

Apatiitin kemiallisen koostumuksen vaihtelu Penikkain kerrosintruusiassa – sovellus PGE-rikastumien etsintään

TAPIO HALKOAHO JA SARI ROMPPANEN

Suomessa 1980- ja 1990-luvut olivat kiivasta platinaryhmän alkuaineista (platinum group elements, PGE) rikastuneiden esiintymien etsimisen ja kartoittamisen aikaa. Yhtenä näiden PGE-esiintymien malminetsintämenetelmänä kokeiltiin Etelä-Afrikan Bushveldin ja Yhdysvaltain Stillwaterin kerrosintruusioissa testattua apatiitin kemiallisen koostumuksen vaihteluihin perustuvaa menetelmää. Tutkimuksen kohteeksi valikoitui Pohjois-Suomessa Simon, Keminmaan ja Tervolan kuntien alueella oleva Penikkain kerrosintruusio, jonka tiedettiin sisältävän Sompujärven, Ala-Penikan ja Paasivaaran PGE-esiintymät. Tässä tekstissä esitellään tutkimuksessa tehtyjä havaintoja. On kuitenkin huomioitava, että tutkimusaikana yli kolme vuosikymmentä sitten, ei vielä ollut käytössä kaikkia nykymenetelmiä.

Johdanto

1980- ja 1990-luvuilla esitettiin teorioita, jotka korostivat volatiilien merkitystä Bushveldin ja Stillwaterin kerrosintruusioiden platinaryhmän alkuaineista rikastuneiden vyöhykkeiden muodostumisessa (mm. Volborth & Housley 1984; Ballhaus & Stumpfl 1985a, 1986; Ballhaus ym. 1988; Boudreau 1988). Teorian mukaan intruusioiden PGE-rikastumat muodostuivat joko ylöspäin vaeltavien fluidien tai alapuolisten kivilajiyksiköiden fluideista rikastuneen interkumulussulan vaikutuksesta (ks. Vermaak 1976; von Gruenewaldt 1979). Yhdysvaltojen Montanan platinametalleista rikastuneen Stillwaterin intruusion J-M Reefissä esiintyy gabroidisia pegmatiittisia kiviä sekä kloori- ja vesipitoisia mineraaleja (Boudreau ym. 1986; Boudreau & McCallum 1989). Myös Etelä-Afrikan Bushveldin intruusion Merensky Reefin on todettu sisältävän klooripitoisia mineraaleja

(Johan & Watkinson 1985; Boudreau ym. 1986; Boudreau & Kruger 1990), ja volatiilien vaikutusta intruusion kiteytymiseen ovat tutkineet esimerkiksi Elliott ym. (1982), Kinloch (1982), Schiffrics (1982), Buntin ym. (1985) sekä Ballhaus ja Stumpfl (1985a, 1986).

Monissa tutkimuksissa (esim. Boudreau ym. 1986; Boudreau & McCallum 1989; Mathez ym. 1989) on esitetty, että kloorista rikastuneilla liuoksilla on merkittävä rooli platinametallien – erityisesti palladiumin ja platinan – rikastumisessa. Boudreaun ja McCallumin (1989) mukaan klooripitoisten fluidien käyttäytymisen ymmärtäminen on keskeistä PGE-malminetsinnän suunnittelussa. Heidän johtopäätöksensä mukaan arkeisissa magmoissa klooripitoisuus oli korkeampi kuin nuoremmassa magmoissa. Korkeampi klooripitoisuus arkeisissa mafisissa ja ultramafisissa magmoissa voisi selittää, miksi PGE-esiintymiä esiintyy erityisesti vanhemmissa kerrosintruusioissa.

Apatiittien geokemian yhteys malminmuodostukseen

Ymmärtääkseen liuosten roolia kerrosintruusioissa Boudreau ja McCallum (1989) sekä Boudreau ja Kruger (1990) tutkivat kloorin ja fluorin pitoisuuksien vaihtelua Stillwaterin ja Bushveldin intruusioiden apatiiteissa. Apatiitti on hyvä indikaattori korkeiden lämpötilojen halogeenien fugasiteettitutkimuksessa, koska se ei kovin helposti tasapainoitunut uudelleen alhaisissa lämpötiloissa (Korziniskiy 1982; Tacker & Stormer 1988). Molemmissa intruusioissa PGE-rikastuneissa vyöhykkeissä apatiitin koostumus muuttuu klooripitoisesta fluoripitoisemmaksi. Klooripitoista apatiittia (tyypillisesti alle 0,4 paino-% F ja yli 6,0 paino-% Cl) esiintyy Stillwaterin kerrosintruusion alaosassa. Fluoripitoisempia apatiitteja (tyypillisesti yli 1,2 paino-% F ja alle 3,0 paino-% Cl) tavataan J-M Reefin yläpuolisissa kerroksissa (Boudreau & McCallum 1989).

Boudreau ym. (1986) kuvasivat runsaasti klooria sisältäviä apatiitteja Bushveldin ja Stillwaterin PGE-rikastuneilta vyöhykkeiltä ja esittivät, että ne olivat tasapainossa klooripitoisten fluidien kanssa, jotka erkaantuivat kumulaattiseurannon kiinteytymisen aikana. Tutkiessaan Merensky Reefin interkumuluskvartsin nestesulkeumia Ballhaus ja Stumpff (1985b) havaitsivat kaasusulkeumia, jotka sisälsivät hiilidioksidia, metaania sekä joissakin tapauksissa jälkiä hypersuolaisista liuoksista. Lisäksi he havaitsivat monifaasisia neste-sulasulkeumia ja sekundäärisiä kolmen faasin H_2O -NaCl-sulkeumia. Näiden yhteydessä esiintyi myös grafiittia ja klooria sisältäviä vesipitoisia silikaatteja (Ballhaus & Stumpff 1985c).

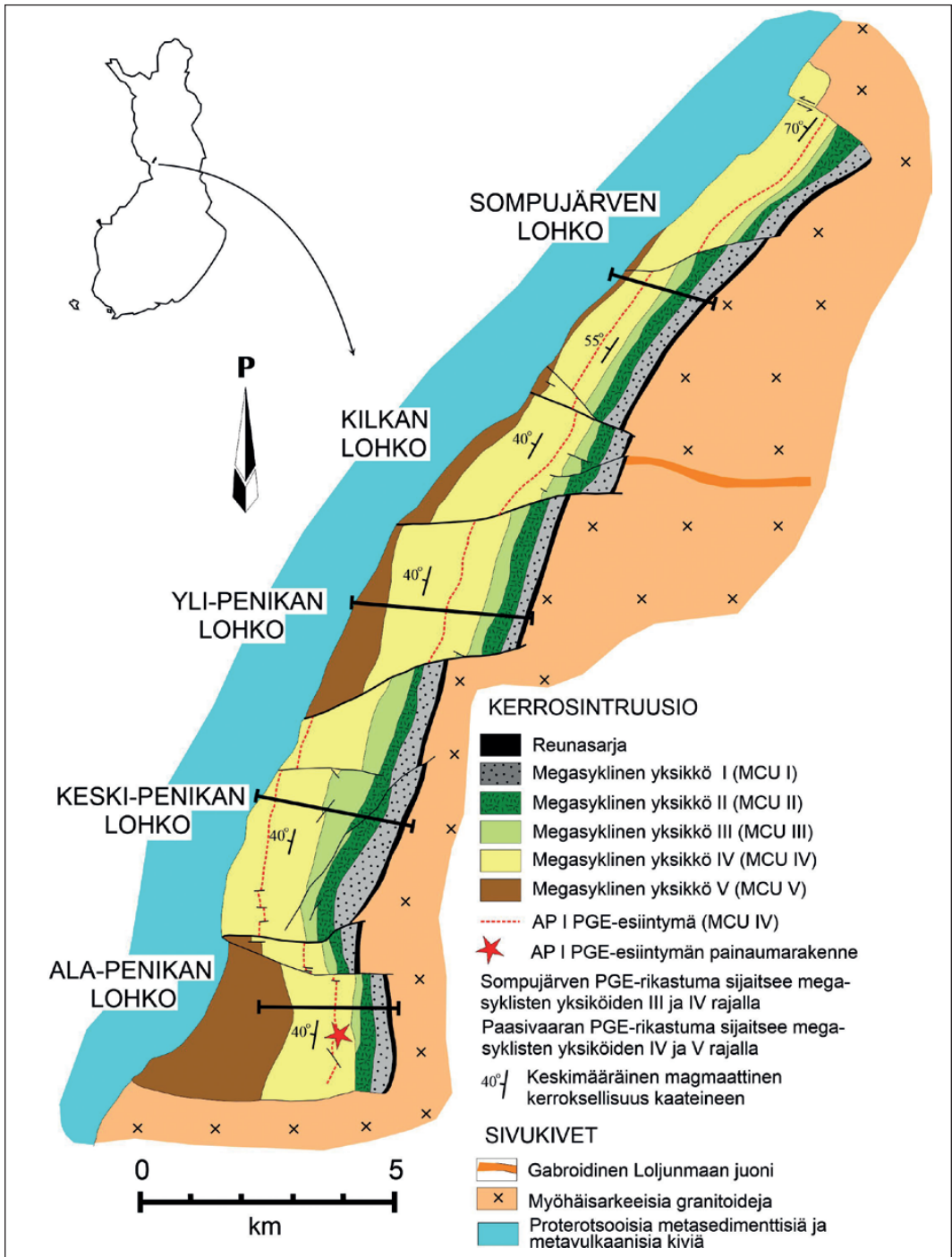
Vermaak (1976) ja von Gruenewaldt (1979) ehdottivat, että plagioklaasin kelluminen Bushveldin magmasäiliössä saattoi muodostaa kidematon, joka vangitsi magmaa alleen ja eristi sen muusta magmasäiliöstä. Tämä vangittu magma rikastui haihtu-

vista aineksista sekä rikki-, PGE-, kupari- ja nikkelpitoisista komponenteista interkumulussulan noustessa alemmista tiivistyvistä kumulaattikerroksista ylöspäin. Kun magnetiitin kiteytyminen alensi magman rikin liukoisuutta, se johti sekoittumattoman sulfidisulan erkaantumiseen. Muodostunut Fe-Ni-Cu-sulfidisula rikastui myös platina-metalleista ja jossain määrin myös hopeasta, vismutista, telluurista, tinasta, antimonista ja muista harvinaisista metalleista muodostaen sulfidipiroitteisen kerroksen.

Tutkimuskohde

Penikkain kerrosintruusio sijaitsee Pohjois-Suomessa Simon, Keminmaan ja Tervolan kuntien alueella (kuva 1). Se on osa epäjatkovaa, noin 300 km pituista varhaispaleoproterotsooista kerrosintruusiovyöhykettä, joka alkaa Ruotsista ja jatkuu Koillismaan Näränkävääraan sekä sieltä edelleen Venäjälle Oulangan kerrosintruusiokompleksille. Penikkain kerrosintruusio on 23 km pitkä, 1,5–3,5 km leveä, ja sen iäksi on määritetty 2 440 miljoonaa vuotta (Huhma ym. 1990). Penikkain intruusiota on kuvattu useissa julkaisuissa (mm. Kujanpää 1964; Alapieti & Lahtinen 1986, 1989; Alapieti ym. 1990; Halkoaho 1993; Halkoaho ym. 2005; Maier ym. 2018).

Länteen kaatuvan Penikkain intruusion jalkapuolen kivet ovat myöhäisarkeisia graniotideja ja kattopuolen kivet vaihtelevasti tholeiittisia vulkaanisia kiviä, puolipinnallisia juonikiviä tai polymiktisia konglomeeraatteja. Alkuperäinen intruusio on pilkkoutunut tektonisissa liikunnoissa viiteen lohkoon, joita erottavat toisistaan itä-länsisuuntaiset siirrokset. Lohkot ovat etelästä pohjoiseen Ala-Penikan, Keski-Penikan, Yli-Penikan, Kilkan ja Sompujärven lohko (kuva 1, Alapieti & Lahtinen 1986). Penikkain kerrosintruusio muodostuu kahdesta pääyksiköstä: reunasarjasta ja kerrossarjasta. Kerrossarja on jaettu viiteen megasykliseen

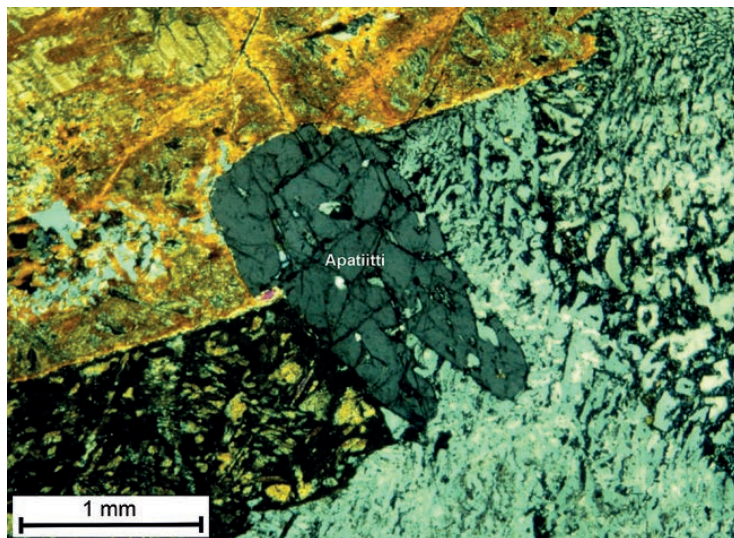


Kuva 1. Penikkain kerrosintruusion kallioperäkartta, jossa nähdään megasyklisten yksiköiden ja platina-ryhmän alkuaineista rikastuneiden kerrosten sijainnit sekä näytteenottoprofiilit (mustat paksut viivat). Kuva muokattu lähteistä Alapieti ja Lahtinen 1986, Alapieti ym. 1990 sekä Halkoaho ym. 2005.

Figure 1. Bedrock map of the Penikat layered intrusion, showing the locations of the megacyclic units and layers enriched with platinum-group elements, as well as sampling profiles (thick black lines). Modified after Alapieti and Lahtinen 1986, Alapieti et al. 1990 and Halkoaho et al. 2005.

yksikköön (engl. *megacyclitic units*, MCU I–V) (kuva 1), joista alemmat (I–III) ovat koostumukseltaan tavanomaista piipitoisempaa korkean magnesiumpitoisuuden basalttia (engl. *siliceous high-Mg basalt*, SHMB) (Maier ym. 2018). Ylemmät yksiköt (IV ja V) sisältävät alempia yksiköitä vähemmän kromia ja muistuttavat koostumukseltaan tholeiittista basalttia. Megasyklisten yksiköiden geokemiallisten erojen on tulkittu johtuvan toistuvista magmapulsseista kiteytyvään magmasäiliöön (Alapieti & Lahtinen 1986). Reunasarjan ja megasyklisten yksiköiden kivilajeja on tarkemmin kuvattu Geologi-lehdessä 3/2024 (Halkoaho ym. 2024).

Intruusion kolme merkittävintä platinaryhmän alkuaineista rikastunutta vyöhykettä ovat Sompujärven, Ala-Penikan ja Paasivaaran PGE-rikastumat. Sompujärven PGE-rikastuma sijaitsee kolmannen (III) ja neljännen (IV) megasyklisen yksikön välisellä rajalla, 500–1 000 m intruusion pohjakontaktin yläpuolella. Ala-Penikan PGE-rikastuma sijaitsee 250–450 m Sompujärven PGE-rikastuman yläpuolella neljännen megasyklisen yksikön alaosassa. Paasivaaran PGE-rikastuma on noin 700–1 000 m Ala-Penikan PGE-rikastuman yläpuolella neljännen ja viidennen megasyklisen yksikön välisellä vaihtumisvyöhykkeellä (kuva 1). Näitä edellä mainittuja platinaryhmän alkuainerikastumia ovat kuvanneet mm. Alapieti ja Lahtinen (1986, 2002), Halkoaho (1993), Halkoaho ym. (1990a, 1990b, 2005), Huhtelin ym. (1990), Törmänen ja



Kuva 2. Mikroskooppikuva ristipolarisoidussa valossa Ala-Penikan lohkon painaumarakenteen gabbronoritepegmatiitista löydetystä apatiitista. Kuva: Tapio Halkoaho.

Figure 2. Microscopic image in cross-polarized light of apatite found in the gabbronorite pegmatite of the Ala-Penikka block's depression structure. Photo: Tapio Halkoaho.

Alapieti (1996), Kaukonen ym. (2004) sekä Maier ym. (2018).

Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksessa keskityttiin analysoimaan Penikkain kerrosintruusion apatiittia. Apatiittia löydettiin lähes jokaisesta tutkitusta näytteestä. Apatiittianalyysit tehtiin 1980–1990-lukujen taitteessa Oulun yliopiston elektronioptiikan laitoksella käyttäen JEOL JCXA 733 -elektronimikroanalysaattoria, Alapietin ja Sivosen (1983) kuvaamaa menetelmää hyödyntäen. Mittauksissa kiihtyvyyssännite oli 15 kV, virta 10 nA ja mittaussäteen halkaisija 3 µm (pienet rakeet) tai 10 µm. Mittausten luotettavuus varmistettiin hyödyntämällä soveltuvia standardeja (ks. Halkoaho 1993). Määritysraja oli 0,01–0,05 painoprosenttia riippuen alkuaineesta. Apatiitin OH- ja H₂O-pitoisuudet laskettiin anionipaikkojen eron perusteella (Cl + F + OH = 2 kaavan yksikköä kohti).

Tulokset

Petrografia

Apatiittia havaittiin esiintyvän aksessorisena mineraalina Penikkain kerrosintruusion kaikissa megasyklisissä yksiköissä: eniten yksiköissä I ja V. Lisäksi neljännen megasyklisen yksikön yläosassa Paasivaaran PGE-rikastumassa sitä voi olla jopa 1–2 tilavuus-%:a. Keskimääräistä enemmän apatiittia esiintyy myös Ala-Penikan PGE-rikastuman painaumarakenteen (ks. Halkoaho & Romppanen 2025) alueella sekä yksiköiden III:n ja IV:n välisellä rajavyöhykkeellä, Sompujärven PGE-rikastuman alueella.

Tutkittujen apatiittirakeiden halkaisija vaihtelee kymmenestä mikrometristä runsaaseen yhteen millimetriin (kuva 2). Pienet rakeet ovat pääosin omamuotoisia (kuvat 3A ja 3C), kun taas suuremmat mukautuvat ympäröivien kumulusmineraalirakeiden muotoon (kuvat 3B ja 3D). Apatiitti esiintyy useimmiten interkumulusmineraalina, paitsi megasyklisen yksiköiden IV ja V yläosissa, joissa se on kumulusmineraalina. Jotkin interkumulusapatiittirakeet megasyklisissä yksiköissä I ja V ovat vyöhykkeellisiä (kuva 3D).

Apatiitin geokemiallinen vaihtelu

Tutkimuksessa analysoitiin yhteensä 709 Penikkain intruusion apatiittia. Kuvissa 4 ja 5 esitetään kaikki 709 analyysia: 226 Ala-Penikan, 118 Keski-Penikan, 191 Yli-Penikan ja 174 Sompujärven lohkolta. Tutkimuksen tuloksia voidaan tarkemmin arvioida valikoitujen analyysien avulla. Yhteensä 32 näytettä Ala-Penikan lohkolta, joissa status ja korkeus kerrosseurannossa vaihtelevat, on esitetty taulukossa 1. Näiden näytteiden koostumukset ovat nähtävillä taulukossa 2 ja kerrosseurannon koostumusvaihtelut on esitetty kuvissa 5–9. Penikkain intruusion apatiitin koostumuksen vaihtelua tutkittiin neljän lohkon yksittäisillä profileilla (kuvat

1 ja 5–9). Tarkoituksena oli selvittää, millaisia apatiitin koostumusvaihteluita profileilla esiintyy. Erityistä huomiota kiinnitettiin platinametalleista rikastuneiden vyöhykkeiden läheisyyteen.

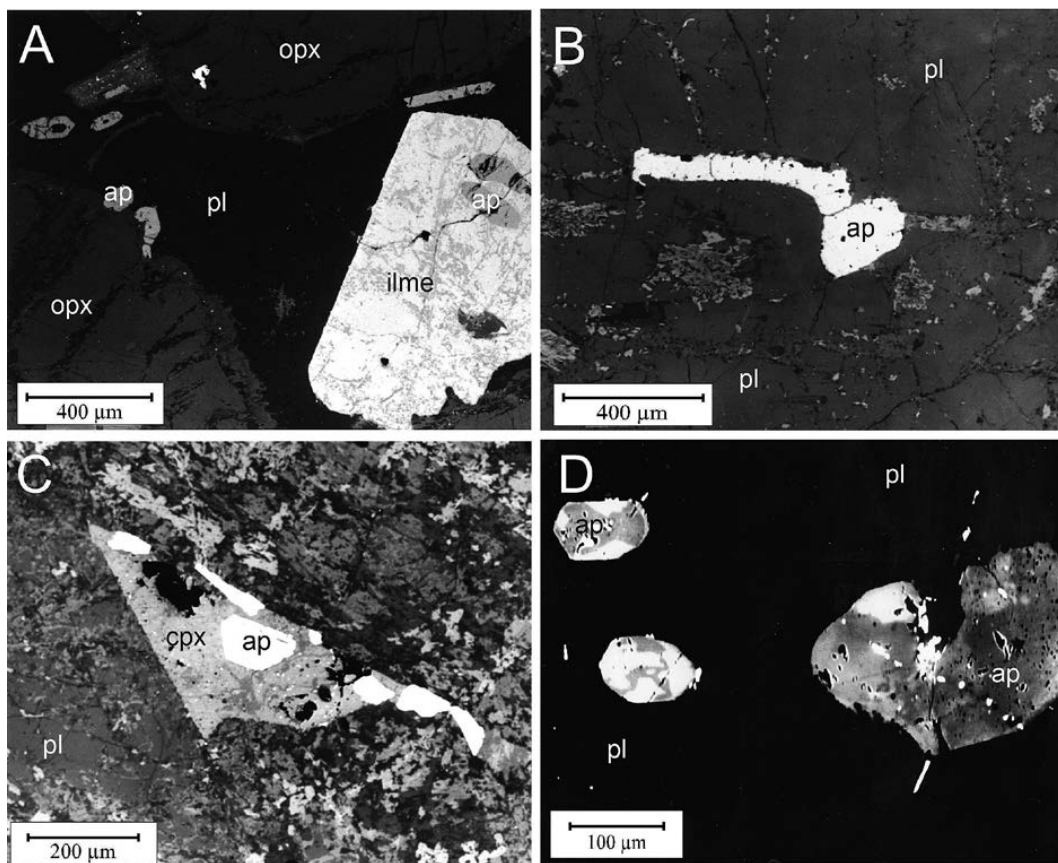
Kuvasta 4 nähdään Penikkain intruusion apatiittien Cl-, F- ja OH-pitoisuuksien jakaumat Cl-F-OH-kolmiodiagrammeilla. Kaikki intruusion klooriapatiitit esiintyvät megasyklisessä yksikössä I (kuva 4B). PGE-rikastumista Ala-Penikan apatiitit ovat klooripitoisimpia (kuva 4D) ja Paasivaaran fluoripitoisimpia (kuva 4E). Paasivaaran alueella esiintyvä kumulusapatiitti on rikastunut fluorista, koska kumulusapatiitti ottaa sitä helposti kidehilaansa. Sompujärven PGE-rikastuman alueella apatiitit ovat OH-pitoisimpia (kuva 4C).

Ala-Penikan lohkon ensimmäisessä ja viidennessä megasyklisessä yksikössä esiintyy heterogeenisiä apatiitteja (kuva 6). Koska kloori on fluoria raskaampi alkuaine, mikroanalysaattorin kuvaruudulla apatiittirakeen klooripitoisemmat kohdat näkyvät fluoripitoisempia vaaleampina (kuva 3D). Tummiin ja vaaleiden kohtien analyyseissa klooripitoisuuksien ero on suurimmillaan 3 paino-%:a (kuva 6, ks. myös taulukko 2: analyysit 28 ja 29).

Ala-Penikan PGE-rikastuman painaumarakenteen alueella apatiittia esiintyy suhteellisen runsaasti. Apatiitilla ei ole PGE-rikastuman läheisyydessä havaittu säännönmukaista koostumusvaihtelua ja apatiittien klooripitoisuus vaihtelee 0,42–1,62 paino-%:n ja fluoripitoisuus 1,48–3,80 paino-%:n välillä. Painaumarakenteen apatiittien klooripitoisuus on korkeampi kuin Ala-Penikan lohkon neljännen megasyklisen yksikön apatiittien keskimääräinen klooripitoisuus (0,68 paino-%; 142 analyysia).

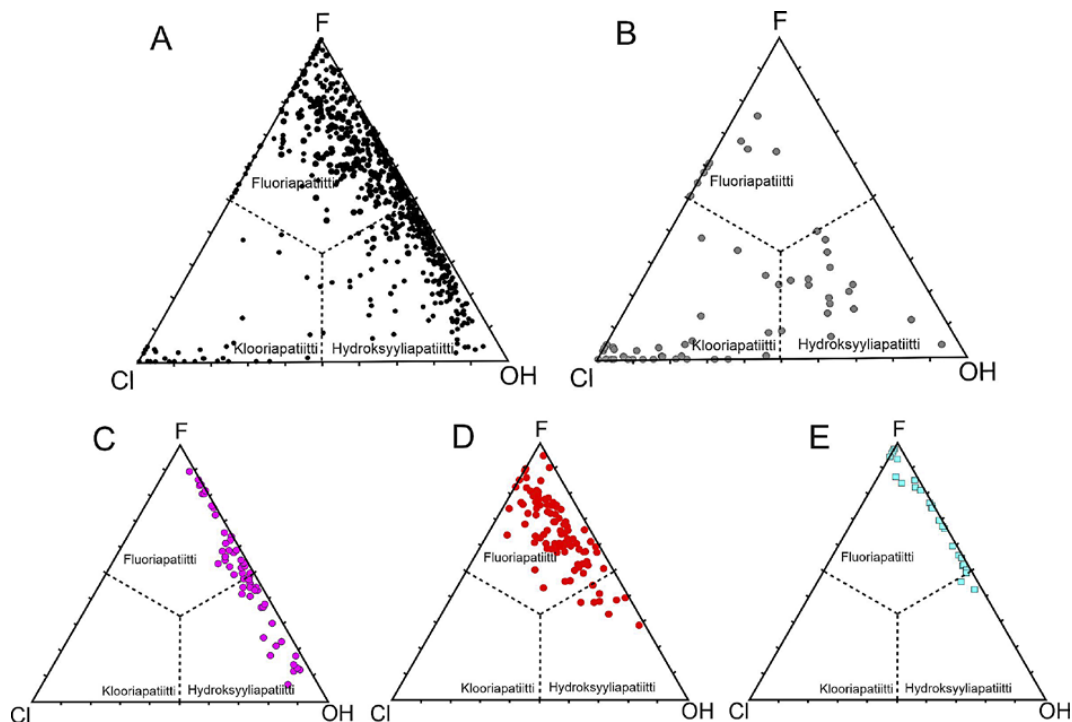
Pohdinta

Penikkain intruusion magmaattiset silikaattimineraalit (pyrokseenit ja oliviini) ovat



Kuva 3. Pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvia Penikkain kerrosintruusion Ala-Penikan lohkon apatiiteista. A) Interkumulusklooriapatiitteja yksikön I alaosan brontsiitissa noin 120 metriä Penikkain intruusion alakontaktin yläpuolella. B) Kookas interkumulusapatiittirae gabronoriitissa noin 60 metriä Sompujärven platinametalleista rikastuneen kerroksen yläpuolella, kerrosseurannossa tasolla 605 m. C) Omamuotoisia apatiittirakeita interkumulusaugiittia sisältävässä gabronoriitissa noin metrin Ala-Penikan platinametalleista rikastuneen kerroksen yläpuolella, kerrosseurannossa tasolla 804 m. D) Heterogeenisiä interkumulusapatiitteja interkumulusaugiittia sisältävässä gabronoriitissa noin 70 metriä Paasivaaran platinametalleista rikastuneen kerroksen yläpuolella, kerrosseurannossa tasolla 1 600 m. Lyhenteet: ap=apatiitti, opx=ortopyrokseeni, pl=plagioklaasi, cpx=klinopyrokseeni ja ilme=ilmeniitti. Kuvat: Tapio Halkoaho.

Figure 3. Scanning electron microscopic images of apatites in the Ala-Penikka block of the Penikat layered intrusion. A) Inter cumulus chlorapatites in the bronzitite at the base of megacyclic unit I about 120 metres above the lower contact of the Penikat intrusion. B) A large inter cumulus apatite grain in the gabbro (gab) about 60 metres above Sompujärvi Reef in the stratigraphic level 605 m. C) Euhedral apatites in the gabbro (gab) about 1 metre above the Ala-Penikka Reef in the stratigraphic level 804 m. D) Heterogeneous inter cumulus apatites in the gabbro (gab) about 70 metres above the Paasivaara Reef in the stratigraphic level 1,600 m. Abbreviations: ap=apatite, opx=orthopyroxene, pl=plagioclase, cpx=clinopyroxene, and ilme=ilmenite. Photos: Tapio Halkoaho.



Kuva 4. Penikkain apatiittien tulokset Cl-F-OH-kolmiodiagrammeissa. A) intruusion kaikki apatiitit (709), B) ensimmäisen megasyklisen yksikön apatiitit, C) Sompujärven PGE-rikastuman apatiitit, D) Ala-Penikan PGE-rikastuman apatiitit ja E) Paasivaaran PGE-rikastuman apatiitit.

Figure 4. Analyses of Penikat apatites in Cl-F-OH triangle diagrams. A) all apatites of the intrusion (709), B) apatites of the first megacyclic unit, C) apatites from the Sompujärvi Reef area, D) apatites from the Ala-Penikka Reef area, and E) apatites from the Paasivaara Reef area.

pääosin muuttuneet sekundäärisiksi mineraaleiksi, joten on lähes mahdoton sanoa, kuinka myöhempi metamorfoosi on vaikuttanut apatiittien kemialliseen koostumukseen. Boudreau ja Kruger (1990) sekä Boudreau ja McCallum (1989) ovat havainneet, että apatiitin hydroksyylikomponenttia on enemmän niissä rakeissa, joihin fluidit tai volatiilit ovat vaikuttaneet alhaisessa lämpötilassa. Toisaalta Boudreau ja McCallum (1989) ovat esittäneet, että plagioklaasin lievä epidoottiutuminen ei merkittävästi vaikuta apatiitin koostumukseen, sillä se oli lähes sama kuin läheisessä kivessä olleen muuttumattoman kiven apatiitin koostumus. Tämä pätee myös tämän tutkimuksen tuloksiin: Ala-Penikan lohkolta kerrosseurannosta ta-

solta 870–880 m analysoidun täysin muuttumattoman kiven apatiitin koostumus on lähes sama kuin lähellä olevan muuttuneen kiven apatiitin. Täten voidaan olettaa, että metamorfiset fluidit eivät ole merkittävästi muuttaneet Penikkain intruusion apatiitin koostumusta.

Penikkain kerrosintruusion apatiittirakeet ovat pääosin homogeenisia. Kuitenkin jotkin megasyklisen yksiköiden I ja V interkumulusapatiittirakeet ovat vyöhykkeellisiä (kuva 3D, taulukot 1 ja 2), ytimen ollessa fluoripitoisempi ja reunaosan rikastuneen kloorista. Poikkeuksena tästä on viidennen megasyklisen yksikön aloittava brontsiitti-kerros, jossa apatiitin ydinosa on klooripitoisempi kuin sen reunaosat. Boudreau ja Mc-

Callum (1989) esittävät diffuusioprosessien homogenisoivan yksittäiset apatiittirakeet jäähtymisen ollessa tarpeeksi hidasta. Vyöhykkeelliset apatiitit esiintyvät yksiköiden I ja V alijäähtyneissä, interkumulusaugiittia sisältävissä kerroksissa, joissa kiteytyminen on tapahtunut muuta intruusiota nopeammin ja estänyt apatiittien tasapainottumisen.

Grönlannissa sijaitsevan Skaergaardin intruusion apatiitin on todettu olevan fluoriapatiittia, jonka fluoripitoisuus on kasvanut differentiaation myötä, kloori- ja vesipitoisuuden samalla pienentyessä (Nash 1976). Boudreaun & Krugerin (1990) mukaan basalttisissa magmoissa kiteytyy yleensä fluoriapatiittia, kun taas klooriapatiitin kiteytyminen vaatii kloorin lisäystä. Penikkain intruusiosta apatiitin fluoripitoisuus kasvaa tasaisesti kerrosseurannossa ylöspäin (kuvat 5–9): aivan kuten differentiaation seurauksena voidaan olettaa. Tämä nähdään erityisesti Sompujärven lohkon kolmessa ensimmäisessä megasyklisessä yksikössä. Fluoripitoisuus palaa alemmalle tasolle aina uuden megasyklisen yksikön alaosassa (kuvat 5 ja 9). Selvä muutos vähemmän fluoria sisältävästä magmatyyppisestä fluoripitoisempaan tapahtuu megasyklisten yksiköiden III ja IV rajalla kaikilla muilla lohkoilla paitsi Ala-Penikalla (kuvat 5–9).

Penikkain intruusion megasyklisen yksikön I alaosa sisältää alapuolisesta graniitoidista peräisin olevaa felsistä materiaalia. Sm- ja Nd-isotooppikoostumukset tukevat teoriaa, että tämä olisi seurausta kuorellisesta kontaminaatiosta (Huhma ym. 1990). Nämä graniitoidiset kivet sisältävät fluoriittia, paikoin jopa päämineraalina (Alapieti ym. 1990). Lisäksi apatiitti on graniitoidisen Sompujärven lohkon intruusion alapuolisissa graniitoidissa fluoriapatiittia, joten voidaan olettaa graniittisen materiaalin kontaminaation lisänsen Penikkain magmasäiliön alaosan magman fluoripitoisuutta. Kuten kuvista 5–9 nähdään, tämä kontaminaatio ei ole kuitenkaan ulottunut juurikaan reunasarjaa pidemmälle.

Taulukko 1. Valikoidut näytteet Ala-Penikan lohkolta kivilajeineen, statuksineen ja korkeuksineen. Korkeus esittää etäisyyttä intruusion alakontaktista. Taulukossa MCU = megasyklinen yksikkö.

Table 1. Chosen samples from the Ala-Penika block with rock types, statuses and heights. Height represents distance to the lower contact of the intrusion. In table MCU = megacyclic unit.

NÄYTE	MCU	KIVILAJI	STATUS	KORKEUS (m)
1	I	Brontsiitti	Interkumulus	150,0
2	I	Gabronoriitti	Interkumulus	216,0
3	I	Gabronoriitti	Interkumulus	244,0
4	II	Gabronoriitti	Interkumulus	337,0
5	III	Gabro-pegmatiitti	Interkumulus	500,0
6	III	Gabronoriitti	Interkumulus	550,0
7	IV	Peridotiitti	Interkumulus	551,5
8	IV	Gabronoriitti	Interkumulus	564,0
9	IV	Gabronoriitti	Interkumulus	639,4
10	IV	Gabronoriitti	Interkumulus	656,0
11	IV	Gabronoriitti	Interkumulus	678,4
12	IV	Gabronoriitti	Interkumulus	706,6
13	IV	Gabronoriitti	Interkumulus	789,0
14	IV	Gabro	Interkumulus	802,2
15	IV	Noriitti	Interkumulus	805,0
16	IV	Gabronoriitti	Interkumulus	818,0
17	IV	Gabronoriitti	Interkumulus	868,0
18	IV	Gabronoriitti	Interkumulus	878,0
19	IV	Gabronoriitti	Interkumulus	920,0
20	IV	Gabronoriitti	Interkumulus	1072,0
21	IV	Gabronoriitti	Interkumulus	1178,0
22	IV	Gabronoriitti	Interkumulus	1280,0
23	IV	Gabronoriitti	Interkumulus	1378,0
24	IV	Anortosiitti	Kumulus	1515,0
25	IV	Anortosiitti	Kumulus	1530,0
26	V	Brontsiitti	Interkumulus	1539,0
27	V	Noriitti	Interkumulus	1568,0
28	V	Gabronoriitti	Interkumulus (reuna)	1600,0
29	V	Gabronoriitti	Interkumulus (ydin)	1600,0
30	V	Noriitti	Interkumulus	1628,0
31	V	Anortosiitti	Interkumulus	1748,0
32	V	Gabro	Kumulus	1998,0

Penikkain intruusiosta apatiitti on kiteytynyt kumulusmineraalina megasyklisten yksiköiden IV ja V yläosissa. Apatiitin kiteytymisen kehitystä on tutkittu mm. Etelämantereella sijaitsevassa Dufekin intruusiosta.

Taulukko 2. Penikkain kerrosintruusion apatiittien kemiallisia koostumuksia (arvot painoprosentteina). Näytteiden sijainti ja ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

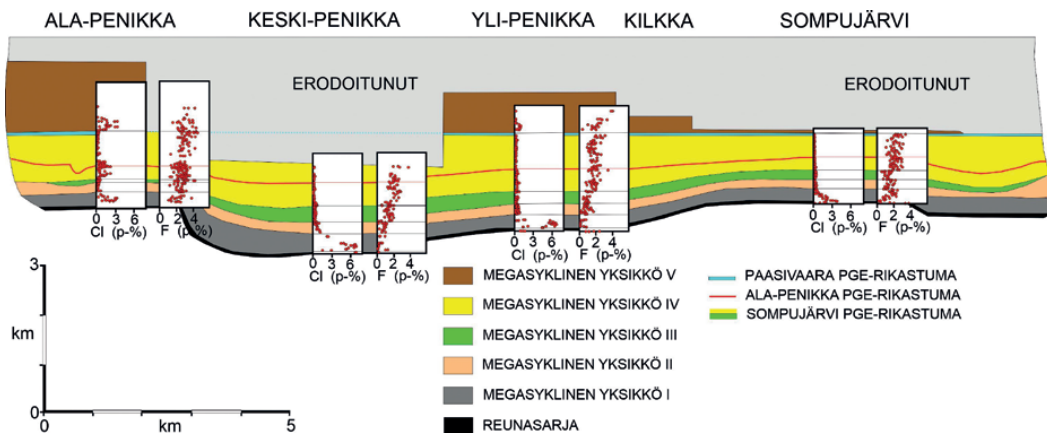
Table 2. The chemical composition of the apatites of the Penikat layered intrusion (values in weight per cent). Sample locations and properties are presented in Table 1.

Näyte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
CaO	55,79	52,63	59,28	59,85	54,01	53,65	53,40	54,43	57,68	52,16	60,07	57,55	58,81	56,98	58,56	55,67
P ₂ O ₅	37,72	42,68	39,35	39,41	43,72	45,62	43,34	44,35	41,51	44,28	38,21	39,45	40,75	39,67	40,01	41,51
F	2,26	2,56	1,55	2,71	3,06	1,94	2,21	4,12	2,42	2,95	2,51	3,22	2,47	1,80	2,96	2,77
Cl	2,67	1,96	1,09	0,40	0,40	0,50	0,44	0,27	0,84	1,16	1,78	0,51	0,45	0,71	0,87	2,34
H ₂ O	0,00	0,05	0,75	0,38	0,25	0,81	0,63	0,00	0,44	0,10	0,10	0,09	0,51	0,70	0,15	0,00
MnO	0,06	0,12	0,08	<0,05	<0,05	0,05	0,05	<0,05	<0,05	0,09	0,05	0,09	0,06	0,06	0,06	0,06
FeO	0,48	0,13	0,14	<0,05	0,08	0,07	0,13	0,05	0,12	0,15	0,23	<0,05	<0,05	0,15	0,35	0,11
SrO	0,07	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,25	<0,05	0,23	<0,05	0,09	<0,05	0,08	<0,05	0,06	<0,05	0,17
	99,06	100,1	102,3	102,8	101,5	102,9	100,2	103,5	103,0	101,0	103,0	101,0	103,1	100,1	103,0	102,6
O=F,Cl	1,55	1,52	0,90	1,23	1,38	0,93	1,03	1,80	1,21	1,50	1,46	1,47	1,14	0,92	1,44	1,69
Summa	97,51	98,61	101,4	101,5	100,1	102,0	99,15	101,7	101,8	99,49	101,5	99,52	101,9	99,22	101,5	100,9
Cl/(Cl+F)	0,39	0,29	0,27	0,07	0,07	0,12	0,10	0,03	0,16	0,17	0,28	0,08	0,09	0,18	0,14	0,31

Näyte	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
CaO	55,82	57,62	61,20	59,22	54,45	53,76	54,19	53,79	54,31	53,92	54,55	52,53	53,82	54,33	53,45	58,13
P ₂ O ₅	42,87	43,61	38,22	38,85	44,53	44,22	44,90	44,47	44,08	42,92	43,29	41,30	43,75	43,47	44,99	40,00
F	2,42	1,80	2,99	1,28	2,60	2,73	3,50	3,60	4,36	2,42	2,19	2,02	4,31	2,55	3,48	3,36
Cl	1,39	1,33	0,58	0,28	0,20	0,28	0,25	0,22	0,32	1,57	1,67	3,43	0,49	2,33	1,18	0,00
H ₂ O	0,30	0,66	0,19	1,07	0,55	0,45	0,12	0,06	0,00	0,24	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17
MnO	<0,00	0,08	<0,05	<0,05	0,09	0,05	0,05	<0,05	<0,05	0,07	0,06	0,09	<0,05	<0,05	0,06	0,05
FeO	<0,05	0,14	0,06	0,21	0,10	0,05	0,10	<0,05	<0,05	0,08	<0,05	0,19	0,05	0,15	<0,05	0,16
SrO	<0,05	0,09	<0,05	<0,05	<0,05	0,09	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,14	0,35	0,05	<0,05	0,10	<0,05
	102,8	105,3	103,2	100,9	102,5	101,6	103,1	102,1	103,1	101,2	102,2	99,91	102,5	102,8	103,3	101,9
O=F,Cl	1,33	1,06	1,39	0,60	1,14	1,21	1,53	1,57	1,91	1,37	1,30	1,63	1,92	1,60	1,73	1,41
Summa	101,5	104,3	101,9	100,3	101,4	100,4	101,6	100,6	101,1	99,85	100,9	98,28	100,5	101,2	101,5	100,5
Cl/(Cl+F)	0,24	0,28	0,09	0,11	0,04	0,05	0,04	0,03	0,04	0,26	0,29	0,48	0,06	0,33	0,15	0,00

sa (Drinkwater ym. 1990), jossa sen havaittiin vastaavan Skaergaardin (Nash 1976; Brown & Peckett 1977) ja Bushveldin (Wager & Brown 1968; von Gruenewaldt 1973) intruusiosta sekä Labradorin niemimaalla sijaitsevalta basalttiselta Kiglapaitin intruusiosta (Huntington 1979) tehtyjä havaintoja. Niissä kumulusapatiitti esiintyy vasta intruusion yläosissa, kun yli 90 % magmasta on jo kiteytynyt. Täten voidaan todeta myös Penikkain intruusion yksiköiden IV ja V olleen pitkälle kiteytyneitä (yli 90 %). Dufekin intruusion kumulusapatiitin on havaittu sisältävän runsaasti fluoria ja vain vähän klooria, kun taas interkumulusapatiitit ovat klooripitoisempia (Drinkwater ym. 1990). Nämä tulokset ovat yhteneviä Penikkain intruusion tutkimustulosten kanssa, sillä myös Penikkain apatiittien klooripitoisuus on alhaisimmillaan juuri kumulusapatiiteissa (kuva 4E).

Stillwaterin intruusiossa *basal-* ja reunasarjan apatiitit eivät ole yhtä klooripitoisia kuin ultramafisen sarjan ja J-M Reefin alapuolisten *lower banded*-yksiköiden apatiitit. Tämä viittaa siihen, että ulkoisen klooripitoisen fluidin lisäys ei selitä klooriapatiittien muodostumista intruusion alaosassa, sillä tällainen fluidi olisi vaikuttanut myös reunasarjaan ja sen yläpuolisiin kerroksiin (Boudreau & McCallum 1989). Koska klooripitoisuus on erittäin alhainen Penikkain intruusion alapuolella olevissa granitoidisissa kivissä, Penikkain magma ei ole saanut granitoideista peräisin olevaa kloorin lisäystä. Apatiitin klooripitoisuus on keskimäärin korkein megasyklisissä yksiköissä I ja V. Megasyklisen yksikön I alaosan brontsiittisen kerroksen interkumulusmateriaali, Keski-Penikan ja Yli-Penikan lohkoilla, Penikkain intruusion keskiosassa, sisältää runsaasti klooriapatiit-



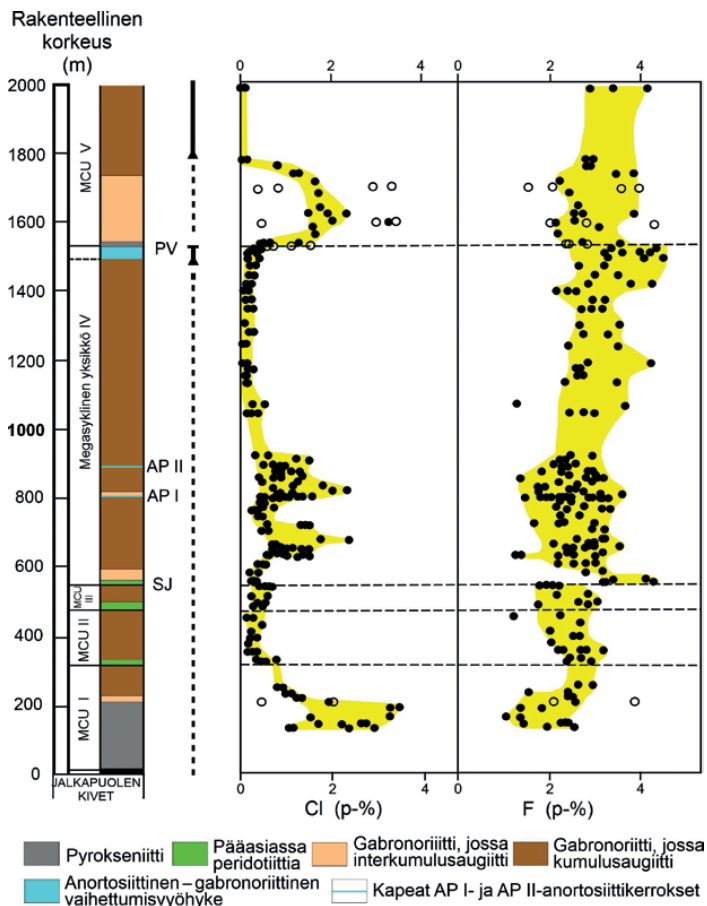
Kuva 5. Apatiitin kloori- ja fluoripitoisuuksien vertikaalinen vaihtelu Penikkain intruusion eri lohkoissa (vertaa kuviin 1 ja 6–9). Kuva muokattu lähteestä Halkoaho (1993).

Figure 5. Vertical variation in apatite Cl and F content in the various blocks of the Penikat Intrusion (see also Figs. 1 and 6–9). Figure modified after Halkoaho (1993).

tia (kuvat 4B, 5, 7 ja 8). Myös Ala-Penikan (taulukko 2, analyysi 1) ja Sompujärven lohkoilla sama yksikkö sisältää eniten klooria, vaikka sen pitoisuus onkin alle 4 paino-%:a (kuvat 5, 6 ja 9). Brontsiitiin interkumulusula siis sisälsi runsaasti klooria intruusion kaikilla lohkoilla. Apatiitin klooripitoisuus laskee nopeasti brontsiitiin yläpuolisissa kivissä alle yhteen paino-%:iin ja on ylempänä tätä korkeampi vain Ala-Penikan loholla ja Yli-Penikan lohkon megasyklisen yksikön V alaosassa (kuvat 5, 6 ja 8). Ala-Penikan loholla brontsiitiin päällä olevan apatiitin klooripitoisuus megasyklisen yksikön I alaosassa pienenee kuten muuallakin, mutta kasvaa uudelleen megasyklisen yksikön IV alaosissa ja ylittää kaksi paino-%:a (taulukko 2, analyysi 16). Apatiitin klooripitoisuuden hyvin heikko kasvu on havaittavissa tällä vyöhykkeellä myös Keski-Penikan ja Yli-Penikan lohkoilla (kuvat 5, 7 ja 8). Ala-Penikan loholla apatiitin klooripitoisuus vähenee uudelleen megasyklisen yksikön IV yläosaa kohti siirryttäessä ja pysyy tällä alhaisella tasolla aina megasyklisen yksikön V aloittavaan brontsiitiiniin saakka (taulukko 2, analyysit 19–25). Tällöin apatiitin klooripitoisuus jälleen kasvaa (taulukko 2, analyysit 26–27).

Ala-Penikan lohkon megasyklisen yksikön V apatiitin klooripitoisuus on korkeimmillaan alaosan poikiliittisessä gabronoriitissa (lähes 4 paino-%). Tämä sama kasvu nähdään vastaavalla vyöhykkeellä myös Yli-Penikan loholla, vaikka siellä apatiitin klooripitoisuus on korkeimmillaan vain 1 paino-% (kuvat 5, 6 ja 8). Molemmilla lohkoilla klooripitoisuus putoaa megasyklisen yksikön V alaosassa sijaitsevan poikiliittisen gabronoriitin yläpuolelle sijoittuvan gabronoriitin apatiiteissa alle 0,05 paino-%:iin (taulukko 2, analyysi 32). Yksi kaikille lohkoille yhteinen piirre on, että apatiitin klooripitoisuus on melko alhainen megasyklisen yksiköiden III ja IV rajalla sijaitsevan Sompujärven PGE-rikastuman alueella (taulukko 2, analyysit 6–8).

Boudreau ja McCallum (1989) havaitsivat, että vaikka yksittäiset apatiittirakeet eivät ole muuttumattomissa Stillwaterin intruusion näytteissä vyöhykkeellisiä, edes 25 %:n kloori- ja fluoripitoisuusvaihtelut eivät ole poikkeuksellisia. He selittivät vaihtelun fraktioitumisella ja kumulusrakeiden väleissä olevan sulan senttimetrin mittakaavassa tapahtuvalla paikallisella eristymisellä. Heidän mukaansa diffuusioprosessit homogenisoivat yksittäiset apatiittirakeet jäähtymisen olles-



Kuva 6. Apatiitin kloori- ja fluoripitoisuuksien vertikaalinen vaihtelu Ala-Penikan loholla (vertaa kuviin 1 ja 5). Avoimet ympyrät edustavat vyöhykkeellisten apatiittien analyysejä.

Figure 6. Vertical variation in apatite Cl and F content in the Ala-Penikka block (see Figs. 1 and 5). The open circles represent analyses of zoned apatites.

sa riittävän hidasta. Boudreaun ja Krugerin (1990) mukaan apatiitin vyöhykkeettömyys tai uudelleenkiteytymistekstuuriin puuttuminen viittaa siihen, että halogeenipitoisuudet kuvastavat apatiitin kiteytymisen aikaisia interkumulussulan kloorin ja fluorin määriä. Ensimmäisen megasyklisen yksikön bronsiittiitit ja viidennen megasyklisen yksikön alaosan gabronoriittiset mesokumulaatit ovat ilmeisesti kiteytyneet alijäähtyneestä magmasta, jolloin kiteytyminen on tapahtunut niin nopeasti, etteivät apatiittirakeet ole ehtineet täysin homogenisoitua.

Boudreau ym. (1986) mukaan ei tunneta magmoja, joilla olisi korkea klooripitoisuus. Cl/F-suhteen vaihtelua ei voida selittää kuivan magman kiteytymisellä. Vesipitoisten mineraalien kiteytyminen rikastaa kloorin jäljelle jääneeseen interkumulussulaan ja aiheuttaa fluidifaasin kyllästymisen. Apatiitti ei välttämättä ota klooria kidehilaansa (Boudreau & Kruger 1990), mikä selittää alhaisen klooripitoisuuden kumulusapatiitissa ja ylemmäs kohoavan interkumulussulan rikastumisen kloorista. Kun klooripitoinen interkumulussula sekoittuu ylempiin interkumulussuliin, apatiitin Cl/F-suhde kasvaa. Ala-Penikan PGE-rikastuman ja megasyklisen yksikön V alaosan alueilla vaikuttaa tapahtuneen edellä mainitun kaltaista fluidifaasisaturatiota.

Klooriapatiitit ovat Stillwaterissa lähes yksinomaan J-M Reefin alapuolella ja fluoriapatiitit sen yläpuolella. J-M Reef tulkitaan hori-

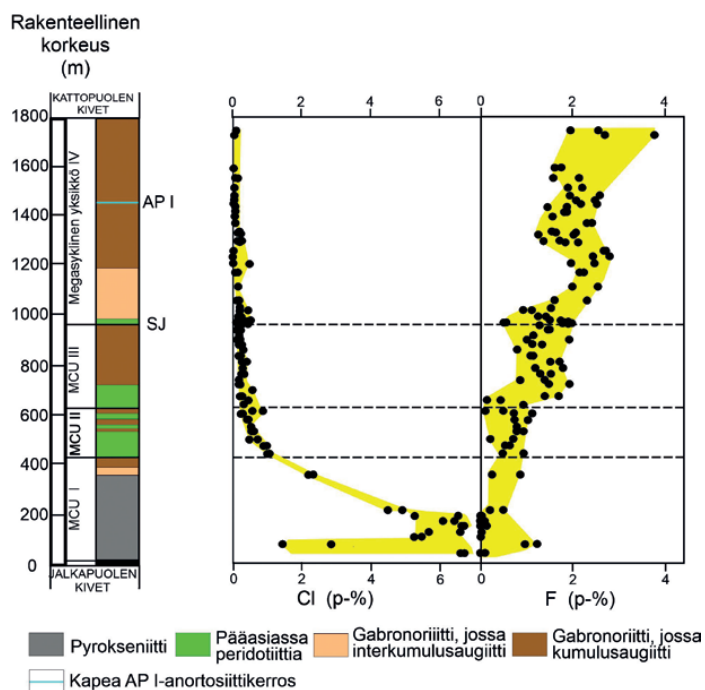
sontiksi, jossa klooripitoinen fluidifaasi sekoittui yläpuolisiin kloorista köyhtyneisiin interkumulussuliin ja aiheutti rikin, platinan ja palladiumin rikastumisen (Boudreau & McCallum 1989). Samanlainen siirtymä klooriapatiitista fluoriapatiittiin havaittiin Bushveldin Merenskyn syklisessä yksikössä (Boudreau & Kruger 1990). Penikkain intruusion kerrosseurannossa Ala-Penikan PGE-rikastuman alueella, 600–900 m pohjakontaktin yläpuolella, klooripitoisuus kasvaa selvästi (kuvat 5 ja 6). Sompujärven ja Paasivaaran PGE-rikastumien kohdalla apa-

tiitin klooripitoisuudet ovat alhaisia (kuvat 5 ja 6), mikä selittyy Paasivaaran PGE-rikastuman osalta ainakin osittain sillä, että apatiitti on kumulusmineraalina.

Vaikka klooripitoiset fluidit ovat merkittäviä platinaryhmän alkuaineiden kuljettajia (esim. Boudreau ym. 1986; Boudreau & McCallum 1989; Mathez ym. 1989), kloorikompleksien mukanaolo fluidissa ei näytä olevan välttämätöntä fluidin kyvylle kuljettaa platinaryhmän alkuaineita. On tärkeää tarkastella myös muiden platinametalleja kuljettavien kompleksien merkitystä tehtäessä malminetsinnällisiä suunnitelmia ja tulkintoja. Hiilipitoisten fluidien osuus platinametallien kuljetuksessa saattaa olla huomattavaa, kuten Halkoaho ym. (1990a)

ovat ehdottaneet Sompujärven PGE-rikastuman tapauksessa.

Klooripitoisuus on usein korkea PGE-rikastumia sisältävissä kerrosintrusioissa, mutta kivien tai apatiitin klooripitoisuus ei välttämättä ole korkea rikastuman alueella tai sen välittömässä läheisyydessä – näin on myös Sompujärven ja Paasivaaran PGE-rikastumien tapauksessa. Penikkain intrusioon klooripitoisimmat apatiitit sijaitsivat megasyklisen yksikön I brontsiitiissa, useita satoja metrejä alimman merkittävän Sompujärven PGE-rikastuman alapuolella. Lisäksi klooripitoisia apatiitteja tavataan Ala-Penikan loholla 250–350 metriä Sompujärven PGE-rikastuman yläpuolella, Ala-Penikoiden PGE-rikastuman alueella sekä megasyklisen yksikön V alemmassa osassa Paasivaaran PGE-rikastuman yläpuolella. Tämä todennäköisesti johtuu kloorin taipumuk-



Kuva 7. Apatiitin kloori- ja fluoripitoisuuksien vertikaalinen vaihtelu Keski-Penikan loholla (vertaa kuviin 1 ja 5).

Figure 7. Vertical variation in apatite Cl and F content in the Keski-Penikka block (see Figs. 1 and 5).

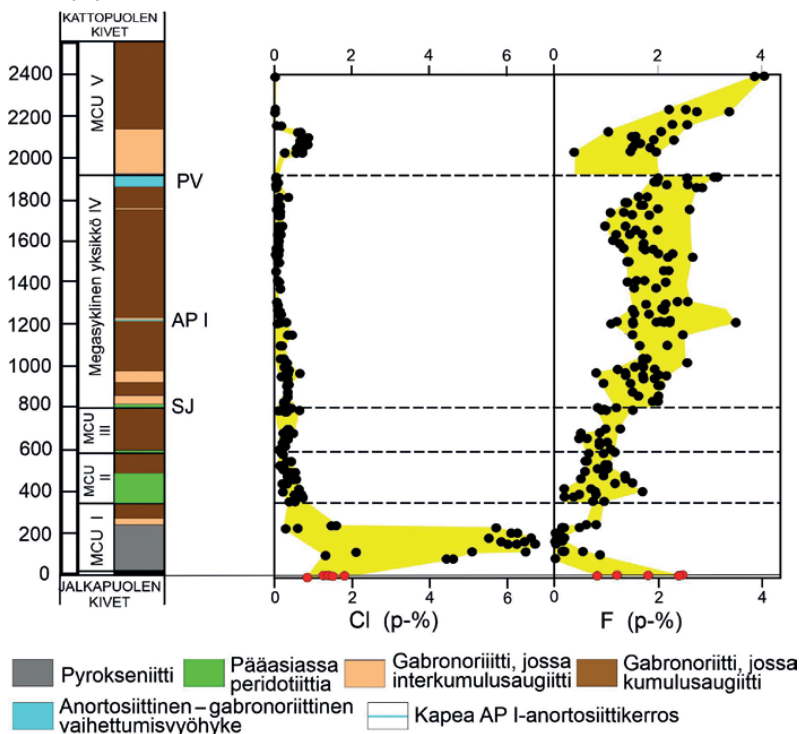
sesta vaeltaa ylöspäin platinaryhmän mineraalien saostuessa ja muodostaessa PGE-rikastuman.

Yhteenveto

Lounais-Lapissa sijaitsevassa Penikkain kerrosintrusiossa on kolme merkittävää platinaryhmän alkuaineista rikastunutta kerrosta: Sompujärvi, Ala-Penikka ja Paasivaara. Intrusiosista tutkittiin apatiitin kemiallisen koostumuksen vaihtelua ja arvioitiin, voidaanko sen avulla päätellä platinaryhmän alkuaineiden (PGE) rikastumien esiintymistä. Menetelmä pohjautui Bushveldin ja Stillwaterin intrusioissa tehtyihin havaintoihin, joissa apatiitin halogeenipitoisuuksien (Cl, F) vaihtelut korreloivat PGE-vyöhykkeiden kanssa.

Yleisesti apatiittien fluoripitoisuus kasvaa intrusioissa differentiaation myötä ylöspäin

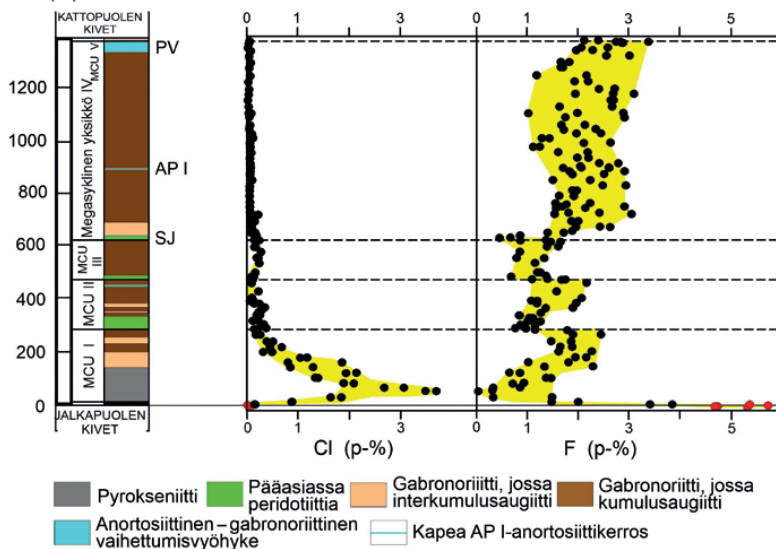
Rakenteellinen korkeus (m)



Kuva 8. Apatiitin kloori- ja fluoripitoisuuksien vertikaalinen vaihtelu Yli-Penikan loholla (vertaa kuviin 1 ja 5). Punaiset ympyrät edustavat intruusion alapuolella olevan granitoidisen kiven apatiitteja.

Figure 8. Vertical variation in apatite Cl and F content in the Yli-Penikka block (see Figs. 1 and 5). The red circles represent the apatites in the granitoidic rock beneath the intrusion.

Rakenteellinen korkeus (m)



Kuva 9. Apatiitin kloori- ja fluoripitoisuuksien vertikaalinen vaihtelu Sompujärven loholla (vertaa kuviin 1 ja 5). Punaiset ympyrät edustavat intruusion alapuolella olevan granitoidisen kiven apatiitteja.

Figure 9. Vertical variation in apatite Cl and F content in the Sompujärvi block (see Figs. 1 and 5). The red circles represent the apatites in the granitoidic rock beneath the intrusion.

mentäessä, kuten havaitaan tapahtuvan myös Penikkain intruusiossa. Klooripitoisimmat apatiitit löytyvät Penikkain intruusion ensimmäisen megasyklisen yksikön alaosan bronsitiittisesta kerroksesta ja viidennen megasyklisen yksikön alaosasta, poikiliittisesta gabronoriittikerroksesta. Vyöhykkeellisiä apatiitteja esiintyy vain tietyissä yksiköissä (I ja V), mikä viittaa näiden intruusion osien nopeaan, alijäähtyneeseen kiteytymisvaiheeseen.

Sompujärven PGE-vyöhykkeellä apatiitit ovat OH-pitoisia ja sisältävät vähän klooria. Paasivaaran PGE-vyöhykkeellä apatiitti esiintyy kumulusmineraalina ja on koostumukseltaan fluoriapatiittia. Ala-Penikan PGE-rikastuman alueella apatiitin klooripitoisuus on muita neljännen megasyklisen yksikön kerroksia korkeampi. Mikäli fluidit ovat vaikuttaneet Sompujärven ja Paasivaaran PGE-rikastumien muodostumiseen, niiden klooripitoisuus on ollut alhainen tai kloori on päässyt karkaamaan kerrosseuranossa ylöspäin.

Tutkimustulokset osoittavat, että PGE-rikastumista voidaan saada viitteitä tarkastelemalla apatiittien kloori- ja fluoripitoisuuksia. Tulokset ovat yhteneviä lukuisten aiempien tutkimusten kanssa, joihin viitataan laajasti tekstissä. Apatiitin kloori- ja fluoripitoisuuksien vaihtelu voi antaa viitteitä magman kehityksestä ja paikallisista fluidiprosesseista, mutta Penikkain intruusiossa klooripitoisuuden huiput eivät kuitenkaan systemaattisesti ennusta PGE-rikastumia. PGE-vyöhykkeiden muodostumiseen ovat todennäköisesti vaikuttaneet useat tekijät: magmapulssit, kerrosrakenteen kehitys, paikalliset fluidiprosessit sekä mahdollisesti kloori- ja hiilipitoiset kompleksit.

Kiitokset

Esitämme lämpimät kiitoksemme Oulun yliopiston vuosina 1987–1989 toimineen Peräpohjan platinaprojektin henkilöstölle. Erityiskiitokset kohdistamme projektin

johtajalle, edesmenneelle professori Tuomo Alapietille, sekä Outokumpu Oy:n geologille, FM Jarmo Lahtiselle. Tässä artikkelissa käytetty aineisto on kerätty vuosina 1982–1989 mainitun projektin sekä Lapin Malmi Oy:n malminetsintätöiden yhteydessä. Kiitämme myös Oulun yliopiston Elektroniopitiikan laitoksen henkilökuntaa – erityisesti laitoksen johtajaa Seppo Sivosta – mahdollisuudesta käyttää laitoksen mikroanalysaattoria apatiittianalyysiin. Lisäksi kirjoittajat haluavat esittää kiitoksensa Geologin toimituskunnalle: päätoimittaja Henriikka Kivilälle, toimitussihteeri Perttu Mikkolalle ja toimittaja Maarit Kalliokoskelle, käsikirjoituksen laatua merkittävästi parantaneista kommentista.

DOS., FT TAPIO HALKOaho

(tapio.halkoaho@gtk.fi)

FT SARI ROMPPANEN

(sari.romppanen@gtk.fi)

Mineraalitalouden ratkaisut
Geologian tutkimuskeskus

Tapio Halkoaho on erikoistutkijana Geologian tutkimuskeskuksen Kuopion toimipisteessä sekä toimii lisäksi magmapetrologian dosenttina Turun yliopistossa ja petrologian dosenttina Helsingin yliopistossa. Sari Romppanen toimii erikoistutkijana Geologian tutkimuskeskuksen Espoon toimipisteessä.

Summary

Geochemical variation of apatite in the Penikat layered intrusion – application for PGE ore exploration

The study focused on the Penikat layered intrusion in southwestern Lapland, northern Finland. The intrusion contains three significant layers enriched in platinum-group ele-

ments (PGE): Sompujärvi, Ala-Penikka, and Paasivaara. The research method involved examining variations in the chemical composition of apatite and assessing whether these variations can be used to infer the presence of PGE-enriched layers. The approach was based on observations from the Bushveld and Stillwater intrusions, where variations in apatite halogen contents (Cl, F) correlate with PGE zones.

The fluorine content of apatite increases upwards in the intrusions as differentiation progresses, as has happened in the Penikat intrusion. The most chlorine-rich apatites occur in the bronzitite layer in the lower part of the first megacyclic unit of the Penikat intrusion, and in the poikilitic gabbro-norite layers in the lower part of the fifth megacyclic unit. Zoned apatites occur only in specific units (I and V), suggesting a rapid, undercooled crystallization stage in these parts of the intrusion.

In the Sompujärvi PGE zone, apatites are OH-rich and contain low amounts of chlorine. In the Paasivaara PGE zone, apatite occurs as a cumulus mineral and has the composition of fluorapatite. In the Ala-Penikka PGE enrichment area, the chlorine content of apatite is higher than in other layers of the fourth megacyclic unit. If fluids played a role in the formation of the Sompujärvi and Paasivaara PGE enrichments, their chlorine content must have been low, or chlorine may have escaped upwards during layer formation.

Based on the results, variations in the chlorine and fluorine contents of apatite can provide indications of PGE enrichments. The findings are consistent with numerous earlier studies that are widely cited in the text. Although variations in apatite Cl and F contents can reveal information about magma evolution and local fluid processes, chlorine concentration peaks in the Penikat intrusion do not systematically predict PGE enrichments. Multiple factors likely influenced the formation of the PGE zones: magma pulses, development of the layered structure, local

fluid processes, and possibly Cl- and C-bearing complexes.

Lähdeluettelo

- 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. & 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. & Sivonen, S. J., 1983. Use of the electron microprobe in the investigation of the early Proterozoic Koillismaa layered igneous complex, NE Finland. *Geologinen tutkimuslaitos, Turkinmusraportti*, 22 s.
- Ballhaus, C. G. & Stumpfl, E. F., 1985a. Occurrence and petrological significance of graphite in the Upper Critical zone, western Bushveld Complex, South Africa. *Earth Planet Science Letters* 74, 58–68. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(85\)90166-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90166-9)
- Ballhaus, C. G. & Stumpfl, E. F., 1985b. Fluid inclusions in Merensky and Bastard Reefs, Western Bushveld Complex. *Canadian Mineralogist* 23, 294.
- Ballhaus, C. G. & Stumpfl, E. F., 1985c. Graphite, platinum and the C-O-H-S system. *Canadian Mineralogist* 23, 293–294.

- Ballhaus, C. G. & Stumpfl, E. F., 1986. Sulfide and platinum mineralization in the Merensky Reef: evidence from hydrous silicates and fluid inclusions. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 94, 193–204. <https://doi.org/10.1007/BF00592936>
- Ballhaus, C. G., Cornelius, M. & Stumpfl, E. F., 1988. The upper critical zone of the Bushveld Complex and the origin of merensky-type ores; a discussion. *Economic Geology* 83, 1082–1085. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.5.1082>
- Boudreau, A. E., 1988. Investigations of the Stillwater Complex; 4, The role of volatiles in the petrogenesis of the J-M Reef, Minneapolis adit section. *Canadian Mineralogist* 26, 193–208.
- Boudreau, A. E. & Kruger, F. J., 1990. Variation in the Composition of Apatite through the Merensky Cyclic Unit in the Western Bushveld Complex. *Economic Geology* 85, 737–745. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.85.4.737>
- Boudreau, A. E., Mathez, E. A. & McCallum, I. S., 1986. Halogen geochemistry of the Stillwater and Bushveld Complexes: evidence for transport of the platinum-group elements by Cl-rich Fluids. *Journal of Petrology* 27, 967–986. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.4.967>
- Boudreau, A. E. & McCallum, I. S., 1986. Investigations of the Stillwater Complex; III, The Picket Pin Pt/Pd deposit. *Economic Geology* 81, 1953–1975. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.8.1953>
- Boudreau, A. E. & McCallum, I. S., 1989. Investigations of the Stillwater Complex: Part V. Apatites as indicators of evolving fluid composition. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 102, 138–153. <https://doi.org/10.1007/BF00375336>
- Brown, G. M. & Peckett, A., 1977. Fluorapatites from the Skaergaard intrusion, East Greenland. *Mineralogical Magazine* 41, 227–232. <https://doi.org/10.1180/minmag.1977.041.318.10>
- Buntin, T. J., Grandstaff, D. E., Ulmer, G. C. & Gold, D. P., 1985. A pilot study of geochemical and redox relationships between potholes and adjacent normal Merensky Reef of the Bushveld Complex. *Economic Geology* 80, 975–987. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.4.975>
- Drinkwater, J. L., Czamanske, G. K. & Ford, A. B., 1990. Apatite of the Dufek Intrusion: Distribution, Paragenesis, and Chemistry. *Canadian Mineralogist* 28, 835–854.
- Elliott, W. C., Grandstaff, D. E., Ulmer, G. C., Buntin, T. & Gold, D. P., 1982. An intrinsic oxygen fugacity study of the platinum-carbon associations in layered intrusions. *Economic Geology* 77, 1493–1510. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.77.6.1493>
- 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 Oulensis, 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., 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>
- Halkoaho, T. A. A. & Romppanen, S., 2025. Painaumarakenne Penikkain kerrosintruusion Ala-Penikan platinaryhmän alkuaineista rikastuneessa kerrosseurannossa: todiste intruusion sisäisestä magmaattisesta fumarolista? *Geologi* 77 (2), 69–83.
- Halkoaho, T. A. A., Romppanen, S. & Szentpéteri, K., 2024. Penikkain kerrosintruusion ja Sompujärven platinaryhmän metalliesiintymästä löydetty uusi mineraali: laflammeiitti (Pd₃Pb₂S₂). *Geologi* 76 (3), 102–115.
- 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. 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>
- Huntington, H. D., 1979. Kiglapait mineralogy I: Apatite, biotite, and volatiles. *Journal of Petrology* 20, 625–652. <https://doi.org/10.1093/petrology/20.3.625>
- Johan, Z. & Watkinson, D. H., 1985. Significance of a fluid phase in platinum-group element concentration: evidence from the critical zone, Bushveld Complex. *Canadian Mineralogist* 23, 293–321.
- Kaukonen, R. J., Törmänen, T. O. & Alapieti, T., 2004. Platinum-group mineralogy of the silicate type PGE mineralization in the Penikat layered intrusion, Northern Finland. 32nd International Geological Congress, Florence. Scientific Sessions: abstracts (part 2), 1269.
- Kinloch, E. D., 1982. Regional trends in the platinum-group mineralogy of the Critical zone of the Bushveld Complex, South Africa. *Economic Geology* 77, 1328–1347. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.77.6.1328>
- Korziniskiy, M. A., 1982. Apatite solid solutions as indicators of the fugacity of HClO and HF0 in hydrothermal fluids. *Geokhimiya (Geochemistry International)*, 1981, 44–60.
- Kujanpää, J., 1964. Kemin Penikkain jakson rakenteesta ja kromiiteista. *Julkaisematon lisensiaatin tutkielma*. Oulun yliopisto, Oulu, 118 s.
- 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>
- Mathez, E. A., Dietrich, V. J., Holloway, J. R. & Boudreau, A. E., 1989. Carbon distribution in the Stillwater Complex and evolution of vapor during crystallization of Stillwater and Bushveld magmas. *Journal of Petrology* 30, 153–173. <https://doi.org/10.1093/petrology/30.1.153>
- Nash, W. P., 1976. Fluorine, chlorine, and OH-bearing minerals in the Skergaard intrusion. *American Journal of Science* 276, 546–557.
- Schiffries, C. M., 1982. The petrogenesis of a platinumiferous dunite pipe in the Bushveld Complex: Infiltration metasomatism by a chloride solution. *Economic Geology* 77, 1439–1453. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.77.6.1439>
- Tacker, R. C. & Stormer, J. C., 1988. Preliminary models for apatite solid solutions: the hydroxyapatite-chlorapatite system and standard state data for chlorapatite. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 69, 500.
- Törmänen, T. & Alapieti, T., 1996. Platinum-group mineralogy of the Penikat layered intrusion, Finland. In IGCP project 336 Symposium in Rovaniemi, Finland, August 21–23, 1996: program and abstracts. *Turun yliopiston geologian ja mineralogian osaston julkaisuja* 38, 83
- Vermaak, C. F., 1976. The Merensky Reef; thoughts on its environment and genesis. *Economic Geology* 71, 1270–1298. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.71.7.1270>
- Volborth, A. A. & Housley, R. M., 1984. A preliminary description of complex graphite, sulphide, arsenide, and platinum-group element mineralization in a pegmatoid pyroxenite of the Stillwater Complex, Montana, U.S.A. *Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* 33, 213–230.
- von Gruenewaldt, G., 1973. The Main and Upper Zones of the Bushveld Complex in the Rossenekal area, Eastern Transvaal. *Geological Society of South Africa Transactions* 76, 207–227.
- von Gruenewaldt, G., 1979. A review of recent concepts of the Bushveld Complex with particular reference to sulfide mineralization. *Canadian Mineralogist* 17, 233–256.
- Wager, L.R. & Brown, G.M., 1968. Layered Igneous Rocks. Oliver & Boyd, Edinburgh ja Lontoo, 588 s.