

Karhu kiertää – tuoreimpia geologian alan väitöstutkimuksia

27.9.2024 Mareike Paul,
Helsingin yliopisto

Tracking deoxygenation and environmental change in coastal depositional environments – A roadmap for reliably using trace metal based (redox)proxies (Happikadon ja ympäristömuutosten jäljitys rannikkoalueiden sedimentaatio-ympäristöissä – ohjeistus hiven-metallien luotettavaan käyttöön hapetus-pelkistys-olojen ilmentäjinä)

Coastal oceans help to regulate the climate, provide important food and mineral resources, and are a key source of oxygen. However, they are under increasing pressure from anthropogenic activities, such as fossil fuel energy production, metal(loid) industry, sewage discharge, transportation emission, and agricultural runoff. These influences combined, can trigger a keychain of processes that ultimately causes the



Kuva: Henrik Kallioniemi

ocean to lose oxygen (“deoxygenation”) and become polluted by contaminants, including metal(oids) (hereafter, trace metals). Despite growing societal demand to protect global oceans, implementing measures to reduce deoxygenation and pollution is strongly limited by an incomplete knowledge on the mechanisms and factors involved in promoting and perpetuating deoxygenation and pollution, as well as patchy environmental monitoring coverage and data availability.

Trace metals entering coastal oceans from natural or anthropogenic sources accumulate in seafloor sediments. Certain groups of trace metals are particularly sensitive to environmental changes, such as varying (de)oxygenation conditions and anthropogenic emission intensities. Upon burial in sediments, such trace metals can store signals of these changes over time, which makes them desirable “proxies” of environmental change. However, besides these primary drivers, additional secondary factors may also influence the behavior of the trace metals, during or after burial. Since the mechanisms

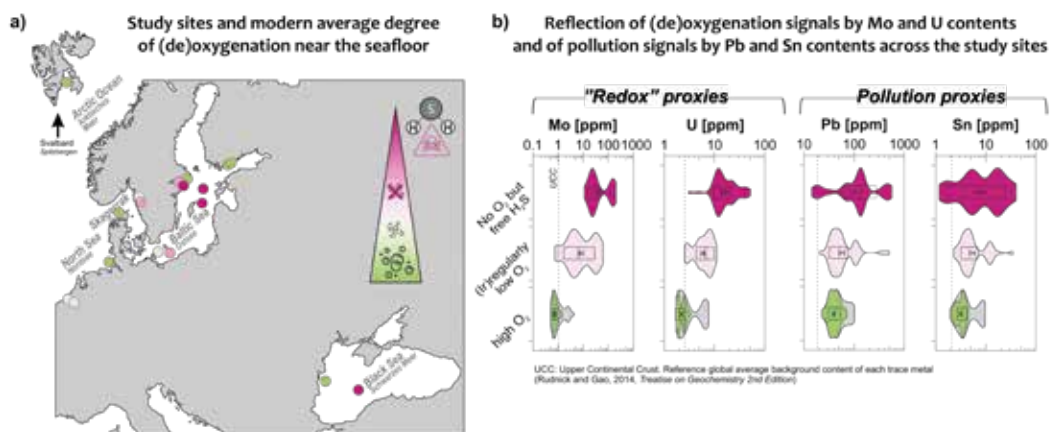


Figure 1. Average bottom water redox conditions at each of the 18 study sites (a). The redox conditions are divided into five redox “bins”: Persistently oxic (dark green, $O_2 > 2 \text{ mL L}^{-1}$), (ir)regularly dysoxic (light green, $O_2 = 0.2\text{--}2 \text{ mL L}^{-1}$), (ir)regularly suboxic (light pink, $O_2 = 0\text{--}0.2 \text{ mL L}^{-1}$), (ir)regularly euxinic (middle pink, $O_2 = 0 \text{ mL L}^{-1}$; $H_2S > 0 \text{ mL L}^{-1}$), and persistently euxinic (dark pink, $O_2 = 0 \text{ mL L}^{-1}$; $H_2S > 0 \text{ mL L}^{-1}$). Enrichment ranges of Mo, U, Pb, and Sn across 10 selected sites (b). Here, all (ir)regular redox bins are considered as one redox bin. Gray areas in the oxic range show metal enrichments at sites with a shallow (5–15 cm sediment depth) sulfate-methane transition zone (SMTZ) causing higher than expected values compared to oxic sites with deeper SMTZs. The UCC values (vertical dashed lines) aid in differentiating natural (crustal) metal contents from excess enrichments (from pollution or deoxygenation).

Kuva 1. Alusveden keskimääräiset redox-olosuhteet 18 tutkimuspisteessä (a). Redox-olosuhteet on jaettu viiteen luokkaan: jatkuvasti hapellinen (tummanvihreä, $O_2 > 2 \text{ mL L}^{-1}$), vaihtelevasti dysoksinen (vaaleanvihreä, $O_2 = 0,2\text{--}2,0 \text{ mL L}^{-1}$), vaihtelevasti suboksinen (vaaleanpunainen, $O_2 = 0,0\text{--}0,2 \text{ mL L}^{-1}$), vaihtelevasti rikkivetypitoinen (punainen, $O_2 = 0 \text{ mL L}^{-1}$; $H_2S > 0 \text{ mL L}^{-1}$) ja jatkuvasti rikkivetypitoinen (tummanpunainen, $O_2 = 0 \text{ mL L}^{-1}$; $H_2S > 0 \text{ mL L}^{-1}$). Mo-, U-, Pb- ja Sn-pitoisuuksien vaihteluväli 10 tutkimuskohteessa (b). Kaikki vaihtelevat redox-olosuhteet on esitetty yhtenä luokkana. Hapellisten alusvesien kategoriassa harmaat alueet edustavat kohteita, joissa sulfaatti-metaani siirtymävyöhyke (SMTZ) sijaitsee lähellä sedimentin pintaa (5–15 cm syvyydellä) aiheuttaen odotettua korkeampia metallipitoisuuksia verrattuna kohteisiin, joissa SMTZ sijaitsee syvemmällä. UCC-arvot (pystysuorat katkoviivat) auttavat erottamaan luonnolliset (yläkuoren) metallipitoisuudet ja happikadon sekä saastumisen aiheuttamat kohonneet pitoisuudet toisistaan.

and importance of these secondary factors on trace metal behavior are not well-understood, trace metal proxies may be less reliable and useful than previously believed.

The thesis aims (1) to reduce the gaps in the monitoring coverage using trace metal proxies, while (2) improving the understanding of trace metal behavior in different coastal ocean environments, and ultimately (3) to ensure a more reliable use of trace metal based environmental proxies. These goals are achieved by measuring the contents of 13 trace metals – grouped into “redox-sensitive” (Mo, Re, U, V) and “anthropogenically

sourced” (As, Cd, Cu, Ni, Pb, Sb, Sn, Tl, Zn) – in sediments of 18 different coastal ocean locations, considering both well-studied and understudied locations (Fig. 1). Besides testing the robustness of existing trace metal proxies, such as Enrichment Factors, this thesis also explores new methods and applications of trace metals (e.g., summed correlation matrices) for investigating past and present environmental changes caused by natural or anthropogenic pressures.

This thesis demonstrates that sedimentary Mo and U can be quite reliably used as redox proxies in different types of coastal ocean

environments and gradients of deoxygenation. Generally, this also applies to overnutrified (eutrophic) and polluted locations under more oxygenated conditions. However, many anthropogenically sourced trace metals (e.g., Zn, Cd, As) also respond to varying levels of (de)oxygenation, which may blur pollution signals stored in these metals and thus, may question their applicability as pollution indicators in coastal sediments. Lesser impacted by this are Pb and Sn, thus making them more reliable pollution indicators. Nevertheless, a network of processes that occur during burial (e.g., co-cycling with Fe and Mn oxides or high hydrogen sulfide contents), or after burial within the sediment (e.g., rate of organic matter degradation or reoxygenation of bottom water) can affect the distribution of all trace metals in the sediment regardless its primary driver (redox or pollution), and thereby reduce their utility as a deoxygenation or pollution proxy.

With a comprehensive trace metal data set and range in methodological approaches presented in three in open-access articles, this thesis provides a roadmap for detecting and circumventing potential pit holes when using trace metals as environmental proxies in coastal ocean settings with varying (de) oxygenation conditions. Further, it enables future studies to faster identify correlations among trace metals and allows to link them to either redox-induced or anthropogenic-induced processes. These findings allow a more reliable use of trace metals as environmental proxies in coastal ocean sediments. Ultimately, this thesis emphasizes the urgent need for including trace metals and coastal ocean environments that are presently understudied to foster the development of countermeasures in protecting coastal oceans from future climatic change and human activities.

Väitöskirja verkossa: <http://hdl.handle.net/10138/585059>

5.11.2024 Fangfang Guo,
Oulun yliopisto

Geochemistry of Archaean and Palaeoproterozoic mafic-ultramafic rocks in NE Fennoscandia and implications for their Ni-Cu-PGE prospectivity
(Arkeisten ja paleoproterotsoisten mafisten ja ultramafisten kivien geokemia Fennoskandian koillis-osassa ja niiden suhde kuparin, nikkelin ja platinametallien löytömahdollisuuksiin)

Northeastern Fennoscandia contains multiple generations of extrusive and intrusive mafic-ultramafic magmatism in the Archaean greenstone belts and Palaeoproterozoic rift-related basins, resulting in the formation of many mineral deposits. This study is focused on the geochemistry of the mafic-ultramafic rocks to constrain the petrogenesis and ore potential of different magmatic events and to identify key factors in ore formation which may have implications for exploration. The study is subdivided into three parts focusing on 1) Archaean komatiites in Russian Karelia, 2) Palaeoproterozoic dyke swarms in NE Fennoscandia, and 3) Palaeoproterozoic basaltic, komatiitic and picritic metavolcanites in several rift-related supracrustal belts in NE Fennoscandia.

Samples of Archaean komatiites and komatiitic basalts from the Vedlozero-Segozero and Tikshozero greenstone belts in Russian Karelia were analysed for their major, trace and chalcophile element contents. The results indicate a lack of both enrichment and depletion of chalcophile elements in the analysed samples. With the exception of localised mobility of Pd, Cu and Au during alteration and metamorphism, the behaviour of platinum-group elements (PGE) in these

rocks is largely consistent with the fractionation of chromite and platinum-group minerals (PGM). The apparent paucity of dynamic lava channel environments, as evidenced by the scarcity of olivine-rich accumulates, and the lack of exposed sulphidic sedimentary rocks in the region leads to the conclusion that the potential of the Archaean greenstone belts in Russian Karelia to host Ni-Cu sulphide mineralisation is relatively low.

During the Palaeoproterozoic, the Karelian craton underwent several rifting events. In this study, they are divided into early (2.5–2.3 Ga), middle (2.3–2.06 Ga) and late (2.06–1.94 Ga) stages of rifting. During the early-stage rifting at 2.5–2.45 Ga, two main magma types were identified in a suite of dykes, siliceous high-magnesian basalt (SHMB) and tholeiitic basalt. The SHMB group shows a large variation in trace element ratios (e.g., La/Sm, Th/Nb) and high initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios from 0.7028 to 0.7036. These features are consistent with crustal contamination of mantle-derived magma, which was confirmed by thermodynamic modelling. The preferred model for the formation of SHMB-group dykes involves crustal contamination of a komatiitic magma in the deeper crust at a pressure of ca. 300 MPa followed by fractional crystallisation at a shallower depth, at a pressure of ca. 100 MPa. In contrast, the magma of the tholeiitic group mainly experienced fractional crystallisation with less crustal contamination.

Based on trace element and isotope characteristics, the SHMB dykes are suitable candidates for the parental magmas to some of the Finnish PGE-mineralised layered intrusions (e.g., Penikat and Portimo), whereas the tholeiitic dykes may represent the parental magma to the Tsipringa layered intrusion in Russian Karelia. Both the SHMB and tholeiitic dyke types are fertile with respect to PGE, suggesting that the magmas remained sulphide undersaturated during mantle melting and en

route to the upper crust. This interpretation is consistent with the fact that most of the ~2.45 Ga Fennoscandian layered intrusions contain PGE mineralisation. Sulphide melt saturation in the dykes and layered intrusions was mostly attained after their final emplacement, likely due to crystal fractionation.

The mafic volcanic rocks of the middle-stage rifting (Jatulian stage, 2.3–2.06 Ga) are contemporaneous with widespread mafic dyke swarms across the Karelian craton. Volcanic rocks from different belts show variable depletion or enrichment in light rare earth elements (LREE). These features probably indicate diverse mantle sources, which have experienced variable extents of earlier melt extraction. New PGE data show that the magmas of this stage in both the Peräpohja and Kuusamo belts are richer in Pt and Pd compared to global basaltic volcanic rocks. However, low Cu/Pd ratios together with high PGE contents and positive correlation between PGE and Cu with Zr, indicate that sulphide saturation did not widely occur at this stage.

In the late-stage rifting event (2.06–1.98 Ga), the magmas in the Central Lapland Greenstone Belt (CLGB) also show unusually high PGE contents, but with a higher Pt/Pd ratio than in the Jatulian stage. Sulphide saturation occurred widely in both primitive and evolved magmas in the CLGB, the Pechenga belt and the Kiiminki belt, reflected by high Cu/Pd ratios and PGE depletion, consistent with the formation of many significant Ni-Cu-(PGE) sulphide deposits in this stage. The oceanic plateau-related mafic volcanic rocks in the Kittilä Belt in Northern Finland show variable PGE contents and Cu/Pd ratios, indicating a PGE-rich primitive magma from which sulphide melt locally segregated. This also indicates some potential for exploration of Ni-Cu-PGE sulphide deposits in palaeo-oceanic environments, though the major deposits are generally considered to have formed in a continental environment.

The unusually high PGE contents (up to 32 ppb Pd and 24 ppb Pt at MgO of 10.8 wt.%) of mafic rocks in both the middle and late rifting stages in NE Fennoscandia is interpreted to be the result of a mantle source enriched in undissolved late veneer. The large variation of the Pt/Pd ratio in these magmas could indicate the contribution of metals from diverse types of meteorites. If correct, the model would imply that the homogenisation of late veneer materials in the Earth's mantle may have been operating until at least Palaeoproterozoic, i.e. much longer than previously considered.

The differences in the ore-formation potential from the early to the late stage of rifting may be largely controlled by the lithospheric structure. During the early stage of rifting the lithosphere was still relatively thick, permissive to the formation of large, slowly cooling magma chambers in which magmas could fractionate extensively to form reef-type PGE sulphide deposits. Progressive extension during the middle stage of rifting weakened and thinned the lithosphere, preventing the formation of large magma chambers in the upper crust. During the late-stage rifting, interaction of magmas with sulphur-rich sediments deposited in deep rift basins allowed the formation of Ni-Cu-dominated sulphide deposits in magma conduits.

Väitöskirja verkossa: https://www.oulu.fi/res-terr/jutut/A50_Guo.pdf

**29.1.2025 Maija Jylhä-Ollila,
Aalto-yliopisto**

**Tekopohjaveden muodostamisen
pitkäaikaisvaikutus veden laatuun
– Orgaanisen aineksen poistuminen
ja siihen liittyvät hapetus-pelkistys-
reaktiot**

(The long-term development of water quality in managed aquifer recharge – Organic matter removal and related redox reactions)

Tekopohjaveden muodostaminen (MAR) on laajasti käytetty menetelmä talousveden tuotannossa. Menetelmän pitkäaikaisvaikutuksia pohjaveteen ei kuitenkaan täysin tunneta. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää veden laadun kehitystä alueella, jossa pintavesi luonnostaan imeytyy maaperään. Tutkimusalueella Hollolassa Suomessa, rantaimetyminen pohjavesimuodostumaan on ollut käynnissä tuhansia vuosia – huomattavasti pitkäaikaisemmin kuin voidaan tutkia tekopohjavesilaitoksilla tai laboratoriotesteillä.

Veden laadun kehitystä tutkittiin määrittämällä järvivedestä ja pohjavedestä lämpötila, orgaanisen ja epäorgaanisen hiilen pitoisuus (TOC, DOC, DIC), happipitoisuus (DO), rauta- ja mangaanipitoisuus sekä laskemalla systeemin hiilitase. Orgaanisen aineksen molekyyli rakenne määritettiin *Fourier transform ion cyclotron resonance* -massaspektrometrillä (FT-ICR MS). Veden laadun kehitys mallinnettiin 1-ulotteisella reaktiivisella kulkeutumismallilla ja mallin herkkyyttä eri parametreille tutkittiin *generalized likelihood uncertainty estimation* -menetelmällä (GLUE).

Luontaisessa rantaimetytyksessä veden laatu vastasi rakennettujen tekopohjavesilaitosten veden laatua. Orgaanisesta aineksesta poistui 80–90 % ja veden laadussa oli havaittavissa lämpötilariippuvainen happi-, rauta- ja mangaanipitoisuuden vaihtelu. Hiilitaseen laskenta osoitti, että 25 % pohjavesimuodostumaan päätyvästä hiilestä oli orgaanista hiiltä ja pääosin järvivedestä lähtöisin. Epäorgaanisesta hiilestä 31 % oli lähtöisin järven pohjasedimentin hajoavasta orgaanisesta aineesta. FT-ICR MS -tulosten perusteella rantaimetytyksessä poistuivat tehokkaimmin happipitoiset yhdisteet, kun taas rikki- ja rauta-yhdisteiden suhteellinen osuus lisääntyi.

Pohjavesimallinnuksen perusteella TOC- ja DO-pitoisuuden kehitys riippui voimakkaimmin virtausnopeudesta, hydrodynaamisesta dispersiviteetistä ja orgaanisen aineksen hapolisesta hajoamiskertoimesta. Näiden lisäksi Fe- ja Mn-pitoisuuksien kehitys oli riippuvaista orgaanisen aineksen reaktionopeuksista mangaanin kanssa, mutta tulos oli vähemmän selkeä.

Johtopäätöksenä todettiin, että MAR on menetelmä, jolla orgaanista ainesta voidaan poistaa vedestä pitkäkestoisesti ilman että poistoteho heikkenee maaperässä. Tulos on menetelmän kestävyys kannalta myönteinen. Tutkimuksessa korostui myös ranta-sedimenttien suuri vaikutus veden laatuun, ja mallinnettaessa MARia rantavyöhykkeen prosessit on sisällytettävä malliin. Hiilitaselaskennalla voidaan hahmottaa rantavyöhykkeen prosessien suuruus. Keskeisten parametrien tunnistaminen auttaa jatkossa MAR-mallien kalibroinnissa ja osaltaan korostaa pohjaveden perusvirtauskuvan ymmärtämisen ja veden virtausnopeuden arvioinnin tärkeyttä tekopohjaveden muodostamiseen tähtäävissä maastotutkimuksissa.

Väitöskirja verkossa: <https://urn.fi/URN:IS-BN:978-952-64-2342-5>

14.2.2025 Heini M. Reijonen, Helsingin yliopisto

Uusia näkökulmia bentoniittisaven pysyvyyteen ydinjätteen loppusijoituksessa – mitä voimme oppia tutkimalla luonnonsavia?
(New insights on natural analogues for bentonites used in geological disposal of radioactive waste – unveiling physical and chemical signatures of bentonites and fracture filling clays)

Bentoniittia, smektiittirikasta savea, esiintyy erilaisissa geologisissa ympäristöissä maailmanlaajuisesti, ja sitä käytetään tiivistävänä teollisuusmineraalina mm. radioaktiivisen jätteen geologisessa loppusijoituksessa. Bentoniittien pitkän aikavälin kestävyys tutkimus on tärkeää, sillä loppusijoitustilojen turvallisuutta on arvioitava kymmenien tuhansien ja jopa miljoonan vuoden aikajaksoilla. Bentoniittien lisäksi smektiittejä esiintyy kiteisessä kallioperässä muuttumism mineraaleina. Smektiiteillä onkin merkittävä rooli maanalaisessa rakentamisessa, johtuen niiden paisumisominaisuuksista ja siihen liittyvistä sortumariskeistä. Smektiittien kestävyyttä on perinteisesti tutkittu oppimalla bentoniittiesiintymistä, joita usein kutsutaan luonnonanalogoiksi. Tässä tutkimuksessa kallion rakoiluun liittyvät smektiitit on tunnistettu uudenaikaisiksi tietolähteiksi smektiittimineraalien kestävyysarviointia ajatellen.

Paisuvien savien karakterisointi on haastavaa niiden pienen raekoon vuoksi. Lisäksi useimmat käytetyt menetelmät perustuvat näytettä tuhoaviin analyyseihin, kuten röntgendiffraktioon. Isojen näytemäärien analysointi on myös aikaavievää. Tässä tutkimuksessa käytettiin onnistuneesti nopeampia ja näytettä tuhoamattomia menetelmiä, röntgentomografiaa ja hyperspektrianalyysiä, parantamaan bentoniittien ja rakosavien tekstuuri- ja mineraalikarakterisointia.

Tulokset osoittavat, että tehokkaamman tiedonkeruun mahdollistavia tuhoamattomia menetelmiä käyttämällä voidaan tehostaa sekä bentoniittien että rakoja täyttävien savien karakterisointia. Lisäksi näytteissä havaittu vaihtelu mineralogiassa ja tekstuureissa on paljon suurempaa kuin mitä aiemmin on otettu huomioon. Tämä tarjoaa uusia mahdollisuuksia sekä Suomen kallioperän nuorimpien vaiheiden ymmärtämiseen että luonnonanalogiutkimukseen, myös koskien uudenlaisia tiivistysmateriaaleja.

Suomen kratonialueella hydrotermistä muuttumista esiintyy syvälläkin kallioperässä. Tässä tutkimuksessa vahvistettiin, että erilaisia smektiittejä esiintyy rakoilleissa migmatiittisissa ja graniittisissa kivissä. Suomessa Olkiluodon, Hyrkkölän, Kivetytyn ja Romuvaaran kohteilla smektiittejä esiintyy pääasiassa *in situ*, kallion pintaosista aina ~1 km syvyyteen. Joissain tapauksissa on mahdollista määritellä smektiitti tarkemmin montmorilloniitiksi ja arvioida montmorilloniitin tarkempaa koostumusta (pääasiassa Na, Ca ja Mg). Montmorilloniitin lisäksi smektiittejä havaittiin esiintyvän erityyppisissä hydrotermisissä seosmineraaleissa, joita syntyy hieman korkeammissa lämpötiloissa. Havaitut smektiitit osoittavat pitkäaikaista stabiilisuutta vaihtelevissa hydrogeokemiallisissa olosuhteissa (makeasta suolaiseen kalliopohjaveteen).

Rakosmektiitit tarjoavat loppusijoitustievälineille uudenlaisia luonnonanalogioita, joita voidaan joissain tapauksissa tutkia suoraan loppusijoituspaikalla. Löydökset tukevat montmorilloniitin pitkäikäisyyttä myös Olkiluodon loppusijoituslaitoksessa, jopa sellaisissa tulevaisuuden skenaarioissa, joissa nykyinen suolainen syvä pohjavesi muuttuisi laimeammaksi.

Väitöskirja verkossa: <http://hdl.handle.net/10138/590234>

14.3.2025 Atte Taivalkoski,
Oulun yliopisto

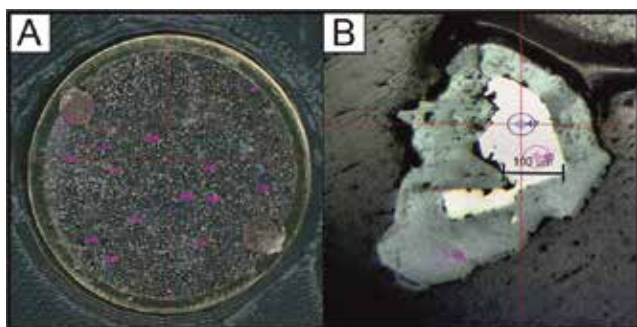
Edistyneet geokemialliset ja indikaattorimineraalitekniikat malminetsintään jäätiköityneillä alueilla: Rikkikiisun ja götiitin hivenaineiden tutkimuksesta saadut havainnot Pohjois-Suomessa

(Advanced Geochemical and Indicator Mineral Techniques for Mineral

Exploration in Glaciated Terrains: Insights from Pyrite and Goethite Trace Element Studies in Northern Finland)

Edistyneet geokemialliset ja indikaattorimineraalitutkimusmenetelmät ovat osoittautuneet arvokkaiksi välineiksi malminetsintäprojekteissa, erityisesti jäätiköityneillä alueilla, kuten Fennoskandiassa ja Pohjois-Amerikassa. Tämä väitöskirja esittää tulokset ja analyysin kolmesta tutkimusartikkelista, jotka käsittelevät moreenista ja rapakalliosta kerättyjen rikkikiisurakeiden ja niiden hapettuneiden vastineiden, kuten götiitin, hivenainekoostumuksia tavoitteena tunnistaa mineralisoituneen kallioperän alkuperä. Väitöskirjan kaksi ensimmäistä artikkelia keskittyivät detritaalisten rikkikiisurakeiden kykyyn säilyttää mineralisoidun kallioperän alkuperäinen hivenalkuainejälki, mikä voisi siten merkittävästi parantaa indikaattorimineraalien käyttöä etsintämenetelmänä. Tutkimuksessa raportoidaan myös haasteista ja esteistä, jotka tulisi ottaa huomioon tulevissa vastaavissa tutkimuksissa.

Yksi suurimmista tutkimuksen aikana havaituista ongelmista oli rikkikiisun hapettuminen abioottisessa ympäristössä, eli pohjaveden tason yläpuolella vallitsevissa olosuhteissa, kuten ohuessa moreenipeitteessä. Tämän vuoksi väitöskirjan kolmas artikkeli keskittyi rikkikiisun hapettumisprosessiin götiitiksi ja arvioi sen käytettävyyttä mahdollisena toissijaisena sormenjälkitunnistusvälineenä. Analysoiduista rikkikiisurakeista koostettu hivenalkuainedata paljasti yhteneväisyyksiä mineralisoituneen kallioperän rikkikiisun kanssa kahdella eri tutkimusalueella (Petäjäselkä ja Rompas-Rajapalot) Lounais- ja Keski-Lapissa, Pohjois-Suomessa. Lisäksi tämä väitöskirja osoitti uusien korkean tarkkuuden analyysimenetelmien, kuten laserablaatiota näytteen-syötössä käyttävän induktiivisesti kytketyn plasma-massaspektrometrian (LA-ICP-MS) ja kenttäemissiopyyhkäisyelektronimikrosko-



Kuva 2. Rikkikiisurakeiden analysointia sormenjälkitutkimuksessa (fingerprin-
ting). Epoksinapista tunnistettuja rikki-
kiisurakeita (violetit pisteet) FE-SEM:llä
tehdyllä automaattijolla (A), ja rikkikiis-
urae LA-ICP-MS-analysaattorin kuvassa
(B).

Figure 2. Pyrite grain fingerprinting ana-
lysis. Identified pyrite grains from epoxy
mount (purple spots) with automated
FE-SEM application (A) and located py-
rite grain in an LA-ICP-MS image (B).

pian (FE-SEM) hyödyllisyyden indikaattori-
mineraalitutkimuksessa (kuva 2).

Edistyneet tilastolliset monimuuttuja-
analyysimenetelmät, kuten pääkomponentti-
analyysi (*principal component analysis*, PCA),
symmetriset pivot-koordinaatit, koneop-
pimisen valvomattomat itseorganisoituvat
kartat (*self-organising mapping*, SOM) ja
k-keskiarvoklusterointi (K-means), todettiin
erittäin käyttökelpoisiksi suuren datamäärän
käsittelyssä ja analysoinnissa tämän tutkiel-
man aikana. Tutkielman päähuomiot olivat,
että joidenkin hivenaineiden, kuten Ni, As,
Co ja Se, suhteet sekä niiden väliset suhteet
pysyivät suhteellisen vakaina detritaalien
rikkikiisurakeiden ja mineralisoituneesta kal-
liosta löytyneiden rikkikiisurakeiden välillä.
Tämä havainto piti jossain määrin paikkansa
myös götiitin hivenainekoostumuksen osal-
ta. Yhteenvetona voidaan todeta, että nämä
tutkimukset korostavat moreenista löytyvien
rikkikiisurakeiden ja niiden hapettuneiden
muotojen (götiitti) merkitystä mineraalitut-
kimusmenetelmien parantamisessa jäätiköi-
tyneillä alueilla. Nämä tulokset voivat auttaa
luomaan tehokkaan malminetsintämenetel-
män, jonka avulla voidaan löytää uusia mine-
raalivarantoja ympäristöltään herkällä arktisil-
la alueilla, mikä on tärkeää siirryttäessä kohti
ympäristöystävällisempää malminetsintää.

Väitöskirja verkossa: [https://www.oulu.fi/res-
terr/jutut/A52_Taivalkoski.pdf](https://www.oulu.fi/res-
terr/jutut/A52_Taivalkoski.pdf)

21.3.2025 Toni Luoto,
Helsingin yliopisto

Paleo-mesoproterotsooinen supermannersykli Fennoskandian näkökulmasta (Paleo- to Mesoproterozoic supercontinent cycle – emphasizing Fennoscandia)

Historian saatossa mantereet ovat useampia
kertoja liittyneet yhteen muodostaen super-
mantereita ja jälleen hajonneet erillisiksi
laatoiksi supermannersykleiden aikana. Super-
mannersykleillä on todettu olevan merkittä-
vä rooli niin ilmaston ja elämän kehityksessä
kuin malmipitoisten muodostumien synnyssä.
On myös todettu, että vaipan konvektiovir-
tausten ja supermannersyklin välillä on posi-
tiivinen takaisinkytkentä: toisaalta vaipan
konvektiot toimivat liikkeellepanevana voima-
na supermantereiden muodostumiselle ja ha-
joamiselle, mutta toisaalta myös supermante-
reet vaikuttavat vaipan konvektiovirtauksiin.
Tämä keskinäinen yhteys korostaa tektoniikan,
mineraalivarojen ja maapallon dynaamisten
järjestelmien välistä monimutkaista suhdetta.

Tässä väitöskirjassa tutkitaan Fennoskan-
dian kilven vaiheita paleo-mesoproterotsooi-
sen Nuna-supermannersyklin aikana. Koska
paleomagnetismi on ainoa kvantitatiivinen
työkalu sen selvittämiseksi, millä leveyspiirillä
mantereet ovat muinoin sijainneet, on se ollut

pääasiallinen työkalu myös tässä väitöskirjassa. Väitöskirjaa varten tehtiin paleomagneettisia tutkimuksia noin 1 330 miljoona vuotta vanhoista juonista Tanskan Bornholmissa sekä Keski-Suomen svekofennisen orogeenin (1920–1 770 Ma) yhteydessä syntyneistä mafisista intruusioista. Tutkimusalueet kattavat täten ajanjakson Nuna-supermantereen muodostumisesta sen hajoamiseen. Uuden paleomagneettisen aineiston lisäksi tutkimuksessa hyödynnetään aiempaa korkealaatuista paleomagneettista aineistoa, joka koottiin vuonna 2017 Nordic Paleomagnetic Workshop (NPW) -työpajassa Leirubakkissa, Islannissa ja jota päivitettiin ja uudelleen arvioitiin NPW:ssä vuonna 2022 Norjan Hurdalsjøenissä.

Maailmanlaajuinen korkealaatuinen 2 060–1 860 Ma paleomagneettinen aineisto osoittaa voimakasta oskillointia paleomagneettisten napojen välillä Nuna-supermannersyklin alkuvaiheissa. Tätä seurasi mahdollisesti pitkäkestoinen ja maailmanlaajuinen ajanjakso, jota luonnehtivat suhteellisen vähäiset laattaliikunnot. Mahdollisia selityksiä havaitulle ilmiölle ovat virheellinen paleomagneettinen data, merkittävästi aksiaaliseen keskeisdipolimallista poikkeava geomagneettinen kenttä, nopea litosfäärilaattojen liike tai ns. todellinen napavaellus (*true polar wander*, TPW), jossa Maan koko kiinteä ulko-kuori (litosfääri) liikkuu suhteessa Maan pyörimisakseliin. Paleomagneettisen datan laatua kuitenkin arvioitiin erilaisin kriteerein, jotka osoittavat käytetyn datan olevan korkealaatuista. Havaitut näennäiset laattanopeudet ovat merkittävästi suurempia kuin modernin laattatektoniikan mukaan olisi mahdollista. Useat eri testit viittaavat siihen, että geomagneettinen kenttä ei myöskään poikennut merkittävästi nykyisestä kentästä Nuna-syklin aikana. Siksi todennäköisin selitys on TPW. Tämä sopii hyvin yhteen havaintojen ja numeerisen mallinnuksen pohjalta aiemmin esitetyn teorian kanssa, jossa TPW on yhdistetty supermantereen ytimen muodostumiseen

ennen varsinaisen supermantereen lopullista muodostumista, jota seuraisi ajanjakso, jossa todellinen napavaellus on joko vähäistä tai olematonta.

Väitöskirja verkossa: <http://hdl.handle.net/10138/593194>

24.3.2025 Soili Solismaa, Aalto-yliopisto

Erityyppisten rikastushiekkojen luokittelu ja hyötykäyttö ympäristönäkökulmasta (Classification and utilization of different types of mine tailings: An environmental perspective)

Raaka-aineiden saatavuus ja riittävyys ovat nousseet huolenaiheiksi, kun ymmärrys maapallon kantokyvyn rajoista on kasvanut. Tämän lisäksi vihreä siirtymä on kasvattanut kiinnostusta sekundääristen raaka-aineiden hyödyntämiseen primäärien sijaan. Kaivannaisteollisuuden tuottamat kaivannaisjätteet, kuten rikastushiekat, tarjoavat mahdollisuuden hyödyntää pienemmän hiilijalanjäljen omaavaa, valmiiksi louhittua ja jauhettua materiaalia useisiin käyttökohteisiin primäärien materiaalien sijaan. Käytännön esimerkit rikastushiekkojen hyödyntämisestä ovat kuitenkin vähäiset mm. taloudellisen kannattavuuden ja tuotteistusprosessin monimutkaisuuden vuoksi. Näihin seikkoihin pyritään aktiivisesti etsimään ratkaisuja ja parempia toimintatapoja työ- ja elinkeinoministeriön toimesta.

Tämä väitys pyrkii omalta osaltaan edistämään sekundääristen raaka-aineiden hyödyntämistä siten, että tunnistetaan erityyppisten rikastushiekkojen eroja ja niiden mahdollisia hyödyntämiskohteita. Väitöstutkimuksen yhteydessä tutkitut rikastushiekat on jaettu neljään ryhmään niiden kemiallisten ja mineralogisten ominaisuuksien perusteella. Ryhmiä

ovat felsiset rikastushiekat (FMT), mafiset rikastushiekat (MMT), karbonaattipitoiset rikastushiekat (CMT) ja vaarallisiksi luokitellut rikastushiekat (HMT). Vaarallisiksi luokiteltujen rikastushiekkojen hyödyntäminen kaivosalueen ulkopuolella voi osoittautua liian haastavaksi, mutta niitä voidaan hyödyntää kovettuvina kaivostäyttömateriaaleina (CPB) maanalaisissa kaivoksissa. CPB:n valmistamiseen tarvitaan suuria määriä sementtiä, jonka tuottamisen tiedetään aiheuttavan runsaasti hiilidioksidipäästöjä. Mikäli toiminnan hiilijalanjälkeä halutaan pienentää, on sementin korvaaminen sekundäärisellä sideaineella suositeltavaa.

Tässä väitöskirjassa tutkittiin kultakaivoksen rikastushiekasta valmistettavan CPB:n ympäristöominaisuuksia ja siinä käytettävän sementin korvaamista osittain ja kokonaan masuunikuonalla. Lopputuloksena havaittiin ensin, että sementin osittainen korvaaminen masuunikuonalla paransi koekappaleiden puristuslujuustuloksia. Kun koekappaleita altistettiin kaivosvedelle, havaittiin, että sementin korvaaminen masuunikuonalla lisäsi kalsiumpitoisten faasien liukenemista CPB:stä. Tämä vähensi As-, Sb- ja Ni-pitoisuuksia kaivosvedessä mutta samalla heikensi CPB-materiaalia. Nämä tulokset tuovat tietoa CPB-materiaalien hyödyistä ja haasteista, kun suuri osa valmistuksessa käytettävästä sementistä on korvattu masuunikuonalla. Rikastushiekkojen karakterisointi ja luokittelu kuten myös rikastushiekka-pohjaisten tuotteiden ominaisuuksien tutkiminen on tärkeää rikastushiekkojen hyödyntämisen edistämiseksi. Nämä toimet auttavat tunnistamaan ja hyödyntämään eri sovelluksiin sopivia rikastushiekkoja, mikä vähentää riippuvuutta primääreistä raaka-aineista ja pienentää kaivostoiminnan ympäristövaikutuksia.

Väitöskirja verkossa: <https://urn.fi/URN:IS-BN:978-952-64-2424-8>

25.4.2025 Tegan Foister,
Helsingin yliopisto

Beyond the Savannah: Interpreting Ecological Flexibility in Early Pleistocene *Homo*

(Savannin tuolla puolen: Tutkimus varhaispleistoseenin ihmisen ekologisesta sopeutumiskyvystä)

Our species, *Homo sapiens*, has evolved to be able to occupy and ecologically dominate nearly every ecosystem on this planet. How *Homo sapiens* have been able to develop such an unprecedentedly large niche for a single species remains unknown. One trait that is known to have contributed to the unprecedented range of *Homo sapiens*, is plasticity. Plasticity is a species or individuals ability to adapt to different ecological conditions. In the case of *Homo sapiens*, extreme plasticity achieved through behaviour, culture, sociality, and physiology, has allowed our species to occupy nearly every environment which exists on Earth - but where did this plasticity come from?

Approximately two million years ago, during the Early Pleistocene, the first members of our genus, *Homo*, are found outside of Africa. From there began the journey of *Homo* from the savannahs of eastern Africa to global dominance and destruction. It has long been assumed that when *Homo* first dispersed from Africa into Eurasia it moved from savannah to savannah through a corridor of savannahs, with the hominins that made this journey remaining within one environment type. However, new evidence has challenged this assumption, suggesting instead that *Homo* dispersed into diverse environments in Eurasia. To have occupied these diverse environments *Homo* would have needed to be plastic. As such,

this identifies a possible origin of plasticity in the *Homo* lineage.

My thesis summarises my research into this question, of whether ‘when *Homo* first dispersed from Africa into Eurasia did it diversify to exploit new environments, or remain within the boundaries of its African niche?’, towards better understanding the origins of plasticity within the hominin lineage. To investigate this question I, along with my co-authors, researched the environments *Homo* occupied during the Early Pleistocene. The results of this research have been presented in the three publications which make up the thesis.

In the first of these publications, I analysed existing articles on this topic. This allowed me to conclude that the existing literature when taken as a whole, rather than on an individual basis, shows *Homo* to have occupied multiple environment types and not only savannah environments. In the second publication, I tested that this result could be reproduced using data from one source. I analysed two tooth traits across *Homo* sites within the Early Pleistocene, to interpret the environmental conditions present. From this I was again able to show that *Homo* did not occupy one environment type and was present in diverse environments. In the third publication, I pursued a parallel line of inquiry to investigate the coverage of the fossil record,

to better understand how this may have influenced the results from my previous two publications. From this I was able to show that collection of the fossil record has been influenced by fixation on human origins, or ‘anthropocentrism’. This anthropocentrism has resulted in undersampling of regions which have not previously borne hominin fossils, potentially biasing the results of my research and that of others as the fossil record of hominins may under represent the range of hominins.

Together these three publications show that *Homo* in the Early Pleistocene occupied diverse environments within and outside of Africa, indicating that *Homo* did not occupy only savannah environments. Moreover, due to sampling and taphonomic biases the degree of variability may be underrepresented by the fossil record. In addition, *Homo*’s dispersal out of Africa, may have resulted in a niche expansion, as *Homo* sites in Eurasia represent environmental types which are not found in the African sample. All together this indicates that *Homo* may have been plastic and occupied a generalist niche in the Early Pleistocene, potentially identifying the origins of the broader niche and greater plasticity seen with later *Homo* species, such as *Homo Sapiens*.

Väitöskirja verkossa: <http://hdl.handle.net/10138/594808>

Ohjesääntö

Veistoksen symboliikka

1 § Väittelijä yrittää kavuta tieteen huipulle, missä on vähän tilaa, sillä siellä on jo suuri tutkija.

Hallussapito-oikeus

2 § Veistoksen ja siihen liittyvän kunniakirjan hallussapito-oikeus on vain viimeksi geologiasa väitelleellä tohtorilla.

3 § Hallussapito-oikeus lakkaa sinä päivänä, jolloin joku muu yrittää julkisesti kavuta tieteen huipulle.

Luovutus

4 § Toiseksi nuorin tohtori luovuttakoon kunniakirjan ja veistoksen nuorimmalle tohtorille a. karonkassa henkilökohtaisesti, b. karonkassa välitysmiehen kautta, c. muuten mahdollisimman nopeasti.

Tulkinnallisia huomautuksia

5 § Hallussapito-oikeuden keinotekoinen jatkaminen tulkittakoon joko seuraavan yrittäjän tieteellisen panoksen aliarvioimiseksi tai oman panoksen yliarvioimiseksi.



Kuva: Henrik Kalliomäki