

# Magmakammio kapselissa – katsaus kokeelliseen petrologiaan

VILLE J. VIRTANEN

**M**aapallon sisäisestä rakenteesta ja syvällä maan uumenissa tapahtuvista magmaattisista prosesseista on hämmästyttävän hyvä käsitys, kun ottaa huomioon suorien havaintojen puutteen. Maan sisäistä rakennetta voidaan luodata geofysikaalisin metodein, jotka perustuvat lähinnä fysikaalisiin eroihin eivätkä näin ollen tuota suoraa tietoa koostumuksellisesta rakenteesta. Magmaattisia prosesseja taas voidaan arvioida maanpinnalta löytyvistä kivistä ja kiviseurueista geokemiallisten ja termodynaamisten mallien avulla, mutta mallit vaativat luotettavia arvioita siitä, miten systeemi käyttäytyy maan sisällä vallitsevissa paine (P) ja lämpötila (T) -olosuhteissa.

Maan sisäisiä P-T-olosuhteita ja prosesseja pystytään onneksi simuloimaan kokeellisen petrologian metodeilla. Nykyisten laitteiden avulla voidaan tutkia prosesseja maan ja muiden planeettojen pinnoilta jopa maata noin neljä kertaa isomman Neptunuksen ytimen olosuhteisiin asti (Holloway ja Wood 1988, Dubrovinskaia *et al.* 2016). Kokeilla pystytään testaamaan suoraan esimerkiksi sitä, mitkä mineraalifaasit ovat stabiileja missäkin P-T-olosuhteissa, jolloin geofysikaaliset havainnot voidaan tulkita tarkemmin maan koostumukselliseksi rakenteeksi. Geokemialliseen ja termodynaamiseen mallintamiseen tarvittavat parametrit, kuten alkuaineiden jakautumisker-

toimet, eri faasien sulamis-/kiteytymislämpötilat ja ominaislämpökapasiteetit voidaan määrittää kvantitatiivisesti kokeellisin keinoin. Esimerkiksi laajasti käytössä oleva MELTS-mallinnusohjelma pohjautuu tuhansiin kokeellisesti määritettyihin faasitasapainokokeisiin (Ghiorso ja Sack 1995).

Eräs kokeellisen petrologian eduista on myös se, että sen avulla voidaan tutkia mitä tahansa kemiallista systeemiä. Maanpinnalle paljastuneet kivet ovat usein monien päällekkäisten prosessien, kuten fraktioivan kiteytymisen ja assimilaation tuloksia, jolloin niiden kantasulan (*parental melt*) ja lähteen selvittäminen on vähintäänkin haastavaa. Kokeellisessa petrologiassa voidaan kuitenkin tutkia luonnollisten kiviläytteen lisäksi laboratorioissa valmistettavia synteettisiä materiaaleja, joiden avulla voidaan testata esimerkiksi erilaisia kantasulien koostumuksia. Synteettisten materiaalien ei ole myöskään pakko koostua mineraalikiteistä, vaan ne voivat olla tarvittaessa myös nesteitä, laseja, geelejä ja näiden sekoituksia. Myös luonnollisen näytteen sekaan voidaan lisätä vaikkapa vettä fluidiksi tai puhdasta hivenalkuainetta jakautumiskertoimien määrittämisen helpottamiseksi.

Kokeellisen petrologian metodeissa on toki myös puutteita, kuten useimpien geologisten prosessien aikaskaalat, joita on mahdotonta toistaa. Geologisten prosessien kestoa voidaan

toisaalta tutkia esimerkiksi reaktiokinetiikkaan keskittyvien kokeiden avulla. Kemiälliseen tasapainoon pyrkivissä sulatuskokeissa kokeen aikaulottuvuuden rajoitteita pyritään kiertämään esimerkiksi jauhamalla näytteet hienoiksi, jolloin faasien reaktiivinen pinta-ala kasvaa ja vastaavasti kiteytymiskokeissa voidaan käyttää esimerkiksi siemenkiteitä (*seed crystal*, kirjoittajan oma suom.) kasvualustoina (Holloway ja Wood 1988).

## Kokeellisen petrologian historiasta

Ensimmäiset dokumentoidut petrologiset kokeet tehtiin jo 1700-luvun alkupuolella, kun R.A.F. Réaumur tutki metallien ja lasien kiteytymistä kokeellisesti (Edgar 1973). Kokeellisen petrologian isänä pidetään kuitenkin Sir J. Hallia, joka 1700- ja 1800-lukujen vaihteessa auttoi plutonistista koulukuntaa vahvistamaan asemaansa neptunisteja vastaan magma-kivien alkuperää koskevassa väittelyssä suorittamalla kiteytyskokeita basalttisille lasille (Edgar 1973). Seuraavan noin sadan vuoden ajan kokeiden avulla syntetisoitiin mineraaleja ja tutkittiin joitakin magmaattisia prosesseja, mutta kokeet rajoituivat lähinnä maanpinnan paineeseen (Edgar 1973). Korkean paineen kokeiden tärkein alkusysäys tapahtui, kun A.L. Day perusti Geofysikaalisen Laboratorion (*Geophysical Laboratory*) Carnegieen Washingtoniin vuosien 1906 ja 1907 aikana (Eugster 1971).

Geofysikaalisessa Laboratoriossa kokeellisen petrologian parissa on työskennellyt vuosien saatossa monia tunnettuja geologeja, mukaan lukien N.L. Bowen, jonka panosta magmaattisten prosessien ymmärryksessä ei voi kylliksi painottaa. Synteettisille materiaaleille suorittamallaan faasitasapainokokeilla Bowen esimerkiksi todisti, että fraktioiva kiteytyminen on merkittävä prosessi magmaattisessa

differentiaatioissa, että graniitit voivat syntyä basalttisesta sulasta fraktioitumalla ja että assimilaatio ei ole vain yksinkertainen sekoitusprosessi (Bowen 1928). Bowen keräsi kokeista tekemänsä havainnot teokseen *The Evolution of the Igneous Rocks* (Bowen 1928), joka on kiistatta yksi magmapetrologian kaikkien aikojen tärkeimmistä teoksista.

Magmapetrologisien saavutuksien lisäksi Geofysikaalinen Laboratorio on ollut keskeisessä asemassa kokeellisen petrologian laitekehityksessä. Eräs ensimmäisistä mullistavista keksinnöistä 1910-luvulla oli säikäytysmetodin (*quenching method*) kehittäminen, minkä ansiosta jäädytyksen aikainen kemiällinen tasapainottuminen pystyttiin estämään luotettavasti (Edgar 1973). Tulevina vuosikymmeninä Geofysikaalisessa Laboratoriossa kehitettiin useita laitteita kuoren ja ylävaipan yläosan P-T-olosuhteiden tutkimuksiin. Näistä tärkeimpiä ovat nykyäänkin käytetyt kuoren olosuhteisiin soveltuvat kylmäeristetty painesäiliö (*cold seal pressure vessel*, kirjoittajan oma suom.), jota kutsutaan myös Tuttle'n pommiksi (Tuttle 1949), sisältäpäin kuumennettu kaasusäiliö (*internally heated gas vessel*, kirjoittajan oma suom.; Yoder 1950) ja kuoren sekä ylävaipan olosuhteisiin soveltuva mäntäsylinteripuristin (*piston cylinder press*, kirjoittajan oma suom.; Boyd ja England 1960).

Kokeellisen petrologian laitekehitys otti suuria askelia 1900-luvun puolivälissä muuallakin. Vuonna 1958 kehitettiin peräti kaksi erityyppistä laitetta, joiden myötä ylä- ja alavaipan sekä lopulta myös ytimen olosuhteiden tutkimisesta tuli mahdollista. H.T. Hall Brigham Young -yliopistosta Utahista esitteli monialasinkammioita (*multi-anvil cell*, kirjoittajan oma suom.), joilla saavutettiin tarvittava paine aluksi koko ylävaipan ja myöhemmin myös koko alavaipan tutkimiseen (Liebermann 2011).

Ehkäpä vielä merkityksellisempänä edis-

tysaskeleena A.V. Valkenburg ryhmineen kehitteli tullissa takavarikoiduista timanteista *National Bureau of Standardissa* timanttialasimet (*diamond anvil*, kirjoittajan oma suom.; Bassett 2009). Timanttialasimien merkittävin etu muihin laitteisiin nähden on, että näytteessä tapahtuvia muutoksia voidaan tutkia kokeen aikana röntgendiffraktiolla (XRD) timanttien läpinäkyvyyden ansiosta. Timanttien kovuus puolestaan on mahdollistanut tutkimuksen laajentamisen aurinkokuntamme neljänneksi suurimman planeetan, Neptunuksen, sisäyttimeen asti (Dubrovinskaia *et al.* 2016).

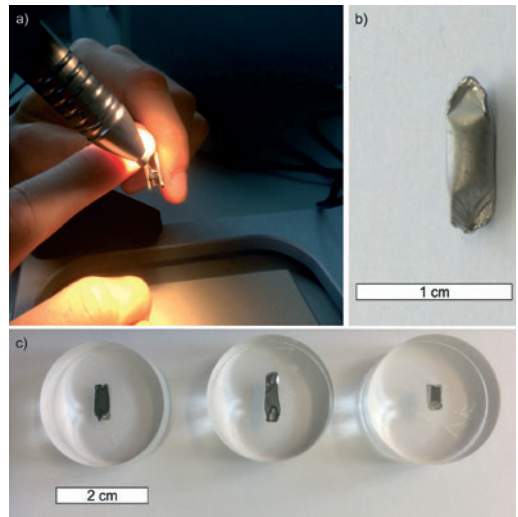
Vuosikymmenien saatossa on kehitetty suurin määrin erilaisia laitteita, ja lisäksi eri laboratorioilla on usein laitteista omiin tarpeisiinsa mukautetut versionsa. Laitteista ja kokeellisesta petrologiasta yleisestikin enemmän kiinnostuneille lukijoille suosittelen alkuun pääsemiseksi teoksia *Experimental Petrology: Basic principles and techniques* (Edgar 1973) ja *Simulating the Earth: experimental geochemistry* (Holloway ja Wood 1988). Tässä katsauksessa esitellään kaksi ETH Zürichissä käytössä olevaa laitetta, joiden avulla pyritään välittämään kuva siitä, miten kokeita tehdään käytännössä.

## Laite-esittelyssä *cold-seal* ja *split-sphere press*

ETH Zürichissä on kattava kokeellisen petrologian laboratorio, jossa tutkitaan maan ja enenevissä määrin myös muiden planeettojen koostumuksia ja prosesseja ([www.geopetro.ethz.ch](http://www.geopetro.ethz.ch)). Tässä esitellään kaksi tutkimuksissa käytettävää laitetta, joiden toiminta perustuu toisistaan poikkeaviin tekniikoihin: yläkuoren P-T-olosuhteisiin suunniteltu *cold-seal* ja vaiipan tutkimukseen tarkoitettu *split-sphere press*. Molempia laitteita varten aloitusmateriaali (esim. luonnollinen kivipulveri tai jauhettu synteettinen lasi) suljetaan näytekapseliin

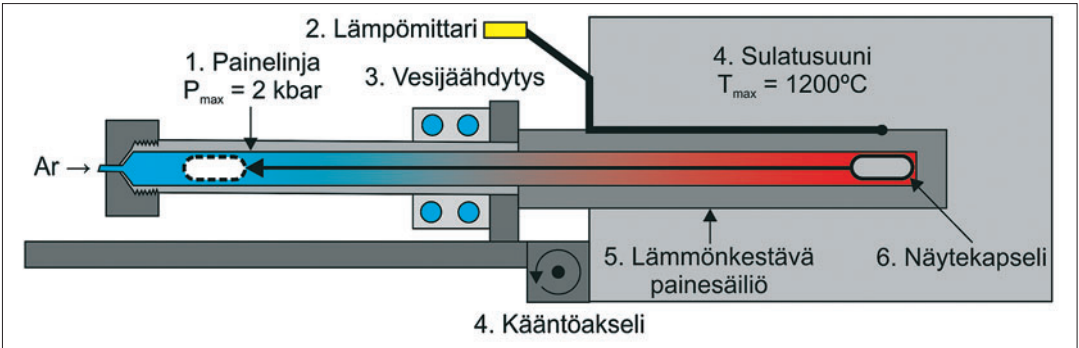
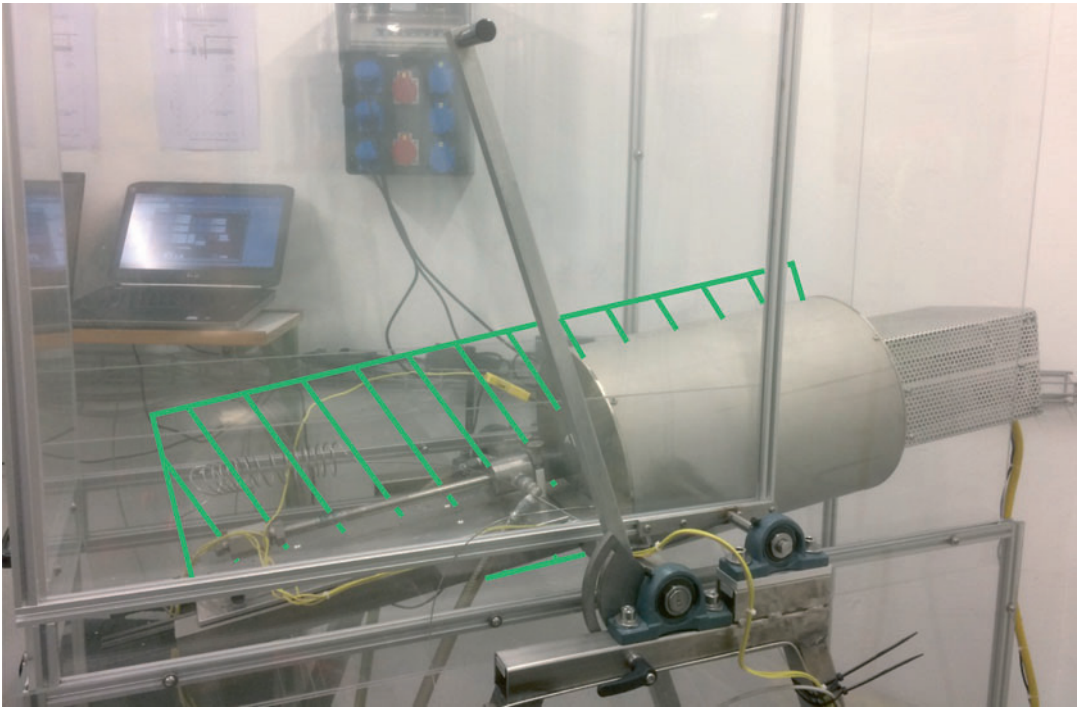
(kuva 1), jonka on pysyttävä kiinteänä faasina kokeen P-T-olosuhteissa ja joka reagoi mahdollisimman vähän näytemateriaalin, erityisesti siinä olevan raudan kanssa. Yleensä hyviä kapselimeriaaleja ovat suuria lämpötiloja kestävä ja kemiallisesti inertit aineet kuten jalometallit (esim. Au, Pd, Pt) ja niiden seokset. Kokeiden jälkeen näytekapselit upotetaan yleensä epoksiin ja hiotaan auki tutkimusta varten (kuva 1).

*Cold-seal*-laitteessa (kuva 2) voidaan käyttää kokeellisessa petrologiassa verrattain suurina näytemääriä, sillä sisään mahtuvan kapselin maksimikoko on 20 × 5 mm. Näytteeseen kohdistuva paine synnytetään pumppaamalla kaasusäiliöön eli pommiin jalokaasua, yleensä argonia, ja lämpötila tuotetaan sähköuunin avulla (kuva 2). Pommeja voidaan valmistaa erilaisista metalliseoksista ja mahdolliset P-T-



Kuva 1. (a) Felix Marxer ETH Zürichistä hitsaa näytekapselia umpeen mikroskoopin alla. (b) Kiinni hitsattu Au-Pd-näytekapseli. (c) Kolme sulatuskokeessa ollutta näytekapselia epoksiin upotettuna ja auki hiottuna.

*Figure 1. (a) Felix Marxer from ETH Zürich welding shut a sample capsule under microscope. (b) Au-Pd sample capsule that has been welded shut. (c) Three sample capsules from melting experiments mounted in epoxy and polished open.*



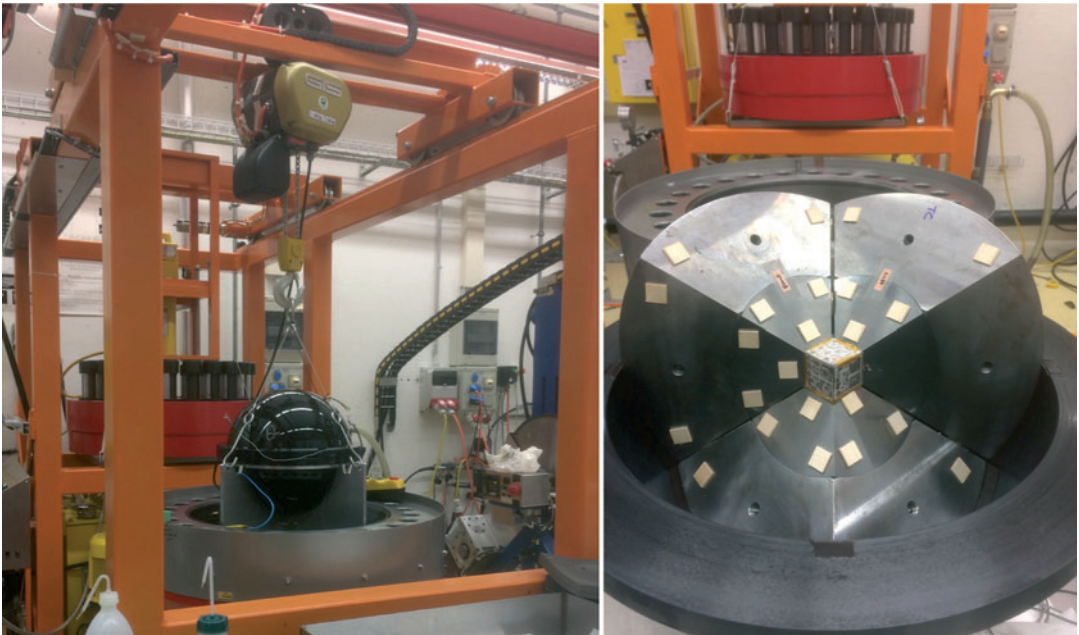
Kuva 2. Ylempässä kuvassa on ETH Zürichin cold-seal -laitteisto ja alempana on kaavakuva ylempään kuvaan piirretty vihreän tason kohdalta. Kokeen alkaessa näytekapseli asetetaan painelinjan sulatusuunin puolella olevaan lämmönkestävään painesäiliöön, jonka jälkeen painelinjaan pumpataan Ar-kaasua. Ylempässä kuvassa oleva plexilasi on kokeen aikana alhaalla, koska painelinja voi räjähtää korkeassa paineessa. Paineistuksen jälkeen sulatusuuni kuumennetaan haluttuun lämpötilaan, jota seurataan lämpömittarin avulla. Painelinjan toinen pää on vesijäähdytyksen ansiosta huoneenlämmössä. Koe pysäytetään kääntämällä koko laitteisto pystyasentoon ylempässä kuvassa näkyvällä vivulla, jolloin näytekapseli putoaa nopeasti painelinjan kylmään päähän ja näytemateriaali säikähtää.

Figure 2. The photo (top) shows ETH Zürich's cold-seal apparatus. The diagram (bottom) is a sketch along the green plane drawn in the top photo. When setting up an experiment, the sample capsule (6) is placed in the heat resistant pressure chamber (5) located in the furnace (4) side of the pressure line (1), after which Ar gas is pumped to the line. The plexiglass seen in the photo is in down position during the experiment, as the pressure line can explode under high pressure. When the pressurizing is complete, the furnace is heated to the desired temperature, which is monitored with a thermometer (2). The other end of the pressure line is kept in room temperature with water cooling (3). The experiment is terminated by turning the whole apparatus into a vertical position with the lever shown in the photo. This makes the sample capsule drop to the cold end of the pressure line, which quenches the sample material.

olosuhteet määräytyvät pitkälti näiden seosten fysikaalisten ominaisuuksien perusteella. ETH:ssä käytettävällä HCM (hafnium-hiili-molybdeeni) -seoksella päästään maksimissaan 2 kbar:iin (n. 8 km:n syvyys) ja 1200 °C:een. Yksi laitteen tärkeimpiä piirteitä on, että vaikka kaasusäiliön uunissa oleva osa on kuumentettu, sen toinen pää on aina huoneen lämpötilassa, mikä mahdollistaa erittäin nopean säikäytyksen (kuva 2). Jäähdytys tapahtuu kääntämällä koko painelinjasto pystysuoraan, jolloin näytekapseli liukuu painekammion kylmään päähän (kuva 2). Tehokas säikäytys on äärimmäisen tärkeää, koska muuten näytteen faasit saattavat jäähdytyksen aikana tasapainot-

tua haluttua alempiin P-T-olosuhteisiin, jolloin koostumukset eivät vastaa enää tutkittuja olosuhteita.

*Split-sphere press*, jota ETH:ssä kutsutaan tavallisemmin nimellä Ämpäri (engl. *Bucket*, kirjoittajan oma suom.), on hyvä osoitus siitä, kuinka monimutkaisia konfiguraatioita korkeiden paineiden tutkimiseen on kehitetty (kuva 3). Kyseinen pallokonfiguraatio kehitettiin vuonna 1953, jolloin ruotsalaisen ASEA:n tutkijat käyttivät sitä valmistessaan maailman ensimmäiset synteettiset timantit (Hazen 1999). Tutkimustuloksia kuitenkin sallittiin seitsemän vuoden ajan, ja kunnia ensimmäisistä synteettisistä timanteista menikin



Kuva 3. Vasemmassa kuvassa ETH Zürichin *split-sphere* -laitteiston kumilla tiivistettyä monialasinpalloa (halkaisija noin 0,5 m) nostetaan öljysäiliöstä. Taka-alalla näkyy öljysäiliön punainen kansi, joka kiinnitetään jättimäisillä mustilla pulteilla. Oikeassa kuvassa kumitiiviste on avattu ja kolme kuudesta uloimmasta alasimesta poistettu. Keskellä näkyvä kuutio koostuu kahdeksasta wolfram-karbidi-alasimesta, jotka ympäröivät kahdeksaa sintteröidyistä timanteista valmistettua kuutioalasinta, joiden keskellä olevaan MgO-oktaedriin on mahdutettu sekä sähköuuni, lämpömittari että näytekapseli.

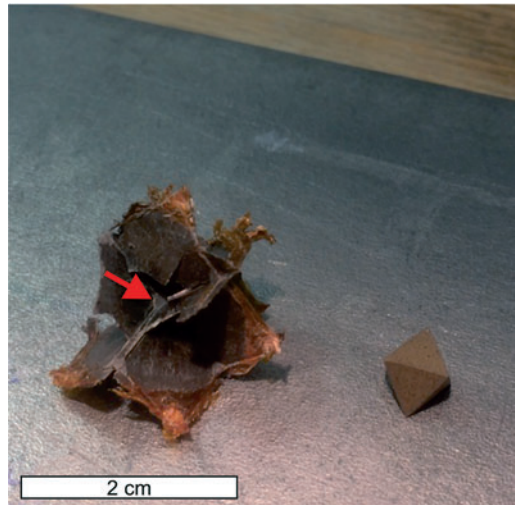
*Figure 3. On the left, ETH Zürich's rubber sealed multi-anvil split-sphere (diameter approximately 0.5 m) is lifted from the oil chamber below. The red lid of the oil chamber, with gigantic black bolts for closing, is visible at the background. On the right, the rubber seal has been opened and three of the six outer anvils have been removed. The cube in the middle is composed of eight tungsten carbide anvils that surround eight sintered diamond cube anvils. In the very center is an MgO octahedron, which further contains an electric furnace, a thermocouple, and the sample capsule.*

*General Electric*:n tutkimusryhmälle, joka valmisti omat timanttinsa vasta kaksi vuotta ASEA:a myöhemmin (Hazen 1999).

Ämpäriässä, kuten lähes kaikissa erittäin korkean paineen laitteissa, paineen saavuttamiseen käytetään pinta-alasuhdetekniikkaa, jossa laajempiin pintoihin kohdistuva voima johdetaan pienempiin pintoihin, jolloin paine kasvaa. Tästä tekniikasta johtuen korkean paineen laitteet ovat kooltaan suuria ja niissä käytettävät näytemäärät erittäin pieniä. Ämpäriässä kumilla tiivistetty monialasinpallo asetetaan kammioon, jonne pumpataan painetta öljyn avulla. Paine ohjautuu ruostumattomasta teräksestä valmistettujen 1/6-pallojen kautta sisempään oleviin kahdeksaan volfram-karbidialasimeen (kuva 3), joista se edelleen siirtyy kahdeksaan sintteröidyistä timanteista valmistettuun kuutioalasiimeen (sivun pituus 14 mm). Timanttialasimien keskelle asetetaan 7 mm:n läpimittainen MgO:sta valmistettu oktaedri (kuva 4) painetta tasaisesti johtavaksi väliaineeksi, ja sen läpi porattuun reikään ehdotetaan sähköuuni (esim. grafiittisylinteri), lämpömittari ja sisimmäksi näytekapseli. Näytekoko on siis erittäin rajallinen, mutta toisaalta se mahdollistaa jopa 400 kbar:in paineen saavuttamisen, mikä vastaa karkeasti 1000 km:n syvyyttä.

## Sulatuskokeet – avain assimilaaion ymmärrykseen?

Käytännön esimerkkinä siitä, miten kokeita voidaan käyttää hyväksi magmapetrologisen ongelman selvittämisessä, kirjoittaja esittelee omaa käynnissä olevaa kokeellisen petrologian tutkimustaan ETH:ssä. Tutkimus suoritetaan osana PALIN-projektia ([blogs.helsinki.fi/jsheinon/author/jsheinon/](http://blogs.helsinki.fi/jsheinon/author/jsheinon/)), ja siinä on tavoitteena selvittää sulatuskokeiden avulla, miten mustaliuske käyttäytyy kun mafinen magma sulattaa sitä. Tutkimuskohteena on Duluthin



Kuva 4. Kuvassa oikealla on MgO-oktaedri, jonka sisälle mahtuu sähköuuni, lämpömittari ja näytekapseli. Vasemmalla on samanlainen MgO-oktaedri, joka on puristettu timanttialasimien väliin split-sphere press -laitteessa. Näytekapselia ei näy, mutta punainen nuoli osoittaa sen sijainnin.

*Figure 4. On the right, an MgO octahedron that can fit an electrical furnace, a thermocouple, and a sample capsule. On the left, a similar MgO octahedron that has been squeezed between diamond anvils in the split-sphere press apparatus. The sample capsule is not visible, but the red arrow points its location*

kompleksi Minnesotassa, jossa mafinen magma on tunkeutunut yläkuoreen, assimiloitunut mustaliusketta ja muodostanut yhden maailman suurimmista Ni-Cu-PGE-sulfidimineralisaatioista (Naldrett 1999). Mafisen magma aiheuttama lämpövaikutus näkyy mustaliuskeessa kontaktaureolina, jossa on merkkejä mineraalimuutoksista ja osittaisesta sulamisesta. Intruusion puolella selvin merkki assimilatiosta on rikin isotooppikoostumus, joka osoittaa, että suuri osa mineralisaation rikistä on peräisin mustaliuskeesta (Ripley ja Al-Jassar 1987). On kuitenkin epäselvää, paljonko mustaliuske on sulanut ja miten sula on tarkalleen vaikuttanut intruusion kemialliseen evoluutioon. Sulatuskokeilla pyritään selvittämään, missä lämpötilassa mustaliuske sulaa, mitkä mineraalit sulavat missäkin vaiheessa,

miten eri mineraalit sulavat ja miten sulakoostumus kehittyi lämpötilan funktiona. Kun nämä tiedot yhdistetään termodynaamiseen malliin mafisen magman potentiaalista sulattaa mustaliusketta ja geokemialliseen malliin koostumuksen kehityksestä, on tuloksena aiempaa tarkempi selitys assimilaation vaikutuksesta intruusion kehitykseen.

Sulatuskokeet on suoritettu edellisessä kappaleessa esitellyllä *cold-seal*-laitteella ja näytekapselimateriaalina on käytetty Au-Pd-seosta. Näytemateriaalina käytettiin kontaktiaureolin ulkopuolelta kerättyä mustaliusketta, jota sulatettiin 2 kbar:in paineessa (kontaktiaureolin mineraaliseurueesta arvioitu assimilaation aikainen paine) ja 700–1100 °C:n lämpötiloissa. Korkeimmissa (1100–1000 °C) lämpötiloissa näytteitä sulatettiin 48 tunnin ajan ja alhaisemmissa lämpötiloissa kemiallisen tasapainotilan saavuttamiseksi aikaa pidennettiin 72 (900 °C), 96 (800 °C) ja 120 tuntiin (700 °C), minkä jälkeen kokeet viimeisteltiin säikäyttämällä. Punnitsemalla näytekapselit ennen ja jälkeen kokeen varmistettiin, että näytemateriaalia ei päässyt karkaamaan kapselista kokeen aikana. Lopuksi kapselit upotettiin epoksiin ja hiottiin auki. Näytteiden sula- ja mineraalikoostumukset on tarkoitut tutkia pääalkuainetasolla pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM) ja elektronimikroproobilla (EPMA) sekä hivenalkuainetasolla laserablaatio induktiivisesti kytketyllä massaspektrometrillä (LA-ICP-MS). Nähtäväksi jää, saadanko sulatuskokeilla vastaukset Duluthin Kompleksin assimilaatiota koskeviin avoimiin kysymyksiin.

## Loppusanat

Geologisissa tutkimuksissa kehittyi usein hypoteeseja, joita on vaikeaa tai lähes mahdotonta todistaa geofysikaalisin, termodynaamisin tai geokemiallisin keinoin. Kokeellinen petrologia tarjoaa geotieteilijöille mahdollisuu-

den testata näitä hypoteeseja missä tahansa maapallon P-T-olosuhteissa ja millä tahansa kemiallisilla koostumuksilla. Tämän katsauksen on tarkoitus herättää ideoita siitä, kuinka kokeellista työtä tehdään ja miten kokeita voisi soveltaa avoimeksi jääneiden tutkimusongelmien selvittämiseksi.

VILLE J. VIRTANEN

Geotieteiden ja maantieteen osasto

PL 64

00014 Helsinki

ville.z.virtanen@helsinki.fi

*FM Ville Virtanen tekee väitöskirjaa Helsingin yliopistossa mafisten kerrosintruusioiden sivukivien sulamisesta. Tutkimus on osa Suomen Akatemian rahoittamaa PALIN-projektia, ja sen keskeisessä osassa ovat ETH Zürichissä suoritettavat sulatuskokeet.*

## Summary

### *Magma chamber in a capsule – overview of experimental petrology*

The internal structure of the Earth and the magmatic processes occurring deep underneath the surface are astonishingly well-understood considering the absence of direct observations. Geophysical methods provide information about physically different domains inside the Earth, but unequivocal answers about compositional variability cannot be provided. On the other hand, magmatic processes can be studied from rocks and rock suites exposed on the surface of the Earth using thermodynamic and geochemical models. The models, however, depend on reliable estimations of how rocks behave in high pressure (P) and temperature (T) conditions present deep within the Earth. The field of experimental petrology enables this behavior to be constrained.

In a typical experiment, sample material (synthetic or natural) is sealed within a heat resistant and chemically inert capsule (Fig. 1) which is then placed inside an experimental apparatus such as a cold seal pressure vessel (Fig. 2) or a split-sphere press (Fig. 3). After the sample has been at the experimental conditions for sufficient time, the experiment is ended by quenching (Fig. 2). The sample capsules can then be collected (Fig. 4), mounted in epoxy and ground open (Fig. 1) for further studies with various geochemical methods.

Experiments on mineral stabilities through wide P–T conditions can supplement the information provided by geophysical observations concerning the compositional structure of the Earth. It is also possible to quantify melting and solidification conditions for various lithologies (e.g., crustal rocks, mantle rocks, and meteorites). In addition, constraints for thermodynamic and geochemical models, such as heat capacities and partition coefficients can be determined experimentally to provide better predictability of magmatic processes (Holloway and Wood 1988).

A wide variety of geophysical and petrological questions that are difficult, or even impossible, to answer with other methods can be tested experimentally. Current experimental methods enable simulating conditions present in the cores of planets as big as Neptune. I encourage everyone, whether geophysicist, geochemist, or metamorphic/igneous petrologist, who has open questions or hypotheses in their research to get acquainted with the possibilities provided by experimental petrology.

## Kirjallisuus

- Bassett, W.A., 2009. Diamond anvil cell, 50<sup>th</sup> Birthday. *High Pressure Research* 29:163–186.  
 Bowen, N.L., 1928. *The Evolution of the Igneous Rocks*. Princeton University Press, Princeton, 332 s.

- Boyd, F.R. ja England, J.L., 1960. Apparatus for Phase-Equilibrium Measurements at Pressures up to 50 Kilobars and Temperatures up to 1750°C. *Journal of Geophysical Research* 65:741–745.  
 Dubrovinskaia, N., Dubrovinsky, L., Solopova, N.A., Abakumov, A., Turner, S., Hanfland, M., *et al.*, 2016. Terapascal static pressure generation with ultrahigh yield strength nanodiamond. *Science Advances* 2:1–12.  
 Edgar, A.D., 1973. *Experimental Petrology: Basic principles and techniques*. Clarendon Press, Oxford, 217 s.  
 Eugster, H.P., 1971. The Beginnings of Experimental Petrology. *Science* 173:481–489.  
 Ghiorso, M.S. ja Sack, R.O., 1995. Chemical mass transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 119:197–212.  
 Hazen, R.M., 1999. *The Diamond Makers*. Cambridge University Press, Cambridge, 258 s.  
 Holloway, J.R. ja Wood, B.J., 1988. *Simulating the Earth: experimental geochemistry*. Unwin Hyman, Boston, 196 s.  
 Liebermann, R.C., 2011. Multi-anvil high pressure apparatus: a half-century of development and progress. *High Pressure Research* 31:493–532.  
 Naldrett, A.J., 1999. World-class Ni-Cu-PGE deposits: key factors in their genesis. *Mineralium Deposita* 34:227–240.  
 Ripley, E.M. ja Al-Jassar, T.J., 1987. Sulfur and Oxygen Isotope Studies of Melt-Country Rock Interaction, Babbitt Cu-Ni Deposit, Duluth Complex, Minnesota. *Economic Geology* 82:87–107.  
 Tuttle, O.F., 1949. Two Pressure Vessels for Silicate-Water Studies. *Geological Society of America Bulletin* 60:1727–1729.  
 Yoder, H.S. Jr., 1950. High-low quartz inversion up to 10,000 bars. *Transactions, American Geophysical Union* 31:827–835.

## Muita lähteitä

- ETH Zürich, Department of Earth Sciences, Institute of Geochemistry and Petrology: <http://www.geopetro.ethz.ch/>  
 PALIN – Partial melting processes at the contact zones of layered intrusions: <https://blogs.helsinki.fi/jsheinon/author/jsheinon>