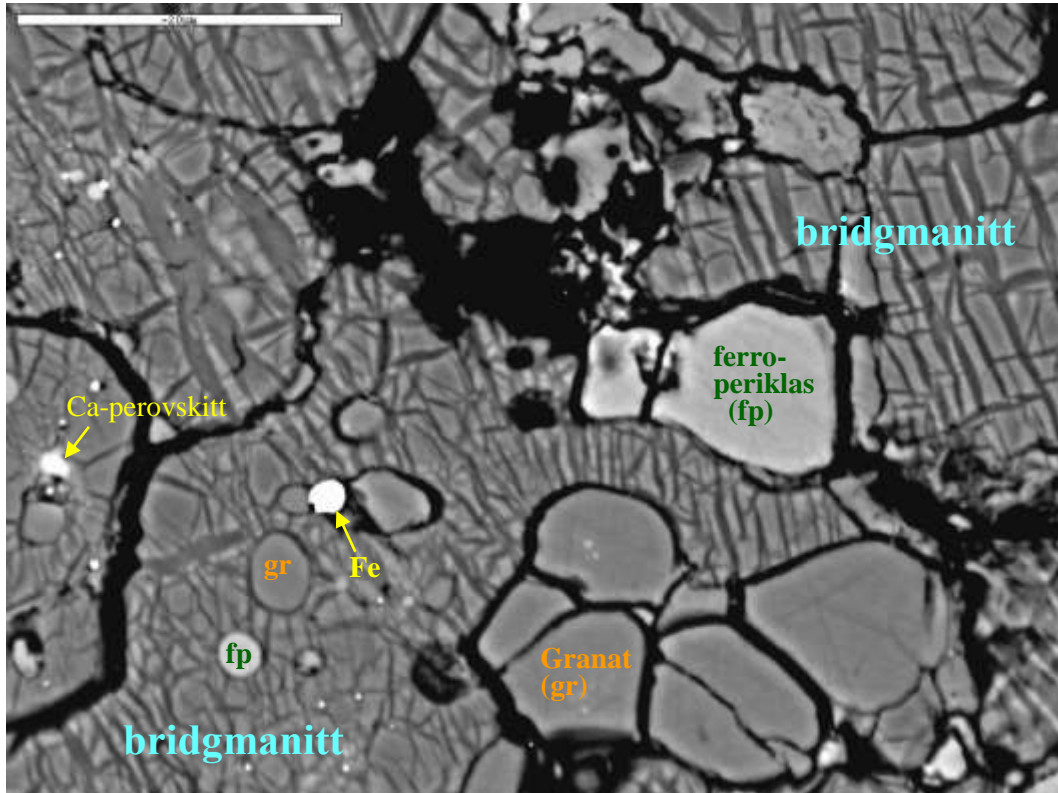


Jordas mest utbredte mineral har fått navn: bridgmanitt

R.G. Trønnes, Naturhistorisk museum og Senter for Jordas utvikling og dynamikk (CEED), Universitetet i Oslo

www.forskning.no, 5. nov. 2014: <http://forskning.no/blogg/reidar-g-tronnes-blogg/jordas-mest-utbredte-mineral-har-fatt-navn-bridgmanitt>

Nesten 40 prosent av Jordas totalvolum består av et mineral som hittil har hatt betegnelsen "MgSiO₃-basert perovskitt" eller "Mg-perovskitt". Mineraliet er nå tilstrekkelig dokumentert i naturlig materiale, slik at det er blitt godkjent av den internasjonale mineralogiforeningen (International Mineralogical Association) med navnet bridgmanitt.



Elektronmikroskop-bilde av mineral-selskapet i bergarten peridotitt ved 25 GPa (gigapascal) trykk. Bildet viser et utsnitt av et eksperimentelt produkt. Den hvite skala-linjalen øverst er 20 μm lang.

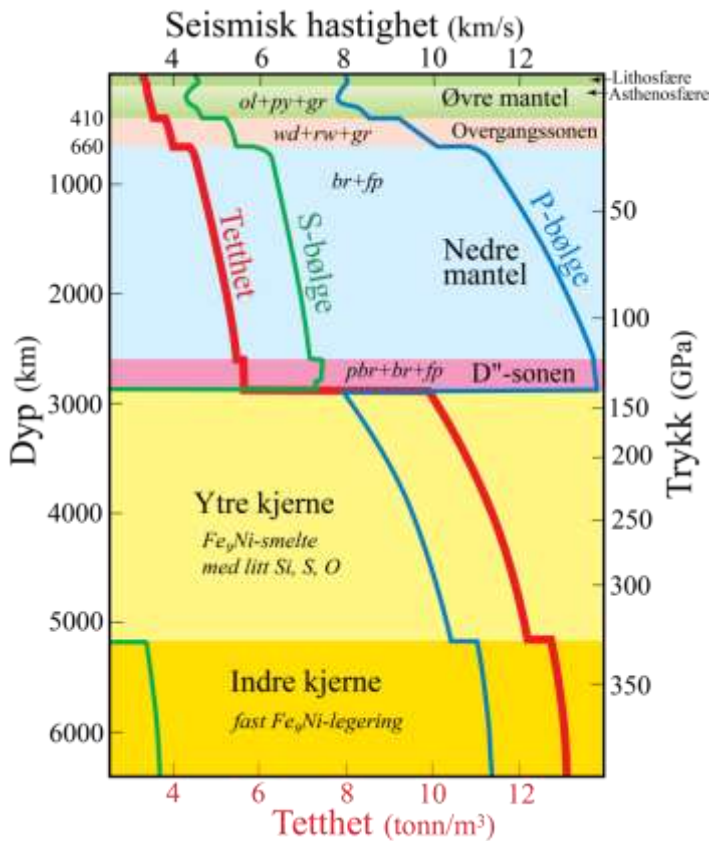
Navnevalget

Det naturlige materialet der bridgmanitt er funnet og karakterisert, er årer med sjokk-smelte i Tenham-meteoritten som falt ned i Queensland i Australia i 1875. Forekomsten av mineraliet i disse årene har vært kjent i minst 17 år (Tomioka & Fujino, 1997), men er nylig dokumentert og beskrevet av Oliver Tschauner, University of Nevada, Las Vegas og Chi Ma, California Institute of Technology (Tschauner & Ma, 2014). De har oppkalt mineraliet etter Percy Bridgman (1882-1961), professor ved Harvard University og vinner av Nobelprisen i fysikk i 1946. Bridgman var en pioner i studier av strukturforandringer i faste stoffer under høye trykk. Disse eksperimentelle undersøkelsene ble senere videreført til materialene i Jordas indre av Bridgman's student, Francis Birch, som ble professor i geologi og geofysikk ved Harvard University.

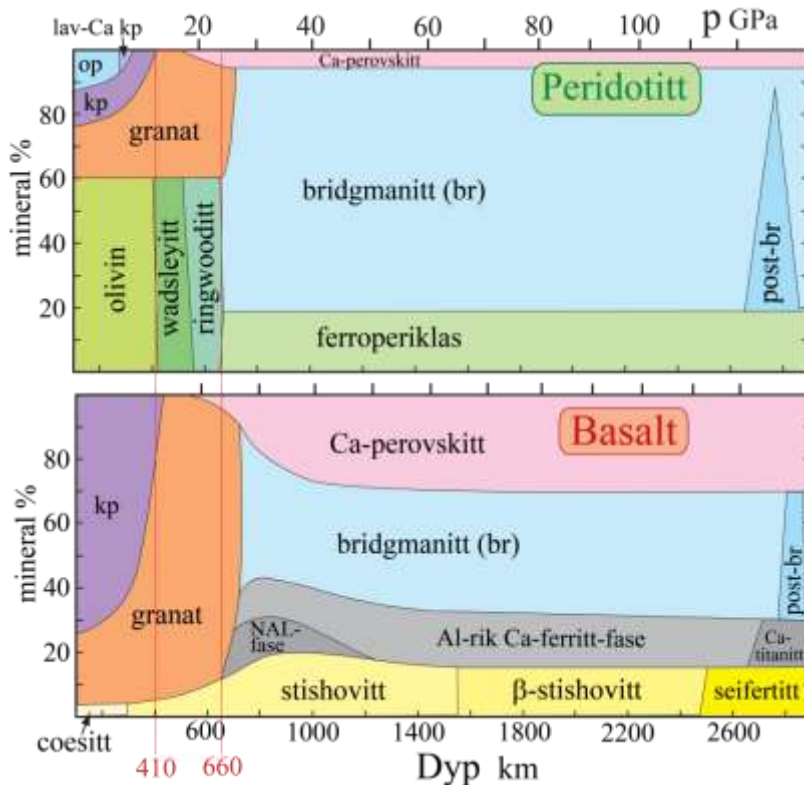
Struktur og materialer i Jordas indre

Vår innsikt i Jordas indre struktur og mineralogi kommer hovedsakelig fra undersøkelser av svingningene utløst av store jordskjelv ("normal modes") samt masse- og tetthetsfordelingen. Jordskjelvbølgene har varierende hastighet gjennom de ulike lagene i mantelen (Fig. 1).

De kjemiske sammensetningene av materialene kan bestemmes ved å sammenligne materialene i ulike stein- og jernmeteoritter, i naboplanetene til Jorda og i Sola (og dermed hele Solsystemet). Fig. 2 viser mineralfordelingen i mantelens hovedbergart peridotitt og i bergarten basalt som resirkuleres tilbake i mantelen som havbunnskorpe. De kalde og tunge havbunnsplatene som beveger seg på overflaten, synker til slutt ned i mantelen der de møter andre jordplater. Dette kalles subduksjon. Havbunnsplatene er omtrent 100 km tykke og inneholder et øvre lag med 6-8 km tykk basaltisk havbunnskorpe over peridotitt. De seismiske grenseflatene på 410, 660 og ca. 2600 km dyp deler mantelen inn i øvre mantel, overgangssone, nedre mantel og D"-sone. Det finnes også en mindre tydelig grenseflate midt i overgangssonen ved ca. 520 km dyp som er knyttet til overgangen fra wadsleyitt til ringwooditt (Fig. 1 og 2).



Figur 1. Jordas indre struktur og materialer (PREM-modellen, Dziewonsky & Anderson, 1981). Seismisk bølgehastighet og tetthet er vist 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. Mineralselskapet i bergarten peridotitt, som dominerer i mantelen, er vist i kursiv med forkortelsene: ol, olivin; py, pyroksen; gr, granat; wd, wadsleyitt; rw, ringwooditt; br, bridgmanitt, fp, ferropriklas, pbr, post-bridgmanitt.



Figur 2. Innholdet av ulike mineraler (volum%) i bergartene peridotitt (dominerende) og basalt som en funksjon av dypet og trykket nedover i mantelen (videreutviklet fra f.eks. Trønnes, 2010). Den kjemiske sammensetningen til hvert av mineralene i mantelen varierer noe, men Mg/Fe-forholdet er omtrent 9. I formlene nedenfor brukes bokstaven M for Mg+Fe. Olivin, wadsleyitt (14-18 GPa) og ringwooditt (18-24 GPa) har alle sammensetning M_2SiO_4 . Pyroksenmineralene omfatter en ortopyroksen $MSiO_3$ (op) og klinopyroksen $CaMSi_2O_6$ (kp). Granat-sammensetningen i den øvre mantelen er omtrent $M_3Al_2Si_3O_{12}$, men sammensetningen endres når pyroksenmineralene tas opp i fast løsning i granaten i overgangssonen. Mineralene bridgmanitt og post-bridgmanitt har begge grunnsammensetningen $MSiO_3$, men kan i tillegg inneholde betydelige mengder Al og treverdige Fe. Ca-perovskitt og ferropriklas er hhv. $CaSiO_3$ og MO . De Al-rike basaltiske mineralene NAL, Ca-ferritt og Ca-titanitt har tilnærmet lik kjemi som ligger nær sammensetningsaksen mellom $MgAl_2O_4$ og $NaAlSiO_4$. Coesitt, stishovitt, β -stishovitt og seifertitt er silika (SiO_2)-dominerte mineraler, men β -stishovitt og seifertitt inneholder i tillegg hhv. 3-4 % og 13-14 % Al_2O_3 . Artikkelen til Solbu (2014) gir et feilaktig inntrykk av at olivin og bridgmanitt ("perovskitt") har lik støkiometri.

Fordi materialstrømmene (konveksjonen) i mantelen og i kjernen sakte men sikkert jevner ut sammensetningen, går vi ut fra at steinmantelen (bergarten peridotitt) og jernkjernen begge er relativt homogene. Den store tetthetsøkningen over grensen mellom mantel og kjerne, fra 5.5 til 9.9 tonn/m³, hindrer blanding av stein- og jernmaterialet. Mantelens tre hoveddeler, avgrenset av de seismiske grenseflatene med raske endringer i tetthet og bølgehastighet, skyldes at kombinasjoner av hovedmineralene blir ustabile og går over til andre mineraler og mineralkombinasjoner som et resultat av den store trykkøkningen innover i Jorda.

Hvordan kjenner vi sammensetningen og mineralogien til Jorda?

Jordas totalsammensetning kan utledes fra en kombinasjon av ulike målinger og observasjoner. Mengdeforholdene mellom grunnstoffene i Solsystemet som helhet gjenspeiles i sammensetningen til Solas fotosfære (det ytre synlige laget av Sola). Denne sammensetningen kan vi måle ganske nøyaktig fra lys-spekteret til solstrålene. De ulike grunnstoffene i fotosfæren absorberer karakteristiske bølgelengder i lyset (fra rødt til fiolett) slik at fotosfærespekteret får mange skarpe "hull". Dybden og bredden til disse hullene viser hvor mye det er av de ulike grunnstoffene. Den andre viktige kilden til informasjon om Jordas totalsammensetning er de primitive meteorittene, spesielt de karbonrike chondrittene av typen CI.

Vi har også mange gjennomsmeltede og separerte (differensierte) meteoritter som representerer byggesteinene til Jorda, Venus og Merkur. Disse meteorittene omfatter f.eks. HED-meteorittene fra den lille protoplaneten, Vesta, SNC-meteorittene fra den store protoplaneten, Mars, og jern-dominerte meteoritter fra kjernene til flere knuste og fragmenterte planetesimaler. Basert på disse puslespillbitene, sammen med våre egne prøver fra Jordas mantel og skorpe, har vi gode holdepunkter for sammensetningen av Jordas mantel og kjerne. I tillegg har vi dokumentert mineralsammensetningen i bergartene peridotitt og basalt gjennom Jordas mantel ved å gjøre eksperimenter ved ulike trykk og temperaturer som svarer til ulike dyp i Jordas indre (Figurene 1 og 2). Overgangen mellom den ytre, flytende og den indre, faste kjernen er fastlagt fra seismologiske målinger og svarer til smeltepunktet av den aktuelle Fe-Ni-legeringen (med litt Si, S og O) ved 330 GPa (gigapascal) trykk. I prinsippet kan vi derfor bestemme den sannsynlige sammensetningen av Jordas kjerne ved å teste smeltepunktene til ulike sammensetninger ved dette trykket. Slike diamantcelle-eksperimenter er i praksis krevende, og mye arbeid gjenstår.

Basaltiske bergarter (fra subduserte havbunnsplater) utgjør trolig mindre enn 5-10% av mantelen. Som vist i Figur 2 utgjør bridgmanitt hele 75% av vanlig peridotitt i den nedre mantelen, som igjen utgjør 54 volum% av Jorda. Basalt har et lavere innhold av bridgmanitt på ca. 40%. Samlet er det derfor litt under 40 volum% bridgmanitt i Jorda. De fysiske og kjemiske egenskapene til dette dominerende mineralet er avgjørende for Jordas utvikling og dynamikk.

Flere mineraler trenger navn

Navnsettingen av hovedmineralet i Jorda vil forenkle kommunikasjonen blant forskerne som arbeider med mineralogi, seismologi og dynamikk i mantelen. Den tidligere betegnelsen MgSiO₃-basert perovskitt var komplisert, men nødvendig, for å skille mineralet fra CaSiO₃-basert perovskitt. Det egentlige mineralet perovskitt som opptrer i Si-fattige magmatiske bergarter, f.eks. nefelinsyenitter og alkalibasalter, har sammensetningen CaTiO₃. CaSiO₃-perovskitt (eller "Ca-perovskitt") og bridgmanitt har begge krystallstruktur som den egentlige perovskitten (CaTiO₃-perovskitt). Fysikere og kjemikere bruker også betegnelsene perovskitt og perovskitt-struktur om de svært mangfoldige materialtypene (med utallige kjemiske sammensetninger) som benyttes som superledere, halvledere og solcellematerialer.

Flere av hovedmineralene i Jordas nedre mantel har krystallstrukturer som ikke overlever tilbakeføring til lave trykk ved Jordas overflate. Dette gjelder særlig CaSiO₃-perovskitt og post-bridgmanitt. Krystallstrukturene til disse mineralene er undersøkt og fastlagt ved hjelp av synkrotron-basert røntgendiffraksjon under høye trykk, innenfor mineralenes stabilitetsområder. Under både rask og sakte dekomprimering brytes disse strukturene ned, og dette vil også skje etter sjokk-betinget høytrykksdannelse som følge av asteroidekollisjoner.

Sjokk-omvandlet meteoritt-materiale på Jordas overflate kan derfor heller ikke inneholde disse mineralene. Derfor bør vi gi CaSiO₃-perovskitt og post-bridgmanitt passende og unike navn. Hittil har IMA (International Mineralogical Association, Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification, CNMNC) vært uvillig til å fravike reglene om at godkjenning av nye mineraler må være basert på forekomster av "naturlig materiale". Det er kanskje hensiktsmessig å gjøre et grasrot-opprør mot denne regelen og gi CaSiO₃-perovskitt og post-bridgmanitt navn uten IMA-godkjenning.

Noen av hovedmineralene i basaltisk materiale under trykkforhold som svarer til nedre mantel (se figur 2) mangler også navn. Dette gjelder de Al-rike mineralene som har sammensetninger nær MgAl₂O₄-NaAlSiO₄-aksen. Disse mineralene med litt varierende sammensetning krystalliserer som heksagonal "New Aluminous Phase" (NAL) samt ortorombisk Ca-ferritt og Ca-titanitt (Figur 2). Oliver Tschauner (pers. meddelelse) har håp om å finne noen av disse Al-rike mineralene i sjokk-omvandlede meteoritter, så i dette tilfellet er det hensiktsmessig å avvete utviklingen.

Problemet med silika-mineralene i basaltisk materiale er allerede løst. Stishovitt (TiO₂-strukturert silika i det tetragonale krystallsystemet) ble dokumentert og navnsatt av Chao et al. (1962). Senere oppdaget vi at økende trykk

fører til at stishovitt gradvis går over til CaCl_2 -struktur med ortorombisk symmetri ved små forskyvninger i atomgitteret (Bolfan-Casanova et al. 2009). Det er derfor trolig uheldig å referere til CaCl_2 -strukturen som et fundamentalt forskjellig mineral. Betegnelsen modifisert stishovitt eller β -stishovitt kan være ideell (O. Tschauer, pers. meddelelse). Ved videre trykkøkning skjer en første-ordens (brå) overgang til α - PbO_2 -strukturert silika, som nylig er dokumentert og beskrevet i Mars-meteorittene Shergotty og Zagami, med det nye navnet seifertitt (El Goresy, 2008).

Stishovitt og seifertitt, samt mineralene wadsleyitt, ringwooditt og akimotoitt ble alle dokumentert og navnsatt relativt kort tid etter at de ble identifisert som hovedmineraler i Jordas overgangssone og nedre mantel basert på høytrykkseksperimenter (Chao et al. 1962; El Goresy, 2008; Binns et al. 1969; Price et al. 1983; Tomioka & Fujino, 1999). Det er derfor på høy tid at Jordas mest utbredte mineral, bridgmanitt, som først ble identifisert og syntetisert for mer enn 40 år siden (Ringwood & Major, 1971; Liu, 1974) også har fått et skikkelig navn.

Rettelse av tidligere artikkel i www.forskning.no

Artikkelen til E.L. Solbu (2014, www.forskning.no) inneholder noen feil og unøyaktigheter. Det norske navnet til det nye mineralet må være bridgmanitt, i tråd med regelen om å bruke endelsen "-itt" som erstatning for den engelske endelsen "-ite". Artikkelen gir også feilaktig inntrykk av at olivin kan gjennomgå en enkel faseforandring til bridgmanitt (såkalt "perovskitt"). Som vist i Fig. 2, vil økende trykk og dyp i mantelen føre til at olivin (M_2SiO_4 , der $\text{M} = \text{Mg} + \text{Fe}$) først omdannes til wadsleyitt og deretter til ringwooditt. Ringwooditt kan deretter omdannes til bridgmanitt + ferropriklas ved reaksjonen: $\text{M}_2\text{SiO}_4 = \text{MSiO}_3 + \text{MO}$.

Referanser

- Binns RA, Davis RJ, Reed NSBJ, 1969: Ringwoodite, natural $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ spinel group in the Tenham meteorite. *Nature* 221, 943-944.
- Bolfan-Casanova N, Andrault D, Amiguet E, Guignot N, 2009: Equation of state and post-stishovite transformation of Al-bearing silica up to 100 GPa and 3000 K. *Phys. Earth Planet. Int.* 174, 70-77.
- Chao ECT, Fahey JJ, Littler J, 1962: Stishovite, SiO_2 , a very high pressure new mineral from meteor crater, Arizona. *J. Geophys. Res.* 67, 419-421.
- Dziewonski AM, Anderson DL, 1984) Preliminary reference Earth model. *Phys. earth Planet. Int.* 25, 297-356.
- El Goresy A, Dera P, Sharp TG, Prewitt CT, Chen M, Dubrovinsky L, Wopenka B, Boctor NZ, Hemley RJ, 2008: Seifertite, a dense orthorhombic polymorph of silica from the Martian meteorites Shergotty and Zagami. *Eur. J. Mineral.* 20, 523-528.
- Liu L-g, 1974: Silicate perovskite from phase transformations of pyrope-garnet at high pressure and temperature. *Geophys. Res. Lett.* 1, 277-280.
- Price GD, Putnis A, Agrell SO, Smith DGW, 1983: Wadsleyite, natural β - $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ from the Peace River meteorite. *Can. Mineral.* 21, 29-35.
- Ringwood AE, Major A, 1971: Synthesis of majorite and other high pressure garnets and perovskites. *Earth Planet. Sci. Lett.* 12, 411-418.
- Solbu EL, 2014: Her er mineralet det finnes mest av i jordkloden. www.forskning.no, <http://forskning.no/geofag/2014/06/her-er-mineralet-det-finnes-mest-av-i-jordkloden>
- Tomioka N, Fujino K, 1997: Natural $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}$ -ilmenite and -perovskite in the Tenham meteorite. *Science* 277, 1084-1086.
- Tomioka N, Fujino K, 1999: Akimotoite, $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$, a new silicate mineral of the ilmenite group in the Tenham chondrite. *Am. Mineral.* 84, 267-271.
- Tschauer O & Ma C, 2014: Bridgmanite, IMA 2014-017. *CNMNC Newsletter No. 21*, August 2014, *Mineralogical Magazine*, 78, 797-804.
- Trønnes RG, 2010: Structure, mineralogy and dynamics of the lowermost mantle. *Mineral. Petrol.* 99, 243-261.

Tilleggsinformasjon (etter publiseringen i [Forskning.no](http://www.forskning.no))

Fredag, 28. november, 2014 ble oppdagelses-artikkelen for bridgmanitt publisert i *Science*:

Tschauer et al. (2014): Discovery of bridgmanite, the most abundant mineral in Earth, in a shocked meteorite. *Science* 346, 1100-1102.

I samme utgave publiserte de en nyhetskommentar (Perspectives article) av Thomas Sharp (2014): Bridgmanite - named at last. The most abundant mineral in Earth's interior gets a name. *Science* 346, 1057-1058. Jeg har gjort begge artiklene tilgjengelige i den samme PDF-filen på: <http://folk.uio.no/rtronnes/Publ-pop-sci/Jorda-Indre/Sci14-Tschauer-Bridgmanite.pdf>