

Penikkain kerrosintruusio ja Sompujärven platinametalliesiintymästä löydetty uusi mineraali: laflammeiitti ($\text{Pd}_3\text{Pb}_2\text{S}_2$)

TAPIO HALKOAHO, SARI ROMPPANEN JA KRISZTIÁN SZENTPÉTERI

Penikkain kerrosintruusio sijaitsee Pohjois-Suomessa. Siitä on löydetty Sompujärven, Ala-Penikan ja Paasivaaran platinametalliesiintymät. Erityisesti Sompujärven esiintymän Kirakkajuppura on platinametallipitoisuudeltaan ja mineralogialtaan ainutlaatuinen. Se eroaa selkeästi muusta Sompujärven platinametalliesiintymästä – mutta miksi? Esiintymä kaipaa yhä tutkimista ja muodostumisen selvitystä.

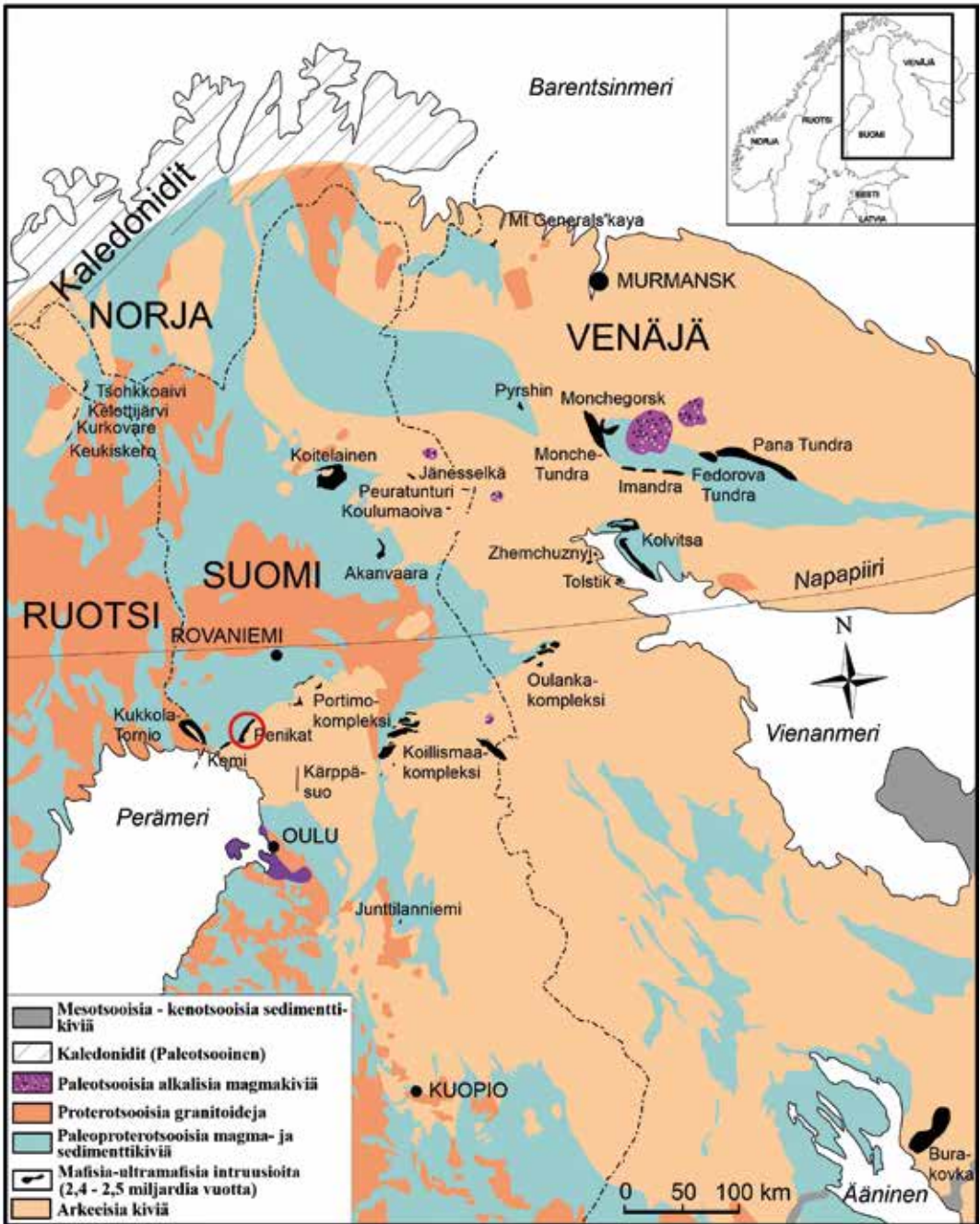
Suomesta on löydetty vuosien saatossa uusia mineraaleja yhteensä 36 kappaletta. Uusia mineraaleja on nimetty kuuluisan suomalaisen geologin (esim. eskolaiitti Cr_2O_3 ; Kouvo & Vuorelainen 1958) tai mineraalin löytöpaikan mukaan (esim. pampaloiitti AuSbTe ; Vymazalová ym. 2019). Yksi näistä uusista mineraaleista on Kirakkajuppuran koelouhokselta löydetty ja kuvattu platinaryhmän mineraali, laflammeiitti.

Penikkain kerrosintruusio

Penikkain kerrosintruusio sijaitsee Pohjois-Suomessa Simon ja Tervolan kuntien alueella, noin 20 km Pohjanlahdelta koilliseen ja 70 km Napapiiriltä etelään (kuva 1). Se on osa epäjatkuvaa, noin 300 km pituista varhaispaleoproterotsooista kerrosintruusiovyöhykettä, joka alkaa Ruotsista ja jatkuu Koillismaan Näränkävaraan ja sieltä edelleen Venäjälle Oulangan kerrosintruusiokompleksina. Tällä ns. Tornio-Näränkävaaavyöhykkeellä (Alapieti & Lahtinen 1986) sijaitsee lähes 20 intruusiota, joiden pituus vaihtelee muutamasta kilometristä aina 30 kilometriin. Muita saman ikäisiä muodostumia ovat mm. Keski-Lapissa Koitelaisen ja Akanvaaran kerrosintruusiot. Venäjällä esiintyy Äänisen

itärannalla Burakovkan kerrosintruusio ja Kuolan niemimaalla Mt Generals'kayan, Montšegorskin, Imandra Lopolithin ja Fedorova Tundra–Pana Tundran kerrosintruusiot (kuva 1). Edellä mainittuja intruusioita on kuvattu useissa julkaisuissa (Kujanpää 1964; Alapieti ym. 1979a, 1979b; Lavrov 1979; Kujanpää 1980; Mutanen 1981; Alapieti 1982; Dokuchaeva ym. 1982; Söderholm & Inkinen 1982, Alapieti & Piirainen 1984; Lahtinen 1985; Tarkian & Mutanen 1987; Alapieti ym. 1989a, 1989b; Mutanen 1989; Alapieti ym. 1990; Halkoaho 1993; Iljina 1994; Mutanen 1997; Maier ym. 2018; Järvinen ym. 2019, 2021, 2022a, 2022b).

länmääritykset zirkonin U-Pb-menetelmällä sekä Pb-Pb-kokokivi- ja Sm-Nd-menetelmillä ovat antaneet edellä mainituille



Kuva 1. Yleistetty kallioperäkarta siitä osasta Fennoskandian kilpialuetta, jossa esiintyy 2,44–2,5 miljardin vuoden ikäisiä varhaispaleoproterotsooisia kerrosintruusioita (muokattu lähteestä Alapieti & Lahtinen 1989). Penikkain kerrosintruusio on merkitty karttaan punaisella ympyrällä.

Figure 1. Generalized bedrock map of the part of the Fennoscandian Shield region with the early Palaeoproterozoic 2.44–2.5 Ga layered intrusions (modified after Alapieti & Lahtinen 1989). Penikat layered intrusion is marked in the map with a red circle.

varhaispaleoproterotsooisille kerrosintruusioille iäkiä, jotka vaihtelevat 2346 ja 2474 miljoonan vuoden välillä, keskiarvon ollessa 2440 miljoonaa vuotta (Kouvo 1977; Puustinen 1977; Manhès ym. 1980; Patchet ym. 1981; Alapieti 1982; Huhma ym. 1990). Penikkain kerrosintruusion ikänä voidaan pitää tuota 2440 miljoonaa vuotta, ja sen alkuperäinen $e_{Nd}(2440)$ on $-1,6 \pm 0,6$ (Huhma ym. 1990).

Penikkain kerrosintruusio on 23 km pitkä ja 1,5–3,5 km leveä. Sen alapuolella sijaitsevat jalkapuolen kivet koostuvat myöhäisarkkeisista granitoideista. Intruusion yläpuolella olevat kattopuolen kivet ovat joko tholeiittisia vulkaanisia kiviä, puolipinnallisia juonikiviä tai polymiktisia konglomeraatteja. Alkuperäinen intruusio on rikkoutunut tektonisissa liikunnoissa ja muodostaa viisi länteen kaatuvaa lohkoa, joita erottaa toisistaan itä-länsisuuntaiset siirrokset. Nämä lohkot on nimetty etelästä pohjoiseen Ala-Penikan, Keski-Penikan, Yli-Penikan, Kilkan ja Sompujärven lohkoiksi (kuva 2) (Alapieti & Lahtinen 1986, 1989; Alapieti ym. 1990; Halkoaho 1993).

Penikkain kerrosintruusio jaetaan kahteen pääyksikköön: reunasarjaan ja kerrossarjaan. Reunasarja on paksuudeltaan 10–20 m. Se koostuu alhaalta ylöspäin hienorakeisesta jäähtymisreunuksesta, subofiittisista gabroista sekä kumulusrakenteisista gabronoriittisista ja brontsiittisista kivistä. Paikoittain siinä on myös kapeita graniittiosueita (Alapieti 1984). Penikkain kerrosintruusion toinen pääyksikkö, kerrossarja koostuu vuorottelevista kumulusrakenteisista ultramafisista (peridotiitit ja pyrokseeniitit), gabronoriittisista, gabroidisista ja anortosiittisista kivistä. Reunasarjan ja kerrossarjan selvän rajan puuttuessa alin kromitiittikerros edustaa yksiköiden rajaa. Penikkain kerrosintruusion jalkapuolella on runsaasti kaliumia sisältävää graniittia, jossa on paikoin fluoriittia ja lyijyhohdetta. Graniitin ja Penikkain intruusion välinen kontakti on terävä ja siinä on selvä jäähtymisreunus.

Jäähtymisreunuksessa on nähtävissä graniitin geokemiallinen vaikutus, sillä graniitti sisältää runsaasti biotiittia.

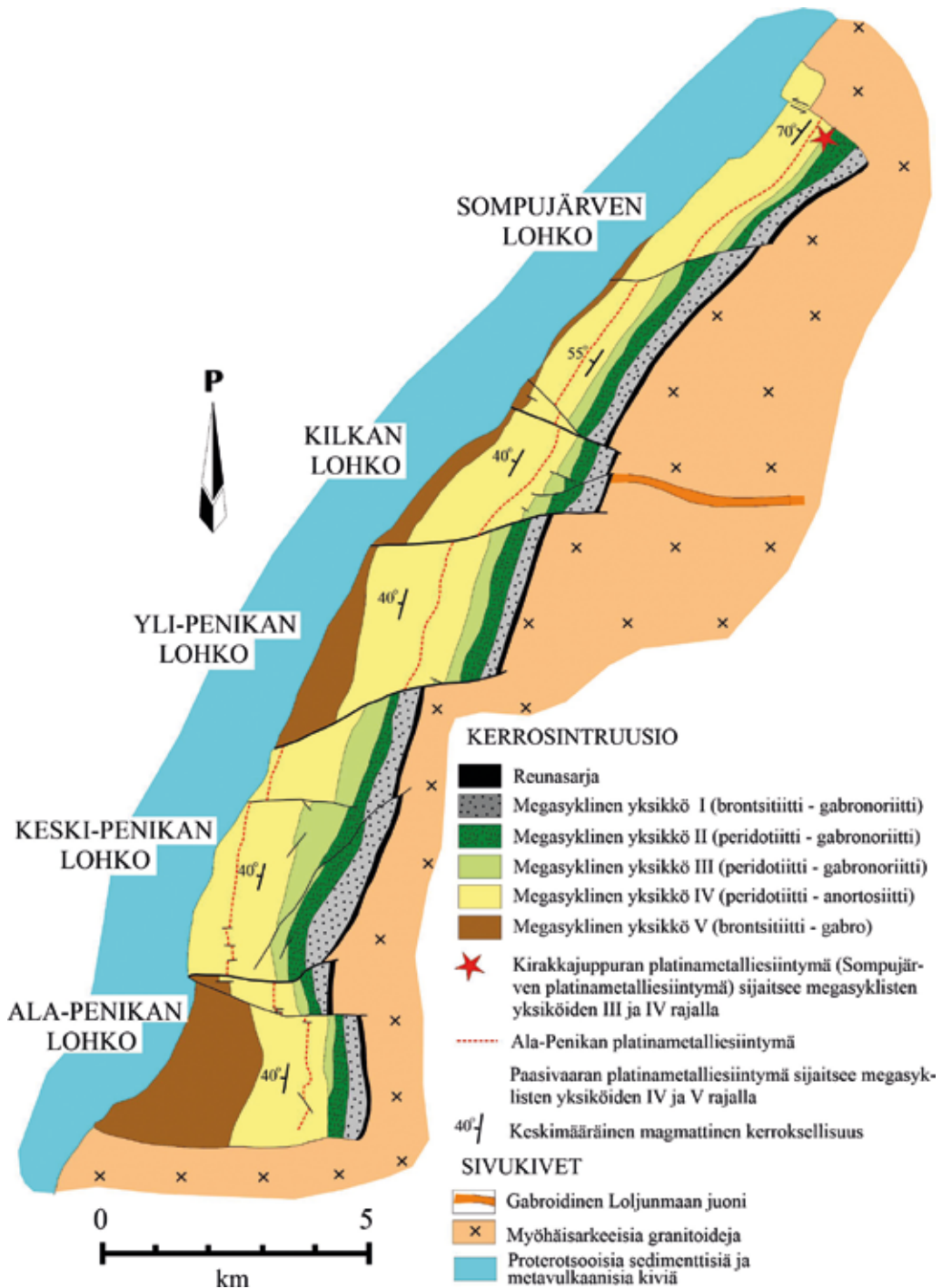
Penikkain kerrosintruusion reunasarja on jaettu alhaalta ylöspäin megasyklisiin yksiköihin I–V (kuva 2). Alemmat megasykliset yksiköt (I–III) ovat koostumukseltaan tavanomaista piipitoisempaa korkean magneesiumpitoisuuden basalttia (*Siliceous high-Mg basalt*, SHMB) (Maier ym. 2018). Ylemmät megasykliset yksiköt (IV ja V) ovat kromista köyhtyneempiä ja koostumukseltaan lähinnä tholeiittista basalttia. Megasyklisten yksiköiden geokemiallisten erojen on tulkittu johtuvan toistuvista uusista magmapulsseista jo kiettyvään Penikkain magmasäiliöön (Alapieti & Lahtinen 1986).

Megasyklinen yksikkö I

Penikkain kerrosintruusion alimman eli ensimmäisen megasyklisen yksikön paksuus on keskimäärin 330 m. Yksikön ultramafisen kerroksen muodostaa brontsiitti (ortopyrokseeniitti), jossa omamuotoisten ortopyrokseenirakeiden välitiloissa esiintyy plagioklaasia ja augiittia (klinopyrokseeni). Aksessorisina mineraaleina on kromiittia, granofyyristä materiaalia, biotiittia, ilmeniittia ja klooriapatiittia. Brontsiitin päällä on 25–60 m gabronoriittia.

Megasyklinen yksikkö II

Penikkain kerrosintruusion toisen megasyklisen yksikön paksuus on keskimäärin 200 m. Alimpana yksikön ultramafisessa kerroksessa on websteriittia (ortopyrokseeni-klinopyrokseenikivi), jonka päällä on ohuita kromitiittikerroksia sisältävää lherzoliittia (oliviini-ortopyrokseeni-klinopyrokseenikivi). Tämän päällä on jälleen websteriittia, jossa on lherzoliitti- ja gabronoriittivälikerroksia. Toisen megasyklisen yksikön yläosan muodostaa kaksi gabronoriittiyksikköä, joiden välissä on kapea websteriittikerros.



Kuva 2. Penikkain kerrosintruusion kallioperäkartta, jossa nähdään megasyklisten yksiköiden ja platina-metalleista rikastuneiden kerrosten sijainnit (muokattu lähteistä Alapieti & Lahtinen 1986, 1989; Alapieti ym. 1990). Kirakkajuppuran platinametalliesiintymän sijainti on merkitty punaisella tähdellä.

Figure 2. Bedrock map of the Penikat layered intrusion showing the locations of the megacyclic units and PGE reefs (modified after Alapieti & Lahtinen 1986, 1989; Alapieti et al. 1990). The location of the Kirakkajuppura PGE deposit is marked with a red star.

Megasyklinen yksikkö III

Penikkain kerrosintruusion kolmannen megasyklisen yksikön paksuus on keskimäärin 200 m. Yksikön pohjalla oleva ultramafinen kerros on pääosin websteriittia, jossa esiintyy paikoin kromiittia. Joillakin alueilla websteriittiyksikön keskiosassa esiintyy lherzoliittia. Ultramafisen kerroksen päällä on pääasiassa homogeenista gabronoriittia. Aivan ylimmässä osassa, seuraavan megasyklisen yksikön kontaktin tuntumassa on paikoin ohut poikiliittinen gabronoriitti, johon liittyy myös yleensä pegmatiittisia gabronoriitteja. Tässä poikiliittisessä gabronoriitissa tavataan paikoitellen runsaasti syöpyneitä tai sintrautuneita kromiittirakeita.

Megasyklinen yksikkö IV

Neljäs megasyklinen yksikkö on platinaryhmänalkuaineiden suhteen Penikkain intruusion merkittävin yksikkö. Sen paksuus on keskimäärin 920 m. Monin paikoin on nähtävissä, että magmaattisen eroosion seurauksena tämä yksikkö leikkaa edellisen yksikön ylimpiä kerroksia. Sompujärven platinametalliesiintymä (Halkoaho ym. 1990a) sijoittuu tämän ja kolmannen megasyklisen yksikön kontaktiin. Neljännessä megasyklisessä yksikössä alimpana on 10–20 m paksu ultramafinen (lherzoliittinen) kivi, jonka reunoilla on kapeat pyrokseeniittiset kerrokset. Tässä ultramafisessa kerroksessa kromipitoisuus on noin kolme kertaa alhaisempi kuin sen alapuolella olevassa kolmannen megasyklisen yksikön homogeenisessa gabronoriitissa. Ultramafisen kerroksen päällä on keskimäärin 900 metriä gabronoriittisia kiviä, joissa esiintyy paikoitellen kapeita anortosiittisia ja pyrokseeniittisiä välikerroksia, erityisesti alimman 400 metrin alueella. Ala-Penikan platinametalliesiintymä (Halkoaho 1989, Halkoaho ym. 1990b) sijaitsee kerrosseurannossa noin 300 m peridotitiittisen (lherzoliittisen) kerroksen yläpuo-

lella. Aivan neljännen megasyklisen yksikön yläosassa on 40–60 m paksu ja kompleksinen ns. vaihtumisvyöhyke, joka sisältää erilaisia gabronoriittisia, anortosiittisia ja pegmatoidisia kiviä. Aivan ylimpänä on noin 5 m paksu anortosiittikerros. Tämä vyöhyke sisältää Penikkain kerrosintruusion kolmannen ja samalla ylimmän platinametallirikastuman, ns. Paasivaaran platinametalliesiintymän (Huhtelin 1989, Huhtelin ym. 1989, 1990).

Megasyklinen yksikkö V

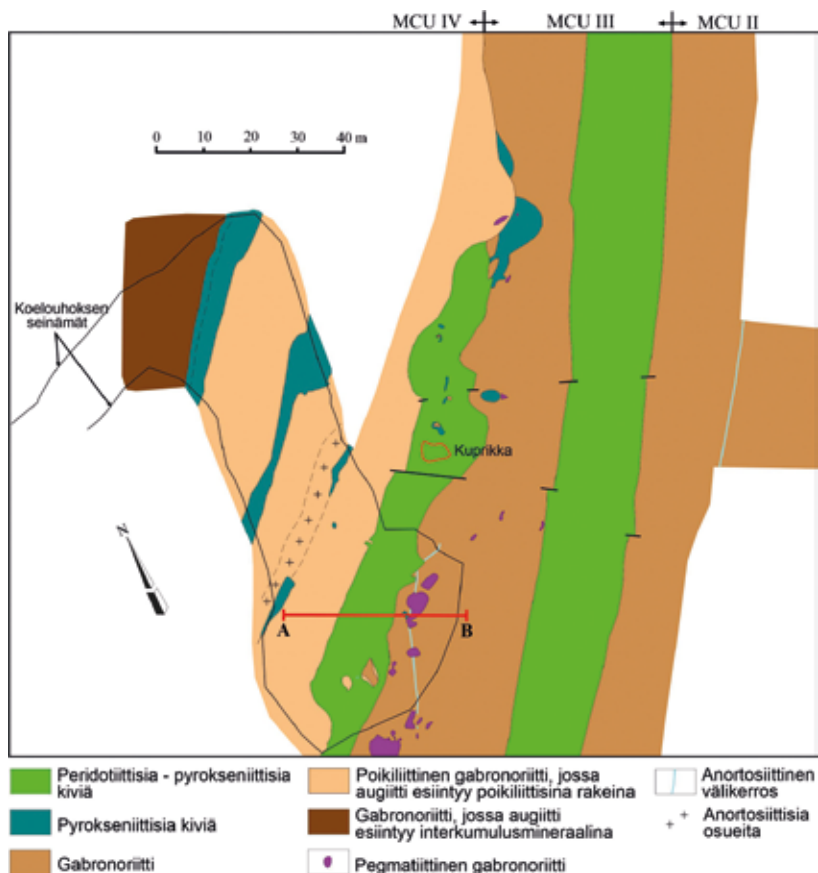
Viidennen megasyklisen yksikön keskimääräistä paksuutta ei tiedetä, sillä Penikkain kerrosintruusion yläosa on kulunut jossain määrin pois: viides megasyklinen yksikkö esimerkiksi puuttuu kokonaan Keski-Penikan lohkolta (kuva 2). Viidettä megasyklistä yksikköä on jäljellä Ala-Penikan lohkolta 900 m ja Yli-Penikan lohkolta 600 m paksuudelta, mutta Sompujärven lohkolta sitä on jäljellä vain 10 m. Kapean, noin 5 m paksun ultramafisen kerroksen (bronsitiittia) päällä on noin 200 m paksu kerros noriittia. Noriittikerroksen päällä on noin 80 m paksu gabronoriitti. Tämän päällä on gabroa, sillä ortopyrokseenia ei enää esiinny kivessä.

Kirakkajuppuran platinametalliesiintymä

1980-luvulla Sompujärven platinametalliesiintymä oli yksi Outokumpu Oy:n PGE-etsintäprojektin pääkohteista. Sen yksi kohta, Kirakkajuppuran platinametalliesiintymä, paikannettiin 1984. Tämän jälkeen sitä kartoitettiin ja kairattiin (Lahtinen 1987a). Vuonna 1987 alkoi Kirakkajuppuran koelouhinnan ensimmäinen vaihe ja vuonna 1988 koelouhintaa jatkettiin toisessa vaiheessa (kuvat 3 ja 4). Kirakkajuppuran päämalmia louhittiin yhteensä 2 342 tonnia keskipitoisuudella: 12,23 ppm platinaa, 29,72 ppm palladiumia,

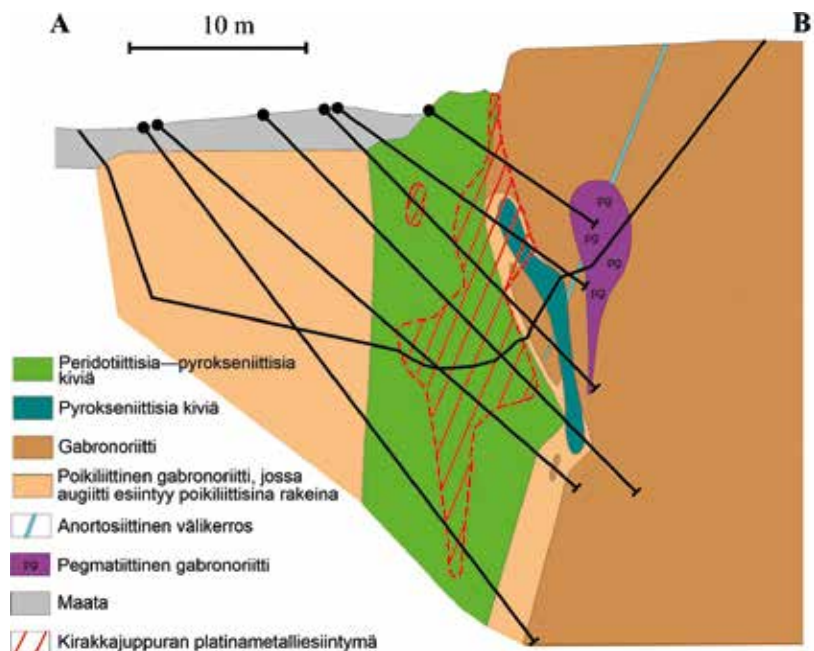
Kuva 3. Kirakkajuppuran kallioperäkartta (muokattu lähteestä Halkoaho ym. 2005). Kuvaan on piirretty koelouhoksen ääri viivat. MCU = megasyklinen yksikkö.

Figure 3. Bedrock map of the Kirakkajuppura area (modified after Halkoaho et al. 2005). The outline of the test quarry is drawn with dotted line in the figure. MCU = megacyclic unit.



Kuva 4. Kirakkajuppuran platinametalliesiintymän poikkileikkaus (A-B kuvassa 3). Kuvaan on piirretty koelouhoksen ääri viiva ja profiilissa kairatut kairareivät (muokattu lähteestä Halkoaho ym. 2005).

Figure 4. Cross-section (A-B in Fig. 3) through the Kirakkajuppura PGE-mineralized zone. The outline of the test quarry and the drill holes drilled on the profile are drawn on the figure (modified after Halkoaho et al. 2005).



1,14 ppm rodiumia ja 0,2 ppm kultaa. Päämalmin lisäksi erillisestä pienestä Kuprikaksi nimetystä platinametallirikastumasta louhittiin malmin noin 200 tonnia pitoisuudella: 3,6 ppm platinaa, 7,6 ppm palladiumia, 0,48 ppm rodiumia ja 0,1 ppm kultaa. Sivukiveä eli ns. raakkua louhittiin yhteensä noin 53 500 tonnia (Lahtinen 1987b, 1989).

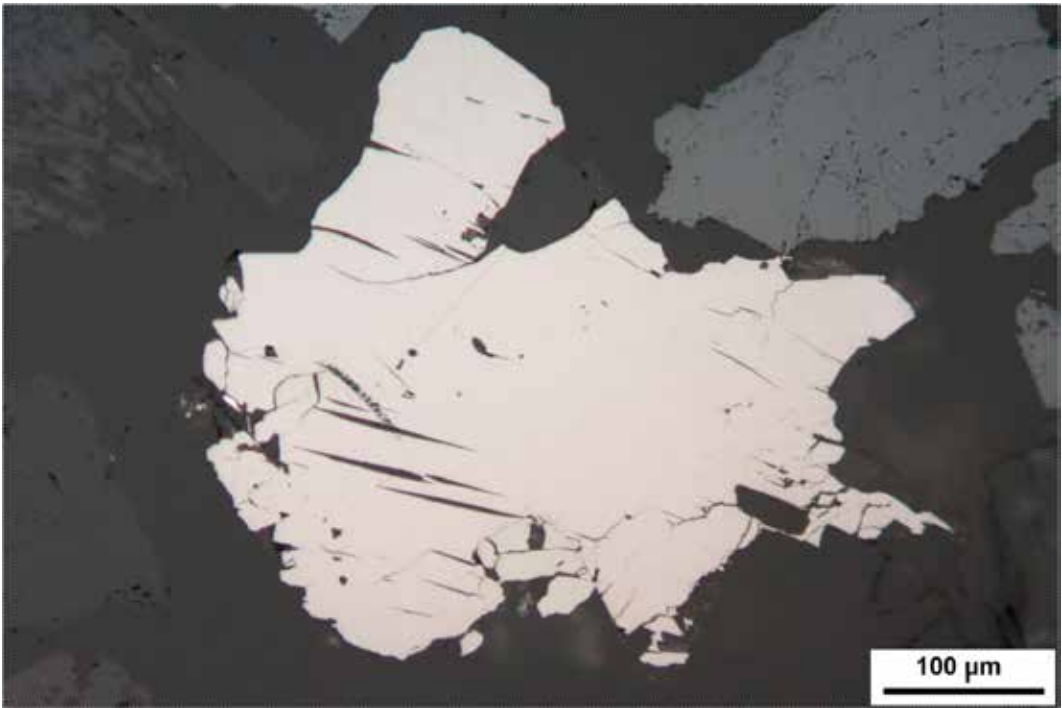
Kirakkajuppuran esiintymässä on erittäin korkea platinametallipitoisuus. Korkeimpia pitoisuuksia edustaa Outokummun Geoanalyttisen Laboratorion (GAL) *fire assay* -menetelmällä analysoima kairasydännäyte, joka sisälsi 501 ppm platinaa, 1350 ppm palladiumia, 58,2 ppm rodiumia ja 12 ppm kultaa (Maier ym. 2018). Kyseinen näyte oli 18 cm pitkä ja kivilajiltaan metapyrokseeniittia. Kirakkajuppuran esiintymän näytteiden analysoija on sisällytetty Sompujärven platinametalliesiintymän kromiittityypin analyysiin Halkoahon ja muiden (1989) julkaisun taulukkoon 4.3 ja Halkoahon (1993) väitöskirjan taulukkoon 5.

Kirakkajuppuran platinametalliesiintymä sijaitsee Penikkain kerrosintrusion pohjoispuolella. Alueella nähdään, miten neljännen megasyklisen yksikön peridotittinen kerros erodoi kolmannen megasyklisen yksikön peridotittisesta kerrosta, joka lopulta hiipuu kokonaan (kuva 3). Neljännen megasyklisen yksikön kivet leikkaavat alemman yksikön kiviä, mikä on todiste merkittävästä magmaattisesta eroosiosta. Tämä osoittaa, että neljännen magmapulssin tunkeutuminen Penikkain magmasäiliöön on ollut todella voimakas tapahtuma. Kerrosseurannossa neljännen megasyklisen yksikön päällä on poikiliittinen gabronoriittikerros (kuvat 3 ja 4). Kyseinen kerros on syntynyt, kun magmapulssi purkautui Penikkain kerrosintrusioon ja sula aines sekoittui aikaisempien magmapulssien jo jäähtyneen jäännösmagman kanssa. Tämän seurauksena syntyi Penikkain kerrosintrusiossa alijäähtynyt tila. Poikiliittinen gabronoriitti on muodostunut tämän alijäähtyneen magman kitey-

tyessä. Huomionarvoinen kivilaji Kirakkajuppuran esiintymässä on myös kolmannen megasyklisen yksikön yläosassa esiintyvä pegmatiittinen gabronoriitti. Se ei ole tällä kohdalla rikastunut platinametalleista ja edustanee samaisen megasyklisen yksikön runsaasti volatiileja sisältävää faasia. Tämän faasin mahdollista vaikutusta Kirakkajuppuran erittäin platinametallipitoisen esiintymän muodostumiseen ei kuitenkaan tunneta.

Kirakkajuppuran platinametalliesiintymän mineralogia

Kirakkajuppuran platinametalliesiintymän perusmetallisulfidimineraalien määrä on vähäinen, mutta platinaryhmän mineraalien kirjo on laaja. Merkittävimpana voitaneen mainita esiintymästä ensimmäisenä löydetty ja kuvattu uusi mineraali, laflammeiitti ($\text{Pd}_3\text{Pb}_2\text{S}_2$). Esiintymän mineralogian ovat kuvanneet Halkoaho ja muut (1989), Halkoaho ja muut (1990a), Halkoaho (1993) sekä Barkov ja muut (1999, 2000, 2002, 2004, 2005). Muina platinaryhmän mineraaleina Kirakkajuppuran esiintymästä tavataan mm. vysotskiitti-braggiittia ($\text{PdS}-(\text{Pt},\text{Pd},\text{Ni})\text{S}$), zvyagintseviittia (Pd_3Pb), lauriitti–erlichmaniittia ($\text{RuS}_2-\text{OsS}_2$), irarsiitti–hollingworthiittia ($\text{IrAsS}-\text{RhAsS}$), keithconniittia ($\text{Pd}_{20}(\text{Te},\text{Bi})_7$), lyijypitoista keithconniittia ($\text{Pd}_{20}(\text{Te}_6\text{Pb})$), kuprorhodiittia (ideaalikoostumus CuRh_2S_4)–ferrorhodiitti–malaniittia ($\text{Cu}(\text{Pt},\text{Ir},\text{Rh})_2\text{S}_4$), kuproiiridiittia (CuIr_2S_4), konderiittimaisia ($\text{Cu}_3\text{Pb}(\text{Rh},\text{Pt},\text{Ir})_8\text{S}_{16}$) Pb-(Pd)-rikkaita sulfidisia kiinteäliuoksia, joissa atomisuhteet ovat $(\text{Cu}+\text{Fe}+\text{Pb}+\text{Ni}):(\text{Rh}+\text{Ir}+\text{Pd}+\text{Pt}+\text{Co}):\text{S}$ 1:2:4, sperryliittia (PtAs_2), skaergaardiitti–hongshiittia ($(\text{Pd},\text{Pt})\text{Cu}$) sekä Pd-Pt-Cu-lejeerinkejä. Lisäksi on tunnustettu toistaiseksi nimeämättömiä mineraaleja, joiden kemialliset kaavat ovat muotoa Pd_7PbO_8 , $\text{Rh}(\text{Ni},\text{Fe},\text{Cu})_2\text{S}_3$ ja $\text{Pd}_3(\text{As},\text{Te},\text{Sn},\text{Pb})_2$. Ferrorhodiitti nimen käytöstä luovuttiin vuonna 2018 (Bosi ym. 2019),



Kuva 5. Malmimikroskooppikuva isohkosta osittain omamuotoisesta laflammeittimineraaliteksestä epoksissa. Mittakaavajanan pituus on 100 mikrometriä. Kuva: Krisztián Szentpéteri.

Figure 5. Ore microscopic image of a large subhedral crystal of laflammeite. The surrounding material is epoxy. Scale bar length is 100 micrometers. Photo: Krisztián Szentpéteri.

koska se on koostumukseltaan ja kidemuodoltaan identtinen kuprorhodosiitin kanssa.

Muina malmimineraaleina tavataan oksideista kromiittia (FeCr_2O_4) ja toistaiseksi nimeämätöntä lyijyvanadiinioksidia ($\text{Pb}_4\text{O}(\text{VO}_4)_2$). Perusmetallisulfideista esiintyy vähäisiä määriä kuparikiisua (CuFeS_2), borniittia (Cu_5FeS_4), kuparihohdetta (Cu_2S), milleriittia (NiS) ja digeniittia (Cu_9S_5). Lisäksi Kirakkajuppuran esiintymissä on korkean kupari- ja palladiumpitoisuuden omaavaa kultaa.

Edellä mainittujen malmimineraalien isäntäkiviä ei voida täysin varmuudella todentaa, sillä tutkimuksessa käytetty päänäyte on vaskattu louhintatyön aikana syntyneestä hienorakeisesta materiaalista. Kuvan 4 perusteella platinametallirikastuman isäntäkivi vaihtelee muuttuneista peridotiiteista muuttuneiden pyrokseeniittien kautta muuttuneisiin

gabronoriittisiin kiviin. Silikaattimineraaleista tavataan mm. aktinoliitti–tremoliittisarjan amfiboleja ($\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), klinoklooria ($\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$), klinozoiisiittia ($\text{Ca}_2(\text{Al,OH})\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$), serpentiiniä ($(\text{Mg}_3(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5)$), plagioklaasia ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ – $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) ja titaniittia (CaTiSiO_5).

Laflammeiitti ($\text{Pd}_3\text{Pb}_2\text{S}_2$)

Penikkain kerrosintrusion Kirakkajuppuran platinametalliesiintymä on toistaiseksi ainoa paikka, mistä on löydetty laflammeiittia. Laflammeiitti on palladiumlyijysulfidimineraali ($\text{Pd}_3\text{Pb}_2\text{S}_2$) (kuva 5 & kansikuva), joka nimettiin kanadalaisen tutkijan, J. H. Gilles Laflammen (s. 1947), mukaan. Mineraali

Taulukko 1. Penikkain kerrosintruusion laflammeiitin ($\text{Pd}_3\text{Pb}_2\text{S}_2$) kemiallisia koostumuksia (Barkov ym. 2002).

Table 1. Chemical compositions of laflammeite ($\text{Pd}_3\text{Pb}_2\text{S}_2$) from the Penikat layered intrusion (Barkov et al. 2002).

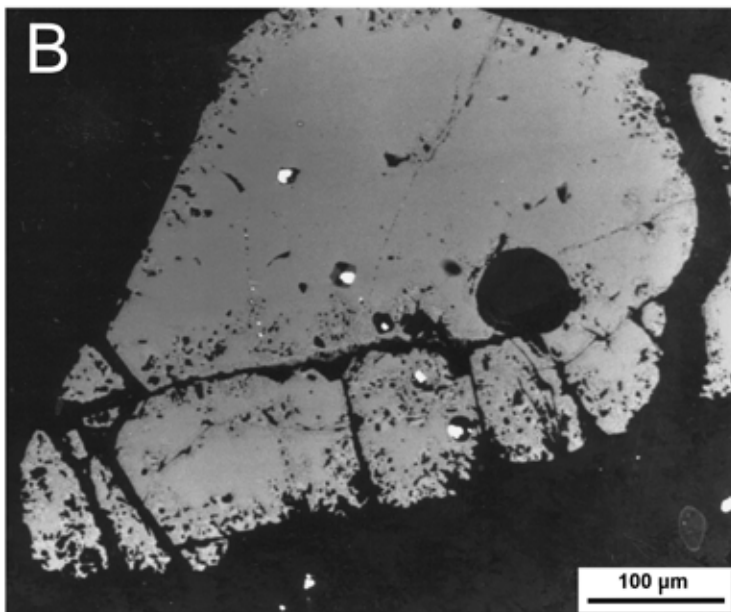
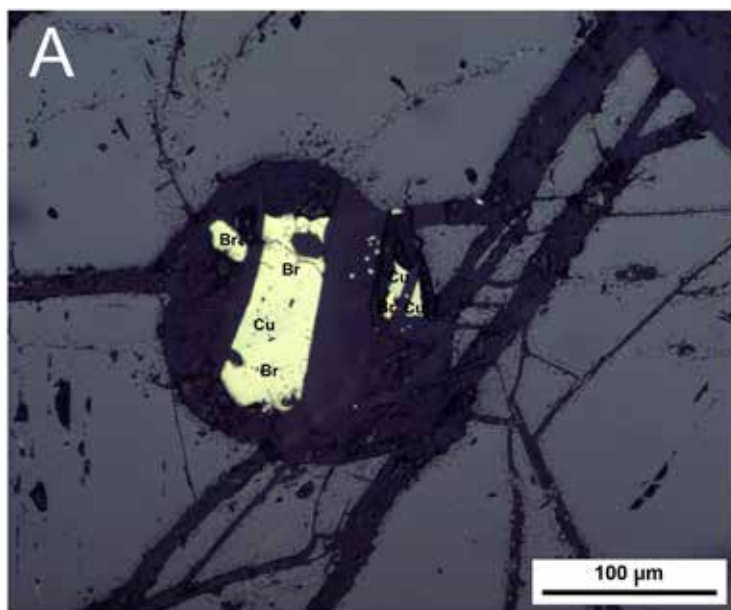
	Laflammeiittirae 1	Laflammeiittirae 2
Pd (paino-%)	39,77	39,16
Ir	—	1,08
Pb	52,98	52,01
S	8,07	7,90
Summa	100,82	100,15
Pd (apfu=7*)	2,97	2,96
Ir	—	0,05
Pb	2,03	2,02
S	2,00	1,98

* apfu (atoms per formula unit) eli arvot kaavan määrästä atomeja perustuvat seitsemään atomiin kaavayksikköä kohti.

niminen hyväksyttiin ennen julkistamista Kansainvälisen mineralogisen yhdistyksen (*International Mineralogical Association*, IMA) uusien mineraaleja ja mineraalien nimiä käsittelevässä komissiossa (*Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification*, CNMNC) numerolla 2000–014. Laflammeiitin tyypin materiaalia (CMNMC 83195) säilytetään Kanadan luontomuseossa Ottawassa. Tällä mineraalilla on parkeriittityyppinen ($\text{Ni}_3(\text{Bi,Pb})_2\text{S}_2$) rakenne. Se esiintyy yksittäisinä $\leq 0,3$ mm pituisina levyinä omamuotoisina ja osittain omamuotoisina kiteinä sekä harvoin vierasmuotoisina kiteinä. Laflammeiittikiteillä on täydelliset lohkoratot tai mineraali muodostaa yhteenkasvettuneita sekarakkeita vysotskiitti–braggiitin kanssa. Laflammeiitti on läpinäkymätön, kermanvärisen ja sillä on ruskehtava sävy ilmassa heijastuneessa valossa (kuva 5). Anisotropia on heikko, ruskehtavan harmaasta harmaanruskeaan. Kaksoisheijastus (*birefractance*) on heikkoa ja pleokroismia ei ole havaittu (Barkov ym. 2002). Laflammeiitin kemiallisia koostumuksia on esitetty taulukossa 1. Tarkemmat hilamitat ja muut ominaisuudet löytyvät julkaisusta Barkov ja muut (2002).

Kirakkajupuran platinametalliesiintymän synty

Barkov ja muut (2005) esittävät, että Kirakkajupuran platinametalliesiintymä olisi muodostunut voimakkaassa hydrotermisessä alkuaineiden uudelleenmobilisaatiossa, jolloin platinaryhmän alkuaineet olisivat uuttuneet ”alkuperäisiltä” vyöhykkeiltään. Tällöin platiniumin ja platinan lähteenä olisi perusmetallisulfideja vähän sisältävä Sompujärven platinametalliesiintymä sekä ruteniumin ja osmiumin lähteenä alueen kromiitti-kerrokset. Sopivissa olosuhteissa tapahtui platinaryhmän mineraalien saostumista ja muodostui erittäin vähärikkinen ja platinametalista rikastunut esiintymä, joka liittyy läheisesti kidevesipitoisiin silikaatteihin. Tämä teoria ei ole kuitenkaan aukoton, sillä sen avulla on haasteellista selittää esimerkiksi kuvassa 6 nähtävää tekstuuria – eli miten platinaryhmän mineraaleja olisi voinut kiteytyä kromiittirakeiden sisällä oleviin silikaattisulkeumiin. Kirakkajupuran erittäin platinametallipitoisen esiintymän syntymekanismi vaatii edelleen tutkimusta.



Kuva 6. Mikroskooppikuvia Kirakkajuppuran platinametalliesiintymän mineraalitekstuureista kiillotetussa ohuthieessä. Malmimikroskooppikuva platinaryhmän mineraalien sekarakkeesta "syöpyneen" kromiittirakeen silikaattisulkeumassa, joka koostuu amfibolista ja kloriitista (A). Takaisin sironneiden elektronien muodostamassa kuvassa braggiittirakeita kromiitin silikaattisulkeumissa (B). Kuvassa A Br = braggiitti ja Cu = kuprorhodosiitti. Mittakaavajanan pituus on 100 mikrometriä. Kuva: Tapio Halkoaho.

Figure 6. Microscopic images of the mineral textures in the polished thin section of the Kirakkajuppura platinum metal deposit. An ore microscopic image of composite platinum-group mineral grain in a silicate inclusion composed of amphibole and chlorite in a corroded chromite grain (A). Backscattered electron image showing braggite grains in silicate inclusions of a chromite grain (B). In A image Br = braggite and Cu = cuprorhodsite. Scale bar length is 100 micrometers. Photo: Tapio Halkoaho.

Yhteenveto

Penikkain kerrosintruusio sijaitsee Pohjois-Suomessa Simon ja Tervolan kuntien alueella. Penikkain kerrosintruusion ikä on noin 2 440 miljoonaa vuotta, ja se on 23 km pitkä sekä 1,5–3,5 km leveä. Intruusio sisältää Sompujärven, Ala-Penikan ja Paasivaaran platinametalliesiintymät. Aivan intruusion pohjoispäässä Kirakkajuppuran alueella (kuva 2) Sompujärven esiintymässä on poikkeuksellisen platina-metallipitoinen kohta. Tässä Kirakkajuppuran esiintymässä on hyvin monipuolinen platinaryhmän mineraaleja sisältävä koostumus: siitä on myös löydetty ja kuvattu uusi platinaryhmän mineraali, laflammeiitti ($\text{Pd}_3\text{Pb}_2\text{S}_2$). Tois-taiseksi tätä mineraalia ei ole löydetty muualta maailmasta. On esitetty, että Kirakkajuppuran esiintymä syntyi alkuaineiden tehokkaan hydrotermisen uudelleenmobilisaation seurauk-sena (Barkov ym. 2005), mutta esiintymässä on myös piirteitä, jotka eivät tue tätä teoriaa.

Kiitokset

Esitämme parhaimmat kiitokset Oulun yliopistossa vuosina 1987–1989 toimineen Peräpohjan platinaprojektin henkilöstölle, erityisesti projektin johtajalle, edesmenneelle professori Tuomo Alapietille. Erityisesti olemme kiitollisia Outokumpu Oy:n geologille FM Jarmo Lahtiselle, sillä hänen aloitteestaan yksi kirjoittajista (Tapio Halkoaho) pääsi toimimaan Kirakkajuppuran koelouhintatyö-maan ohjaajana vuonna 1988, jolloin useisiin julkaisuihin johtanut raskasmineraaliaineisto kerättiin. Tässä artikkelissa esitetty paljastu-makartoitusaineisto periytyy edellä mainitun projektin ja Lapin Malmi Oy:n malmin-etsintätoimien tuloksista. Kirjoittajat haluavat lisäksi kiittää Geologin toimitussihteeriä, Mira Valkamaa, tekstiä parantavista kommentteista.

DOS., FT TAPIO HALKOAHO
(tapio.halkoaho@gtk.fi)

FT SARI ROMPPANEN
(sari.romppanen@gtk.fi)

KRISZTIÁN SZENTPÉTERI, PHD
(kriszian.szentpeteri@gtk.fi)

Mineraalitalouden ratkaisut
Geologian tutkimuskeskus

Tapio Halkoaho on erikoistutkijana Geologian tutkimuskeskuksen Kuopion toimipisteessä sekä lisäksi toimii magmapetrologian dosenttina Turun yliopis-tossa ja petrologian dosenttina Helsingin yliopis-tossa. Sari Romppanen toimii erikoistutkijana Geo-logian tutkimuskeskuksen Espoon toimipisteessä sekä on Geologin päätoimittaja. Krisztián Szentpéteri toimii erikoistutkijana (malmigeologia) Geologian tutkimuskeskuksen Espoon toimipisteessä.

Summary

Penikat layered intrusion and a new mineral found from the Sompujärvi platinum metal deposit: laflammeite ($\text{Pd}_3\text{Pb}_2\text{S}_2$)

The Penikat layered intrusion is located in the northern Finland in the area of Simo and Tervola municipalities. It is about 2,440 million years old, 23 km long and 1.5–3.5 km wide. The intrusion contains three significant platinum metal deposits: Sompujärvi, Ala-Penikka and Paasivaara deposits. The very northern part of the intrusion (Fig. 2), the Kirakkajuppura area of the Sompujärvi platinum metal deposit is exceptionally rich in platinum metals. The Kirakkajuppura deposit is a very varied deposit containing platinum-group minerals. From this site, a new platinum-group mineral laflammeite ($\text{Pd}_3\text{Pb}_2\text{S}_2$), has been described. Laflammeite has not been found elsewhere so far. It has been proposed that the Kirakkajuppura

deposit was formed by effective hydrothermal remobilization (Barkov et al. 2005). The Kirakkajuppura deposit is clearly different from the normal Sompujärvi platinum metal deposit, but why? The occurrence therefore still needs to be studied and its formation clarified.

Lähdeluettelo

- Alapieti, T. T., 1982. The Koillismaa layered igneous complex, Finland – its structure, mineralogy and geochemistry, with emphasis on the distribution of chromium. Geological Survey of Finland Bulletin 319, 1–116.
- Alapieti, T. T., 1984. Peräpohjan kerrosintruusiotutkimus. Outokumpu säätiö, julkaisematon raportti, 55 s.
- Alapieti, T. T., Filén, B. A., Lahtinen, J. J., Lavrov, M. M., Smolkin, V. F. & Voitsekhovskiy, S. N., 1990. Early Proterozoic layered intrusions in the northeastern part of the Fennoscandian shield. *Mineralogy and Petrology* 42, 1–22. <https://doi.org/10.1007/BF01162681>
- Alapieti, T. T., Hugg, R. & Piirainen, T. A., 1979a. Structure, mineralogy and chemistry of the Syöte section in the early Proterozoic Koillismaa layered intrusion, northeastern Finland. Geological Survey of Finland Bulletin 229, 1–43.
- Alapieti, T. T., Hugg, R., Piirainen, T. A. & Ruotsalainen, A., 1979b. The ultramafic and mafic intrusion at Näränkäväära, northeastern Finland. Geological Survey of Finland, Report of Investigation 35, 1–31.
- Alapieti, T. T., Kujanpää, J., Lahtinen, J. J. & Papunen, H., 1989a. The Kemi stratiform chromite deposit, Northern Finland. *Economic Geology* 84, 1057–1077. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.84.5.1057>
- Alapieti, T. T. & Lahtinen, J. J., 1986. Stratigraphy, petrology, and platinum-group element mineralization of the early Proterozoic Penikat layered intrusion, Northern Finland. *Economic Geology* 81, 1126–1136. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.5.1126>
- Alapieti, T. T. & Lahtinen, J. J., 1989. Early Proterozoic layered intrusions in the northeastern part of the Fennoscandian shield. Teoksessa: Alapieti, T. (toim.), 5th International Platinum Symposium. Guide to the post-symposium field trip. Geologian tutkimuskeskus, opas 29, 3–41.
- Alapieti, T. T. & Lahtinen, J. J., 2002. Platinum-group element mineralization in layered intrusions of Northern Finland and the Kola Peninsula, Russia. Teoksessa: Cabri, L. J. (toim.), *The Geology, Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of Platinum-group Elements*. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, 507–546.
- Alapieti, T. T., Lahtinen, J., Huhma, H., Hänninen, E., Piirainen, T. A. & Sivonen, S. J., 1989b. Platinum-group element-bearing Cu-Ni sulphide mineralization in the marginal series of the early Proterozoic Suhanko-Konttijärvi layered intrusion, Northern Finland. Teoksessa: Prendergast, M. D. & Jones, M. J. (toim.), *Magmatic sulphides - Zimbabwe volume*. Institution of Mining and Metallurgy, London, 177–187.
- Alapieti, T. T. & Piirainen, T. A., 1984. Cu-Ni-PGE mineralization in the marginal series of the early Proterozoic Koillismaa layered igneous complex, northeast Finland. Teoksessa: Buchanan, D. L. & Jones, M. J. (toim.), *Sulphide deposits in Mafic and Ultramafic Rocks*. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 123–131.
- Barkov, A. Y., Fleet, M. E., Martin, R. F. & Halkoaho, T. A. A., 2004. A potentially new konderite-like sulfide of Fe, Pb, Cu, Rh, Pd, and Ir from the Penikat layered complex, Finland. *Canadian Mineralogist* 42, 499–513. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.42.2.499>
- Barkov, A. Y., Fleet, M. E., Martin, R. F. & Halkoaho, T. A. A., 2005. New data on “bonanza”-type PGE mineralization in the Kirakkajuppura PGE deposit, Penikat layered complex, Finland. *Canadian Mineralogist* 43, 1663–1686. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.5.1663>
- Barkov, A. Y., Halkoaho, T. A. A., Roberts, A. C., Criddle, A. J., Martin, R. F. & Papunen, H., 1999. New Pd-Pb and Pb-V oxides from a bonanza-type PGE-rich, nearly BMS-free deposit in the Penikat layered complex, Finland. *Canadian Mineralogist* 37 (6), 1507–1524.
- Barkov, A. Y., Martin, R. F., Halkoaho, T. A. A. & Criddle, A. J., 2002. Laflammeite, Pd₃Pb₂S₂, a new platinum-group mineral species from the Penikat layered complex, Finland. *Canadian Mineralogist* 40, 671–678. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.40.2.671>
- Barkov, A. Y., Martin, R. F., Halkoaho, T. A. A. & Poirier, G., 2000. The mechanism of charge compensation in Cu-Fe-PGE thiospinels from the Penikat layered intrusion, Finland. *American Mineralogist* 85, 694–697. <https://doi.org/10.2138/am-2000-5-606>
- Bosi, F., Biagioni, C. & Pasero, M., 2019. Nomenclature and classification of the spinel supergroup. *European Journal of Mineralogy* 31, 183–192. <https://doi.org/10.1127/ejm/2019/0031-2788>
- Dokuchaeva, V. S., Chargurov, A. A., Radchenko, M. K. & Fedorov, C. A., 1982. Rannekarelskie magmatism.

- Teoksessa: Gorbunov, G. I. (toim.), *Imandra-Varzuga zona Kareliid*. NAUKA, Leningrad, 114–144 (venäjäksi).
- Halkoaho, T., 1989. Ala-Penikan platinametallimineralisaatiot Penikkain kerrosintruusiassa. Oulun yliopisto, Peräpohjan platinaprojektin raportti n:o 2, Oulu, 173 s.
- Halkoaho, T., 1993. The Sompujärvi and Ala-Penikka PGE Reefs in the Penikat Layered Intrusion, Northern Finland: implications for PGE reef-forming processes. *Acta Universitatis Ouluensis, Series A, Scientiae rerum naturalium* 249, 122 s.
- Halkoaho, T. A. A., Alapieti, T. T. & Huhtelin, T. A., 2005. The Sompujärvi, Ala-Penikka and Paasivaara PGE Reefs in the Penikat layered intrusion, Northern Finland. Teoksessa: Alapieti, T. T. & Kärki, A. J. (toim.), *Field trip guidebook: Early Palaeoproterozoic (2.5-2.4) Tornio – Näränkäväära layered intrusion belt and related chrome and platinum-group element mineralization, Northern Finland*. Prepared for the 10th Platinum Symposium in Oulu Finland 2005. *Geologian tutkimuskeskus, opas* 51a, 33–76.
- Halkoaho, T. A. A., Alapieti, T. T. & Lahtinen, J. J., 1989. The Sompujärvi PGE mineralization in the Penikat layered intrusion, Northern Finland. Teoksessa: Alapieti, T. (toim.), *5th International Platinum Symposium – Guide to the post-symposium field trip*. *Geologian tutkimuskeskus, opas* 29, 71–92.
- Halkoaho, T. A. A., Alapieti, T. T. & Lahtinen, J. J., 1990a. The Sompujärvi PGE Reef in the Penikat layered intrusion, Northern Finland. *Mineralogy and Petrology* 42, 39–55. <https://doi.org/10.1007/BF01162683>
- Halkoaho, T. A. A., Alapieti, T. T., Lahtinen, J. J. & Lerssi, J. M., 1990b. The Ala-Penikka PGE Reef in the Penikat layered intrusion, Northern Finland. *Mineralogy and Petrology* 42, 23–38. <https://doi.org/10.1007/BF01162682>
- Huhma, H., Cliff, R. A., Perttunen, V. & Sakko, M., 1990. Sm-Nd and Pb isotopic study of mafic rocks associated with early Proterozoic continental rifting: the Peräpohja schist belt in northern Finland. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 104, 369–379. <https://doi.org/10.1007/BF00321491>
- Huhtelin, T., 1989. Paasivaaran platinamineralisaatio Penikkain kerrosintruusiassa., Oulun yliopisto, Peräpohjan platinaprojektin raportti n:o 1, Oulu, 70 s.
- Huhtelin, T. A., Alapieti, T. T. & Lahtinen, J. J., 1989. The Paasivaara PGE mineralization in the Penikat layered intrusion, Northern Finland. Teoksessa: Alapieti, T. (toim.), *5th International Platinum Symposium – Guide to the post-symposium field trip*. *Geologian tutkimuskeskus, opas* 29, 123–144.
- Huhtelin, T. A., Alapieti, T. T. & Lahtinen, J. J., 1990. The Paasivaara PGE Reef in the Penikat layered intrusion, Northern Finland. *Mineralogy and Petrology* 42, 57–70. <https://doi.org/10.1007/BF01162684>
- Iljina, M., 1994. The Portimo Layered Igneous Complex, with emphasis on diverse sulphide and platinum-group element deposits. *Acta Universitatis Ouluensis, Series A, Scientiae rerum naturalium* 258, 158 s.
- Järvinen, V., Halkoaho, T., Konnunaho, J., Heinonen, J. S. & Rämö, O. T., 2019. Parental magma, magmatic stratigraphy, and reef-type PGE enrichment of the 2.44-Ga mafic-ultramafic Näränkäväära layered intrusion, Northern Finland. *Mineralium Deposita* 53, 1535–1560. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00934-z>
- Järvinen, V., Halkoaho, T., Konnunaho, J., Heinonen, J. S. & Rämö, O. T., 2021. The basal dunitite of the Precambrian mafic-ultramafic Näränkäväära intrusion: Petrogenetic considerations and implications to exploration. *Mineralogy and Petrology* 115, 37–61. <https://doi.org/10.1007/s00710-020-00725-9>
- Järvinen, V., Halkoaho, T., Konnunaho, J., Heinonen, J. S., Kamo, S., ym., 2022a. Petrogenesis of the Paleoproterozoic Näränkäväära layered intrusion, northern Finland, Part II: U-Pb ID-TIMS age and Sm-Nd isotope systematics. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 94, 53–74. <https://doi.org/10.17741/bgsf/94.1.003>
- Järvinen, V., Halkoaho, T., Konnunaho, J., Heinonen, J. S., Karinen, T. & Rämö, O. T., 2022b. Petrogenesis of the Paleoproterozoic Näränkäväära layered intrusion, northern Finland, Part I: The northern peridotites and their relationships with the layered series and recharge events. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 94, 23–52. <https://doi.org/10.17741/bgsf/94.1.002>
- Kouvo, O., 1977. The use of mafic pegmatoids in geochronometry. 5th ECOG meeting, Pisa, Italy (abstrakti).
- Kouvo, O. & Vuorelainen, Y., 1958. Eskolaite, a new chromium mineral. *American Mineralogist* 43 (11–12), 1098–1106.
- Kujanpää, J., 1964. Kemin Penikkain jakson rakenteesta ja kromiiteista. *Julkaisematon lisensiaatintutkimus*. Oulun yliopisto, Oulu, 118 s.
- Kujanpää, J., 1980. Geology of the Kemi chromite deposit. Teoksessa: Häkli, T. A. (toim.), *Precambrian ores of Finland*. 26th International Geological Congress, Paris. *Guide to excursions* 078 A-C, 6–13.
- Lahtinen, J., 1985. PGE-bearing copper-nickel occurrences in the Marginal Series of the early Proterozoic Koillismaa layered intrusion, Northern

- Finland. Teoksessa: Papunen, H. & Gorbunov, G. I. (toim.), Nickel-copper deposits of the Baltic shield and Scandinavian Caledonides. Geological Survey of Finland Bulletin 333, 161–178.
- Lahtinen, J., 1987a. Platina-palladium-rodium-esiintymän geologinen in situ-malmiarvio I. Lapin Malmi, raportti 035/2544 05C/JJL/87/2, 17 s.
- Lahtinen, J., 1987b. Kirakkajuppuran Pt-Pd-esiintymän koelouhinta; arvio jäljellä olevan malmin määrästä ja laadusta. Lapin Malmi, raportti 035/2544 05/JJL/87, 27 s.
- Lahtinen, J., 1989. Kirakkajuppuran (N) II-vaiheen koelouhinta v. 1988. Lapin Malmi, raportti 035/2544 05/JJL/89, 16 s.
- Lavrov, M. M., 1979. Giberbasiy i rasslojennie peridotit-gabbro-noritovie intrusii dokembria Severnoi Karelii. NAUKA, Leningrad, 1–135 (venäjäksi).
- Maier, W. D., Halkoaho, T., Huhma, H., Hanski, E. & Barnes, S.-J., 2018. The Penikat Intrusion, Finland: Geochemistry, Geochronology, and Origin of Platinum–Palladium Reefs. *Journal of Petrology* 59, 967–1006. <https://doi.org/10.1093/petrology/egy051>
- Manhes, G., Allegre, C. J., Dupre, B. & Hamelin, B., 1980. Lead isotope study of basic-ultrabasic layered complexes: speculation about the age of the earth and primitive mantle characteristics. *Earth Planet Science Letters* 47, 370–382. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(80\)90024-2](https://doi.org/10.1016/0012-821X(80)90024-2)
- Mutanen, T., 1981. A new type of platinum-bearing chromite ore in the Koitelainen mafic layered intrusion, Northern Finland. 3rd International Platinum Symposium, Pretoria, South Africa. Abstracts of papers, 28–29.
- Mutanen, T., 1989. Koitelainen intrusion and Keivitsa-Satovaara complex. Excursion guide 5th International Platinum Symposium. Geologian tutkimuskeskus, opas 28, 49 s.
- Mutanen, T., 1997. Geology and petrology of the Akanvaara and Koitelainen mafic layered intrusions and the Keivitsa-Satovaara layered complex, northeastern Finland. *Geological Survey of Finland Bulletin* 395, 233 s.
- Patchett, P., Kouvo, O., Hedge, C. E. & Tatsumoto, M., 1981. Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: evidence from Hf isotopes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 78, 279–297. <https://doi.org/10.1007/BF00398923>
- Puustinen, K., 1977. Exploration in the northeast region of the Koitelainen gabbro complex, Sodankylä, Finnish Lapland. Teoksessa: Davis, G. R. (toim.), *Prospecting in areas of glaciated terrain*. The Institute Mining and Metallurgy, London, 6–13.
- Söderholm, K. & Inkinen, O., 1982. The Tornio layered intrusion – a recently discovered intrusion with chromite horizons in northern Finland. *Geological Society of Finland Bulletin* 54, 15–24.
- Tarkian, M. & Mutanen, T., 1987. Loveringite from the Koitelainen layered intrusion, Northern Finland. *Mineralogy and Petrology* 37, 37–50. <https://doi.org/10.1007/BF01163157>
- Vymazalová, A., Kojonen, K., Laufek, F., Johanson, B., Stanley, C. J., ym., 2019. Pampaloite, AuSbTe, a new mineral from Pampalo gold mine, Finland. *Mineralogical Magazine* 2019, 393–400. <https://doi.org/10.1180/mgm.2018.129>

