



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

## **Kuolan niemimaan alkalikiviprovinssi**

Peppi Piisilä

GEOTIETEIDEN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Kuolan niemimaan alkalikiviprovinssi

Peppi Piisilä

Oulun yliopisto, geotieteiden tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2024, 33 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Kari Strand

Tässä kandidaatintyössä käsitellään Kuolan niemimaan alkalikiviprovinssia jo olemassa olevien tutkimusten ja kirjallisuuden pohjalta. Alkalikiviprovinssilla esiintyy monia alkalikivikomplekseja, jotka koostuvat alkalisista magmakivistä ja metasomaattisesta eli muuttuneesta isäntäkivestä. Komplekseille ominaisia kivilajeja ovat muun muassa karbonaattit, syeniitit ja erilaiset lamprofyirit. Alkalikiviprovinssin kompleksien sijoittumiseen on vaikuttanut tektoninen toiminta niin Kuolan niemimaan ympärillä kuin sen sisäosissa. Mantereinen repeämävyöhyke on alkalikiviprovinseille tyypillinen tektoninen ympäristö, ja komplekseja esiintyy erilaisten syvien siirrosten läheisyydessä. Alkalisten magmakivien laaja kirjo on syntynyt maapallon vaipan alhaisesta osittaisulamisesta, fraktioivasta kiteytymisestä sekä vaipassa magman purkautuessa vallinneista koostumus- ja syvyyseroista. Muita magmaattiseen toimintaan liittyviä tekijöitä ovat volatiilien viskositeetti ja magman vuorovaikutus ympäröivän kiviaineksen kanssa. Kuolan niemimaan alkalikiviprovinssissa on taloudellista potentiaalia. Sen alkalikivikomplekseissa tavataan perusmetalleja, mutta perusmetallien lisäksi niissä esiintyy myös harvinaisempia raaka-aineita. Tällaisia raaka-aineita ovat REE-metallit eli harvinaiset maametallit (*rare earth elements*), HFSE-aineet (*high field strenght elements*) sekä apatiitista saatava fosfori. Ihmiskunta tarvitsee näitä raaka-aineita erilaisiin tarkoituksiin; harvinaisia maametalleja sekä HFSE-aineita teollisuuteen ja tekniikan kehitykseen, ja fosforia lannoiteteollisuuteen. Ihmiskunnan kehittyessä tarve näille raaka-aineille tulee kasvamaan, mikä lisää mahdollisuuksia ja joidenkin raaka-aineiden osalta myös paineita alkalisten esiintymien taloudelliseen hyödyntämiseen.

Asiasanat: Kuolan niemimaa, alkalikivi, alkalikiviprovinssi, REE, HFSE, fosfori

# SISÄLLYSLUETTELO

|   |    |
|---|----|
| 1 Johdanto .....  | 3  |
| 2 Kuolan niemimaan alkalikiviprovinssi.....             | 4  |
| 2.1 Kuolan niemimaa yleisesti .....                     | 4  |
| 2.2 Alkalikiviprovinssilla esiintyviä kivilajeja.....   | 5  |
| 2.2.1 Alkalikivet yleisesti .....                       | 5  |
| 2.2.2 Karbonaatit ja foskoriitit .....                  | 6  |
| 2.2.3 Syeniitit ja nefeliinisyeniitit.....              | 7  |
| 2.2.4 Lamprofyirit ja kimberliitit .....                | 7  |
| 2.3 Provinssin synty .....                              | 8  |
| 2.3.1 Tektoninen toiminta .....                         | 9  |
| 2.3.2 Magmaattiset prosessit.....                       | 11 |
| 3 Provinssin esiintymät .....                           | 14 |
| 3.1 Sokli .....   | 14 |
| 3.2 Kovdor.....   | 17 |
| 3.3 Hiipinä ja Lovozero.....                            | 18 |
| 4 Alkalikivikompleksien taloudellinen potentiaali ..... | 22 |
| 4.1 REE .....   | 22 |
| 4.2 Niobi ja tantaali .....                             | 24 |
| 4.3 Fosfori .....                                       | 25 |
| 5 Yhteenveto .....                                      | 27 |
| LÄHDELUETTELO .....                                     | 28 |

## 1 JOHDANTO

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on perehtyä Kuolan niemimaan alkalikiviprovinssiin. Alkalikiviprovinssit vaativat erityisiä olosuhteita syntyäkseen, mikä tekee niistä suhteellisen harvinaisia ja geologisesti mielenkiintoisia esiintymiä. Työssä käsitellään yleisesti Kuolan niemimaan alkalikiviprovinssin geologiaa, syntyä sekä muutamia työn aiheen kannalta merkittäviä alkalikiviesiintymiä. Provinssin esiintymistä tässä työssä esitellään Soklia, Kovdoria (Kouteroa), Lovozeroa ja Hiipinää. Pienemmät tai vähemmän merkittävät esiintymät on jätetty pois. Työn lopussa kerrotaan alkalikivien taloudellisesta potentiaalista. Alkalikiviesiintymissä tavataan erityisiä geologisia varoja, ja tarkastelun kohteeksi on valittu harvinaiset maametallit eli REE-metallit (Rare earth elements), HFSE-aineet (High field strenght elements) ja apatiitti.

## 2 KUOLAN NIEMIMAAN ALKALIKIVIPROVINSSI

### 2.1 Kuolan niemimaa yleisesti

Kuolan niemimaa kuuluu Fennoskandian kilpialueeseen. Se koostuu pääosin arkeeisesta kallioperästä, tarkemmin määriteltynä meso- ja neoarkeeisista yksiköistä (Lahtinen, 2012). Luukkosen ja Sorjonen-Wardin (1998) mukaan arkeinen eoni käsittää aikavälin 4450–2500 miljoonaa vuotta sitten, ja Fennoskandian kilpialueen arkeinen kallioperä on iältään noin 2760–2650 miljoonaa vuotta vanha.

Mielenkiintoisena piirteenä Kuolan niemimaalla ovat paleotsooisen maailmankauden devonikaudella, joka Kähkösen ja Lehtisen (1998) mukaan tarkoittaa ajanjaksoa 408–360 miljoonaa vuotta sitten, muodostuneet erikoiset esiintymät. Kyseiset esiintymät ovat alkalisista magmakivistä ja karbonaatiiteista koostuvia intruusiokomplekseja (Kramm *et al.*, 1993), jotka eivät ole kovin yleisiä maailman mittakaavassa (Burke *et al.*, 2007). Näiden kompleksien muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan Kuolan niemimaan alkalikiviprovinssiksi. Provinssiin kuuluu yhteensä 22 alkalikompleksia (O'Brien ja Hyvönen, 2015), joista valtaosa on Venäjällä ja muutamat Suomen puolella lähellä itärajaa. Alkalikiviprovinssi rajautuu Kuolan niemimaan rajoihin ja Suomessa Itä-Lappiin ja hieman Lappia etelämpänä Iivaaraan.

## 2.2 Alkalikiviprovinssilla esiintyviä kivilajeja

### 2.2.1 Alkalikivet yleisesti

Yksinkertaistettuna alkalikivet ovat sellaisia magmakiviä eli kivilajia, jotka kivilajista kiteytyneitä kiviä, jotka sisältävät runsaasti alkalimetalleja, eli natriumia tai kaliumia, ja vähäisesti piitä (Hytönen, 1999). Middlemostin (1985) sekä Lehtinen *et al.*n (1998) mukaan natriumin ja kaliumin runsautta verrataan piin ja alumiinin suhteeseen, eli alkalikivissä on tavallista enemmän alkalimetalleja suhteessa piin ja alumiinin määrään. Useiden määritelmien mukaan alkalikiviksi luokitellaan sellaiset kivet, jotka sisältävät riittävän suuren määrän maasälvänsijaisia eli foideja, alkali-amfibooleja, alkalipyrokseenia tai näitä kaikkia (Vartiainen, 1998; O'Brien *et al.*, 2005). Foideilla tarkoitetaan leusiitti-, nefeliini- ja sodaliittiryhmän mineraaleja (Middlemost, 1985; Kähkönen ja Lehtinen, 1998). Kun magmassa on maasälpäen osalta ”liikaa” alkaleja, niin alkaleja sitoutuu foideihin (Papunen *et al.*, 1986). Alkalikivistä puhuttaessa oleellinen termi on kiven peralkalisuus. Lehtinen *et al.*n laatiman sanaston (1998) mukaan peralkalinen tarkoittaa, että kivessä alumiinioksidin ( $Al_2O_3$ ) molekyylisuus on vähäisempi kuin alkalimetallien muodostamien oksidien eli  $K_2O$  ja  $Na_2O$ :n molekyylisuudet yhteenlaskettuna.

Alkalikivet edustavat vain pientä osaa magmakivistä, mutta ryhmänä ne ovat hyvin moninaisia ja mineraalikoostumukseltaan vaihtelevia. Hyvä vertaus alkalikivien kemiallisen koostumuksen ja mineralogian moninaisuudesta on esimerkiksi Vartiaisen (1998) käyttämä kuvaus: sekä mineralogian että kemiallisen kaavan puolesta alkalikivet vastaisivat noin puolta magmakivien nimistä, vaikka alkalikivien ryhmä on vain noin 1 % koko magmakivien ryhmästä. Monet alkalikivet muistuttavat koostumukseltaan magmaa, koska ne kiteytyvät suoraan vaipan magmasta (Vartiainen, 1998). Tämän takia

ne ovat otollinen tutkimuskohde, kun halutaan tutkia vaipan koostumusta ja magmakivien kehityshistoriaa.

### 2.2.2 Karbonaatit ja foskoriitit

Kuolan niemimaan alkalikiviprovinssin 22 kompleksista 14 on karbonaattiteja sisältäviä komplekseja (Zaitsev *et al.*, 2014). Karbonaatin määritelmä O'Brienin (2015) mukaan on, että kiven tilavuudesta yli 50 % on oltava karbonaattimineraaleja, kuten dolomiittia, kalsiittia, magnesiittia, sideriittia ja ankeriittia. Karbonaateista puhuttaessa on hyvä huomata termien karbonaatti ja karbonaatti erot. Karbonaatti viittaa kiven magmaattiseen alkuperään, kun taas karbonaatti on nimitys sedimenttikivelle (Paakkola *et al.*, 1986). Runsaasti karbonaattiteja sisältäville alkalikivikomplekseille on tyypillistä voimakas alkalinen metasomatoosi eli eräänlainen muuttuminen, jonka seurauksena syntyy fenitikehä (Middlemost, 1985). Karbonaattiteja ovat esimerkiksi beforiitti (dolomiinipitoinen karbonaatti), söviitti (kalsiittipitoinen karbonaatti) sekä sideriitti (rautakarbonaatti) (Lehtinen *et al.*, 1998).

Karbonaattien yhteydessä tai läheisyydessä voi esiintyä joskus erästä harvinaisempaa ultramafista syväkiveä, eli foskoriittia (Zaitsev *et al.*, 2014; Krasnova *et al.*, 2004). Useiden määritelmien (Zaitsev *et al.*, 2014; Krasnova *et al.*, 2004; Vartiainen, 1980) mukaan foskoriitit koostuvat apatiitista, magnetiitista, diopsidista, forsteriitista, flogopiitista sekä silikaattimineraalista. Niissä voi myös olla vähäisinä määrinä esiintyvinä mineraaleina, eli ns. aksessorimineraaleina, taloudellisesta näkökulmasta mielenkiintoisia mineraaleja, kuten pyroklooria, baddeleyiittia, sekä sulfideista muun muassa magneetti- ja kuparikiisua (Krasnova *et al.*, 2004; Vartiainen, 1980). Vartiaisen

väitöskirjan (1980) mukaan foskoriitit ovat karbonatiitista erkaantuneita assosiaatioita, toisin sanoen siis kumulaatteja, jotka ilmentävät karbonatiitin primääristä eli ensimmäistä koostumusta. Näin on myös osassa Kuolan niemimaan alkalikivikomplekseissa (Downes *et al.*, 2005).

### 2.2.3 Syeniitit ja nefeliinisyeniitit

Syeniitit ovat ryhmä felsisiä plutonisia kiviä eli vaaleita magmaattisia syväkiviä, joissa on runsain määrin kalimaasälpää, biotiittia, pyrokseenia, plagioklaasia ja amfioleja, mutta hyvin vähäisesti kvartssia tai erästä alkalipitoista mineraalia, nefeliiniä (Lehtinen *et al.*, 1998). Syeniitti muistuttaa erästä toista kivilajia, trakyyttia, mutta erona syeniitti sisältää vähemmän kvartssia ja on syväkivi trakyytin ollessa pintakivi (Middlemost, 1985). Nefeliinisyeniitistä puhutaan silloin, kun syeniitissä on yhtenä päämineraalina nefeliiniä (Lehtinen *et al.*, 1998). Linnen *et al.*n (2014) mukaan nefeliinisyeniitti-intruusiot ovat yleensä kerroksellisia. Esimerkkejä nefeliinisyeniiteiksi luokitelluista kivilajeista ovat muun muassa lujavriitti, khibiniitti ja foyaiitti (Middlemost, 1985). Kuolan niemimaan alkalikiviprovinssissa syeniittiä ja nefeliinisyeniittiä esiintyy etenkin Hiipinän ja Lovozeron komplekseissa.

### 2.2.4 Lamprofyyrit ja kimberliitit

Lamprofyyrit ovat ryhmä intruusiokiviä, jotka ovat purkautuneet syvältä vaipasta kuoreen vauhdilla. Nopean purkautumisen takia niissä voi esiintyä paljon mineraaleja, ja ryhmän kivien kemialliset koostumukset vaihtelevat paljon. Hytösen (1999) mukaan lamprofyyrien väri on yleensä tumma, ja rakenteeltaan lamprofyyrit ovat porfyyrisiä eli



hajarakeisia. Lamprofyyri-ryhmän kivet esiintyvät tyypillisesti intrusiivisina rakenteina, kuten piippuina ja haarautuvina juonina. Ne voidaan jakaa alaryhmiin, mutta ryhmien väliset rajat ovat epäselvät ja menevät päällekkäin lamprofyyrien laajan koostumuksen takia. (Vartiainen, 1998).

Vartiaisen (1998) mukaan ryhmät ovat seuraavanlaisia: Lamprofyyri-ryhmän ensimmäinen alaryhmä on lamprofyyrit, eli tummaa juonikivilajia olevat kivet, joille on tyypillistä rikastuneisuus volatiileista, kaliumista, rubidiumista ja bariumista. Tälläkin ryhmällä on vielä kolme alaryhmää: kalkkialkalinen, ultramafinen lamprofyyri ja alkalilamprofyyri. Seuraavan alaryhmän, lamproiittien, piirteitä ovat Vartiaisen kuvauksen (1998) mukaisesti ultramafisuus eli hyvin korkea rauta-magnesiummineraalien osuus sekä poikkeuksellisen korkeat pitoisuudet magnesiumia ja kaliumia. Lamproiitit sisältävät muun muassa flogopiittia, diopsidia ja alkaliambioleja. Viimeisen alaryhmän Vartiaisen (1998) laatimassa jaottelussa muodostavat kimberliitit. Kimberliitit ovat ultramafista alkaliperidotititeja, jotka ovat syntyneet korkeassa paineessa ja voivat sisältää hajarakeina esimerkiksi oliviinia tai flogopiittia (Hytönen, 1999). Papunen *et al.*n (1986) mukaan tyypillisiä muita mineraaleja ovat ilmeniitti sekä granaatti, ja näiden lisäksi kimberliitit voivat isännöidä timantteja.

### 2.3 Provinssin synty

Kuolan niemimaan alkalikiviprovinsin kompleksit ovat O'Brienin ja Hyvösen (2015) mukaan syntyneet suhteellisen lyhyen ajanjakson sisällä, eli aikana 382–362 miljoonaa vuotta sitten. Kompleksien rajallisten ikävaihteluiden sekä rajallisen esiintymisen

perusteella tiedetään, että erilaiset magmatyyppit muodostuivat saman, suhteellisen lyhytkestoisen tapahtumasarjan aikana, mutta yksityiskohdista on eriäviä teorioita. Provinssilla vaikuttaneen magmaattisen tapahtumasarjan lähteestä ja etenemisvaiheista on tutkimuksia, ja provinssin synnyn syyksi on ehdotettu muun muassa vaipan alaosaan kohonnutta pluumia eli astenosfääriin purkautunutta kuumaa massaa (Downes *et al.*, 2005) tai Fennoskandian kilven ympärillä tapahtunutta tektoniikkaa eli litosfäärin rakenteisiin liittyvää toimintaa (Arzamastsev, 2008).

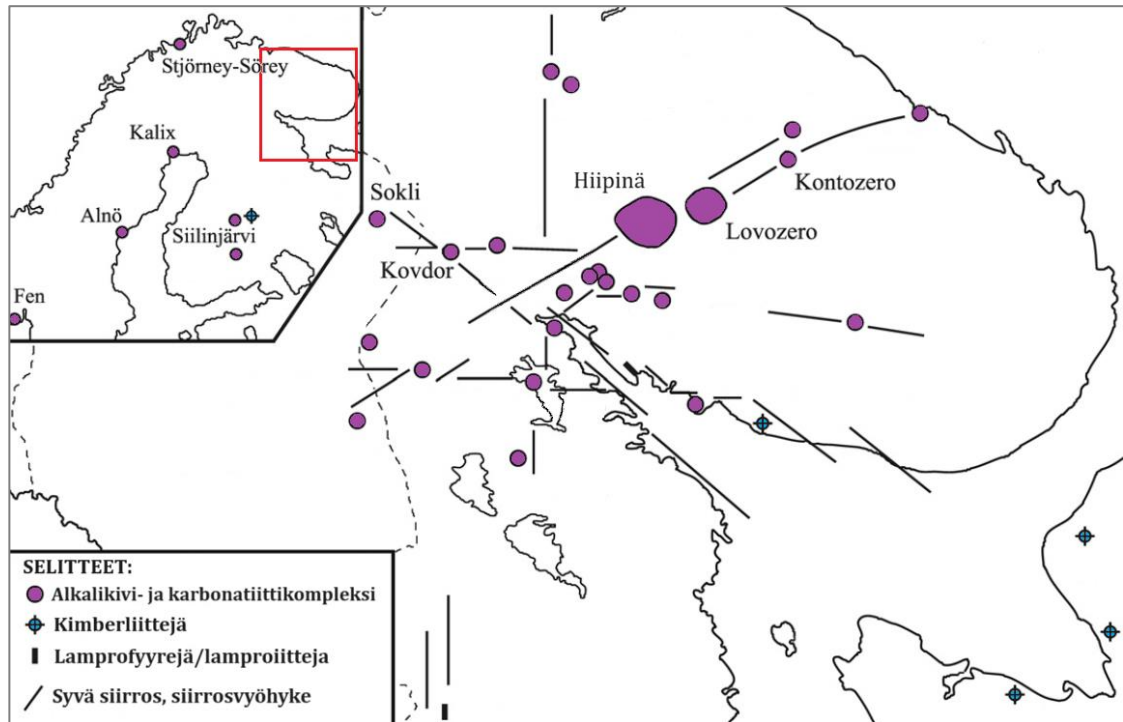
### 2.3.1 Tektoninen toiminta

Kuolan niemimaalla alkalisia intrusioita esiintyy erilaisina haarautuvina juonina ja juonikimppuina, jotka muodostavat monimutkaisia alkalikivikomplekseja. Juonia syntyy, kun magma tunkeutuu kuoreen. Yleensä magman tunkeutuminen liittyy tektoniikkaan ja kuoren rakenteisiin, kuten erkaantumis- tai siirtovyöhykkeisiin sekä jännityskenttään (Vuollo ja Huhma, 2005). Rikkonaiset ja hauraat rakenteet kuoreessa ohjaavat magman purkautumista, kun magma purkautuessaan täyttää rakoja samalla hajottaen tai deformaoiden kuorta (Middlemost, 1985).

Alkalikivet ovat peräisin magmasta, ja niille on tyypillistä esiintyä jossain tektonisessa ympäristössä (Middlemost, 1985). Tiedetään, että monipuolisia magmasarjoja, mukaan lukien myös alkalisia magmoja, voi esiintyä mantereisilla repeämävyöhykkeillä tai kratoneissa eli laajassa ja tektonisesti vakaassa kallioperäkokonaisuudessa (Middlemost, 1985). Kratoniin tunkeutuneet syväkivet ovat harvinaisia ja muodostavat alkalisia intrusioita piippujen ja juonien muodossa (Kähkönen ja Lehtinen, 1998). Myös Papsen (1986) mukaan kuoren repeämät ja anorogeeniset eli ei-orogeeniset ympäristöt ovat tyypillisiä alkalikivien synty-ympäristöjä. Mantereinen repeämävyöhyke on siirrostien systeemi, jonka alla kuori on tyypillisesti tavallista ohuempaa (Kähkönen ja Lehtinen,

1998). Tällaiset synty-ympäristöt sopivat Kuolan niemimaan alkalikiviprovinssin piirteisiin, ja monissa niemimaata kuvaavissa geologisissa kartoissa alkalikiviesiintymät sijoittuvat siirrosten kohdille tai läheisyyteen. Tätä havainnoidaan kuvassa 1. Kuolan niemimaan alkalikiviprovinssin lisäksi muitakin suunnilleen samanikäisiä alkalikiviesiintymiä on löydetty muilta alueilta, joilla on vaikuttanut siirrosvyöhyke tai tektonisen laatan tai kuoren repeäminen (Middlemost, 1985).

Kuolan niemimaan keskiosissa on tapahtunut tektonista toimintaa paleotsooisen maailmankauden devonikaudella. Arkeisen kratonin mantereisen kuoren siirrosvyöhykkeet ovat olleet merkittävässä asemassa provinssin synnyssä, sillä ne ovat vaikuttaneet intruusioiden sijoittumiseen kratonilla (Vuollo ja Huhma, 2005; Arzamastsev, 2008). Useiden tutkimusten mukaan (Dostal, 2016; Kramm *et al.*, 1993) itäkoillis-länsilounas-suuntainen Kontozeron repeämä voisi olla merkittävä tekijä siihen, kuinka provinssin kompleksit ovat sijoittuneet ja suuntautuneet. Esimerkiksi provinssin kaksi suurinta kompleksia, Hiipinä ja Lovozero, ovat muodostuneet kyseisen repeämän kohdalle (Middlemost, 1985; Salvi *et al.*, 2005). Tektoninen toiminta on ollut merkittävää alkalikiviesiintymien synnylle, mutta se ei kuitenkaan yksin selitä Kuolan niemimaan monimutkaisia alkalikivikomplekseja, vaan eräänlaiset magmaattisen toiminnan erityispiirteet ovat yhdessä olleet toinen vaikuttava tekijä provinssin syntyyn.



Kuva 1. Fennoskandian kilpialueen alkalikiviesiintymät ja niistä Kuolan niemimaa tarkemmin kuvattuna (modifioitu Zaitsev *et al.*, 2014 julkaisun kartasta). Kuvassa on yksinkertaistettuna provinssin esiintymiä ja merkittäviä siirroksia. Alkalikivi- ja karbonaatti-kompleksien sijainnit mukailevat pitkälti siirroksia.

### 2.3.2 Magmaattiset prosessit

Alkalisten kompleksien rakenteet ovat vaihtelevia, ja niissä esiintyvien erilaisten kivilajien synnystä on ollut väittelyä kivilajin koostumus- ja mineraalivaihteluiden takia (Zaitsev *et al.*, 2014). Yleisesti ottaen magmakivien laaja koostumuksen kirjo selittyy vaipan osittaisulamisen, paikallisten koostumuserojen tai lämpötilan, magmaattisen differentiaation sekä näiden prosessien tapahtumapaikan syvyyden avulla, ja samat tekijät vaikuttavat myös alkalikivien syntyyn (Downes *et al.*, 2005; Middlemost, 1985). Magman differentiaatiolla tarkoitetaan kaikenlaisia prosesseja, jotka saavat aikaan magman kehityksen erilaiseksi kiviksi (Middlemost, 1985). Näihin prosesseihin kuuluu esimerkiksi fraktioiva kiteytyminen, eli mineraalien kiteytyminen magmasta

järjestyksessä niin, että tietyn koostumuksen omaavat kiteet kiteytyvät ensin ja toisenlaiset myöhemmin (Kähkönen ja Lehtinen, 1998). Monimutkaisten magmaattisten prosessien kautta syntyy magmasarja, eli samasta magmasta syntyneiden erilaisten kivien ryhmä (Kähkönen ja Lehtinen, 1998).

Kuten muidenkin magmakivien tapauksessa, vaipan olosuhteet määrittelevät pitkälti sen, kuinka alkalisten magmojen sulamis- ja kiteytymisvaiheet etenevät alkalisiksi magmakivisarjaksi. Olosuhteissa on kuitenkin joitain juuri alkalikivien syntyyn johtavia muuttuvia tekijöitä. Downes *et al.*n tutkimuksen (2005) mukaan on selviä viitteitä siitä, että Kuolanniemimaan alkalikivet synnyttänyt magma on peräisin vaipan alhaisesta osittaissulamista. Tätä päätelmää tukee myös jotkin Verplanck *et al.*n (2016) luettelemat vanhemmat karbonaattiteja yleisellä tasolla käsittelevät tutkimukset, joissa on osoitettu, että karbonaattimagmoja voi syntyä metasomaattisesta vaipan materiaalista, kun osittaissulaminen on alhaista. Alhaisen osittaissulamisen lisäksi kuumien liuosten eli fluidien tietynlaisten ominaisuuksien on ehdotettu olevan osallisena alkalikivien syntyyn: Dostal (2016) mukaan alkalipitoiset fluidit voivat hydrotermisessä muuttumisessa saada aikaan mineraalien korvautumista alkalipitoisempaan muotoon.

Yhtenä oleellisena tekijänä syvältä vaipasta purkautuvien fluidien viskositeetti vaikuttaa alkalikivien syntyyn usealla tavalla (Middlemost, 1985; Spera, 1981). Middlemostin (1985) mukaan fluidien alhainen viskositeetti voi aiheuttaa magmassa esimerkiksi metasomatoosia. Alkalimagmojen vuorovaikutus muun magman kanssa aiheuttaaakin alkalista metasomatoosia, jolloin syntyy feniittiä (Dostal, 2016). Feniittiä esiintyy myös Kuolan niemimaan alkalkivikompleksien yhteydessä kompleksin ja isäntäkiven muuttumisrajana feniittikehänä. Magman feniittiytymisen lisäksi metasomatoosi voi tuottaa alkalikivien myöhempään syntyyn sopivaa materiaalia tai laukaista primäärien alkalimagmojen synnyn (Middlemost, 1985). Tämän lisäksi esimerkiksi Speran arvion

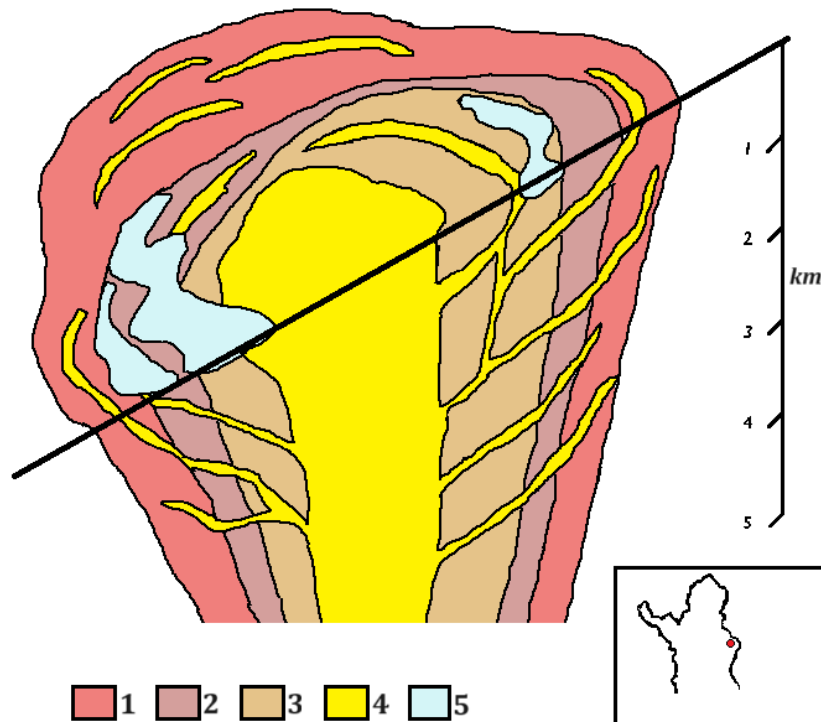
(1981) mukaan alhaisen viskositeetin omaavien fluidien kuljettama lämpö voisi fluidien purkautuessa kuoreen mahdollisesti tuottaa kaikkia mahdollisia alkalimagmoja.

Alkalikivien kirjo ja kompleksien rakenteet viittaavat siihen, että magmaattista toimintaa on tapahtunut useissa jaksoissa (Arzamastsev, 2008; Salvi *et al.*, 2005). Vaikka provinssin alkalikompleksit ovat syntyneet suhteellisen lyhyessä ajassa ja melko samoihin aikoihin, niin kompleksien synty on tapahtunut monissa eri vaiheissa, joihin on vaikuttanut alustavasti tektoninen ympäristö ja sitten pääasiassa magmaattisen toiminnan monimutkaiset prosessit. Provinssin synnyn eri vaiheissa on muodostunut kompleksien eri osia ja erilaisia alkalisia magmakivilajeja. Tämä on havaittavissa alkalikivikompleksien vyöhykkeellisyydestä tai kerroksellisuudesta. Kompleksien ympärillä on myös voinut tapahtua magmojen vuorovaikutusta isäntäkiven kanssa, jolloin on syntynyt metasomatiittia eli metasomaattista kivilajia.

## 3 PROVINSSIN ESIINTYMÄT

### 3.1 Sokli

Itä-Lapissa Savukosken kunnassa sijaitseva Sokli on yksi Suomen alkalikivimassiiveista Iivaaran ja Siilinjärven ohella (Papunen *et al.*, 1986). Se on suhteellisen suurikokoinen karbonaattimassiivi, jota on tutkittu jo monta vuotta sen löytymisestä eli vuodesta 1967 asti (Vartiainen, 1998). O'Brienin ja Hyvösen (2015) mukaan Sokli on Kuolan niemimaan suurin karbonaatti-intruusio, ja heidän arvioltaan se voisi mahdollisesti olla myös maailman suurin. Karbonaatti-intruusio on halkaisijaltaan 2,5 km leveä, pinta-alaltaan jopa noin 20 km<sup>2</sup> ja jatkuu 7 kilometrin syvyydelle (O'Brien *et al.*, 2005; Finnish Minerals Group).



Kuva 2. Poikkileikkaus Soklin esiintymästä mukailten Vartiasta (1998). Selitteet: 1. Feniitti, 2. Metasomaattinen kivilaji, 3. Metakarbonaatti, 4. Karbonaatti, 5. Fosforimalmi.

Vartiainen (1998) kuvauksen mukaan Soklin esiintymä muistuttaa yksinkertaistettuna muodoltaan suppiloa, jossa on erilaisia vyöhykkeitä (kuva 2). Eri vyöhykkeissä kulkee juonia ja mineralisaatiolinsejä. Esiintymän ydin on muuta kiviainesta nuorempaa magmaattista karbonaattia, joka kapenee alaspäin mentäessä. Karbonaattiydintä ympäröi magman muuttama metasomaattinen karbonaatti eli metakarbonaatti, joka on syntynyt magman ja fluidien liikkuaessa pois karbonaattiytimeistä (O'Brien ja Hyvönen, 2015). Karbonaattista on prosessin myötä korvautunut ja syrjäytynyt tiettyjä aineita, mikä on synnyttänyt muuttunutta kiviainesta (Vartiainen, 1998). Karbonaattivyöhykkeen ympärillä on metasomaattisia ultramafisia silikaattikiviä, jota on muodostunut, kun alkuperäisen intruusion ultramafisissa kivissä on tapahtunut niin ikään korvautumista (O'Brien *et al.*, 2005). Tämän prosessin myötä silikaattivyöhykkeeseen muodostui Vartiainen (1998) mukaan esimerkiksi melkein puhdasta flogopiittikiveä, eli eräänlaista kiillerikasta kiveä. Kompleksin uloin osa on feniittikehä, joka on muodostunut koko



kompleksia ympäröivien kivilajien, kuten amfiboliittien ja graniittigneissin, metasomatoosin vaikutuksesta. Feniittikehä noin kilometrin paksuisena on tavallista laajempi (Korsakova *et al.*, 2012; Vartiainen, 1998).

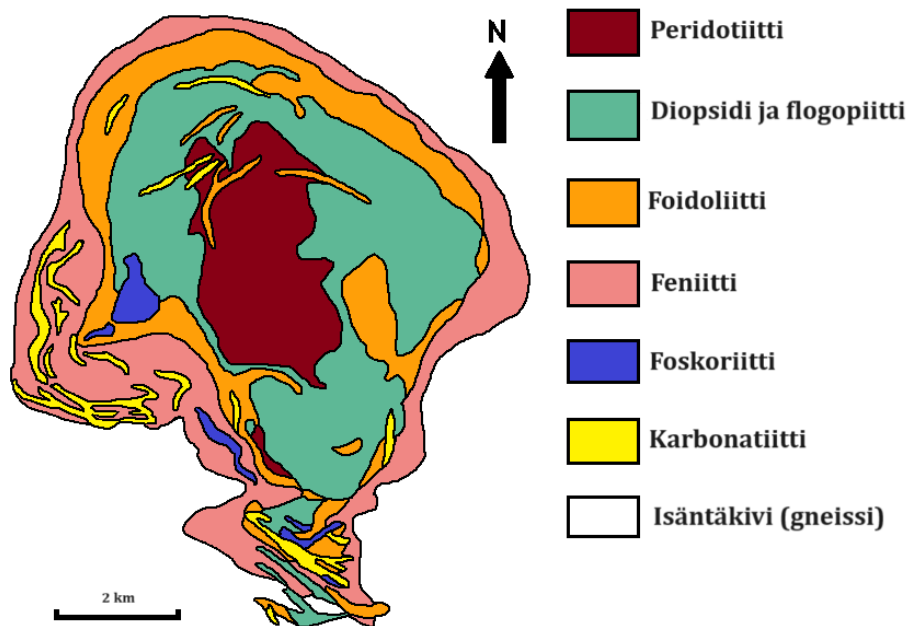
Soklin alueella on tapahtunut rapautumista niin kallio- kuin maaperässäkin, ja rapautumisella on ollut merkitystä esiintymän mineralogiaan. Korsakova *et al.*n (2012) ja Vartiaisen (1998) mukaan Soklia peittää 26 metrin paksuinen regoliittinen kerros. Termi regoliittinen tarkoittaa, että kerrostuma on syntynyt rapautumisesta ja rikastumisesta (Vartiainen, 1998). Rapautuminen on tapahtunut trooppisissa olosuhteissa silloin, kun Sokli on ollut päiväntasaajan alueilla (O'Brien ja Hyvönen, 2015; Vartiainen, 1998). Karbonaatiitti-intruusion yläosan rapautumisen myötä mineraaliesiintymä on rikastunut tietyistä alkuaineista, kuten fosforista, REE-elementeistä, niobiumista, tantaalista ja raudasta (Paakkola *et al.*, 1986).

Tärkeimmät mahdolliset malmimineraalit Soklin esiintymässä ovat uraanipitoinen apatiitti, pyrokloori, magnetiitti, baddeleyiitti sekä muutamat muut (Korsakova *et al.*, 2012). Myös karbonaatiittia ympäröivää feniittikehää pidetään nykyisin malmipotentialina eli mahdollisesti taloudellisesti hyödynnettävänä REE-metallien lähteenä, sillä kehään on vielä itse varsinaisen intruusion tunkeutumisen jälkeen tunkeutunut uusia karbonaatiittijuonia (Finnish Minerals Group; Sarapää, 2015).

## 3.2 Kovdor

Kovdorin (*joissain lähteissä Kouteron*) massiivi sijaitsee Venäjän Kouteron kaupungin alueella melko lähellä Suomen rajaa ja Soklia. Kovdor on Kuolan niemimaalla esiintyvistä alkalikivikomplekseista erityinen siinä mielessä, että se on magmakivisarjansa ja sen säilyneisyyden perusteella edustavin. Esimerkiksi Downes *et al.*n (2005) mukaan Kovdorin kompleksista löytyy alkalisen magmatismien erilaisia kehitysvaiheita edustavia kiviä, minkä takia se on arvokas tutkimuksen kohde. Myös Zaitsev *et al.* (2014) korostaa tutkimuksessaan Kovdorin foskoriittien erityistä edustavuutta ja monipuolisuutta.

Massiivi on 42 km<sup>2</sup> kokoinen ultramafinen alkalikivi-intruusio (Broom-Fendley *et al.*, 2020), joka Korsakova *et al.*n kuvauksen (2012) mukaan on tunkeutunut graniittigneissiin. Massiivin keskusta sisältää peridotiittia eli Hytösen (1999) mukaan tummista mineraaleista, kuten oliviinista, sarvivälkkeestä ja pyrokseenista, koostuvaa syväkivilajia. Peridotiitin ympärillä on karbonatiittia, foskoriittia sekä metasomaattisia kiviä (Ivanyuk *et al.* 2019). Karbonatiittijuonia esiintyy runsain määrin massiivin länsi- ja lounaisosissa. Kuten Soklin esiintymässä, myös Kovdorin massiivin ympärillä kiertää vaihtelevan laajuinen feniittikehä, joka on syntynyt ytimen ja intruusiota ympäröivän isäntäkiven vuorovaikutuksessa ja siitä seuranneessa metasomaattisessa muuttumisessa (Ivanyuk *et al.* 2019). Keskustan läheisyydessä on myös tapahtunut muuttumista, josta on syntynyt vyöhyke flogopiittia ja diopsidia, ja kauempana keskustaa esiintyy foidoliittia, kuten kuvasta 3 voidaan havaita. Foidoliitti on nimensä mukaisesti paljon foideja sisältävä kivilaji (Hytönen, 1999).

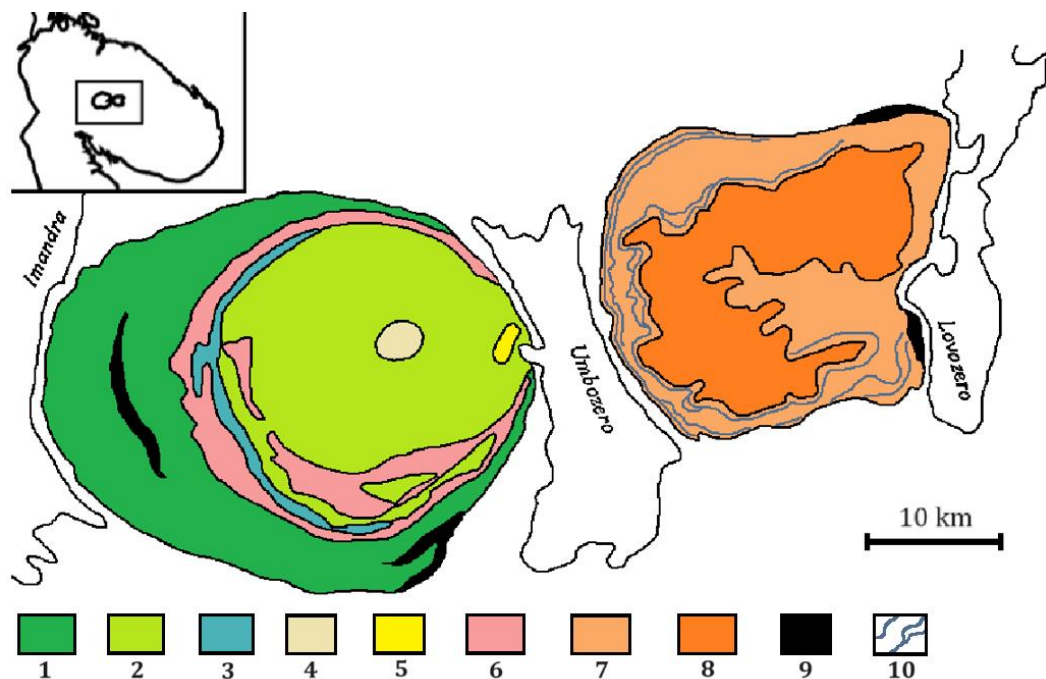


Kuva 3. Kovdorin massiivi ylhäältä päin kuvattuna Ivanyukin (2019) julkaisua mukailleen.

Kovdorin massiivissa on kolme eri malmiä: apatiittimalmi, baddeleyiitti-apatiitti-magneetiittimalmi ja niobimalmi (Korsakova *et al.* 2012). Niobimalmiesiintymiä Kovdorin massiivissa on Korsakova *et al.*n (2012) mukaan kolme. Ne ovat kooltaan kuitenkin melko pieniä, eivätkä niinkään taloudellisesti kannattavia (Linnen *et al.*, 2014). Näiden lisäksi Kovdorissa louhitaan rautaa (Linnen *et al.*, 2014; Eilu *et al.*, 2012), jota saadaan esimerkiksi karbonaateissa olevasta magneetiitista (Papunen *et al.*, 1986).

### 3.3 Hiipinä ja Lovozero

Alkalikiviprovinssin suurimmat kompleksit ovat Umbozero-järven molemmin puolin toisiaan lähemmäs sijaitsevat Lovozeron ja Hiipinän kompleksit (Salvi *et al.*, 2005). Kuolan niemimaan alkalikivikompleksien lisäksi ne ovat Nivinin sanojen (2019) mukaan jopa maailman suurimmat alkalimassiivit. Yhdessä näiden kompleksien pinta-ala on Salvi *et al.*n (2005) arviolta jopa noin 2000 neliökilometriä, Hiipinän ollessa noin 1346 km<sup>2</sup> (Korsakova *et al.*, 2012) ja Lovozeron noin 650 km<sup>2</sup> (Dostal, 2016; Mikhailova *et al.*, 2021). Hiipinä ja Lovozero ovat maailmalla tunnettuja komplekseja niiden mineraalien runsaudesta, ja esimerkiksi Nivinin (2019) mukaan niissä tavattuja erilaisia mineraaleja on jopa 500. Tähän lukuun kuuluu hyvin harvinaisiakin mineraaleja. Komplekseissa on myös monia malmiesiintymiä, ja molempia massiiveja on alettu louhimaan 20–30-lukujen paikkeilla (Eilu *et al.*, 2012).



Kuva 4. Yksinkertaistettu malli Hiipinän (vasemmalla) ja Lovozeron (oikealla) komplekseista mukailen Arzamastsev *et al.* (2001) ja Korsakov *et al.* (2012). Selitteet: 1. Khibiniitti, 2. Foyaitiitti/nefeliinisyeeniitti, 3. Ijoliitti, 4. Pulaskiitti, 5. Karbonatiitti, 6. Kalsiittinen nefeliinisyeeniitti, 7. lujavriitti-foyaitiitti-uritiitti -kerroskompleksi, 8. eudialyytti-lujavriitti, 9. Alkalinen ultramafinen kivi, 10. malmia (lopariittia) sisältäviä horisontteja

Sekä Lovozero että Hiipinä ovat rakenteeltaan rengasmaisia apatiittisia nefeliinisyeeniitti-plutoneja (Kramm *et al.*, 1993). Kuvassa 4 nähdään massiivien rengasmaisuus. Ne ovat purkautuneet arkeeseen graniittigneisiin (Mikhailova *et al.*, 2021), ja läheisestä sijainnista huolimatta komplekseilla on eri juuret, eli ne eivät ole syntyneet täysin samasta lähteestä tai purkauksesta (Salvi *et al.*, 2005).

Hiipinän massiivissa on useita kivilajivyöhykkeitä, joiden ikä nuorenee kompleksin keskipistettä kohden. Aivan massiivin keskisosissa on pulaskiittia (Salvi *et al.*, 2005; Arzamastsev *et al.*, 2001), jota ympäröi nefeliinisyeeniitti ja foyaiitti (Korsakova *et al.*, 2012). Tätä aluetta ympäröi pirstaleisemmista ja kapeammista rengasmaisista vyöhykkeistä koostuva alue, jossa esiintyy ijoliittia ja kalsiittista nefeliinisyeeniittiä (Arzamastsev, 2001). Beard *et al.*n (2023) sekä Korsakova *et al.*n (2012) mukaan Hiipinän apatiittimalmiesiintymät sijoittuvat tälle kyseiselle alueelle. Massiivin vyöhykkeistä uloimmilla esiintyy nefeliinisyeeniitin lisäksi khibiniittiä ja alkalista syeniittiä (Korsakova *et al.*, 2012). Hiipinän apatiittiesiintymistä Korsakova *et al.*n (2012) mukaan kuutta louhitaan. Nämä malmit sisältävät monia metalleja, kuten niobia, alumiinia ja tantaalia, mutta pääasiassa vain apatiittia kerätään talteen (Korsakova *et al.*, 2012). Hiipinän massiivi sisältää myös paikoittain strontiumia, ja Hiipinä on Venäjän tärkein strontiumin lähde (Eilu *et al.*, 2012).

Lovozeron massiivissa on vaakatasossa olevia magmaattisia kerroksia, ja sen kerrosyksiköt muodostuivat kahdessa vaiheessa (Dostal, 2016; Korsakova *et al.*, 2012). Korsakova *et al.*n (2012) mukaan Lovozero on muodostunut seuraavasti: Ensin on syntynyt noin 1,7–5 km paksu primääri kerroskompleksi lujavriittia, foyaiittia ja urtiittia. Nämä kerrokset ovat rytmisiä eli niissä vuorottelevat edellä mainitut kivilajit toistuvasti lustosavien tapaan niin, että alimpana on urtiitti, keskellä foyaiitti ja ylimpänä on lujavriitti. Myöhemmin kerroskompleksiin tunkeutui eudialyytti-lujavriittiä, joka jäi ensimmäisenä syntyneiden kerrosten päälle noin 800–1000 metrin paksuiseksi

kerrokseksi muodostaen massiivin toisen kerroskompleksin (Korsakova *et al.*, 2012). Taloudellisesta näkökulmasta vanhempi kerroskompleksi on mielenkiintoisempi, sillä kerroksissa urtiitin ja lujavriitin kontaktissa sijaitsee harvinaisten maametallien rikastumiseen suotuisaa pegmatiittia (Mikhailova *et al.* 2021). Korsakova *et al.*n (2012) mukaan Lovozeron massiivin tärkein malmimineraali on lopariitti (Korsakova *et al.*, 2012).

## 4 ALKALIKIVIKOMPLEKSIEN POTENTIAALI

## TALOUDELLINEN

Ihmiskunnan metallien tarve kasvaa jatkuvasti (Graedel *et al.*, 2014), ja erityisesti uusiutuvaan energiaan siirtyminen sekä fossiilipolttoaineiden vähentäminen vaatii tietynlaisia kriittisiä raaka-aineita (Beard *et al.*, 2023). Eurooppa-neuvoston (2024) mukaan kriittiset raaka-aineet tarkoittavat taloudellisesti paitsi merkittäviä, myös tuonnin kannalta korkean riskin omaavia raaka-aineita. Tähän lukeutuvat muun muassa fosfori, harvinaiset maametallit ja HFSE-aineet, jotka ovatkin alkalikivikomplekseihin liittyviä varoja.

### 4.1 REE

REE-metallit eli harvinaiset metallit (*rare earth elements*) ovat 17 alkuaineen ryhmä, joka koostuu lantanoideista yhdessä skandiumin ja yttriumin kanssa (Wall, 2014; Kihlman ja Lauri, 2013). Ne ovat pieninä pitoisuuksina melko yleisiä maan kuoressa, mutta niihin liitetty sana ”harvinainen” viittaa niiden heikkoon taloudelliseen hyödynnettävyyteen. Kihlmanin ja Laurin (2013) mukaan tämä johtuu siitä, että harvinaiset maametallit esiintyvät erilaisten mineraalien ionien korvaajina. Louhittavaksi kelpaavat REE-esiintymät eivät siis ole kovin yleisiä, koska metallipitoisuudet ovat hyvin pieniä, ja esiintymässä täytyy olla riittävän paljon mineralogisesti muuttuneita mineraaleja, joissa ionien korvautumista on tapahtunut. Mineralogista muuttumista ja REE-metallien uudelleenliikkumista voi aiheuttaa rapautuminen, metamorfoosi, metasomatoosi tai hydrotermiset liuokset (Sarapää *et al.*, 2015).

Tällaisia prosesseja on tapahtunut alkalikiviprovinssin synnyn ja kehityksen aikana, minkä takia alkalikivikompleksit ovat usein rikastuneet harvinaisista maametalleista. Alkalikivet ja karbonaatiitit ovat yleisellä tasolla taloudellisesti merkittäviä siinä mielessä, että kivilajiryhmänä ne ovat tärkeimpiä harvinaisten maametallien lähteitä (Beard *et al.*, 2023; Elliott *et al.* 2018). Verplanck *et al.* korostaa artikkelissaan (2016), että erityisesti karbonaateissa tavataan kaikista magmakivistä korkeimpia REE-pitoisuuksia.

Taloudellisen hyödyntämisen mahdollisuus edellyttää esiintymältä tiettyjä ominaisuuksia, kuten REE-metallien jakautumista suotuisalla tavalla ja malmia isännöivän kiven tai mineraalin prosessoitavuutta (Sarapää *et al.*, 2015). Useiden tutkijoiden (Dostal, 2016; Sarapää *et al.*, 2015; Kihlman ja Lauri, 2013) mukaan taloudellisesta näkökulmasta otollisimpia mineraaleja REE-metalleille ovat monatsiitti, kaoliniitti, eudialyytti, lopariitti ja bastnäsiitti, joita esiintyy etenkin alkalikivikompleksien yhteydessä. Esimerkiksi Lovozerossa louhittavan lopariitin lisäksi eudialyytti sisältäisi paikoin REE-metalleja, mutta haastavan eroteltavuuden takia eudialyyttia ei olla hyödynnetty (Dostal, 2016). Vuonna 2023 tilanne eudialyytin suhteen oli edelleen sama (Beard *et al.*, 2023). Eroteltavuuden vaikeus onkin yleisesti merkittävä ongelma REE-metallien hyödynnettävyydessä, sillä niiden erottamiseen ja talteenottoon vaadittaisiin kehittyntä teknikkaa, jota ei yleensä ole kannattavaa toteuttaa tai sopivaa tekniikka ei vain ole (Sarapää *et al.*, 2015). Poikkeuksena tähän ovat sedimenttiset fosfaattimalmit, joissa REE-metallit ovat suhteellisen helposti eroteltavissa (Emsbo *et al.*, 2016).

REE-metallien huonoa hyödynnettävyyttä kuvastaa myös hyvin vähäinen karbonaattiesiintymiin perustettujen kaivosten määrä. Esimerkiksi vuonna 2016 Verplanck *et al.*n mukaan tilanne oli se, että yli 500 tunnetusta esiintymästä vain neljässä



louhitaan harvinaisia maametalleja. Kihlmanin ja Laurin laatimassa raportissa (2013) kerrotaan, että harvinaisia maametalleja tuottaa vain harva kaivos, ja valtaosa tuotannosta tulee Kiinasta. Kuolan niemimaan merkittävimmät kompleksit REE-metallien osalta ovat Hiipinän ja Lovozeron kompleksit (Zaitsev *et al.*, 2014). Zaitsev *et al.*n (2014) mukaan Venäjältä voisi tulevaisuudessa tulla merkittävä REE-elementtien tuottaja. Wall (2014) myös arvioi, että mahdollisesti kiinnostus REE-metallien tuottamiseen jo tuotettavien metallien sivutuotteena kasvaa entisestään tulevaisuudessa.

## 4.2 Niobi ja tantaali

REE-metallien lisäksi alkalikiviin sekä karbonatititeihin voi rikastua HFSE-aineita, eli niobia, tantaalia, uraania ja zirkonia (Mikhailova *et al.*, 2021). Näistä esimerkiksi niobi ja tantaali ovat paljon puhuttuja sekä tärkeitä raaka-aineita monissa ihmiskunnan tarvitsemissa tuotteissa. Dostalin ja Gerelin (2022) listaamia käyttökohteita niobille ovat muun muassa rakenteisiin ja putkistoihin käytettävät ominaisuuksiltaan parannellut metalliseokset sekä erittäin voimakkaat magneetit. Saman listan mukaan tantaalia hyödynnetään erilaisissa elektroniikan tuotteissa, kuten puhelimissa ja tietokoneissa, elektrolyttisissä kondensaattoreissa, sekä niobin tapaan erilaisissa metalliseoksissa.

Niobi ja tantaali ovat sekä kemiallisilta että fysikaalisilta ominaisuuksiltaan melko samankaltaisia (Dostal ja Gerel, 2022; Kihlman ja Lauri, 2013). Niiden yhteisiä ominaisuuksia ovat esimerkiksi Kihlmanin ja Laurin (2013) luettelemat korkea sulamispiste, johtavuus ja korroosion kestäminen. Niobi ja tantaali eivät tyypillisesti esiinny luonnossa vapaina metalleina, vaan useimmiten oksideihin sitoutuneina (Linnen

*et al.*, 2014). Dostalin ja Gerelin (2022) mukaan niobi ja tantaali esiintyvät useimmiten yhdessä. Niistä rikastuneita kivilajeja ovat tyypillisesti karbonaattit, alkaliset tai peralkaliset graniitit ja syeniitit (Dostal ja Gerel, 2022; Linnen *et al.*, 2014), jotka ovat alkalikiviprovinsseille ominaisia kivilajeja. Linnen *et al.* tarkentaa tekstissään (2014), että niobille suotuisimmat esiintymät ovat pääasiassa karbonaattiteja, kun taas hyviä tantaaliesiintymiä tavataan etenkin peralumiinisissa pegmatiiteissa.

Maailmanlaajuisella tasolla valtaosa niobintuotannosta, esimerkiksi O'Brienin (2015) mukaan jopa 99 %, louhitaan kolmessa kaivoksessa Brasiliassa ja Kanadassa. Näissä kaivoksissa merkittävin malmi niobin louhinnassa on pyrokloori (O'Brien, 2015), joka onkin esimerkiksi Dostalin ja Gerelin (2022) sekä Linnen *et al.*n (2014) mukaan mineraaleista tärkein niobin lähde kolumbiitin ohella. Pyroklooria esiintyy myös Kuolan niemimaan monissa alkalikivikomplekseissa. Tantaalin osalta Dostalin ja Gerelin (2022) mukaan merkittävin mineraali louhintaan on tantalitti. Maailmanlaajuisesti merkittävimmät esiintymät ovat Australiassa ja Brasiliassa, mutta Fennoskandian alueella tärkeimmät tantaalia sisältävät esiintymät ovat Kuolan niemimaalla (Kihlman ja Lauri, 2013).

### 4.3 Fosfori

Maapallon väkiluvun kasvaminen lisää paineita ruuantuotantoon ja maanviljelyyn, johon tarvitaan paljon lannoitteita (Emsbo *et al.*, 2016). Alkalikiviprovinsit ovat myös lannoiteteollisuuden kannalta merkittäviä. O'Brienin (2015) mukaan alkalikivikomplekseissa esiintyvistä erilaisista kivilajeista saatava apatiitti on hyvin

tärkeä fosforipentoksidin ( $P_2O_5$ ) lähde. Yhdisteestä kerättävä fosfori on uusiutumaton luonnonvaraa ja yksi lannoitteiden pääraaka-aineista (Broom-Fendley et al, 2020). Fosforia sisältävät kivet ja mineraalit eivät yleensä rajoitu pelkästään alkalisien kompleksien karbonaattiosaan, vaan korkeita fosforipitoisuuksia voi olla myös kompleksien silikaattikivissä (O'Brien, 2015). Kuolan niemimaan alkalikiviprovinssilla on suuria apatiittia sisältäviä massiiveja, ja esimerkiksi Hiipinän massiivissa on maailman suurimpiin kuuluva apatiittiesiintymä (Dostal, 2016). Myös Soklissa on karbonaattijuonia ja regoliittia, joissa voisi olla Finnish Minerals Group:n tutkimusten mukaan potentiaalia fosforin louhintaan. On kuitenkin huomionarvoista, että maailmanlaajuisesti merkittävimmät fosforin lähteet ovat meriympäristöjen sedimenttiset fosforiitit eli fosforipitoiset kivet (Emsbo *et al.*, 2016; O'Brien, 2015).

## 5 YHTEENVETO

Alkalikivet ovat suhteellisen harvinaisen ryhmä magmakiviä. Erityiset olosuhteet ovat mahdollistaneet alkalimagmojen kehittymisen erilaisiksi alkalikivilajeiksi, joista muodostui alkalikivikomplekseja ja laajemmalla mittakaavalla itse alkalikiviprovinssi. Kuolan niemimaan alkalikiviprovinssi on laaja, ja siellä esiintyy monipuolisesti erilaisia alkalikivilajeja sekä erityyppisiä komplekseja. Muutamat komplekseista ovat jopa maailman mittapuulla erityisiä; Sokli on peräti maailman suurin karbonaattiesiintymä, Hiipinä ja Lovozero maailman suurimmat alkalimassiivit, ja Kovdor puolestaan magmasarjojen ja foskoriittien kehitysten kannalta hyvin merkittävä tutkimuskohde.

Joidenkin alkalikivikompleksien yhteydestä löytyy perusmetalliesiintymiä, mutta taloudellisesti erityisen alkalikivistä tekee harvinaisempien raaka-aineiden esiintymisen ja niiden poikkeuksellisen korkeat pitoisuudet. Tällaisista raaka-aineista merkittävimmät ovat harvinaiset maametallit, niobi, tantaali ja apatiitti. Näitä raaka-aineita ei louhita kovin monessa kaivoksessa, vaan niistä monen kohdalla tuotto keskittyy pääasiassa muutamiin esiintymiin tai maihin. Joidenkin raaka-aineiden, erityisesti harvinaisten maametallien, kohdalla haasteena on pienten pitoisuuksien lisäksi metallien hankala eroteltavuus rikastusvaiheessa. Tulevaisuudessa edellä lueteltujen raaka-aineiden kysyntä kasvaa, ja alkalikivet voisivat siten olla enenevässä määrin taloudellista potentiaalia omaavia esiintymiä muutamista haasteista huolimatta.

## LÄHDELUETTELO

Arzamastsev, A., Glaznev, V.N., Arzamastseva, L.V. & Bea, F., 2001. Kola alkaline province in the Paleozoic: evaluation of primary mantle magma composition and magma generation conditions [verkkolehti]. Russian Journal of Earth Sciences 3 (1), S. 1–32. Saatavilla:

<https://rjes.wdcb.ru/v03/tje01054/tje01054.pdf> [viitattu 1.1.2024]

Arzamastsev, A., Yakovenchuk, V. & Ivanyuk, G., 2008. The Khibina and Lovozero massifs: Geology and unique mineralization [verkkodokumentti]. 33 IGC excursion No 47. Saatavilla:

[https://www.researchgate.net/publication/237730754\\_The\\_Khibina\\_and\\_Lovozero\\_alkaline\\_massifs\\_Geology\\_and\\_unique\\_mineralization](https://www.researchgate.net/publication/237730754_The_Khibina_and_Lovozero_alkaline_massifs_Geology_and_unique_mineralization) [viitattu 1.1.2024]

Beard, C.D., Goodenough, K.M., Borst, A.M., Wall, F., Siegfried, P.R., Deady, E.A., Pohl, C., Hutchison, W., Finch, A.A., Walter, B.F., Elliott, H.A.L. & Brauch, K., 2023. Alkaline-Silicate REE-HFSE Systems [verkkodokumentti]. Economic Geology 118 (1), S. 177–208. Saatavilla:

<https://doi.org/10.5382/econgeo.4956>

Broom-Fendley, S., Siegfried, P.R., Wall, F., O'Neill, M., Brooker, R.A., Fallon, E.K., Pickles, J.R. & Banks, D.A., 2020. The origin and composition of carbonatite-derived carbonate-bearing fluorapatite deposits [verkkodokumentti]. Mineralium Deposita 56, S. 863–884. Saatavilla:

<https://doi.org/10.1007/s00126-020-01010-7>

Burke, K., Roberts, D. & Ashwal, L.D., 2007. Alkaline rocks and carbonatites of northwestern Russia and northern Norway: Linked Wilson cycle records extending over two billion years [verkkodokumentti]. Tectonics 26 (4). Saatavilla: <https://doi.org/10.1029/2006TC002052>

Dostal, J. & Gerel, O., 2022. Occurrences of Niobium and Tantalum Mineralization in Mongolia [verkkodokumentti]. Minerals 2022, 12 (12), 1529. S. 1–21. Saatavilla:

<https://doi.org/10.3390/min12121529>

Dostal, J., 2016. Rare Metal Deposits Associated with Alkaline/Peralkaline Igneous Rocks.

Teoksessa: Verplanck, P.L. & Hitzman, M.W. (toim.), Rare Earth And Critical Elements In Ore Deposits. Reviews in Economic Geology, 18. Society of Economic Geologists, Inc. S.33–54.

ISBN: 978–1–629492–18–6

Downes, H., Balaganskaya, E., Beard, A., Liferovich, R. & Demaiffe, D., 2005. Petrogenetic processes in the ultramafic, alkaline, and carbonatitic magmatism in the Kola Alkaline Province: a review [verkkolehti]. *Lithos* 85 (1–4) S. 48–75. Saatavilla:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2005.03.020>

Eilu, P., Boyd, R., Hallberg, A., Korsakova, M., Krasotkin, S., Nurmi, P.A., Ripa, M., Stromov, V. & Tontti, M., 2012. Mining history of Fennoscandia. Teoksessa: Eilu, P. (toim.) *Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia*. Geological Survey of Finland, Special paper 53.

Espoo: Geological Survey of Finland, S. 19–32. ISBN 978-952-217-174-0

Elliott, H.A.L., Wall, F., Chakhmouradian, A.R., Siegfried, P.R., Dahlgren, S., Weatherley, S., Finch, A.A., Marks, M.A.W., Dowman, E. & Deady, E., 2018. Fenites associated with carbonatite complexes: A review [verkkolehti]. *Ore Geology Reviews*, 93, S. 38–59. Saatavilla:

<https://doi-org.pc124152.oulu.fi:9443/10.1016/j.oregeorev.2017.12.003>

Emsbo, P., McLaughlin, P.I., du Bray, E., Anderson, E.D., Vandenbroucke, T.R.A. & Zielinski, R.A., 2014. Rare Earth Elements in Sedimentary Phosphorite Deposits: A Global Assessment. Teoksessa: Verplanck, P.L. & Hitzman, M.W. (toim.), *Rare Earth And Critical Elements In Ore Deposits*. *Reviews in Economic Geology*, 18. Society of Economic Geologists, Inc. S.101–114. ISBN: 978–1–629492–18–6

Eurooppa-neuvosto. EU:n kriittisiä raaka-aineita koskeva säädös EU:n tulevien toimitusketjujen tueksi [verkkosivu]. Saatavilla: <https://www.consilium.europa.eu/fi/infographics/critical-raw-materials/#0> [viitattu 17.4.2024]

Finnish Minerals Group. Sokli on ainutlaatuinen mineraaliesiintymä [verkkosivu]. Saatavilla:

<https://www.mineralsgroup.fi/fi/liiketoiminta/sokli.html> [viitattu 6.4.2024]

Graedel, T.E., Gunn, G. & Espinoza, L.T., 2014. Metal resources, use and criticality. Teoksessa: Gunn, G. (toim.) *Critical Metals Handbook*. Nottingham, UK: British Geological Survey, S. 1–19. ISBN: 978-0-470-67171-9

Hytönen, K., 1999. Suomen mineraalit [verkkoaineisto]. Geologian Tutkimuskeskus.

Erillisjulkaisu. 399 s. ISBN 951-690-745-8. Saatavilla:

[https://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej\\_031.pdf](https://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej_031.pdf)

Ivanyuk, G.Y., Yakovenchuk, V.N., Panikorovskii, T.L., Konoplyova, N., Pakhomovsky, Y.A., Bazai, A.V., Bocharov, V.N. & Krivovichev, S.V., 2019. Hydroxynatropyrochlore,  $(\text{Na,Ca,Ce})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH})$ , a new member of the pyrochlore group from Kovdor phoscorite-carbonatite pipe, Kola Peninsula, Russia [verkkodokumentti]. *Mineralogical Magazine* 83, 107–113: Cambridge University Press. Saatavilla: <http://dx.doi.org/10.1180/minmag.2017.081.102>

Kihlman, S. & Lauri, L.S., 2013. Kriittiset metallit ja mineraalit sekä niiden alueellinen jakautuminen ja esiintymispotentiaali Suomen ja Fennoskandian alueilla [verkkodokumentti]. Geologian Tutkimuskeskus. Saatavilla: [https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/102\\_2013.pdf](https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/102_2013.pdf)

Korsakova, M., Krasotkin, S., Stromov, V., Iljana, M., Lauri, L. & Nilsson, N.P., 2012. Metallogenic areas in Russian part of the Fennoscandian shield. Teoksessa: Eilu, P. (toim.) *Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia*. Geological Survey of Finland, Special paper 53. Espoo: Geological Survey of Finland, S. 343–395. ISBN 978-952-217-174-0

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 [verkkodokumentti]. *Lithos*, 30: 33-44. Saatavilla: [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(93\)90004-V](https://doi.org/10.1016/0024-4937(93)90004-V)

Krasnova, N.I., Petrov, T.G., Balaganskaya, E.G., Garcia, D., Moutte, J., Zaitsev, A.N. & Wall, F., 2004. Introduction to phoscorites: occurrence, composition, nomenclature and petrogenesis [verkkodokumentti]. Teoksessa: Zaitsev, A. & Wall, F. (toim.) *Phoscorites and Carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province*. Lontoo: Mineralogical Society, S 43–72. ISBN 0 903056 22 4. Saatavilla: <https://doi.org/10.1180/MSS.10.02>

Kähkönen, Y. & Lehtinen, M., (1998). Geologian peruskäsitteitä [verkkodokumentti]. Teoksessa: Lehtinen, M., Nurmi, P. & Rämö, T. (toim.), *Suomen kallioperä: 3000 vuosimiljoonaa*. Helsinki, Suomen Geologinen Seura ry. S. 23–91. Saatavilla: <https://www.geologinenseura.fi/sites/geologinenseura.fi/files/ch2.pdf>

Lahtinen, R., 2012. Main geological features of Fennoscandia. Teoksessa: Eilu, P. (toim.) *Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia*. Geological Survey of Finland, Special paper 53. Espoo: Geological Survey of Finland, S. 13–18. ISBN 978-952-217-174-0

Lehtinen, M., Nurmi, P. & Rämö, T., 1998. Kallioperägeologista sanastoa [verkkodokumentti].

Teoksessa: Lehtinen, M., Nurmi, P. & Rämö, T. (toim.), Suomen kallioperä: 3000 vuosimiljoonaa. Helsinki, Suomen Geologinen Seura ry. S. 357–370. Saatavilla:

<https://www.geologinenseura.fi/sites/geologinenseura.fi/files/sanasto.pdf>

Linnen, R., Trueman, D.L. & Burt, R., 2014. Tantalum and niobium. Teoksessa: Gus Gunn (toim.), Critical metals handbook. Nottingham, UK: British Geological Survey, S. 3361-384. ISBN 978-0-470-67171-9

Luukkonen, E.J. & Sorjonen-Ward, P., 1998. Arkeinen kallioperä – ikkuna 3 miljardin vuoden taakse [verkkodokumentti]. Teoksessa: Lehtinen, M., Nurmi, P. & Rämö, T. (toim.) Suomen kallioperä: 3000 vuosimiljoonaa. Helsinki, Suomen Geologinen Seura ry. S. 105–139.

Saatavilla: <https://www.geologinenseura.fi/sites/geologinenseura.fi/files/ch4.pdf>

Middlemost, E.A.K., 1985. Magmas and magmatic rocks: An introduction to igneous petrology. New York: Longman Inc. 266 s. ISBN 0-582-30080

Mikhailova, J.A., Pakhomovsky Y.A., Goychuk, O.F., Kalashnikov, A.O., Bazai, A.V. & Yakovenchuk, V.N., 2021. Pre-Pegmatite Stage in Peralkaline Magmatic Process: Insights from Poikilitic Syenites from the Lovozero Massif, Kola Peninsula, Russia [verkkodokumentti].

Minerals, 11(9), 974. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/min11090974>

Nivin, V.A., 2019. Occurrence forms, composition, distribution, origin and potential hazard of natural hydrogen-hydrocarbon gases in ore deposits of the Khibiny and Lovozero massifs: A review. Minerals 9 (9), 535. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/min9090535>

O'Brien, H., 2015. Deposits related to carbonatites and kimberlites. Introduction to carbonatite deposits of Finland. Teoksessa: Maier, W.D., Lahtinen, R. & O'Brien, H. (toim.) Mineral Deposits of Finland. Elsevier, S. 291–303. ISBN 978-0-12-410438-9

O'Brien, H. & Hyvönen, E., 2015. The Sokli carbonatite complex. Teoksessa: Maier, W.D., Lahtinen, R. & O'Brien, H. (toim.) Mineral Deposits of Finland. Elsevier S. 305–325. ISBN 978-0-12-410438-9



O'Brien, H.E., Peltonen, P. & Vartiainen, H., 2005. Kimberlites, carbonatites, and alkaline rocks [verkkodokumentti]. Teoksessa: Lehtinen, M., Nurmi, P.A. & Rämö, O.T. (toim.) Precambrian Geology of Finland, Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield Developments in Precambrian Geology. Elsevier B.V., Amsterdam, S. 605–644. Saatavilla: [https://doi-org.pc124152.oulu.fi:9443/10.1016/S0166-2635\(05\)80015-5](https://doi-org.pc124152.oulu.fi:9443/10.1016/S0166-2635(05)80015-5)

Paakkola, J., Piirainen, T. & Piispanen, R., 1986. Teoksessa: Papunen H., Haapala, I. ja Rouhunkoski, P. (toim.) Suomen Malmigeologia – Metalliset malmiesiintymät. Suomen geologinen seura. S. 90–91.

Salvi, S. & Williams-Jones, A.E., 2005. Alkaline Granite-Syenite Deposits [verkkodokumentti]. Teoksessa: Linnen, R.L., & Samson, I.M. (toim.) Rare-Element Geochemistry and Mineral Deposits: Geological Association of Canada, GAC Short Course Notes 17, S. 315–341. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/259195077\\_Alkaline\\_granite-syenite\\_deposits](https://www.researchgate.net/publication/259195077_Alkaline_granite-syenite_deposits) [viitattu 16.4.2024]

Sarapää, O., Kärkkäinen, N., Ahtola, T. & Al-Ani, T., 2015. High-tech minerals in Finland. Teoksessa: Maier, W.D., Lahtinen, R. & O'Brien, H. (toim.) Mineral Deposits of Finland. Elsevier, S. 613–632. ISBN 978-0-12-410438-9

Spera, F.J., 1981. Carbon Dioxide in Igneous Petrogenesis : II. Fluid Dynamics of Mantle Metasomatism. Contributions to Mineralogy and Petrology, 77 (1). S.56–65

Vartiainen, H., 1998. Suomen alkalikivet [verkkodokumentti]. Teoksessa: Lehtinen, M., Nurmi, P. & Rämö, T. (toim.), Suomen kallioperä: 3000 vuosimiljoonaa. Helsinki, Suomen Geologinen Seura ry. S. 286–307. Saatavilla: <https://www.geologinenseura.fi/sites/geologinenseura.fi/files/ch10.pdf>

Vartiainen, H., 1980. The petrography, mineralogy and petrochemistry of the Sokli carbonatite massif, Northern Finland [verkkodokumentti]. Espoo: Geological Survey of Finland. Saatavilla: [https://tupa.gtk.fi/julkaisu/bulletin/bt\\_313.pdf](https://tupa.gtk.fi/julkaisu/bulletin/bt_313.pdf)

Verplanck, P.L., Mariano, A.N. & Mariano, A. Jr., 2016. Rare Earth Element Ore Geology of Carbonatites. Teoksessa: Verplanck, P.L. & Hitzman, M.W. (toim.), Rare Earth And Critical

Elements In Ore Deposits. Reviews in Economic Geology, 18. Society of Economic Geologists, Inc. S. 5–32. ISBN: 978–1–629492–18–6

Vuollo, J. & Huhma, H, 2005. Paleoproterozoic mafic dikes in NE Finland [verkkodokumentti]. Teoksessa: Lehtinen, M., Nurmi, P.A. & Rämö, O.T. (toim.), Precambrian Geology of Finland – Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield. Elsevier B.V., Amsterdam, S. 195–236. Saatavilla: [https://doi-org.pc124152.oulu.fi:9443/10.1016/S0166-2635\(05\)80006-4](https://doi-org.pc124152.oulu.fi:9443/10.1016/S0166-2635(05)80006-4)

Wall, F., 2014. Rare Earth Elements. Teoksessa: Gus Gunn (toim.), Critical metals handbook. Nottingham, UK: British Geological Survey, S. 312-339 ISBN 978-0-470-67171-9

Zaitsev, A.N., Williams, C.T., Jeffries, T.E., Strekopytov, S., Moutte, J., Ivashchenkova, O.V., Spratt, J., Petrov, S.V., Wall, F., Seltmann, R. & Borozdin, A.P., 2014. Rare earth elements in phoscorites and carbonatites of the Devonian Kola Alkaline Province, Russia: Examples from Kovdor, Khibina, Vuorijärvi and Turij Mys complexes [verkkodokumentti]. Ore Geology Reviews 61. S. 204–225. Saatavilla: <https://doi-org.pc124152.oulu.fi:9443/10.1016/j.oregeorev.2014.06.004>