

Kerrosintruusioiden sivukivien osittainen sulaminen – Suomen Akatemian rahoittama viisivuotinen projekti käyntiin Helsingin yliopistolla

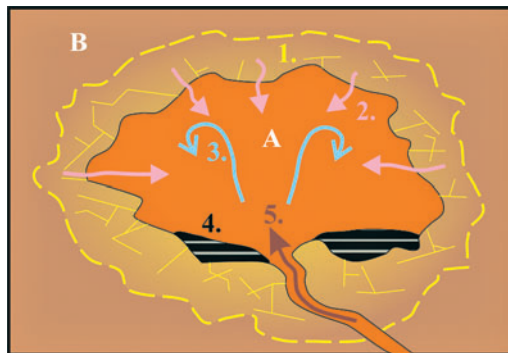
JUSSI S. HEINONEN

Kivisulat ovat merkittäviä energian ja aineen kuljettajia maankuoressa. Emäksisten ja viskositeetiltaan alhaisten kiviluolien kiteytyessä kuorella muodostuu usein mineraali- ja kemialliselta koostumukseltaan vaihtelevista kerroksista koostuvia intruutioita. Nämä niin sanotut kerrosintruusioiden olleet yksi keskeisimpiä petrologian ja taloudellisen geologian tutkimuskohteita – eikä vähiten niiden sisältämien merkittävien metalliesiintymien vuoksi (esim. kupari, nikkeli, kromi ja platinaryhmän jalometallit).

Monien kerrosintruusioihin liittyvien metalliesiintymien syntyyn on vaikuttanut keskeisesti kuumien emäksisten kiviluolien ja sitä ympäröivän kylmän sivukiven vuorovaikutus ja sekoittuminen eli kuoren assimilaatio (esim. Li *et al.* 2001; Spandler *et al.* 2005, Benkó *et al.* 2015). Tämän prosessin etenemisestä sekä fysikaalisista ja kemiallisista seurauksista ei kuitenkaan ole yksityiskohtaista tietoa. Tutkimusta on hankaloittanut fysiikkaa (termodynamiikkaa) ja kemiaa yhdistävien laskennallisten mallien puute. Esimerkiksi kuoren assimilaation mallinnuksessa edelleen runsaasti käytetty AFC (Assimilation - Fractional Crystallization) -yhtälö (DePaolo 1981) on puhtaasti kemiallinen malli eikä millään tavalla huomioi sivukiven osittaista sulamista tai sitä onko laskettu tulos termodynaamisesti mahdollinen.

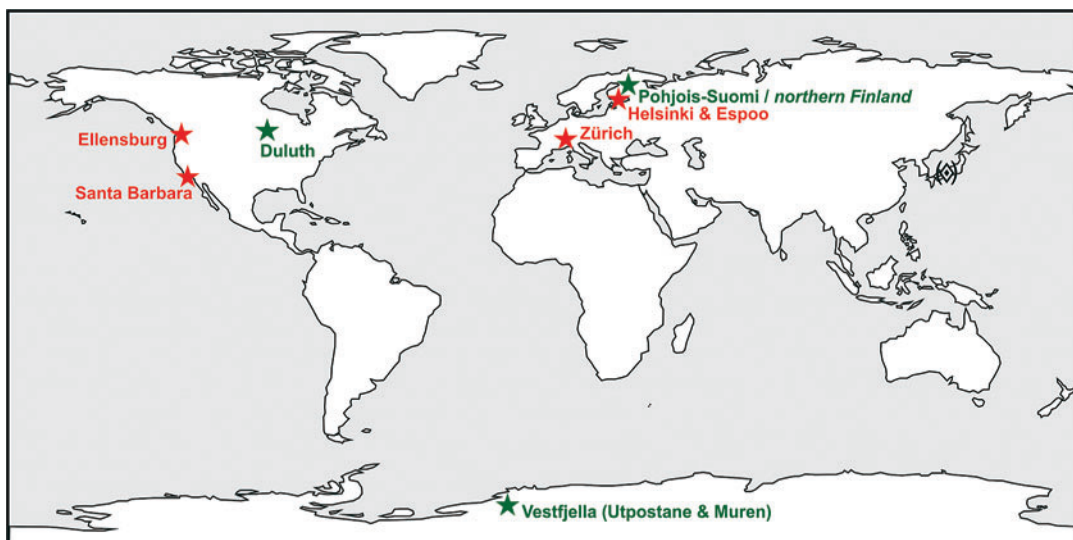
Hiljattain alkaneessa Suomen Akatemian rahoittamassa projektissa ("PALIN – Partial

melting processes at the contact zones of layered intrusions") tutkitaan emäksisten kiviluolien ja sivukivien vuorovaikutusta petrologialtaan, kompleksisuudeltaan, malmipotentialtaan ja iältään erilaisissa ympäristöissä. Tutkimuksessa ovat keskeisessä osassa äskettäin kehitetyt tietokonemallit (Bohrson *et al.* 2014), joille voi antaa sekä kemiallisia että fysikaalisia raja-arvoja (kuva 1). Mallien sovel-



Kuva 1. Kiteytyvän intruusion yksinkertaistettu malli (A = kiviluola; B = sivukivi), jossa kuvattuna siihen liittyviä termodynaamisia prosesseja (muokattu Spera ja Bohrson 2001 pohjalta): (1.) sivukiven lämpeneminen ja osittainen sulaminen, (2.) assimilaatio, (3.) sekoittuminen, (4.) kiteytyminen ja akkumulaatio, (5.) täydennys primitiivisellä magmalla.

Figure 1. A schematic model of a crystallizing intrusion (A = magma; B = wallrock), with an illustration of the associated thermodynamic processes (after Spera and Bohrson 2001): (1.) heating and partial melting of wallrock, (2.) assimilation, (3.) mixing, (4.) crystallization and accumulation, (5.) magma replenishment.



Kuva 2. Projektin tutkimuskohteet (vihreällä) ja -paikat (punaisella) maailmankartalla.

Figure 2. The project case study sites (in green) and the sites of research (in red) on a world map.

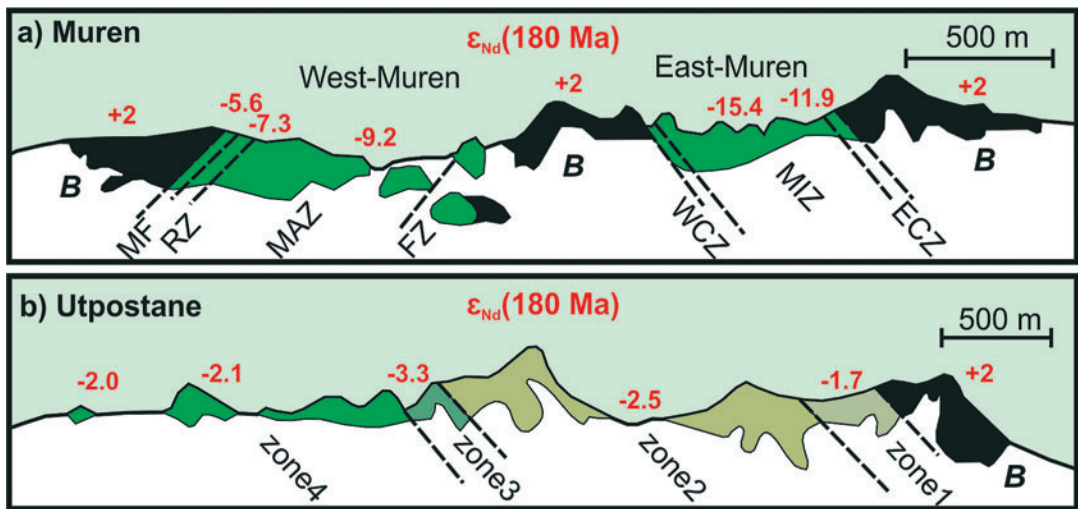
lettavuutta on tarkoitus tarkastella geokemiallisen aineiston ja sivukivien sulatuskokeiden avulla. Näitä erilaisia geotieteiden osa-alueita yhdistävä tutkimus on uutta, ja sen odotetaan tarjoavan merkittävää tietoa suurten magma-säiliöiden ja niihin liittyvien malmiesiintymien synnystä, etenkin intruusion termisen kehityksen ja sivukiven roolista malminmuodostuksessa ja kiteytyvän sulan faasitasapainon muutoksissa.

TUTKIMUSKOHTEET

Tutkimuskohteet (kuva 2) on valittu siten, että niiden suhteen edetään yksinkertaisista yhä monimutkaisempiin systeemeihin. On tärkeää huomioda, että alla luetellut kohteet ovat alustavia ja projektiin on mahdollista sisällyttää muitakin esimerkkitapauksia. Käytännössä mikä tahansa magmaattinen prosessi, johon kuuluu kuoren assimilaatiota, voidaan integroida projektiin, ja yhteistyöstä kiinnostuneita lukijoita kannustetaan olemaan yhteydessä kirjoittajaan.

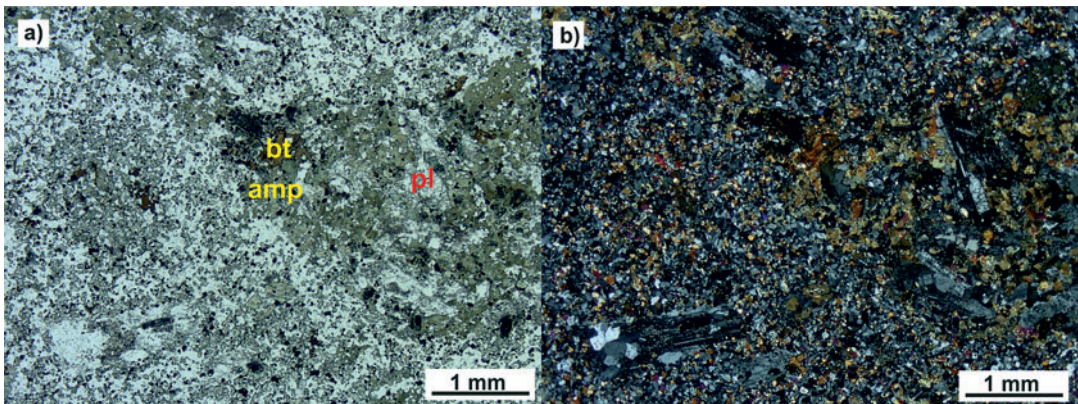
Kohde 1: Utpostanen ja Murenin intruusioiden, Karoon suuren magma-provinssin, Etelämannen

Noin 180 miljoonaa vuotta vanhat Utpostanen ja Murenin gabroidiset intruusioiden (jälkimmäisiä voidaan pitää myös paksuina juonina) leikkaavat samaan magmaattisen tapahtumaan liittyviä Karoon laakiobasaltteja (Vuori ja Luttinen 2003, kuva 3). Alustavan geokemiallisen aineiston perusteella niiden kantamagmat ovat saastuneet kahdessa vaiheessa: ensin prekambriksen pohjakompleksin kanssa syvemmillä kuoressa ja sitten pohjakompleksin päällä lepäävien ja nykyään intruusion kanssa kontaktissa olevien laakiobasalttien kanssa (kuvat 3 ja 4). Mielenkiintoista on, että intruusioiden initiaaliset Nd-isotooppikoostumukset ovat radiogeenisempiä kontaktivöhykkeissä (kuva 3). On vielä epäselvää, johtuuko tämä kemiallisesti köyhtyneempien basalttien assimilaatiosta tai kontaktivöhykkeiden primitiivisemmästä luonteesta, ja siksi nämä verrattaen yksinkertaiset intruusioiden ovat tutkimus-



Kuva 3. Poikkileikkaukset 180 miljoonaa vuotta vanhaan Karoon suureen magmaprovinssiin kuuluvista (a) Murenin ja (b) Utpostanen mafisista intruusioista. Näkymä kohti pohjoista. $\epsilon_{Nd}(180 \text{ Ma})$ tarkoittaa kiven $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ -suhdetta normalisoituna maapallon keskikoostumukseen kiven kiteytymishetkellä (180 miljoonaa vuotta sitten). Lyhenteet Länsi-Murenin (West-Muren) intruusiolle: MF = felsinen reunayksikkö, RF = kattovyöhyke, MAZ = päävyöhyke. Lyhenteet Itä-Murenin (East-Muren) intruusiolle: WCZ = läntinen kontaktivyöhyke, MIZ = keskivyöhyke, ECZ = itäinen kontaktivyöhyke. Kuvan alkuperäisen mallin ja gabrojen isotooppidatan lähde on Vuori (2004) ja basalttien isotooppidatan lähde on Luttinen et al. (1998) ja Luttinen ja Furnes (2000).

Figure 3. Cross-sections of the a) Muren and b) Utpostane mafic intrusions that belong to the 180 Ma Karoo large igneous province. View is towards north. $\epsilon_{Nd}(180 \text{ Ma})$ denotes the $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratio of the rock normalized to Bulk Silicate Earth at the time of its crystallization (180 million years ago). Abbreviations for the West-Muren intrusion: MF = marginal felsic unit, RZ = roof zone, MAZ = main zone. Abbreviations for the East-Muren intrusion: WCZ = western contact zone, MIZ = middle zone, ECZ = eastern contact zone. The illustration and isotopic data for the gabbros after Vuori (2004) and isotopic data for the flood basalts after Luttinen et al. (1998) and Luttinen and Furnes (2000).



Kuva 4. Ohuthiekuvia (a = tasopolarisoitu valo; b = ristipolarisoitu valo) Utpostanen intruusion kontaktivyöhykkeeltä. Hydrotermisesti muuttuneita ja epämääräisiä pääosin biotiitista (bt), amfibolista (amp) ja plagioklaasihajaraakeista (pl) koostuvia basalttiksenoliitteja hyvin hienorakeisessa gabroidisessa kivessä.

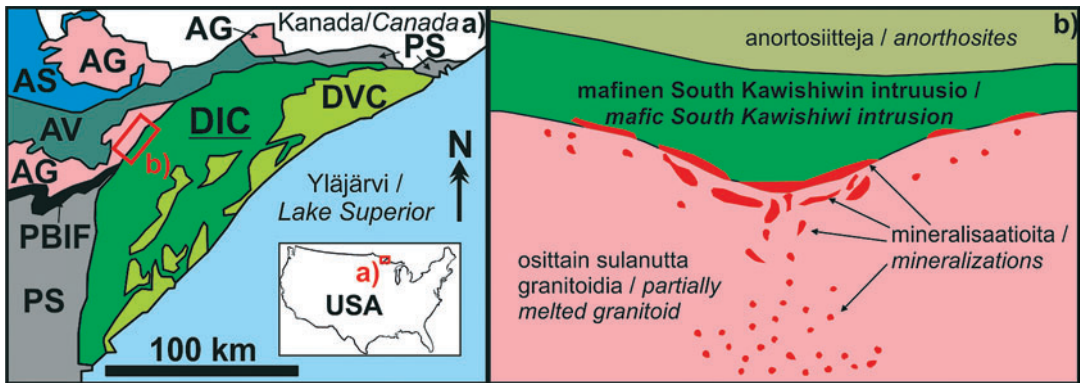
Figure 4. Thin section images (a = plane-polarized light; b = cross-polarized light) from the contact zone of the Utpostane intrusion. Hydrothermally altered and vague basaltic xenoliths mainly composed of biotite (bt), amphibole (amp), and plagioclase phenocrysts (pl) in a very fine-grained gabbroid rock.

sen ensimmäisiä koeympäristöjä. Intruusioiden suhteellisesti helpompaan käsiteltävyyteen vaikuttaa myös merkittävien sulfidimineralisaatioiden puuttuminen.

Kohde 2: Duluthin intruusio-kompleksi, Minnesota, Yhdysvallat

Noin 1100 miljoonaa vuotta vanha Duluthin intruusio-kompleksi ("Duluth Igneous Complex") on yksi suurimmista Cu-Ni-PGE-malminmineralisaatioita sisältävistä intruusio-komplekseista (kuva 5). Se kuuluu myös stratigra-

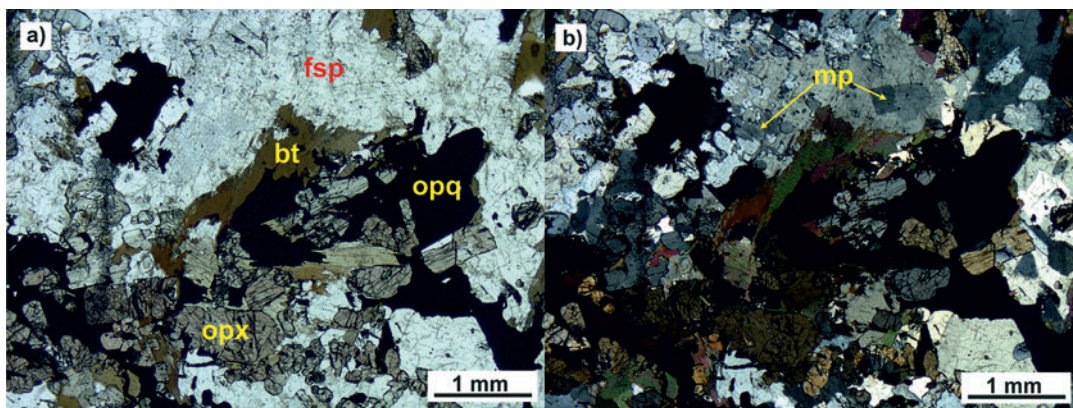
fisesti intruusioiden päällä lepäviä laakiobasalteja sisältävään Keweenawan repeämävyöhykkeeseen ("Keweenawan Rift" tai "Midcontinent Rift"). Emäksisen sulan ja kuoren sivukivien välisellä vuorovaikutuksella on todettu olleen merkittävä rooli intruusion pohjaosissa ja sivukivessä sijaitsevien mineralisaatioiden synnyssä (esim. Ripley ja Al-Jassar 1987, Benkó *et al.* 2015, kuva 6), mutta tätä vuorovaikutusta ei ole yksityiskohtaisesti käsitelty tai mallinnettu. Sulfidimineralisaatioiden sisältämän rikin on arveltu olevan peräisin emäksiseen sulan assimiloimista mustaliuskeista



Kuva 5. (a) 1100 miljoonaa vuotta vanha Duluthin intruusio-kompleksi (DIC) ja Pohjois-Minnesotan geologiaa (DVC = Duluthiin liittyvät vulkaaniset kivet; PS = proterotsooisia metasedimenttejä; PBIF = proterotsooisia raitaisia rautamuodostumia; AS = arkeaisia metasedimenttejä; AV = arkeaisia metavulkaanisia kiviä; AG = Arkeaisia granitoideja). (b) Poikkileikkaus Etelä Kawishiwin intruusiosta ja sen PGE-rikastuneesta kontaktiaureolista osittain sulaneessa arkeaisessa granitoidissa. Alkuperäisen kartan ja mallien lähde on Minnesotan geologinen tutkimuskeskus ja Dean M. Peterson (Duluth Metals Ltd.).

Figure 5. (a) 1100 Ma Duluth Igneous Complex (DIC) and geology of northern Minnesota (DVC = Duluth-related volcanic rocks; PS = Proterozoic metasediments; PBIF = Proterozoic banded iron formations; AS = Archean metasediments; AV = Archean metavolcanic rocks; AG = Archean granitoids). (b) Cross-section of South Kawishiwi intrusion and its PGE-rich contact aureole in partially melted Archean granitoid. After Minnesota Geological Survey and Dean M. Peterson (Duluth Metals Ltd.).

Projektin kuulumisia ja lisätietoa löydät seuraavasta blogista: <http://blogs.helsinki.fi/jsheinon/>



Kuva 6. Ohuthiekuvia (a = tasopolarisoitu valo; b = ristipolarisoitu valo) jalkapuolen arkeeisesta granitoidista, johon on huomattavasti vaikuttanut ("charnockitisaatio" ja osittainen sulaminen) Duluthin kompleksiin kuuluvan läheisen Etelä-Kawishiwin intruusion lämpöenergia. Näyte on kerätty noin 20 m kontaktista. Rautapitoinen ortopyrokseeni (opx) on muodostunut dehydratoitumalla alkuperäisistä granitoidin mafisista mineraaleista (biotitti, "bt" kuvassa a, ja/tai amfiboli). Suurissa maasälpäkiteissä (fs) on merkkejä uudelleenkiteytymisestä ja osittaisesta sulamisesta (pieniä monimuotoisia kalimaasälvästä ja/tai kvartsista koostuvia laikkuja, "mp" kuvassa b). Verkkomaiset opaakit rakeet (opq) koostuvat magneetikisusta, pentlandiitista ja kuparikiisusta ja todennäköisesti kiteytyivät kuumasta sulfidisulasta, joka erkaantui ja tunkeutui granitoidin osittain sulaneisiin vyöhykkeisiin Etelä-Kawishiwin intruusion kiteytyvästä kantamagmasta.

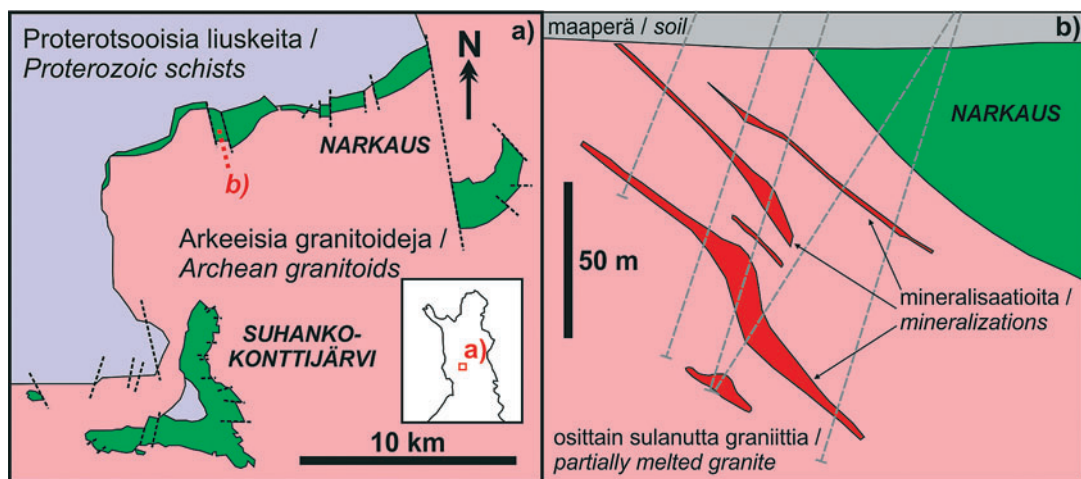
Figure 6. Thin section images (a = plane-polarized light; b = cross-polarized light) of a footwall Archean granitoid that has been heavily influenced ("charnockitization" and partial melting) by the thermal energy released from the nearby South Kawishiwi mafic intrusion, a part of the Duluth Complex. The sample has been collected about 20 m from the contact. Fe-rich orthopyroxene (opx) has been generated by dehydration of original mafic minerals (biotite, denoted by "bt" in a, and/or hornblende) in the granitoids. Large feldspar crystals (fs) show evidence of recrystallization and partial melting (small variably shaped patches of K-feldspar and/or quartz denoted with "mp" in b). The net-textured opaque grains (opq) consist of pyrrhotite-pentlandite-chalcopyrite and most probably crystallized from a high-temperature sulphide melt which was separated and infiltrated into the partially molten zones of the footwall granitoid from the crystallizing parent magma of the South Kawishiwi intrusion.

(Ripley ja Al-Jassar 1987, Queffurus ja Barnes 2014). Vanhasta iästään huolimatta intruusion kivet ovat pääosin hyvin säilyneitä ja siksi niiden petrografiaa ja geokemiaa on vaivatonta hyödyntää tutkimuksessa.

Kohde 3: Fennoskandian suuren magmaprovinssin kerrosintruusioid Pohjois-Suomessa

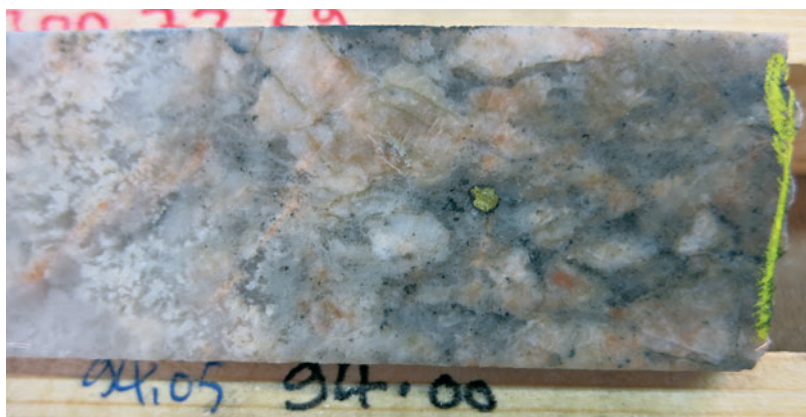
Niin sanotulta Tornio-Näränkävään 300 kilometriä pitkältä itä-länsisuuntaiselta vyöhykkeeltä tunnetaan useita n. 2440 miljoonaa vuotta vanhoja kerrosintruusioita (kuva 7),

joihin liittyy erilaisia metallimineralisaatioita (Iljina ja Hanski 2005). Esimerkiksi Narkuksen intruusion jalkapuolen kontaktin arkeiset kivet ovat osittain sulaneita ja niiden sisällä tavataan mineralisaatioita (kuva 8), joista on mitattu Fennoskandian kilven korkeimpia PGE-pitoisuuksia (Andersen *et al.* 2006). Yhtenä haasteena näiden intruusioiden kehityksen mallintamisessa on niiden kantamagmojen monimuotoisuus sekä monivaiheinen deformaatio- ja metamorfinen historia, mukaan lukien Svekofenninen päällemerkintä (Iljina ja Hanski 2005).



Kuva 7. (a) Narkauksen ja Suhanko-Konttijärven kerrosintruusioiden sijainnit, jotka kuuluvat paleoproterotsooiseen noin 2440 miljoonaa vuotta vanhaan Fennoskandian suureen magmaprovinssiin. Katkoviivat ovat siirroksia. (b) Poikkileikkaus Narkauksen intruusiosta. Harmaat katkoviivat ovat kairareikiä. Muokattu Iljina ja Hanskin (2005) mukaan.

Figure 7. (a) Narkaus and Suhanko-Konttijärvi layered intrusions that belong to the Paleoproterozoic (~2440 Ma) Fennoscandian large igneous province. Stippled lines indicate faults. (b) Cross-section of the Narkaus intrusion. Gray stippled lines indicate drill holes. After Iljina and Hanski (2005).



Kuva 8. Osittain sulanutta Narkauksen intruusion graniitoidista sivukiveä, jossa pieni keltainen kuparikiisurae. Kairasydämen halkaisija on noin 5 cm.

Figure 8. Partially molten granitoid wall-rock of the Narkaus intrusion with a small yellow grain of chalcopyrite. The diameter of the drill core is about 5 cm.

AIKATAULU JA YHTEISTYÖKUMPPANIT

Projekti alkoi syyskuussa 2016 ja päättyi elokuussa 2021; se pohjautuu suurelta osin aiemmin kerättyihin kallioperä- ja kairasydännäytteisiin. Tämän artikkelin kirjoittaja toimii projektin vastuullisena tutkijana, mutta sitä

olisi mahdoton toteuttaa suunnitellussa laajuudessa ilman kansainvälistä infrastruktuuria ja asiantuntijuutta (kuva 2). Keskeisessä roolissa projektissa ovat professori Wendy A. Bohron (Central Washington University, Yhdysvallat) ja professori Frank J. Spera (University of California Santa Barbara, Yhdysvallat), jotka ovat termodynamiikkaa ja kemial-

lisia muuttujia yhdistävien laskennallisten mallien kehittäjiä. Intruusioista ja niiden sivuvivistä kerätyistä näytteistä on tarkoitus tehdä sulatuskokeita ETH Zürichin laboratoriossa Sveitsissä professori Max W. Schmidin opastuksella. Antarktisen, Duluthin ja Fennoskandian intruusoiden geologisen ympäristön asiantuntijoina toimivat FT Arto Luttinen (Luomus, Helsingin yliopisto) ja FT Ferenc Molnár (Geologian tutkimuskeskus). Kivinäytteitä sekä sulatuskokeiden koostumuksia analysoidaan Geologian tutkimuskeskuksen laboratoriossa sekä professori Thomas Wagnerin Helsingin yliopiston geotieteiden ja maantieteen laitokselle hiljattain hankkimilla geanalyttisillä laitteistoilla. Projektiin on tarkoitus palkata tutkijatohtori (yhdeksi vuodeksi) ja tohtorikoulutettava (noin neljäksi vuodeksi) vuodesta 2018 alkaen. Projektin keskuspaikkana toimii pääosin geotieteiden ja maantieteen laitos Helsingin yliopistolla, paitsi vuonna 2017 Central Washington University (Ellensburg WA, Yhdysvallat).

JUSSI S. HEINONEN

Geotieteiden ja maantieteen laitos
PL 64

00014 Helsingin yliopisto
jussi.s.heinonen@helsinki.fi

Kirjoittaja on petrologiaan ja korkean lämpötilan geokemiaan erikoistunut geologi (FT, akatemia-tutkija) ja artikkelissa kuvatus projektin vastuullinen tutkija. Hän viettää vuoden 2017 vierailevana tutkijana Yhdysvaltojen Ellensburgissa, Washingtonin osavaltiossa (Department of Geological Sciences, Central Washington University), Santa Barbarassa, Kaliforniassa (Department of Earth Science, University of California Santa Barbara) ja Duluthissa, Minnesotassa (Natural Resources Research Institute, University of Minnesota).

Summary:

Partial melting processes of layered intrusions – a newly funded Academy of Finland project launches at the University of Helsinki

Magma-wallrock interaction in crustal magma chambers (a process known as crustal assimilation) is critical to the evolution of a magmatic system and the formation of many economically important base and precious metal deposits. Although the generalized crustal assimilation model is largely accepted, the details of the interactions remain relatively poorly characterized. One of the major issues has been the lack of models that integrate mass and energy exchange, thermodynamics and geochemistry. The project titled “Partial melting processes at the contact zones of layered intrusions” proposes to explore magma-wallrock interaction at three major intrusive complexes in Antarctica (Muren and Utpostane, 180 Ma), USA (Duluth, 1100 Ma), and Finland (Fennoscandian LIP, 2440 Ma). The study is a multidisciplinary effort which will include state-of-the-art computational modeling with recently developed energy-constrained equations. The modeling will be tested against existing and new geochemical data, as well as partial melting experiments of wallrock. The results are expected to provide unique insight into the generation of layered intrusions and associated ore deposits. The project is conducted at the University of Helsinki in collaboration with the Geological Survey of Finland, University of California Santa Barbara, Central Washington Universi-

ty, and Swiss Federal Institute of Technology Zürich. The project is funded by the Academy of Finland from September 2016 to August 2021. Proposals for potential collaboration (e.g. additional case studies) are very welcome!

Kirjallisuus

- Andersen, J.C.O., Thallhammer, O.A.R. ja Schoenberg, R., 2006. Platinum-group element and Re-Os isotope variations of the high-grade Kilvenjärvi platinum group element deposit, Portimo layered igneous complex, Finland. *Economic Geology* 101:159–177.
- Benkó, Z., Mogessie, A., Molnár, F., Severson, M.J., Hauck, S.A. ja Raič, S., 2015. Partial Melting Processes and Cu-Ni-PGE Mineralization in the Footwall of the South Kawishiwi Intrusion at the Spruce Road Deposit, Duluth Complex, Minnesota. *Economic Geology* 110:1269–1293.
- Bohrson, W.A., Spera, F.J., Ghiorso, M.S., Brown, G.A., Creamer, J.B. ja Mayfield, A., 2014. Thermodynamic Model for Energy-Constrained Open-System Evolution of Crustal Magma Bodies Undergoing Simultaneous Recharge, Assimilation and Crystallization: the Magma Chamber Simulator. *Journal of Petrology* 55:1685–1717.
- DePaolo, D.J., 1981. Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization. *Earth and Planetary Science Letters* 53:189–202.
- Iljina, M. ja Hanski, E., 2005. Layered mafic intrusions of the Tornio–Näränkävaara belt. Teoksessa: Lehtinen, M., Nurmi, P.A. ja Rämö, O.T. (toim.), *Precambrian Geology of Finland – Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield*. Elsevier B.V., Amsterdam, 101–138.
- Li, C., Maier, W.D. ja de Waal, S.A., 2001. Magmatic Ni-Cu versus PGE deposits: Contrasting genetic controls and exploration implications. *South African Journal of Geology* 104:309–318.
- Luttinen, A.V. ja Furnes, H., 2000. Flood basalts of Vestfjella: Jurassic magmatism across an Archaean–Proterozoic lithospheric boundary in Dronning Maud Land, Antarctica. *Journal of Petrology* 41:1271–1305.
- Luttinen, A.V., Rämö, O.T. ja Huhma, H., 1998. Neodymium and strontium isotopic and trace element composition of a Mesozoic CFB suite from Dronning Maud Land, Antarctica: Implications for lithosphere and asthenosphere contributions to Karoo magmatism. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 62:2701–2714.
- Queffurus, M. ja Barnes, S.-J., 2014. Selenium and sulfur concentrations in country rocks from the Duluth complex, Minnesota, USA: implications for formation of the Cu-Ni-PGE sulfides. *Economic Geology* 109:785–794.
- 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.
- Spandler, C., Mavrogenes, J. ja Arculus, R., 2005. Origin of chromitites in layered intrusions: Evidence from chromite-hosted melt inclusions from the Stillwater Complex. *Geology* 33:893–896.
- Spera, F.J. ja Bohrson, W.A., 2001. Energy-constrained open-system magmatic processes I: General model and energy-constrained assimilation and fractional crystallization (EC-AFC) formulation. *Journal of Petrology* 42:999–1018.
- Vuori, S.K., 2004. Petrogenesis of the Jurassic gabbroic intrusions of Vestfjella, Dronning Maud Land, Antarctica. Väitöskirja. Helsingin yliopisto, Gummerus, Saarijärvi, 25 s.
- Vuori, S.K. ja Luttinen, A.V., 2003. The Jurassic gabbroic intrusion of Utpostane and Muren: insights into Karoo-related plutonism in Dronning Maud Land, Antarctica. *Antarctic Science* 15:283–301.