



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **LCT-pegmatiittien syntymekanismit ja esiintyminen Suomessa**

Sonja Marianne Lecler

Geotieteiden Tutkinto-ohjelma (LuK) 2020

Kandidaatin työ

Tammikuu 2023

# 1 TIIVISTELMÄ

LCT-pegmatiittien syntymekanismit ja esiintyminen Suomessa

Sonja Lecler

Oulun yliopisto, Geotieteiden tutkinto-ohjelma

LCT-pegmatiitit edustavat pegmatiittiryhmää, joka on rikastunut harvinaisista alkuaineista, kuten litiumista, cesiumista ja tantaalista. Litium on tyypillinen alkuaine felsisissä pegmatiittisulissa, jotka kiteyttävät mineraaleja hyvin alhaisissa paine- ja lämpöolosuhteissa. Li-pitoisia mineraaleja ovat esimerkiksi spodumeeni ja lepidoliitti. Mineraaliseurueiden perusteella LCT-pegmatiitit jakaantuvat alaluokkiin; albiitti-, albiitti-spodumeeni-, kompleksi- ja berylliryhmä. Myöhäinen kiteytyminen mm. sopeutumattomien alkuaineiden vaikutuksesta saa aikaan pegmatiittien rikastumisen useammasta harvinaisesta alkuaineesta, mikä kasvattaa pegmatiitin kompleksisuutta. Suomessa tavataan jokaista LCT-pegmatiitin alalajia, ja ne ovat levittäytyneet vallitsevasti Länsi-Suomen puolelle. Esimerkiksi albiitti-spodumeeniryhmän pegmatiitit ovat yleisiä Kaustinen-Ullava sektorilla. Berylliryhmän pegmatiitteja taas tavataan lähempänä sisämaata ja kompleksisia pegmatiitteja on havaittu yleisesti etelämpänä Seinäjoen alueella ja esimerkiksi Kemiössä. Alueellisia vaihteluita on kuitenkin paljon, ja pegmatiitin koostumus pohjautuu lähtösulan koostumukseen. Työ perustuu kirjallisuuskatsaukseen graniittisten kivien synnystä ja LCT-pegmatiittien muodostumisesta. Työn tarkoituksena on tutustua pegmatiittien luokitteluperusteisiin ja tarkastella pegmatiittiesiintymiä Suomen alueella.

# SISÄLLYSLUETTELO

|  |      |
|--|------|
| 1 Tiivistelmä .....  | 1-2  |
| 2 Johdanto .....   | 2-4  |
| 3 Pegmatiitit ja niiden luokittelu .....                           | 3-5  |
| 3.1 Pegmatiittien luokittelu .....                                 | 3-5  |
| 3.2 Petrogeneesi .....   | 3-7  |
| 4 LCT-pegmatiittien alkuperä ja koostumus .....                    | 4-11 |
| 4.1 LCT-pegmatiittien syntymekanismit ja koostumus .....           | 4-11 |
| 4.2 LCT-pegmatiittien mineralisaatiot Suomessa .....               | 4-14 |
| 5 Esimerkkejä merkittävistä LCT-pegmatiittialueista Suomessa ..... | 5-18 |
| 5.1 Kaustinen – Ullava .....                                       | 5-18 |
| 5.2 Haapaluoma .....   | 5-22 |
| 6 Yhteenveto .....   | 6-24 |
| LÄHDELUETTELO .....  | 6-25 |

## 2 JOHDANTO

Kandidaatin tutkielmani aiheena on LCT (litium-cesium-tantaali) -pegmatiittien syntymekanismit ja tärkeimmät mineralisaatiot Suomessa. LCT-pegmatiitit ovat merkittäviä lähteitä harvinaisille alkuaineille. Etenkin litiumin merkitys on korostunut kasvavassa akkuteollisuudessa ja ns. vihreässä siirtymässä, jolloin kiinnostus on samalla kohdistunut LCT-pegmatiitteihin. Aihevalintani perustuu myös omaan kasvaneeseen mielenkiintoon kyseistä pegmatiittiryhmää kohtaan, sillä olen opintojeni varrella saanut mahdollisuuden työskennellä malminetsinnän tehtävissä, joissa LCT-pegmatiitteja näki päivittäin. Heräsi kysymys, miksi kyseistä tyyppiä esiintyy vain hyvin rajatulla alueella Suomessa, ja mitä muita mahdollisia esiintymismuotoja Suomessa tavataan. Mutta erityisesti minua alkoi kiinnostamaan, millaisissa olosuhteissa pegmatiitit muodostuvat, ja miten esiintymien jakaantumista Suomessa selitetään.

Työlläni pyrin avaamaan pegmatiittien syntymekanismeja ja luokitteluperiaatteita. Lisäksi haluan tuoda mukaan tapausesimerkkejä merkittävistä Suomessa esiintyvistä esiintymistä. Aiheeni rajauksena toimii perehtyminen LCT-pegmatiitteihin, joka sisältää harvinaisten alkuaineiden rikastumia. Tutkimusalue puolestaan rajautuu Suomeen. Ennen varsinaista rajausta on kuitenkin syytä selittää auki, mitä pegmatiitit oikeastaan ovat ja mikä on niiden alkuperä.

## 3 PEGMATIITIT JA NIIDEN LUOKITTELU

Pegmatiiteiksi kutsutaan karkearakeisia syväkiviä, joihin on tavallisesti kiteytynyt erilaisia teollisuudessa hyödynnettäviä arvometalleja, joista osa voi olla mahdollisesti hyvin harvinaisia maa-alkuaineita (Tieteen termipankki 2022). Pegmatiitti terminä kuvaa kiven hyvin karkearakeista tekstuuria eikä ota kantaa kiven mineralogiaan. Pegmatiitteja luokitellaan synty-ympäristön olosuhteiden, sulan lähtöaineksen ja alkuainepitoisuuksien mukaan (Cerny 1998).

### 3.1 Pegmatiittien luokittelu

Pääasiassa pegmatiittien luokittelu tehdään pegmatiittien tunkeutumisympäristön paine- ja lämpötilaolosuhteiden perusteella, jolloin pegmatiitit jaetaan neljään pääluokkaan; abysaaliseen, muskoviittiseen, harvinaisten alkuaineiden (REL= Rare elements) ja miaroliittiseen luokkaan (Cerny 1991). Cernyn (1991) mukaan luokkajako on tällöin suoraan liitoksissa vallitsevaan metamorfoosiasteeseen ja pegmatiitin tunkeutumissyvyyteen, mikä selittää tavattavien pegmatiittien erilaisen mineraalikirjon sekä myös synty-ympäristön poikkeamat.

Pegmatiittien luokittelussa on ensisijaisesti tunnistettava vallitseva syväkivilaji, jonka joukkoon on kiteytynyt mahdollisesti myös päämineraaleista poikkeavia mineraaleja (Cerny 1991; Alviola ym 2001). Esimerkiksi graniittipegmatiitti koostuu pääosin maasälvistä ja kiilteistä (Alviola ym 2001). Alviolan ym (2001) mukaan graniittipegmatiitti on yleisin pegmatiittityyppi Suomessa. Gabro- tai nefeliinisyeniittipegmatiitit ovat suhteellisen harvinaisia (Tieteen Termipankki 2022).

Cernyn (1991) pegmatiittiluokitusta on päivitetty tarkemmin harvinaisten alkuaineiden pääluokan osalta (Cerny 1998). Alaluokitus perustuu kiven geokemiaan ja kiteytymisympäristöön, jolloin alaluokat nimetään kivessä esiintyvien mineraaliseurueiden mukaan (Taulukko 1). Graniittipegmatiitteja voidaan siis luokitella synty- ja kiteytymisympäristön sekä alkuainepitoisuuksien mukaan, missä korostuu etenkin harvinaisten alkuaineiden merkitys luokittelun kannalta (Cerny 1998). Esimerkiksi litiumia sisältävän spodumeenin läsnäolo Ullavan alueen pegmatiiteissa merkitsee, että pegmatiitti kuuluu LCT-perheeseen, kun taas Alavuuden pegmatiiteissa tavataan yttriumista koostuvaa allaniittia, mikä on merkki NYF-tyypistä (Alviola ym

2001). Graniittisille pegmatiiteille tehdään siis usein karkea kahtiajako LCT- ja NYF-perheeseen (Kuva 1). LCT-lyhenne tulee sanoista Lithium-Cesium-Tantalum, eli harvinaisiin alkuaineisiin (REL) kuuluvaa litiumia, cesiumia ja tantaalia on rikastunut LCT-pegmatiitteihin (Cerny 1991). NYF-lyhenne puolestaan muodostuu sanoista Niobium-Yttrium-Fluorine, jotka myös kuuluvat harvinaisten alkuaineiden kirjoon, ja valtaosa myös harvinaisiin maametalleihin (REE) (Cerny 1991). On esitetty, että pegmatiittiryhmien tyypillisten alkuaineiden rikastuminen korreloi tietyn tektonisen synty-ympäristön kanssa, jolloin LCT-perhe liittyy orogeenisiin ympäristöihin ja NYF-perheen pegmatiitit vastaavasti anorogeenisiin ympäristöön, kuten repeämisympäristöön (Martin & DeVito 2005).

Taulukko 1: Harvinaisista alkuaineista koostuvien (REL) pegmatiittien luokittelu Cerny (1998) mukailten.

| Tyyppi                  | Alatyyppi  | Perhe                           |
|-------------------------|--|---------------------------------|
| Harvinaiset maametallit | Allaniitti-monatsiitti<br>Gardoliniitti                                | NYF<br>NYF                      |
| Berylli                 | Berylli-Kolumbiitti<br>Berylli-kolumbiitti-<br>Fosfaatti               | LCT,NYF<br>LCT                  |
| Kompleksi               | Spodumeeni<br>Petaliiitti<br>Ambigoniitti<br>Lepidoliitti<br>Elbaiitti | LCT<br>LCT<br>LCT<br>LCT<br>LCT |
| Albiitti-spodumeeni     |  | LCT                             |
| Albiitti                |  | LCT                             |

S-tyyppin felsiset magmat sopivat LCT-pegmatiittien koostumukseen, ja ne ovat tyypillisiä orogeenisissä ympäristöissä, kuten subduktiovyöhykkeillä (London 2009). S-tyyppin magmat ovat Londonin (2009) mukaan myös yleisin pegmatiitteja muodostava sulatyyppi. S-tyyppin magmat edustavat peralumiinisia sulia, joissa alumiinipitoisuus on suhteellisesti kohonneempi kuin alkaalisten aineiden pitoisuus (Selway & Tindle 2004). Sulien uskotaan olevan kuoren sedimenttiaineksen osittaisulamisen tulosta (London 2009).

Myös I-tyyppiset magmat voivat edustaa pegmatiittisulia, jotka syntyvät vaippaperäisen magman differentoitua tai aiemmin kiteytyneiden magmakivien sulamisesta (Cerny 1991; Ercit 2004). Sulatyyppi on repeämisympäristölle ja kaarisysteemille ominainen, jossa syntynyt sula on koostumukseltaan alkaalista. I-tyyppin sula vastaa NYF-pegmatiittien lähdegranitoidin koostumusta (London 2009). S- ja I-tyyppin sulien

sekoittuminen synnyttää edellä mainittujen päätejäsenten lisäksi erilaisia LCT-perheen pegmatiittivariaatioita (Cerny 1991; Ercit 2004).

Pegmatiitteja voidaan myös luokitella synty-ympäristön paine- ja lämpöolosuhteiden perusteella (Cerny 1991). P- ja T-olosuhteilla viitataan myös paikallisesti vallitsevaan metamorfoosiasteeseen, joka kertoo mm pegmatiitteja muodostavien osittaissulien koostumuksesta tietynlaisissa olosuhteissa (Cerny 1991). Suurin osa harvinaisista alkuaineista on osana sulaa matalilla metamorfoosiasteilla, joiden vaihtelua tapahtuu alhaisesta amfiboliittifasieksista vihreäliuskefasiekseseen (Selway 1977; Alviola ym 2001). Sulien koostumus edellä mainituissa olosuhteissa mahdollistaa myöhemmin mm. monien kiilteiden synnyn (Alviola ym 2001). Sulat differentoituvat lähdegranitoidista vähitellen ja kiteytyvät tasaisesti noustessaan kohti kuorta. Harvinaiset alkuaineet (REL) ovat sopeutumattomia, jolloin ne erkanevat kiteytyvästä sulasta jäännössulaan, jossa niillä on tilaa kasvaa (Trueman & Cerny 1982; London 2009). LCT-pegmatiittien kiteytyminen perustuu nopeaan alijäähtymiseen, joka saavutetaan usein 500–350°C-asteen välillä (Moody ym 1993; London 2009). Kiteytymislämpötilat perustuvat pegmatiittien fluidisulkeumien termometriaan ja jäähtymismalleihin (Moody ym 1993). NYF-perheelle tyypilliset sulat kehittyvät korkeamman metamorfoosiasteen olosuhteissa kuin LCT-perheelle tyypilliset sulat (Mäkitie ym 2001).

Nämä seikat mahdollisesti selittäisivät REL-pegmatiittien karkeaan jaon LCT ja NYF perheisiin, joista jälkimmäistä tavataan selvästi harvemmin (Cerny 1998). On kuitenkin mahdollista, että korrelaatio ei ole täysin suora, sillä pegmatiittien muodostumisprosessi on hyvin monimutkainen, ja muuttujia on useita.

### **3.2 Petrogeneesi**

Pegmatiittien synnyn ja jakaantumisen ymmärtämiseksi Suomessa, on syytä tarkastella Suomen kallioperän kehitystä ja tektonista evoluutiota, etenkin graniittisten kivien osalta, jotka nykyisen käsityksen mukaan edustavat pegmatiittien lähteitä (Alviola ym 2001).

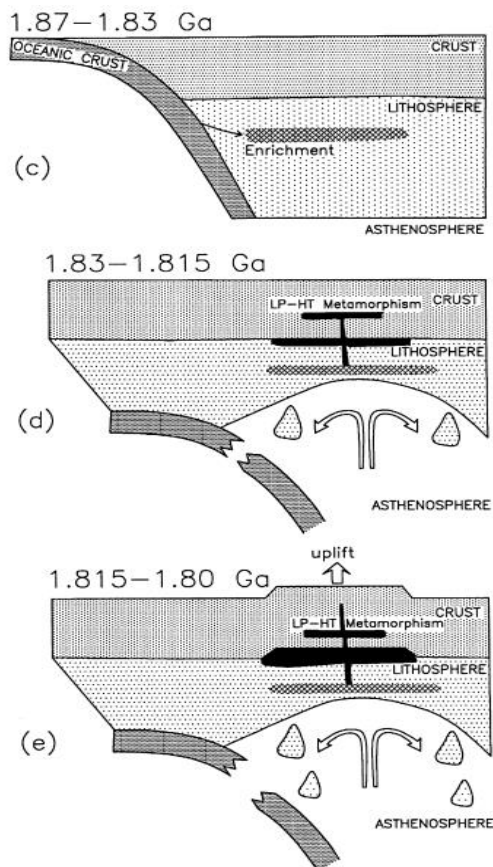
Suomen kallioperän yhtenä merkittävimpänä tapahtumana voidaan pitää Svekofennistä orogeniaa, joka ajoittuu pääosin n. 1.91–1.80 mrd vuosien ajanjaksolle (Korsman ym 1999). Svekofenninen orogenia jakaantuu Pre-, syn- ja myöhäis-orogeeniseen vaiheeseen, ja graniittiset kivet jaetaan näiden vaiheiden perusteella (Väisänen 2000). Pre-orogeeninen vaihe liittyy arkeisen kuoren hajautumiseen n. 2.44–1.95 mrd vuotta sitten, mikä avasi reunamerivyöhykkeen arkeisen Karjalaisen kratonin ja proterotsooisen Svekofennian kuoren rajalle (Korsman ym 1999). Tämä mahdollisti saarikaarikompleksien synnyn rajavyöhykkeelle, johon kuuluu mm Pyhäsalmen saarikaarikompleksi ja Jormuan ofioliittikompleksi. Vulkaaninen aktiivisuus synnytti alueelle n. 1.93 mrd ikäisiä kiviä, jotka koostuvat mm basalttisista andesiiteista ja auenneen altaan sedimenteistä (Korsman ym 1999).

Synorogeeninen vaihe liittyy varhaiseen Svekofenniseen orogeniaan, jossa saarikaarikompleksit ja mikrolaatat törmäsivät arkeiseen mantereeseen n. 1.91–1.87 mrd vuotta sitten aiheuttaen mikrolaattojen kasautumista ja reunamerialtaan sulkeutumisen (Korsman ym 1999; Lahtinen ym 2005). Synorogenia liitetään kiviin, jotka ovat syntyneet törmäyksen aiheuttamassa tektonisessa liikehdinnässä n. 1.89–1.87 mrd vuotta sitten (Lahtinen ym 2005). Tähän ajanjaksoon liittyy S- ja I-tyypin magmatismia, josta kehittyi alkaalirikkaita granitoideja, granodioritteja ja tonaliitteja mm Keski-Suomen granitoidikompleksiin (Väisänen ym 2000). Toinen merkittävä törmäys tapahtui Svekofennian myöhäisorogeenisessa vaiheessa n. 1.84–1.82 mrd vuotta sitten Sarmatian ja Fennoskandian laatan välillä, millä on ollut vaikutusta Etelä-Suomen graniittisiin kiviin (Ehlers & Selonen 1993). Ehlers & Selonen (1993) mukaan graniitit ovat etelässä hyvin kaliumpitoisia johtuen mikroliittisistä graniiteista, joiden taustalla on ollut S-tyypin magmatismia ja migmatisaatiota.

Merkittävien törmäysten välillä n. 1.86–1.84 mrd vuotta sitten kuori on ollut paikoin ekstensiotilassa, etenkin arkeisen ja proterotsooisen kallioperän rajalla, mikä on aiheutunut astenosfäärin kuumenemisestä ja konvektiovirtauksista (Platt & England 1994). Kuoren ekstensiossa paine on laskenut, mutta lämpötila on pysynyt hyvin korkealla, jolla on ollut vaikutusta mm yläkuoren osittaiseen sulamiseen (Platt & England 1994; Väisänen ym 2000). Etelä-Suomessa ekstensionaalinen vaihe on ollut myöhäisempää, n. 1.81 mrd vuotta vanhaa, jonka aikana alhaiset paineolosuhteet ja korkea lämpötila ovat aiheuttaneet sen mukaista metamorfoosia alueen kiviin sekä kuoren osittaissulamista (Korsman ym 1999; Kuva 1).



On esitetty, että juuri myöhäisorogeeninen ekstensionaalivaihe liittyy pegmatiittisulien syntyyn (Mäkitie ym 2001). Mäkitien (2001) mukaan litosfäärin ohentumisen seurauksena mm Svekofenniassa kuoreen painuneet muinaisen reunameren sedimentit sulivat osittain (Korsman ym 1999). Tarvittava lämpöenergia olisi lähtöisin astenosfäärin konvektiovirtauksista sekä alueen aiemmasta saarikaarivulkanismista (Väisänen ym 2000; Lahtinen ym 2005).



Kuva 1: Myöhäisorogeeninen vaihe selittää alhaisessa paineessa ja korkeassa lämpötilassa tapahtuvaa metamorfoosia ja osittaissulamista. Esimerkki tilanteesta Etelä-Suomessa. Väisänen ym (2000).

Svekofennidien osalta tektonomagmaattinen aktiivisuus on siis ollut voimakasta n. 1.89–1.79 mrd vuosien välillä (Lahtinen ym 2005). Lahtisen (2005) mukaan tuona aikana Suomen kallioperän paksuus on vaihdellut erityisen paljon, kun kuori on vuorotellut subduktion ja ekstension välillä synnyttäen samalla erilaisia granitoideja. Aktiivinen orogeeninen ajanjakso on pystytty arvioimaan Zirkonien U-Pb ikämääritystutkimuksilla, jossa Itä-Suomen kallioperästä löydetyt Zirkoni ksenoliittien iät 1.8 mrd vuotta indikoi korkeaa alakuoren ja ylävaipan aktiivisuutta ainakin 1.9–1.8 mrd vuoden välillä (Väisänen ym 2000). Samankaltaisia ikämäärityksiä on tehty Lounais-Suomen graniittien zirkonien U-Pb- sekä ferrotapioliitti-ikämäärityksissä, joilla on pyritty löytämään yhteys myös pegmatiittien aikaskaalaukseen (Lindroos ym 1996). Näyttää siltä, että monet pegmatiitit ovat syntyneet Svekofennisen orogeenian myöhäisvaiheessa, jolloin on ollut merkittävää osittaissulamista sekä post-orogeenisen kehityksen aikana sulien tunkeutuessa siirrosrakenteisiin (Väisänen ym 2000; Mäkitie ym 2001).

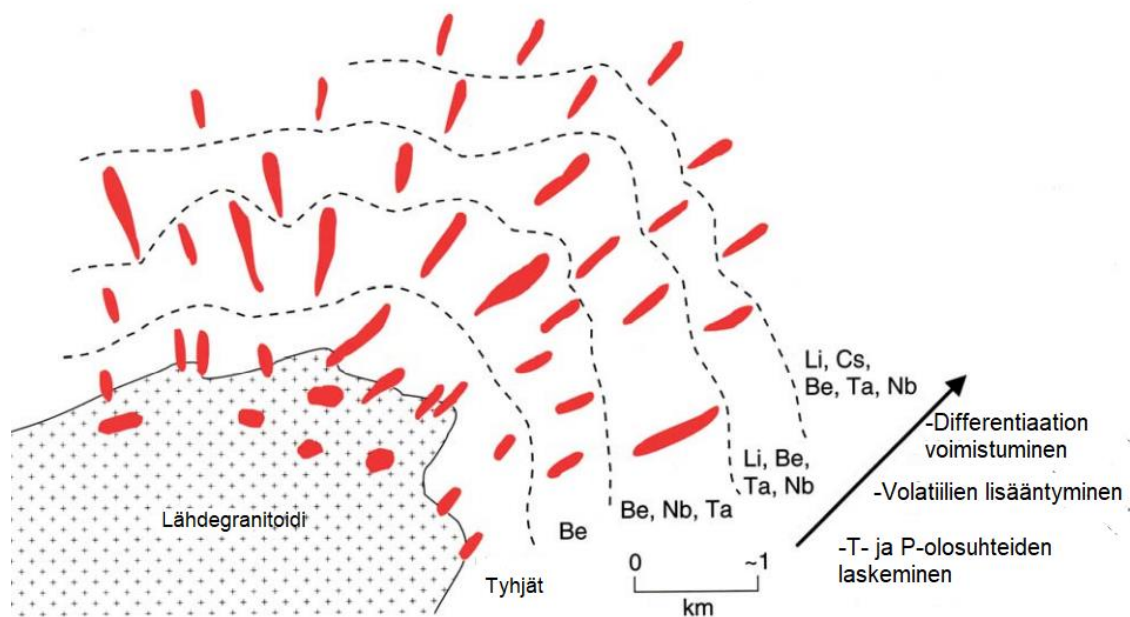
## 4 LCT-PEGMATIITTIIEN ALKUPERÄ JA KOOSTUMUS

### 4.1 LCT-pegmatiittien syntymekanismit ja koostumus

LCT-pegmatiittien uskotaan syntyneen metapeliittisen kuoren osittaissulamisesta, mikä osaltaan selittää myös harvinaisten mineraalien synnyn (Platt & England 1994; Mäkitie ym 2001). Yhteys metapeliitteihin pohjautuu muinaisten altainen sedimenttiainekseen, joka on metamorfoitunut kuoren muutoksissa (Haapala 1966). Haapala (1996) on tutkinut Seinäjoen alueen pegmatiitteja, jotka koostuvat enimmäkseen pertiittisistä maasälvistä, kuten mikrokliinistä, sekä pitävät sisällään useampaa Li- ja Al-pitoista mineraalia, esimerkiksi spodumeenia. Alumiinin on esitetty olevan peräisin peliittisestä aineksestä, mikä osittain perustelee LCT-pegmatiittien peralumiinisuuden, ja selittää miten tyypilliset alumiinipitoiset mineraalit ovat pystyneet kasvamaan (Haapala 1966; Mäkitie ym 2001; London 2009).

Peliittinen aines on todennäköisesti joutunut kuoren paksuuntuessa osaksi metamorfista kivisarjaa, kuten reunamerialtainen sulkuvaiheessa (Mäkitie ym 2001; Lahtinen 2005). Tämä on osittain synnyttänyt S-tyyppin sulia, joissa on olennaisena osana volatiilit, joita tarvitaan tiettyjen harvinaisten mineraalien muodostamiseen (London 2009). I-tyyppin sulat liittyvät syväkiviaineksen sulan differentioitumiseen ja fraktioivaan kiteytymiseen (Cerny 1991; Ercit 2004). LCT-pegmatiitteja ajatellen on I- ja S-tyyppin sulat voineet myös sekoittua, sillä jotkin pegmatiitit osoittavat molemmille sulatyypeille ominaisia koostumuksia. Esimerkiksi Kaustisen alueella S-tyypille ominainen peralumiinisuus ja I-tyypin korkea kaliumpitoisuus voivat ilmetä samassa kivessä (Kontoniemi 2011). Karkeasti ajatellen LCT-pegmatiitit kuitenkin mukailevat vallitsevasti S-tyypin sulien koostumusta (Martin & DeVito 2005).

Pegmatiitteja muodostava magmaattinen kiteytyminen perustuu felsisen magman soliduslämpötilan nopeaan alittumiseen (London 2009). Soliduslämpötilalla viitataan sulan lämpöasteeseen, jossa sula kiteytyy täysin kiveksi (Mäkitie ym 2001). Tätä edesauttaa kiihdytinkomponentit, jotka ovat sopeutumattomia alkuaineita ja jäävät jäännössuliin kiteyttääkseen mm. LCT-pegmatiiteille tyypillisiä mineraaleja (London 2009). Niiden läsnäolo määrittää myös pegmatiittisulien erkaantumisen etenemisen, ja siten selittää erilaiset pegmatiittiseurueet (London 2009; Cerny 1991). Kiihdytinkomponentteihin kuuluu veden lisäksi tietyt alkuaineet, joilla on havaittu kiteytymislämpötilaa alentavaa vaikutusta, kuten B, F ja P (London 2009). Näihin alkuaineisiin kuuluu myös Li, mikä selittää osittain, miksi lähdegranitoidista distaalimpien pegmatiittien mineraalit ovat kiteytyneet vasta fraktioitumisen loppuvaiheessa hyvin alhaisissa T/P olosuhteissa, mikä myös kasvattaa niiden kidekokoja (Kuva 2).



Kuva 2: Sulien differentiaatio lähdegranitoidista. Mukailten Trueman & Cerny (1982); London (2009) ja Sinclair (1991).

Sulien erkaantumista eli differentiaatiota voidaan mallintaa vyöhykkeellisyydellä, missä kasvava etäisyys lähdegranitoidista indikoi myöhäisempää sulien erkaantumista jäännössuliin (Kuva 2). Suliin sopeutuvat alkuaineet ja volatiitit jäävät jäännössuliin, jotka kiteytyvät myöhäisessä vaiheessa pegmatiitin syntyä, distaalimpana lähdegranitoidiin nähden (London 2009). Londonin (2009) mukaan kiilteillä ja volatiileilla vaikuttaisi olevan yhteyttä myös peralumiinisuuteen, sillä kiilteistä rikkaat alumiinisilikaatit ja pyrokseenit ovat läsnä myöhemmin kiteytyvissä pegmatiiteissa.

Lähdegranitoidista erkaantuvien pegmatiittisulien koostumus on felsinen, ja sulat alkavat jäähtyessään kiteyttää LCT-pegmatiittia synnyttäviä mineraaleita (Cerny 1991; Mäkitie ym 2001; London 2009). Kun lämpötila laskee n. 500–350 °C välille, eli sula on alijäähtynyt, alkaa LCT-pegmatiittien kiteytyminen (Moody ym 1983). Pegmatiittisulan alijäähtyminen on usein nopeaa mutta kiteytyminen tasaista, mistä seuraa vyöhykemäisesti REL-alkuaineista rikastuneita pegmatiitteja, esimerkiksi Li-, Ce- ja Be-rikkaita pegmatiitteja (Kuva 2). Lämpötilan muutoksiin ja jäähtymisnopeuteen vaikuttaa kiihdytinkomponentit, jotka ovat sitoutuneet mm fluidien volatiilisiin ligandeihin, kuten vesimolekyyliin (Mäkitie ym 2001; Selway & Tindle 2004). Kiihdytinkomponentit toimivat soliduslämpötilan alentamisen lisäksi kiteiden nukleoiden määrää pienentävinä, jolloin mineraalien kidekoko kasvaa nopeasta jäähtymisestä huolimatta (Cerny 1991; London 2009).

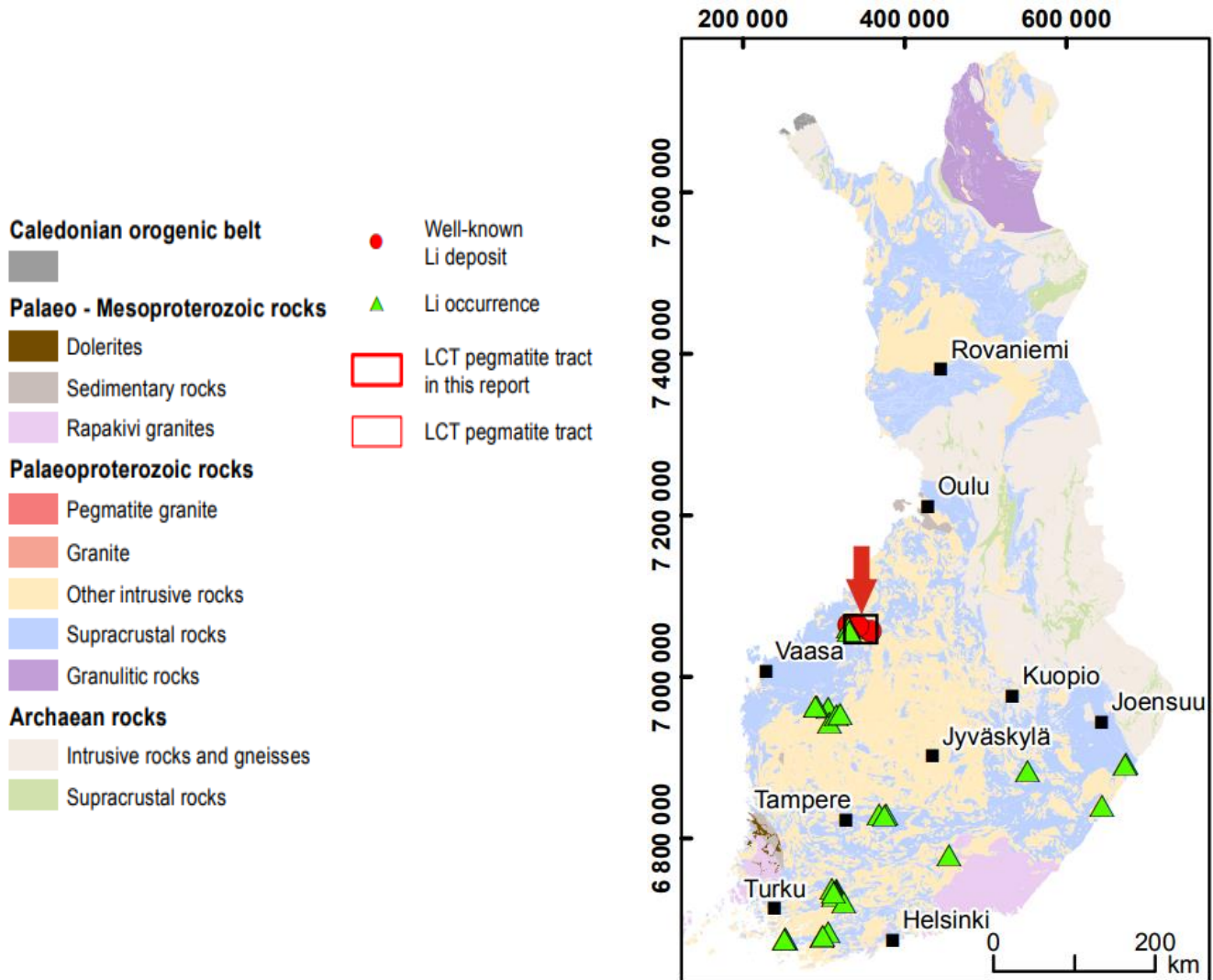
Magman koostumusta ei nähdä kuitenkaan täysin selittävänä tekijänä eri Li-mineraalien esiintymiselle, sillä alkuainekoostumus on useammassa aiemmassa pegmatiittinäytteen tarkastelussa todettu mukailevan 1.5–2.0 painoprosentin LiO<sub>2</sub>-pitoisuutta (Cerny 1991). Tämä ei katso sitä, mistä Li-pitoisesta mineraalista on kyse, mikä kertoo melko pienestä eroista mineraalien välillä ja mahdollisesti siitä, että mineralisaatiota selittää muutkin muuttujat kuin koostumus. Cerny (1991) korostaa T- ja P-olosuhteiden merkitystä, jotka perustuvat alhaisiin metamorfoosiasteisiin, lämpötilan muutoksiin fluidien vaikutuksesta ja siten myös fraktioivaan kiteytymiseen. Vallitseviin T- ja P-olosuhteet kertovat osittaissulien koostumuksesta eri vyöhykkeillä (Alviola ym 2001). Alviolan ym (2001) mukaan LCT-pegmatiitteja muodostavat sulat syntyvät alhaisissa paine- ja lämpöolosuhteissa, jolloin olosuhteet lähenevät usein vihreäliuskefasieksen tai alhaisen amfiboliittifasieksen olosuhteita n 500° C:sta alaspäin (Mäkitie ym 2001).

Vihreäliuskefasieksen olosuhteissa ns. andalusiittivyöhykkeellä pegmatiittisulasta on mahdollista kiteyttää turmaliinia, jonka koostumus perustuu mm. taustalla vaikuttaviin alkuaineisiin kuten boorin ja alumiinin läsnäoloon (Cerny 1991; Mäkitie ym 2001; London 2009). Metamorfoosiasteen ollessa lähempänä amfiboliittifasiesta, joka edustaa tyypillisesti intermediäärisiä olosuhteita, sillimaniitti ja muskoviitti kiteytyvät (Mäkitie ym 2001). Mäkitien ym (2001) mukaan muskoviittia voi syntyä myös pseudomorfisissa reaktioissa, joissa esimerkiksi aiemmin kiteytyvässä kordieriitissa tapahtuu muuttumisreaktioita. Harvinaisia alkuaineita edustavat mineraalit muodostuvat kuitenkin tyypillisesti matalan ja keskiasteen andalusiitti- ja amfiboliittivyöhykkeen olosuhteissa (Alviola 2001; Mäkitie ym 2001). LCT-pegmatiitit ovat kuitenkin komplekseja, jolloin on magman lähteellä ja fluidien koostumuksella on T- ja P-olosuhteiden lisäksi merkittävä vaikutus kokonaisuuteen (Cerny 1991; Mäkitie ym 2001).

## **4.2 LCT-pegmatiittien mineralisaatiot Suomessa**

Suomen tapauksessa pegmatiitteja esiintyy etenkin Pohjanmaan liuskevyöhykkeellä ja Vaasan migmatiittikompleksin alueella (Alviola ym 2001). Alviolan ym (2001) mukaan pegmatiitteja esiintyy myös Keski-Suomen granitoidikompleksilla ja Etelä-Suomessa. Alueiden paikallisissa mineralogioissa on havaittavissa eroja, jotka selittyvät mahdollisesti metamorfoosivyöhykkeiden vaikutuksella ja muilla alueellisilla tekijöillä (Alviola ym 2001; Mäkitie ym 2001). Pohjanmaan liuskevyöhykkeen kivet ovat peliittisiä, graniittisia ja vulkaanisia, asteeltaan vähemmän metamorfoituneita verrattuna Vaasan migmatiittikompleksin kivilajeihin (Alviola ym 2001). Migmatiittikompleksin kivet ilmenevät puolestaan gneissimäisinä rakenteina pegmatiittien sivukivissä, ja pegmatiiteissa saattaa esiintyä myös rautapitoista kordieriittia ja biotiittia, jotka myös edustavat hieman kohonneemman metamorfoosiasteen olosuhteissa syntyneitä mineraaliseurueita (Ehlers & Selonen 1993). Keski-Suomen granitoidikompleksi koostuu pääosin granitoideista ja tonaliiteista, mikä kertoo alueen kivien felsisyydestä (Alviola ym 2001). Alviolan ym (2001) mukaan alueen sivukivet ovat andalusiittivyöhykkeen mukaisia, eli edustavat yleisesti matalamman metamorfoosiasteen kiviä kuin Pohjanmaan kivet.

Harvinaisten alkuaineiden jakautuminen Suomessa painottuu länsirannikolle, missä on ollut alueellisesti suotuisat kuoren olosuhteet LCT-pegmatiittien synnylle (Alviola 2001; Kuva 3). Tämän näkee myös alueen turbidiittisista lohkeista, sillä ne tukevat peliittisen aineksen osittaissulamisteoriaa (Mäkitie ym 2001; London 2009). Graniittisten pegmatiittien yleisyys lännessä ja korkea Li-potentiaali taas kertovat, että litiumia on päässyt rikastumaan vain rajoitetuille alueille (Kontoniemi 2011).



Kuva 3: Tunnetut Li-havainnot ja esiintymät. Rasilainen ym (2018).

LCT-pegmatiittien esiintyminen Suomessa jakautuu alaluokkiin, pegmatiitin luonteen ja siinä esiintyvien mineraalien mukaisesti (Taulukko 1). Kompleksisia pegmatiitteja esiintyy Järvi-Pohjanmaalla, etenkin Seinäjoen ja Alavuuden seuduilla, ja merkittävimpana Kaustisen ja Ullavan alueella Keski-Pohjanmaalla (Alviola ym 2001; Kontoniemi 2011). Tälle pegmatiittijoukolle tyypillisiä mineraaleja ovat spodumeeni, lepidoliitti, petaliitti, berylli, elbaiitti ja kassiteriitti (Cerny 1991; Alviola ym 2001). Pegmatiitit ovat tavallisesti terävästi kontaktissa kiilleliuskeen kanssa ja mineraaliassosiaatiot vaihtelevat suuresti pienelläkin alueellisella mittakaavalla (Haapala 1966; Cerny 1991; Väisänen ym 2002). Lepidoliitin esiintyminen keskittyy Haapaluoman seudulle, jossa esiintyy myös toista Li-pitoista mineraalia, spodumeenia (Haapala 1966). Spodumeeni-albiittiluokka on Kaustisen ja Ullavan alueella yleinen pegmatiitti (Kontoniemi 2011). Kaustisen ja Seinäjoen alueen välissä pegmatiiteissa esiintyy yleisemmin berylliä verrattuna spodumeeniin (Alviola ym 2001). Pegmatiittiluokituksessa tämä joukko nimetään berylliryhmäksi (Cerny 1991).

Etelä-Pohjanmaalla, Alajärven ja Evijärven lähetyvillä, beryllit ovat melko yleisiä, ja myös fosfori- ja rautapitoisuudet alueen kivissä on todettu kohonneemmaksi muihin läheisiin LCT-pegmatiittialueisiin verrattuna (Alviola ym 2001). Tämän vuoksi alueen pegmatiitit sisältävät usein kolumbiittia ja fosfaattipitoisia mineraaleja. Berylliryhmään kuuluvia pegmatiitteja on tunnistettu myös Tampereen alueelta, Juurakossa, mutta mineralisaation koosta ei ole arviota (Kuva 3).

Varsinais-Suomessa merkittävimpana Li-rikkaana alueena on Kemiö-Torrnsuon alue, joka on myös tärkeä harvinaisten alkuaineiden kuten tantaalin kannalta (Lindroos ym 1996; Kuva 3). Pegmatiitit vastaavat kompleksisia LCT-pegmatiitteja, ja niiden mineraaliseurueeseen kuuluvat spodumeenin, petaliitin, beryllin ja lepidoliitin lisäksi cookeiitti, joka on mahdollisesti muuttunut kloriittiutumisen yhteydessä, joka on yleistä alueen graniittipegmatiiteissa (Aurola 1963). Petaliitti on ollut tärkeä Hirvikalliolla louhittava mineraali. Alueelta on tehty merkittävää pegmatiittien ikämääritystä niissä esiintyvien ferrotapioliittien U-Pb selvitysten avulla (Lindroos ym 1996).



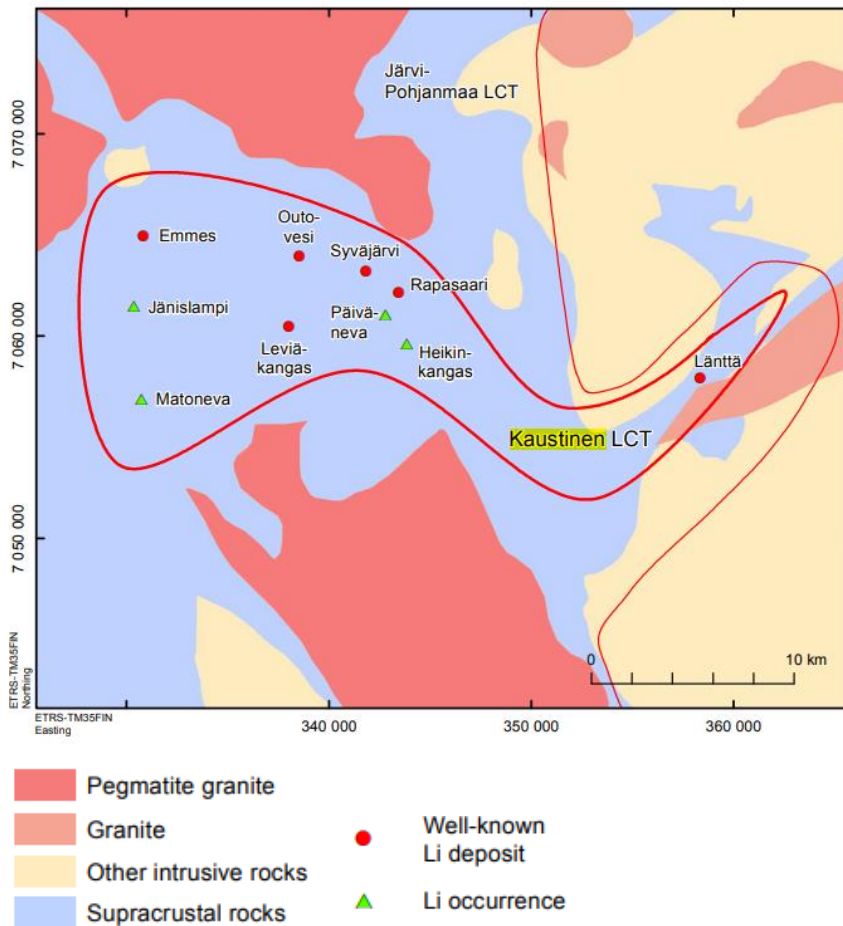
Useimmat pegmatiitit ovat tunkeutuneet kallioon post-orogeenisen kehityksen aikana alkaen n.1.80 mrd vuotta sitten (Lindroos ym 1996; Väisänen ym 2000). Pegmatiittien esiintyvyys on siten riippuvainen kallioperän heikkousvyöhykkeistä ja suprakrustisten kivien asemasta. Pegmatiitilla on taipumus esiintyä eri paksuisina juonirakenteina, usein viistosti vertikaalissa asemassa kallioon työntyneenä (Ehlers & Selonen 1993). Esimerkiksi Kemiössä pegmatiitti on työntyneenä gabrorikkaan kallion hiertovyöhykkeisiin (Aurola 1963, Lindroos ym 1996). Pegmatiitin isäntäkivi ei yleensä ole granitoidi, vaikka tämä olisikin magman lähtöaines (Ehlers & Selonen 1993). Pohjanmaalla pegmatiittien isäntäkivenä ja ns. sivukivenä on useimmiten kiilleliuske tai vulkaaninen kivi, kuten plagioklaasiporfyyriitti (Kontoniemi 2011). Seinäjoella pegmatiitit ovat toisaalta yhteydessä granodioriitteihin, mutta isäntäkivi on usein myös kiilleliuske (Mäkitie ym 2001). Monessa tapauksessa pegmatiitti esiintyy terävästi sivukiveä leikkaavana, mikä kertoo myöhemmin tunkeutumisesta sivukiveen (Aurola 1963; Haapala 1966; Ehlers & Selonen 1993; Mäkitie ym 2001).

# 5 ESIMERKKEJÄ MERKITTÄVISTÄ LCT- PEGMATIITTIALUEISTA SUOMESSA

Pohjoisen harvinaiset alkuaine-esiintymät ilmenivät ensin yksittäisistä lohkarehavainnoista, joista LCT-tyyppin pegmatiitteja on löydetty runsaasti Pohjanmaan seudulta (Rasilainen ym 2018).

## 5.1 Kaustinen – Ullava

Kaustinen – Ullava -akseli kuuluu Keski-Pohjanmaan maakuntaan, jossa sijaitsee myös nykyisin tunnetuin ja suurin Li-mineralisaatio, mineraaleina enimmäkseen spodumeenia ja beryylliä (Rasilainen ym 2018). Alueen Li-potentiaalin selvittämistä varten tehtiin vuonna 2010 moreenikemiallisia testejä, johon kuului alueelta kerättyjen näytteiden jauhatus ja pienemmälle fraktiolle tehty natriumperoksidisulfaatti, jolla Li pyrittiin saamaan mukaan analyysiliuokseen ICO-AES analyysiä varten (Kontoniemi 2011). Myönteiset tulokset kannustivat laajentamaan tutkimusta koko alueelle, josta käytetään myös nimitystä KaLi-tutkimukset eli Kaustisen seudun litiumvarannot -hanke. Aiemmissä selvityksissä on ollut käytössä sopeutumattomia menetelmiä, kuten perinteinen kuningasliuos, jolloin kaikki Li ei päässyt liukenemaan analyysiä varten huonosti liukenevasta spodumeenista (Kontoniemi 2012). Uusien analyysien ja selvitysten pohjalta alueen mineraalipotentiali on todettu, mikä on johtanut myös litiumhydroksidin tuotantoprosessiin vastaamaan tulevaisuuden akkutarpeisiin (Keliber 2022).



Kuva 4: Kaustisen seudun Li-varannot. Rasilainen ym (2018).

Kaustisen alueella on useampi tunnettu Li-varanto, jonka eteen tehdään aktiivista selvitystyötä (Kuva 4; Keliber 2022). Lantän ja Syväjärven esiintymät ovat tunnetuista esiintymistä varhaisimmat, mutta Rapasaaren esiintymä on myös hyvin merkittävä (Rasilainen ym 2018). Litiumista on myös havaintoja alueilta, joille ei ole toistaiseksi todettu taloudellista potentiaalia (Kuva 4). Kaustisen tärkein litiumin lähde on spodumeeni, jota esiintyy kahdenlaisena variaationa, vihertävänä ja punertavana mineraalina (Kontoniemi 2011). Spodumeeni on punertavampaa Lantässä, joka sijaitsee Kauempana Kaustiselta, lähellä Ullavaa (Kontoniemi 2011). Vihertävä väri on kuitenkin tyypillisempi muoto, varsinkin Syväjärvellä, ja sitä tavataan myös muilla esiintymisalueilla, kuitenkin hyvin usein haalistuneena tai hieman rapautuneena rusehtavan sävynä (Kuvat 5 & 6; Kontoniemi 2012).



Kuva 5: Vihertävän haaleaa Spodumeenia Kaustisen Syväjärveltä. Kiteet ovat n 40–80 mm pitkiä ja 15 mm leveitä.



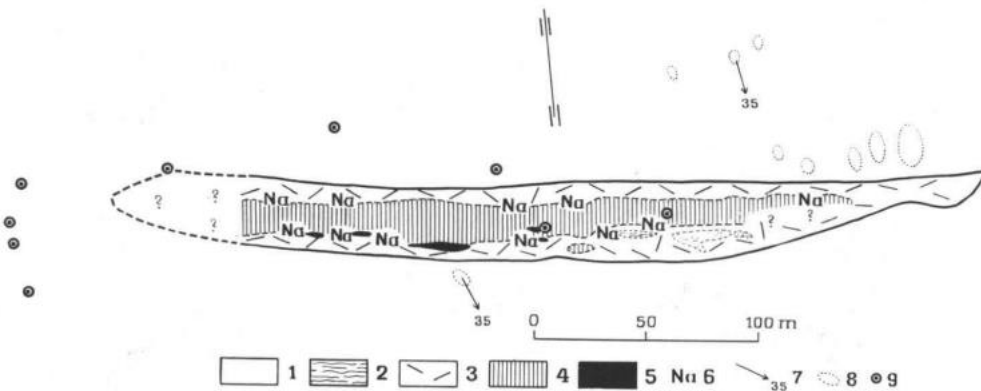
Kuva 6: Rusehtavan haalean sävyistä spodumeenia merkkinä rapautumisesta.

Alueen pegmatiitit kuuluvat pääosin albiitti-spodumeeni -luokkaan, mutta ovat jokseenkin kompleksisia muiden harvinaisempien mineraalien läsnäollessa (Cerny 1991; Al-Ani & Ahtola 2008). Spodumeenin olemus pegmatiiteissa on tyypillisesti pitkänomaisina kiteinä ja fenokrysteinä albiittisessa matriksissa (Al-Ani & Ahtola 2008; Kontoniemi 2011). Muita mahdollisia mineraaleja voivat olla granaatti, berylli, apatiitti, schorl-turmaliiini ja amblygoniitti (Al-Ani & Ahtola 2008).

## 5.2 Haapaluoma

Haapaluoma sijaitsee Perä-Seinäjoen kupeessa, joka on tunnettu erityisesti Li-pitoisista mineraaleista, kuten violetista lepidoliitista (Rasilainen 2018). Haapaluoman pegmatiittiesiintymä löydettiin vuonna 1958, ja pari vuotta myöhemmin alueella aloitettiin louhostoiminta maasälvän taloudellista hyödyntämistä varten, jossa tärkeimpänä louhittavana oli mikrokliini pertiitti (Haapala 1966). Louhinta on nykyisin lopetettu, mutta alue on kiinnostava pegmatiitissa esiintyvien harvinaisempien mineraalien vuoksi.

Haapaluoman pegmatiitti koostuu kahdesta vertikaalista pegmatiittijuonesta, joiden lineaatio on selvästi itä-länsi suuntainen (Haapala 1966). Alueen peruskallio on granodioriittia, johon nähden pegmatiitit asettuvat terävästi leikatun. Itäisempää juonta on tutkittu enemmän. Haapaluoman pegmatiitti omaa vyöhykkeellisen rakenteen, mikä on kuitenkin hyvin kompleksinen, kun huomioidaan mineraalien korvautumiset rakenteissa ja volatiilien aiheuttamat muuttumiset, varsinkin savimineraalien suhteen (Haapala 1966).



Kuva 7: Haapaluoman pegmatiittijuonen rakenne. 1. Granodioriitti; 2. Kiillegneissi inkluusiot; 3. Seinävyöhyke; 4. Intermediäärivyöhyke; 5. Ydin; 6. Korvautumisvyöhykkeet (Na); 7. Lineaatio; 8. Paljastuma; 9. Porareikä. Haapala (1966).

Haapaluoman vyöhykkeellinen rakenne johtuu hydrotermisistä lämpömuutoksista johtuvasta fraktioivasta kiteytymisestä (Haapala 1966). Pegmatiittijuoni on tunkeutuneena alueen granodioriittiseen pääkiveen (Kuva 7). Juonen reunoilla sijaitsevalla seinävyöhykkeellä mineraalikoostumus pysyy pertiittisessä mikrokliinissä, vaikka haalean kellertävää beryylliä tavataan joissain määrin.

Ominaista Haapaluoman pegmatiittiesiintymälle on Li-pitoiset kiillemineraalit, merkittävimpana lepidoliitti sekä värikkäät turmaliinit, kuten rubelliitti (Haapala 1966; Rasilainen 2018). Mineraaliseurueet ovat kehittyneet eri vaiheissa, mikä kasvattaa kompleksisuutta entisestään. Yleisesti ottaen mineraalit ovat kiteytyneet fraktioivan kiteytymisen kautta pegmatiitin seinävyöhykkeiltä kohti pegmatiitin ydintä, joka koostuu pääosin kvartsista (Kuva 7).

Mineraalien korvautumista tapahtuu tyypillisimmin pegmatiitissa intermediäärisen ja reunavyöhykkeen alueilla, jotka sijaitsevat ytimen ympärillä (Kuva 7). Rakenteissa ensimmäisinä kiteytyneet pegmatiitin mineraalit, kuten kaliumpitoinen maasälpä, korvautuvat osittain natrium- ja litiumpitoisten volatiilien vuorovaikutuksesta (Haapala 1966). Tämä mahdollistaa harvinaisten yhdisteiden pääsyn pegmatiittiin. Haapalan mukaan Na-pitoiset volatiilit vaativat korkeamman lämpötilan kuin Li-pitoiset pysyäkseen sulina, jolloin kiteytyessä pegmatiittiin rikastuu albiittia, kvartsia ja tummaa turmaliinia. Olosuhteet mahdollistavat myös cecium- ja fosforipitoisen monatsiitin ja apatiitin esiintymisen.

Li-pitoiset volatiilit kiteytyvät tyypillisesti alhaisemmissa lämpötiloissa tai osittain rinnakkain Na-volatiilien mineraalien kanssa, minkä vuoksi uudet mineraalit saattavat tunkeutua aiemmin kiteytyneisiin rakenteisiin (Haapala 1966). Li-pitoiset volatiilit kiteyttävät Haapalan mukaan pegmatiittiin lepidoliittia, punaista turmaliinia ja spodumeenia, mutta myös berylliä ja osan albiitista. Meteorinen vesi pegmatiittirakenteessa saa aikaan kaolinisoitumista, eli etenkin maasälpä ja spodumeenin muuttumista savimineraaliksi, tässä tapauksessa kaoliiniksi (Haapala 1966). Tämä on kuitenkin suhteellisen pientä.

Haapaluoman pegmatiitti siten käytännössä kehittyi maasälvästä (mikrokliini), kun Na-pitoisesta volatiilista kiteytyy albiittia ja muita Na-rikkaita mineraaleja, jotka korvaavat osan pegmatiitin alkuperäisestä koostumuksesta (Haapala 1966). Lämpötilan laskiessa alemmas, Li-volatiilit kiteyttävät vielä uusia mineraaleja, kuten lepidoliittia, turmaliineja (rubelliittia) ja mahdollisesti myös kunziittia, mikä on spodumeenin variaatio. Pegmatiitti on myös altis hydrotermiselle muuttumiselle.

## 6 YHTEENVETO

Pegmatiitit ovat karkearakeisia syväkiviä, joita luokitellaan paine- ja lämpöolotilaolosuhteiden sekä syntyvän mukaan pääluokkiin, joista yksi edustaa harvinaisia alkuaineita sisältäviä (REL) pegmatiitteja. Nämä luokitellaan vielä mineralogian mukaan kahteen pääluokkaan LCT- (litium-cesium-tantaali) ja NYF (niobium-yttrium-fluori). Kahtiajakoa voidaan perustella tektonisilla synty-ympäristöillä, kuoren T- ja P-olosuhteilla, sulien koostumuksella ja differentiaatiolla sekä näkyvimmin pegmatiitin mineralogialla.

Pegmatiitit ovat syntyneet vallitsevien teorioiden mukaan graniittisista ja peliittisistä pegmatiittisulista, jotka ovat erkaantuneet lähdegranitoideista. Svekofenninen orogenia arkeeseen ja proterotsooisien kallioperän välillä on luonut pohjan Suomen graniitteja synnyttävälle vulkaaniselle ja magmaattiselle aktiivisuudelle n. 1.92–1.79 mrd vuotta sitten. Litosfäärin ohentuminen ja paksuuntuminen on vuorotellut orogenisissa vaiheissa, mikä on mahdollistanut kuoren osittaissulamisen ja migmatisaation sekä volatiilien kulkeutumisen kuoren sisäisiin olosuhteisiin. Tämä tukee teorioita, joiden mukaan pegmatiitit ovat syntyneet peliittisen aineksen osittaissulamisen kautta ja painunut syvempiin kerroksiin mm painovoiman kautta. Kuoren läheisyys on ilmeinen pegmatiitteja ajatellen, sillä niiden synnyttämisessä on ollut mukana volatiileja, jotka tunnetaan hydrotermisinä fluideina. Volatiilien koostumus vaikuttaa sulan koostumuksen lisäksi siihen, mitä mineraaleja sulasta on mahdollista kiteytyä, ja kuinka nopeaa fraktioiva kiteytyminen on. Kiihdytinkomponenttien ansiosta LCT-pegmatiitit differentoituvat hyvin distaalisti lähdegranitoidista.

Suomen LCT-pegmatiitteja tavataan yleisimmin Pohjanmaalla, Suomen eteläosissa ja Keski-Suomessa. Kaustisen ja Ullavan alueella on suurin tunnettu Li-mineralisaatio, joka tunnetaan tärkeimpänä albiitti-spodumeeni-pegmatiittien alueena myös taloudelliselta kannalta. Etelämmässä Kemiö tunnetaan yhtenä tärkeimmistä Ta-mineralisaatioista. Alueella on myös havaittu monia Li-mineraaleja kuten petaliittia ja spodumeenia. Haapaluoman erikoisuus on lepidoliitti ja värikkäät turmaliinit. Yleisesti ottaen Suomessa pegmatiitit vaihtelevat mineraaliassosiaatioiden suhteen paljon alueellisesti.



# LÄHDELUETTELO

- Al-Ani, T & Ahtola, T. 2008. Mineralogy of Spodumene pegmatites, Kaustinen, Western Finland. Geologian Tutkimuskeskus. Espoo. S 45.
- Alviola, R., Mänttari, I., Mäkitie, H & Vaasjoki, M. 2001.  
Svecofennian rare-element granitic pegmatites of the Ostrobothnia region, western Finland; their metamorphic environment and time of intrusion. Teoksessa: H. Mäkitie (Editori.), Svecofennian granitic pegmatites (1.86-1.79 Ga) and quartz monzonite (1.87 Ga), and their metamorphic environment in the Seinäjoki region, western Finland. Geologian tutkimuskeskus. Erikoispainos, 30. S 9-29.
- Aurola, E. 1963. On the pegmatites in Torro area, Southwestren Finland. Geologinen tutkimuslaitos. Bulletin De La Commission Géologique, 206. S 32.
- Cerny, P. 1998. Magmatic vs. metamorphic derivation of rare-element granitic pegmatites. Krystalinikum. 24, S 7–36.
- Cerny, P. 1991. Rare-element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. Geoscience Canada. 18. S 49-67
- Ehlers, C., Lindroos A. & Selonen O. 1993.  
The late Svecofennian granitemigmatite zone of southern Finland a belt of transpressive deformation and granite emplacement, Precambr. Res. S 64.
- Ercit, T. S. 2005. REE-enriched granitic pegmatites.  
Rare element geochemistry and ore deposits. Linnen, R. L & Samson, I. M. Geological Association of Canada. Short Course Notes. Vol 17. S 257-296
- Haapala, I. 1966. On the granitic pegmatites in the Peräseinäjoki-Alavus area, South-Pohjanmaa, Finland. Bulletin de la Commission Géologique de Finlande 224. S 98.

- Keliber 2022. Litiumhanke – Hankkeen esittely.  
<https://www.keliber.fi/litiumhanke/hankkeen-esittely/> Luettu 28.12.2022
- Kontoniemi, O. 2011. Kaustisen seudun litiumvarannot –hankkeen (KaLi) tutkimukset vuosina 2010–2011. Malmitutkimusraportti. Geologian Tutkimuskeskus. Länsi-Suomen yksikkö 35/2011. Kokkola. S 29.
- Kontoniemi, O. 2012. Kaustisen alueen Li-potentiaali: Vanhojen moreeninäytteiden uudelleenanalysointi. Geologian Tutkimuskeskus. Länsi-Suomen yksikkö 68/2012. Kokkola. S 20.
- Korsman, K., Korja, T., Pajunen, M., Virransalo, P., GGTrSVEKA työryhmä. 1999. The GGTrSVEKA transect: structure and evolution of the continental in the Paleoproterozoic Svecofennian Orogen in Finland. *Int. Geol. Rev.* 41, S 287–333.
- Lahtinen, R., Korja, A & Nironen, M. 2005.  
Paleoproterozoic tectonic evolution. Teoksessa: Lehtinen, M., Nurmi, PA., Rämö, O.T. (editorit.), *Precambrian Geology of Finland- Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield*. Elsevier B.V., Amsterdam. S 481-532.
- Lindroos, A., Romer, R., Ehlers, C. & Alviola, R. 1996.  
Late-orogenic Svecofennian deformation in SW Finland constrained by pegmatite emplacement ages. *Terra Nova* 8. S 567 -574.
- London, D. 2009. The Origin of Primary Textures In Granitic Pegmatites.  
*The Canadian Mineralogist*. 47(4). S 697 – 724. 10.3749/canmin.47.4.697
- Martin, R. F, & C. DeVito. 2005.  
The patterns of enrichment in felsic pegmatites ultimately depend on tectonic setting. *The Canadian Mineralogist*. 43 (6). S 2027–2048.  
[10.2113/gscanmin.43.6.2027](https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2027)

- Moody, J.B., Meyer, D. & Jenkins, J.E. (1983).  
Experimental characterization of the greenschist/amphibolite boundary in mafic systems. *Am. J. Sci.* 283, S 48-92.
- Mäkitie, H. 2000. Svecofennian granitic pegmatites (1.86-1.79 Ga) and quartz monzonite (1.87 Ga), and their metamorphic environment in the Seinäjoki region, western Finland. Geological Survey of Finland, Special Paper. 30. S 31–59.
- Platt, J.P. & England, P.C. 1994. Convective removal of lithosphere beneath mountain belts: thermal and mechanical consequences. *Am. J. Sci.* 293, S 307–336. [10.2475/ajs.294.3.307](https://doi.org/10.2475/ajs.294.3.307)
- Rasilainen, K., Eilu, P., Ahtola, T., Halkoaho, T., Kärkkäinen, N., Kuusela, J., Lintinen, P. & Törmänen, T. 2018.  
Quantitative assessment of undiscovered resources in lithium–caesium–tantalum pegmatite-hosted deposits in Finland. Geological Survey of Finland, Bulletin 406, S 31. [Doi.org/10.30440/bt406](https://doi.org/10.30440/bt406)
- Selway, J.B. & Tindle, A.G. 2004.  
A Review of Rare-Element (Li-Cs-Ta) Pegmatite Exploration Techniques for the Superior Province, Canada, and Large Worldwide Tantalum Deposits. *Exploration and Mining geology.* 14. S
- Sinclair, W. D. 1993. Granitic pegmatites; in *Geology of Canadian Mineral Deposit Types*. Teoksessa: Eckstrand, O. R., Sinclair, W. D & Thrope, R. I. (Editorit); Geological Survey of Canada, *Geology of Canada*, No. 8. S 503-512.
- Tieteen Termipankki 2022. Pegmatiitti. *Luettu 16.10.2022.*  
<https://tieteentermipankki.fi/wiki/Geologia:pegmatiitti>
- Trueman, D.L. ja Černý, P. 1982. Exploration for rare-element granitic pegmatites. Teoksessa: Černý, P. (toim.) *Granitic pegmatites in science and industry*. Mineralogical Association of Canada Short Course Handbook 8. S 463-493.

Väisänen, M., Mänttari, I., Kriegsman, L. M & Hölttä, P. 2000.

Tectonic setting of post-collisional magmatism in the Paleoproterozoic Svecofennian Orogen, S-W Finland. *Lithos*. Volume 54, 1 – 2. S 64 – 81.  
[https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00018-9)

Väisänen, M., Mänttari, I & Hölttä, P. 2002.

Svecofennian magmatic and metamorphic evolution in southwestern Finland as revealed by U-Pb zircon SIMS geochronology. *Precambrian research*. S 111–127.