

Sakatin suuri nikkelimalmio ei ollut yllätys

MATTI SAVERIKKO

AngloAmerican Ltd. löysi Euroopan suurimman nikkeli-kuparimalmion Sodankylästä yllätyksenä vallitsevalle käsitykselle Lapin vihreäkivivyöhykkeen Proterotsooisesta laattatektoniikka-kehityksessä. Malmion sijainti manttelipatsaan alueella Pohjois-Euroopan rikkaimmassa kultaprovinssissa viittaa paremmin Condien ja Bennin (2006) globaaliiin manttelipluumien kultakriittiseen kauteen n. 2,7 Ga sitten.

Lapponinen manttelipullistuma ja mannerkohouma

Keski-Lapin komatiittijakso (Saverikko *et al.* 1985) kuvastaa manttelidiapiiria ja sen kaulamaista puhkeamaa (kuva 1), jonka reunavyöhykkeellä Sakatin nikkelimalmion pitääkin sijaita. Puhkeama on pienempi kuin Solovetskin Arkeeinen manttelipuhkeama Vienanmeren alueella. Diapiiriin liittyy säteittäisten Arkeeisten vihreäkivivyöhykkeiden ja muiden maankuormitumien perusteella mannerkohuman keskiö (kuva 2).

Tämä suora havainto on ristiriidassa Pohjois-Suomen laattatektonisten tulkintojen kanssa, joiden edellyttämiä maankuoren lohkojen liikuntoja ei ole todistettu. Vaikka Fennoskandian kilven alla on ollut voimakkaita manttelivirtauksia (Mertanen *et al.* 1989) diapiirin synnyttämiseksi ja Kuolan lohkon sekä granuliittikaaren kiertymiseksi vastapäivään (kuva 3), ei geofysikaalisissa syväluotauksissa ole perusteita subduktioille tai mannertörmäyksille (von Knorring ja Lund 1989, Patison *et al.* 2006).

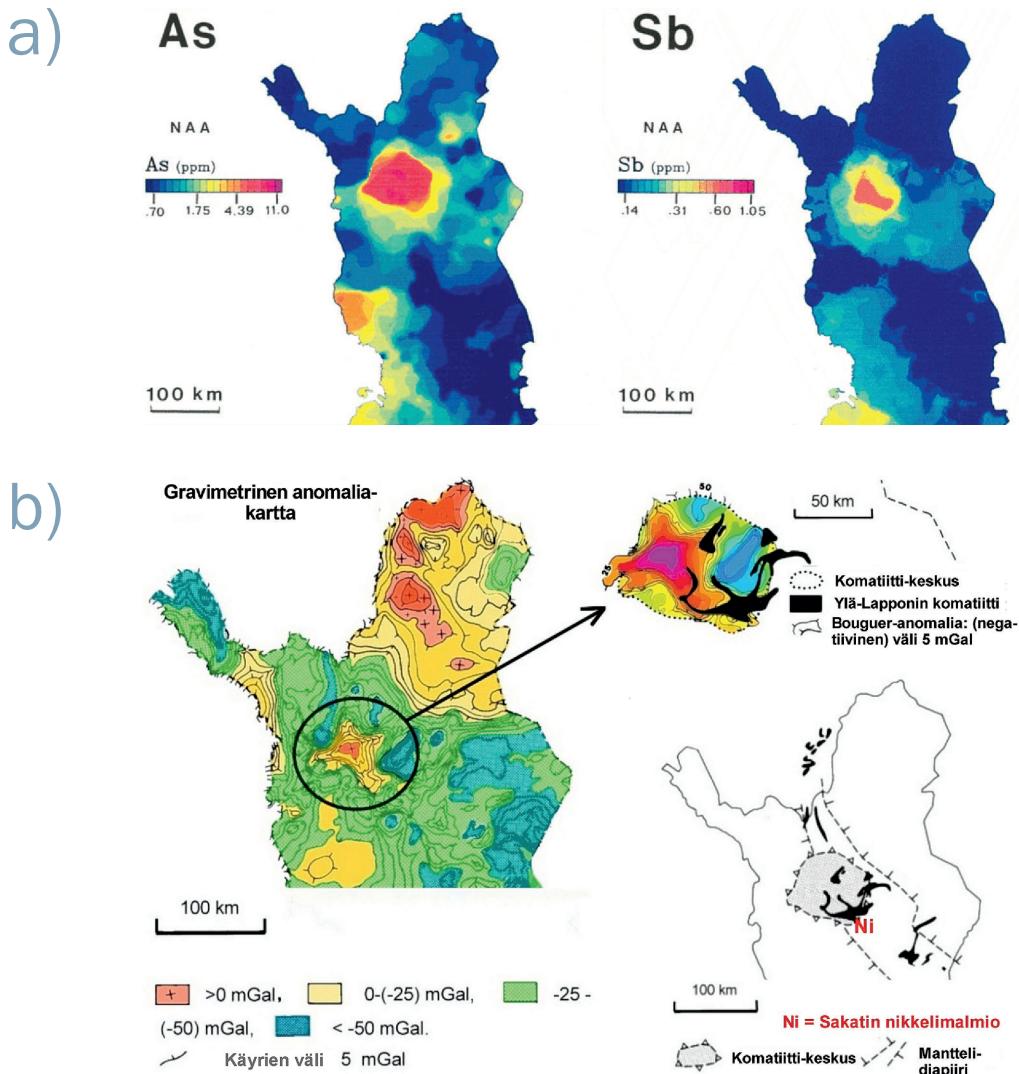
Mantteliplumi on pusertunut riittävän paksun mannerkuoren läpi lähelle pintaa, jotta ultramäksinen magma on tarpeeksi jäähtynyt muodos-taakseen jähmeää komatiittiilaavaa. Komatiittikeskusten eli isojen tulivuorten lohkarelaavat (kuva 4) ovat lisätodiste mantereisesta ympäristöstä (Macdonald 1972), mikä näkyy myös Lapponisten epiklastisten kerrostumien runsautena.

Magmadifferentaatio-olosuhteet

Pinnanläheisen säiliön magmadifferentaatiosta ja kaasujen kerääntymisestä säiliön yläosiin on petrografisia todisteita. Sattasaaran kerrosmainen komatiittikompleksi syntyi komatiittisesta basaltti- ja ultramafisesta komatiittimagmasta, jossa ultramafinen osa kumuloitui edelleen kidepuuroksi. Olosuhteet olivat suotuisat nikkelimalmienkin kumuloitumiselle.

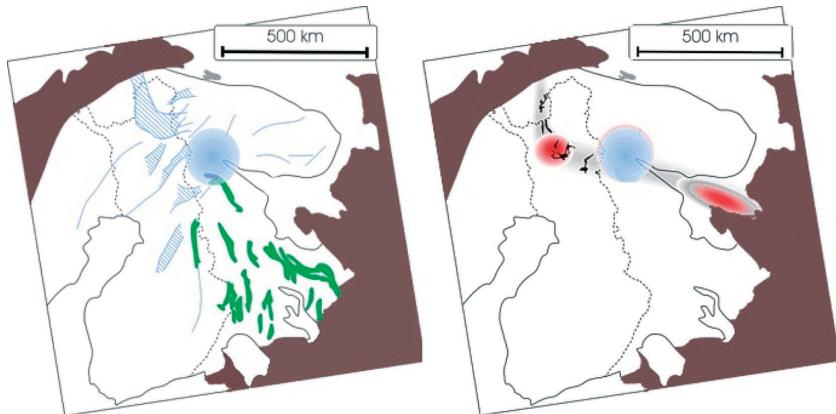
Peridotititiset kidepuurot ($\text{MgO} > 30 \text{ wt.\%}$) levisivät alkupurkuksissa laakiomaisia virtoina, minkä jälkeen purausjärjestyksessä jähmenevä laavasarja muodostui Havaijin tyypistä purkautuneista amfibolikivistä ($\text{MgO} 9\text{--}18 \text{ wt.\%}$) ja Strombolin tyypistä purkautuneista amfiboli-klorititivistä ($\text{MgO} 18\text{--}30 \text{ wt.\%}$) loppupurkuosten näkyessä kidepuuroisina piippuina.

Amfiboli-klorititivistä esiintyvät seuraavat todisteet viskoosista magmasta: (1) yleinen pyroklastisuus: räjähdysvulkaaniset purkaukset vallitsevia korkeaviskoosissa magmassa (McBirney 1973, Sparks 1978); (2) runsaslukuiset sintterit kerrostuvat oleellisen kiinteässä olomuodossa (Macdo-



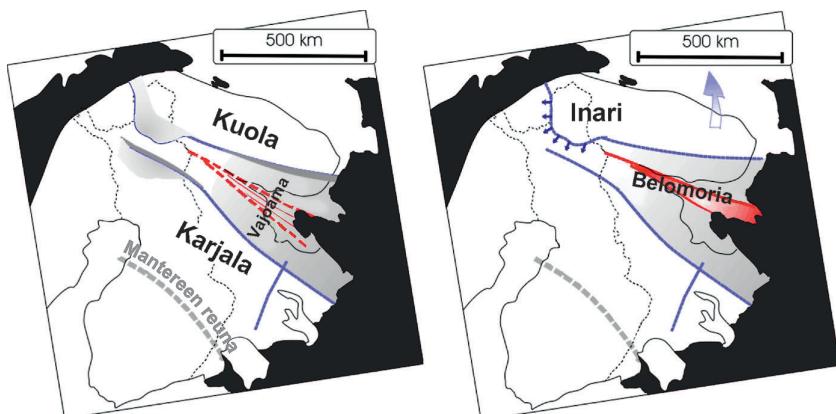
Kuva 1. (a) Korkeat arseeni- ja antimoni坑itoisuudet moreenissa kuvastavat hyvin vulkaanista keskusta. Komatiittialueiden kallioperä näkyy selvästi moreenigeokemiassa (Pulkkinen 1983, Saverikko et al. 1983) ainakin viimeisen jääkauden jääjakaja-alueella (Salonen 1986). (ks. Koljonen 1992) (b) Komatiittikeskus näkyy selvästi gravimetrisena maksimina, joka puuttuu varsinaiselta diapiirialueelta. Kyseessä on manttelin kaulamainen puhkeama. (Pohjois-Fennoskandian Gravimetrisen Anomaliakartta, 1:1 milj., Suomen, Norjan ja Ruotsin Geodeettiset instituutit, 1986)

Figure 1. (a) Arsenic and antimony anomalies discriminated by neutron-activation analyses (NAA) in till indicate a volcanic centre. The lithology of the bedrock in an area where komatiites prevail can be correlated with regional till geochemistry (Pulkkinen 1983, Saverikko et al. 1983) classified by statistical methods (Ahlsved et al. 1983), because an ice divide of the last glaciation lies in the middle of Finnish Lapland (Salonen 1986). (see Koljonen 1992). (b) The volcanic, i.e. komatiitic centre delineated is also revealed through gravimetric sounding: Bouguer anomalies are at their highest where the upper Lapponian komatiites are covered with spilitic greenstones. The komatiitic centre is explained as a mantle plume. The gravimetric patterns are from the Gravity Anomaly Map, Northern Fennoscandia, 1:1 mill., Geodetic Institutes and Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden, 1986.



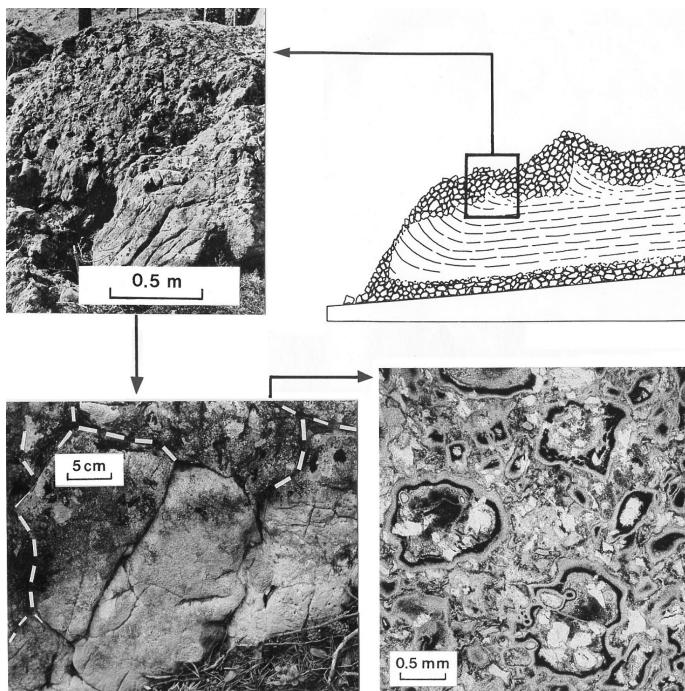
Kuva 2. Arkeeisten vihreäkivivyöhykkeiden (vihreät) ja maankuoren murtumien (siniset) säteittäinen parvi paikantaa mannerkohuman keskuksen (sininen ympyrä) manttelidiapiirin kohdalle. Loppiset vihreäkivivyöhykkeet Venäjän puolella ovat syntyneet (manner)laatan sisäisiin murtumiin (Musatov et al. 1984). Huomattakoon, että Solovetskin manttelipuhkeama (hehkuvan punainen) Vienanmeren alueella on merkitty todellista sijaintiaan pohjoisemmaksi. (Saverikko 1990).

Figure 2. Archaean greenstone belts (green) and crustal fractures (blue) form radial swarms in which linear mobile belts of the Lopian greenstone belts in Russia were intraplate tectonic basins (Musatov et al. 1984). Thus, domal uplift (the centre marked with a blue circle) in obvious correspondence with the mantle diapir is manifested. Note that a (Solovetsky) mantle plume (glowing red) in the White Sea is marked farther north as its real position. (Saverikko 1990).



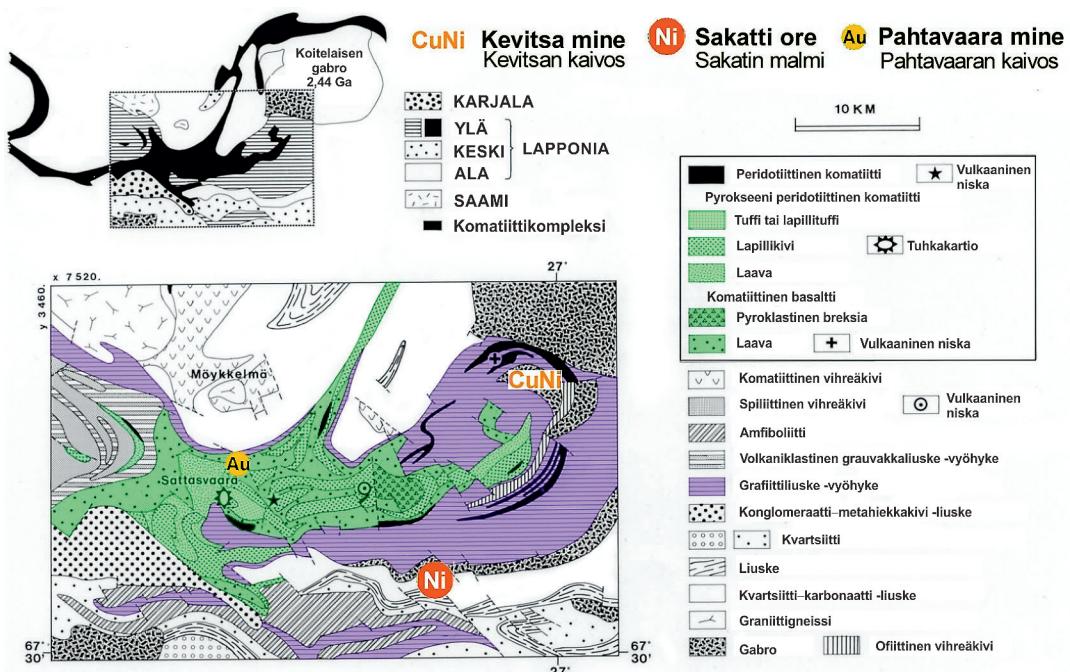
Kuva 3. Manttelivirtaukset ovat levittäneet mannerkuorta, jolloin Kuolan lohko on kiertynyt vastapäivään Vienanmeren (Belomoria) lohkon niiatessa kaakkoon (Bylinski et al., 1977, Efimov et al. 1977) ja Inarin granuliittikaari on ylityöntynyt lounaaseen (Bylinski et al. 1977). Kantalahdessa oleva syväruhjevyöhyke (punaiset viivat) on kuvattua paljon laajempi ja muodostaa porrasmaisesti kiilautuneen vajoaman Vienanmeren alueella (Akudinov et al. 1972, Bylinski et al. 1977).

Fig. 3. Mantle convection and upwelling were the reasons for extensional tectonic regime and counter-clockwise rotation of the Kola megablock since the Late Archaean (Bylinski et al. 1977, Efimov et al. 1977). The Archaean Kantalahti rift (red lines) consists of a central deep-fault zone intersecting circular megastructures of the Saamian granitoid basement, but the original fault system is much wider in the form of wedging subsidence within the Belomoria (White Sea) megablock (Akudinov et al. 1972, Bylinski et al. 1977). The advancing rotation caused overthrusting of the Anar megablock (see Saverikko 1990) when the granulite belt and the adjacent bedrock in the west formed imbrication structures (Bylinski et al. 1977).



Kuva 4. Hyvin säilynyt lohkarelaavvirta Sattasvaaran sintterikartion vieressä. Laavat lohkoutuvat vain jähmeinä, ja mafisetkin laavat voivat muodostaa lohkareisia virtoja vain hyvin jäähyteinä. Vulkaanisen lasin (kirkkaat sulkeumat mikroskooppikuvassa) muodostuminen edellyttää jäähtynytä ja jähmeää laavaa.

Fig. 4. A recent-like block-lava flow beside the Sattasvaara cinder cone. The komatiitic block lavas are quite exceptional because even the mafic block lavas erupt only at very low temperature. Only the viscous lavas split into blocks. The formation of volcanic glass (clear vitric droplets in microphotograph) depends on the cooling rate and viscosity of a stable silicate liquid.



Kuva 5. Sattasvaaran komatiittikompleksi ja loivasti itäänpäin kallistuva Koitelaisen gabbro (Saverikko 1990). Sakattipahdan komatiitiesiintymää ei ole merkitty kartalle.

Fig. 5. The Sattasvaara komatiite complex beside the Koitelainen gabbro sheet slightly inclined to the east (Saverikko 1990). The komatiite deposit at Sakattipahta is not marked on the map.

nald 1972); (3) vulkaaniset lasiheitteleet: täyslasiheitteleitä muodostuu vain korkeaviskoosista magmasta (Fisher ja Schmincke 1984); (4) suuret laavaheitteleet lohkaremaisia, harvemmin roiskemaisia; (5) vähäiset laavat fragmentoituneita lohkarelaavoiksi: vain jähmeä aines lohkoutuu.

Jähmeyden aiheuttanut jäähtyneisyyss näkyy seuraavasti: (1) spinifex-rakenteiden puuttuminen käytännössä kokonaan: yli-jäähtymiselle liian alhainen purkauslämpötila (Donaldson 1982); (2) monikulmaisen rakoilun harvinaisuus: vähäisen *in situ* jäähtymisen heikko kutistamisvaikutus (Williams ja McBirney 1979); (3) laavojen vähäiset jäähtymiskuoret ja lähinnä hitsautumattomat heitteleet: komatiittien korkeasta lämpötilasta oleellisesti laskenut purkauslämpötila; (4) paljon lasiheitteleitä ja lasilukemia: muodostuminen riippuu myös magman jäähtymistästä (Carmichael 1979); (5) vähäiset laavat lohkarelaavoja: mafinenkin laava lohkoutuu vain hyvin alhaisessa lämpötilassa (Williams ja McBirney 1979).

Manteliaktiiviset hautavajoamat (2,7–2,6 Ga) ja kultaesiintymät (~2,7 Ga)

Globaali manteliaktiivisten hautavajoamien kausi 2,7–2,6 Ga oli Arkeeisen ajan merkittävin magmaattinen vaihe (Condie 1981). Miksei myös Lapissa, koska Sattasvaaran komatiitit muodostuvat manteliaktiivisen hautavajoaman (Saverikko 1987) manttelipluumista (Saverikko 1990) osana diapiiria, jossa Solovetskin manttelipuhkeaman mafis-ultramafiseen magmatismiin 2,72–2,66 Ga (Arestova *et al.* 2003) liittyi komatiitteja 2,7–2,65 Ga (Lobach-Zhuchenko ja Levchenkov 1986). Mantelitoiminta olikin voimakasta Fennoskandiin kilven kiertyessä 2,7–2,6 Ga (Mertanen *et al.* 1989) ja läpikotaisen tektonismetamorfisen pulsin kulminoituessa 2,7 Ga (Paavola 1988). Mannerkuori rauhoittui tektonisesti 2,6 Ga (Silvennoinen 1985) mantelitoiminnan tasaantuessa.

Sattasvaaran komatiitit (kuva 5) rajoittuvat Koitelaisen gabbroon (2,44 Ga) ja ovat sitä van-

hempia tämän kallistuessa loivasti itäänpäin komatiittien ja vulkaanisten metasedimenttien päällä (Puustinen 1977). Sen alaosissa on sulkeumina ekstrusioista komatiitti (Mutanen 1997) ja sen eteläreunan jalkapuolella näkyy peridotitiitissa komatiittiissä kontaktimetamorfinen vyöhyke, jossa pyrokseeniidioblastien koko ja määrä vähenevät selvästi gabbron kontaktista poispäin (Saverikko 1985). Tätä komatiittia leikkaa hapan vulkaaninen tulokanava (\varnothing 2–5 m) serttimäisen kiven vaihettuessa albiittikiveksi. Molemmat kivet ovat välierroksina laaja-alaisessa grafittiliuskeessa varsinaisen Sattasvaaran komatiittikompleksin alla. Saman vyöhykkeen albiittikivi Kittilän alueella antaa 2,70 Ga:n ikämäärityksen (Rastas 1980) ja albiittijuoni komatiittijakson alueella Karasjoella 2,72 Ga:n ikämäärityksen (Meriläinen 1976).

Hyvin kultakriittisten vihreäkivihautavajoamienvälinen globaali manttelipluumien vaihe oli n. 2,7 Ga (Groves *et al.* 1987, Condie ja Benn 2006). Mikä muu kehitysvaihe olisi Keski-Lapissa (Eilu 2012) aiheuttanut Pohjois-Euroopan rikkaimman kultaprovinssin (Ojala 2007) juuri Lapponisen hautavajoaman manttelipuhkeamaan (Saverikko 1990)?

Teksti perustuu kirjoittajan 1991 hylättyyn synopsis-käsikirjoitukseen "Komatiitic Explosive Volcanism, Volcanoes, and Its Tectonic Significance in Northern Finland, the Fennoscandian (Baltic) Shield" ja sen liitteisiin, jotka ovat pyydettäessä saatavissa kirjoittajalta.

English summary:

The Sakatti nickel-ore deposit was not a surprise

The discovery of the largest nickel-copper deposit in Europe in Sakatti, Sodankylä, was surprising in the framework of traditional Proterozoic plate-tectonic models of Lapland. Its location in a mantle-plume area within the richest gold province of northern Europe, however, justifies a discussion about a global mantle-plume epoch that coincided with the peak of gold production ca. 2.7 Ga ago (Condie and Benn 2006).

Linear shield-scale mantle diapirism can be interpreted from the large Archean Solovetsky mantle plume (Bylinsky *et al.* 1977) and the associated pyroclastic komatiite zone (Fig. 1; Saverikko *et al.* 1985). A radial swarm of Archean greenstone belts and crustal fractures (Fig. 2) form an aulacogenic network which is consistent with domal uplift of the compact plate at the onset of the influence of the diapir (Saverikko 1990). Vigorous mantle convections operating since Late Archean (Mertanen *et al.* 1989) were enough to rotate the Kola megablock anticlockwise (Fig. 3) but no evidence of a possible subduction survives (von Knorring and Lund 1989, Patison *et al.* 2006).

The mantle-activated rifting at 2.7–2.6 Ga was globally the most important Archean period of magmatic activity (Condie 1981). Mantle-activated rifting also generated the Sattasvaa complex (Saverikko 1987, 1990) and the 2.7–2.65 Ga komatiites in the Solovetsky zone (Lobach-Zhuchenko and Levchenkov 1986). The Sakatti nickel deposit, along with the richest gold province of northern Europe (Ojala 2007) in central Lapland (Eilu 2012), is related to the global mantle-plume processes ca. 2.7 Ga ago (Groves *et al.* 1987, Condie and Benn 2006).

This essay is based on the author's unaccepted doctoral study: "Komatiitic Explosive Volcanism, Volcanoes, and Its Tectonic Significance in Northern Finland, the Fennoscandian (Baltic) Shield". The synopsis and unpublished appendices are available upon request from the author.

MATTI SAVERIKKO
Alberganesplanadi 4 A 10
FI-02600 Espoo
Email: matti.saverikko@mbnet.fi

Viihteet – References

- Ahlsved, C., Gustavsson, N., Söderman, B. ja Koljonen, T. 1983. Statistical classification of till into lithologies in the Sattasvaa komatiite area, Finland. Teoksessa: A. Björklund ja T. Koljonen (toim.) Abstracts. 10th International geochemical exploration symposium – 3rd symposium in methods of geochemical prospecting, Espoo/Helsinki.
- Akudinov, S.A., Bolgurtsev, N.N., Litvinenko, I.V. ja Porotova, G.A. 1972. Deep structure of the eastern part of the Karelian region (from joint geophysical studies of the Lake Onega–White Sea profile). *Geotectonics* 5:296–297.
- Arestova, N.A., Lobach-Zhuchenko, S.B. ja Chekulaev, V.P. 2003. Early Precambrian mafic rocks of the Fennoscandian shield as a reflection of plume magmatism: geochemical types and formation stages. *Russian Journal of Earth Sciences* 5:3.
- Bylinski, R., Glebovitski, V., Dolivo-Dobrovolski, A. ja Porotova, G. 1977. The major Belomorian deep-fault zone. Teoksessa: Kortman, C. (toim.) Fault tectonics in the eastern part of the Baltic Shield. Proceedings of a Finnish-Soviet symposium, 20th–24th September, 1976, Finland, 49–62.
- Carmichael, I.S.E. 1979. Glass and glassy rocks. Teoksessa: H.S. Yoder, Jr. (toim.) The evolution of the igneous rocks. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 233–244.
- Condie, K.C. 1981. Archean greenstone belts. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York.
- Condie, K. C. ja Benn, K. 2006. Archean geodynamics: similar to or different from modern geodynamics? Teoksessa: Benn, K., Mareshal, J.-C. ja Condie, K.C. (toim.) Archean geodynamics and environments. *Geophysical Monograph* 164. American Geophysical Union, Washington DC. 47–59.
- Donaldson, C.H. 1982. Spinifex-textured komatiites: a review of textures, compositions and layering. Teoksessa: N.T. Arndt and E.G. Nisbet (toim.) Komatiites. George Allen & Unwin, London, 213–244.
- Efimov, M.M., Koshechkin, B.I. ja Pavlovskiy, V.I. 1977. The geological structure and evolution of the Kandalaksha abyssal fault zone. Teoksessa: Kortman, C. (toim.) Fault tectonics in the eastern part of the Baltic Shield. Proceedings of a Finnish-Soviet symposium, 20th–24th September, 1976, Finland, 63–72.
- Eilu, P. (toim.) 2012. Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia. Geological Survey of Finland, Special Paper 53, 401 s.
- Fisher, R.V. ja Schmincke, H.-V. 1984. Pyroclastic rocks. Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York–Tokyo.
- Groves, D.I., Phillips, N., Ho, S.E., Houstoun, S.M. ja Standing, C.A. 1987. Craton-scale distribution of Archean greenstone gold deposits: predictive capacity of the metamorphic model. *Economic Geology* 82:2045–2058.

- von Knorring, M. ja Lund, C.-E. 1989. Description of the POLAR profile transect display. *Tectonophysics* 162:165–171.
- Koljonen, T. (toim.) 1992. Geochemical atlas of Finland, part 2: till. Geological Survey of Finland, Espoo.
- Lobach-Zhuchenko, S.B. ja Levchenkov, O.A. 1986. Isotope geochronological data on the Archaean-Lower Proterozoic boundary. Teoksessa: Sokolov, V.A. ja Heiskanen, K.I. (toim.) Early Proterozoic of the Baltic Shield. Proceedings of a Finnish-Soviet Symposium, 19th–27th August, 1985, Petrozavodsk, 191–198.
- Macdonald, G.A. 1972. Volcanoes. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- McBirney, A.R. 1973. Factors governing the intensity of explosive andesitic eruptions. *Bulletin of Volcanology* 37:443–453.
- Meriläinen, K. 1976. The granulite complex and adjacent rocks in Lapland, northern Finland. *Bulletin of the Geological Survey of Finland* 281.
- Mertanen, S., Pesonen, L.J., Huhma, H. ja Leino, M.A.H. 1989. Palaeomagnetism of the Early Proterozoic layered intrusions, northern Finland. *Bulletin of the Geological Survey of Finland* 347.
- Musatov, D.I., Fedorovsky, V.S., Afanasyev, Yu.T.A., Zonenshain, L.P., Kleshch, K.A., Kovalev, A.A., Mezhelovsky, N.V. ja Sorokhtin, O.G. 1984. Some aspects of geology and geological history of the USSR territory according to new geotectonic concepts. Teoksessa: Volkov, V.M., Eremeev, A.N., Kireev, A.S., Krasny, L.I., Kulikov, G.V., Mezhelovsky, N.V. ja Pushcharovsky, Yu.M. (toim.) Geology of the USSR. 27th International Geological Congress, 4th–14th August, 1984, Moscow, 129–145.
- Mutanen, T. 1997. Geology and ore petrology of the Akanvaara and Koitelainen mafic layered intrusions and the Kevitsa-Satovaara layered complex, northern Finland. *Bulletin of the Geological Survey of Finland* 395.
- Ojala, V.J. (toim.) 2007. Gold in the Central Lapland greenstone belt. Geological Survey of Finland, Special Paper 44.
- Paavola, J. 1988. The Archaean bedrock of the Lapinlahti–Varpaisjärvi area, central Finland. *Geological Survey of Finland, Special Paper* 4:161–169.
- Patison, N.L., Korja, A., Lahtinen, R., Ojala, V.J. ja FIRE-töryhmä 2006. FIRE seismic reflection profiles 4, 4A and 4B: Insights into the crustal structure of northern Finland from Ranua to Näätämö. Teoksessa: Kukkonen, I.T. ja Lahtinen, R. (toim.) Finnish reflection experiment FIRE 2001–2005. Geological Survey of Finland, Special Paper 43:161–222.
- Pulkkinen, E. 1983. Sattasen karttalehtialueen geokemiallisen kartoituksen tulokset. Summary: The results of the geochemical survey in the Sattasen map-sheet area. Explanatory Notes to Geochemical Maps, Sheet-3714, Geological Survey of Finland, Espoo.
- 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. Institution of Mining and Metallurgy, London, 6–13.
- Rastas, P. 1980. Stratigraphy of the Kittilä area. Teoksessa: Silvennoinen, A. (toim.) Jatulian geology in eastern part of the Baltic Shield, Proceedings of a Finnish-Soviet symposium, 21st–26th August, 1979, Finland, 145–152.
- Salonen, V.-P. 1986. Glacial transport distance distributions of surface boulders in Finland. *Bulletin of the Geological Survey of Finland* 338.
- Saverikko, M. 1985. The pyroclastic komatiite complex at Sattasvaara in northern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 57:55–87.
- Saverikko, M. 1987. The Lapland greenstone belt: stratigraphic and depositional features in northern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 59:129–154.
- Saverikko, M. 1990. Komatiitic explosive volcanism and its tectonic setting in Finland, the Fennoscandian (Baltic) Shield. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 62:3–38.
- Saverikko, M., Pulkkinen, E. ja Koljonen, T. 1983. Geochemical response in till over komatiitic rocks. Teoksessa: Björklund, A. ja Koljonen, T. (toim.) Abstracts. 10th International Geochemical Exploration Symposium – 3rd Symposium in Methods of Geochemical Prospecting, Espoo/Helsinki, 71–72.
- Saverikko, M., Koljonen, T. ja Hoffré, V. 1985. Palaeogeography and palaeovolcanism of the Kummitsoiva komatiite complex in northern Finland. *Bulletin of the Geological Survey of Finland* 331:143–158.
- Silvennoinen, A. (toim.) 1985. Geologinen Pohjois-Suomi. *Acta Lapponica Fenniae* 12.
- Sparks, R.S.J. 1978. The dynamics of bubble formation and growth in magmas: a review and analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 3:1–37.
- Williams, H. ja McBirney, A.R. 1979. *Volcanology*. Freeman Cooper & Co., San Francisco.