

# SUOMEN ALKALIKIVET

—  
apatiitista  
timanttiin

Heikki Vartiainen

**A**lkalikivet muodostavat laajan magmakiviryhmän, jonka jäsenet sisältävät foideja (maasälvänsijaisia) ja/tai alkalipyrokseeneja ja -amfiboleja. Täyttä yksimielisyyttä ei vielä ole saavutettu alkalikivien määritelmästä eikä siitä, mitkä kaikki kivilajit voidaan laskea alkalikiviin kuuluviksi (katso Le Maitre ym. 1989). Tässä kirjassa alkalikivet on tulkittu laajasti ja niiden piiriin on otettu seuraavat kivilajiryhmät:

- (1) *karbonatiitit*
- (2) *silikaattiset alkalikivet*
- (3) *lamprofyriset juonikivilajit.*

Alle prosentti kaikista maamme syväkivistä on alkalikiviä. Alkalikivet ovat kuitenkin mineraalikoostumukseltaan hyvin vaihtelevia ja kiinnostavia ja niihin kohdistunut tutkimus on tavallaan ollut ylimitotettua. Muun muassa tämän seurauksena alkalikivien noin 400 tyyppi- ja kivilajinimeä vastaa liki puolta syväkivien nimistöstä. Monet alkalikivistä ovat kiteytyneet suoraan Maan vaipasta lähteneistä magmoista ja tarjoavat siten materiaalia vaipassa tapahtuvien prosessien tutkimukselle. Lisäksi alkalikivet ovat taloudellisesti mielenkiintoisia, sillä niihin liittyvät maailman tärkeimmät niobiumin, tantaalin ja harvinaisten maametallien malmit, huomattavia fosforiesiintymiä ja eräs maailman suurimmista kuparimalmeista.

Suomalaisen alkalikivitutkimuksen perinteet ulottuvat vuoteen 1857, jolloin H.J. Holmberg otti ensimmäiset näytteet Iivaaran ijo-liitti-intruusiosta Kuusamossa (Holmberg 1857, 1858, Ramsay ja Berghell 1891). Tutkimukselle merkittäviä kohteita ovat olleet Wilhelm Ramsayn vuonna 1887 löytämät Lovozeron (Lujaur Urtin) ja Hiipinän (Umptek) nefeliinisyeniitti-intruusiot Kuolan niemimaalla (Ramsay 1889, Ramsay ja Hackman 1894), Håkan Kranckin tutkima Turjanniemen alkalikivialue Kuolassa (Kranck 1928) ja Mauno Lehijärven 1950-luvulla tutkima Iivaaran alue Kuusamossa (Lehijärvi 1960). Seuraava alkalikivitutkimuksen ajanjakso alkoi Suomessa 1960-luvun jälkipuoliskolla, jolloin löytyi Soklin karbonatiitti-intruusio Savukoskelta (Paarma 1970) ja Siilinjärven karbonatiittifosforimalmi (Puustinen 1970, 1971). Viimeaikaiset kimberliittilöydöt (esim. Laapas 1994, Vilpas 1995, Tyni 1997) takaavat, että alkalikivitutkimus jatkuu maassamme.

Suomen karbonaatti- ja silikaattisten alkalikiviesiintymien sijainti, samoin kuin Kuolan tärkeän alkalikiviprovinssin rajat käyvät ilmi *Kuvasta 10.1*. Suuri osa esiintymistä on Itä-Lapissa, johon Kuolan provinssi lännessä rajoittuu. Etelä- ja Keski-Suomesta on tähän mennessä löydetty neljä karbonaatti- tai silikaattista alkalikiviesiintymää. Kuvaan on merkitty myös tähän mennessä julkistetut Suomen kimberliittipiippujen esiintymisalueet.

## 10.1. Karbonaatiitit

### Nimistö

Karbonaatti määritellään magmaattiseksi syvä- tai pintakivilajiksi, joka sisältää karbonaattimineraaleja yli puolet tilavuudestaan (Streckeisen 1978). Karbonaattien nimistöstä ei kuitenkaan vielä ole täyttä yksimielisyyttä. Suurin osa julkaistusta karbonaattikirjallisuudesta noudattaa vanhaa norjalaisen W.C. Bröggerin (1921) laatimaa ja ruotsalaisen Harry von Eckermannin (1948) täydentämää nimistöä. Viimeisemmän ehdotuksen mukaan (Woolley ja Kempe 1989) karbonaattien nimeäminen voi perustua paitsi mineralogiseen myös kemialliseen koostumukseen.

Kalsiittinen karbonaatti on uudessa ehdotuksessa *kalsiittikarbonaatti*. Vanhassa nimistössä se on joko söviitti (karkearakeinen syväkivilaji) tai alvikiitti (keski- tai pienirakeinen juonikivi). Dolomiittinen karbonaatti on uudessa ehdotuksessa *dolomiittikarbonaatti*, vanhassa nimistössä joko rauhaugiitti (syväkivi) tai beforsiitti (juonikivi). Samoin uuden ehdotuksen mukaan raudasta rikkaat karbonaatiitit ovat *ferrokarbonaattiteja*, vanhan nimistön mukaan esimerkiksi ferrosöviittiä, ferroalvikiittiä jne.

Karbonaatti-intruusioihin liittyy usein

kivilajimuunnoksia, joiden karbonaattipitoisuus on 10 - 50 %. Ryhmänä näitä on kutsuttu *silikokarbonaattiteiksi*. Niitä lähemmin eriteltäessä käytetään etuliitteenä vallitsevan lisämineraalin tai -mineraalien nimiä, kuten flogopiitti-söviitti tai magnetiitti-apatiitti-rauhaugiitti. Uuden ehdotuksen mukaiset nimet ovat flogopiitti-kalsiittikarbonaatti ja magnetiitti-apatiitti-dolomiittikarbonaatti.

Varsinkin suurille karbonaattikomplekseille on tyypillistä, että silikaattisia alkuperäiskivilajeja on muuttunut karbonaattituumisen myötä magmaattisia karbonaattiteja muistuttaviksi kivilajeiksi. Kirjallisuudessa niistä käytetään yhteisnimitystä *metakarbonaatiitit*. Täsmäntävä nimeäminen voidaan tehdä mineraalietuliitettä käyttäen.

*Foskoriitti* on tieteellistä hyväksymistä vaille oleva karbonaattiteihin liittyvä malmikivilaji, jonka päämineraaleja ovat magnetiitti, flogopiitti, forsteriitti (oliviini) ja apatiitti. Karbonaattimäärä on yleensä 5 - 25 %. Akessorisina mineraaleina esiintyy harvinaista pyroklooria  $(\text{Na,Ca})_2(\text{Nb,Ta})_2\text{O}_6(\text{OH,F})$  ja baddeleyiittiä  $\text{ZrO}_2$ , joita pidetään magnetiitin ja apatiitin lisäksi kiven malmimineraaleina.

Karbonaattiset kivilajit esiintyvät veraten usein juonimaisesti. Varsinaista omaa nimistöä ei juonikivityypeille ole esitetty. Soklilla esiintyy myöhäisemmän magmaattisen vaiheen juonimuodostusta. Näitä koostumukseltaan vaihtelevia kivilajeja on kutsuttu myöhäisiksi juoniksi.

Suomen karbonaattiteja kuvaavissa julkaisuissa on tähän asti käytetty vanhaa nimistöä. Tässä esityksessä tukeudutaan pääosin uuden ehdotuksen (Woolley ja Kempe 1989) mukaiseen kivilajinimistöön.

### länmääritykset

Alkalikivistä on tehty länmäärityksiä 1960-luvulta alkaen eri mineraaleista ja kivinäyt-

teistä. Kuten seuraavasta ilmenee, samasta esiintymästä on saatu eri menetelmillä ja eri mineraaleista erilaisia ikiä. Erikoisuutena voidaan pitää sitä, että Suomessa on verraten pieneltä alueelta löydetty kolmenkin ikäryhmän alkalikiviä. *Siilinjärven arkeinen* (zirkonin uraani-lyijykä 2 580 miljoonaa vuotta, Patchett ym. 1981; flogopiitin kalium-argonikä ”vain” 2 094 miljoonaa vuotta, Basu ja Puustinen 1982) karbonaatti edustaa harvinaisuutta, sillä tähän ryhmään kuuluu maailmassa vain kaksi muuta esiintymää, toinen Grönlannissa, toinen Pohjois-Amerikassa.

*Svekofennistä ikäryhmää* (2 050 - 1 710 miljoonaa vuotta) edustavat *Laivajoki* (zirkonin uraani-lyijykä 2 020 miljoonaa vuotta; Kouvo ja Tilton 1966), *Kortejärvi* (flogopiitista saatu kalium-argonikä 1 875 miljoonaa vuotta; Kresten ym. 1977) ja *Halpanen* (monatsiitin uraani-lyijykä 1 710 miljoonaa vuotta; Puustinen ja Karhu 1995). Kaikki nämä esiintymät ovat syntynsä jälkeen olleet mukana metamorfoosissa. Mahdolliset myöhemmät iänmäärittelyt saattavat antaa korkeampia ikiä, kuten Siilinjärven kohdalla on käynyt.

*Soklin* esiintymälle, joka kuuluu Kuolan alkalikiviprovinssiin, on saatu eri menetelmillä (uraani-torium-lyijy, rubidium-strontium, kalium-argon ja strontium) ja eri mineraaleista sama, *kaledoninen ikä*. Se on viimeisimpien määritysten mukaan tarkentunut lukemiin 368 - 362 miljoonaa vuotta (Vartiainen ja Woolley 1974, Kramm ym. 1993).

Karbonaattien iänmäärittelyt osoittavat, että Suomen kohdalla on ajoittaista karbonaattimagnetismia (karbonaattisen kivisulan muodostusta) tapahtunut aikavälillä 2 580 - 362 miljoonaa vuotta eli yli 2 200 miljoonan vuoden aikana. Tämän katsotaan merkitsevän sitä, että litosfäärin (maankuoren ja sen alla olevan vaipan jäykän yläosan) fyysiset ja kemialliset olosuhteet ja niiden muutokset ovat merkittävästi vaikuttaneet karbonaattien syntyyn.

## Kemiallinen koostumus

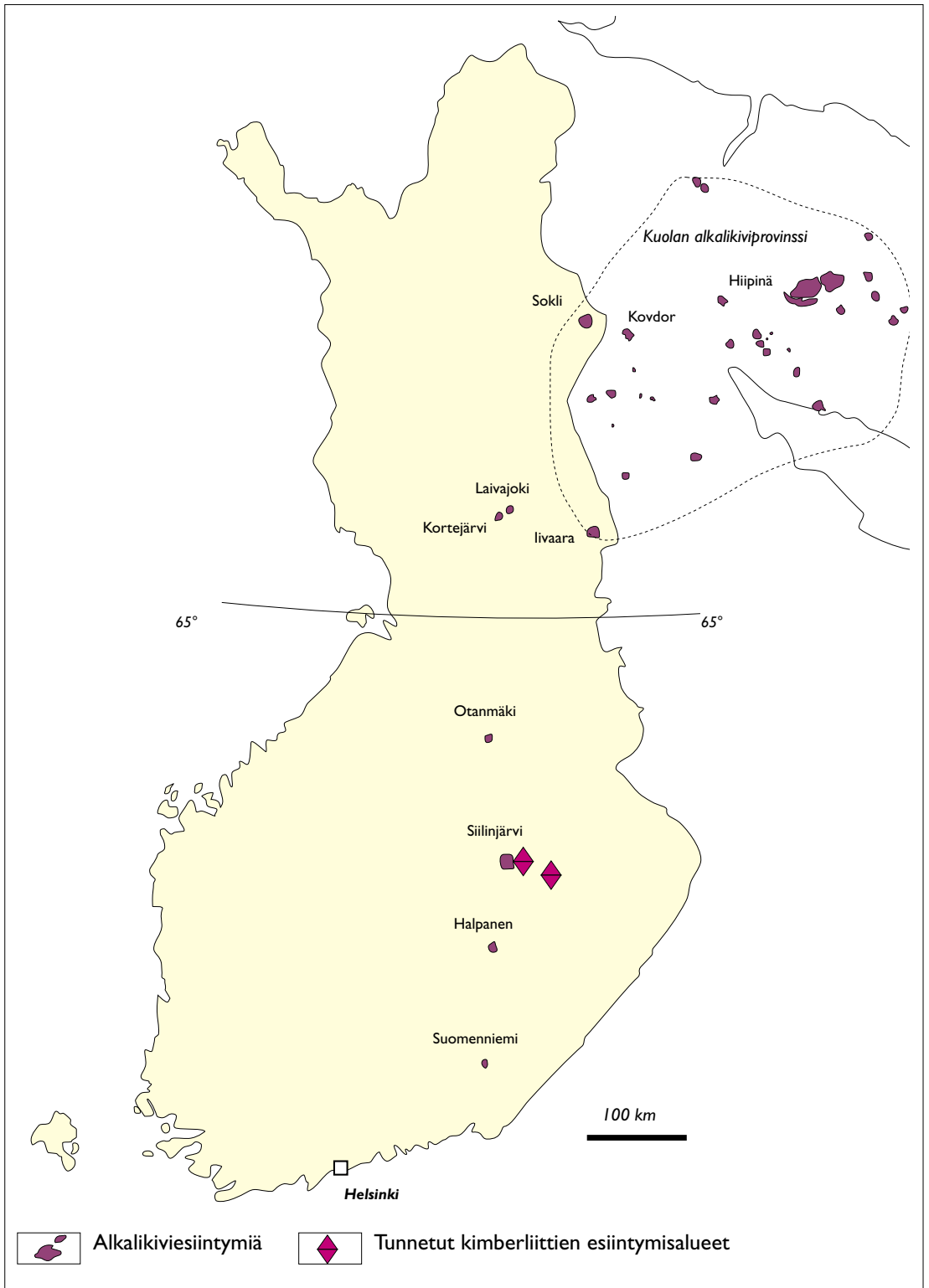
Sedimenttisiä (kerrostumalla syntyneitä) kalkkikiviä ei voi pääalkuaineidensa eli kalsiumin, magnesiumin ja hiilen (hiilidioksidin) pitoisuuksien perusteella erottaa magmasyntyisistä kalkkikivistä. Sen sijaan karbonaateista rikkaiden kivilajien tiettyjen sivu- ja hivenaineiden vertailu paljastaa selviä eroja näiden synnyltään täysin erilaisten kivilajiryhmien välillä.

Woolleyn ja Kempen (1989) mukaan karbonaattit sisältävät fosforia ( $P_2O_5$ ) keskimäärin 2 %, strontiumia (SrO) 0,78 % ja bariumia (BaO) 0,49 %. Vastaavat pitoisuudet sedimenttisyntyisille kalkkikiville ovat 0,041 %, 0,06 % ja 0,006 %. Samalla tavalla ovat esimerkiksi sellaisten harvinaisten alkuaineiden kuin lantaanin, niobiumin ja zirkoniumin pitoisuudet karbonaateissa keskimäärin 686 ppm (ppm = grammaa tonnissa kiveä), 887 ppm ja 327 ppm, mutta sedimenttisyntyisissä kalkkikivissä vain 0,9 ppm, 0,3 ppm ja 13 ppm. Eräiden alkuaineiden pitoisuudet ovat siis karbonaateissa kymmeniä, jopa satoja kertoja korkeampia kuin sedimenttisyntyisissä kalkkikivissä.

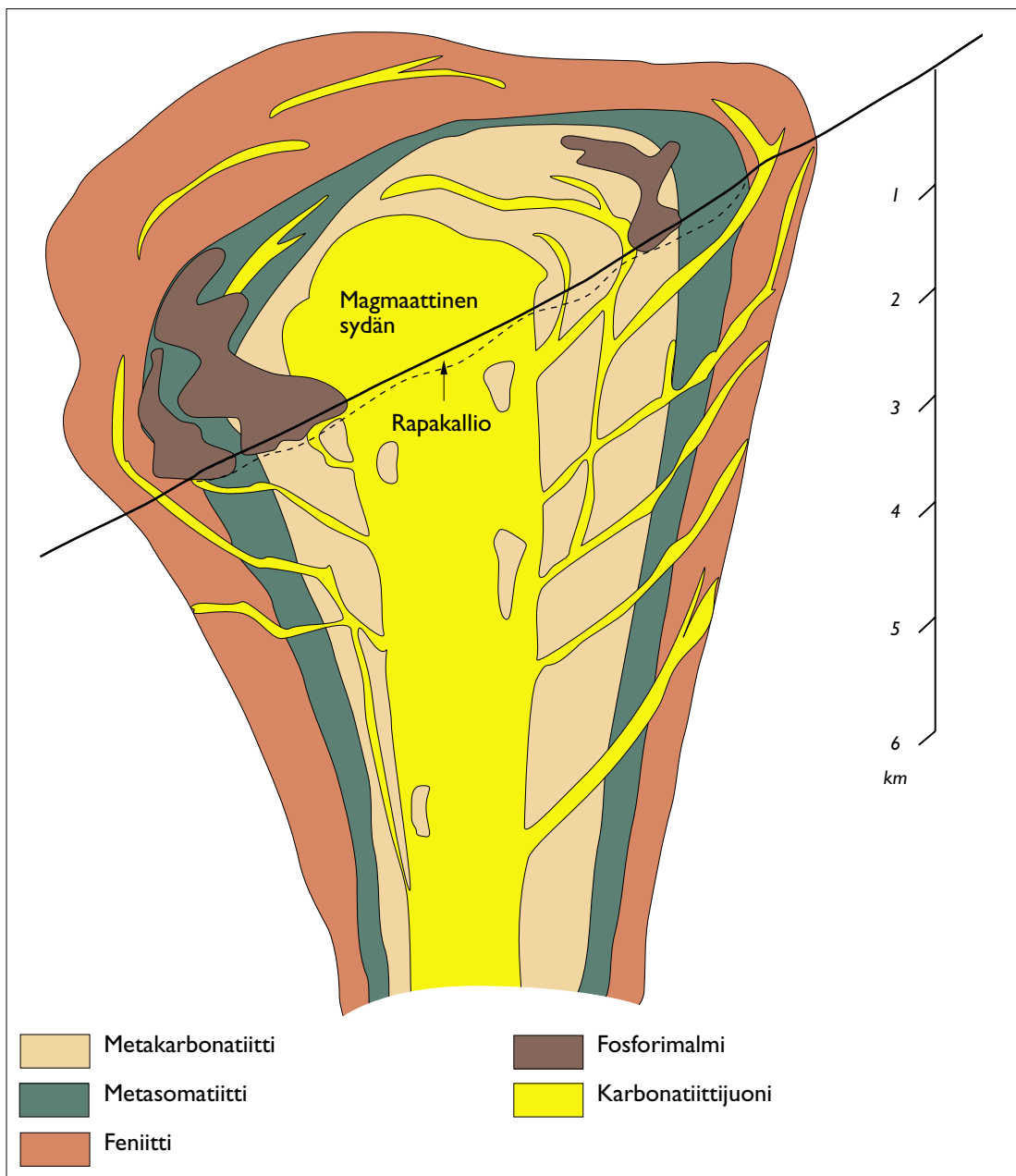
Soklin magmaattiset karbonaattit ovat verraten lähellä karbonaattien keskiarvoa. Suomen karbonaattit voidaan ryhmitellä niobiumpitoisuuksien perusteella. Soklin magmaattiset karbonaattit erottuvat todella korkean niobiumpitoisuutensa (1 525 ppm) perusteella Soklin metasomaattisista (60 ppm) ja toisista Suomen karbonaateista (esim. Siilinjärvi 50 ppm, Laivajoki ja Kortejärvi 14 ppm). Onkin mahdollista, että tällaisten vähän niobiumia sisältävien karbonaattien muodostuessa metasomaattiset ja metamorfiset prosessit ovat olleet vaikuttamassa ja muovaamassa myös kiven lopullista kemiallista koostumusta.

## Mineraalikoostumus

Karbonaattit ovat tarjonneet mineralogeille kiehtovan tutkimuskohteen, sillä maailman



**Kuva 10.1.** Suomen alkalikiviesiintymät ja Kuolan alkalikiviprovinssi.



**Kuva 10.2.** Soklin karbonaattikompleksin rakenne (maanpinta- ja pystyleikkaus) ja kivilajit.

karbonaateista on löydetty kaikkiaan noin 300 eri mineraalia (mineraalispesiestä). Edellytykset tähän johtuvat siitä, että karbonaattimagmaat ovat syntyneet syvällä ja rikastuneet haihtuvista aineksista. Magmaat ovat myös kiteytyneet monivaiheisesti ja

eri syvyystasoilla, ja syntyneisiin karbonaattiteihin ovat vaikuttaneet metasomaattiset ja metamorfiset tapahtumat sekä rapautuminen.

Suomalaiset karbonaatiitit edustavat varsin syvälle kulunutta eroosiotasoa ja Soklia

**Taulukko 10.1.** Soklin magmaattisten karbonatiittien petrografiset piirteet.

Magmaattinen vaihe	Kivilaji	Tyypilliset mineraalit	Rakenne
I	Foskoriitti	Oliiviini, flogopiitti, magnetiitti, kalsiitti, apatiitti, U-Ta-pyrokloori, baddeleyiitti	Massamainen, karkearakeinen
II	Kalsiitti-karbonatiitteja	Kalsiitti, flogopiitti, oliiviini, magnetiitti U-pyrokloori, baddeleyiitti	Massamainen, keski- tai karkearakeinen
III*	Muuttuneita foskoriitteja	Tetraferroflogopiitti, klinohumiitti, richteriitti, iddingsiitti, oliiviini, magnetiitti, apatiitti, sulfidit, Th-pyrokloori, zirkoni	Massamainen, keski- tai karkearakeinen
IV	Kalsiitti- ja dolomiitti-karbonatiitteja	Dolomiitti, kalsiitti, tetraferroflogopiitti, richteriitti, apatiitti, magneetikiisu, Th-pyrokloori, zirkoni	Suuntautunut, raitainen, pieni- tai keskirakeinen
V	Dolomiittisia myöhäisjuonia	Dolomiitti, barytokalsiitti, sulfidit, hematiitti, ankyliitti	Massamainen, osaksi onteloinen, keski- tai karkerakeinen

\* = pneumatolyttis-hydroterminen vaihe

lukuunottamatta niiden mineraalikoostumus on jokseenkin yksinkertainen. Suomen karbonatiiteista on tunnistettu yhteensä 65 mineraalia: Soklista 56, Siilinjärveltä 18, Laivajoelta ja Kortejärveltä 20 ja Halpasta 5. Sokli monivaiheisesti syntyneenä ja monenlaiset muutosprosessit kokeneena sisältää siis runsaimmin erilaisia mineraaleja. Kun lasketaan mukaan kaikki Suomen karbonatiittien kivilajimuunnokset, esiintyy niissä vain 15 päämineraalia: kalsiitti, dolomiitti, barytokalsiitti, apatiitti, magnetiitti, magneetikiisu, oliiviini, klinohumiitti, diopsidi, egiriini, richteriitti, eckermannniitti, biotiitti, flogopiitti ja tetraferroflogopiitti. Lisäksi tavataan runsaasti oliiviinin muuttumistuloksena syntyneitä iddingsiittejä, joka ei ole varsinainen mineraali vaan mineraaliseos. Kaikki muut mineraalit ovat aksessorisia tai harvinaisuuksia.

Erikoisen kokonaisuuden muodostaa Soklin rapakallio ja siihen liittyvä *regoliittinen* (rapautumisen ja rikastumisen tuloksena syntyneet) fosformalmikerrostuma. Rapakalliossa ovat päämineraaleina kalsiitti,

dolomiitti, flogopiitti, vermikuliitti, iddingsiitti, klinohumiitti, richteriitti ja magnetiitti, regoliitissa hydrokiille, goethiitti, apatiitti ja francoliitti (karbonaatti-fluoriapatiitti).

## 10.2. Suomen karbonatiitti-esiintymät

### Sokli

Soklin karbonatiittikompleksi (*Kuvat 10.1 ja 10.2*) löytyi v. 1967 Rautaruukki Oy:n etsiessä malmia Kovdorin alkalikivikompleksiin liittyvän suuren rautamalmin suomenpuoleiselta alueelta. Soklin mittasuhteiden paljastuttua (kokonaispinta-ala n. 50 neliökilometriä!) ja sen osoittauduttua malmigeologisesti monipuoliseksi arvioitiin alusta pitäen tutkimusten tulevan vaatimaan pitkän ajan (Vartiainen ja Paarma 1979). Kaikkiaan Soklia on tutkittu geologisesti, malminetsinnällisesti ja teknologisesti yli 20

vuotta. Näin siitä onkin tullut yksi maailman parhaiten tunnetuista karbonaattikomplekseista (Vartiainen 1980).

*Rakenne.* Yli kuuden kilometrin syvyyteen ulottuvien seismisin luotauksin on voitu osoittaa (Paarma ym. 1981), että kompleksin on poikkileikkaukseltaan alaspäin kapeneva sienimäinen muodostuma, jonka keskeltä erottuu selvästi magmaattisten karbonaattien tappimainen sydän (*Kuva 10.2*). Kompleksin muut osat ovat toisikseen vaihtuvien metakarbonaattien ja metasomatiittien (syrjäytymällä ja/tai korvautumalla syntyneiden kivilajien) muodostumia. Nämä kolme osaa muodostavat yhdessä varsinaisen karbonaatti-intruusion. Sitä ympäröi epätavallisen laaja, pohjan kivilajeista metasomaattisesti syntynyt feniittikehä. (*Kuva 10.2*).

Jäänjakajaseudulla sijaitsevana ovat Sokli-kompleksin rapakallio ja siihen liittyvä regoliittinen fosforimalmi säilyneet verraten hyvin mannerjään kuluttavalta vaikutukselta. Näin on Soklin rakennepiirteisiin syntynyt erikoinen lisäelementti (*Kuva 10.2*).

*Kivilajit.* Soklin magmaattisten karbonaattien petrografiset piirteet on kuvattu *Taulukossa 10.1*. Vaiheisuus (vaihtuminen) on voitu dokumentoida sekä kairsydämistä että esiinkaivetuista kalliopaljastumista.

Magmaattiset karbonaattit ovat syntyneet sydänosaan viidessä päävaiheessa (*Taulukko 10.1*). Eri vaiheiden kivilajimuunnokset erottuvat toisistaan petrografisesti, mineralogisesti ja kemiallisesti. Vallitsevina ovat toisen ja neljännen vaiheen karbonaattit. Erikoisinta kivilajiryhmää edustavat myöhäisen vaiheen juonet (Vartiainen ja Vitikka 1993), joiden mineraloginen tutkimus tulee näytämäärän täydentyessä lisäämään tunnistettujen mineraalien lukumäärää.

Metakarbonaattit ovat muodostuneet karbonaattituumisprosessin tuloksena koko Sokli-kompleksin alkuperäisimmistä kivilajeista eli pyrokseeniiteista ja karkearakeisista

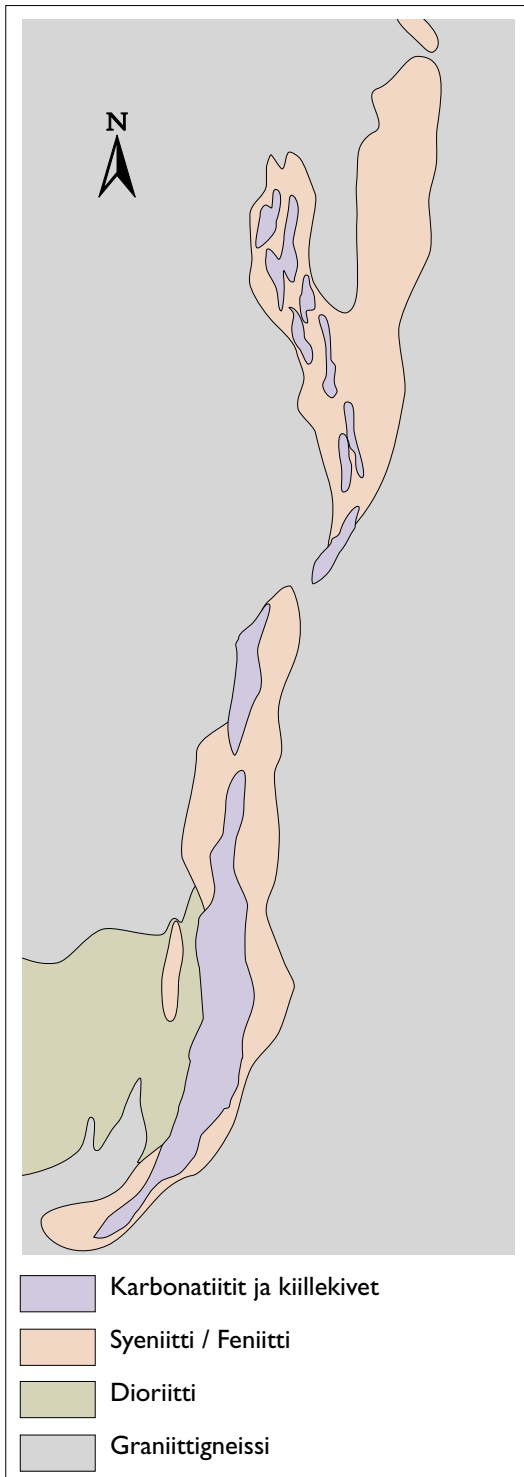
magneitti-duniiteista. Lievästi karbonaattituumuneet muunnokset ovat massamaisia ja voimakkaasti karbonaattituumuneet yleensä raitaisia.

Metasomatiitit ovat syntyneet alkuperäisen ultramafisen intruusion kivilajeista monimutkaisten syrjäytymis- ja korvautumisprosessien kautta siten, että lopputuloksena on syntynyt lähes pelkkää flogopiittikiveä. Välimuotoina esiintyy mitä moninaisempia kivilajimuunnoksia, jotka sisältävät päämineraaleina amfioleja ja alkali-amfioleja, egiriiniä ja flogopiittia vaihtelevissa määrin.

Feniitti on pohjan kivilajeista lähinnä natriumin lisääntymisen (natrium-metasomatoosin) ja kvartsin syrjäytymisen kautta syntynyt kivilaji, joka kiertää kehämäisesti karbonaatti-intruusiota (Vartiainen ja Woolley 1976). Alkali-amfibolit (arfvedsoniitti ja eckermanniitti) antavat muuten vaalealle kivilajille tyypillisen vihreän vivahteen, josta feniitti on helposti tunnettavissa. Feniittiytymisprosessi voimistuu äärialueelta kohden karbonaatti-intruusiota. Lopulliset feniitit Soklilla koostuvat alkalimaasälvistä, magnesio-arfvedsoniitista, eckermanniitista, egiriinistä ja flogopiitista. Kemiallisesti muutoksessa on oleellista voimakas natriumin lisäys ja kolmearvoisen raudan (ferriraudan) määrän kasvu. Samalla gneissigraniitin muuttumiseen liittyy piin ja amfiboliitin feniittiytymiseen kalsiumin määrän voimakas väheneminen.

*Juonikivilajit.* Paitsi myöhäisiä juonia, jotka edustavat Soklissa viidettä magmaattista vaihetta, on lähinnä neljännessä vaiheessa syntynyt kalsiittisia ja dolomiittisia, pieni- tai keskirakeisia karbonaattijuonia. Feniittiaureolin (-kehän) alueella esiintyy jokaisen magmaattisen karbonaatti-intruusiovaiheen tuottamia rengasrakenteisia juonia, jotka saattavat olla useiden metrien levyisiä (*Kuva 10.2*). Kaikkialla kompleksin alueella ja sen ulkopuolellakin tavataan useiden kilometrien etäisyydellä lampro-





**Kuva 10.3.** Siilinjärven karbonatiittikompleksin geologinen kartta. Esiintymän pituus on pohjois-eteläsuunnassa n. 16 km.

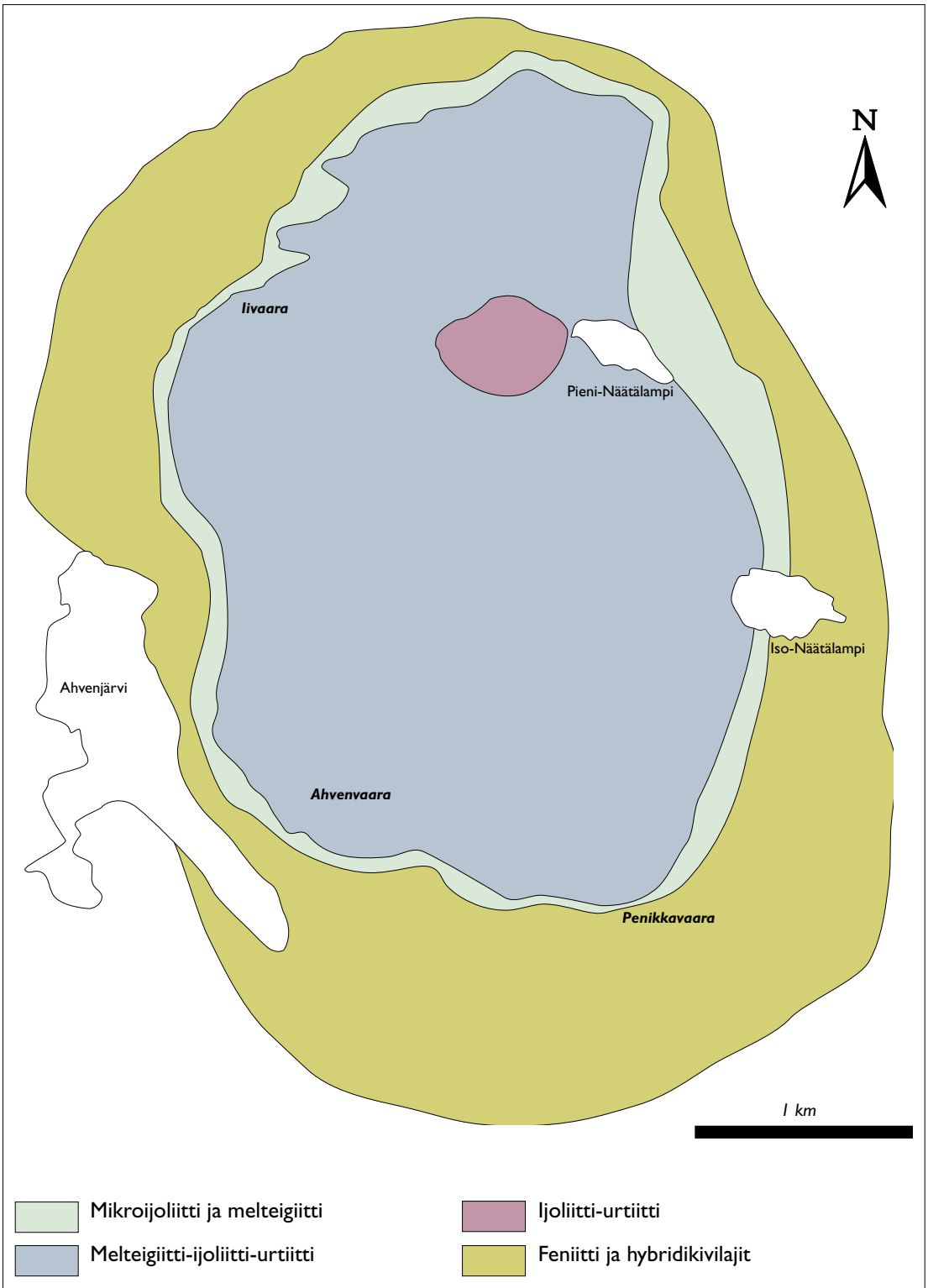
fyysijuoonia (ks. kohta 10.4. Lamprofyriset juonikivilajit).

*Rapakallio ja regoliitti.* Koko Soklin karbonatiittia peittää vaihtelevan paksuinen rapakallio. Rapautumiseen liittyvät tärkeimmät mineralogiset muutokset ovat karbonaattimineraalien osittainen liukeneminen, flogopiitin muuttuminen paikoin vermikuliitiksi, oliviinin voimakas muuttuminen, magnetiitin osittainen muuttuminen hematitiiksi (martiittiutumisen), pyrokloorirakeiden uuttuminen ja sulfidien täydellinen häviäminen.

Regoliitti eli fosforimalmi on syntynyt primäärikivestä tai rapakalliosta trooppisissa olosuhteissa (Suomi oli n. 400 miljoonaa vuotta sitten päiväntasaajalla!) monimutkaisten rapautumis-, liukenemis-, uudelleenkiteytymis- ja kivetymisprosessien kautta (Nuutilainen 1973). Lopputuloksena on punaruskea, keskipaksuudeltaan 26 m vahva kerrostuma. Sen muodoltaan erilaiset osat voivat vaihdella multamaisen pehmeistä kovaan kiveen. Karbonaatit ovat lienneet niistä kokonaan. Jäännösmineraaleina esiintyvät apatiitti, magnetiitti, hydratunut kiille ja repaleinen pyrokloori. Uudelleenkiteytymisen tuloksena on syntynyt francoliittia (karbonaatti-fluoriapatiittia), goethiittia ja mangaanioksiedeja (Vartiainen ym. 1990). Samalla fosforipitoisuus ( $P_2O_5$ -oksidina ilmaistuna) on noussut alkuperäisestä 4 - 5 %:sta ( $P_2O_5$ ) parhaimmillaan 30 %:iin.

### Siilinjärvi

Siilinjärven karbonatiittikompleksi on ensimmäinen Suomesta löydetty karbonatiitti. Se löytyi 1950-luvun alussa lähetetyn kansannäytteen avulla. Kairauksiin perustuvat tutkimukset alkoivat 1959 ja fosforimalmin hyväksikäyttöön tähtäävät ja kaivoksen avaamiseen johtaneet selvitykset suoritettiin 1970-luvulla. Koska Siilinjärven karbonatiittikompleksi on geologisesti varsin yksinkertainen (Puustinen 1971), ei siihen ole



**Kuva 10.4.** livaaran alkalikivi-intruusion geologinen kartta.

kohdistunut niin monipuolisia tutkimuksia kuin Sokliin.

*Rakenne.* Siilinjärven karbonaattikompleksi on lähes pystyasentoinen, pohjoisosastaan pirstoutunut linssimäinen muodostuma, jolla on pituutta kaikkiaan 16 km ja leveyttä suurimmillaan 1,5 km (*Kuva 10.3*). Sen pinta-ala on 14,7 km<sup>2</sup>.

*Kivilajit.* Kompleksin keskeisen osan täyttävät glimmeriitti-karbonaattimuunnokset, jotka mineralogisesti käsittävät sarjan lähes puhtaasta kiillekivestä (glimmeriitistä) lisääntyvän karbonaattimäärän myötä puhtaaseen kalsiittikarbonaattiin eli sarjan glimmeriitti - karbonaatti-glimmeriitti - silikokarbonaatti - kalsiittikarbonaatti. Tyypillisimmillään Siilinjärven karbonaatti on raitaista, valkoisen-vihreänkirjavaa ja keskirakeista kiveä. Petrografisesti ja kemiallisesti se muistuttaa Soklin meta-silikokarbonaattia. Fosforimalmina louhittavan glimmeriitti-karbonaattikiven keskimääräinen apatiittipitoisuus on noin 10 %. Kaivoksen vuosilouhinta on noin 10 miljoonaa tonnia.

Siilinjärvellä karbonaattikiveä ympäröivä gneissigraniitti on feniittiytynyt samaan tapaan kuin Soklilla.

### Kortejärvi ja Laivajoki

Koillismaahan karbonaattit Kortejärvi ja Laivajoki (*Kuva 10.1*) löytyivät Rautaruukki Oy:n malminetsinnän tuloksena v. 1961. Molemmat esiintymät ovat linssimäisiä ja lähes pystyasentoisia. Harvan kairauksen ja magneettisten anomalioiden perusteella Kortejärven esiintymä on noin 60 m paksu ja 2 km pitkä, Laivajoki noin 20 m paksu ja 4 km pitkä (Nykänen 1993). Molemmissa esiintymissä on kalsiittikarbonaattia ja dolomiittikarbonaattia. Laivajoella on myös silikokarbonaattia ja Kortejärvellä glimmeriittiä sekä oliviini-magneittikiveä.

Kalsiitti- ja dolomiittikarbonaattiteihin

liittyy kaksikarbonaattisia muunnoksia. Esiintymien kivilajit ovat massiivisia tai raitaisia, yleensä pieni- tai keskirakeisia. Molemmat karbonaattit esiintyvät amfiboliitissa, mutta kummarkaan ympäristössä ei näy amfiboliitin feniittiytymistä.

### Halpanen

Myös pienen Halpasen muodostuman tunnisti Rautaruukki Oy:n malminetsintä karbonaattiksi. Ensimmäisenä muodostuman kuvasi Kauko Puustinen 1986. Kapea, loiva-asentoinen (kaade 30 - 35°), juonimainen muodostuma on geofysikaalisten mittauksen mukaan 1 500 m pitkä. Juoni koostuu pienirakeisesta, massiivisesta tai heikosti raitaisesta kalsiittikarbonaattista, jossa on satunnaisesti jopa 10 cm leveitä apatiitista rikkaita raitoja.

## 10.3. Silikaattiset alkalikivet

Suomen silikaattiset alkalikivet ovat lukumäärältään ja mittasuhteiltaan vähäisiä sekä kivilaji-, mineraali- ja kemialliselta koostumukseltaan yksinkertaisia verrattuina vastaaviin muodostumiin, joita on Fennoskandian kilven itäisimmällä osalla Kuolan ja Karjalan alueilla.

### Iivaaran alkalikivi-intruusio

Kuusamon kunnassa sijaitseva Iivaaran alkalikivi-intruusio (*Kuva 10.1*) on kiinnostanut geologeja jo lähes 150 vuoden ajan. Monet suomalaiset ja ulkomaiset geologit ovat tehneet tutkimuksia Iivaaralla. Maailmanlaajuisesti Iivaaralla on nimistöllistä merkitystä, sillä ijoliitti, yksi yleisimpiä silikaattisia alkalikiviä, on nimetty ja tyypitetty Iivaaran mukaan (Ramsay ja Berghell 1891, Hackman 1899).

**Taulukko 10.2.** Iivaaran alkalikivi-intruusion pääkivilajien mineraalikoostumukset.

Mineraalikoostumus	Granodioriitti 1)	Feniitti 1)	Melteigiitti 1)	Ijoliitti 1)	Mikroijoliitti 2)	Urstiitti 2)
Maasälpä	60,1	-	-	-	-	-
Nefeliini	-	80,6	33,9	57,1	38	75
Egiriiniaugiitti	-	16,4	52,4	38,8	55	20
Kankriniitti	-	2,1	5,9	2,2	+	< 5
Apatiitti	-	-	5,8	+	5	< 5
Titaniitti	-	0,8	1,4	+	+	< 1
Kvartsi	34	-	-	1	-	-

1) = Lehijärvi (1960) 2) = Makkonen (1995)

Iivaaran alkalikivikompleksi on muodoltaan soikea ja pinta-alaltaan noin 8,8 km<sup>2</sup> (Kuva 10.4). Viimeisimmät iänmääritykset antavat Iivaaran iäksi 373 - 363 miljoonaa vuotta (Doig 1970, Kramm ym. 1993). Paljastumien lisäksi tietoa kompleksista on saatu yhdeksästä syväkairausreiästä. Iivaaran alue on kuitenkin suurelta osin peitteistä, eikä kompleksin rakennetta ja kivilajisuhteita tunneta vielä riittävästi.

Feniittikehä on leveimmillään kilometrin laajuinen. Paitsi tyypillistä feniittiä kehä sisältää muitakin sekoittumalla syntyneitä (hybridisiä) kivilajimuunnoksia. Kompleksin keskustaan mentäessä feniittiä seuraa (Kuva 10.4) mikroijoliitti-melteigiittivyöhyke, jonka leveys on 50 - 100 m. Kompleksin sisäosa koostuu melteigiitti-ijoliitti-urstiitti-sarjan kivistä, joista ijoliitti on vallitsevin (n. 85 %). Kivilajien katsotaan syntyneen edellä luetellussa järjestyksessä metasomaattisesti (feniitti) ja magmaattisesti (muut kivilajit).

Iivaaran pääkivilajien mineraalikoostumukset on esitetty Taulukossa 10.2. Alkalikiville tyypillisesti - feniittiä lukuunottamatta - kompleksin kivilajit eivät sisällä maasälpää. Sarjan melteigiitti - ijoliitti - urstiitti mukaisesti nefeliinin määrä kasvaa ja egiriiniaugiitin määrä vähenee samalla, kun kiven väri vaaleenee. Muiden mineraalien eli kankriniitin, apatiitin ja titaniitin määrät vaihtelevat. Tyypillistä on kivilajien heterogeenisuus ja

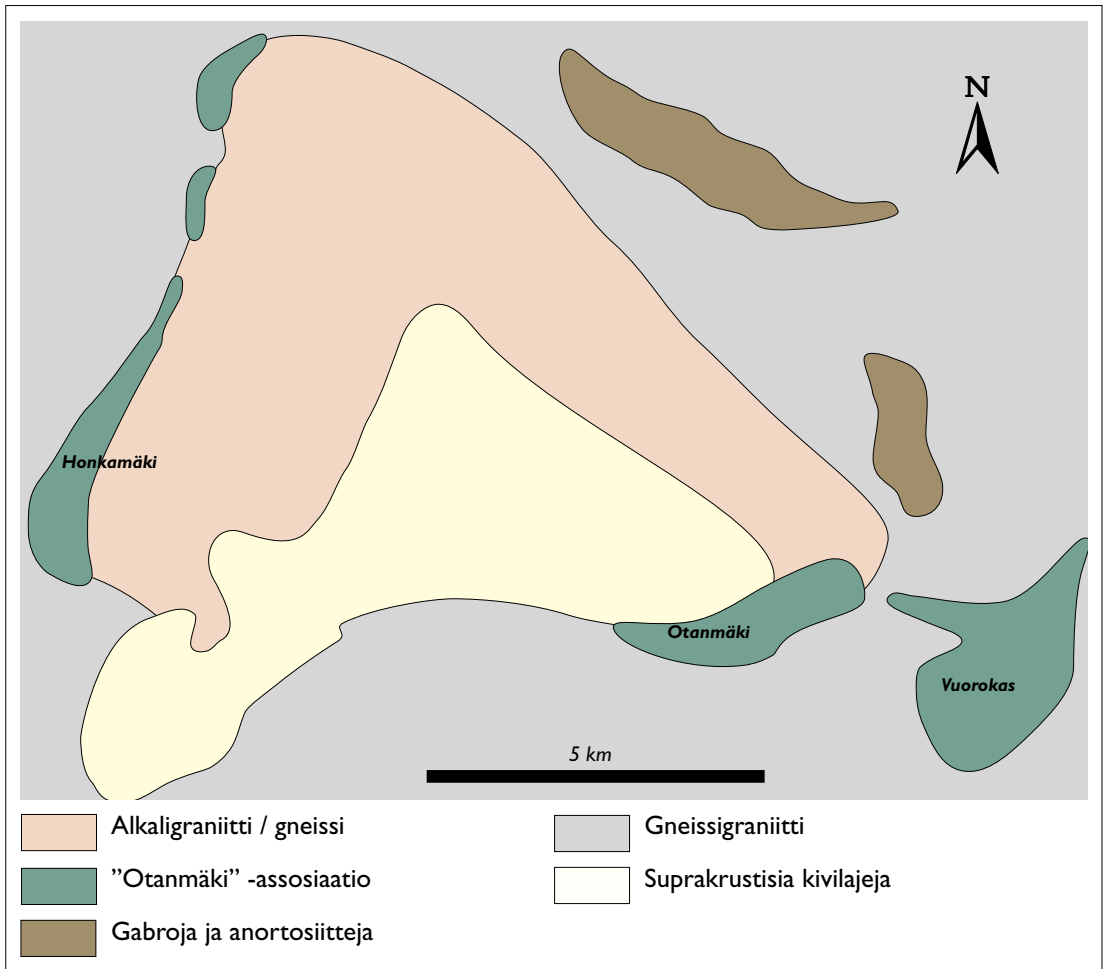
kivilajisuhteiden epämääräisyys.

Iivaaran mineraloginen erikoisuus on titaanirikas granaatti, jonka Nils Nordenskiöld risti iivaariitiksi (Nordenskiöld 1852, 1855). Korkean titaanipitoisuuden (TiO<sub>2</sub> noin 15 %) vuoksi se näyttää mikroskoopissakin lähes mustalta. Kaikkiaan on Iivaaralta tähän mennessä tunnistettu 21 mineraalia.

Kemiallisen koostumuksensa perusteella alkalikiviä kutsutaan alikyllästetyiksi piidioksidin eli SiO<sub>2</sub>:n suhteen. Esimerkiksi Iivaaran alkalikivien SiO<sub>2</sub>-pitoisuus on 40 - 46 %, kun esim. granodioriitilla se on noin 70 %. Muita Iivaaran ijoliitille tyypillisiä piirteitä ovat korkea natrium-, titaani- ja rautapitoisuus, kun niitä verrataan esimerkiksi granodioriitin vastaaviin pitoisuuksiin.

### Otanmäen alkaligraniitti

Otanmäen titaani-vanadiini-rautamuodostuman luoteispuolelle (Kuva 10.5) sijoittuu muodoltaan koukkumainen graniitti-muodostuma, joka täyttää alkalikivelle asetetun vaatimuksen eli sisältää alkalimineraaleja kuten alkaliambibolia ja egiriiniä. Myös kiven kemiallinen koostumus osoittaa sen alkalisuuden: SiO<sub>2</sub> = 64 - 75 %, (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) = 7,7 - 10,8 % (Marmo ym. 1966). Zirkonista on uraani-lyijymenetelmällä määritetty kiven iäksi 2 050 miljoonaa vuotta (Marmo ym. 1966).



**Kuva 10.5.** Otanmäen alueen geologinen kartta.

Toistaiseksi tätä kiveä on tutkittu vain vähän. Marmo ym. (1966) puhuu epähomogeenisesta alkalisesta graniitista, joka on punertavaa pieni- ja keskirakeista. Lindholm ja Anttonen (1980) mukaan kivi on erittäin heterogeeninen alkaligneissi, jolla on metasomaattisia piirteitä.

Mielenkiintoiseksi Otanmäen alkaligraniitin tai -gneissin tekevät sen hivenainepitoisuudet ja tämän johdosta graniiteille epätavallisten mineraalien esiintyminen (Marmo ym. 1966, Lindholm ja Anttonen 1980). Tällaisia graniiteissa harvinaisia mineraaleja on Otanmäen kivistä tunnistettu mm. bastnäsiitti, kolumbiitti, toriitti, dana-

liitti ja enigmatiitti.

Otanmäen alkaligraniitti tai -gneissi on sekä petrologisesti että malmimahdollisuuksiltaan niin mielenkiintoinen, että se ansaitsee tulla aikaisempaa perusteellisemmin tutkituksi.

### Suomenniemen alkalimaasälpäsyeniitti

Suomenniemen rapakivigraniittibatoliitti on ns. subalkalinen eli siinä ei esiinny muita alkalimineraaleja kuin maasälpää. Sen sijaan batoliittia leikkaavat alkalimaasälpäsyeniittiset juonikivilajit edustavat varsinaista alkalikiveä. Kaikkiaan täältä tunnetaan 16

juonta, joiden paksuus on muutamia metrejä (Rämö 1991, s. 20). Alkalimaasälpäsyeniitti vaihtelee väriltään violetista punertavaan. Päämineraaleina siinä esiintyvät egiriini-augiitti, kalimaasälpä ja albiitti sekä aksessorisesti alkaliamboli, titaniitti, kvartsi, melaniittinen granaatti, zirkoni ja opaakki (Rämö 1991).

Rämön (1991, s. 133) mukaan alkalimaasälpäsyeniittijuonet, jotka edustavat Suomessa uutta rapakivigraniitteihin liittyvää kivilajityyppiä, kuuluvat Suomenniemen kompleksin erilliseen myöhäiseen intruusiivaiheeseen.

## 10.4. Lamprofyriset juonikivilajit

Kimberliittien paljastuttua Etelä-Afrikassa runsaat 100 vuotta sitten timanttien isäntäkiveksi on näihin kivilajeihin kohdistunut tutkimus ollut voimakasta. Kun lisäksi Argyle, maailman suurin timanttilöydös Australiassa osoittautui v. 1979 liittyvän lamproiittiseen kiveen, käynnistyi lamproiittien ja myös lamprofyreihin lähes ryntäksenomainen tutkimus. Tieto Suomesta löydetystä timanttipitoisista kimberliiteistä on herättänyt mielenkiinnon kyseisiin kivilajeihin myös suomalaisessa geologikunnassa.

### Luokittelu ja nimistö

Vuosikymmenien aikana on keskusteltu laajasti lamprofyrien, lamproiittien ja kimberliittien synnystä ja keskinäisistä geologisista suhteista. Rock ym. (1991) tekivät perusteellisen tutkimuksen lamprofyreistä ja samalla antoivat selvityksen systemaattisesta luokitteluksesta. Heidän lähtökohtansa asiassa on, että nämä kivilajit muodostavat yhteisön, lamprofyrisen klaanin eli suvun. Se jakautuu viiteen sukuhaaraan, joihin suoraan tai kivilajiperheeseen jakautuneena johdetaan hyväksytyt kivilajinimet. Aikojen kuluessa

lamprofyriseen kivilajinimistöön on liitetty lähes 60 nimeä. Näistä nimistä Rock ym. (1991) hyväksyivät luokitteluunsa vajaa puolet (katso myös Woolley ym. 1996).

Lamprofyrisen suvun kivilajien sukuhaaroja ovat varsinaisten lamprofyrien lisäksi lamproiitit ja kimberliitit. *Lamprofyrit* ovat tummia juonikivilajeja, joihin ovat rikastuneet helposti haihtuvat ainekset (volatiilit) ja muun muassa kalium, rubidium ja barium. Mineraalikoostumuksensa perusteella ne voidaan jakaa kolmeen alaryhmään (sukuhaaraan): kalkkialkaliset lamprofyrit, alkalilamprofyrit ja ultramafiset lamprofyrit (*Kuva 10.6*).

*Kimberliitti* on ultraemäksinen kaliumrikas kivilaji, joka sisältää runsaasti helposti haihtuvia aineksia. Sen rakenteelle on tyypillistä isojen kiteitten esiintyminen pienirakeisessa perusmassassa. Tyypillisiä mineraaleja ovat magnesiumipitoinen ilmeniitti, kromipitoinen titaaniopyrooppi (granaatti), forsteriittinen oliviini, kromipitoinen pyrokseeni, flogopiitti, enstatiitti ja titaaniipitoinen kromiitti.

*Lamproiitti* on intermediäärinen tai ultraemäksinen kivilaji, jonka magnesium- ja kaliumpitoisuudet ovat poikkeuksellisen korkeita jopa niin, että  $K_2O/Na_2O > 4$  ja  $K_2O/Al_2O_3 > 0,8$ . Tyypillisiä mineraaleja ovat flogopiitti, diopsidi, forsteriittinen oliviini, alkaliambolit, bariumista ja raudasta rikas sanidiini, analsiimi, leusiitti, perovskiitti ja spinelli sekä hyvin harvinaiset indikaattorimineraalit prideriitti, jeppeitti, shtsherbakoviitti ja wadeiitti.

### Esiintymistapa

Tyypilliset lamprofyriklaanin kivilajit esiintyvät subvulkanisina juonina, kerrosjuonina (eli silleinä), pahkuina, piippuina ja tulokanavina (*Kuva 10.7*). Intrusiivi- ja räjähdysbreksiarakenteet ovat yleisiä. Yksittäisten esiintymien pinta-alat ovat vaatimatonta, mutta alueelliset piippurykelmät ja

juoniparvistot saattavat sisältää satoja jopa tuhansia yksittäisiä esiintymiä. Juonille on tyypillistä voimakas intrusiivinen luonne kuten juonien haarauneisuus ja jakautuminen osiin sekä raitainen tai vyöhykkeinen rakenne. Laavat ja muista tulivuoren purkaustuotteista syntyneet kivet ovat harvinaisia.

*Kuvassa 10.7* on havainnollistettu erot kimberliitti- ja lamproiittiipiippusysteemien välillä. Kimberliittiipiiput ovat pystyleikkaukseltaan porkkanamaisia ja lamproiittiipiiput shampanjalasimaisia. Lamproiittisysteemissä kraateriaine on vallalla ja niissä on paksu kontaktibreksia.

### Rakenne ja mineraalikoostumus

Lamprofyyriset kivilajit ovat rakenteeltaan porfyryisiä, väriltään tummia harmaan ja vihreän eri vivahtein. Maasälpä ja kvartsi eivät esiinny hajarakeina, kun taas oliiviini on harvoin perusmassan mineraalina. Hajarakeet voivat olla kantikkaita, puolipyöreitä tai pyöreitä sekä reaktiosauaman ympäröimiä. Lamprofyyreille on luonteenomaista vaaleitten, joskus vain mikrooppisesti erotettavien nystyröiden esiintyminen. Ne ovat koostumukseltaan usein karbonaattisia, analsiimisia, syeniittisiä tai koostuvat kloriitista, serpentiinistä, epidootista ja kvartsista.

Erot lamprofyyrisuvun kivilajijaarojen mineraalikoostumuksissa ilmenevät *Kuvasta 10.6*. Mineraalikoostumuksista käy selville, kuinka timanttikriittiset kivilajit kimberliitti ja lamproiitti ovat mineraalikoostumukseltaan lähempänä toisiaan kuin varsinaiset lamprofyyrit. Tämä näkyy oliiviinin esiintymisenä perusmassassa, perovskiitin läsnäolona ja plagioklaasin ja pyrokseenin puuttumisena. Lisäksi kimberliitti erottuu omaksi kivilajiksi mineraalikoostumuksensa perusteella.

Koska lamprofyyriset kivilajit sisältävät sekä korkean että matalan paineen mine-

raaleja ja koska niiden kantamagmat ovat sisältäneet paljon helposti haihtuvia aineksia ja ilmeisesti myös vieraita kivilajikappaleita (ksenoliitteja), on mineraalien määrä suuri ja mineraalikemialliset koostumusvaihtelut todella huomattavia. Jo viisi vuotta sitten suvun eri mineraaleista oli käytettävissä yli 5 000 analyysiä, joka sekin kuvaa näihin kivilajeihin kohdistuvan tutkimuksen määrää.

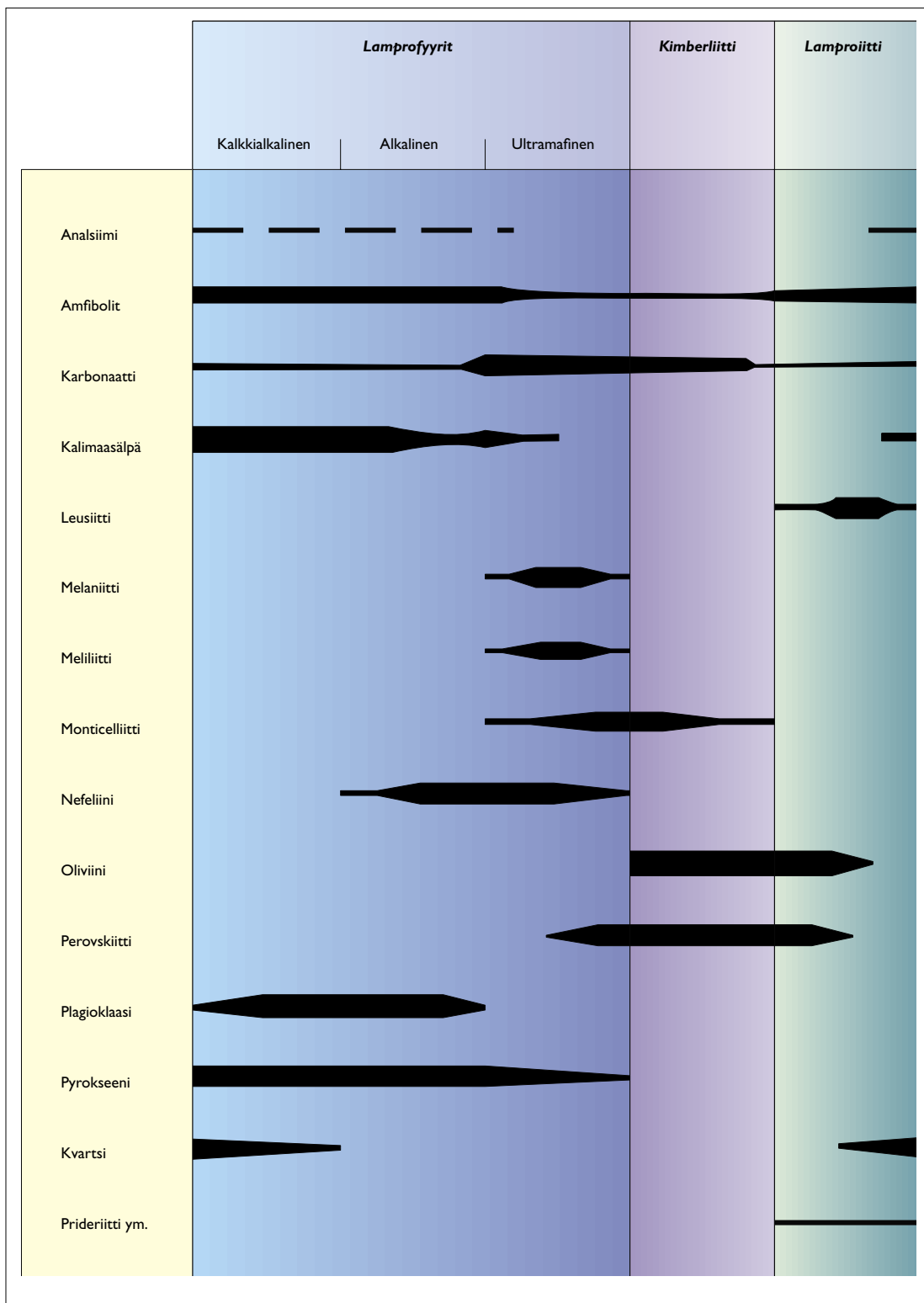
### Sulkeumat

Lamprofyyreille ovat luonteenomaisia niiden omasta magmaattisesta systeemistä irronneet ja vierasperäiset sulkeumat ja kappaleet, siis kide- ja kivilajifragmentit, jotka ovat isäntäkiven raekokoa karkeampia tai suurempia. Yleensä sulkeumien määrä on joitakin kymmeniä prosentteja, äärimmäisissä tapauksissa jopa 70 - 80 %. Sulkeumia tutkimalla saadaan lisätietoa mm. lamprofyyrien synnystä ja alkuperästä, onhan sulkeumina tavattu myös eri-ikäisiä Maan vaipasta peräisin olevia kappaleita, *noduleja*.

### Kemiallinen koostumus

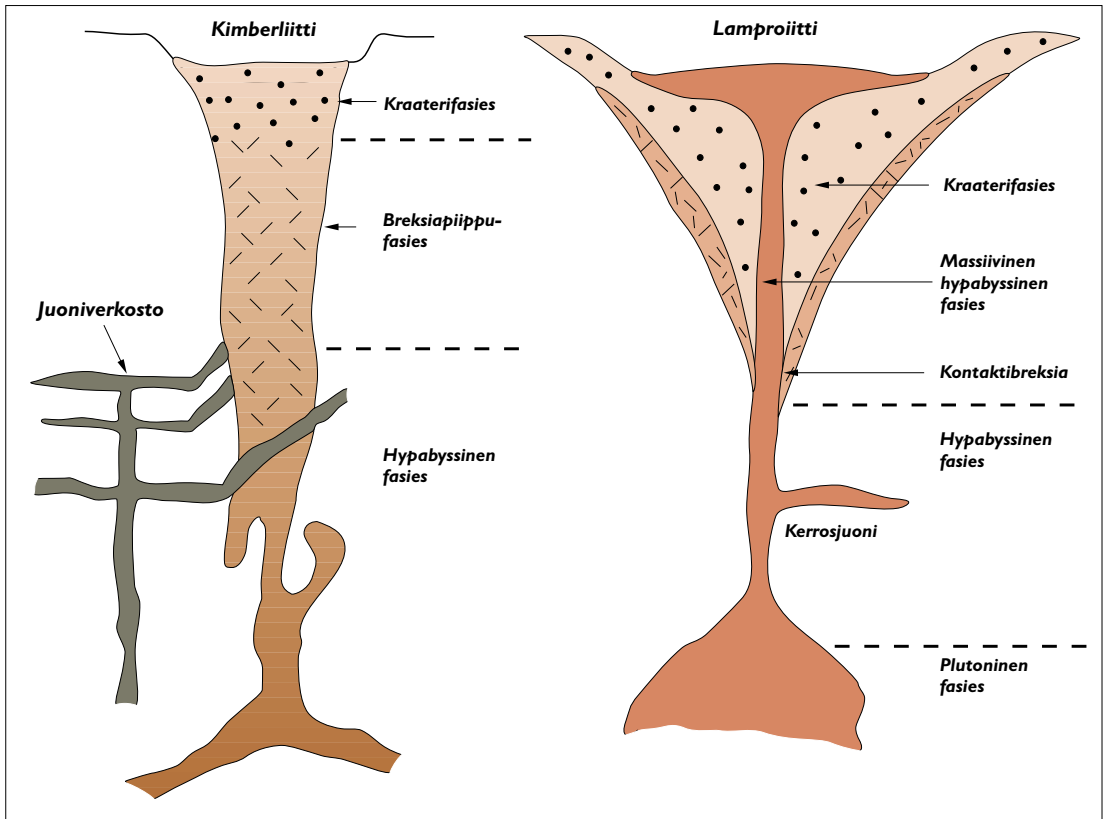
Koska lamprofyyrit ovat laaja kivilajisuku, koostumusvaihtelut ovat liukuvia siirryttäessä lamprofyyrien sukuhaarasta toiseen. Tämä on hyvin nähtävissä mm. (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)/SiO<sub>2</sub>-diagrammissa (*Kuva 10.8*). Lähes kaikki lamprofyyrit, muutamia kalkkialkalisia ja alkalilamprofyyrejä lukuunottamatta, sijoittuvat alkaliseen kenttään.

Hivenaineiden osalta voidaan todeta, että koko lamprofyyrien kivilajisukua luonnehtivat kaikille alkalikiville tyypillisesti korkeat kaliumin, rubidiumin, strontiumin, bariumin jne. pitoisuudet, mutta skandium, titaani, yttrium ja kevyet lantanoidit ovat lähempänä basalttien tasoa. Hivenaineiden käyttö ei lamprofyyrien keskinäisessä luokittelussa ole yhtä luotettavaa kuin pääal-kuaineiden käyttö.



**Kuva 10.6.** Lamprofyyrusten kivilajien luokittelu tärkeimpien tyypimineraalien avulla (Rock ym. 1991).





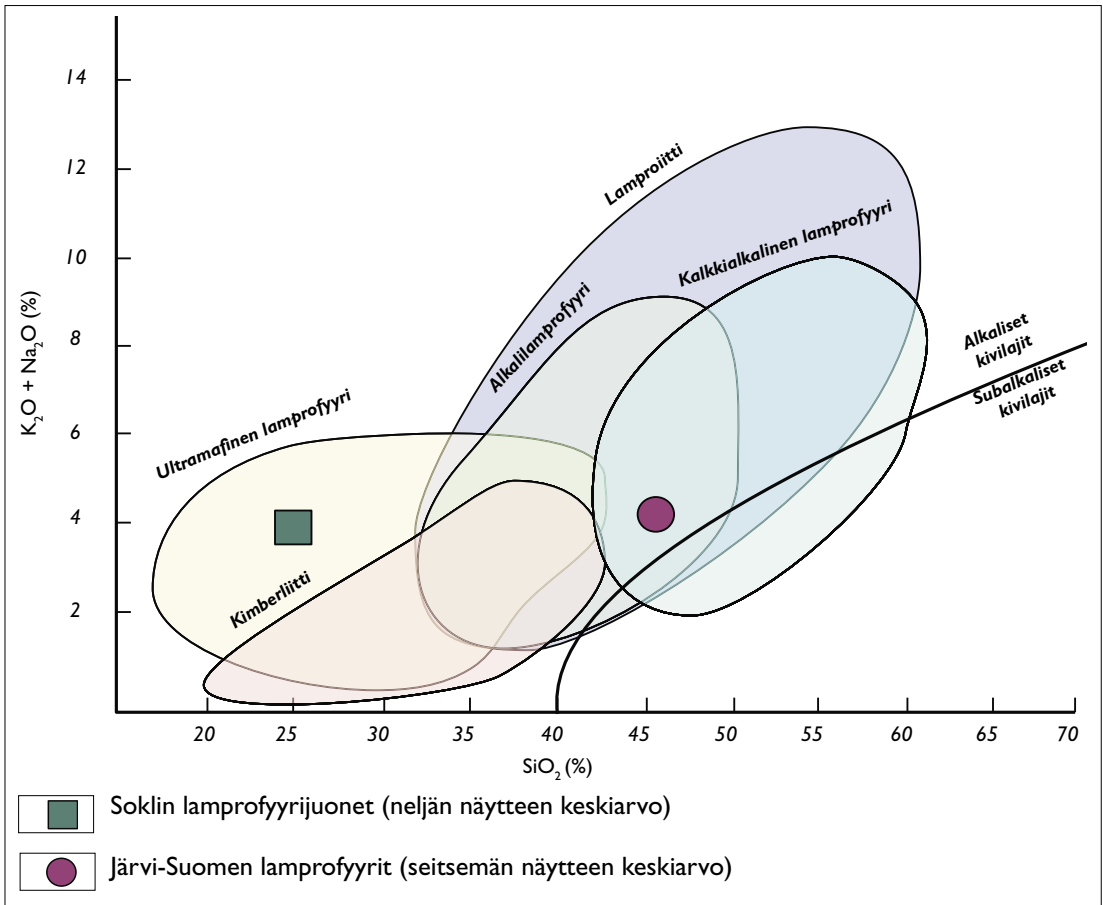
**Kuva 10.7.** Kaaviokuva kimberliitti- ja lamproiittihiippusysteemistä.

## 10.5. Suomen lamprofyriset kivilajit

Suomesta tiedetään löydetyn kaikkia muita lamprofyrisuvun kivilajeja paitsi lamproiitteja. Ensimmäisinä ovat tulleet tietoon vuosisadan alussa Järvi-Suomen lamprofyriset juonikivilajit (Hackman 1914 ja 1933, s.160). Soklin karbonaattikompleksista ja sen lähiympäristöstä on kuvattu lamprofyrisiä juonia 1970-luvulla (Vartiainen ym. 1978), ja vuonna 1994 julkistettiin tieto timanttipitoisten kimberliittien esiintymisestä Suomessa (Ashton Mining, lehdistötiedote 1994, Laapas 1994; ks. myös Griffin ym. 1995, Vilpas 1995, O'Brien ja Tyni 1997, Tyni 1997 ja Vilpas 1997).

### Järvi-Suomen lamprofyrijuonet

Järvi-Suomen lamprofyrijuonia on Victor Hackmanin jälkeen tutkinut lähinnä Laukkanen (1987). Lamprofyirit esiintyvät parvina, kylmiin isäntäkiviin tunkeutuneina rakojuonina. Juonet ovat tyypillisiä kalkkialkalisia lamprofyyrejä hajarakeineen, erilaisine sivukivisiruineen ja -kappaleineen sekä kalsiittimanteleineen. Perusmassa on niissä paljaalla silmällä katsottaessa kuin mustaa lasia. Hajarakeina esiintyy tyypillisesti klinopyrokseeni ja biotiitti, lisäksi amfiboli, plagioklaasi, apatiitti sekä flogopiitti. Perusmassan päämineraalit vaihtelevat lamprofyriityypin mukaan siten, että minetiissä on biotiittia, flogopiittia, ortoklaasia ja amfibolia, kamptoniitissa ja kersantiitissa biotiittia, plagioklaasia ja klinopyrokseenia. Oliiviinia ei Järvi-Suomen lamprofyyreissä ole.



**Kuva 10.8.** Lamprofyyrin kivilajien luokittelu  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{SiO}_2$  -diagrammin avulla. Kivilajien kentät on pelkistetty Rockin ym. (1991) esityksestä.

Sivukivestä peräisin olevina kiteinä esiintyvät juonissa erilaiset pyrokseenit mm. hypersteeni, diopsidi ja augiitti sekä plagioklaasi. Sivukiven kappaleina (ksenoliitteina) tavataan erilaisia runsaasti pyrokseeneja sisältäviä kivilajeja, gabronoriittia, pyrokseenigraniittia ja granaattipitoisia kivilajifragmentteja. Osa näistä kappaleista (esim. websteriitti) on peräisin Maan vaipasta asti.

Laukkasen (1987) mukaan juonia on löytynyt neljältä alueelta. Runsaimmin niitä (25 juonta) on Haukivedellä, missä juonien leveys on 10 - 100 cm. Juonien ikä on 1837 miljoonaa vuotta (Neuvonen ym. 1981). Lamprofyryrityyppejä ovat täällä minetti,

kamptoniitti ja kersantiitti. Nilsistä on löytynyt yhdeksän minettijuonta, joiden leveys on 4 - 40 cm. Kaavilta tunnetaan seitsemän juonta (zirkonin uraani-lyijyikä 1 830 miljoonaa vuotta, Huhma 1981). Näiden juonien leveys on 10 - 70 cm, ja kivilajityyppeinä tavataan kamptoniittia ja kersantiittia. Lisäksi Järvi-Suomen lamprofyryrijuoniin kuuluu yksi 40 cm leveä minettijuoni Pielavedeltä.

### Soklin lamprofyryrijuonet

Soklin karbonaattikompleksista ja sen välittömästä läheisyydestä on kuvattu kir-

java joukko alkalilamprofyreina pidettyjä juonikivilajeja (Vartiainen ym.1978). Ne esiintyvät eri suuntaisina parvina. Juonien keskipaksuus on kairausten perusteella noin puoli metriä. Yleisväriltään juonet ovat tummia, pääväri vaihtelee punertavasta ja vihertävästä harmaaseen. Juonet on luokiteltu neljään pääryhmään: porfyryysiin, ksenoliittisiin, massiivisiin ja kiillerikkaisiin. Kaksi viimeistä ryhmää ovat vallitsevia. Kaksi ensin mainittua juoniryhmää sijoittuu pääosin feniittikehälle ja peruskallioalueelle karbonatiitin ulkopuolelle.

Soklin lamprofyrien mineraalikoostumus vaihtelee huomattavasti. Porfyryisessä ryhmässä hajarakeiden määrä vaihtelee välillä 27 - 37 %. Tyypillistä on, että oliviini on voimakkaasti muuttunut ja että se puuttuu perusmassasta, kuten lamprofyrin määrittelmä edellyttääkin. Perusmassan raekoko on noin 0,1 mm. Sen mineraalit ovat kiteytyneet järjestyksessä opaakit → flogopiitti ja kalsiitti → richteriitti.

Kivilajifragmentit ovat karbonatiittikompleksin sisällä olevissa lamprofyrijuonissa autoliitteja eli peräisin kompleksin omista kivistä: foskoriittia, karbonatiittia ja feniittia.

Kemiallisen koostumuksensa perusteella Soklin lamprofyrit sijoittuvat Rockin ym. (1991) luokittelussa ultramafisten lamprofyrien kenttään (*Kuva 10.8*). Soklin lamprofyreistä puuttuvat kimberliittikriittiset mineraalit ja toisaalta niissä esiintyy kimberliitteihin kuulumatonta richteriittia. Kemialliselta koostumukseltaan juonet ovat kuitenkin lähellä kimberliittejä. Onkin arvioitu, että Soklin lamprofyriset juonet voisivat olla peräisin kimberliittisestä magmasta, josta ultramafiset palloset olisivat erottuneet ja korkean paineen maineraalit tasapainottuneet toisen vaiheen magmasäiliössä. Kuoren aiheuttama koostumuksen muuttuminen (kontaminoituminen) ja karbonatiittimagman reaktiot ympäröivän kallioperän kanssa ovat muovanneet juoni-

materiaalin lopulliseen koostumukseensa.

Soklin kompleksin yli kulkevasta Sokliharjusta suoritettu raskasmineraalitutkimus osoittaa, ettei harjuaineuksessa ole timantti-kimberliiteille kriittisiä mineraaleja (Perttunen ja Vartiainen 1992).

### Kimberliitit

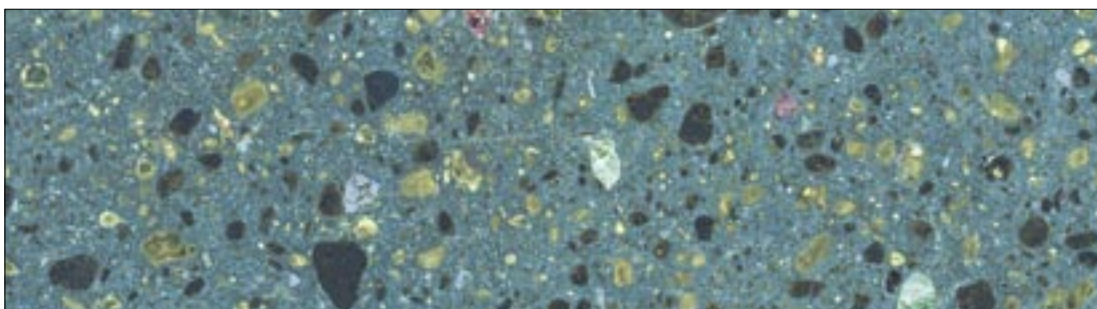
Teoreettisesti Fennoskandian kilpialue on kimberliittien esiintymiselle otollista. Tiedot Arkangelin alueen kimberliittien (Papunen 1995) ja Kostamuksen suunnan lamproiittijuonien olemassaolosta ovat tämän todistaneet, ja 1994 julkistettu tieto kimberliittien esiintymisestä myös Suomessa on lopullisesti vahvistanut teorian oikeaksi. Se, että Suomesta ei aikaisemmin ole kimberliittejä löydetty, johtuu siitä, että kimberliittipiiput ja -juonet ovat pienialaisia ja lisäksi ne pehmeistä kivilajeista koostuvina ovat kovertuneet kallion painanteiksi ja tulleet siten irtomaan peittäviksi. Näin esimerkiksi kallioperäkartoittajat eivät ole voineet osua kimberliittipaljastumiin. Toisaalta suomalaiset malminetsintätoimintaa harjoittavat yhtiöt Malmikaivos Oy:tä lukuunottamatta eivät myöskään ole panostaneet timanttien etsintään.

Tarkempaa tietoa suomalaisista kimberliiteistä ja timanteista ovat julkaisseet Griffin ym. (1995), O'Brien ja Tyni (1997), Tyni (1997) ja Tyni ja O'Brien (1997). Tynin mukaan ensimmäinen kimberliittipiippu löytyi jo vuonna 1964 Malmikaivos Oy:n suorittaessa malminetsintää perusteilla olleen Luikonlahden kuparikaivoksen ympäröstössä Kaavin kunnassa.

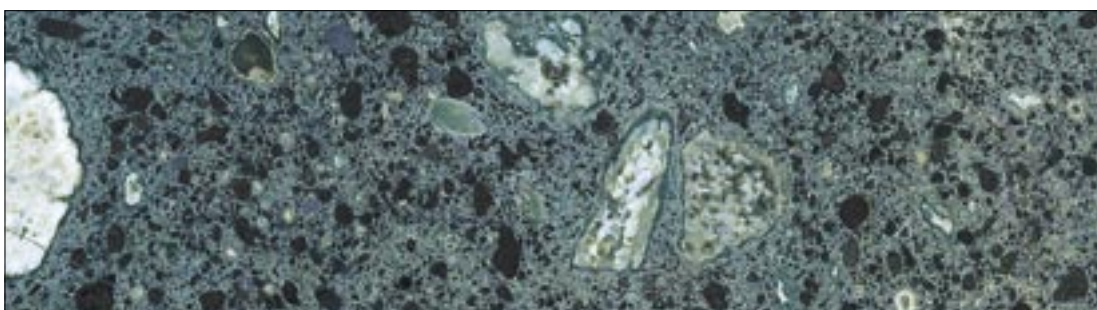
Laajamittainen kimberliittien ja timanttien etsintä alkoi kuitenkin vasta 1980-luvun puolivälissä Malmikaivos Oy:n hankkuiduttua yhteistoimintaan australialaisen timanttiyhtiön Ashton Mining Ltd:n kanssa, josta lopulta tuli Malmikaivos Oy:n omistaja. Näiden etsintöjen tuloksena on tähän mennessä löydetty kaikkiaan 24 kimberliittien



**Kuva 10.9.** Sahattu pala suomalaista puolipinnallista (eli hypabyssistä, vrt. Kuva 10.7) kimberliittiä (Malmikaivos Oy, esiintymä no. 1). Pyöristäyneet hajarakeet ovat oliivinitkeitä, jotka ovat kuluneet ja syöpyneet kimberliittimagman noustessa maankuoressa nopeasti ylöspäin. Kuvan pitkä sivu luonnossa 5,5 cm. Kuva Helena Saarinen.



**Kuva 10.10.** Runsaasti timantin indikaattorimineraaleja sisältävää suomalaista puolipinnallista kimberliittiä (Malmikaivos Oy, esiintymä no. 10). Pyöristäyneet indikaattorimineraalit ovat kromista rikkaita punaisia pyrooppigranaatteja, vihreitä diopsideja sekä teräksenharmaita magnesiumista rikkaita ilmeniittejä. Lisäksi näytteessä on kahdessa vaiheessa syntyneitä, muuttuneita oliivinirakeita. Indikaattorimineraalien koostumukset osoittavat, että ne ovat peräisin yli 150 km:n syvyydestä Maan vaipasta. Tässä syvyydessä timantti on hiilen pysyvä olomuoto. Näyte onkin timanttipitoinen. Kuvan pitkä sivu luonnossa 5,5 cm. Kuva Helena Saarinen.



**Kuva 10.11.** Sahattu pala suomalaista puolipinnallista kimberliittibreksiaa (Malmikaivos Oy, esiintymä no. 14). Näytteen vaaleat ja vihreät kulmikkaat kivilajikappaleet (eli ksenoliittit) ovat peräisin maankuoresta ja koostuvat enimmäkseen kvartsista ja maasälvästä. Ksenoliittien kulmikkaus johtuu siitä, etteivät ne ole kulkeutuneet kimberliittimagman mukana yhtä pitkää matkaa kuin Kuvan 10.10 puolipinnallisen kimberliitin pyöristäyneet hajarakeet. Lähempi tarkastelu paljastaa kuitenkin useita pyöristäyneitä magnesiumista rikkaita ilmeniittirakeita (timantti-indikaattoreita) ja niistä irronneita kulmikkaita siruja. Esiintymä sisältää mikrotimantteja. Kuvan pitkä sivu luonnossa 5,5 cm. Kuva Helena Saarinen.

tai niiden sukuisten kivilajien muodostamaa piippua ja juonimaista esiintymää (*Kuvat 10.9, 10.10 ja 10.11*). Niiden pinta-alat vaihtelevat puolesta neljään hehtaariin. Kimberliiteistä 16 sisältää timantteja. Neljäsä on merkittävä määrä eli yli 10 karaattia 100 kimberliitin kivitonnia kohti (yksi karaatti on 200 mg). Laadullisesti Suomesta löydetyt timantit ovat verrattavissa muualla toiminnassa olevien kaivosten timantteihin (katso myös Laapas 1994 sekä Virkkunen ja Partanen 1995).

Tieteellisesti suomalaisia kimberliittejä on ollut mahdollisuus tutkia vasta alustavasti. Ikämääritykset kahdesta piipusta ovat antaneet tuloksiksi 590 - 430 miljoonaa vuotta eli ne ovat hieman vanhempia kuin Kuolan alkalikiviprovinssin Suomen puoleiset intruusiot (*Kuva 10.1*). Jo alustavat tutkimukset osoittavat, että löydetyt kimberliitit edustavat kimberliittien perustyyppiä vaihdellen nykyisellä eroosiotasolla *Kuvan 10.7* mukaisesti puolipinnallisen (hypabyssisen) fasieksen intruusioista monivaiheisesti muodostuneisiin piippuihin, jotka sisältävät mm. breksiapiippufasieksen vulkaniklastiitteja. Kimberliittien joukossa esiintyy myös ultramafisia juonikivilajeja.

Tyypillistä löydetyille kimberliiteille on, että silloin kun niissä on timantteja, ne sisältävät runsaasti myös ns. indikaattorimineraaleja. Näitä ovat mm. pyrooppi-granaatti, magnesium-ilmeniitti ja runsaasti kromia sisältävä pyrokseeni (Vilpas 1997). Indikaattorimineraalien runsaus on siis hyvä merkki timanttien etsinnässä (*Kuva 10.10*).

## Viiteluettelo

*Ashton Mining Limited, 1994.* Media release (lehdistötiedote). Ashton announces new diamond province. Ashton Mining

- Limited. 4th Floor, 441 St. Kilda Road, Melbourne VIC 3004, Australia.
- Basu, A.R. & Puustinen, K., 1982.* Nd-isotopic study of the Siilinjärvi carbonatite complex, eastern Finland and evidence of early Proterozoic mantle enrichment. Geological Society of America, Abstracts with Programs, 14, No. 7, s. 440.
- Brögger, W.C., 1921.* Die Eruptivgesteine des Kristianiagebietes. IV. Das Fengebiet in Telemark, Norwegen. Skrifter udgit av Videnskabselskabet i Kristiania. I. Math.-Naturwis. Klasse, No. 9, 408 s.
- Doig, R., 1970.* An alkaline rock province linking Europe and North America. Canadian Journal of Earth Sciences, 7, s. 22 - 28.
- Eckermann, H. von, 1948.* The alkaline district of Alnö Island (Alnö alkalina område). Sveriges Geologiska Undersökning, Ser. Ca., N:o 36, 176 s.
- Griffin, B.J., Rissanen, J.P., Pooley, G.D., Lee, D.C., MacDonald, I. & Kinny, P.D., 1995.* A new diamondiferous eclogite-bearing kimberlitic occurrence from Finland. Sixth International Kimberlite Conference Abstracts, s. 198 - 200.
- Hackman, V., 1899.* Neue Mitteilungen über das Ijolithmassiv in Kuusamo. Bulletin de la Commission géologique de Finlande, 11, 45 s.
- Hackman, V., 1914.* Über Camptonitgänge im mittleren Finnland. Bulletin de la Commission géologique de la Finlande, 42, 18 s.
- Hackman, V., 1933.* Suomen geologinen yleiskartta. Lehti D 2 Savonlinna. Kivilajikartan selitys. Suomen Geologinen toimikunta, Helsinki, 175 s.
- Holmberg, H.J., 1857.* Mineralogischer Wegweiser durch Finnland. Dryckeri der Finnischen Litteratur-Gesellschaft, Helsingfors, 76 s.
- Holmberg, H.J., 1858.* Materialier till Finlands geognosi. Första Serien. Finska Litteratursällskapet tryckeri, Helsingfors, 254 s.
- Hubma, A., 1981.* Youngest Precambrian dyke rocks in North Karelia, East Finland. Bulletin of the Geological Society of Finland, 53, s. 67 - 82.
- Kouvo, O. & Tilton, G.R., 1966.* Mineral ages from Finnish Precambrian. Journal of Geology, 74, s. 62 - 65.
- Kranck, E.H., 1928.* On turjaite and the ijolite stem of Turja, Kola. Fennia, 51, N:o 5, 104 s.

- Kramm, U., Kogarko, L.N., Kononova, V.A. & Vartiainen, H., 1993.* The Kola Alkaline Province of the CIS and Finland: Precise Rb-Sr ages define 380 - 360 Ma age range for all magmatism. *Lithos*, 30, s. 33 - 44.
- Kresten, P., Printzlau, I., Rex, D., Vartiainen, H. & Woolley, A., 1977.* New ages of carbonatitic and alkaline ultramafic rocks from Sweden and Finland. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, 99, s. 62 - 65.
- Laapas, H., 1994.* Timantteja Suomesta. *Vuoriteollisuus - Bergshanteringen*, 52, No. 2, s.72.
- Laukkanen, J., 1987.* Väli-Suomen lamprofyrijuonet. *Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti* 76, s. 91 - 98.
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, J., Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sörensen, H., Streckeisen, A., Woolley, A.R. & Zanettin, B. (toim. Le Maitre, R.W.), 1989.* A classification of igneous rocks and glossary of terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Blackwell Scientific Publications Ltd., Oxford, 193 s.
- Lehijärvi, M., 1960.* The alkaline district of Iivaara, Kuusamo, Finland. *Bulletin de la Commission géologique de Finlande*, 185, 62 s.
- Lindholm, O. & Anttonen, R., 1980.* Geology of the Otanmäki iron ore. Sivut 25 - 33 teoksessa T.A. Häkli (toim.) Precambrian ores of Finland, 26th International Geological Congress, Paris 1980. Guide to excursions 078 A+C, Part 2 (Finland). Geological Survey of Finland, Espoo.
- Makkonen, H., 1995.* Iivaara (julkaistavana).
- Marmo, V., Hoffrén, V., Hytönen, K., Kallio, P., Lindholm, O. & Siivola, J., 1966.* On the granites of Honkamäki and Otanmäki, Finland. *Bulletin de la Commission géologique de Finlande*, 221, 34 s.
- Nordenskiöld, N., 1852.* Verzeichniss der in Finland gefundenen Mineralien. *Käsikirjoitus*, 2.1.1852.
- Nordenskiöld, A., 1855.* Beskrifning öfver de i Finland funna Mineralier. *Finska Litteratur-sällskapets tryckeri*, Helsingfors, 162 s.
- Neuvonen, K.J., Korsman, K., Kouvo, O. & Paavola, J., 1981.* Paleomagnetism and age relations of the rocks in the Main Sulphide Ore Belt in central Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 53, s. 109 - 133.
- Nuutilainen, J., 1973.* Soklin karbonaattiinvaikuttavien geokemiallisista tutkimuksista. *Geologi*, 25, No. 2, s. 13 - 17.
- Nykänen, J., 1993.* Pudasjärven Korttejärven ja Posion Laivajoen proterotsooisten karbonaattien geologia, mineralogia ja geokemia. *Julkaisematton pro gradu -tutkielma, säilytetään Oulun yliopiston geotieteiden ja tähtitieteen laitoksella*, 60 s.
- O'Brien, H.E. & Tyni, M., 1997.* Petrology and mineralogy of kimberlites and related rocks from Finland: Preliminary results. Sivut 781-783 teoksessa H. Papunen (toim.) Mineral Deposits: Research and Exploration Where do They Meet? Proceedings of the Fourth Biennial SGA Meeting, Turku/Finland. 11 - 13 August 1997, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Paarma, H., 1970.* A new find of carbonatite in North Finland, the Sokli plug in Savukoski. *Lithos*, 3, s. 129 - 133.
- Paarma, H., Vartiainen, H., Litvinenko, V.I. & Muzylev, V.V., 1981.* Geological interpretation of seismic soundings at the Sokli carbonatite complex, northern Finland. Papers issued to the 10th General Meeting of the Finnish-Soviet Joint Geological Working Group, held in Rovaniemi, 7 - 11 September 1981, s. 213 - 224.
- Papunen, H., 1995.* Arkangelin alueen timanteista. *Geologi*, 47, No. 4 - 5, s. 64 - 65
- Patchett, P.J., Kouvo, O., Hedge, C.E. & Tatsumoto, M., 1981.* Evolution of continental crust and mantle heterogeneity: Evidence from Hf isotopes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 78, s. 279 - 297.
- Perttunen, M. & Vartiainen, H., 1992.* Glaciofluvial transport of clasts and heavy minerals from the Sokli carbonatite complex, Finnish Lapland. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 366, 21 s.
- Puustinen, K., 1970.* The carbonatite of Siilinjärvi in the Precambrian of Eastern Finland. A preliminary report. *Lithos*, 3, s. 89 - 92.
- Puustinen, K., 1971.* Geology of the Siilinjärvi carbonatite complex, Eastern Finland. *Bulletin de la Commission géologique de Finlande*, 249, 43 s.
- Puustinen, K., 1986.* Halpasen karbonaatti Mik-

- kelin mlk:ssa. *Geologi*, 38, No. 1, s. 1 - 5.
- Puustinen, K. & Karbu, J.A., 1995.* Halpanen alvikite dike, southeastern Finland (julkaistavana).
- Ramsay, W., 1889.* Geologische Beobachtungen auf der Halbinseln Kola. *Fennia*, 3, N:o 7, 52 s.
- Ramsay, W. & Bergbell, H., 1891.* Das Gestein vom Iiwaara in Finnland. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, 13, s. 300 - 312.
- Ramsay, W. & Hackman, V., 1894.* Das Nephelinsyenitgebiet auf der Halbinseln Kola. *Fennia*, 11, N:o 2, 225 s.
- Rock, N.M.S., Bowes, D.R. & Wright, A.E., 1991.* Lamprophyres. Blackie and Son Ltd., Glasgow, 275 s.
- Rämö, O.T., 1991.* Petrogenesis of the Proterozoic rapakivi granites and related basic rocks of southeastern Fennoscandia: Nd and Pb isotopic and general geochemical constraints. *Geological Survey of Finland, Bulletin 355*, 161 s.
- Streckeisen, A., 1978.* Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks. Recommendations and suggestions. IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen*, 134, Heft 1, s. 1 - 14.
- Tyni, M., 1997.* Diamond prospecting in Finland - A review. Sivut 789 - 791 teoksessa H. Papunen (toim.) *Mineral Deposits: Research and Exploration Where do They Meet?* Proceedings of the Fourth Biennial SGA Meeting, Turku/Finland. 11 - 13 August 1997, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Tyni, M. & O'Brien, H., 1997.* Prospecting for diamondiferous kimberlites in Finland. *Vuoriteollisuus - Bergshanteringen*, 55, No. 3, s. 26 - 29.
- Vartiainen, H., 1980.* The petrography, mineralogy and petrochemistry of the Sokli carbonatite massif, northern Finland. *Geological Survey of Finland, Bulletin 313*, 126 s.
- Vartiainen, H. & Paarma, H., 1979.* Geological characteristics of the Sokli carbonatite complex, Finland. *Economic Geology*, 74, s. 1296 - 1306.
- Vartiainen, H. & Vitikka, A., 1993.* The late dikes of the Sokli massif and their tectonic monitoring. *Geochimia*, 8, s. 1241 - 1244 (venäjäksi).
- Vartiainen, H. & Woolley, A.R., 1974.* The age of the Sokli carbonatite, Finland, and some relationships of the North Atlantic alkaline igneous province. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 46, s. 81 - 91.
- Vartiainen, H. & Woolley, A.R., 1976.* The petrography, mineralogy and chemistry of the fenites of the Sokli carbonatite intrusion, Finland. *Geological Survey of Finland, Bulletin 280*, 87 s.
- Vartiainen, H., Kresten, P. & Kafkas, Y., 1978.* Alkaline lamprophyres from the Sokli complex, Northern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 50, s. 59 - 68.
- Vartiainen, H., Melnikov, I. & Sullimov, B., 1990.* The francolite ore deposits of Kovdor and Sokli. Proceedings of the Finnish-Soviet Symposium held in Helsinki, Finland, November 14 - 15, 1990. Research Report TKK-IGEA13, s. 7 - 14.
- Vilpas, L., 1995.* Timantteihin liittyvien kivilajien etsintä indikaattorimineraalien avulla. Lakeuden kiviviesti, Lakeuden Kivikerho r.y:n tiedotuslehti, Toukokuu 1995, s. 20 - 22.
- Vilpas, L., 1997.* Timanttiin liittyvien kivilajien indikaattorimineraalit. Kello- ja kultasepänapala, 4/1997, s. 24 - 25.
- Virkkunen, M. & Partanen S.J., 1995.* Suomen kivet, jalo-, koru-, koriste- ja rakennuskivet, maakuntakivet, kansalliskivet ja muut luontonomimikot. Suomen Matkailuliitto ry., Helsinki, Gummeruksen kirjapaino Oy, Jyväskylä, 2. painos, 176 s.
- Wiik, E.J., 1883.* Undersökningar af eleolitsyenit från Iivaara i Kuusamo. *Mineralogiska och petrografiska meddelanden*. VIII. No. 31. Öfversikt af Finska Vetenskaps-Societets Förhandlingar, 25, s. 129 - 133.
- Woolley, A.R. & Kempe, D.R.C., 1989.* Carbonatites: nomenclature, average chemical compositions, and element distribution. Sivut 1 - 14 teoksessa K. Bell (toim.) *Carbonatites: Genesis and evolution*. Unwin Hyman Ltd., Lontoo.
- Woolley, A.R., Bergman, S.C., Edgar, A.D., Le Bas, M.J., Mitchell, R.H., Rock, N.M.S. & Scott Smith, B.H., 1996.* Classification of lamprophyres, lamproites, kimberlites, and the kalsilitic, melilitic, and leucitic rocks. *Canadian Mineralogist*, 34, s. 175 - 186.