

Painaumarakenne Penikkain kerrosintruusion Ala-Penikan platinaryhmän alkuaineista rikastuneessa kerrosseurannossa: todiste intruusion sisäisestä magmaattisesta fumarolista?

TAPIO HALKOAHO JA SARI ROMPPANEN

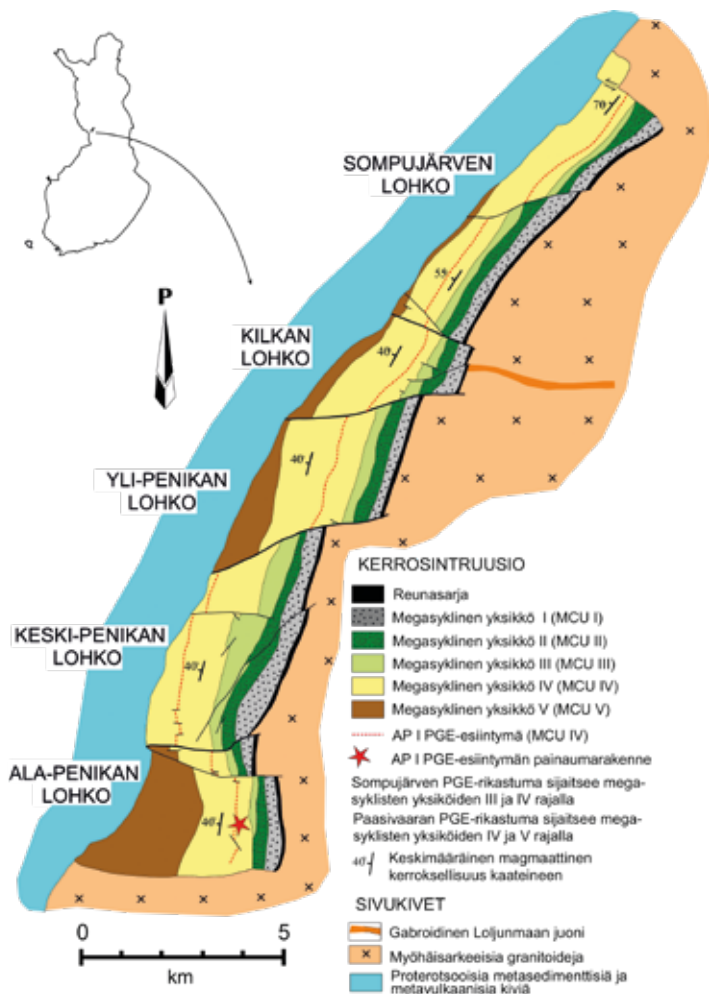
Platinaryhmän alkuaineisiin (platinum group elements, PGE) luetaan kuusi alkuainetta: osmium, iridium, rutenium, rodium, platina ja palladium. Näistä jalometalleista rikastuneita esiintymiä on löydetty eri-ikäisistä emäksisistä kerrosintruusioista ympäri maailman. Tunnetuimpia ovat noin 2 060 miljoonan vuoden ikäisen Etelä-Afrikan Bushveldin kerrosintruusion Merensky Reef, UG2 Chromitite Reef ja Platreef sekä noin 2 700 miljoonan vuoden ikäisen Yhdysvaltojen Montanan Stillwaterin kerrosintruusion Johns-Manville (J-M) Reef. Suomen platinaryhmän alkuaineiden suhteen kriittiset kerrosintruusioiden iältään noin 2 440 miljoonaa vuotta: yksi tunnetuimmista on Simon, Keminmaan ja Tervolan kuntien alueella sijaitseva Penikkain kerrosintruusio. Lähes kaikista kerrosintruusioiden platinaryhmän alkuaineista rikastuneista kerroksista on löydetty geologinen erikoispiirre: ne sisältävät erimuotoisia ja -kokoisia painaumarakenteita (engl. pothole structure). Tässä artikkelissa kuvataan lyhyesti Penikkain intruusion Ala-Penikan kivikkoisesta maastosta löydetty Suomen suurin ja vaikuttavin painaumarakenne.

Johdanto

Penikkain kerrosintruusio sijaitsee Pohjois-Suomessa Simon, Keminmaan ja Tervolan kuntien alueella (kuva 1). Se on osa epäjatkuvaa, noin 300 km pituista varhaispaleoproterotsooista kerrosintruusiovyöhykettä, joka alkaa Ruotsista ja jatkuu Koillismaan Näränkävaaraan ja 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 graniitoideja ja kattopuolen kivet vaihtelevasti tholeiittisia vulkaanisia kiviä, puolipinnallisia juonikiviä tai polymiktisia konglomeraatteja. Alkuperäinen intruusio on pilkkoutunut tektonisissa liikunnoissa viiteen lohkokoon, joita erottavat toisistaan itä-läntiset 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 kerros-



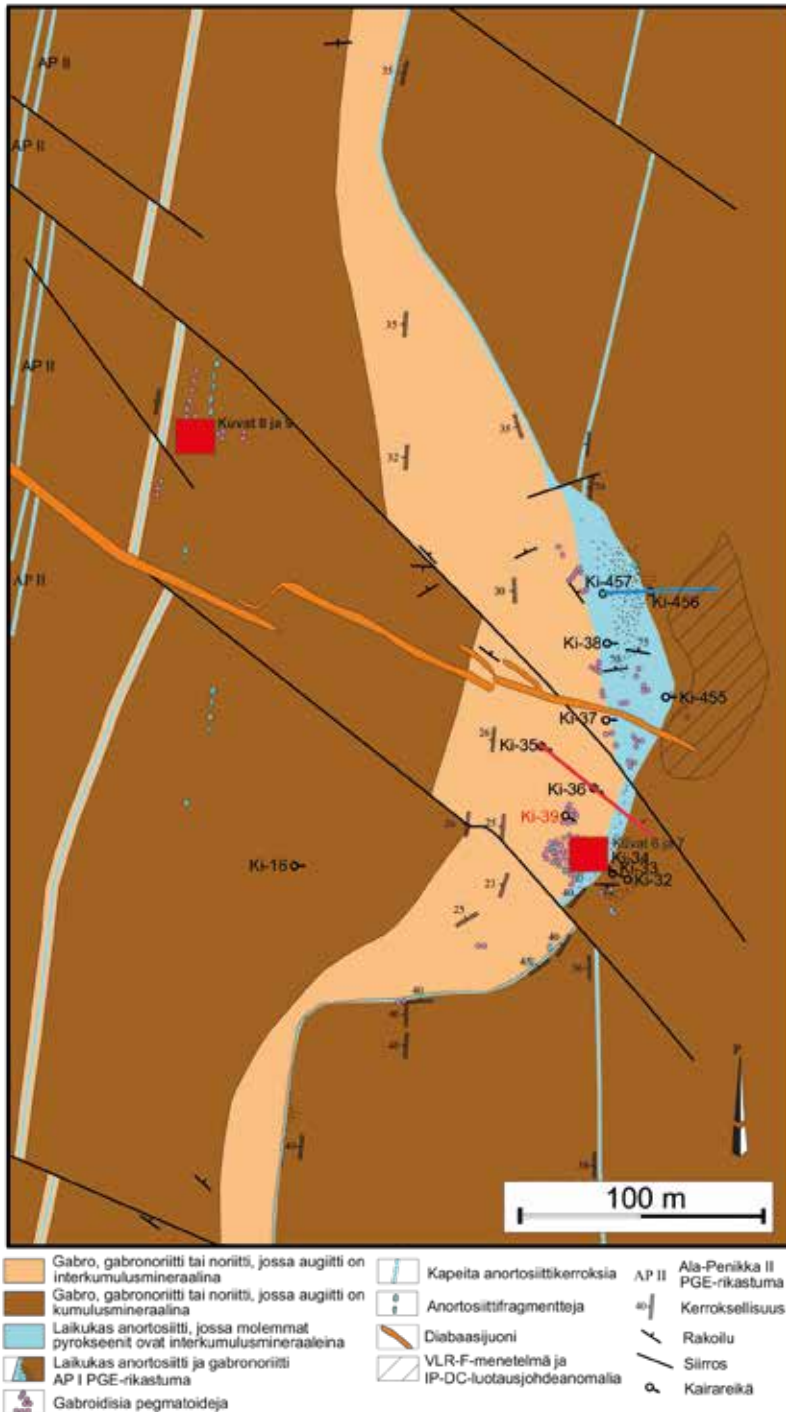
Kuva 1. Penikkain kerrosintruusion kallioperäkarta, jossa nähdään megasyklisen yksiköiden ja platinaryhmän alkuaineista rikastuneen Ala-Penikan (AP I) PGE-esiintymän sijainti. Kuva muokattu lähteistä Alapieti & Lahtinen 1986, Alapieti ym. 1990 ja Halkoaho ym. 2005.

Figure 1. Bedrock map of the Penikat layered intrusion showing the locations of the megacyclic units and Ala-Penikka (AP I) PGE reef (modified after Alapieti & Lahtinen 1986; Alapieti et al. 1990; Halkoaho ym. 2005). The location of the AP I PGE deposit pothole structure is marked with a red star.

sarjasta. Kerrossarja on jaettu megasyklisiin yksiköihin (engl. *megacyclic 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. Megasyklisen yksiköiden geokemiallisten erojen on tulkittu johtuvan kiteytyvään magmasäiliöön tulevista toistuvista magmapulsseista (Alapieti & Lahtinen 1986). Reunasarjan ja megasyklisen yksiköiden kivilajeja on tarkemmin kuvattu Geologi-lehdessä 3/2024 (Halkoaho ym. 2024).

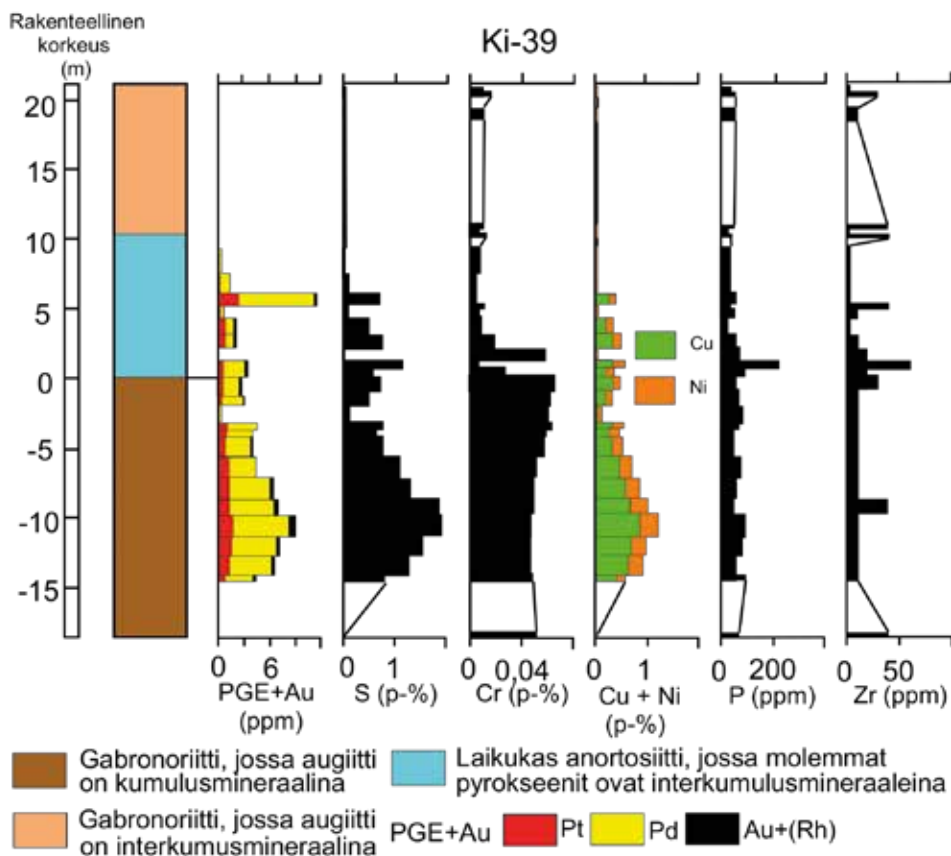
Intruusiossa on kolme merkittävämpää platinaryhmän alkuaineista rikastunutta vyöhykettä.

Sompujärven (SJ) PGE-rikastuma sijaitsee kolmannen (III) ja neljännen (IV) megasyklisen yksikön välisellä rajalla, 500–1000 m intruusion pohjakontaktin yläpuolella. Ala-Penikan (AP) PGE-rikastuma sijaitsee 250–450 m Sompujärven PGE-rikastuman yläpuolella neljännen megasyklisen yksikön alaosassa. Paasivaaran (PV) PGE-rikastuma on noin 700–1000 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 Alapieti (1996), Kaukonen ym. (2004) ja Maier ym. (2018).



Kuva 2. Ala-Penikan painaumarakenteen geologinen kartta. Muualla 10 cm paksuinen anortosiitti esiintyy painaumarakenteen kohdalla parhaimmillaan 20 m vahvaisena. Kuva muokattu lähteistä Halkoaho (1989), Halkoaho ym. (2005) sekä Maier ym. (2018).

Figure 2. Geological map of the pothole area of the Ala-Penikka intrusion. Within the pothole structure the normally 10 cm thick anorthosite can reach thickness of 20 m. Modified after Halkoaho (1989), Halkoaho et al. (2005) and Maier et al. (2018).



Kuva 3. AP I:n painaumarakenteen kerrosseuranto kairareiässä Ki-39 ja pylväsdiagrammeina vaihtelut platina+palladium+kulta (Pt+Pd+Au)-, rikki (S)-, kromi (Cr)-, kupari+nikkeli (Cu+Ni)-, fosfori (P)- ja zirkonium (Zr) -pitoisuuksissa. Kuva muokattu lähteistä Halkoaho (1989), Halkoaho ym. (1990b), Halkoaho (1993), Alapieti ja Lahtinen (2002) sekä Halkoaho ym. (2005). Kairareiän tunnus on merkitty punaisella tekstillä Ki-39 kuvaan 2.

Figure 3. Stratigraphic sequence of the AP PGE Reef in the pothole structure observed in drill hole Ki-39. Variations in Pt+Pd+Au, S, Cr, Cu+Ni, P, and Zr are also shown. Modified after Halkoaho et al. (1990b), Halkoaho (1993), Alapieti and Lahtinen (2002) and Halkoaho et al. (2005). The label of the drill hole is marked with red in Fig. 2.

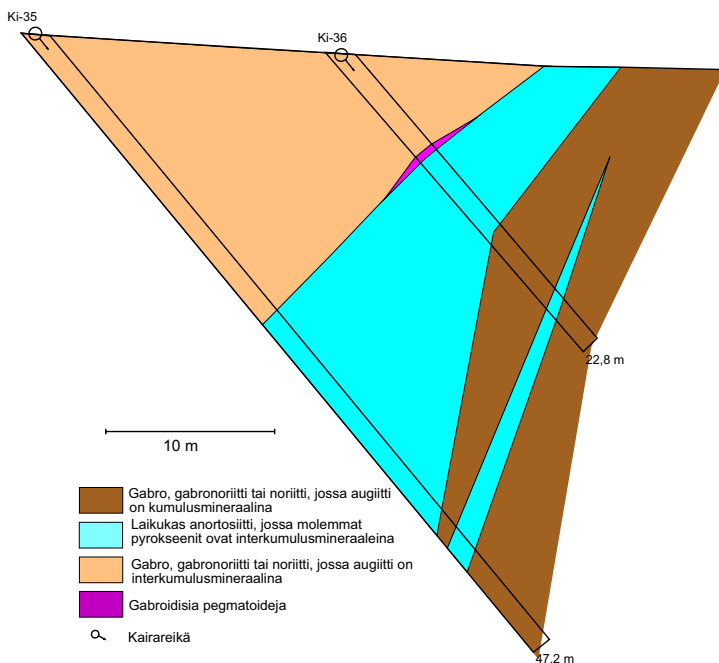
Ala-Penikan platinaryhmän rikastumat

Ala-Penikan alempi PGE-rikastuma sijaitsee neljännen megasyklisten yksikön (IV) alaosassa (kuvat 1 ja 2) ja se tunnetaan koko intruusion 23 kilometrin pituudelta, mutta se on kuvattu ja tutkittu parhaiten Ala-Penikan loholla (Alapieti & Lahtinen 1986; Halkoaho 1989, 1993; Halkoaho ym. 1989, 1990b, 2005; Maier ym. 2018). AP I on tyypillisesti 20–40

senttimetriä paksu ja se sijoittuu alaosastaan gabronoriittikerrokseen ja yläosastaan kapeaan laikukkaaseen anortosiittiin. AP I muodostuu sulfidipirootteesta (kuparikiisu, magneettikiisu ja pentlandiitti) ja platinaryhmän mineraaleista (*platinum group minerals*, PGM), jotka esiintyvät lähes omamuotoisten kumulusmineraalien välitiloissa yhdessä magnetiitin ja sekundääristen mineraalien, kuten epidootin ja kloriitin kanssa.

Kuva 4. Poikkileikkaus kairareikien Ki-35 ja Ki-36 kohdalta. Poikkileikkaus on merkitty kuvaan 2 punaisella viivalla.

Figure 4. Cross-section from drill holes Ki-35 and Ki-36. The cross-section is marked in Fig. 2 with a red line.

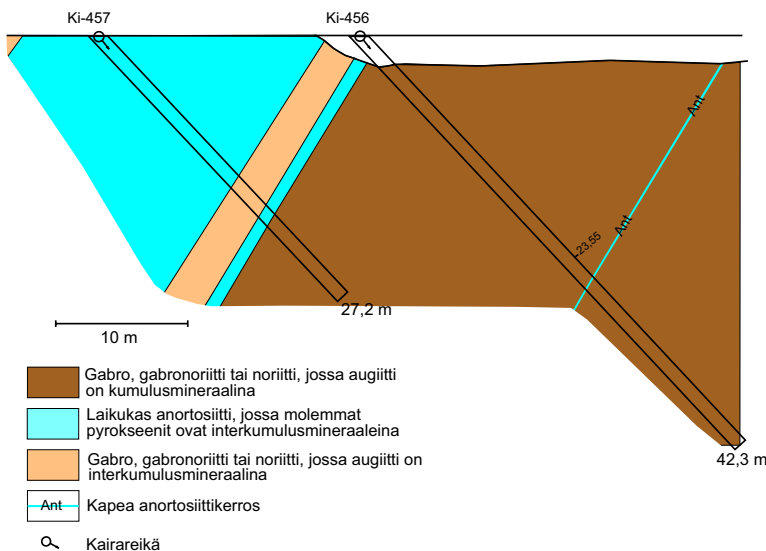


AP I:n painaumarakenne on 300 m pitkä, 100 m syvä, ja sen pohjalla esiintyy enimmäkseen 20 metrin paksuinen laikukas anortosiitti. Rakenne on erodoinut alapuolellaan olevia kerroksia. Laikukas rakenne muodostuu, kun normaalisti kumulusmineraaleina esiintyvät orto- ja klinopyrokseenit (tässä tapauksessa brontsiitti ja augiitti) kiteytyvät poikiliittisiksi oikokrysteiksi kumulusplagioklaasirakeiden välitilaan. Rakenteen yläosan täyttää noin sata metriä paksu gabronoriitti, jossa augiitti esiintyy kumulusplagioklaasi- ja kumulusbrontsiittirakeiden välitiloissa. Vasenkätiset kaakko-luodesuuntaiset siirrokset pilkkovat painaumarakenteen kolmeen osaan (Halkoaho ym., 2005; Maier ym., 2018) (kuva 2).

Painaumarakenteen kohdalla platinaryhmän alkuaineista rikastuneet kivet saavuttavat paikoin lähes 20 metrin kerrospaksuuden (kuvat 2–3) (Halkoaho 1989, 1993; Halkoaho ym. 1989, 1990b, 2005; Maier ym. 2018). Kerrospaksuuden suhteen AP I jakautuu selkeästi kahteen tyyppiin: normaalikerrokseen ja painaumarakenteeseen. Normaalikerros on

platinaryhmän alkuainepitoisuuksiltaan paras Keski-Penikan lohkon eteläosassa, jossa se on paksuudeltaan 0,6 m ja sisältää keskimäärin platinaa 2,3 ja palladiumia 9 ppm. Ala-Penikan loholla sen paksuus on 0,4 m, ja se sisältää platinaa 1–2 ja palladiumia 2–6 ppm. Painaumarakenteen AP I:n keskipaksuuden on arvioitu olevan n. 5 m, ja se sisältää keskimäärin 1,6 ppm platinaa ja 5,7 ppm palladiumia (Lahtinen 1988). Kivilajistoltaan nämä tyytit ovat kuitenkin samankaltaisia toistensa kanssa. Molemmissa tyypeissä on selvä kromipitoisuuden (Cr) lasku 0,05–0,06 paino-%:sta 0,01–0,02 paino-%:iin alapuolisen gabronoriitin ja laikukkaan anortosiitin välisellä rajapinnalla.

Kairasydämen Ki-39 (kuva 2) alkuainepitoisuudet arvioitiin samalla, kun tutkittiin AP I:n painaumarakennetta. Kyseisen kairareian platinan, palladiumin, kullan, rikin, kromin, kuparin, nikkelin, fosforin ja zirkoniumin vaihtelut on esitetty kuvassa 3. Tähän liittyviä tutkimustuloksia on esitelty useissa julkaisuissa (Alapieti & Lahtinen 1986; Halkoaho 1989, 1993; Halkoaho ym. 1989, 1990b, 2005).



Kuva 5. Poikkileikkaus kairareikien Ki-457 ja Ki-456 kohdalta. Poikkileikkaus on merkitty kuvaan 2 sinisellä viivalla.

Figure 5. Cross-section from drill holes Ki-457 and Ki-456. The cross-section is marked in Fig. 2 with a blue line.

Kiven kromipitoisuus nousee jälleen korkeammalle tasolle 10–15 metriä normaalin AP I:n ja noin 100 metriä painaumarakenteen yläpuolella, kun augiitti on jälleen kumulusmineraalina (kuva 2). Korkeimmat fosfori- ja zirkoniumpitoisuudet AP I:n painaumarakenteesta löytyvät laikukkaasta anortosiitista (kuva 3). Kuparipitoisuus on selkeästi korkeampi suhteessa nikkeliin: keskimääräinen Cu/Ni-suhde vaihtelee 1,4–2,7 välillä. Lisäksi rikki-, kupari- ja nikkelipitoisuudet ovat korkeampia painaumarakenteessa (kuva 3) kuin normaalissa AP I:n platinaryhmän rikastumassa. AP I:n keskimääräinen Pd/Pt-suhde on noin 3 (Halkoaho 1989, 1993; Halkoaho ym. 1989, 1990b).

Ala-Penikan ylempi PGE-rikastuma (AP II) muistuttaa suuresti AP I:tä. Sulfidit ja platinaryhmän mineraalit ovat asettuneet noin 340 metriä neljännen megasyklisen yksikön alakontaktin yläpuolella olevan gabronoriittikerroksen ja sen yläpuolisen kapean anortosiitin kontaktiin. Sulfidipitoisuus AP II:ssa on yleensä alhainen, lukuun ottamatta joitain satunnaisia kohtia, joissa se nousee 1–2 tilavuusprosenttiin ja platinaryhmän alkuainepitoisuus muutamiiin kymmeniin ppm:iin.

AP II:n platinaryhmän alkuainerikastuman keskimääräinen Cu/Ni-suhde on noin 2,5 ja keskimääräinen Pd/Pt-suhde noin 3,4 (Halkoaho 1989, 1993; Halkoaho ym. 1989, 1990b, 2005).

Platinaryhmän rikastumien synty

Normaalit Ala-Penikan platinaryhmän rikastumat

AP I ja AP II syntyivät, kun vanhempien magmapulssien (megasykliset yksiköt I–III) jäänösmagma sekoittui uuden magmapulssin kanssa ja muodostui hybridimagmaa. Syntynyt hybridimagma oli hieman kevyempää kuin neljännen megasyklisen yksikön kantamagma, ja se kohosi muodostamaan 100–340 metriä neljännen megasyklisen yksikön alakontaktin yläpuolella olevia kerroksia. Hybridimagma oli todennäköisesti kromipitoisempaa kuin uuden magmapulssin magma. Tämän seurauksena 100–250 metriä neljännen megasyklisen yksikön alakontaktin yläpuolella olevassa vyöhykkeessä kromipitoisuus on korkeampi kuin muilla saman yksikön vyöhykkeillä. Kun magman purkautuminen intrusioon päättyi, magma jakautui konvektioviin mag-

makerroksiin (Halkoaho 1993; Halkoaho ym. 2005).

Oletettavasti platinaryhmän alkuaineet ovat pääasiassa peräisin jäännösmagmasta, mutta jossain määrin myös uudesta neljänestä magmapulssista, jonka kromi-, palladium- ja klooripitoisuudet olivat aiemmista pulsseista peräisin olevaa jäännösmagmaa alhaisemmat. Siten jäännösmagman vaikutus näkyy korkeampana klooripitoisuutena rakenteellisesti 100–340 metrin korkeudella neljännessä megasyklisessä yksikössä (Halkoaho 1993; Halkoaho ym. 2005).

Ala-Penikan PGE-rikastumisissa ei ole viitteitä uudesta esiintymien synnyn aikaisesta magmapulssista. Lisäksi vain noin 30 % platinaryhmän mineraalien rakeista on yhteydessä sulfideihin: 70 % esiintyy sulkeumina silikaatimineraaleissa. On esitetty, että Ala-Penikan PGE-rikastumat olisivat muodostuneet ylöspäin kohonneesta volatiileista rikastuneesta interkumulussulasta, jossa volatiilifaasi kuljetti platinaryhmän alkuaineita, rikkiä, nikkeä, kuparia ja muita kalkofiliisiä alkuaineita (Halkoaho ym. 1989, 1990b; Halkoaho 1993; Halkoaho ym. 2005). Ala-Penikan lohkolla noin 250 metriä neljännen megasyklisen yksikön alakontaktin yläpuolella esiintyvä 10–20 metriä paksu, gabronoriittikerroksista ylempi (interkumulusaugiittia sisältävä), toimi kerroksena, joka vangitsi ylöspäin vaeltaneen interkumulussulan alakontaktinsa tuntumaan, missä se kiteytyi laikukkaaksi anortosiitiksi. Vaihtoehtoisesti AP I:n laikukas anortosiitti voi olla volatiilien aiheuttama uudelleenkiteytymistuote (Halkoaho 1993; Halkoaho ym. 2005).

Ylöspäin vaeltaneen interkumulussulan vaikutus on nyt nähtävissä muihin neljännen megasyklisen yksikön alaosan vyöhykkeisiin verrattaessa 100–250 metriä neljännen megasyklisen yksikön alakontaktin yläpuolella olevien kumulaattien mm. augiitin alhaisena nikkelpitoisuutena ja alhaisempana palladiumpitoisuutena. Interkumulussulan

volatiilifaasin hapen osapaine lisääntyi asteittain, jolloin myös raudan hapetusaste eli $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+})$ -suhde nousi ja lopulta saavutettiin piste, jossa magnetiittia alkoi kiteytyä AP I:n interkumulussulatiloihin. Tämä puolestaan vähensi rikin liukoisuutta interkumulussulassa ja sai aikaan sulfidisulan muodostumisen (vrt. Shima & Naldrett 1975), aiheuttaen volatiilifaasissa olevien platinaryhmän alkuaineita sisältävien yhdisteiden hajoamisen. Boudreau ja McCallum (1986) ovat ehdottaneet samanlaista muodostumismallia Stillwaterin kerrosintruusion Picket Pin-esiintymälle. He uskovat, että Picket Pin muodostui volatiileista rikastuneesta materiaalista, joka jäi ansaan keskirakeisen anortosiittikerroksen alapuolelle. Keskimääräistä korkeampi kloori- ja palladiumpitoisuus 250–340 metriä neljännen megasyklisen yksikön alakontaktin yläpuolella olevissa kumulaateissa voi johtua siitä, että osa volatiileista läpäisi AP I:n. Pääosa alemman esiintymän läpäisseistä platinaryhmän alkuaineista olisi rikastunut AP II:n tasolle.

Painauamarakenne AP I -rikastumassa

Ala-Penikan painauamarakenne (kuvat 1–5) on platinaryhmän alkuainepotentiaalin ja platinaryhmän esiintymien syntymallien ymmärtämisen suhteen merkittävä. Halkoaho (1989) ja Halkoaho ym. (1989, 1990b) ehdottavat sen muodostuneen jonkin magmakammion kiteytymisen aikaisen häiriön seurauksena, mikä aiheutti jähmettymättömien kumulaattikerrosten romahtamisen. Romahthaneiden kerrosten yläpuoliset konvektiovirrat työstivät ja tasoittivat niitä, jolloin muodostui säännöllinen kanavamainen rakenne. Ballhaus ym. (1988) sekä Stumpfl ja Ballhaus (1986) ovat tulleet siihen johtopäätökseen, että Merenskyn Reefin painauarakenteet ovat alkuperältään magmaattisia häiriöitä. Heidän mukaansa ne muodostuivat, kun volatiilisten aineiden korkeat pitoisuudet paikallisesti las-



Kuva 6. Laikukasta anortosiittia painaumarakenteen alueelta. Kompassin pituus on 12 cm. Paljastumakuvan sijainti on merkitty kuvan 2 oikeaan alakulmaan punaisella laatikolla. Kuva: Tapio Halkoaho.

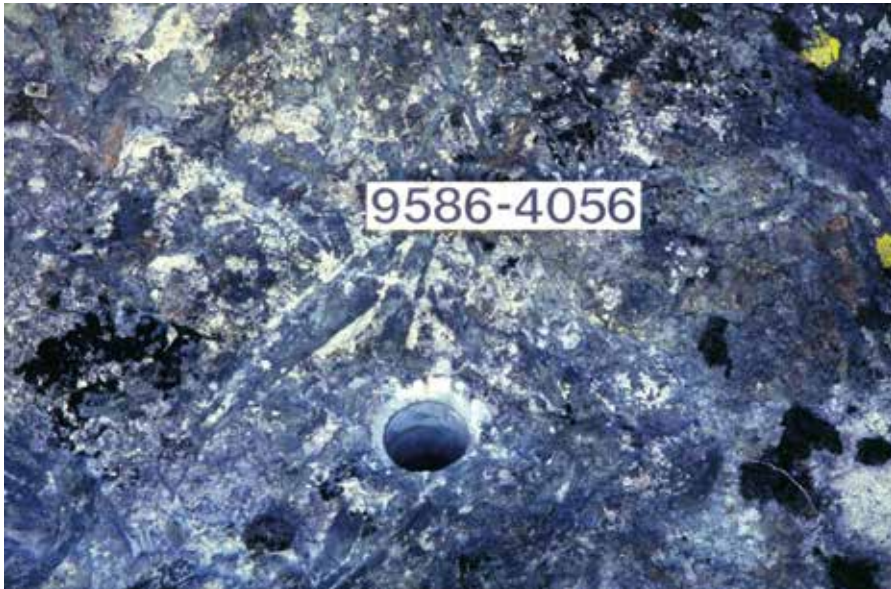
Figure. 6. Mottled anorthosite in the area of the pothole structure. The length of the compass is 12 cm. See the red box in the lower right corner of Fig. 2. Photo: Tapio Halkoaho.

kivat plagioklaasin likviduslämpötilaa niin, ettei esimerkiksi Merensky Reefin alapuolisia anortosiittikumulaatteja päässyt kiteytymään. Suuria määriä epäjatkuvia gabronoriittisia pegmatiitteja tavataan Ala-Penikan painaumarakenteen alueelta. Niinpä yksi vaihtoehto on, että korkea volatiiliaktiivisuus on tällä alueella häirinnyt normaalia mineraalien kiteytymisprosessia (Halkoaho ym. 1990b; Halkoaho 1993).

Buntin ym. (1985) olettavat, että Merensky Reefin painaumarakenteet edustavat myöhäisen magmaattisen fumarolitoiminnan arpia. Boudreau (1991) toteaa, että näissä painaumarakenteissa on samankaltaisia morfologisia yhtäläisyyksiä sedimenttiympäristöissä tavattujen rokonarpirakenteiden (engl. *pockmark*) kanssa. Boudreau (1991) ehdotti näille kahdelle samantyyppistä muodostumismekanismia eli ylipaineinen runsaasti volatiileja sisältävä materiaali karkaa alla olevista sedimenteistä ja kumulaateista. AP I:ssä esiintyvä laaja painaumarakenne voi siis olla purkausaukko runsaasti volatiileja sisältäväl-

le materiaalille, jota intruusiossa puristetaan ylöspäin alempana kiteytyvistä kumulaateista. Painaumarakenteen laikukkaassa anortosiitissa (kuva 6) sekä sen alapuolella olevassa lähes omamuotoista kumulusaugiittia sisältävässä gabronoriitissa esiintyy platinaryhmän alkuaineista rikastuneita gabronoriittipegmatiitteja. Gabronoriittipegmatiitteja on runsaasti myös laikukkaan anortosiitin yläpuolisessa interkumulusaugiittia sisältävässä gabronoriitissa (kuva 7), mutta niiden platinametallipitoisuus on alhainen. Lisäksi kohtisuoraan kerroksellisuutta leikkaavia gabronoriittisia pegmatiitteja (kuva 8) tavataan yhdessä anortosiittisten fragmenttien kanssa (kuva 9) kerrosseurannossa noin 200 metriä painaumarakenteen laikukkaan anortosiittikerroksen yläpuolella (kuva 2).

Ala-Penikan loholla painaumarakenteen lähellä olevissa kerroksissa apatiittien klooripitoisuus on 0,41–1,62 paino-% välillä, keskiarvon ollessa 0,8 paino-%. Pitoisuus on siten korkeampi kuin muiden Penikkain kerrosintruusion lohkojen AP I -rikastuman ympäristön kerroksissa (Halkoaho 1993). Painauma-



Kuva 7. Välittömästi painaumarakenteen laikukkaan anortosiitin yläpuolella esiintyvää magmaattista kerroksellisuutta leikkaavaa gabronoriittipegmatiittia. Numerolaatan pituus on 10 cm. Paljastumakuvan sijainti on merkitty kuvan 2 oikeaan alakulmaan punaisella laatikolla. Kuva: Tapio Halkoaho.

Figure 7. The gabbronorite pegmatite intersecting magmatic layering immediately above the mottled anorthosite of the pothole structure. The length of the number plate is 12 cm. The red box in the lower right corner of Fig. 2 marks the location of the outcrop. Photo: Tapio Halkoaho.



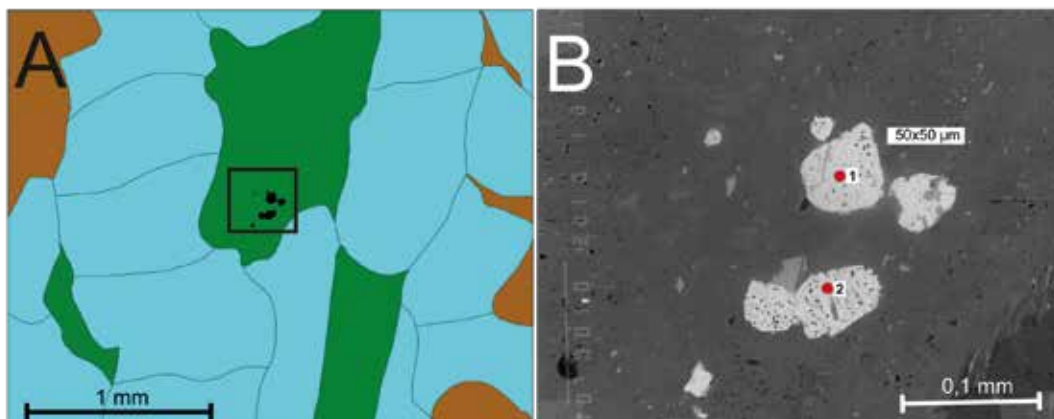
Kuva 8. Noin 200 metriä AP I:n painaumarakenteen keskimmäisen lohkon yläpuolella kerroksellisuutta kohtisuoraan leikkaava pegmatiittinen gabronoriittinen "juoni". Magmaattisen kerroksellisuuden kulun suunnassa olevan vasaran pituus on 65 cm. Paljastumakuvan sijainti on merkitty kuvan 2 vasempaan yläkulmaan punaisella laatikolla. Kuva: Tapio Halkoaho.

Figure 8. A pegmatitic gabbronorite "dyke" about 200 metres above the central block of the AP I Reef pothole structure. The length of the hammer aligned with the strike of the magmatic layering is 65 cm. The location of the outcrop is marked with a red box in the upper left corner of Fig. 2. Photo: Tapio Halkoaho.



Kuva 9. Noin 200 m AP I:n painaumarakenteen keskimmäisen lohkon yläpuolella oleva anortosiittifragmentti. Kompassin pituus on 12 cm. Paljastumakuvan sijainti on merkitty kuvan 2 vasempaan yläkulmaan punaisella laatikolla. Kuva: Tapio Halkoaho.

Figure 9. An anorthosite fragment located about 200 metres above the central block of the AP I Reef pothole structure. The length of the compass is 12 cm. The location of the outcrop is marked with a red box in the upper left corner of Fig. 2. Photo: Tapio Halkoaho.

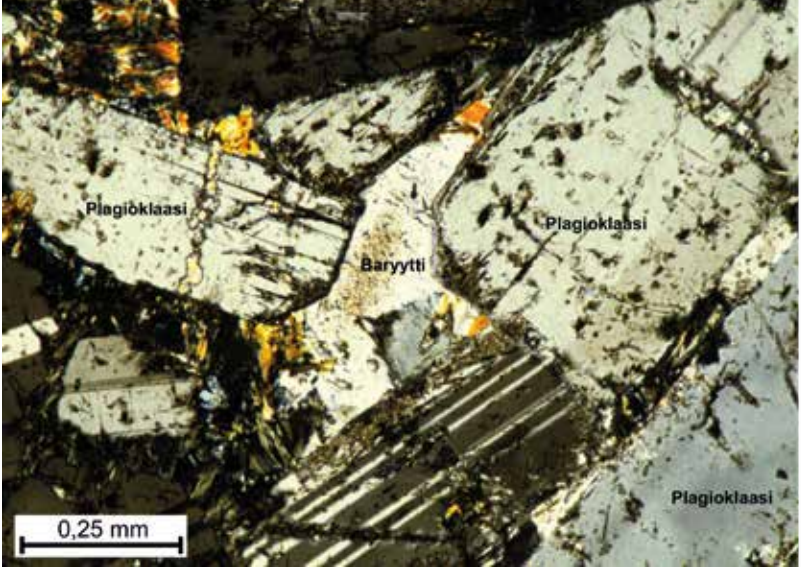


Kuva 10. Kairasydämen Ki-456 gabronoriitissa syvyydellä 23,55 m (kuva 5) muuttuneessa kumulusaugiittirakeessa sulkeumina esiintyviä kromiittirakeita (FeCr_2O_4). Kuva 10A on piirretty ohuthiekuvasta: ruskea = muuttunut bronsiitti, vihreä = muuttunut augiitti, vaalean sininen = plagioklaasi ja musta = muuttuneessa augiitissa sulkeumana olevat kromiittirakeet. Kuva 10B esittää kromiittirakeita takaisin sironneiden elektronien muodostamassa kuvassa, analyysitulokset pisteistä 1 ja 2 ovat esitetty taulukossa 1. Huomaa kuvien mittakaavaero. Kuva 10B: Tapio Halkoaho.

Figure 10. Chromite grains (FeCr_2O_4) occur as inclusions in an altered augite cumulus grain in gabbro-norite at 23.55 m depth in the drill hole Ki-456 (Fig. 5). Fig. 10A is drawn from a thin section and shows brown = altered bronzite, green = altered augite, light blue = plagioclase and black = chromite grains as inclusions in altered augite. Fig. 10B chromite grains in a backscattered electron image, the analysis results (1 and 2) are presented in Table 1. Note the difference in scale of the Figs. Photo 10B: Tapio Halkoaho.

Kuva 11. Kairasydä-
mestä Ki-456 gabro-
noriitista syvyydeltä
23,55 m (kuva 5)
löydetty interkumulus-
baryytti ((Ba,Sr)SO₄).
Mikroskooppikuva,
ristipolarit: Tapio
Halkoaho.

Figure 11. Intercumu-
lus baryte ((Ba,Sr)SO₄)
found in gabbronorite
at 23.55 m depth in
the drill hole Ki-456
(Fig. 5). Microscopic
image in cross-po-
larized light: Tapio
Halkoaho.



Taulukko 1. Penikkain kerrosintruusion AP I:n
painaumarakenteesta löydettyjen kromiittirakei-
den kemiallisia koostumuksia (katso kuvaa 10B).
Fe₂O₃/FeO laskettiin uudelleen Carmichaelin
(1967) kuvaamalla menetelmällä.

Table 1. Chemical composition of chromite grains
found around the area of the pothole structure of
the AP I PGE Reef of the Penikat layered intrusion
(see Fig. 10B). Fe₂O₃/FeO was recalculated using
the method described by Carmichael (1967).

	1	2
Cr ₂ O ₃ (paino-%)	30,04	30,13
Al ₂ O ₃	19,70	19,93
Fe ₂ O ₃	12,24	11,85
FeO	31,80	31,44
MnO	1,63	1,40
MgO	0,47	0,47
TiO ₂	1,08	0,84
V ₂ O ₃	1,07	1,10
NiO	0,03	0,04
ZnO	1,92	2,10
CaO	0,08	0,12
Na ₂ O	0,08	0,05
Summa	100,13	99,46

Kationien lukumäärä
32 happiatomia kohti

Cr	6,4675	6,5200
Al	6,3245	6,4310
Fe ³⁺	2,5087	2,4405
Fe ²⁺	7,2427	7,1975
Mn	0,3749	0,3237
Mg	0,1908	0,1914
Ti	0,2208	0,1725
V	0,2328	0,2414
Ni	0,0055	0,0077
Zn	0,3859	0,4238
Ca	0,0242	0,0361
Na	0,0444	0,0260

Taulukko 2. Penikkain kerrosintruusion AP I:n pai-
naumarakenteen alueelta löydetyn interkumulus-
baryytin kemiallinen koostumus.

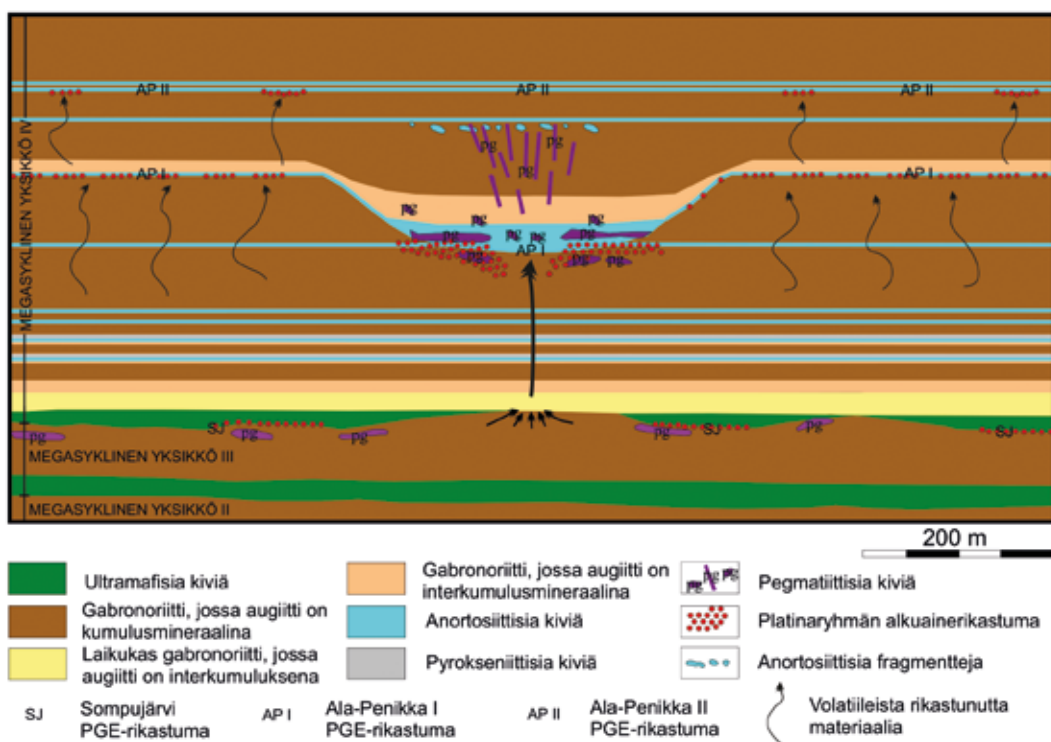
Table 2. Chemical composition of intercumulus ba-
ryte found in the area of the pothole structure of
the AP I PGE Reef of the Penikat layered intrusion.

BaO (paino-%)	62,53
SO ₃	33,66
SrO	0,73
Summa	96,92

Kationien lukumäärä
4 happiatomia kohti

S	1,003
Ba	0,973
Sr	0,017

rakenteen kivistä on löydetty, nimiitti-nimistä
(engl. *nimite*) nikkelpitoista kloriittimineraa-
lia ((Ni,Mg,Fe,Al)₆(AlSi₃)O₁₀(OH)₈). Nimii-
tin NiO-pitoisuus vaihtelee välillä 1,82–12,73
paino-%. Yhdestä näytteestä (kairasydän Ki-
456, syvyys 23,55 m) on löydetty muuttunees-
ta kumulusaugiittirakeesta sulkeumina pieniä
kromiittirakeita, joissa on yllättävän korkea
sinkkioksidipitoisuus: n. 2 paino-% (kuva
10 ja taulukko 1). Tämän perusteella painau-
marakenteen alueella on sen muodostumisen
aikaan vallinneet poikkeukselliset olosuhteet,
sillä alkava kumulusaugiitin kiteytyminen kes-
keyttää varhaisemman kumuluskromiitin ki-
teytymisen. Kromiitin puuttuminen augiittia



Kuva 12. Kaaviomalli AP I platinarikastuman Ala-Penikan lohkon painaumarakenteen muodostumisesta. Painaumarakenne voi edustaa jonkinlaista rokonarpea, joka viittaisi magmaattiseen fumaroliaktiivisuuteen ja edustaisi ylipaineisen volatiileista rikkaan faasin purkautumispaikkaa kerrostuneiden kumulaattien läpi (vrt. Buntin ym. 1985; Boudreau 1991). Kuva muokattu lähteestä Halkoaho (1993).

Figure 12. Schematic model of the formation of the pothole structure in the AP I PGE Reef at the Ala-Penikka block of the Penikat layered intrusion. The pothole structure may represent some kind of a pockmark indicating magmatic fumarole activity and representing an escape site of overpressured volatile-rich phase through the cumulates deposited below (see also Buntin et al. 1985; Boudreau 1991). Modified after Halkoaho (1993).

sisältävistä kumulaateista on yhdenmukainen kromiitin ja augiitin välisen reaktiosuhteen kanssa (katso Irvine 1967; Hill & Roeder 1974). Lisäksi tästä samaisesta näytteestä on löydetty magmaattista interkumulusbaryyyttia, joka on todiste rikkiyhdisteitä sisältävästä interkumulussulasta (kuva 11 ja taulukko 2).

Noin 5–10 metriä painaumarakenteen laikukkaan anortosiittikerroksen (kuva 6) alapuolelta, painaumarakenteen keskiosasta, löydettiin Peräpohjan platinaprojektin geofysikaalisten sähkönjohtavuusmittausten yhteydessä noin 30 metriä leveä ja 100 metriä

pitkä linssimäinen johtavuusanomaliavyöhyke (kuva 2). Tehtyjen sähkömagneettisten, tasoaalto-lähdettä käyttävän, VLF-R- ja sähköisten DC-IP-luotausten tulosten mukaan vyöhyke seuraa painaumarakenteen pohjan ääri viivoja (Halkoaho 1989; Lerssi 1990). Sähkönjohtavuusanomaliavyöhykkeen aiheuttajaa yritettiin selvittää kairaamalla, mutta tuloksetta, sillä kairareitit eivät ylittäneet yli 50 metriin (kuvat 4 ja 5). Lähimmäs sähkönjohtavuusanomaliaa on päästy kevättalvella 1989 kairatulla kairareitillä Ki-456, joka lopetettiin 42,30 metrin syvyyteen (kuva 5). Sy-

vydestä 38,60–42,30 m on kuvattu paikoin liuskeista kiveä, joten kairareian loppuosassa voidaan havaita muutos kiven ominaisuuksissa. Geofysikaalisten mittausten perusteella anomaliavyöhyke jatkuu painaumarakenteen itäpuolella ainakin 200 metrin syvyyteen saakka (Lerssi suullinen tiedonanto; Lerssi 1990). Sähkönjohtavuusanomalian oletetaan johdettavan sulfidien määrän lisääntymisestä noin 200 metrin syvyydessä sijaitsevan volatiileista rikastuneen magman purkausaukon alueella (kuva 12) (Halkoaho 1993).

Yhteenveto

Penikkain kerrosintruusio sijaitsee Lounais-Lapissa, Pohjois-Suomessa. Intruusio koostuu kahdesta pääyksiköstä: reunasarjasta ja kerrossarjasta. Kerrossarja on jaettu viiteen megasykliseen yksikköön, joiden on tulkittu syntyneen erillisistä magmapulsseista kiteytyvään Penikkain magmasäiliöön. Intruusiossa on kolme merkittävää platinaryhmän alkuaineista rikastunutta kerrosta: Sompujärvi, Ala-Penikka ja Paasivaara. Näistä keskimäinen, Ala-Penikan PGE-rikastumakerros, sisältää suuren painaumarakenteen. Tämä rakenne on noin 300 m pitkä ja 100 m syvä ja leikkaa allaan olevia kerroksia. Rakenne koostuu kolmesta erillisestä lohkoista, joista eteläisin edustaa alkuperäisen rakenteen matalinta leikkausta ja pohjoisin syvintä. Painaumarakenteen alueella rikastuman maksimipaksuus on lähes 20 metriä, keskipaksuuden on arvioitu olevan n. 5 m.

AP I:n painaumarakenteen kokonaisuu- den ymmärtäminen on tärkeää PGE-rikastumien syntymekanismin ymmärtämisen kannalta. Epäilemättä volatiileilla on ollut merkittävä osuus tämän tyyppisten rakenteiden muodostumiseen. Volatiilit lienevät myös vaikuttaneet koko AP I:n syntyyn. Painaumarakenteen syntymekanismi on kuitenkin edelleen avoin, ja sen selvitys vaatisi ehdottomasti lisätutkimuksia. Malminetsinnallisesti

herää kysymys, onko tämä painaumarakenne AP I:ssä ainutlaatuinen Penikkain kerrosintruusiossa vai voisiko vastaavanlaisia olla lisää?

Kiitokset

Esitämme parhaimmat kiitokset Oulun yliopistossa vuosina 1987–1989 toimineen Peräpohjan platinaprojektin henkilöstölle, erityisesti projektin johtajalle, edesmenneelle professori Tuomo Alapietille ja Outokumpu Oy:n geologille FM Jarmo Lahtiselle. Tässä artikkelissa esitetty paljastumakartoitus- ja kairasydänaineisto on kerätty vuosina 1982–1989 edellä mainitun projektin ja Lapin Malmi Oy:n malminetsintätöiden aikana. Kirjoittajat haluavat lisäksi kiittää Geologin toimitussihteeriä, Perttu Mikkolaa, ja toimitajaa, Maarit Kalliokoskea, tekstiä suuresti parantavista kommenteista sekä Jouni Lerssiä käytettyjen geofysiikan mittausten menetelmien kuvauksista.

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 lisäksi toimii magmapetrologian dosenttina Turun yliopistossa ja petrologian dosenttina Helsingin yliopistossa. Sari Romppanen toimii erikoistutkijana Geologian tutkimuskeskuksen Espoon toimipisteessä sekä on Geologin päätoimittaja.

Summary

The pothole structure in the Ala-Penikka platinum-group element-enriched layered sequence of the Penikat layered intrusion: evidence for an internal magmatic fumarole within the intrusion?

The Penikat layered intrusion is located in southwestern Lapland, northern Finland. The intrusion consists of two main units: a marginal series and a layered series. The layered series is divided into five megacyclic units (MCUs), which have been interpreted as separate magma pulses in the crystallizing Penikat magma chamber. Three significant platinum-group element enriched layers have been found in the intrusion: Sompujärvi, Ala-Penikka and Paasivaara. The middle one of these, the Ala-Penikka platinum-group element enrichment layer (AP I), contains a large pothole or a depression structure, which is about 300 m long and 100 m deep cutting the underlying layers. The structure consists of three separate blocks, the southernmost representing the shallowest section of the original structure, and the northernmost the deepest one. In the area of the depression structure, the base metal enrichment forms a wider zone, allowing the base metal sulfide-containing rocks to reach a thickness of almost 20 meters. Its average thickness is estimated to be about 5 m.

Understanding the entirety of the depression structure of the AP I is important for understanding the formation mechanism of platinum-group element enrichments. Undoubtedly, volatility has had a significant impact on the formation of this type of structures. Volatility may also have contributed to the formation of the AP I as a whole. However, the formation mechanism of the depression structure remains open and further research would definitely be needed to investigate it. In terms of mineral prospecting, the question arises

whether this depression structure is unique for the AP I or could there be more similar ones?

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.
- Ballhaus, C. G., Cornelius, M. & Stumpff, 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., 1991. Fluid overpressure in layered intrusions and the formation of potholes. Teoksessa: Barnes, S. J. (toim.), IAGOD Commission on Ore Deposits in Mafic and Ultramafic Rocks 6th International Platinum Symposium Program and Abstracts, Perth, Western Australia, 11–12.
- 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>
- 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>

- Carmichael, I. S. E., 1967. The iron-titanium oxides of salic volcanic rocks and their associated ferromagnesian silicates. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 14, 36–64. <https://doi.org/10.1007/BF00370985>
- Halkoaho, T., 1989. Ala-Penikan platinaryhmän metallimineralisaatio Penikkain kerrosintruusiossa. 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 Ala-Penikka PGE mineralizations 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, 93–122.
- 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. & Szentpéteri, K., 2024. Penikkain kerrosintruusio ja Sompujärven platinaryhmän metalliesiintymästä löydetty uusi mineraali: laflammeiitti ($\text{Pd}_3\text{Pb}_2\text{S}_2$). *Geologi* 76 (3), 102–115.
- Hill, R. & Roeder, P., 1974. The crystallization of spinel from basaltic liquid as a function of oxygen fugacity. *Journal of Geology* 82, 709–729. <https://doi.org/10.1086/628026>
- 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>
- Irvine, T. N., 1967. Chromian spinel as a petrogenetic indicator—Part 2, petrologic applications. *Canadian Journal of Earth Sciences* 4, 71–103. <https://doi.org/10.1139/c67-004>
- 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.
- Kujanpää, J., 1964. Kemin Penikkain jakson rakenteesta ja kromiiteista. Julkaisematon lisensiaatintutkielma. Oulun yliopisto, Oulu, 118 s.
- Lahtinen, J., 1988. AP-platinaryhmän metallimineralisaatio Penikkain kerrosintruusiossa. *Lapin Malmi, raportti 001/2543,2544/JJL/88-2*, 17 s.
- Lerssi, J., 1990. Geofysikaaliset tutkimukset. Teoksessa: Alapieti, T., Halkoaho, T., Huhtelin, T., Iljina, M. & Lerssi, J. (toim.) *Peräpohjan platinaprojektin loppuraportti n:o 3*. Oulun yliopisto, Oulu, 150–172.
- 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>
- Shima, H. & Naldrett, A. J., 1975. Solubility of sulfur in an ultramafic melt and the relevance of the system Fe-S-O. *Economic Geology* 70, 960–967. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.70.5.960>
- Stumpff, E.F. & Ballhaus, C.G., 1986. Stratiform platinum deposits: new data and concepts. *Fortschr. Mineralogie* 64, 205–214.
- 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.