

Karhu kiertää – tuoreimpia geologian alan väitöstutkimuksia



Kuva: Henrik Kalliomäki

20.5.2019 Janina Rannikko,
Helsingin yliopisto

**Turkanan altaan sikojen (Suidae)
sopeutuminen muuttuviin ympäristö-
oloihin plio-pleistoseenin aikana:
hampaiden kuluminen, ruokavaliot
ja elinympäristöt. (Adaptations
of the Turkana Basin pigs (Suidae)
to changing environments in the
Plio-Pleistocene: tooth wear, diets
and habitats)**

Tämä väitöskirja keskittyy kokeelliseen hampaiden kulumistutkimukseen sekä nykyisen Kenian pohjoisosissa ja Etiopian eteläosissa sijaitsevan Turkanan altaan alueella esiintyneiden sikojen paleoekologiaan mioseenin lopulta pleistoseeniin (noin 8–0,07 Ma).

Suurin osa nykyisin elävistä sioista (Suidae, Mammalia) on kaikkiruokaisia, keskikokoisia, metsässä tai muutoin tiheän kasvillisuuden seassa eläviä sorkkaeläimiä. Pahkasika (Pha-

cochoerus) on kuitenkin poikkeus: pahkasiat elävät Afrikan avoimilla heinätasangoilla ja käyttävät pääravintonaan heinää. Plio-pleistoseenin aikaisessa Afrikassa oli kolme eri sikalinjaa (Nyanzachoerus-Notochoerus, Kolpochoerus ja Metridiochoerus), joiden arvellaan sopeutuneen avoimiin ympäristöihin ja heinän hyödyntämiseen ravintona pahkasian tapaan. Isotooppianalyysit hampaiden kiilteestä ovat osoittaneet, että kaikki nämä sikalinjat siirtyivät vähitellen sekaruokavaliosta kohti heinänsyöntiä. Myös niiden poskihampaiden kruunun korkeus kasvoi ja hampaan nystyjen määrä lisääntyi.

Muinaiset siat ja ihmisten sukulaiset asuivat samoissa elinympäristöissä Turkanan altaan alueella plio-pleistoseenin aikana. Sekasyönti ja hampaiden muoto yhdistävät monia sika- ja ihmislajeja. Afrikassa siat kuitenkin kehittyivät plio-pleistoseenin aikana nopeasti lajeiksi, jotka olivat sopeutuneet syömään kulluttavaa ruokaa.

Väitöskirjatutkimuksessani tein kokeellista tutkimusta mekaanisella purulaitteella tut-



Kuva 1. Notochoerus-suvun sian yläleuka, jossa on säilynyt poskihampaita. Mustavalkoinen mitta 10 cm.
Figure 1. Maxilla of Notochoerus suid with molars attached. Black and white scale 10 cm.

kiakseni erilaisten ruokavalioiden aiheuttamaa hampaiden kokonaiskulumista ja mikrokuvionnin syntyä. Mikroskooppiset kulumisjäljet eivät olleet merkitsevästi erilaista heinän ja lehtevän ruokavalion välillä, mutta heinä aiheutti suuremman hampaan kokonaiskulumisen. Sen lisäksi hiekkaa sisältävä ruokavalio kulutti hammasta paljon.

Hampaankulumistutkimuksen lisäksi keskityin Turkanan alueen sikojen ekologiaan. Toisessa tutkimuksessani perehdyin eri sikalajien runsauteen eri aikoina myöhäis-mioseenin ja pleistoseenin välillä Turkanan altaan alueella. Eri sikalajit olivat runsaimmillaan eri aikoina. Lisäksi hyvin pitkälle kehittyneet lajit eivät esiintyneet samaan aikaan. Sen sijaan sekä tiheää kasvillisuutta että avointa ympäristöä suosivia lajeja eli koko ajan samoilla alueilla.

Kolmanneksi tutkin erilaisia ruokia syövien nykyisten sikojen hampaiden pinnan topografiaa. Vertailin myös nykyisten sikojen hampaiden pinnan topografiaa Turkanan altaan muinaisten sikojen hampaiden pinnan topografiaan päätelläkseen niiden ruokavaliota. Pääosin kasviruokavaliota käyttävät siat, pahkasika ja metsäkarju, eroavat hampaan pinnan topografaltaan muista sekasyöjä sioista (villisika, pensassika ja hirvisika). Lisäksi, villisika voidaan erottaa muista sekasyöjä sioista (pensassika ja hirvisika) hampaan pinnan monimutkaisuuden avulla. Kaksi Turkanan altaan sikalajia muistuttivat hampaan pinnan topografaltaan eniten pahkasikaa, ja toiset kaksi muistuttivat osin pahkasikaa sekä osin muita sekasyöjä sikoja. Tämä tukee aikaisempien tutkimusten tuloksia siitä, että Turkanan

altaan alueella on ollut hyvin vaihtelevia elinympäristöjä viimeisen 4 miljoonan vuoden aikana.

Tulokseni lisäävät tietoa Turkanan altaan plio-pleistoseenin sikojen paleoekologiasta, lisäksi tässä tutkimuksessa hampaan pinnan topografia-analyysinä käytettiin ensimmäistä kertaa laajasti sikoihin. Purulaitekokeet osoittavat mikrokulumisen monimutkaisuuden sekä useamman menetelmän tarpeellisuuden paleoekologisissa tutkimuksissa.

Väitöskirja verkossa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/301449>

29.5.2019 Stefan Andersson, Helsingin yliopisto

Formation of hydrothermal REE-phosphate deposits (Hydrotermisten REE-fosfaattiesiintymien muodostuminen)

Rare earth elements (REE) are important metals used in green and low-carbon energy and information technologies, and are widely used for geological petrogenetic studies. It is becoming increasingly evident that the REE can be mobile in certain hydrothermal fluids and even form hydrothermal REE deposits. This study focuses on the formation of hydrothermal REE deposits rich in the REE-phosphates (monazite $[(\text{LREE}, \text{Y})\text{PO}_4]$ and xenotime $[(\text{Y}, \text{HREE})\text{PO}_4]$). The main objective of the study was to characterise the Olserum-Djupedal REE-phosphate mineralisation in SE Sweden. Based on this, the study evaluates different sources of REE and P in hydrothermal deposits and assesses how REE and P are transported in hydrothermal fluids. To characterise the Olserum-Djupedal REE mineralisation, this study combines fieldwork, petrographical and textural analysis, major and trace element

mineral chemistry of REE-bearing minerals and the main gangue phases, stable Cl isotopic and halogen analysis of fluorapatite, and fluid inclusion microthermometry and LA-ICP-MS analysis.

The primary Olserum-Djupedal REE mineralisation comprises co-existing monazite-(Ce), xenotime-(Y) and fluorapatite. These occur mainly within veins dominated by biotite, magnetite, gedrite and quartz forming within metasedimentary rocks in or close to the contact aureole of a peraluminous alkali feldspar granite. The veins are also hosted by the granite within the outermost part of this granite. Primary REE-minerals formed by granitic-derived $\text{NaCl-FeCl}_2\text{-KCl-CaCl}_2\text{-HF-H}_2\text{O}$ fluids at high temperatures of $\sim 600^\circ\text{C}$ at c. 1.8 Ga. Subsequently, the ore assemblages were variably modified during cooling by $\text{CaCl}_2\text{-NaCl}$ to NaCl-CaCl_2 brines, and partly, CO_2 -rich fluids down to temperatures of $\sim 300^\circ\text{C}$ and to at least 1.75 Ga.

Hydrothermal REE deposits rich in REE-phosphates are commonly associated with alkaline magmatism, particularly in silicate-carbonatitic systems. This is because REE and P both exhibit strong chemical affinities with carbonatitic systems and the potential for mobilisation of REE and P are high. This study shows that REE deposits can also form by hydrothermal activity related to subalkaline magmatic rocks. Peraluminous granites exhibit the greatest potential to exsolve fluids carrying REE and P, which can lead to the formation of hydrothermal REE deposits rich in REE-phosphates.

The general understanding on how hydrothermal REE-phosphate deposits form is that REE and P are transported in separate fluids and that the REE-phosphates form when these two fluids mix, or the REE-phosphates form when REE-bearing fluids interact with P-rich rocks. The lack of rocks pre-enriched in P in the Olserum-Djupedal district and the co-crystallisation of fluorapatite,

monazite-(Ce) and xenotime-(Y), however, suggest that such scenarios not necessarily account for all occurrences of hydrothermal REE-phosphate deposits. As an alternative, REE and P can have been transported by the same fluid. This study demonstrates that the most probable conditions for co-transport of REE and P are at temperatures exceeding 400 °C and with increasing salinity of the fluids, conditions that agree well with that of the Olserum-Djupedal system. The most effective co-transport of REE and P would occur at acidic conditions by REE-Cl, REE-F or REE-SO₄ complexes. Yet, co-transport of REE and P may also be feasible at neutral to alkaline conditions by REE-OH complexes. In low-temperature hydrothermal systems, the interaction of REE-bearing fluids with P-rich rocks or fluids is probably the most efficient mechanism for precipitating REE-phosphates. In high-temperature magmatic-hydrothermal systems, REE and P probably share a common origin and were transported by the same fluid. In such systems, pH changes, cooling and the destabilisation of the chief REE transporting complexes jointly contribute to the precipitation of REE-phosphates.

Väitöskirja verkossa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/301372>

14.6.2019 Mira Valkama, Turun yliopisto

Rapakivigraniitteihin liittyvät indiumpitoiset esiintymät Fennoskandian kaakkoisosassa (Rapakivi-related In-rich mineralisations in southeastern Fennoscandia)

Indium on olennaisen tärkeä raaka-aine maailman elektroniikkateollisuudelle. Indiumia käytetään nestekide-, plasma- ja OLED-näy-

töissä, televisioissa, matkapuhelimissa sekä kannettavissa tietokoneissa. Tämän hetkinen kysynnän ja tarjonnan suhde on maailmanlaajuisesti lisännyt kiinnostusta indiumin etsintään. Tämä väitöskirja kuvailee kaksi Fennoskandian kaakkoisosassa sijaitsevaa, rapakivigraniitteihin liittyvää indiumpitoista esiintymää; Kaakkois-Suomessa sijaitsevat Loviisan Sarvlaxvikenin monimetallijuonet sekä Venäjällä Laatokan Karjalan Pitkärannassa olevan karsimalmin.

Sarvlaxvikenin monimetallijuonet esiintyvät kahdessa eri rapakivigraniittityypissä ja ne voidaan jakaa viiteen eri ryhmään; viborgiittissa esiintyvät Li-As-W-Zn-Mn, Pb-Zn sekä Cu-As-In ja tasarakeisessa graniitissa esiintyvät As-Sn-Cu sekä Mo-Bi-Be. Juonet muodostavat monimutkaisen järjestelmän, jossa esiintyy useita juonigeneraatioita. Viborgiittissa esiintyvissä juonet ovat NNN-suuntaisia ja ne ovat kehittyneet kahdessa eri vaiheessa (generaatiot 1 ja 2). Tasarakeisen Marvikenin graniitin muuttumisvyöhykkeellä esiintyviä juonia on tavattu ainoastaan jään kuljettamissa lohka-reissa, minkä vuoksi niiden ikäsuhte edellisiin on epäselvä (generaatio x). Viborgiittissa esiintyvien juonten syntyolosuhteet ovat fluidisulkeumatutkimusten perusteella olleet lähes identtiset generaatiosta riippumatta. Fluidin kloori- ja rikkipitoisuudet ovat vaikuttaneet metallien rikastumiseen. Metalleja rikastanut fluoripitoinen fluidi on todennäköisesti peräisin Marviken graniitista.

Pitkärannan historiallisen kaivosalueen karsimalmi sisältää neljä päämalmityyppiä; rauta-, kupari-, tina-, ja sinkkityypit. Samassa kaivoksessa tavataan useita eri malmityyppejä, joiden välillä on havaittavissa mahdollisesti syntyolosuhteiden vaihteluista johtuvaa asteittaista vaihtelua. Tietyt metallit ovat kuitenkin yleisempiä tietyillä alueilla ja esiintyvät yhdessä erityisten hivenaineiden, esim. Ag, Bi, In ja Li, kanssa.

Molemmilla tutkimusalueilla indium esiintyy pääsääntöisesti sinkkipitoisissa mal-

missa, jossa se on useimmiten sinkkivälkkeessä. Tutkimusalueilla on kuitenkin havaittu myös indium-mineraalia nimeltä roquesiitti. Indium-mineraalien esiintymistä voidaan ennustaa laskemalla In (ppm) / Zn (%) suhde. Jos tämä suhde on suurempi kuin 50, on todennäköistä, että näyte sisältää indium-mineraaleja.

Sarvlaxvikenin alueelta on kerätty 100 tai 20 metrin näytevälein yli 2000 maaperänäytettä geokemiallisia analyysejä varten. Lukuisat anomaaliset näytteet viittaavat useaan eri metallilähteeseen. Havaittujen anomalioiden sekä tunnettujen metallipitoisten juonten välillä ei kuitenkaan voitu havaita selkeää yhteyttä. Siitä syystä anomaliat vahvasti viittaavat löytymättömiin, maaperäkerroksen alla oleviin, metallijuoniin.

Tämä väitöskirja antaa tärkeää tietoa Fennoskandian kilven rapakivien yhteydessä esiintyvistä indiumpitoisista esiintymistä. Väitöskirja sisältää yksityiskohtaisen alueellisen kallioperäkartoituksen sekä mineralogisia, geokemiallisia ja fluidisulkeumatutkimuksia. Nämä kaikki yhdistettynä tarjoavat apuvälineen rapakivialueiden metallinetsintään.

Väitöskirja verkossa: <https://www.utupub.fi/handle/10024/147335>

**12.9.2019 K. R. Ilona Romu,
Helsingin yliopisto**

**Vestfjellan mantereisen kuoren
alkuperä ja genesis läntisellä
Kuningatar Maudin maalla
lamproiittijuonien ksenoliittien
koostumuksen ja geokronologian
perusteella (Origin of the concealed
continental crust of Vestfjella, western
Dronning Maud Land, Antarctica:
Evidence from xenoliths hosted by
Jurassic lamproites)**

Ilona Romun monografiaväitöskirja selvitti jään ja laakiobasalttien peittämän mantereisen kuoren geologista historiaa Kuningatar Maudin maalla Etelämantereella. Kallioperän alkuperän, iän ja paleoympäristön mallinnus perustui petrologisiin, mineralogisiin, geokemiallisiin ja isotooppigeologisiin menetelmiin. Monografia todisti Läntisen Kuningatar Maudin maan Vestfjella vuoriston mantereisten juurten koostuvan saarikaariympäristössä varhais- ja keskiproterotsooisella ajalla kiteytyneistä alkuperältään magmaattisista kivistä, joissa esiintyy jäänteitä 1300–1450 miljoonaa vuotta vanhasta maan kuoresta niistä periytyneiden zirkoni-mineraalien muodossa. Zirkoni-mineraalien kiteytymisajankohtien määrittäminen SIMS uraani-lyijy-menetelmällä paljasti, että Läntisen Kuningatar Maudin maan kallioperään on kohdistunut sarja peräkkäisiä maankuorta voimakkaasti lämmittäneitä tapahtumia jurakaudelta keskiproterotsooiselle ajalle. Ksenoliittisarjan nuorin zirkonin uraani-lyijy ikä, 165 Ma, määritettiin metagranitista. Tämä viittaa graniittimagmaatismiin Karoo-magmaatmin päävaiheen jälkeen.

Metagabroksoksenoliittien mineraali-kokokivi-rubidium-strontium-määrittäminen perusteella Vestfjellan kuori viileni alle 300 °C lämpötilaan noin 100 miljoonaa vuotta sitten. Laskelmat metagabroksenoliittien mineraaliseurueiden tasapainottumisen paine-lämpötilaoloista viittaavat siihen, että Läntisen Kuningatar Maudin maan mantereisen kuoren paksuus ennen jurakautta on voinut olla jopa 63–74 km. Myös arviot metakvartsidioriitti- ja -tonaliittiksenoliittien provenanssista (> 20 km) viittaavat poikkeuksellisen paksuun mantereiseen kuoreen ennen Gondwana mantereen hajoamista 200 miljoonaa vuotta sitten. Isotooppitutkimuksissa määritetyt mineraalien kiteytymis- ja jäähtymisajankohdat vastaavat Etelä-Afrikan Natalin vyöhykkeeltä ja Itä-Antarktiksien Kuningatar Maudin maan Maudin vyöhykkeeltä tunnettuja Grenvillen (Kibaran) vuorijonopoitumuksen aikaisia ja



Kuva 2. Keskiproterotsooiset gneissit ovat paljastuneet Heimefrontfjellalla noin 150 km Vestfjellasta itään. Väitöskirjassa tutkitut ksenoliitit edustavat syvällä maankuoressa kiteytyneitä metamorfisia kivilajeja. Kuva: Ilona Romu 2008.

Figure 2. The possible shallow counterparts of the Vestfjella xenoliths are exposed on Heimefrontfjella, c. 150 km east of Vestfjella. Photo: Ilona Romu 2008.

myöhempiä Rodinia-supermantereen hajoamiseen yhdistettyjä iänmäärittystuloksia. Esi-tetyt iät ovat myös samankaltaisia verrattuina Länsi-Antarktiksien Haagin nunatakkien ja läntisten Falklandin saarten mesoproterotsoois-kallioperän iänmäärittelyyn.

Nämä uudet, suorat todisteet Itä-Antarktiksien peitteisen prekambriksen kuoren synnys-tä ja absoluuttisesta iästä, Itä-Antarktiksien ja eteläisen Afrikan alueellisesta geologiasta sekä Vestfjellan kallioperässä yli miljardin vuoden aikana tapahtuneista prosesseista mahdollis-tavat Rodinia- ja Gondwana-supermantereiden paleomaantieteen selvitystyön tutkimus-alueella sekä geokronologisen, geokemiallisen

ja geofysikaalisen datan tulkitsemisen tulevai-suudessa.

Suomen Akatemia, Geologian Tutkimus-keskus ja akatemiaturkija Arto Luttinen (Sources of Large Igneous Provinces) mahdollistivat Vestfjellan lamproiittien, lamprofyryrien ja ksenoliittien kenttä- ja laboratoriotutkimukset vuosina 2007–2011. Monografian kirjoitus-työtä tukivat Geologian kansallinen tutkija-koulu (in memoriam), Kelan aikuisopinto-rahasto ja Geologian Tutkimuskeskus GTK.

Väitöskirja verkossa: https://tupa.gtk.fi/julkaisu/bulletin/bt_409.pdf

29.1.2020 Einari Suikkanen,
Helsingin yliopisto

**Lounais-Suomen rapakivigraniittien
moninaiset mesoskoopiset rakenteet:
Episyeniitit ja niihin liittyvät prosessit
(The Diverse Mesoscopic Structures
in Rapakivi Granites of Southeastern
Finland: Episyenites and related
processes)**

Eteläisen Suomen kallioperän merkittävimpään piirteisiin kuuluvat keskiproterotsooiset, pääosin alakuoren sulamisen seurauksena syntyneet rapakivigraniitit. Kaakkois-Suomessa Mikkelin kunnan alueella sijaitseva Suomenniemen rapakivi-intruusio asettui paikalleen maankuoreen rapakivigraniiteista varhaisimpana, noin 1644 miljoonaa vuotta sitten. Graniittien sekä kvartsi-maasälpäporfyri- ja diabaasijuonien lisäksi Suomenniemen intruusiosta löytyy vähäisiä määriä peralkalisia ja metalumiinisia syeniittisiä kiviä juonimaisina muodostumina. Peralkalisia kiviä ei ole löydetty muiden Suomen rapakivi-intruusioiden yhteydestä. Tämän väitöskirjan aihe kietoutuu näiden vähäisten, mutta petrologisesti merkittävien syeniittisten kivien ympärille.

Rapakivigraniittien ja muiden A-tyyppin graniittien yhteydestä löytyvät peralkaliset syeniitit ovat tyypillisesti vaippaperäisten magmojen fraktioitumisen seurauksena syntyneitä kiviä. Magmaattiseen syeniittiin mineraalikoostumukseltaan vertautuvia kiviä voi myös muodostua, kun ei-syeniittiset kivet reagoivat niiden läpi kulkevien fluidien kanssa. Tällöin kiviä kutsutaan joko episyeniiteiksi tai feniteiksi riippuen fluidien lähteestä. Sekä magmaattiset että fluiditoiminnan seurauksena syntyneet syeniittiset kivet voivat olla rikastuneita harvinaisista maa-alkuaineista, uraanista, tinasta, tai muista tärkeistä metalleista. Tässä tutkimuksessa pyrittiinkin selvittämään Suomenniemen syeniittisten kivien syntymekanismia, ikää ja malmipotentiaalia tutkimalla

niiden ulkoasua, mineralogista ja kemiallista koostumusta, sekä kiven ja sen sisältämien mineraalien isotooppikoostumuksia. Tämän lisäksi yksi tutkimuksen osajulkaisuista arvioi episyeniittien esiintymistä sekä synty- ja malmimuodostusmekanismeja maailmanlaajuisesti.

Tutkimuksessa havaittiin Suomenniemen syeniittisten kivien muistuttavan huomattavasti ympäröivää rapakivigraniittia. Ne ovat kuitenkin osittain muuttuneita ja uudelleenkiertyneitä, verrattain köyhtyneitä kvartsista ja plagioklaasista ja sisältävät joissain tapauksissa peralkalisille kiville tyypillisiä natriumrikkaita mineraaleja. Teollisuudelle tärkeiden alkuaineiden merkittävää rikastumista ei havaittu. Happi- ja uraani-lyijy-isotooppianalyysien perusteella syeniittisten kivien zirkoni on iältään ja happi-isotooppikoostumukseltaan identtistä rapakivigraniitin zirkonin kanssa. Aineiston perusteella syeniittisten kivien arvioitiin syntyneen joko kehittymällä rapakivigraniittimagmaasta tai fluiditoiminnan seurauksena rapakivigraniitin kiteytymisen jälkeen. Ensimmäisessä tapauksessa syeniittinen kivi on saattanut syntyä myöhäismagmaattisessa vaiheessa maasälpärikkaan magman hiertyessä paikallaan. Magmaattisen vaiheen jälkeen syeniittinen kivi voi syntyä rapakivigraniitin reagoidessa pääosin meteorista alkuperää olevien fluidien kanssa, jolloin kivi nimitään episyeniitiksi. Tutkimuksessa havaittiin, että magmaattisten ja magmatismien jälkeen syntyneiden syeniittisten kivien erottaminen toisistaan voi olla haastavaa rapakivigraniitin synty-ympäristössä. Erityisen huomionarvoista on kuitenkin se, että rapakivigraniitin yhteydestä tavatun peralkalisen syeniitin muodostuminen ei vaadi erillistä vaippaperäistä lähdettä.

Väitöskirja verkossa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/308923>