

Karhu kiertää – tuoreimpia geologian alan väitöstutkimuksia



Kuva: Henrik Kalliomäki

19.11.2021 Heider Al Humadi,
Turun yliopisto

Geochemistry of felsic, mafic and ultramafic rocks in the supra-subduction zone Mawat ophiolite, Northeast Iraq (Koillis-Irakissa suprasubduktiovyöhykkeellä muodostuneen Mawatin ofoliitin felsisten, mafisten ja ultramafisten kivien geokemia)

The Mawat ophiolite (Figure 1) is a remnant from the Neotethyan oceanic lithosphere exposed within the Zagros Suture Zone, northeastern Iraq. This thesis focuses on the evolution of the mantle-derived magma and their temporally and spatially associated evolution during the late Cretaceous-Eocene. The isotope geology in Mawat is based on zircon and monazite U–Pb dating, and zircon Hf isotopes from felsic dykes and a gabbro. The zircon results give ages between 222 and 38 Ma interpreted to be related to radiogenic

Pb mobility and Pb loss. The monazite 94.6 ± 1.2 Ma age is considered as a crystallization age of the felsic dykes and the oldest zircons in gabbro provide the age of 81.2 ± 2.5 Ma which is the crystallisation age of the gabbro. The gabbro is interpreted to be related to later rifting above the suprasubduction zone. The youngest ages ~ 40 Ma are related to crustal extension. The negative zircon initial ϵ_{Hf} values for the felsic dykes indicate that the magma comes from an older source. The positive zircon initial ϵ_{Hf} values for gabbro suggest that the magma comes from a juvenile source.

The felsic dykes occur in two types: tonalites and granites. The dykes also occur in the western part as a plagiogranite and the central part as a leucogranite. Both types are mixed in various proportions in the east. The eastern tonalities are weakly peraluminous to metaluminous and are low in K_2O , TiO_2 , and high in Na_2O . They have low MgO, Cr, and Ni contents and low Sr/Y compared to the western ones where these are high and similar to adakites. These were derived by

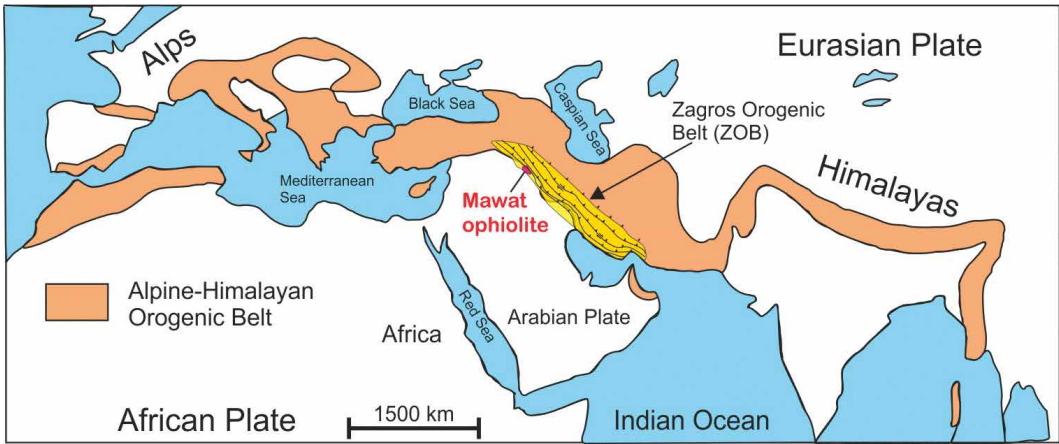


Figure 1. Zagros Orogenic Belt containing the Mawat ophiolite within the large Alpine-Himalayan Orogenic Belt. Figure from the thesis, modified after Furnes et al. (2020, *Geochemical characterization of ophiolites in the Alpine-Himalayan Orogenic Belt: Magmatically and tectonically diverse evolution of the Mesozoic Neotethyan oceanic crust. Earth-Science Reviews*, 208:103258).

Kuva 1. Mawatin ofoliitin sijainti Zagrosin orogeenisessä vyöhykkeessä, joka on osa laaja Alppi-Himalaja-orogeeniavyöhykettä. Kuva on väitöskirjasta, muokattu Furnes ym. (2020, *Geochemical characterization of ophiolites in the Alpine-Himalayan Orogenic Belt: Magmatically and tectonically diverse evolution of the Mesozoic Neotethyan oceanic crust. Earth-Science Reviews*, 208:103258) pohjalta.

partial melting of the subducted oceanic slab. The eastern tonalities underwent hornblende and plagioclase fractionation in a shallow-level magma chamber modifying their original compositions. The eastern granites are strongly peraluminous, moderate to high in K_2O , Pb and Na_2O , and very low in TiO_2 . Their melts are derived from psammitic sediments on the top of the subducted slab. Parental melts of the tonalities and granites partially mixed in shallow magma chambers.

The basalts and ultramafic rocks are extremely depleted in the LILE and some HFSE elements. They plot below the N-MORB reference line suggesting that these elements have been mobile. The basaltic and ultramafic rocks resemble the arc boninites related to subduction initiation setting. This is confirmed with $Ti/1000$ vs. V diagram. This suggests that these rocks formed in the same forearc region. The undepleted pattern of the gabbros plot parallel to the N-MORB reference line and within the MORB field in the V vs. $Ti/1000$ diagram. This is an indication of rifting in an extensional setting

above the subduction zone. The geochemical data is consistent with the tectonic setting for suprasubduction zone ophiolite.

Väitöskirja verkossa: <https://www.utupub.fi/handle/10024/152683>

17.12.2021 Tiina Eskola,
Oulun yliopisto

Myöhäisen keski- ja myöhäispleistoseenin ympäristö- ja jäätiköitymishistoria Pohjois-Pohjanmaalla ja Lapissa (The late Middle and Late Pleistocene environmental and glaciation history of Northern Ostrobothnia and Finnish Lapland)

Skandinavian mannerjäätikkö (SIS) peitti Fennoskandian useita kertoja Pleistoseenin aikana, mutta jäätiköityneiden ja jäästä vapaiden jaksojen tarkkaa lukumäärää, jääkentän laajuutta, täsmällistä aikaa ja kestoa ei ole voitu täysin todentaa Skandinavian mannerjäätikön itä-

simmälle osalle. Monin paikoin on säilynyt vain epätäydellisiä sedimenttisarjoja johtuen useiden jäätiköitymisjaksojen aiheuttamasta eroosiosta ja glasiotektonisesta deformaatiosta. Kattavimmat sedimenttisarjat ovat löytyneet Pohjois-Suomesta ja Keski-Suomen läntisestä osasta, jossa eroosio oli hyvin vähäistä johtuen jäänjakajavyöhykkeen läheisyydestä ja kylmäpohjaisesta jäätiköstä.

Tämän väitöskirjatyön päätavoitteena oli tutkia Veikselin (MIS 5–2) ja myöhäis-Saalen (MIS 6) vaiheiden aikaista muinaista ympäristöä ja jäätiköitymishistoriaa Pohjois-Suomen ja läntisen Keski-Suomen alueilla. Tässä väitöskirjatyössä keskitytään erityisesti siitepölystratigrafiaan ja sen käyttöön korrelaation välineenä muiden stratigrafisten ja geokronologisten tutkimusmenetelmien lisäksi. Sedimenttisarjat kolmesta eri paikasta, jotka sijaitsevat Suomen Lapin pohjois- ja keskiosissa sekä Pohjois-Pohjanmaalla, tutkittiin stratigrafisilla menetelmillä ja erilaisilla ajoitusmenetelmillä. Lisäksi työssä esiteltiin mineraaliainespitoisille sedimenteille soveltuva, turvallisempi raskasneste-erotteluun perustuva siitepölynäytteiden valmistusmenetelmä. Tutkimustulosten perusteella voidaan todeta muunnellun LST Fastfloat -menetelmän antavan vertailukelpoisia tuloksia perinteiseen fluorivetyhappomenetelmään (HF) verrattuna.

Tämä väitöskirjatyö tarjoaa uutta geokronologisesti ja biostratigrafisesti tuotettua tietoa, joka auttaa muodostamaan kattavamman stratigrafisen kuvan Pohjois- ja Keski-Suomesta. Tutkimustulokset osoittavat jääpeitteen edenneen aiemmin uskottua etelämmäksi varhais-Veikselin Herning-stadiaalin (MIS 5d) aikana. Tulokset vahvistavat myös käsitystä jäättömästä keski-Veiksel -vaiheesta (MIS 3). Lisäksi tulokset Kaarrejoelta, Pohjois-Lapista, osoittavat ilmaston olleen aiemmin oletettua lämpimämpi.

Väitöskirja verkossa: <http://jultika.oulu.fi/Record/isbn978-952-62-3179-2>

13.5.2022 Sarianna Salminen,
Turun yliopisto

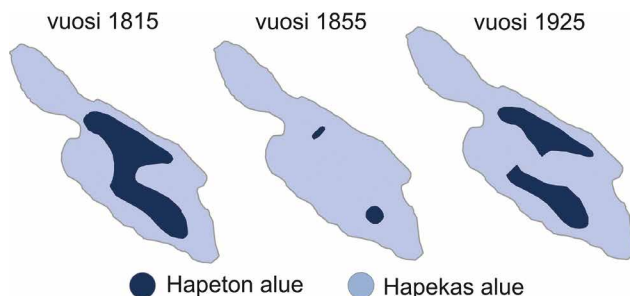
Ihmistoiminnan ja ilmaston vaikutus boreaalisten vuosilustojen ominaisuuksiin ja säilymiseen (Human and climate-induced changes in boreal varve characteristics and preservation)

Tässä väitöskirjassa selvitettiin suomalaisten järvien pohjakerrostumien avulla sitä, miten järvet reagoivat ilmaston ja ihmistoiminnan muutoksiin. Ilmaston ja ihmistoiminnan vaikutusta tutkittiin pohjakerrostumien vuosilustorakenteiden muodostumisen, säilymisen ja ominaisuuksien avulla. Tutkimuksen kohteena olivat Lehmilammen, Vesijärven, Kallio-Kourujärven, Kanteleen, Kuninkaisenlammen ja Linnanlammen pohjakerrostumat. Järvistä kairattiin sekä pitkiä kairanäytteitä että jäsorminäytteitä, joista tehtiin lusto-, alkuaine- ja piileväanalyysjä. Näytteet imeytettiin epoksiin lustojen ominaisuuksien kuten luston paksuuden ja lustojen mikrorakenteiden tutkimusta varten. Näitä ominaisuuksia tutkittiin stereomikroskoopin, petrografisen mikroskoopin ja röntgenkuvien avulla. Lehmilammen ja Vesijärven pohjakerrostumista tunnistettiin piilevät standardimenettelytavan mukaan. Vesijärven pohjakerrostumista mitattiin lisäksi alkuainepitoisuuksia μ XRF:llä. Piileväsiirtofunktiota käytettiin piilevien avulla laskettavan kokonaisfosforin laskemiseksi. Lehmilammen lustojen säilyvyyden spatiotemporaaliseen vaihteluun vaikuttavia ilmastoparametrejä tutkittiin tilastollisten menetelmien avulla. Lisäksi Lehmilammen, Kallio-Kourujärven, Kanteleen, Kuninkaisenlammen ja Linnanlammen lustojen biogeenisen lustonosan paksuuden vastetta ilmastoparametrien muutoksiin tutkittiin tilastollisesti.

Tutkimuksen tulosten perusteella Lehmilammen lustojen säilyvyyden laajuus ja laajuutta vastaava hapettomien vesien tilavuus ovat vaihdelleet viimeisten 200 vuoden aikana

Kuva 2. Vuosilustojen avulla saatiin selville, kuinka hapettomien alueiden laajuus on muuttunut Itä-Suomessa sijaitsevassa tutkimusjärvessä viimeisten 200 vuoden aikana. Kuvassa esimerkki järven pohjan hapettomien alueiden laajuudesta vuosina 1815, 1855 ja 1925.

Figure 2. Varves revealed how the extent of hypoxic areas has varied during the past 200 years in a research lake located in Eastern Finland. Figure shows an example of the extent of hypoxic areas in the lake bottom in 1815, 1855, and 1925.



(kuva 2). Laajuuteen on vaikuttanut erityisesti talven ja maaliskuun lämpötila, syksyn ja lokakuun sadanta, sekä marraskuun lämpötila ja lumipeitteen kesto. Lusto- ja piileväanalyysit viittaavat siihen, että Lehmilammen lustojen säilyvyyden laajuus on ollut ennemminkin riippuvainen ilmastosta kuin ihmistoiminnasta. Vesijärvessä lustojen säilyminen alkoi ihmistoiminnan seurauksena Enonsaaren syvänteen syvimässä osassa 1930-luvun loppussa, ja eteni tämän jälkeen syvänteen matalampiin osiin. Kunnostustoimenpiteiden vaikutuksesta lustojen säilyminen heikentyi ja lustojen ominaisuudet muuttuivat. Järven hapettamisella oli suurin yksittäinen vaikutus lustojen säilymiseen, sillä se johti lustojen säilymisen loppumiseen. Hapettimesta aiheutunut turbulenssi muutti hapettimen läheisyydessä sijainneet kerrostumisalueet kuljetustai eroosioalueiksi, jolloin lustonmuodostus loppui. Lehmilammen, Kallio-Kourujärven, Kanteleen, Kuninkaisenlammen ja Linnalammen biogeenisen lustonosan paksuus on ollut riippuvainen ilmastoparametrien muutoksista viimeisten sadan vuoden aikana huolimatta valuma-alueella tapahtuneesta ihmistoiminnasta. Kasvukauden lämpötila ja jäättömän kauden sateisuus ohjaavat biogeenisen lustonosan paksuutta, mikä mahdollistaa biogeenisen lustonosan paksuuden käytön ilmastorekonstruktioissa.

Väitöskirja verkossa: <https://www.utupub.fi/handle/10024/153707>

30.9.2022 Ville Järvinen,
Helsingin yliopisto

Näränkävään mafis-ultramafisen 2,44 Ga intruusion petrogenesi ja ortomagmaattinen mineraalipotentiali (Petrogenesis and orthomagmatic mineral potential of the mafic-ultramafic 2.44 Ga Näränkävään intrusion, northern Finland)

Kuusamossa sijaitseva Näränkävään paleoproterotsooinen kerrosintruusio on kooltaan 25 km × 5 km ja stratigrafiselta paksuudeltaan noin 3 km. Tässä väitöstutkimuksessa intruusion magmaattista stratigrafiaa, petrogenesiä ja magmaattista malmipotentialia on selvitetty uuden kokokivi- ja mineraalikemiallisen sekä isotooppikemiallisen (Sm–Nd ja U–Pb) datan perusteella.

Näränkävään intruusio koostuu pääosin kahdesta kumulaattisarjasta. Alimpana on 1,5–2 km paksu pohjaduniittisarja (BD), jonka iäksi on tässä tutkimuksessa ajoitettu U–Pb-menetelmällä 2442 ± 1 Ma. Sen päällä on tyypillisempi 1,3 km paksu kerrossarja (LS), jonka iäksi on aiemmin saatu 2436 ± 5 Ma. Näiden kahden kumulaattisarjan välissä sijaitsee noin 20 m paksu, heikosti kehittynyt reunasarjan gabronoriitti (MS), joka on tektonisessa kontaktissa pohjaduniitin kanssa ja vaihettuu kerrossarjaan. Intruusion peridoittiset kivet ovat serpentiiniittyneet, mutta

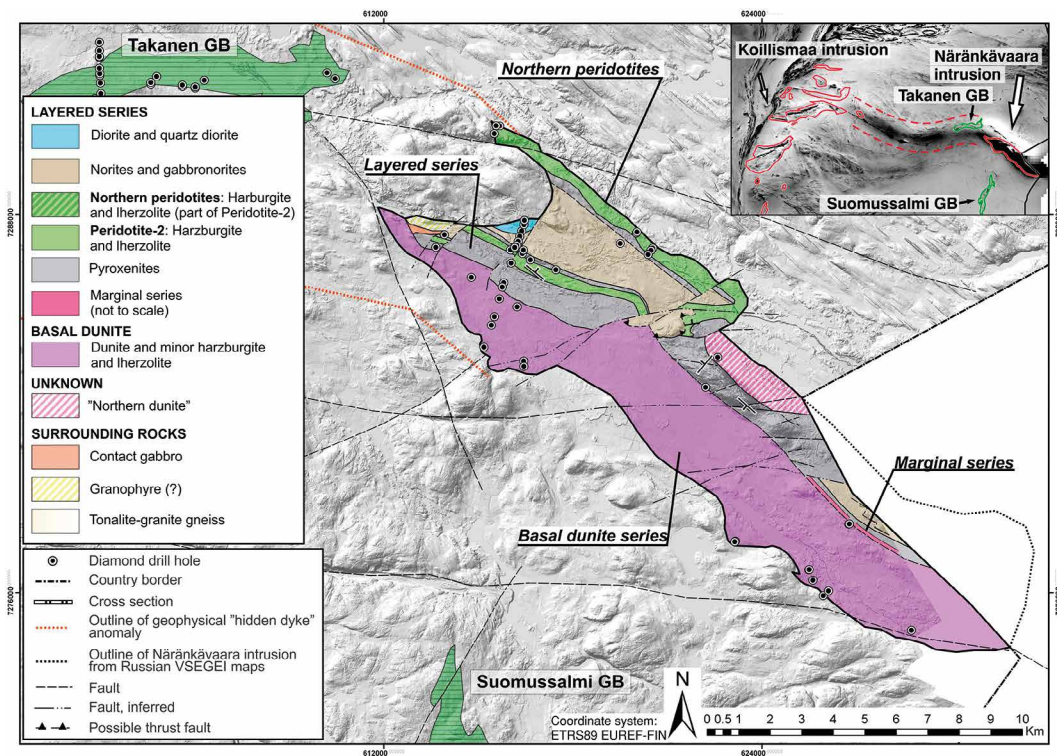
muuten intruusio on lähes muuttumaton ja siirrostumista lukuunottamatta intruusio ei ole deformatunut. Pohjaduniitti koostuu pääasiassa homogeenisista oliiviini-adkumulaateista (tyypillisesti < 3 til.-% interkumulusta), mutta sen eteläinen kontakti arkeeseen pohjakompleksin kanssa koostuu oliiviiniortokumulaateista ja pohjoinen kontakti kerrossarjaan oliiviiniortopyrokseeniheteradkumulaateista. Kerrossarja koostuu peridotiittisesta–pyrokseniittisesta ultramafisesta vyöhykkeestä (UMZ) sekä gabronoriittisesta–dioriittisesta mafisesta vyöhykkeestä (MZ), joista jälkimmäisessä plagioklaasi esiintyy kumulusfaasina. Kerrossarjan stratigrafiasta löytyy kaksi koostumuksellista taantumaa takaisin peridotiittiin koostumuksiin (yksi UMZ:ssa ja yksi MZ:ssa), jotka on tulkittu uusien magmapulssien intrudoitumisen aikaansaannoksiksi. Paikalleen asettuessaan näistä pulseista ensimmäinen (alimmainen) tuotti intruusion pohjoisreunaa vasten kolmannen, verraten pienen peridotiittisen kumulaattisarjan, joka koostuu oliiviiniorto- ja oliiviiniheteradkumulaateista ja muistuttaa paljon pohjaduniittisarjan eteläkontaktin kiviä.

Intruusion etelä- ja pohjoiskontaktien oliiviiniortokumulaatit ovat käänteisesti fraktioituneita ja niiden on tulkittu jäähtyneen verrattain nopeasti. Niiden sisältämän interkumulussulan on tulkittu edustavan karkeasti niiden kantamagman koostumusta. Mallinnuksen perusteella interkumulussulan koostumus on LREE-rikastunut ja runsaasti piidioksidia sisältävä basaltti, jonka MgO-pitoisuus on 13–18 paino-% (nk. SHMB, *siliceous high magnesium basalt*). Tähän verrattuna myös kerrossarjan painotettu keskiarvokoostumus sekä reunasarjan gabronoriitin koostumus ovat hyvin samankaltaisia. Intruusion kantamagman koostumus on siten arvioitu kolmesta erillisestä stratigrafisesta sijainnista. Arvioiden samankaltaisuuteen perustuen voidaan todeta, että intruusio on rakentunut useasta koostumuksellisesti melko homogeenisesta

SHMB-magmapulssista, mikä edelleen viittaa verrattain homogeeniseen magman lähteeseen. Samanlaiset alkuperäiset ϵ_{Nd} -arvot (ka. n. -2) tukevat tätä tulkintaa ja viittaavat myös siihen, että kantamagman kontaminaatio mantereisen kuoren aineksella on tapahtunut ennen intruusion paikalleen asettumista.

Pohjaduniittisarjan keskellä sijaitsee noin 1 km paksuinen interkumulusköyhä (< 3 til.-%) oliiviiniadkumulaattinen vyöhyke. Vyöhykkeen kokokivianalyysien pieni vaihteluväli magnesiumluvun (Mg#) suhteen (85–88) viittaa siihen, että vyöhyke on syntynyt oliivin kumuloitumisen kautta avoimessa magmaattisessa systeemissä. Mallinnuksen perusteella intruusion kantamagmasta (13–18 paino-% MgO) kiteytyy vain 5–9 paino-% Fo_{85-88} oliiviinia, mikä verrattuna vyöhykkeen paksuuteen viittaa suurten magmamäärien läpivirtaukseen vyöhykkeen syntyhetkenä (esim. magmakanavassa). Vyöhykkeestä löytyy myös poikiliittista kromiittia, jota tyypillisesti löydetään kanavoituneista komatiittisista laava-irroista, ja mikä osaltaan tukee tätä tulkintaa.

Noin 50 km pitkä (paljastumaton) positiivinen painovoima- ja magneettinen anomalia yhdistää Näränkävään ja Koillismaan 2,44 miljardin vuoden ikäiset intruusioidet. Anomaliavyöhykkeellä on kairauksissa lävistetty ultramafisia kumulaatteja, ja lisäksi sen päällä sijaitsee Takasen 2,95 Ga vihreäkivijakso. Esitän, että anomalia edustaa kahden pienehkön kratonisen lohkon rajapintaan kehittyneitä pitkäikäistä kuoren läpileikkaavaa rakennetta, jonka myötäisesti vaippaperäiset magmat ovat päässeet kohoamaan yläkuoreen sekä arkeeisena (2,95 Ga) että proterotsooisena aikana (2,44 Ga). Anomaliarakenteen yhdistyy Lapin mantereiseen paleo-kolmoisrepeämään. Hypoteettisesti voidaan olettaa, että suuri määrä vaipan osittaissulaa on syntynyt vaipan pluumin kohotessa Lapin kolmoisrepeämän alla noin 2,44 Ga, missä sijainnut ohut mantereinen kuori olisi sallinut suurimittaisen dekompressiosulamisen. Täten syntyneet mitta-



Kuva 3. Näränkävään intruusion kallioperäkartta; taustalla rinnevarjostettu topografinen kartta (LiDAR korkeusmalli, © Maanmittauslaitos, 6/2022). Kartakkeessa Koillismaa-Näränkävään kerrosintruusiokompleksi rinnevarjostetulla magneettisella anomaliakartalla (tumma väri = korkea totaali-intensiteetti); paleoproterotsooiset intruusioidet ja intruusiolohkot rajattu punaisella, ja kompleksia yhdistävä painovoima- ja magneettinen anomalia korostettu punaisella katkoviivalla; arkeiset vihreäkivivyöhykkeet rajattu vihreällä (GB = greenstone belt).

Figure 3. Bedrock map of the Näränkävään intrusion overlain on a hill-shaded topographical map (LiDAR digital elevation model, © National Land Survey of Finland, 6/2022). Inset shows the Koillismaa-Näränkävään layered igneous complex overlain on a hill-shaded magnetic anomaly map (dark color = high total magnetic intensity); Paleoproterozoic intrusions and intrusion-blocks outlined with red, and the connecting gravity- and magnetic anomaly highlighted with a dashed red line; Archean greenstone belts outlined with green (GB = greenstone belt).

vat vaipan osittaissulat olisivat intrudoituneet em. anomaliarakennetta pitkin Näränkävään, ensin avoimemmassa magmakanasysteemissä (synnyttäen pohjaduniittisarjan), ja magman syötön hiivuttua staattisemmassa magmakammiosysteemissä (synnyttäen kerrossarjan) (kuva 3).

Kanavoituneilla mafisilla-ultramafisilla intruutioilla on tunnetusti korkea Ni-Cu-(Co)-PGE-malmipotentiali. Näränkävään kerrossarjasta löytyy epätaloudellinen, 20–80 m paksu offset-tyyppinen PGE-malmiutuma (Pd/Pt ~3; 200–300 ppm Au+Pd+Pt, maks.

450 ppb), joka on jatkuva >5 km kerrosmyötäisesti UMZ- ja MZ-vyöhykkeiden rajapinnassa. Malmiutuma syntyi fraktioivan kiteytymisen aikaansaaman sulfidifaasin saostumisen kautta. Sulfidia on saostunut vain pieni määrä suhteessa yhtä aikaa kiteytyneisiin silikaatteihin, mikä selittää malmiutuman suuren kerrossaksuuden suhteessa sen mataliin metallipitoisuuksiin. Muutoin intruutio on sulfidiköyhä, eikä muita malmeja ole löydetty. Kantamagman koostumusmäärittäisiin käytetyt kokokivinäytteet ovat sekä metalleista köyhtyneitä että köyhtymättömiä, mikä

viittaa siihen että sulfidisaaturaatio on voitu saavuttaa useasti intruusion historiassa. Pohjaduniittisarjassa tavattu Ni-köyhtymistrendi (suhteessa oliviinin Fo-pitoisuuteen ja kokokiven magnesiumlukuun) voidaan selittää fraktioivalla kiteytymismallilla, jossa oliviinia ja sulfidia fraktioituu magmasta kotteksisessa suhteessa. Mallinnuksen perusteella sulfidisaaturaatio voidaan saavuttaa pohjaduniittisarjassa oliviinin kiteytymisen aikana, jos sen kanta-magmassa oli yli 500 ppm rikkiä. Siten voidaan pitää mahdollisena, että pohjaduniittisarjaan olisi kehittynyt toistaiseksi löytämätön (matalapitoinen) sisäinen pirotteinen Ni-sulfidimineralisaatio. Mafisia-ultramafisia 2,44 Ga vulkaanisia kiviä ei tunneta Pohjois-Suomesta, mutta niitä tunnetaan Vetreny-vyöhykkeestä Venäjältä. Näränkävääraa-tyyppisten metalleista köyhtymättömien 2,44 Ga magmojen intruusio subvulkaanisina kanavina (tai kono-liitteina) S-pitoisiin suprakrustisiin jaksoihin voisi edustaa uutta malminetsintäkohdetta.

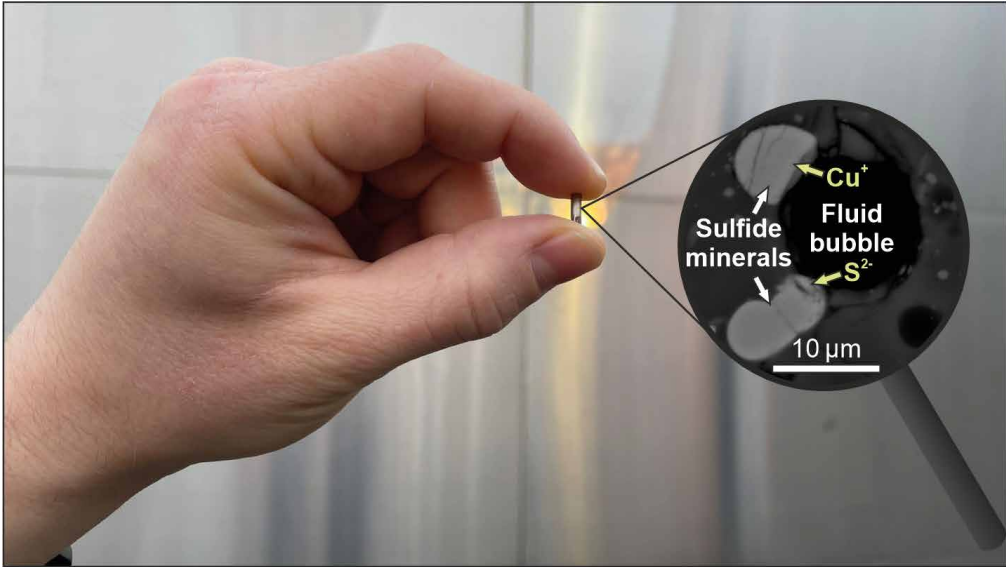
Väitöskirja verkossa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/346823>

23.9.2022 Ville J. Virtanen,
Helsingin yliopisto

Lämpötilariippuvaiset prosessit mustaliuskeissa ja mafisiin intruusioihin liittyvien Cu-Ni(-PGE)-sulfidiesiintymien muodostuminen – esimerkki Duluthin kompleksista, Yhdysvaltojen Minnesotasta (Thermally induced processes in black shales and the formation of Cu-Ni(-PGE) sulfide deposits in and around mafic layered intrusions – an example from the Duluth Complex, Minnesota, United States)

Magmaattiset kuparia (Cu), nikkeliä (Ni) ja platinaryhmän metalleja (PGE) sisältävät Cu-Ni(-PGE)-esiintymät tarjoavat yhteiskunnallemme korvaamattomia raaka-aineita. Yksi maailman suurimmista Cu-Ni(-PGE)-esiintymistä sijaitsee Duluthin magmaattisessa kompleksissa Minnesotassa (USA). Duluthin kompleksi muodostui ~1,1 miljardia vuotta sitten, kun mannerrepeämän seurauksena Maan vaipasta purkautui valtava määrä laavaa (paikoin jopa 10 km:n paksuudelta). Osa vaipasta nousseesta kivisulasta muodosti magmakammioita jähmettyneiden laavakerrosten ja vanhemman kallioperän väliin. Kuuma magma (~1 200 °C) assimiloit eli sulautti itseensä ympäröivän Virginia-muodostuman rikkipitoista mustaliusketta. Rikkipitoisen aineksen assimilaatio muodosti magmaan erillisen sulfidisulan, joka rikasti magmasta metalleja ja synnytti Duluthin kompleksin Cu-Ni(-PGE)-esiintymät. Samankaltaisten prosessien tiedetään vaikuttaneen myös monien muiden magmaattisten metalliesiintymien syntyyn. Sitä miten rikki ja metallit vapautuvat mustaliuskeesta ja miten mustaliuskemateriaalin assimilaatio aiheuttaa sulfidisulan syntymisen magmassa, on tutkittu kuitenkin vain vähän, mikä vaikeuttaa uusien esiintymien löytämistä. Tässä tutkimuksessa etsittiin vastausta näihin kysymyksiin Virginia-muodostuman mustaliuskenäytteiden, laboratoriokokeiden ja tietokonesimulaatioiden avulla.

Laboratoriokokeissa Virginia-muodostuman mustaliuske altistettiin magmaattista assimilaatiota vastaaville lämpötila- ja paineolosuhteille (700–1 000 °C, 200 MPa ≈ 8 km:n syvyys). Kokeet osoittivat rikin ja metallien vapautuvan kahdessa päävaiheessa. Ensin 700 °C:ssa vesipitoisten mineraalien hajoaminen muodostaa ylikriittisen fluidin, joka kykenee liuottamaan sulfidimineraaleista rikkiä ja kuparia sekä kuljettamaan niitä magmaan. Kun prosessia tarkastellaan Virginia-muodostuman mittakaavassa, fluidin kuljettaman rikin määrä



Kuva 4. Havainnekuva laboratorioissa käytetystä kapselistä ja 1 000 °C:n kokeessa havaitusta rakenteesta: sulfidimineraalit ovat rikastaneet itseensä kuparia ja rikkiä niihin kiinnittyneestä fluidikuplasta.

Figure 4. An illustration of a capsule used in the laboratory experiments and of a structure observed at the 1 000 °C experiment: sulfide minerals have scavenged copper and sulfur from the attached fluid bubble.

riittää muodostamaan Duluthin kompleksin tunnetut Cu-Ni(-PGE)-esiintymät. Mustaliuskeen lämpötilan noustessa 1 000 °C:een siinä muodostuu fluidikupliin kiinnittyneitä kuparirikkaita sulfidipisaroita (kuva 4). Matolan tiheyden fluidi kykenee mahdollisesti kelluttamaan sulfidipisaroita magmaan osittain sulan mustaliuskeen läpi ja kasvattamaan esiintymien kokoa.

Termodynaamiset tietokonesimulaatiot osoittivat, että kaikki kemialliset vaikutukset alentavat sulfidin liukoisuutta magmaan mustaliuskeen assimilaatiossa. Tämä edesauttaa erillisen sulfidifaasin erkaantumista. Simulaatiot tukevat hypoteesia, jonka mukaan fluidi toimii pääasiallisena rikin kuljettajana assimilaatiossa, sillä rikki on eristettävä muusta mustaliuskeesta tehokkaan sulfidien muodostumisen aikaansaamiseksi.

Virginia-muodostuman mustaliuskenäytteitä tutkimalla selvitettiin lisäksi, että fluiditoiminta Duluthin kompleksin yhteydessä jatkui vielä kauan magmojen jäähtymisen jälkeen. Fluidit kuljettivat ja saostivat sulfidimineraaleja sopiviin rakenteisiin ja muodostivat lisää Cu-Ni(-PGE)-esiintymiä. Tämän väitöskirjatutkimuksen tulosten perusteella mustaliuskeen kuumentuessa syntyvät fluidit ovat tärkein yksittäinen tekijä magmaattisten Cu-Ni(-PGE)-esiintymien muodostumisen kannalta. Näin ollen uusien esiintymien löytämiseksi olisi tärkeää keskittyä magmaattisten systeemien ympäristön fluidinmuodostuspotentialiin, sekä fluidin kulkeutumiseen soveltuvien rakenteiden tutkimukseen.

Väitöskirja verkossa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/347394>