

Outokummun alueen geologia

Ville Kylli
LuK-tutkielma
Oulu Mining School
OULUN YLIOPISTO
2018

Tiivistelmä

Outokummun kuparimalmi löydettiin Otto Trüstedtin toimesta siirtolohkaretutkimuksissa 1900-luvun alussa. Tutkimukset aloitettiin sen jälkeen, kun oli löydetty noin viiden kuutiometrin kokoinen kuparimalmilohkare jokiruoppausten yhteydessä. Malmi paikannettiin Kuopion ja Joensuun välille noin 50 km:n päähän lohkareen löytöpaikasta. Muodostuma asettuu arkeisen ja proterotsooisen kallioperän väliselle sutuurivyöhykkeelle.

Outokummun alueen stratigrafia pohjautuu osin alueella tehtyistä kairauksista ja heijastusseismisistä kokeista saatuun tietoon. Syvän kairareian poraaminen eli Outokumpu Deep Drilling Project sisällytettiin osaksi Venäjän ja Suomen valtioiden välisten kauppavelkojen sovittelua. Tästä seurauksena GTK pystyi palkkaamaan venäläiset NEDRA G.N.N.P. ja Machinoexport S.E. -yhtiöt vastaamaan kairauksista. Kairaustyö toteutettiin tarkoituksena selvittää Outokummun alueella aiemmin tehtyjen, seismisistä heijastuksista saatujen tulosten geologista luonnetta. Tärkeimmät heijastavat kohteet sijaitsivat 2-2.5 km:n syvyydellä. Kairareikä ulottuu kokonaisuudessaan 2516 metrin syvyydelle, josta ylimmät kaksi kilometriä ovat pääasiassa kiilleliusketta. Kiilleliuske voidaan jakaa ylempään ja alempaan ryhmään, joiden välille asettuu Outokummulle erikoislaatuinen ofioliittinen yksikkö, jota puolestaan ympäröi mustaliuske. Paikoittain kiilleliuskeen seassa esiintyy myös kloriitti-serisiittiliusketta sekä biotiittigneissia. Pohjimmaisena kairasydämessä yli kahden kilometrin syvyydelle mentäessä kivi vaihtuu pegmatoidiryhmäksi koostuen pääasiassa pegmatiittigraniitista.

Outokummun malmin syntymalliksi Peltonen et al. (2008) ehdottavat kolmivaiheista prosessia, jonka alussa kuparimalmi muodostuu merellisessä ympäristössä. Tämän jälkeen yhtäaikaisesti tektonisen kuljetuksen aikana nikkeli sekoittuu kuparin kanssa voimakkaassa karbonaatio-silisifikaatioissa muodostaen Outokumpu-tyyppisen Cu-Co-Zn-Ni-Ag-Au-sulfidimuodostuman aikavälillä 1.95-1.88 miljardia vuotta sitten.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	1
1. Johdanto	3
2. Historia	3
3. Sijainti	3
4. Geologia	5
4.1. Stratigrafia ja litologiset yksiköt syväkairauksen ja heijastusseismisen tiedon perusteella	7
4.1.1. FIRE-projekti	7
4.1.2. HIRE-projekti	7
4.1.3. Keretin-Vuonoksen alue	8
4.1.4. Perttilahti-Horsmanahon alue	8
4.1.5. Kylylahden alue	9
4.1.6. Hukkala-Kylylahden alue	9
4.1.7. Sola ja Sotkuman alue	9
4.1.8. OKU Deep drill core –syväkairareikä	12
4.1.9. Pohjois-Karjalan liuskejakso ja Outokumpu-assosiaatio	13
4.2. Petrologia ja geokemia	16
4.2.1. Kiilleliuske ja biotiitti-gneissi	16
4.2.2. Kloriitti-serisiittiliuske ja sarvivälke-epidoottiliuske	16
4.2.3. Mustaliuske	17
4.2.4. Outokumpu-assosiaatio	18
4.2.5. Pegmatiittigraniitit ja niihin liitettävät kivet	19
4.3. Pohjois-Karjalan liuskejakson tektonis-metamorfinen evoluution päävaiheet	20
4.4. Syntymalli	21
Viiteluettelo	26

1. Johdanto

Outokummun alueen geologia on monimuotoisella syntytarinallaan herättänyt mielenkiintoa useissa tutkijoissa. Tässä työssä esittelen Outokummun alueen pääpiirteissään keskittyen erityisesti stratigrafiaan ja kairasydämeistä R2500 saatuun tietoon kivien kemiallisesta koostumuksesta. Tarkastelen myös tämän hetkiseen tietoon pohjautuvaa Peltonen et. al. (2008) koostamaa syntymallia.

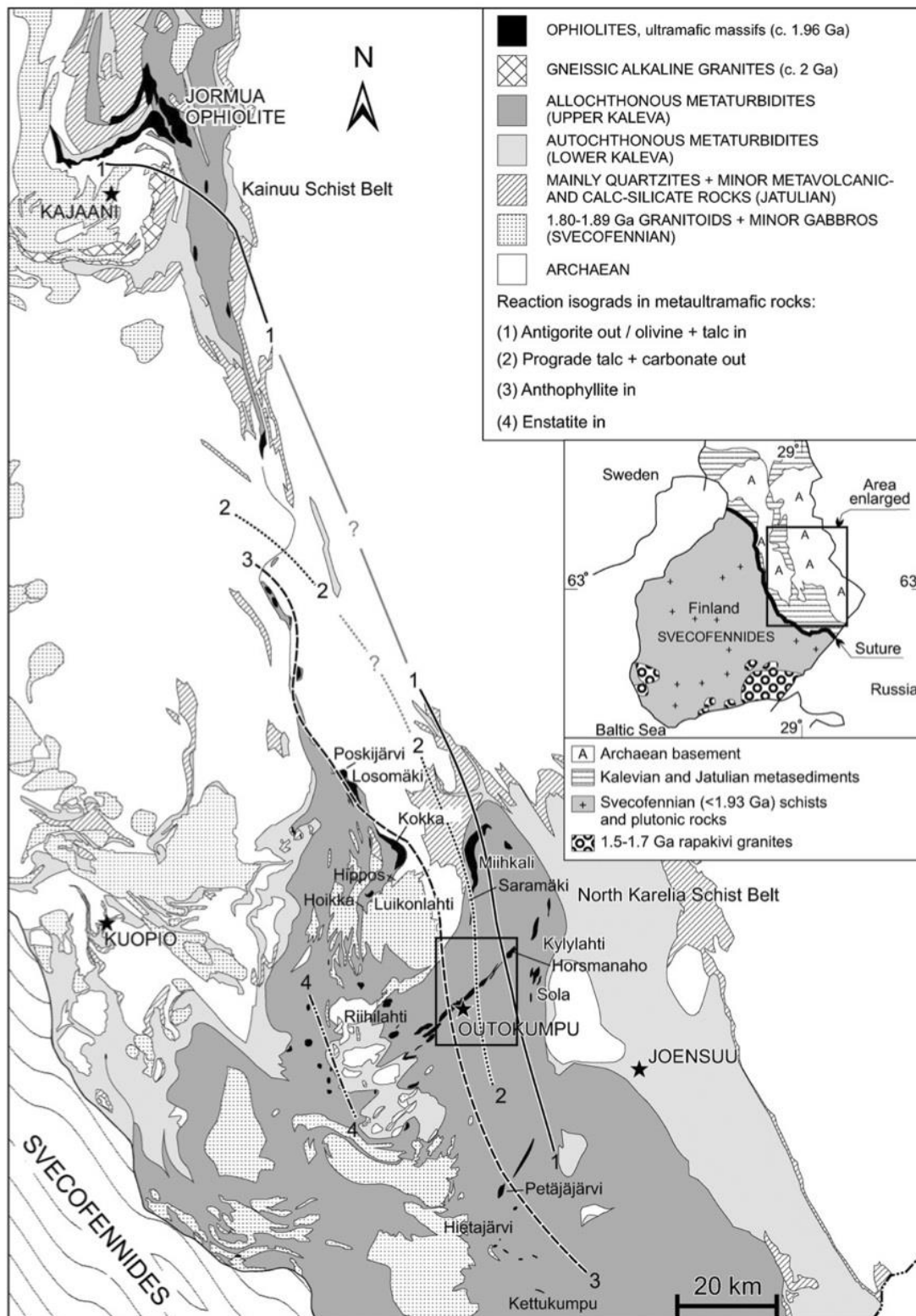
2. Historia

Vuonna 1908 löydettiin Pohjois-Karjalasta Rääkkylän Kivisalmen kanavan ruoppaustöiden yhteydessä noin viiden kuutiometrin kokoinen kuparimalmilohkare. Aluksi lohkarkeen epäiltiin olevan meteoriitti, mutta Geologisen Komissionin todettua lohkarkeen kuparimalmiksi alettiin asiaa tutkimaan tarkemmin (Outokummun kaivos, 1928).

Silloisen Geologisen Komissionin palveluksessa toiminut vuori-insinööri Otto Trüstedt sai tehtäväkseen kyseisen malmilohkarkeen alkuperän selvittämisen. Kaksi vuotta kestäneen malmilohkare-etsinnän jälkeen löydettiin Outokummun kuparimalmi. Se sijaitsee 53 km:n päässä alkuperäisen malmilohkarkeen löytöpaikasta. Kaivoksen toiminta käynnistettiin vuonna 1913 (Outokummun kaivos, 1928).

3. Sijainti

Outokummun kaivosalue sijoittuu Kuopion ja Joensuun välille. Se kuuluu Pohjois-Karjalan paleoproterotsooiseen liuskejaksoon, joka puolestaan sijoittuu itäpuolella olevan neoarkeaisen kratonin ja länsipuolella olevan svekofenniseen suuralueeseen kuuluvan paleoproterotsooisen saarikaarikompleksin välille (Peltonen et al., 2008). Outokummun muodostumat ovat asettuneet paikoilleen alloktonisena nappekompleksina karjalaisen kratonin rajalle svekofennisen orogeenian alkuvaiheessa (Kuva 1).



Kuva 1. Geologinen kartta Outokumpu-Jormuan alloktonista. Outokummun kaivosalue osoitettu nelikulmiolla (Peltonen et al., 2008). Julkaistu kustantajan luvalla.

4. Geologia

Outokummun alueelta voidaan erottaa useita litologisia yksiköitä. Gaál et al. (1975) jakavat kivet kahteen ryhmään niiden synty-ympäristön perusteella: geosynkliiniset ja sisämeren alueella syntyneet kivet. Geosynkliinisiin kiviin luetaan kuuluvaksi serpentiniitit, kvartsiitit, karsikivet, karbonaattikivet, kordieriitti-antofylliittikivet, flogopiittiset kiilleliuskeet sekä malmit. Sisämeren kiviin kuuluvat satroliitit, kalkkisiilikaattikvartsiitit, kvartsiitit, kloriitti-biotiittiliuskeet, diopsidi-karsikivet, konglomeraatit ja rapautumisbreksiat karsimatriisilla.

Alueen tunnusomainen piirre on Gaálin (1975) mukaan Outokumpu-assosiaatio, jossa serpentiniittiä ympäröivät kvartsiitit, karsikivet sekä karbonaattikivet, jotka kaikki yhdessä muodostavat yksikön. Yksikön sisäinen kivilajien järjestys ytimeä ulospäin on: karbonaattinen serpentiniitti - karbonaattikivi - tremoliittikarsi - diopsidikarsi - kvartsiitti (Gaál et al., 1975). Outokumpu-assosiaation, jonka on todettu olevan ofioliittista alkuperää, ajatellaan korreloivan tektonostratigrafisesti Kajaanin läheisyyteen asettuneeseen Jormuan ofioliitin kanssa (Peltonen et al., 2008).

Västi (2011) jakaa alueella esiintyvät kivilajit arkeisiin (2.8-2.6 Ga) kiviin ja karjalaisen liuskejakson kiviin. Arkeisiin kiviin kuuluu pääasiassa kvartsi-kalimaasälpäisiä orto- ja paragneissejä, joissa esiintyy paikoin liuskeisia amfiboliittilinssejä. Arkeiset kivet koostuvat pääosin autoktonisista pohjan arkooseista, konglomeraateista, kvartsiiteista, karsikivistä sekä mustaliuskeista. Niillä on myös matalan meren synty-ympäristölle ominaisia piirteitä. Karjalaisen liuskejakson kivet voidaan edelleen jakaa alemman Sariolan ja Jatulin (2.5-2.1 Ga) sekä Ylä-Kalevan (2.1-1.9 Ga) yksiköihin. Kalevan yksikön ylempi alloktoninen osio koostuu pääpiirteissään turbidiittisista syvän meren kiilleliuskeista, joissa on mustaliuskevälikerroksia. Outokummun karjalaisilta metasedimenteiltä länteen mentäessä kivilajiyksikkö vaihtuu Maarianvaaran graniittiin (1.86 Ga), joka tunkeutuu metasedimentteihin sekä arkeisen peruskallion doomeihin. Metasedimenttien eteläpuolella Heinäveden graniitti tunkeutuu myös Outokummun metasedimentteihin.

Kontinen (2012) käsittelee Outokummun aluetta pohjoismaiden metallogenisien kartoituksen yhtenä osa-alueena, joka julkaistiin Geologian tutkimuskeskuksen Special Paper –sarjan volyymissä 53. Tutkimuksessa todetaan Outokummun alueen sijoittuvan paleoproterotsooiselle Pohjois-Karjalan liuskejaksolle ja rajoittuvan Outokummun alloktionin alueelle, joka tunnetaan myös Outokumpu Nappe-kompleksina tai Outokummun nappena. Kompleksi sisältää polymetallisia ja polygeneettisiä serpentiniittiyksiköitä, joihin Outokummun tyyppin kupari-koboltti-sinkkimalmien ja Kokka-tyypin nikkelimineralisaatiot läheisesti liittyvät.

Outokummun alloktioni koostuu yli 85 % liuskeisesta, keskitason – korkean asteen metaturbidiittisesta hiekkakivistä ja peliiteistä (Kontinen, 2012). Kilometrien paksuisesta pääturbidiittisekvenssistä ei löydy metavulkaanisia kiviä tai syntektonisia magmaattisia intrusioita. Nämä karbonaattiset liuskeet sisältävät suuren määrän grafiittia (5-10 %) sekä rautasulfideja (5-20 p-%) ja ovat voimakkaasti rikastuneita metalleista Ni, Cu sekä Zn verrattuna ylemmän kuoren koostumukseen. Pelkistymisherkät metallit, kuten Sb, Se, Mo, V ja U, esiintyvät myös korkeampina pitoisuuksina. Kobolttipitoisuus on kauttaaltaan alhainen, noin 33 ppm.

Jotkin Outokummun alueen serpentiniittiyksiköistä sisältävät massiivisia tai semimassiivisia Cu-Co-Zn-tyypin (Outokumpu) sekä Ni-tyypin (Kokka) sulfideja. Näistä kahdesta taloudellisesti merkittävämpi Outokummun Cu-Co-Zn-mineralisaatio esiintyy aina rinnakkain voimakkaasti Ni-pitoisen mineralisaation kanssa. Toisaalta Kokka-tyypin Ni-mineralisaatioita esiintyy myös ilman Outokummun tyyppin Cu-Co-Zn-mineralisaatioita. Heikot Outokummun tyyppin kivien Ni-mineralisaatioita löydetään laajalta alueelta ja sisältävät 1500-3000 ppm Ni magneettikiisussa ja pentlandiitissa. Vaikka malminetsinnän näkökulmasta ajateltuna Outokumpu-tyyppisten Cu-Co-Zn-esiintymien todennäköisyys serpentiniittisessä isäntäkivessä on alhainen, on otettava huomioon, ettei yleisesti lähelle asettuneet mustaliuskeet vaikuttaneet suuresti malmiesiintymien syntyyn eikä niiden metallien määrään (Kontinen, 2012)

4.1. Stratigrafia ja litologiset yksiköt syväkairauksen ja heijastusseismisen tiedon perusteella

Outokummun alueen stratifiasta saa hyvän käsityksen yhdistämällä alueella tehtyjen heijastusseismisten töiden tuloksia sekä R2500-kairareistä saatua tietoa. Outokummun alueelta saatu heijastusseisminen aineisto koostuu kahden erillisen projektin osista: FIRE (Finnish Reflection Seismic Experiment) sekä HIRE (High Resolution Reflection Seismics for Ore Exploration) (Sorjonen-Ward, 2006).

4.1.1. FIRE-projekti

FIRE-työn heijastusseismisistä linjoista Outokummun aluetta koskeva tieto kuuluu FIRE3-kategorian alle, joka edelleen jaetaan kolmeen alakategoriaan alueen perusteella: Outokumpu domain, Höytiäinen domain sekä Pielinen domain. Näistä kolmesta alakategoriasta käytän työssäni Outokumpu-alueella tehtyjen seismisten linjojen OKU1, OKU2 ja OKU3 tietoja stratifiasta tarkemman käsityksen saamiseksi. Outokummun alueen stratigrafiaan liittyvä tieto FIRE-työssä on mittauspistetiedoissa pisteiden CMP 0000-2450 välillä (Sorjonen-Ward, 2006).

4.1.2. HIRE-projekti

FIRE-projektin lisäksi alueella on toteutettu myös osia HIRE (High Resolution Reflection Seismics for Ore Exploration 2007-2010)-projektista. HIRE-työ keskittyy FIRE-projektin läheisyyteen koillispuolelle, Outokumpu-Polvijärven alueelle ja tehtiin yhteistyössä Kylylahti Copper Oy:n ja Mondo Minerals Oy:n kanssa. HIRE-projektin heijastusseismiset osa-alueet on nimetty seuraavasti: V1, V2, V3, V7, V8 ja E1. Kokonaisuudessaan alueen heijastusseismiset linjat kattavat yhteensä 78.5 km, joiden lisäksi myös yksi 3.5 km mittainen räjäytysseisminen linja kuuluu alueella toteutettuihin kenttätöihin. FIRE- ja HIRE-projektien korkearesoluutiotulokset ja niiden tulkinta jaetaan tutkimuksessa kokonaisuuksiin alueiden perusteella, joita ovat: Keretti-Vuonos, Perttilahti-Horsmanaho, Kylylahti, Hukkala-Kylylahti sekä Sola ja Sotkuma (Kukkonen et. al., 2012).

4.1.3. Keretin-Vuonoksen alue

Keretin-Vuonoksen alueelta saatujen OKU1- ja OKU2-tietojen pohjalta voidaan todeta päämalmivyöhykkeen kallistuvan kaakkoon, kapenevan ja lopulta katkeavan noin kilometrin syvyydellä (Kukkonen et. al., 2012). Päämalmivyöhyke voidaan jakaa kahteen eri heijastavaan yksikköön, Keretti ja Horsmanaho, niiden alueeseen liittyvän geologian sekä kahden pinnalla havaittavan malmivyöhykkeen päähaaran mukaisesti. Alueen syväkairareikään perustuen sekä Keretti että Horsmanaho osoittavat alueella olevan mustaliusketta ainoastaan pirstaloituneena tai ohuena kerroksena kilometrin syvyydellä. 1,5 kilometrin syvyydelle mentäessä voidaan havaita aiempiin tutkimustietoihin perustuvat Outokumpu-assosiaation osat: laminoituneet serpentiniittiyksiköt, karsikivet sekä mustaliuske. OKU3 tiedot korreloivat suoraan OKU1- ja OKU2-linjoista saatuun tietoon ja osoittavat selvää rakenteiden jatkumoa.

4.1.4. Perttilahti-Horsmanahon alue

Perttilahti-Horsmanahon alueen heijastusseismiset tiedot V7-linjalta ja pintaesiintymät yhdessä viittaavat alueen voimakkaiden heijastavien yksiköiden olevan välillä CMP 0-3300 pääasiassa proterotsooista metasedimenttiä sekä arkeista kallioperää saavuttaessa kahden kilometrin päähän luoteeseen Saarivaaran alueelle. OKU1-OKU3- ja V1-linjojen korrelaatio viittaa Outokumpu-assosiaation kivien olevan läsnä V7-linjan profiilin yläosissa. CMP 2700-3300 välisen alueen heijastavat yksiköt 1,5-3,5 kilometrin syvyydellä voivat kuitenkin koostua ofioliittista kivistä. Horsmanahon alueelta V2-linjalta voidaan havaita sama heijastava yksikkö kuin Keretin-Vuonoksen alueelta. Horsmanahon alapuolella sijaitseva Keretin heijastava yksikkö voidaan nähdä 500 metriä paksuna pakettina laminoituneita heijastavia yksiköitä, jotka kallistuvat noin 40 astetta kaakkoon (Kukkonen et. al., 2012).

4.1.5. Kylylahden alue

Kylylahden alueen V1-linjalle lounaasta saavuttaessa tapahtuu muutos heijastavissa yksiköissä. Horsmanahon ja Keretin alueiden sekä Outokummun alueen heijastavien yksiköiden jatkuvuus katkeaa (Kukkonen et. al., 2012). Horsmanahon alueen heijastava yksikkö päättyy jo lähellä Horsmanahoa eroosioista johtuen ja sen noustessa pinnan tasoon. Keretin alueen heijastava yksikkö sen sijaan jatkuu noin kilometrin verran lounaaseen Kylylahden alueesta, jossa se katkeaa kaakko-luodesuuntaiseen siirroslinjaan. Kylylahden alueen seisminen kuva on Outokummun vyöhykkeeseen verrattuna erilainen. V8- ja E1-linjojen tiedot viittaavat alueen heijastavien yksiköiden olevan siirrostuneita kaakko-luodesuuntaisesti. Kylylahden esiintymä sekä kaivos jatkuvat kolmen kilometrin syvyydelle ja alueella on todettu olevan kolme suurta siirrostumaa. Alueen malmiesiintymää ei voida suoraan kuvantaa heijastusseismissä johtuen sen pienestä koosta verrattuna seismisten aaltojen kokoon sekä malmin pystysuuntaisesta kallistumasta.

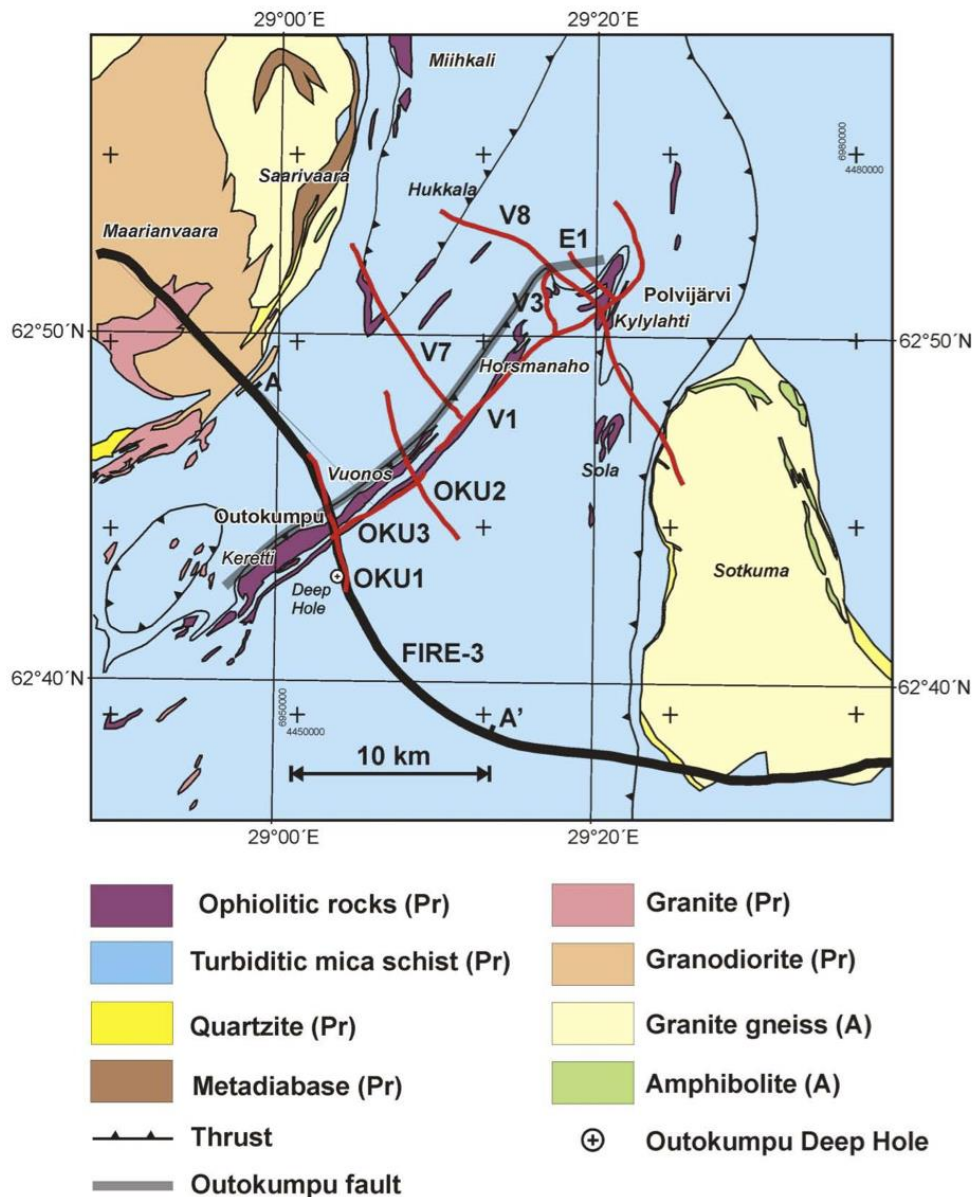
4.1.6 Hukkala-Kylylahden alue

Hukkala-Kylylahden alueelta luoteeseen mentäessä löydettiin useita kaakkoon loivasti kallistuvia heijastavia yksiköitä, jotka korreloivat OKU1-, OKU2-, V7- ja V2-linjojen saman kaltaisten yksiköiden kanssa samalla edustaen ofioliittijohdannaisia kiviä (Kukkonen et. al., 2012). Pinnan heijastavat yksiköt ilmenevät yhdessä mustaliuskeen sekä karsikivien kanssa geologisella kartalla. V8-linjan profiilin kaakkoisosan syvimmissä kohdissa sijaitsevien heijastavien yksiköiden voidaan todeta olevan arkeista kallioperää sekä proterotsooisia ofioliittisiä kiviä.

4.1.7. Solan ja Sotkuman alue

Solan ja Sotkuman alueiden heijastavat yksiköt Kylylahden ja Polvijärven alueilta kaakkoon mentäessä viittaavat ofioliittisten synformisten rakenteiden jatkuvan 1,5 kilometrin syvyydelle V8-linjan kohdalla CMP 4400 (Kukkonen et. al., 2012). Solan alueen pintaesiintymän serpentiinit sijaitsevat 1-2 km:n päässä tältä V8-linjan

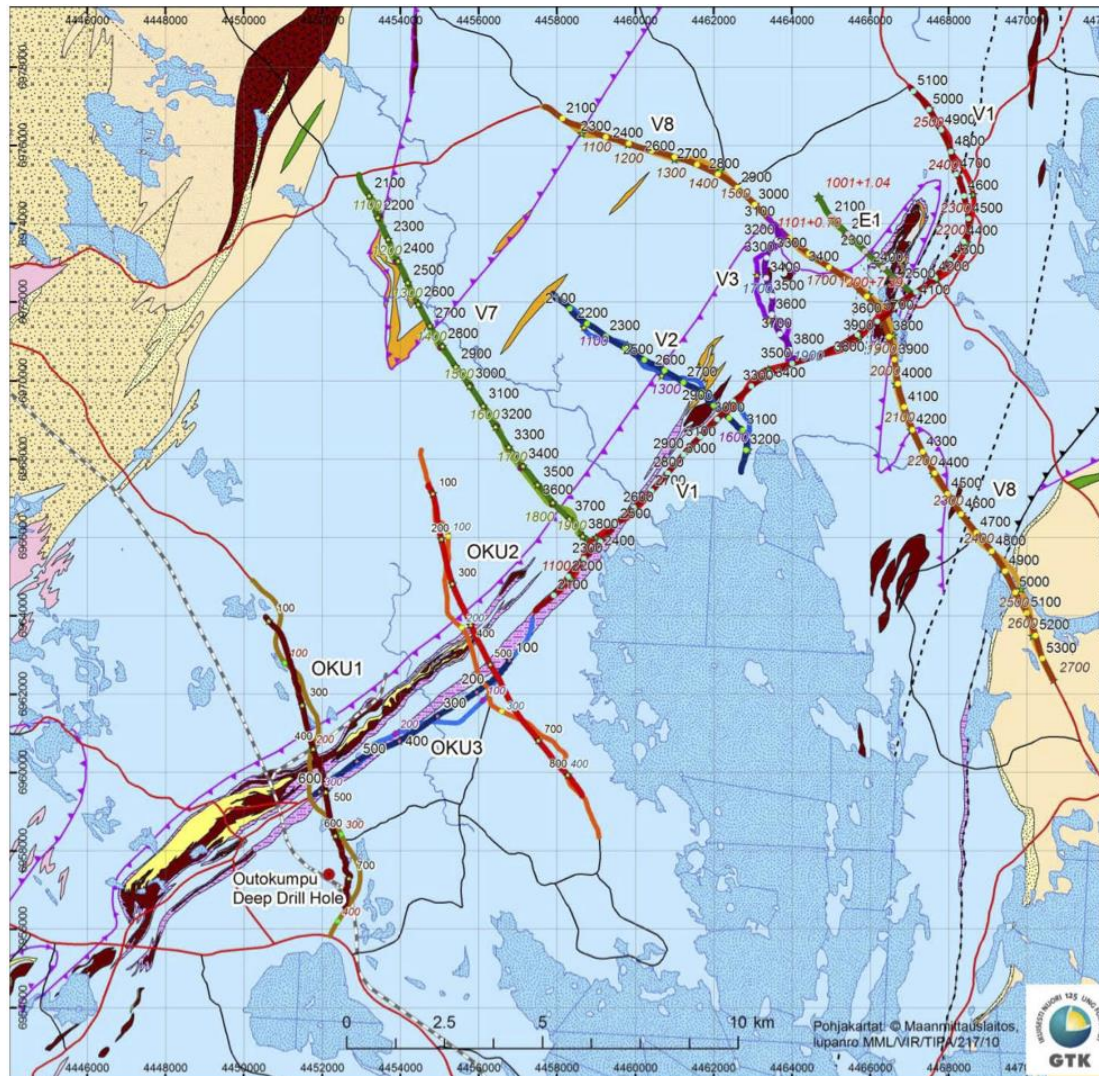
alueelta. Myös lähempää Kylylahden alueen heijastavaa yksikköä, jopa 2 km pohjoiseen mentäessä, voidaan havaita ofoliittisia kiviä.



Kuva 2. Yleiskuva Outokummun alueen malmiesiintymistä sekä alueella tehdyistä FIRE- ja HIRE-kenttätöistä (Kukkonen et. al., 2012).

Sotkuman alueen voimakkaasti heijastavat yksiköt voidaan yhdistää arkeisiin gneisseihin. V8-linjan gneissien alla sijaitsee voimakas kaakkoon kallistuva heijastava yksikkö, jonka arvellaan liittyvän gneissien kontaktissa olevaan mafiseen intruusioon sekä mustaliuskeeseen. Sotkuman gneissin on tulkittu olevan palanen arkeista kiveä; täten se ei edusta todellista kallioperädoomia. Mafisen intruusion ja mustaliuskeen

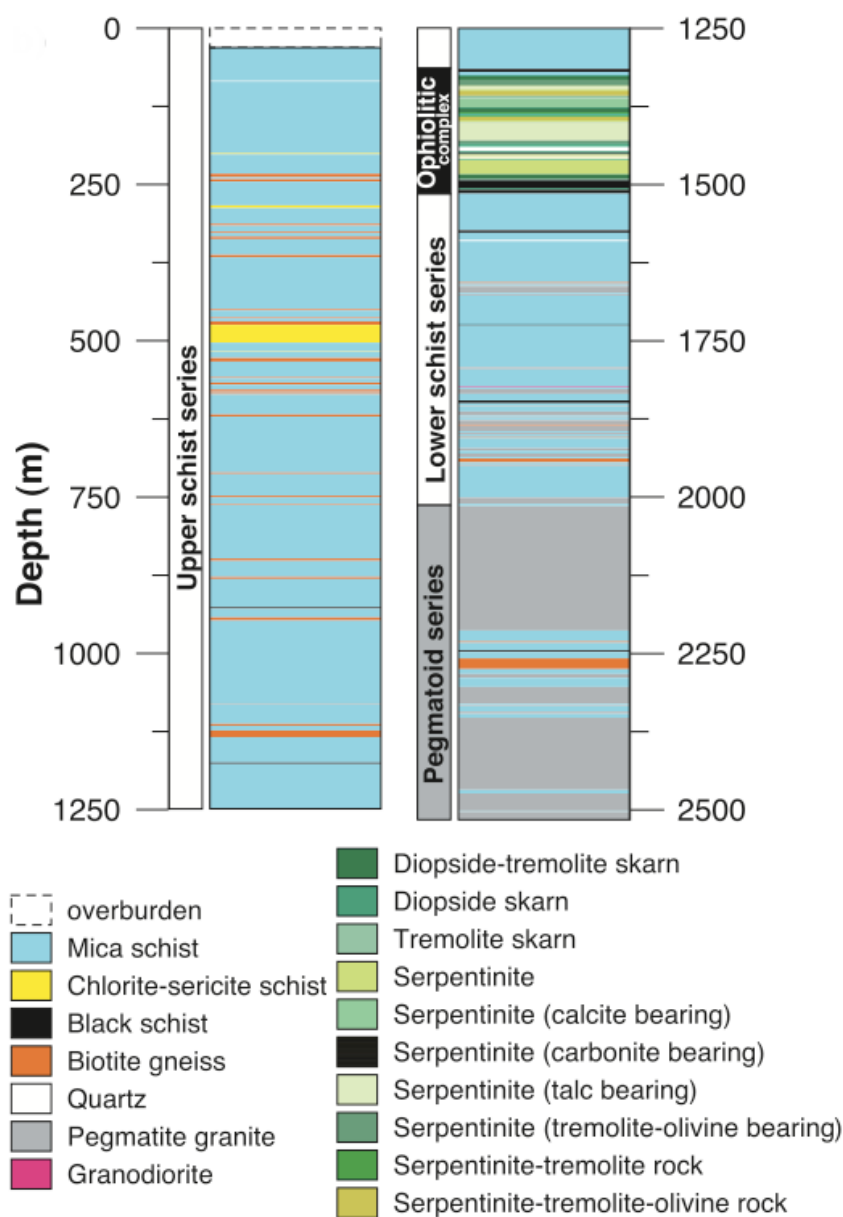
koostaman heijastavan yksikön voidaan tulkita pitävän allaan hiertymävyöhykkeen, joka on muodoltaan yhteneväinen heijastavan yksikön kärjen kanssa. Syvemmälle 1,5-2 kilometriin mentäessä kiilleliuskeen ja Sotkuman alueen gneissin alla (CMP 4600-5400) on paksu kerros heijastavia yksiköitä. Yksiköiden on todettu olevan ofioliittijohdannaisia kiviä.



Kuva 3. Outokumpun-Polvijärven alueen korkean resoluution seismiset linjat ja mittauspisteet sekä Outokumpu Deep Drill Hole. Linjoille merkityt numerot (kursiivi) osoittavat vastaanottoasemien numerot ja viereen merkityt numerot (normaali teksti) CMP koordinaatit. FIRE: OKU1, OKU2, OKU3. HIRE: V1, V2, V3, V7, V8, E1 (Kukkonen et. al., 2012).

4.1.8. OKU Deep drill core –syväkairareikä

Aiempiä GTK:n ja venäläisten yhtiöiden yhdessä toteuttamia heijastusseismisten töiden tuloksia tarkentamaan porattiin kairareikä R2500. Kairasydäimestä saadun tiedon perusteella on voitu määrittää tarkasti litologiset yksiköt Outokummun kaivosalueelta, johon viime aikainen tutkimus ja kaivostoiminta on pääasiassa keskittynyt. Elbra et al. (2011) määrittelevät tutkimuksessaan litologiset yksiköt pinnalta pohjalle seuraavasti (Kuva 4): ylempi liuskeryhmä, ofioliittinen kompleksi, alempi liuskeryhmä ja pegmatoidiryhmä.



Kuva 4. OKU deep drill core -projektin aineiston pohjalta koottu poikkileikkaus litologisista yksiköistä (Elbra et al., 2011).

4.1.9. Pohjois-Karjalan liuskejako ja Outokumpu –assosiaatio

Kontinen et. al. (2006) jakavat työssään Outokumpu-assosiaation ja sen geologisen ympäristön Pohjois-Karjalan liuskejaksolla eri kokonaisuuksiksi. Pohjois-Karjalan liuskejakson suuret tektonis-stratigrafiset yksiköt on jaettu neljään alaosiin: Arkeinen kallioperäkompleksi, Sariolan-Jatulin tektofasies sekä Ala- ja Ylä-Kalevan tektofasiekset. Outokumpu-assosiaation levittäytyminen Pohjois-Karjalan liuskejakson alueelle on saanut myös selvennystä työssä.

Pohjois-Karjalan liuskejako koostuu pääasiassa Sariolan ja Jatulin vanhemmista (2.5-2.0 Ga), autoktonisista metasedimenttisistä kivistä syntyperältään matalan meren ympäristö sekä Kalevan nuoremista (2.0-1.92 Ga), osittain parautoktonisista ja alloktonisista, syntyperältään syvän meren ympäristön kivistä (Kontinen et.al., 2006). Pohjois-Karjalan liuskejakson pohjoisosan alapuolelle sijoittuva arkeinen kallioperäkompleksi on verrattavissa edempänä pohjoispuolella sijaitsevaan Iisalmen kompleksiin ja koostuu täten pääasiassa 3.2-2.7 miljardin vuoden ikäisistä, poimuttuneista, mafis-tonaliittis-felsisistä gneisseistä länsiosassa (Iisalmen alue) ja 2.75-2.7 miljardin vuoden ikäisistä, metasedimenttis-vulkaanis-graniittisista gneisseistä itäosassa (Rautavaaran alue).

Sariolan ja Jatulin tektofasiekset yhdessä edustavat kratonista, matalan meren ympäristön, 2.5-2.1 miljardin vuoden ikäistä yksikköä, kun taas Itä-Suomen kallioperäkompleksin on selkeästi todettu olevan osana suurta, stabiilia ja suurelta osin läpitasoitettunutta mantereista blokkia, joka tunnetaan myös nimellä karjalainen kratoni. Tämän kratonis-epiratonisen alueen kivet ovat suurelta osin huuhtoutuneista arkoosisista erittäin kehittyneisiin ortokvartsiittisiin hiekkoihin luokiteltavia. Serisiitti-muskoviitti-phlogopiittisiksi liuskeiksi muuttuneista saviliuskeyksiköistä alueen kiviä on alle 10 %. Sekvenssin yläosassa on ohut, noin 2.1 miljardia vuotta vanha, dolomiiteista, metabasiiteista (laavaa ja tuffia) sekä metavakoista (kiilleliuske) koostuva yksikkö. Kerrostuneet mafiset muodostumat ovat yleisiä erityisesti Jatulin jaksossa ja sen alapuolelle sijoittuvassa arkeisessa kallioperässä. Kallioperäkompleksi sisältää runsaasti doleriittisiä juonia, jotka kerrosmuodostumien kanssa yhdessä ilmentävät ainakin kolmea eri päätapahtumaa mantereisen alueen

laakiobasalttityylisestä, vaippaperäisestä mafisesta magmatismista. Nämä kolme päätaphtumaa alueella ovat: 1) alueellisesti erittäin laaja, kerrostunut wehrliittigabbro-leucogabbrosarjan kerrosjuonet, jotka ovat asettuneet paikoilleen noin 2.2 miljardia vuotta sitten, 2) Fe-tholeiittiset juonet (ikä noin 2.1 Ga) ja 3) Mg-tholeiittiset juonet (ikä noin 1.97 Ga).

Ala-Kalevan tektofasies koostuu pääosin metagrauvakasta, arkoosisista vakoista, vakkakonglomeraateista, kvartsivakoista, mustaliuskeista sekä paikallisista ohuista metabasiittisista tunkeutumista (Kontinen et. al., 2006). Tutkimusalueen luoteisosissa sijaitseva Höytiäisen vyöhyke edustaa Ala-Kalevan tyyppin parhaiten ja laajimmin tutkittua esiintymää Pohjois-Karjalassa. Kivet koostuvat noin 2.1 miljardin vuoden ikäisestä (Ylä-Jatuli), pääosin turbidiittityyppisistä, psammiittis-fylliittisistä, paikallisesti konglomeraattisista metasedimenteistä, joiden on aiemmin päätelty olevan koherentti yksikkö. Uudempien tutkimusten valossa on kuitenkin osoittautunut, että Höytiäisen vyöhyke edustaakin sen sijaan tektonostratigrafisesti varsin monimutkaista kokonaisuutta, jossa osa yksiköistä korreloi Ala-Kalevan tektofasieksen Kainuun esiintymien kanssa, ja joka on osittain Ylä-Kalevan tyyppistä sekä luonteeltaan alloktonista. Toiseksi suurin esiintymä Ala-Kalevan tektofasieksista on Kaavi, jossa kvartsiittis-arkoosiset vakka-siivut nappea ja alustojen väliset mustaliuskeet lomittuvat Ylä-Kalevan tektofasieksen grauvakkaisten metaturbidiittien ja mustaliuskeiden, serpentiniittien ja arkeaisen kallioperän suikaleiden ja niitä peittävän Jatuli/Kalevan kivien kanssa.

Ylä-Kalevan tektofasies on esitetty Kontisen (1987) työssä ensimmäisen kerran. Ylä-Kalevan turbidiittien kerrostuminen on yhdistetty repeämän jälkeiseen viilenemiseen ja siihen liittyvään 1.95 miljardia vuotta sitten tapahtuneeseen Karjalan kratonin hajoamisen synnyttämään passiivisen reuna-altaan vajoamiseen. Sittemmin Kontinen ja Sorjonen-Ward (1991) totesivat Ylä-Kalevan metaturbidiittien olevan litologialtaan sekä geokemialliselta koostumukseltaan identtisiä Outokummun alueen metaturbidiittien kanssa.

Tarkastelemalla Outokumpu-assosisaation levinneisyyttä ja hajontaa Pohjois-Karjalan liuskejaksen alueella pelkistä kartoista saattaa helposti päätyä vääriin päätelmiin. Outokumpu-assosisaation kivet kuitenkin koostuvat osin usean kilometrin paksuisista,

hiekkaisista turbidiiteista, joissa esiintyy vain vähän mustaliuskeisia tunkeutumia ilman niihin liitettävää serpentiniittiä. Turbidiittien alapuolella stratigrafiassa esiintyy mustaliuske-serpentiniittikerros. Sen on täytynyt asettua paikoilleen joko ennen tai saman aikaisesti ensimmäisen siirrostuman kanssa, jossa Outokumpu-alloktioni on siirrostunut kratonin rajan yläpuolelle. Karttoja tarkastelemalla voidaan huomata, että Pohjois-Karjalan liuskejaksolle on sijoittunut useita, toisistaan irrallisia, nykyisellä eroosiopinnalla esiintyviä Outokumpu-assosiaation rakenteellisia yksiköitä, jotka sisältävät serpentiniittejä ja niihin liittyviä metasomaattisia kiviä. Nämä ”nappe-
struktuurit” ovat Outokumpu, Enonsalo, Kaavi ja Miihkali. Lisäksi alueelta löytyy pienempiä serpentiniittiyksiköitä Juojärveltä itään ja kaakkoispuolella Rikkaveden aluetta, epäsäännöllisessä jousimaisessa muodossa jatkuen Maljasalmelta Varislahden kautta Lietukkaan. Pieniä yksiköitä on myös läsnä lounaispuolella Rikkaveden aluetta, Ohtaansalmen-Paakkilan alueella. Kontinen et. al. (2006) yhdistävät edellä mainitut pienemmät yksiköt yhdeksi, Rikkavesi-strukturiksi.

4.2. Petrologia ja geokemia

R2500-kairareian ylin kivilajiyksikkö, joka on noin kaksi kilometriä paksuudeltaan, koostuu pääasiassa monotonisesta kiilleliuskeesta, jossa esiintyy paikoittain biotiittigneissia. Väliin kuitenkin mahtuu myös kloriitti-serisiittiliusketta sekä ofioliittinen Outokumpu-assosiaatio. Kahdesta kilometristä syvemälle mentäessä kivilaji vaihtuu pegmatiittigraniitiksi (Kuva 4) (Västi, 2011; Elbra et al., 2011).

4.2.1. Kiilleliuske ja biotiittigneissi

Kiilleliuske on tyypillisesti homogenista, raekooltaan hieno-keskirakeista, väriltään harmaata, granoblastista eikä juurikaan paljasta mitään rakenteita (Västi, 2011). Mineraalikoostumukseltaan kivi on yksinkertainen ja sisältää päämineraaleinaan keskimäärin kvartssia 40.2 %, plagioklaasia 33.7 % ja biotiittia 20.3 %. Kalimaasälpä sekä muskoviitti esiintyvät myös harvoin päämineraaleina. Aksessorisina mineraaleina esiintyy yleisimmin muskoviittia, kloriittia, kalimaasälpää, opaakkeja, apatiittia, zirkonia ja kalsiittia. Kivi sisältää myös pieniä määriä epidoottia, prehniittia, meioniittia, almandiinia, turmaliinia, titaniittia sekä monatsiittia.

4.2.2. Kloriitti-serisiittiliuske ja sarvivälke-epidoottiliuske

Kloriitti-serisiittiliuske on homogeenista, raekooltaan hieno-keskirakeista, harmaata, tekstuuriltaan granoblastista-lepidoblastista eikä osoita säilyneitä primäärisiä rakenteita (Västi, 2011). Päämineraalit ja niiden runsaudet vaihtelevat seuraavasti: kvartsi 25.9-44.0 %, plagioklaasi 14.7-32.8 %, kloriitti 7.3-15.74 %, serisiitti/muskoviitti 6.5-13.44 %, kalimaasälpä 3.5-19.8 % sekä biotiitti 3.6-13.2 %. Aksessorisina mineraaleina kivessä on kalsiittia, apatiittia, almandiinia, prehniittia, turmaliinia, epidoottia sekä opaakkeja mineraaleja.

Sarvivälke-epidoottiliuske on väriltään vaalean harmaata, raekooltaan keski-karkearakkeista ja granoblastista. Päämineraaleina kivessä ovat kvartsi, epidootti, plagioklaasi, sarvivälke, biotiitti ja muskoviitti. Västi on listannut aksessorisiksi mineraaleiksi kalsiittia, kalimaasälpää, opaakkeja, titaniittia, almandiinia, diopsidia, kloriittia, apatiittia ja zirkonia. Hän ehdottaa kloriitti-serisiittiliuskeen olleen alunperin kiilleliusketta, jossa olisi fluidien vaikutuksesta biotiitti muuttunut kloriitiksi ja plagioklaasi serisiitiksi.

4.2.3. Mustaliuske

Outokummun alueen mustaliuskeet Västi (2011) jakaa tutkimuksessaan kahteen ryhmään: mustaliuskeet ja kalsiumkarbonaattiset mustaliuskeet. Kalsiumkarbonaattinen mustaliuske jaetaan edelleen kvartsirikkaaseen ja kvartsiköyhään tyyppiin. Mustaliuskeen pääsilikaattimineraalit runsauksineen ovat kvartsi 6.4-38.8 % ja plagioklaasi 9.0-37.3 %. Kalimaasälpää, biotiittia, flogopiittia, kloriittia, muskoviittia ja opaakkeja (rikkikiisu, magneettikiisu) esiintyy myös päämineraaleina, mutta niiden koostumus on hyvin vaihtelevaa. Kalsiumkarbonaattista mustaliusketta esiintyy vain Outokumpu-assosiaation kivien kontaktipinnan alapuolella, kun taas "tavallista" mustaliusketta esiintyy yhtä poikkeavaa horisonttia lukuun ottamatta ainoastaan stratigrafiassa Outokumpu-assosiaation yläpuolella.

Kvartsirikkaan kalsiumkarbonaattisen mustaliuskeen päämineraalit ja niiden runsaudet ovat seuraavat: tremoliitti 12.8-31.8 %, kvartsi 11.4-29.4 % ja plagioklaasi (Västi, 2011). Kvartsiköyhän kalsiumkarbonaattisen mustaliuskeen päämineraalit puolestaan koostuvat tremoliitista (35.6-42.0 %), plagioklaasista (3.6-23.4 %) ja kvartsista (0-0.3 %). Kummassakin tyypissä, niin kvartsirikkaassa kuin kvartsiköyhässä, esiintyy päämineraaleina myös kalimaasälpää, muskoviittia sekä epidoottia.

Verrattaessa alueen kiilleliuskeisiin tai biotiittigneisseihin sekä "tavallinen" että kalsiumkarbonaattinen mustaliuske ovat kemiallisesti rikastuneita useista pää- ja hivenalkuaineista, kuten CaO, MgO, Fe₂O₃, C, S, Ni, Cu, V, Zn, Mo, U, Se, Ag, As, Cd, Pb, Bi, Te (Västi, 2011).

4.2.4. Outokumpu-assosiaatio

Outokumpu-assosiaation kivien on todettu koostuvan pääasiassa vaipan peridotiitin palasista, joihin on vaikuttanut metasomatoosi. Kivien koostumus on hyvin monimuotoista vaihdellen monomineraalisesta serpentiniitistä erilaisiin diopsidi- ja/tai tremoliittipitoisiin karsi- ja kvartsikiviin. Västin (2011) kokoamassa aineistossa jaottelu kuitenkin tapahtuu täysin kivilajien modaalisen koostumuksen perusteella, jossa noin 50 % tai enemmän serpentiniittiä sisältävät kivet luetellaan serpentiniiteiksi.

Monomineraaliset serpentiniitit ovat homogeenisia, erittäin hienorakeisia ja vihertävän mustia väriltään (Västi, 2011). Tremoliitti-, talkki-, karbonaatti- ja/tai oliviinipitoiset variaatiot ovat joissain tapauksissa tekstuuriltaan porfyroblastisia. Serpentiniittien mineraalikoostumus vaihtelee lähes monomineraalisesta (80-90 % serpentiniittiä) tremoliittia, karbonaatteja, talkkia ja oliviinia sisältäviin tyypeihin. Mineraalien runsaudet vaihtelevat seuraavilla väleillä: 50-66 % serpentiniittiä, 6-26 % tremoliittia, 0.3-39 % karbonaatteja, 0.1-36 % talkkia ja 1-17 % oliviinia. Päämineraaleina esiintyy myös kloriittia, flogopiittia sekä talkkia. Aksessorisina mineraaleina kivessä on opaakkeja mineraaleja, biotiittia, diopsidia sekä apatiittia.

Serpentiini-tremoliitti- ja serpentiini-tremoliitti-oliviinikivet ovat heterogeenisiä, hieno-karkearakeisia, harmaita tai vaalean harmaita väriltään sekä foliaation tai poimuttumisen läpikäyneitä kiviä (Västi, 2011). Kivet poikkeavat mineralogisesti serpentiniiteistä pääasiassa niiden alhaisemman serpentiinipitoisuuden (n. 17-45 %) perusteella. Serpentiini-tremoliittikivet sisältävät 31-65 % tremoliittia, kun taas serpentiini-tremoliitti-oliviinikivet sisältävät tremoliittia 23-32 % ja 14-23 % oliviinia.

Karsi- ja kvartsikivet on jaettu neljään eri alakategoriaan niiden koostumuksen perusteella: plagioklaasia sisältävä diopsidi-tremoliittikarsi, diopsidi-tremoliittikarsi, tremoliittikarsi ja diopsidikarsi (Västi, 2011). Diopsidi-tremoliittikarsi ja tremoliittikarsi ovat usein raekooltaan keski-karkearakeisia, väriltään vihertävän harmaita tai vaalean vihreitä ja rakenteeltaan liuskeista ja/tai poimuttunutta.

Diopsidi-tremoliittikarsikivi, joka asettuu yläpuolen kontaktiin serpentiniitin ja kiilleliuskeen väliin, omaa hyvin poikkeuksellisen mineraalikoostumuksen sisältäen 14.5 % plagioklaasia, 29.6 % diopsidia, 26.5 % tremoliittia ja paikoittain paljolti opaakkeja mineraaleja (Västi, 2011). Kalsiittia kivi sisältää niukasti määrän vaihdellussa välillä 0.03-6.7 %. Tremoliittikarsi sisältää puolestaan 61 % tremoliittia ja 31 % kalsiittia päämineraaleinaan.

Outokumpu-assosiaatioon kuuluu yksi eroteltavissa oleva kvartsikiviyksikkö, jonka paksuudesta ei ole tarkkaa tietoa kairaytimen tuhoutumisen seurauksena. Yksikkö on heterogeeninen ja paikoittain breksioitunut ja sisältää suuren määrän diopsidi-tremoliittikarsia ja talkkiliusketta sekä karbonaattijuonia. Kvartsirakeet ovat kooltaan 0.1-5 mm ja nematoblastiset tremoliitti- ja diopsidineulaset useimmiten alle 1 cm mittaisia. Seurauksena karsikivien ja talkkiliuskeraitojen suuresta määrästä kvartsipitoisuus pysyttelee varsin alhaisena, noin 50 %. Keskimääräiset pitoisuudet muille mineraaleille ovat: kalsiitti 11 %, diopsidi 9 %, tremoliitti 10% sekä talkki 14 %. Aksessorisia mineraaleja ovat yleisimmin opaakit mineraalit, kloriitti ja kromikiille (fuksiitti). Opaakkeja mineraaleja ovat pääasiassa magneettikiisu, rikkikiisu, grafiitti sekä pentlandiitti. Kuparikiisu, sinkkivälke ja kromiitti ovat määrältään vähäisiä.

4.2.5. Pegmatiittigraniitit ja niihin liitettävät kivet

Pegmatiittiset granitoidit asettuvat kairareian pohjaosiin, erityisesti syvyydelle kaksi kilometriä ja sitä syvemmälle (Västi, 2011). Intrusiivisten juonien paksuus vaihtelee muutamista senttimetreistä noin 200 metriin. Väriltään ne ovat kerman valkoisia tai valkoisia, tekstuurltaan massiivisia ja usein erittäin karkearakeisia ja suuntautumattomia. Paineen vaikutuksesta kaksi kilometriä ja sitä alempana sijaitsevat granitoidit muodostavat 1-5 cm:n paksuisia, lautasmaisia kiekkoja.

Vaikka modaalinen koostumus vaihtelee suuresti, voidaan kivet jakaa mineralogiansa puolesta tonaliitteihin ja granodioriitteihin (Västi, 2011). Granodioriitit koostuvat pääasiassa kaliumpitoisesta plagioklaasista (42.3 %), kvartsista (34.4 %) ja kalimaasälvästä (17.4 %). Paikoittain myös muskoviitti voi esiintyä päämineraalina.

On voitu erotella kahden tyyppistä tonaliittista pegmatiittia toisistaan (Västi, 2011). Ensimmäinen tyyppi koostuu keskimäärin 34.3 % plagioklaasista, 34.0 % kvartsista ja 28 % muskoviitista, kun taas toinen tyyppi pitää sisällään 53.9 % plagioklaasia, 39.1 % kvartsia ja hyvin vähän muskoviittia. Kaliumpitoisen maasälvän määrä tonaliiteissa on keskimäärin 2.6-2.7 %. Pegmatiittien tyypillisimpiin aksessorisiin mineraaleihin kuuluu almandiini, biotiitti sekä kloriitti.

4.3. Pohjois-Karjalan liuskejakson tektonis-metamorfinen evoluution päävaiheet

Kontinen (2006) luettelee Pohjois-Karjalan liuskejakson tektonis-metamorfinen evoluution viisi päävaihetta seuraavasti:

- Vaihe:** (Tapahtuma / Kiven rakenne)
- Pre-D1:** Outokummun nappien paikalleen asettuminen ohuena työntösiirroksena / kerrostumia sisältäen rinnakkaisjakautumaa ja kvartsijuonia
- D1-D2:** Makaavaa poimuttumista ja ennen pitkää työntösiirrostumista akselin suuntaisia siirrostumia pitkin / tiukkoja isokliinisiä poimuja (F1) uudelleenpoimuttuneena epäsymmetrisiksi poimuiksi (F2), paikallisesti esiintyvän liuskeisuuden kehittyminen (S2) sekä risteävää mineraalista lineaatiota. D2 laajamittainen siirrostumien sekä D1-D2 nappejen

pinoutuminen synnyttäen paikallisia kallioperän liuskeita ja useita myloniittisia siirroksia.

- D2_c:** Luoteissuuntaisten, oikeansuuntaisia poimuja usein sisältävien sivuttaissiirrosten kehittyminen / laajamittaisia luoteissuuntaisia lohkorakoja sekä krenulaatiota.
- D3:** Avointen, epäsymmetristen poimujen kehittyminen / akselin suuntaisia lohkorakoja, krenulaatiota. Paikallisen metamorfoosin lämpötilahuippu tapahtui D3-tapahtuman loppuvaiheessa.
- D4-D5:** Avoimia, ylös suuntautuneita siirroksia / heikkoa rakoilua, heikkoa - paikallisesti näkyvää lineaatiota.

4.4. Syntymalli

Outokumpu-tyyppisen muodostuman oletetaan syntyneen kolmessa päävaiheessa aikavälillä 1.95-1.88 miljardia vuotta sitten (Peltonen et al., 2008). Syntymallin on otettava huomioon seuraavat havainnot ja tulkinnat. Muodostuma sijaitsee karjalaisen kratonin ja svekofennidien välisellä törmäyslinjalla. Lisäksi vaipan peridotiitit ovat sijoittuneet hyvin lähelle sulfidimalmeja. Hydrotermis-eshalatiivisia sedimenttikiviä ei alueella esiinny. Sulfidit ovat luonteeltaan monimetallisia. Pb-määrä sulfideissa on erittäin vähäinen ja niiden Pb-isotooppikoostumus on lähes vaipan koostumusta vastaava. Sulfideissa on myös hyvin korkea Ni-pitoisuus. Massiivisten sulfidien läsnäolo on lisäksi yksi tekijä. Rikki ja metallit ovat peräisin vaipasta sekä kuoresta. Alueella on tapahtunut syntektonista sulfidien uudelleen mobilisoitumista. Zirkonista määritettyjen U-Pb-isotooppien sekä Pb-isotooppitutkimusten avulla on pystytty määrittämään syntymallin yksiköiden ikäsuhteet.

Peltosen et al. (2008) mukaan Outokummun alueen muodostuminen alkoi Cu-rikkaan esimalmin muodostuksella (Kuva 3). Tämä tapahtui noin 1950 miljoonaa vuotta sitten ultramafisen merenpohjan ympäristössä, kaukana vanhan kallioperän alueelta. Tässä ympäristössä magma tunkeutui vaipan peridotiitteihin. Magman aiheuttama lämpö mahdollisti myös fluidikierron, joka edesauttoi osaltaan malmien muodostumista. Kymmenien miljoonien vuosien kuluttua edellisestä tapahtumasta tapahtui tektoninen kulkeutuminen, ja lopulta Cu-rikas malmi sekä meren pohjan ultramafiset kivet

obduktoituivat mantereen päälle. Tästä seurasi intensiivinen ultramafisten massiivien karbonaattiutumisen ja silisifikaatio. Tapahtuma on voitu ajoittaa jopa noin 40 miljoonaa vuotta Cu-malmin muodostumisen jälkeen tapahtuneeksi hyödyntämällä silisifikaatiossa mustaliuskeesta vaihettumisvyöhykkeeseen mobilisoitunutta uraania.

Outokumpu-assosiaation Ni-sulfidien lähteen on ehdotettu olevan syntehtonisen sekoittumisen seurausta. Outokummun karbonaatti-karsi-kvartsikivien kaikkialla läsnäoleva suuri 1500-3000 ppm Ni-pitoisuus on ymmärrettävä, mikäli ajatellaan kiviä karbonaatti-silikaattimetamorfoituneina vaipan peridotiiteina. Tyypillisesti vaipan peridotiitit sisältävät nikkeliä 1800-2200 ppm, joten prosessille on ollut välttämätöntä sisällyttää rikkiä mahdollistaakseen nikkeliatomien vapautumisen liukenevista silikaateista ja oksideista (magneetiitista serpentinisaaatiossa) ja niiden uudelleen asettumisen sulfideihin. Outokummun amfiboliittifasiuksen nikkeliferriittiset kivet ovat pääasiassa metamorfoituneet nikkeliköyhäksi magneettikiisuksi sekä vähäisissä määrin pentlandiitiksi. Outokummun ja vertailukelpoisen kohteen (Eastern Metals) rikki- ja Pb-isotooppikoostumukset yhdistettynä hivenainedataan viittaavat siihen, että rikki ja sen mukana pienet määrät muita metalleja, kuten U, Pb, As ja mahdollisesti myös Mo ja Sb, olisivat siirtyneet karbonaatti-silikaattikiviin viereisistä mustaliuskeista (Kontinen et al., 2006).

Kun kivistä ei ole havaittu tilavuuden kasvua, nikkelin lisääntymistä/häviämistä, sulfidikaatiota/silisifikaatiota, tyypillinen vaipan peridotiitti synnyttää prosessissa sulfideista köyhää kvartsikiveä sisältäen 2500 ppm Ni. Täten voidaan päätellä, että Outokummun tyyppisissä kvartsikivissä, jotka sisältävät noin 1700 ppm nikkeliä, silisifikaatiossa on tapahtunut joko suurimittaista tilavuuden ja silikaatin määrän kasvua tai vaihtoehtoisesti suurta köyhtymistä nikkeliässä. Kokan tyyppin nikkeliirikastumat karsi-kvartsikivissä ovat sijoittuneet enemmän tai vähemmän murroslinjojen yhteyteen metasomaattisesti muuntuneiden ultramafisten yksiköiden rajapinnoille ja ovat samalla rikastuneet Ni- ja Fe-sulfideista sekä paikallisesti kromista. Tärkeänä yksityiskohtana Cu-Co-Zn-malmien mallinnuksessa on, että karbonaatti-karsi-kvartsikivissä tai Kokan tyyppin mineralisaatiossa ei esiinny kohonneita Co/Ni- tai Cu/Ni-arvoja ja isotooppikoostumusten mukaankin yksiköt ovat 30-50 miljoonaa vuotta nuorempia kuin Cu-Co-Zn-esiintymät (Kontinen et al.,

2006).

Tutkimuksen tiedot osoittavat, että Outokummun tyyppin polymetalliset Cu-Co-Zn-Ni±Au-esiintymät edustavat erittäin poikkeuksellista massiivis-semimassiivista sulfidiesiintymää verrattuna tyypillisempiin massiivisiin sulfidiesiintymiin, kuten Besshi ja Kypros. Selkeimpiä poikkeavia ominaisuuksia Outokummun tyyppin malmeille ovat: 1) erittäin harvinaisesti esiintyviä tai ei ollenkaan vulkaanisia tai subvulkaanisia kiviä; 2) malmiympäristöjen selkeä hydrotermis-eshalatiivisten kivien määrä; 3) usein pitkiä, kapeita ja ohuita massiivis-semimassiivisia malmiesiintymiä erittäin terävillä rajapinnoilla; 4) sulfidien läheisyys karbonaatti-silikaatti – muuntuneiden ja köyhtyneiden kallioperän peridotiittien kanssa; 5) suuri Ni:n ja Co:n määrä hydrotermaalisisessa Cu-Zn–malmissa; 6) pienet määrät hivenaineita, kuten Bi, Sb ja Sc; 7) erittäin tai äärimmäisen vähäinen lyijyn määrä; 8) vaippatyyppiset Pb-isotooppiarvot lyijyhohdemalmissa; 9) verrattain suuret $\delta^{18}\text{O}$ -arvot +13 ‰:sta +16 ‰:iin (Kontinen et. al., 2006).

Kontisen et. al. (2006) artikkelissa esitellyn syntymallin tukena käytetään hivenaine- ja isotooppigeokemiallista aineistoa. Saatavilla olevasta tiedosta Outokummun-Vuonoksen malmin data sekä Pb-isotooppidata on merkityksellisintä. Erittäin vähäinen Pb:n määrä, vaippatyyppinen Pb:n isotooppikoostumus sekä Pb-isotoopilla saatu Outokummun ja Vuonoksen malmien ikä 1943 ± 85 Ma viittaavat kaikki siihen, että näillä esiintymillä on yhteistä historiaa n. 1.97–1.96 miljardin vuoden ikäisen Outokummun alloktionin ultramafis-mafisten ofioliittifragmenttien kanssa. Tämä edellä mainittu sekä tieto sulfidien ja Outokummun alloktionin synty-ympäristönä olisi ”kalevalainen meriallas”, joka avautui 2.0-1.95 miljardia vuotta sitten karjalalaisen kratonin hajoamisen aikana ja esiintyi Outokummun alloktionin obdukioon saakka n. 1.90 miljardia vuotta sitten. Verrattain vähäinen mafisten, eritoten mafisten extrusiivisten kivien määrä Outokummun systeemissä ja vähäinen Pb:n määrä malmiesiintymissä viittaavat siihen, että Cu-protomalmin asettuminen paikoilleen olisi tapahtunut merialtaan ympäristössä, jossa merelliset vaipan tektoniitit olivat laajamittaisesti paljastuneina mahdollistaen olosuhteet metallin/rikin uuttumiselle ja saostumiselle. Asettumisesta noin 30-50 miljoonan vuoden kuluttua noin 1.9 miljardia vuotta vanhat Cu-Co-Zn-sulfidit kuljettuivat pääasiassa

peridotiittisten ofioliittifragmenttien sisällä karjalaisen kratonin reunalle. Outokummun alloktionin ofioliittiset fragmentit irtosivat ja levittäytyivät joko saman aikaisesti obduktiovaiheen alkaessa tai hieman ennen sitä. Obduktioprosessin edetessä tai välittömästi sen jälkeen tapahtui ofioliittiyksiköiden metasomaattinen muuntuminen niiden uloimpien reunojen alueilla karbonaatti- ja kvartsikiviksi (listwaeniitti-birbiriitti).

Kontinen et. al. (2006) tarjoavat selityksen korkealle Ni-pitoisuudelle ja malmyksiköiden juoni-tyyliselle epigeneettiselle luonteelle samalla säilyttäen isotooppisesti järkevän ja usein esitetyn idean merellisestä synty-ympäristöstä. Selitys perustuu kahden proto-malmin ideaan, jossa: 1) noin 1.95 miljardin vuoden ikäiset Cu-Co-Zn merelliset sulfidit ja 2) noin 1.9 miljardia vuotta vanhat varhais-tektoniset serpentiniittiyksiköiden sisältämät karbonaattis-silikaattisen muuntumiskuorten Ni-sulfidit sekä näiden sulfidien syntektonis-synmetamorfinen, rakenteellisesti kontrolloitu sekoittuminen mahdollistivat nykyisten Cu-Co-Zn-malmien muodostuksen. Pitkäkestoisen ja kompleksin syntektonisen sekoittumisprosessin on ajateltu sisältävän kolme eri vaihetta: 1) Cu-Co-Zn-rikkaan proto-malmin fluidiavusteinen uudelleenmobili-soituminen niiden alkuperäisestä sijainnista, 2) serpentiniittiyksiköiden rajojen läheisyyteen sijoittuneiden ainesten uudelleen asettuminen, ja 3) uudelleen paikoiheenasettuneiden sulfidien jatkobilisoituminen johtuen siirroskontrolloidusta sula-kiinteä –prosesseista ja aiheuttaen esiintymien nykyisen juonimaisen muodon. Cu- ja Ni –päätejäsenten sulfidien sekoittuminen tapahtui joko uudelleenasettumisesta välisten käytävien Ni-mineralosoituineiden seinämien uuttumisessa tai diffuusiolla.

Esitetty malli (Kuva 5) ottaa huomioon monta Outokummun alueen malmiesiintymien yksityiskohtaa, jotka ovat konfliktissa keskenään. Malli on yhtenäinen niin malmiesiintymien selkeän epigeneettisen luonteen kuin geokemiallisen ja isotooppisen tiedon kanssa, jotka viittaavat ei-radiogeeniseen, vaipatyypiseen lähteeseen sekä pretektoniseen, mahdolliseen merelliseen hydrotermiseen malmimetallien erottamiseen. Lisäksi malli tarjoaa selityksen Outokummun yksiköiden korkealle nikkeli-pitoisuudelle, joka olisi vaikea selittää pelkästään merenpohjan hydrotermisillä reaktiomalleilla. Syntymalli selvittää myös Outokumpu-assosiaation metasomaattisten, ei-sedimenttistä alkuperää olevien kvartsikivien

alkuperää ja ottaa kantaa siihen, miksi malmiesiintymät ja niiden viereiset kiviyksiköt eivät sisällä todellisia eshalatiivisia hydrotermaalisia komponentteja (Kontinen et. al., 2006).

Ultramafic ocean floor stage, 1950 Ma:

Inhalative, fault-controlled deposition of hydrothermal sulphides at oceanic ridge or transform fault zone.

Cu proto-ore formation

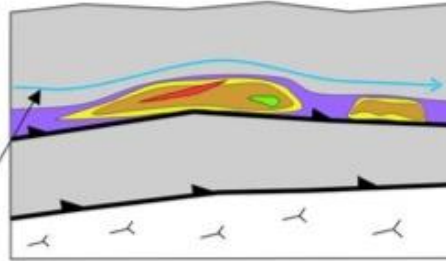


Obduction stage, 1900 Ma:

Low-T (100 - 200 °C) listwaenite-birbrite-type carbonate-quartz alteration of peridotite body margins > Ni sulphide disseminations.

Ni proto-ore formation

Early metamorphic carbonic-aquaeous fluids, focussed by thrust faults



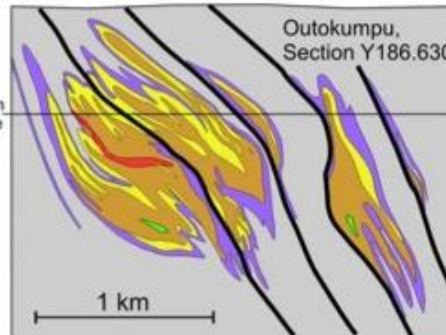
Regional deformation stage, 1880 Ma:

Syntectonic remobilisation:

Mixing of the Cu- and Ni- proto-ore components

Peak metamorphic (ca. 630 °C) static recrystallisation: textural upgrading

Retrogression



- Mantle peridotite
- Sulphides
- Gabbro stocks, lavas and dikes
- Black schists
- Silicified and carbonated peridotites (incl. nickel sulphide disseminations)
- "Upper Kaleva" turbidites
- Archaean basement gneisses

Kuva 5. 3-vaiheinen Outokumpu-tyypin Cu-Co-Zn-Ni-Ag-Au-malmin muodostuminen (Peltonen et al., 2008).

Viiteluettelo

Eilu, P., Ahtola, T., Äikäs, O., Halkoaho, T., Heikura, P., et al. (2012) Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia. Geological Survey of Finland, Special Paper 53, 249-252. Elbra, T., Karlqvist, R., Lassila, I., Hæggström, E., Pesonen, L. (2011) Laboratory measurements of the seismic velocities and other petrophysical properties of the Outokumpu deep drill core samples, eastern Finland. *Geophysical Journal International* 184, 405–415.

Gaál, G., Koistinen, T., Mattila, E. (1975) Tectonics and stratigraphy of the vicinity of Outokumpu, North Karelia, Finland, Including a structural analysis of the Outokumpu ore deposit. Geological Survey of Finland, Bulletin 271, 5-65.

Kukkonen, I., Heikkinen, P., Heinonen, S., Laitinen, J., Sorjonen-Ward, P., HIRE Working Group of the Geological Survey of Finland (2012) HIRE Seismic Reflection Survey in the Outokumpu-Polvijärvi Cu-Co-Zn mining and exploration area, Eastern Finland. Geological Survey of Finland. Geologian tutkimuskeskus, Arkistoraportti 55/2012. Saatavilla: http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/55_2012.pdf

Kontinen, A. (1987) An early Proterozoic ophiolite – the Jormua mafic-ultramafic complex, northern Finland. *Precambrian Research* 35, 313-341.

Kontinen, A. 2012. F020 Outokumpu Cu-Co, Ni. Teoksessa: Eilu P. (toim.) Mineral Deposits and Metallogeny of Fennoscandia. Geological Survey of Finland, Special Paper 53, 249-252.

Kontinen, A., Sorjonen-Ward, P. (1991) Geochemistry of metagraywackes and metapelites from the Palaeoproterozoic Nuasjärvi Group, Kainuu schist belt and the Savo province, North Karelia; implications for provenance, lithostratigraphic correlation and depositional setting. Geological Survey of Finland, Special Paper 12, 21-22.

Kontinen, A., Peltonen, P., Huhma, H. (2006) Description and genetic modelling of the Outokumpu-type rock assemblage and associated sulphide deposits. Geological Survey of Finland. Geologian tutkimuskeskus, Arkistoraportti M 10.4/2006/1, 378. Saatavilla: http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/m10_4_2006_1.pdf

Outokummun kaivos (1928) Outokummun kaivos 1910-1928, Pohjois-Karjalan kirjapaino Oy.

Peltonen, P., Kontinen, A., Huhma, H., Kuronen, U. (2008) Outokumpu revisited: New mineral deposit model for the mantle peridotite-associated Cu–Co–Zn–Ni–Ag–Au sulphide deposits. *Ore Geology Reviews* 33, 559–617.

Sorjonen-Ward, P. (2006) Geological and structural framework and preliminary interpretation of the FIRE 3 and FIRE 3A reflection seismic profiles, central Finland. Geological Survey of Finland, Special Paper 43, 105-159.

Västi, K. (2011) Petrology of the Drill Hole R2500 at Outokumpu, eastern Finland - the deepest drill hole ever drilled in Finland. Geological Survey of Finland, Special Paper 51, 17-46.