

Karhu kiertää

- tuoreimpia geologian alan väitöstutkimuksia

05.09.2025 Johanna Tepsell,
Helsingin yliopisto

Sulfidimineraalien stabiilit isotoopit ja hivenalkuaineet Pohjois-Suomen epätyypillisissä Co-rikkaissa orogeenisissä kultaesiintymissä

(Unconventional (transition metal) isotopes and trace elements in sulphide minerals in Co-enriched orogenic gold deposits in Finnish Lapland)

Tämä väitöskirja perehtyy stabiilien isotooppien käyttäytymiseen ja sovelluksiin epätyypillisissä orogeenisissä kultaesiintymissä. Tutkimusalueena toimii Rajan Au-Co-esiintymä Peräpohjan vyöhykkeellä, Pohjois-Suomessa. Työssä kehitetään Ni- ja Ag-isotooppianalyysimenetelmiä sekä hienosäädetään jo olemassa olevien ICP-MS-menetelmien käytännön toteutusta. Tulokset parantavat ymmärrystämme stabiilien isotooppien käyttäytymisestä malminmuodostusympäristöissä ja näin edesauttavat stabiilien isotooppien käyttöä malmimineraalien muodostumista ohjaavien prosessien määrittämisessä.

Tutkimuksessa tarkastellaan metallien (Cu, Ni, Fe, Ag) ja rikin (S) isotooppisuhteita yhdessä sulfidimineraalien hivenalkuainekoostumuksen ja tekstuurin kanssa. Laaja



Kuva:Henrik Kalliomäki

isotooppiaineisto auttaa muodostamaan yksityiskohtaisen käsityksen Rajan monivaiheisista malminmuodostusprosesseista haastaen perinteisen käsityksen orogeenisten kultaalmien synnystä. Tulokset viittaavat siihen, että orogeenisten kultalmien syntyprosessi on aiemmin oletettua monimutkaisempi, erityisesti metamorfisilla kallioperäalueilla, missä hydrotermiset fluidit ovat vaikuttaneet voimakkaasti sekä malmin että sitä ympäröivien kivilajien kehitykseen.

Analyysitulosten pohjalta voidaan todeta Rajan Co-Au-esiintymän muodostuneen kahdessa erillisessä vaiheessa. Varhaisessa vaiheessa syntynyt Co-mineralisaatio muistuttaa geokemiallisilta ominaisuuksiltaan sedimenttiympäristöissä tavattavia Cu-Co-esiintymiä. Myöhempi alueellinen metamorfoosi johti rikkikiisun (pyriitti) osittaiseen hajoamiseen ja metallien (Co, Au, Bi, Te) vapautumiseen sen kidehilasta. Prosessin seurauksena kiteytyi pyrroitiittia (magneettikiisu), kobolttihohdetta sekä pieniä määriä kultaa ja telluurimineraaleja.

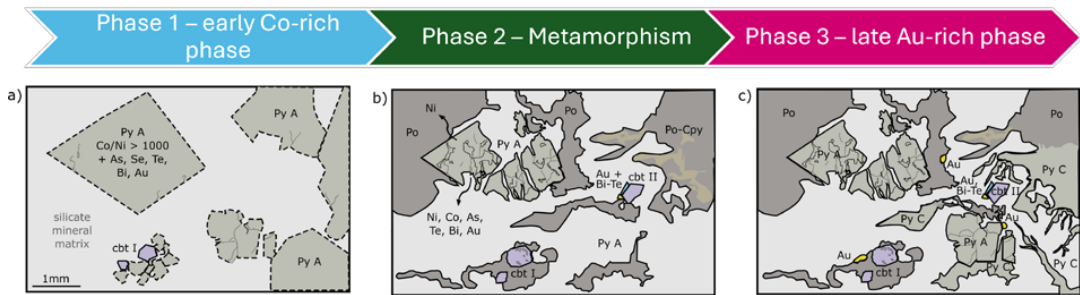


Figure 1. Illustration of the three-stage mineralisation history at the Raja Au-Co prospect. Phase 1 – Early Co mineralization (a): Deposition of Co-rich pyrite (Py A) and cobaltite from highly saline, metal-rich fluids. Dashed outlines indicate inferred mineral phases that have been altered, overprinted, or replaced during later events and are no longer observed in the sample. Phase 2 – Metamorphic overprint (b): Regional metamorphism caused partial transformation of pyrite A into pyrrhotite, releasing Au, Co, and other trace metals. Chalcopyrite and secondary cobaltite crystallised together with minor Au–Bi–Te phases, while Ni was preferentially incorporated into pyrrhotite. Arrows represent the mobilisation of elements liberated from pyrite A during metamorphism. Phase 3 – Late Au mineralization (c): Subsequent Au-rich fluids overprinted the earlier assemblages, forming native Au. Pyrite C precipitated in late-stage fractures and locally replaced pyrrhotite. Abbreviations: Py – pyrite, cbt I – primary cobaltite, cbt II – secondary cobaltite, po – pyrrhotite, cpy – chalcopyrite.

Kuva 1. Kaavamainen esitys Rajan Au-Co -esiintymän kolmivaiheisesta mineralisaatiosta. Vaihe 1 – Varhainen Co-mineralisaatio (a): Suolaisista Co-rikkaista fluideista kiteytyy Co-rikasta rikkikiisua (Py A) ja kobolttihohdetta. Katkoviivat kuvastavat mineraaleja, jotka ovat sittemmin muuttuneet tai korvautuneet muilla mineraaleilla. Vaihe 2 – Metamorfoosi (b): Alueellisen metamorfoosin myötä rikkikiisu A muuttui magneettikiisuksi vapauttaen osittain kultaa, kobolttia ja muita hivenalkuaineita. Näistä kiteytyi kupari-kiisua, sekundääristä kobolttihohdetta, sekä pieniä määriä Au–Bi–Te-mineraaleja. Vapautunut Ni sitoutui magneettikiisuun. Nuolilla kuvataan alkuaineiden vapautumista rikkikiisusta. Vaihe 3 – Myöhäinen Au-mineralisaatio (c): Au-pitoisesta fluidista kiteytyi kultaa olemassa oleviin rakenteisiin. Rikkikiisu C kiteytyi rakoihin, osittain korvaten myös magneettikiisua. Lyhenteet: Py – rikkikiisu, cbt I –kobolttihohde, cbt II – sekundäärinen kobolttihohde, po – magneettikiisu, cpy – kuparikiisu.

Erillinen myöhäisvaiheen Au-mineralisaatio tapahtui metamorfoosihuipun jälkeen. Selvä rakenteellinen kontrolli sekä isotooppikoostumukseltaan ja geokemialtaan poikkeava fluidin koostumus erottavat tapahtuman varhaisemmasta kobolttia rikastaneesta hydrotermisestä vaiheesta. Magmaattisen intruusion vaikutusta myöhäisemmän vaiheen kultamineralisaatioon ei voida sulkea pois.

Tutkimus tuo esiin haasteet orogeenisten kultaesiintymien luokittelussa ja korostaa tarvetta tarkastella niitä dynaamisina kokonaisuuksina, joita peräkkäiset hydrotermiset tapahtumat ja alueelliset geologiset prosessit

ovat toistuvasti muokanneet. Rajan esiintymän tulokset auttavat kehittämään tarkempia metallogenisia malleja Co-Au-esiintymien (tai muista epätyypillisistä metalleista rikastuneiden Au-esiintymien) tutkimukseen ja osoittavat stabiilien isotooppimenetelmien hyödyllisyyden malminmuodostusprosessien tutkimuksessa. Samalla tutkimus tarjoaa käytännön työkaluja stabiilien isotooppien analyysiin ja uutta tietoa metallien käyttäytymisestä hydrotermisissä ympäristöissä.

Väitöskirja verkossa: <http://hdl.handle.net/10138/599407>

26.09.2025 Kaisa Turunen,
Helsingin yliopisto

Hydrologisten, geokemiallisten ja isotooppitutkimusmenetelmien hyödyntäminen kestäväen kaivostoiminnan tukena kaivoksen elinkaaren eri vaiheissa

(Employing of hydrological, geochemical and isotopic research methods to ensure environmental compliance throughout the life of a mine)

Kaivossektori tuottaa yhteiskunnan ja teollisuuden tarvitsemia mineraaleja ja metalleja esimerkiksi uusiutuvan energian, infrastruktuurin ja digitaalisen yhteiskunnan kehitykseen. Kaivostoiminnassa käytetään paljon vettä ja vesi on myös merkittävin päästöjen kulkureitti kaivokselta ympäristöön. Vesien hallinta on globaalisti yksi kaivos- ja prosessiteollisuuden hankalimmin hallittavia riskitekijöitä ja tehokkaiden vesienhallintastrategioiden toteuttaminen koko kaivoksen elinkaaren ajan onkin ratkaisevan tärkeää kaivostoiminnan onnistumisen ja kestävyyskannalta.

Kaivoksen elinkaaren eri vaiheilla on erilaiset vaikutukset kaivosvesien laatuun ja määrään sekä muuhun ympäristöön. Jokainen eri vaihe vaatii räätälöityjä vedenhallintastrategioita, joilla voidaan minimoida vaikutukset kaivosta ympäröiviin vesistöihin ja muuhun ympäristöön. Jotta näihin haasteisiin voidaan vastata, on jokaisen kaivoksen vedet tunnettava tarkasti. Jokainen kaivos on geologialtaan (malmin koko, sijainti, kemia jne.), sijainniltaan (ilmasto-olosuhteet, ympäröivät vesistöt, pohjavedet jne.) sekä kaivostekniikaltaan erilainen ja edellä mainitut seikat määrittävät pitkälti myös vesien laadun ja määrän.

Tässä väitöskirjatutkimuksessa yhdistettiin erilaisia hydrologisia, hydrogeologisia, geokemiallisia ja isotooppimenetelmiä kaivoksesta peräisin olevien päästöjen arvioimiseksi kaivostoiminnan eri vaiheissa. Väitöskirjan havainnot korostavat rutiininäytteenoton rajoituksia veden laatuun ja määrään vaikuttavien taustalla olevien tekijöiden havaitsemisessa ja ehdottaa parannettuja menetelmiä kaivostoiminnan ympäristön seurantaan ja hallintaan.

Väitöskirjatyön tulokset ovat merkityksellisiä ympäristövaikutusten arviointeihin ja kestävien kaivoskäytäntöjen kehittämiseen osallistuville sidosryhmille. Yhdistämällä tieteellisiä menetelmiä rutiiniseurantaan tutkimus tarjoaa arvokasta tietoa viranomaisten päätöksiin ja kannustaa käytäntöihin, jotka suojelevat ympäristöä. Tutkimus korostaa yksityiskohtaisen kemiallisen profiloinnin, veden laadun ja määrän ajallisten vaihteluiden ymmärtämisen tarvetta, jotta haitta-aineiden kulkeutumismekanismia voidaan tutkia tehokkaasti kaivosalueen elinkaaren eri vaiheissa. Se kannustaa myös kohdekohtaisiin arviointeihin ja menetelmien mukauttamiseen paikallisten olosuhteiden mukaisesti ottaen huomioon kunkin kaivosalueen ainutlaatuiset ominaisuudet.

Väitöskirja verkossa: <http://hdl.handle.net/10138/600167>

7.11.2025 Christina Tsarsitalidou,
Helsingin yliopisto

Rayleigh wave focal spot imaging applied to continental scale dense arrays

**(Rayleigh-aaltoja hyödyntävä focal
spot –kuvantaminen sovellettuna
mannerlaajuisiin tiheisiin
asemaverkkoihin)**

Seismic imaging investigates Earth's structure by using waves that propagate along the surface or through the body of the Earth. In passive seismology, the most common approach is seismic tomography and it is based on wave propagation between a source and a receiver. Earthquake waves and waves reconstructed from ambient-noise correlations are commonly used in seismic tomography, which so far has provided high-resolution images of the Earth.

This thesis investigates an alternative imaging method, the Rayleigh-wave focal spot imaging, and aims to establish it as a complementary ambient-noise imaging method in dense-array applications. Focal spot imaging is a correlation-based approach and, in contrast to ambient-noise tomography, does not use propagating Rayleigh waves to estimate the velocity structure from the solution to a complex inverse problem, but instead it is based on the properties of the focal spot, the local spatial autocorrelation field.

From the equivalence of the correlations and the time reversal, the focal spot is the interference pattern formed from the refocusing of far-field waves. The focal spot size and shape follow a Bessel function that is controlled by the local medium properties, and it is a proxy of the seismic wavelength. We estimate the fundamental-mode Rayleigh-wave phase velocity by parameterizing focal spots with homogeneous Bessel-function models developed using the isotropic or anisotropic

assumption under the SPAC framework. Importantly, we use only data distances up to 1.5λ , which allows us to explore longer-period waves than those accessible in dense-array ambient-noise tomography.

This thesis utilizes two continental-scale seismic focal spot imaging applications, the USArray and AlpArray, which are supported by two numerical studies on the sensitivity and resolution power of the method.

The numerical tests evaluate the accuracy of phase velocity estimates from focal spots in the presence of biasing wavefield components, such as P-wave energy and anisotropic background illumination, and assess the lateral resolution achieved by applying the homogeneous model to heterogeneous media. The results indicate that higher focal spot quality allows for reliable velocity estimation using shorter data ranges, whereas suboptimal surface wavefields require longer distances to achieve comparable accuracy.

Guided by the numerical studies, the two seismic applications provide imaging results that demonstrate the effectiveness of the method even in the case of a non-optimal surface wavefield. The phase velocity maps obtained through focal spot imaging reveal features that correlate well with noise tomography results at short periods and with earthquake tomography at longer periods. Extending the Rayleigh-wave analysis, the inversion for the shear-wave velocity model suggests that focal spot imaging results can be used to resolve the 3D Earth structure.

In conclusion, this thesis investigates the strengths and limitations of the focal spot imaging method in the context of dense seismic datasets. It introduces an innovative approach to probe the medium at a local scale, enhancing current seismic imaging capabilities by improving the vertical and lateral resolution of surface-wave tomography.

Väitöskirja verkossa: <http://hdl.handle.net/10138/602588>