

Onko Suomessa uusia Talvivaara-tyyppisiä malmeja?

Geofysikaalisiin ja geokemiallisiin tutkimuksiin perustuva Suomen mustaliuskekartta

KIRSTI LOUKOLA-RUSKEENIEMI, EIJÄ HYVÖNEN, MERI-LIISA AIRO,
HILKKA ARKIMAA, JUKKA ESKELINEN, JOUNI LERSSI,
JOUKO VASSE, SATU VUORIAINEN

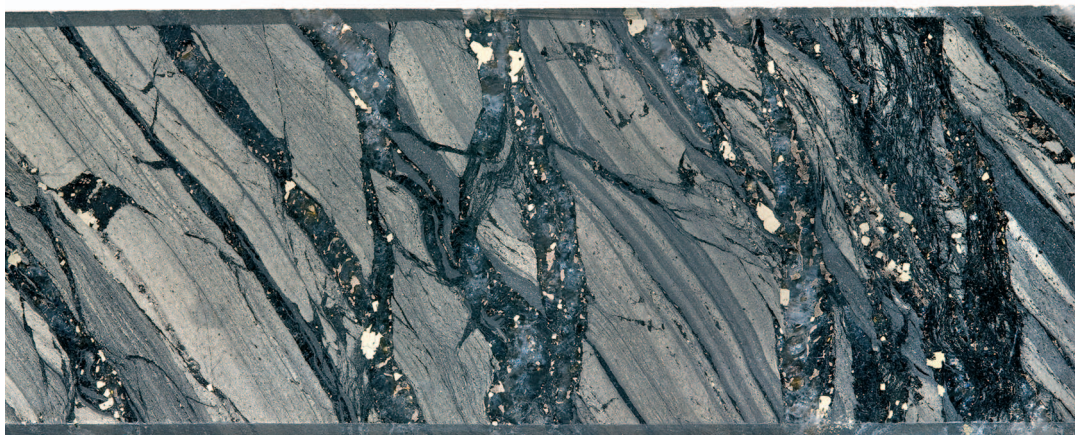
Talvivaara on tällä hetkellä yksi Suomen suurimmista kaivoksista, mutta se on myös maailman suurin mustaliuske-malmi, ainakin tonnimäärältään. Talvivaaran mineraalivarannot ovat Talvivaaran kaivososakeyhtiön viime vuonna julkaiseman arvion mukaan 1550 Mt. Eri metallien keskipitoisuudet ovat 0,22 % nikkeliä, 0,13 % kuparia, 0,02 % kobolttia ja 0,49 % sinkkiä (Talvivaaran kaivososakeyhtiö 2010). Mustaliuske on yli 1 % sekä eloperäistä hiiltä että rikkiä sisältävä kivi, joka on alun perin kerrostunut merenpohjaan hapettomissa olosuhteissa. Suomen mustaliuskeissa eloperäinen hiili on tavallisesti nykyisin grafiittia. Joonas Virtasalo ja Aarno Kotilainen kuvasivat Geologi-lehdessä viime vuonna hienosedimenttien kerrostumisesta Itämeren syvänteissä (Virtasalo ja Kotilainen 2010). Itämeren syvänteet kuitenkin poikkeavat esimerkiksi Talvivaaran mustaliuskeiden syntyolosuhteista siten, että Itämeren syvänteissä on ollut useammin hapellisia vaihei-

ta. Talvivaaran mustaliuskeessa on vielä näkyvissä alkuperäistä kerroksellisuutta (kuva 1).

Suomen mustaliuskekartta

Vuonna 2000 julkaistu Suomen mustaliuskekartta pohjautui silloin käytettävissä olleisiin Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) geofysikaalisiin matalalentoaineistoihin (Arkimaa et al. 2000). Geofysikaalisissa mittauksissa kerrottiin maankamaran magneettisia, sähkömagneettisia ja radiometrisiä ominaisuuksia (Moore 2008). Aineistosta tuotettiin erilaisia johdannaiskarttoja, kuten näennäinen ominaisvastuskartta, joka on laskettu homogeeniselle puoliavaruudelle (Hautaniemi et al. 2005).

Mustaliuskekarttaa varten magneettisesta ja sähkömagneettisesta matalalentoaineistosta prosessoitiin yhdistelmäkarttoja, joihin lisättiin tiedot petrofysikaalisista ja geologisista



Kuva 1. Talvivaaran Ni-Cu-Co-Zn-Mn-esiintymän mustaliusketta. Kvartsia ja sulfideja sisältävät juonet leikkaavat alkuperäisiä hienorakeisia kerroksia, jotka saostuivat merenpohjaan hapettomissa olosuhteissa. Myös näissä alkuperäisissä kerroksissa on runsaasti hienorakeisia sulfideita, erityisesti rikkikiisiä. Kairasydännäytteen leveys on 3 cm. Kuva: Jari Väättäinen, Geologian tutkimuskeskus.

Fig. 1. Metamorphosed black shale from the Talvivaara Ni-Cu-Co-Zn-Mn deposit. Quartz-sulphide veins cut the original laminae which deposited on sea floor under anoxic conditions. Also the laminae contain a lot of sulphides, especially pyrite. The width of the drill core section is 3 cm. Photo: Jari Väättäinen, Geological Survey of Finland.

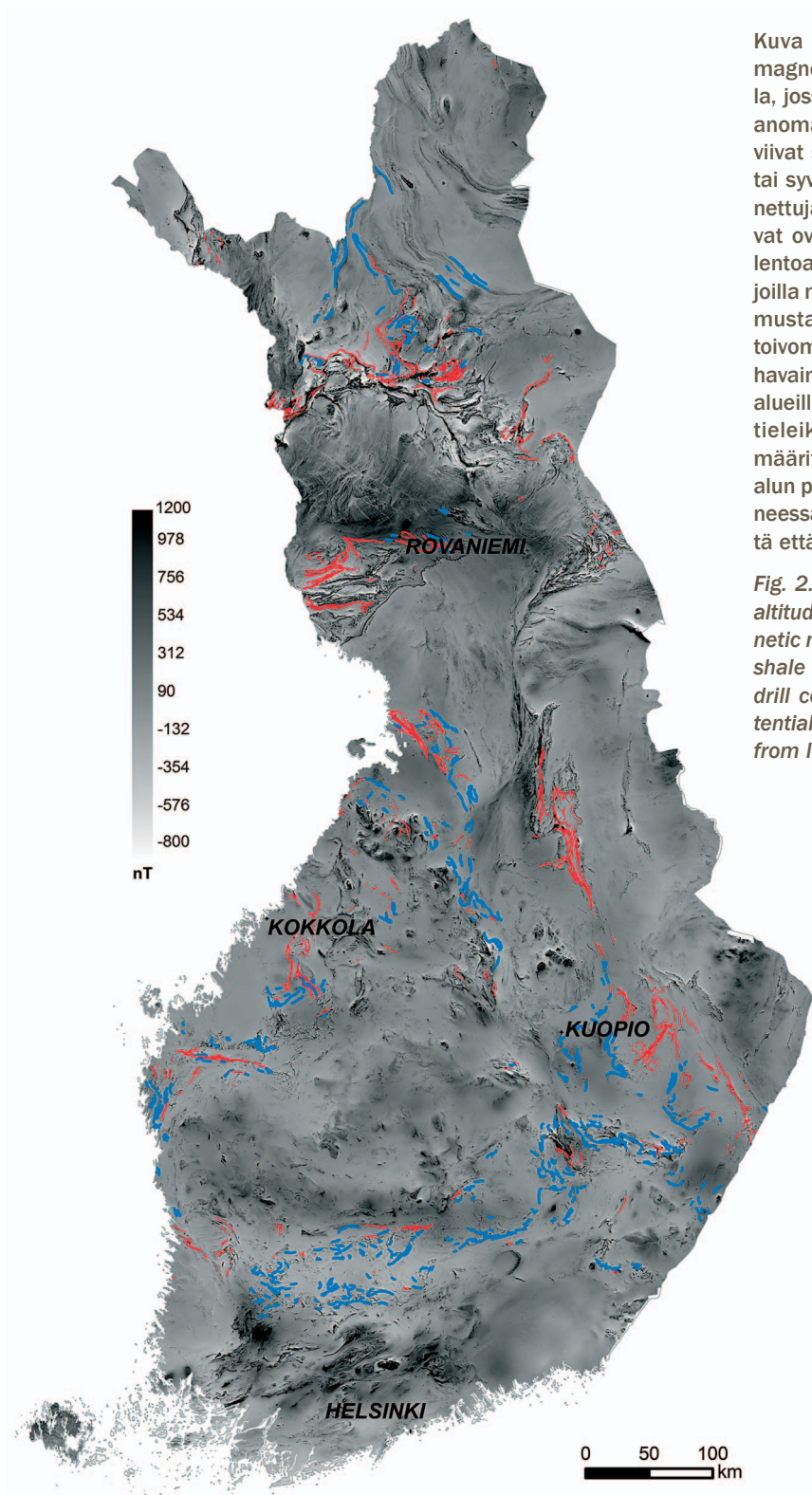
tietokannoista (kairaustieto ja paljastumatieto). Lisäksi alueita tutkineita geologeja ja geofysikoita haastateltiin. Mustaliuskenäytteitä valittiin kairasydämistä ympäri Suomea ja näytteet analysoitiin kemiallisesti ja petrofysikaalisesti. Näiden tietojen pohjalta paikannettiin tunnetut mustaliuskejaksot sekä geofysikaalisilta ominaisuuksiltaan vastaavan tyyppiset alueet. Kartassa havainnot jaettiin 1) kalliopaljastumien tai kairasydänainestojen perusteella tunnettuihin mustaliuskekerroksiin ja 2) geofysikaalisista matalalentoainestoista tulkittuihin mustaliuskekerroksiin (kuva 2, Arkimaa et al. 1999, 2000).

Mustaliuskekartan ja -tietokannan päivitys

Suomen mustaliusketietokannan ajantasaistaminen aloitettiin koko Suomen kattavan alueellisen lentomittausohjelman valmistuttua. Työ perustuu paitsi GTK:n olemassa oleviin

geofysikaalisiin aineistoihin – valtakunnalliset lentogeofysiikan ja petrofysiikan aineistot – myös aiemmin malminetsinnän yhteydessä kairattuihin kairasydämiin, jotka tutkittiin uudelleen vertailevan mustaliusketutkimuksen näkökulmasta. Kairasydämistä valittiin näytteitä, jotka analysoitiin sekä petrofysikaalisesti että kemiallisesti (kuva 3). Tulosten perusteella luodaan tietokanta tunnetuista ja mahdollisista mustaliuskejaksoista. Tietokantaa voidaan käyttää malminetsinnän, kallioperäkartoituksen, aluesuunnittelun ja ympäristötutkimuksen apuna. Projektin aikana on löydetty muutamia uusia malminetsinnällisesti kiinnostavia kohteita. Aluesuunnittelussa ja ympäristötutkimuksissa mustaliuskeiden sijainti on merkittävä tieto sen vuoksi, että ne rapautuvat helpommin kuin monet muut Suomen kivilajit ja niistä voi liueta rikkiä, alumiinia ja raskasmetalleja pinta- tai pohjaveteen (esim. Loukola-Ruskeeniemi et al. 1998).

Mustaliusketietokantaa päivitetään par-



Kuva 2. Mustaliuskeiden sijainti magneettisella matalalentokartalla, jossa voimakkaat magneettiset anomaliat ovat tummia. Punaiset viivat sisältävät kalliopaljastumien tai syväkairausten perusteella tunnettuja mustaliuskeita. Siniset viivat ovat geofysikaalisista matalalentoaineistoista tulkittuja alueita, joilla meidän mielestämme voi olla mustaliuskeita. Sinisistä alueista toivomme Geologi-lehden lukijoilta havaintoja: oletteko nähneet näillä alueilla mustaliuskeita esimerkiksi tieleikkauksissa? Mustaliuskeen määritelmänä pidämme sitä, että alun perin meren pohjalle kerrostuneessa kivessä on yli 1 % sekä hiiltä että rikkiä.

Fig. 2. Black shale units on a low-altitude airborne total intensity magnetic map. Red areas contain black shale units, verified in outcrop and drill cores. Blue areas contain potential black shale units, interpreted from low-altitude airborne data.

Arkeaiset kivet (> 2.5 mrd. vuotta)

Magma­kivet ja gneissit

Suprakrustiset kivet

Proterotsooiset kivet

Suprakrustiset kivet (2.50-2.06 mrd. vuotta)

Suprakrustiset kivet (2.06-1.96 mrd. vuotta)

Granuliittivyöhyke (2.30-1.91 mrd. vuotta)

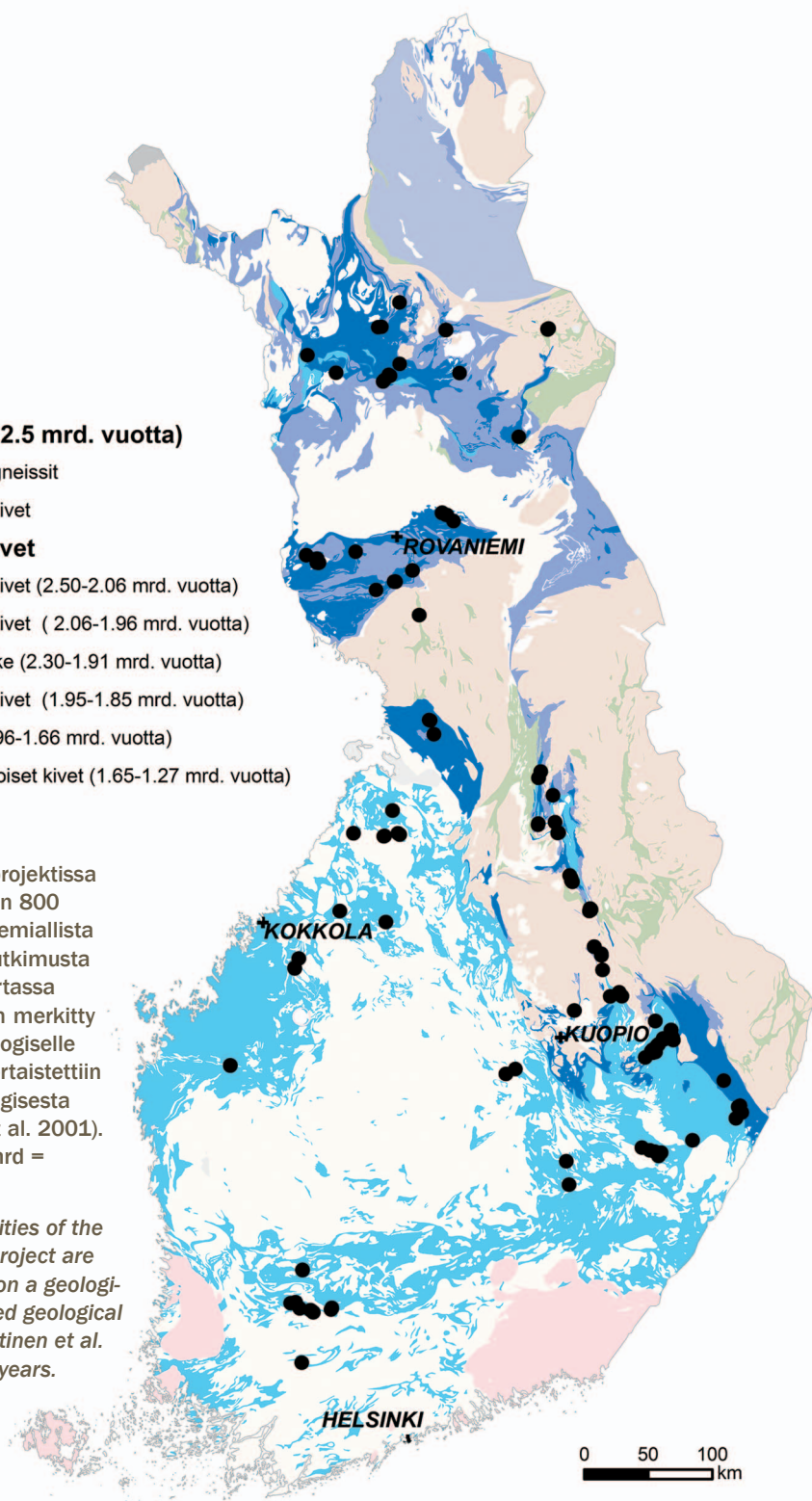
Suprakrustiset kivet (1.95-1.85 mrd. vuotta)

Magma­kivet (1.96-1.66 mrd. vuotta)

Mesoproterotsooiset kivet (1.65-1.27 mrd. vuotta)

Kuva 3. Mustaliuskeprojektissa valittiin kaikkiaan noin 800 kairasydännäytettä kemiallista ja petrofysikaalista tutkimusta varten. Oheisessa kartassa näytteenotto­paikat on merkitty mustilla pisteillä geologiselle kartalle, joka yksinkertaistettiin Fennoskandian geologisesta kartasta (Koistinen et al. 2001). Muodostumien ikä: mrd = miljardeja vuosia.

Fig. 3. Sampling localities of the present black shale project are shown as black dots on a geological map. The simplified geological map is based on Koistinen et al. (2001). mrd = billion years.



haillaan. Toivomme Geologi-lehden lukijoilta tietoja kuvassa 2 sinisillä viivoilla merkityistä alueista, jotka perustuvat geofysikaaliseen tulokintaan. Suomen mustaliuske-esiintymät ja niiden kuvaus lisätään vuonna 2012 GTK:n DigiKP 200 -tietokantaan ja mahdollisesti myös aktiivikarttaan (<http://geomaps2.gtk.fi/activemap/>).

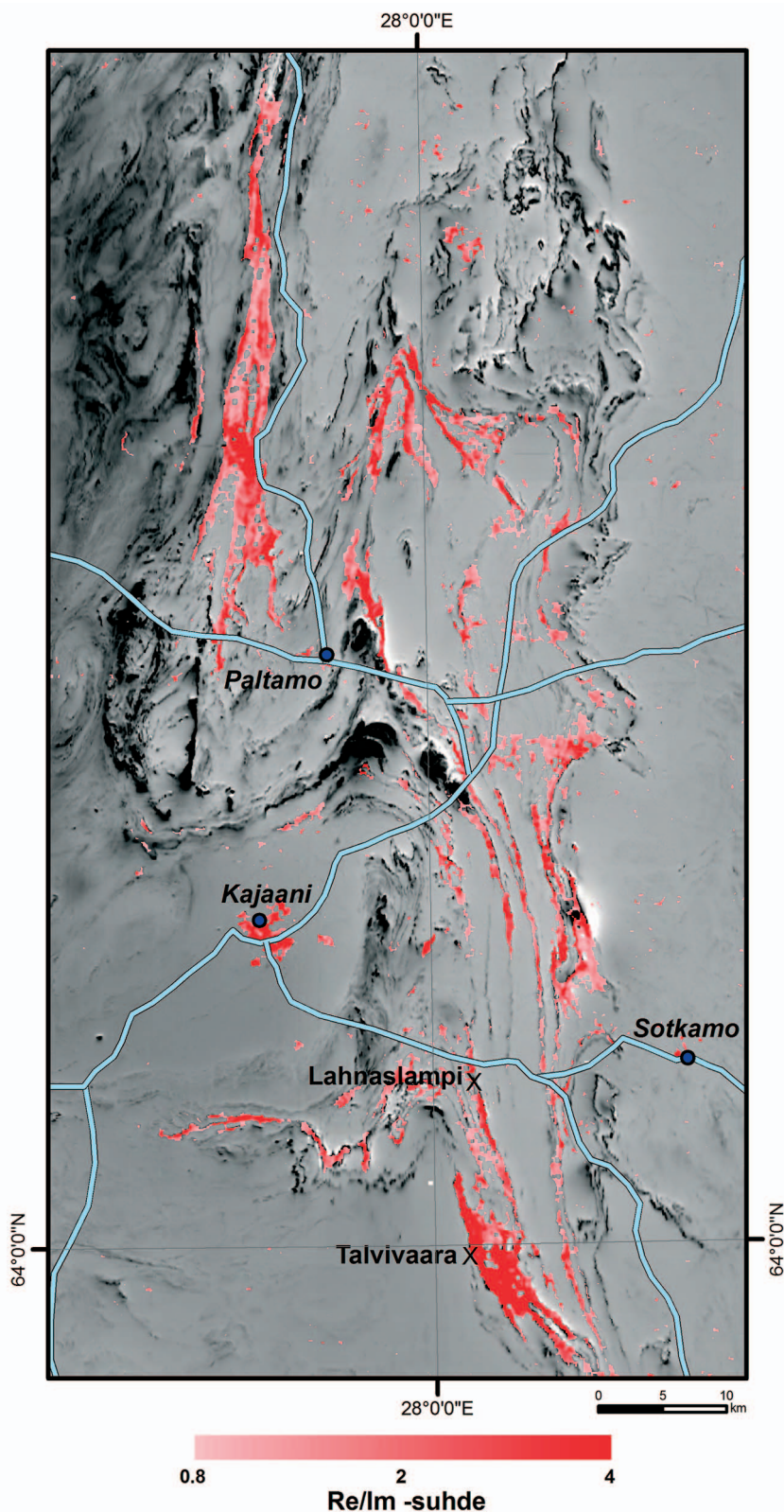
Mustaliuskeiden geofysikaaliset ominaisuudet

Mustaliuskeet voi helposti havaita geofysikaalisin mittauksin, koska ne johtavat hyvin sähköä ja lisäksi useimmiten ovat magneettisesti ympäristöstään poikkeavia – anomaalisia. Mustaliuskeiden sähkönjohtavuus liittyy niiden grafiitti- ja sulfidipitoisuuteen. Niiden magneettiset ominaisuudet johtuvat magneettikiisusta. Magneettikiisun kahdesta tyypistä monokliininen on voimakkaasti ferrimagneettista (voimakas positiivinen magneettinen susceptibiliteetti ja voimakas remanenssi), kun taas heksagoninen on antiferromagneettista. Mustaliuskeiden mineraalikoostumuksessa esiintyy myös diamagneettisia (negatiivinen magneettinen susceptibiliteetti) mineraaleja, joita ovat mm. grafiitti, kvartsi, kalsiitti tai tremoliitti. Suomessa tutkituissa mustaliuskeissa monokliinista magneettikiisua esiintyy runsaammin kuin heksagonista, mikä aiheuttaa mustaliuskeille tyypilliset, usein voimakkaat magneettiset anomaliat (Airo ja Loukola-Ruskeeniemi 1991, Airo 1997). Yksi syy ferrimagneettisen magneettikiisun runsaaseen esiintymiseen Suomen mustaliuskeissa on niiden metamorfoosiaste, joka on tavallisesti amfiboliitti- tai vihreäliuskefasies. Lentogeofysiikan kartoilla mustaliuskeet voidaan tunnistaa päällekkäisten magneettisten ja sähkönjohtavuusanomalioiden perusteella, kuten esimerkiksi kuvassa 4 Kainuun alueelta.

Mustaliuskeiden petrofysikaaliset ominaisuudet vaihtelevat niiden mineraalikoostumuksen, erityisesti grafiitti- ja sulfidipitoisuuden, ja rakenteen mukaan. Siksi vaikka mustaliuskeiden geofysikaaliset ominaisuudet yleisesti ovatkin erotettavissa muiden kivilajien ominaisuuksista, voivat ne alueittain vaihdella ja kuvastaa mustaliuskeiden geologista muodostumishistoriaa (Airo ja Loukola-Ruskeeniemi 2004, Airo ja Hyvönen 2008, Airo et al. 2009). Mustaliuskeiden petrofysikaalisten ominaisuuksien korreloimiseksi geokemiallisiin ja lentogeofysiikan aineistoissa havaittuihin ominaisuuksiin kerättiin eri puolilta Suomea kairatuista mustaliuskeista näytteet, joiden petrofysikaaliset ominaisuudet mitattiin ja kemiallinen koostumus analysoitiin. Näyteteksteri kattaa yli 800 näytettä (kuva 5). Näyteteksterin perusteella mustaliuskeiden keskimääräinen tiheys on 2800 kg/m^3 ja se kasvaa sulfidipitoisuuden lisääntyessä. Mustaliuskeiden keskimääräinen susceptibiliteetti on noin $6000 \times 10^{-6} \text{ SI}$, ja se on suoraan verrannollinen monokliinisen magneettikiisun määrään. Vastaavasti remanentti magnetoituma on suuruusluokkaa 3 A/m . Mustaliuskeiden ominaisvastus vaihtelee $1\text{--}10^{-5} \text{ Ohm-m}$ välillä.

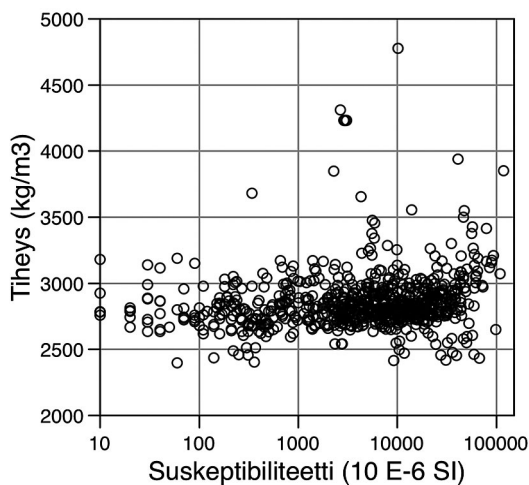
Talvivaaraa on tutkittu vuosikymmenien ajan

Geologi Eero Nenonen kartoitti Talvivaaran mustaliuskeita 1960-luvulla, mutta jo 1700-luvulla oli tiedossa, että Talvivaaran alueella on malminetsinnallisesti mielenkiintoisia kallioita (Nenonen 1964, Puustinen 2003). Geologian tutkimuskeskus teki malminetsintää alueella 1970- ja 1980-luvuilla (Ervamaa ja Heino 1980, 1983, Talvitie et al. 1980). Outokumpu-konserni jatkoi alueen malmipotentiaalin selvitystä ja myi kaivosoikeudet Talvivaara-yhtiölle vuonna 2004. Esiintymän hyödyntäminen tavanomaisilla metallin rikastus-



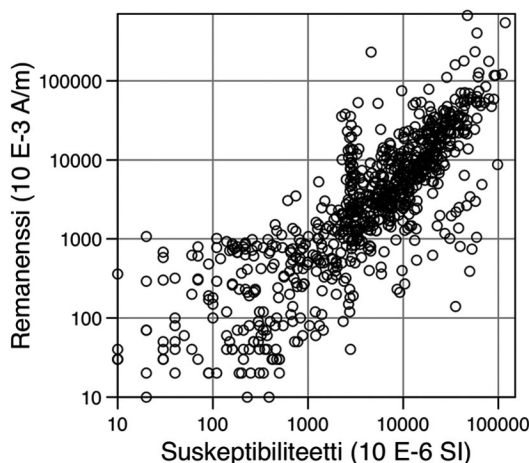
Kuva 4. Sähköä johtavat ja magneettiset jaksot Kainuussa GTK:n geofyysikaalisten lentomittausaineistojen perusteella. Talvivaaran esiintymä erottuu voimakkaasti johtavana anomaliaryppäänä kuvan alareunassa. Johtavuusluokat perustuvat sähkömagneettisen reaali- ja imaginäärikomponentin suhdeluukuun (Re/Im). Pohjakarttana on aeromagneettinen totaali-intensiteettikartta, jonka väripaletti on sama kuin kuvassa 2 (voimakkaat magneettiset anomaliat ovat tummia).

Fig. 4. Electrically conductive and magnetic geological formations in Kainuu from GTK's airborne geophysical databases. Conductivity categories are based on the ratio of the Real to the Imaginary component (Re/Im) of electromagnetic measurement data. The background is aeromagnetic total intensity map, where the grey scale is the same as in Fig. 2.



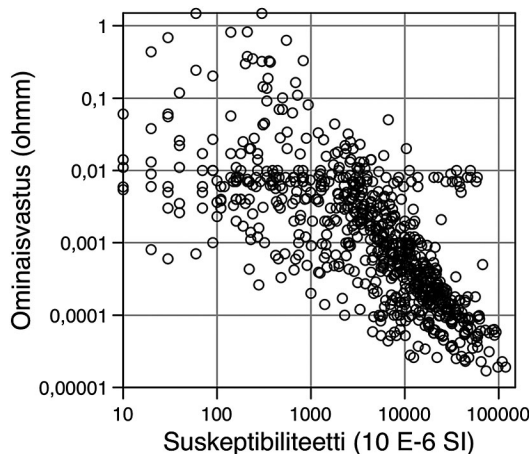
Kuva 5a. Mustaliuskeiden tiheyden ja magneettisen suskeptibiliteetin välinen korrelaatio. Tiheys kasvaa sulfidipitoisuuden kasvaessa. Suskeptibiliteetin raja-arvon 1000×10^{-6} (SI) yläpuolella monokliinisen magneettikiisun määrän lisääntyessä suskeptibiliteetti kasvaa.

Fig. 5a. The correlation between density and magnetic susceptibility of black shales. The densities grow with the increasing sulphide content. The susceptibilities grow linearly with increasing pyrrhotite content above the limiting susceptibility value of 1000×10^{-6} (SI).



Kuva 5b. Mustaliuskeiden magneettinen suskeptibiliteetti ja remanentin magnetoituman intensiteetti kasvavat monokliinisen magneettikiisun määrän kasvaessa. Suskeptibiliteetin raja-arvon 1000×10^{-6} (SI) yläpuolella korrelaatio on lineaarinen.

Fig. 5b. Magnetic susceptibility and the intensity of remanent magnetization in black shales increase with the increasing content of monoclinic pyrrhotite. The correlation is linear above the limiting susceptibility value of 1000×10^{-6} (SI).



Kuva 5c. Ominaisvastus pienenee – eli johtavuus kasvaa – magneettisen suskeptibiliteetin raja-arvon 1000×10^{-6} (SI) yläpuolella, eli johtavuuden kasvu on suoraan verrannollinen monokliinisen magneettikiisun määrän lisääntymiseen.

Fig. 5c. The specific resistivity decreases – i.e. conductivity increases – above the limiting susceptibility value of 1000×10^{-6} (SI). The increasing conductivities correlate linearly with the increasing content of monoclinic pyrrhotite.

tekniikoilla ei ollut aiemmin kaupallisesti kannattavaa. 1980- ja 1990-luvuilla bioliuotus oli vielä melko uusi teknologia, ja sitä pidettiin siihen aikaan liian riskialttiina käytettäväksi suuren mittakaavan toiminnassa.

Talvivaaran alue sisältyy GTK:n julkaisemiin 1:100 000 kallioperäkarttoihin Sotkamo 3433 (Havola 1981) ja Laakajärvi (Kontinen ja Eskelinen 2005).

Vuosina 1988–1999 Kainuun-Outokummun alueen mustaliuskeita tutkittiin Geologian tutkimuskeskuksen ja Suomen Akatemian yhteisrahoituksella (Loukola-Ruskeeniemi et al. 1991, Loukola-Ruskeeniemi 1990, 1991, 1995, 1999, Loukola-Ruskeeniemi ja Heino 1996). Talvivaaran mustaliuskeissa on keskimäärin 7–8 % eloperäistä hiiltä ja 8–11 % rikkiä (kuva 6). Alumiinipitoisuuden määrä heijastaa saviaineksen osuutta mustaliuskeessa. Eloperäistä piitä saostuu alun perin mustaliuskekerrokseen (Kuroda et al. 2005), mutta Talvivaaran mustaliuskeissa on myös kvartsijuonia, jotka leikkaavat alkuperäistä kerroksellisuutta (kuva 1). Korkea mangaanipitoisuus on Talvivaaran erikoisia piirteitä, erityisesti sen vuoksi, että osa mangaanista esiintyy harvinaisena sulfidina, alabandiittina (MnS). Kalsiumpitoisia kiviä on Talvivaarassa tavallisesti 0,5–3 metrin paksuisina välikerroksina mustaliuskeessa. Osa kalsiumia runsaasti sisältävistä kerroksista sisältää runsaasti myös mangaania. Uraania on Talvivaarassa vain vähän, tavallisesti alle 30 ppm, ja se on jakautunut tasaisesti mustaliuskekerrokseen. Kuparia, sinkkiä, kobolttia ja nikkeliä Talvivaarassa on enemmän kuin Suomen mustaliuskeissa keskimäärin.

Nikkeliä liukeni alun perin kuumiin liuoksiin emäksisistä ja/tai ultraemäksisistä kivistä. Liuokset kulkeutuivat sen jälkeen meriveiteen, josta nikkeliä saostui meren pohjalle samanaikaisesti eloperäisen aineksen kanssa hapestomissa olosuhteissa. Myös bakteeritoiminnalla on todennäköisesti ollut osuutta malmin

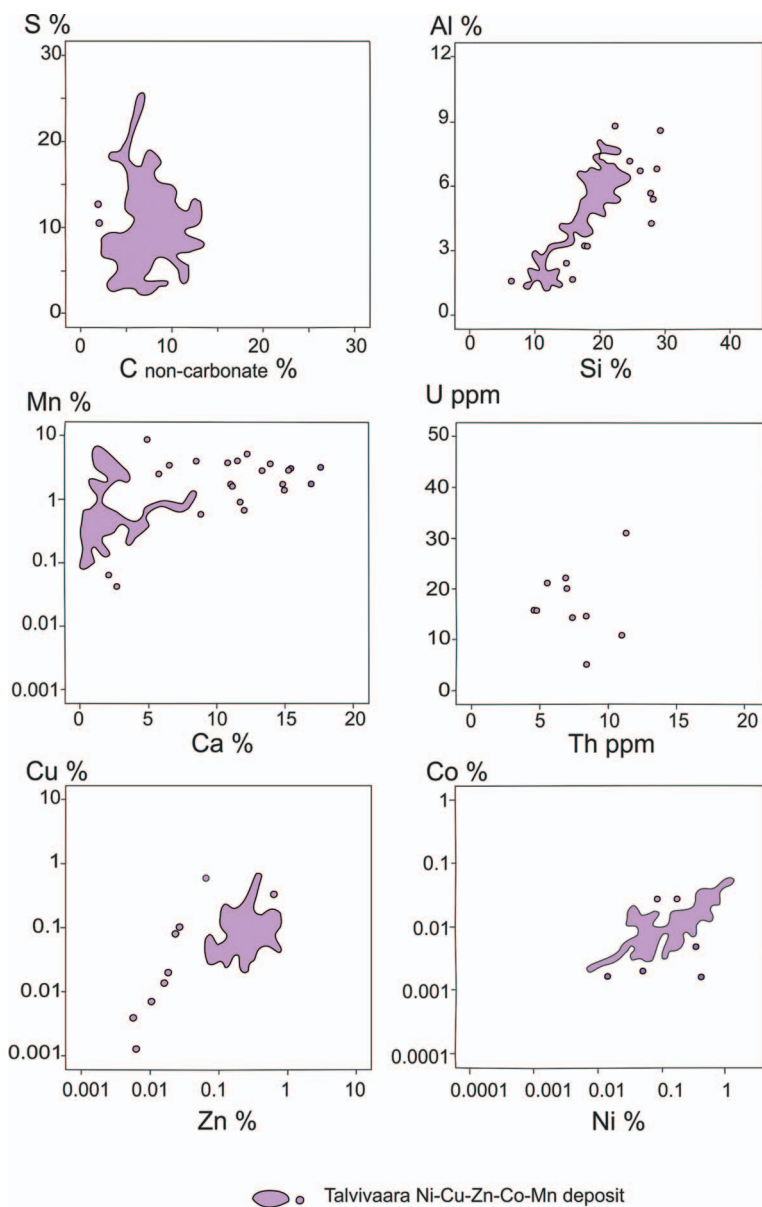
synnyssä. Malmin reunaosissa sijaitsevat kerrokset, joiden nikkelpitoisuus on alle 0,1 % mutta mangaanipitoisuus yli 0,8 %, ovat mahdollisesti saostuneet hapettoman merialtaan hapellisissa reunaosissa (Loukola-Ruskeeniemi 2011).

Talvivaara-tyyppisiä malmiesiintymiä ei ole tavattu muualla maailmassa, mutta todennäköisesti samantapaisia metallien rikastumisprosesseja on käynnissä vielä nykyisinkin. Esimerkiksi Punaisella merellä on syvänteitä, joiden pohjalle saostuu metalleja kuumista liuoksista (66 °C). Metalleja on liuennut kuumiin liuoksiin syvänteiden alla olevista basalttisista kivistä (Anschutz ja Blanc 1996). Se, että nikkelin osuus Punaisen meren syvänteiden kuumissa liuoksissa on pienempi kuin aikoinaan Talvivaarassa, voi johtua myös siitä, että noin kaksi miljardia vuotta sitten nikkeliä kulkeutui manttelista enemmän maankuoreen kuin nykyisin (Dobretsov et al. 1992).

Mustaliuskeita on tutkittu myös muualla kuin Talvivaaran ympäristössä. Esimerkiksi Esko Peltola, Anssi Lonka ja Vladi Marmo ovat tutkineet mustaliuskeita eri puolilla Suomea. Grafiitin etsinnän yhteydessä Ilmo Kukkonen ja Olli Sarapää selvittivät 1980-luvulla Suomen mustaliuskeiden esiintymistä ja luokittelivat niitä hiili- ja rikkipitoisuuksien perusteella. Pentti Rehtijärven johdolla Olli Sarapään grafiitin etsintää varten valitsemista näytteistä tehtiin myös geokemiallinen tutkimus (Ruskeeniemi et al. 1986). Kolme vuotta sitten Kaj Västi julkaisi tutkimusraportin Vihannin alueen mustaliuskeiden kemiallisesta koostumuksesta (Västi 2008).

Onko Suomessa malmin-etsinnällisesti kiinnostavia mustaliuskeita?

Mustaliuskekartta ja -tietokanta -hankkeessa hyödynsimme GTK:n valtakunnallisia lento-



Kuva 6. Yhteensä 100 mustaliuskenäytteen kemiallinen koostumus Talvivaaran esiintymässä GTK:n tekemien kairausten perusteella. Grafiittisen hiilen pitoisuus on yli 1 %, samoin rikkipitoisuus. Näytteiden pituus vaihtelee 21–60 cm kairasydämessä, mediaaniarvo on 42 cm. Mangaanin, kuparin, sinkin, kobolttin ja nikkelin asteikko on logaritminen.

Fig. 6. Chemical characteristics of 100 black schist samples from the Talvivaara deposit according to the drillings carried out by the Geological Survey of Finland. Concentrations of both graphitic C and S are more than 1 %. Sample size varies from 21–60 cm in the drill core. The axis is logarithmic for Mn, Cu, Zn, Co and Ni.

geofysiikan ja petrofysiikan aineistoja. Lisäksi tutkimme systemaattisesti uudelleen aiemmin malminetsinnän yhteydessä kairatut kairasydämet vertaillevan mustaliusketutkimuksen näkökulmasta. Työ on vielä kesken, mutta jo nyt on löytynyt uusia malminetsinnällisiä viitteitä.

Todennäköisyys Talvivaara-tyyppisten Ni-Cu-Co-Zn-Mn-malmien esiintymiselle on mielestämme suurin 1,9–2,0 miljardia vuotta vanhoissa mustaliuskekerroksissa, jotka esiintyvät serpentiniittien tai niiden muuttumistulosten läheisyydessä Kaavin ja Paltamon välisellä alueella. Vertaillevassa mustaliusketutkimuksessa löysimme kuitenkin viitteitä muista kuin Talvivaara-tyyppisistä malmiaiheista. Esimerkiksi palladiumin pitoisuus on joissain näytteissä keskimääräistä suurempi. Seuraava vaihe olisi valita malmipotentiaalisimmat kerrostumisaltaat ja jatkaa selvitystä kohteellisen malminetsinnän menetelmillä.

Mustaliuskekalmeja on myös muualla maailmassa, ja niiden metallisisältö ja syntymekanismit vaihtelevat (esim. Loukola-Ruskeeniemi 1992). Puolalaiset louhivat kuparihopeamalmia, jossa mustaliuskekerros on alle yhden metrin paksuinen (esim. Jowett et al. 1987). Yksi metri on vähän verrattuna Talvivaaran mineralisoituneen mustaliuskeen pak-

suuteen, jonka on paikoin yli 800 metriä (geologi Hannu Lahtinen, Talvivaaran kaivososakeyhtiö, henk.koht. tiedonanto). Mustaliuskemalmeissa on myös kultaa ja platinaryhmän metalleja. Yksi merkittävistä kultaa ja platinaryhmän metalleja sisältävistä esiintymistä on Venäjällä sijaitseva Voronezh (Chernyshov 2009).

Abstract

Evaluation of the ore potential of black shale units in Finland – preliminary results of a geophysical and geochemical study

The Talvivaara deposit in eastern Finland contains 1 550 Mt of low-grade Ni-Cu-Co-Zn-Mn ore. It is hosted by metamorphosed black shales, black schists. The Talvivaara black schists are characterized by high organic C and S concentrations with median values of 7.6 % and 9 %, respectively, and the occurrence of layers with Mn $\geq$ 0.8 %. Nickel precipitated in organic-rich mud from Ni-rich bottom waters in a stratified marine basin. The Mn-rich layers with low Ni concentration were probably deposited on the margins of the anoxic basin.

The ore potential of Palaeoproterozoic black schist units in Finland was first evaluated by nation-wide airborne geophysical surveys, because the geophysical properties of black shales can be used for preliminary classification. Textures, mineralogy, geochemistry and petrophysical properties were studied from altogether some 800 black schist samples. Concentrations of organic C and S were as high as at Talvivaara in many localities in eastern and northern Finland, but Ni-Cu-Co-Zn and/or Mn concentrations were lower. However, indications for mineralized black shale units representing other than the

Talvivaara type mineralization were found.

Geophysically black schists are challenging. They are easy to recognize on airborne geophysical maps because of their stratigraphy-related, coupled magnetic and conductive patterns. Correlation of drill core data with petrophysical and airborne geophysical data indicates that the geophysical responses of black shales are related to variation in concentrations of C, S and Fe. Increased S-content in geochemical data is connected to increased conductivity (high Re/Im ratio). The magnetic anomalies are caused by ferrimagnetic, monoclinic pyrrhotite. Locally these anomalies may show strong magnetic intensities, and the crystal anisotropy of pyrrhotite introduces a high magnetic anisotropy which affects the aeromagnetic signatures producing irregular patterns.

The black schist database composed of airborne geophysical, geochemical and rock physical data facilitates data integration, statistical analysis and interpretation. These results integrated with magnetic structural analysis supply a good tool for investigation, characterization and classification of black schists in Finland. They can be used both in predicting potential mineralized areas in regional context and also be applied in detailed studies.

Kiitokset

Kiitämme erityisesti Lopen kairasydänarkiston henkilökuntaa, Raimo Ruotsalaista, Marko Puontia ja Esa Raivosta, sekä Rovaniemen kairasydänarkiston henkilökuntaa, Kari Kaikosta ja Paavo Uusitaloa.

Kirjallisuus

Airo, M.-L. ja Loukola-Ruskeeniemi, K. 1991. Early Proterozoic metamorphosed black shales in the Kainuu Schist Belt, eastern Finland – geophysical properties correlated with petrography and geoche-

- mistry. Teoksessa: Autio, S. (toim.). Geological Survey of Finland, Special Paper 12, 209–216.
- Airo, M.-L. 1997. Magnetic classification characterizing different types of Early Proterozoic metamorphosed black shales in Finland. Teoksessa: Papunen (toim.). Mineral Deposits: Research and Exploration, Where do they Meet? Proceedings of the Fourth Biennial SGA Meeting, Turku/Finland 11–13 August, 1997, 33–35.
- Airo, M.-L. ja Loukola-Ruskeeniemi, K. 2004. Characterization of sulfide deposits by airborne magnetic and gamma-ray responses in eastern Finland. *Ore Geology Reviews* 24:67–84.
- Airo, M.-L. ja Hyvönen, E. 2008. Petrophysical data coupled with airborne magnetic, conductive and radiometric signatures identifying bedrock conductors. Proceedings of the 5th International Conference on Airborne Electromagnetics, Porvoo Haikko, Finland, 28–30 May 2008.
- Airo, M.-L., Loukola-Ruskeeniemi, K. ja Hyvönen, E. 2009. Geophysical databases supporting large- and detailed scale mineral exploration: black shale formations in Finland. Teoksessa: Smart science for exploration and mining: proceedings of the 10th Biennial SGA Meeting, Townsville, Australia, 17th–20th August 2009. Townsville: James Cook University, 781–783.
- Anschutz, P. ja Blanc, G. 1996. Heat and salt fluxes in the Atlantis II Deep (Red Sea). *Earth and Planetary Science Letters* 142:147–159.
- Arkimaa, H., Hyvönen, E., Lerssi, J., Loukola-Ruskeeniemi, K. ja Vanne, J. 1999. Compilation of maps of black shales in Finland: applications for exploration and environmental studies. Teoksessa: Geological Survey of Finland, Current Research 1997–1998. Geological Survey of Finland. Special Paper 27:111–114.
- Arkimaa, H., Hyvönen, E., Lerssi, J., Loukola-Ruskeeniemi, K. ja Vanne, J. 2000. Suomen mustaliuskeet aeromagneettisella kartalla = Proterozoic black shale formations and aeromagnetic anomalies in Finland 1:1 000 000. Espoo: Geologian tutkimuskeskus.
- Chernyshov, N.M. 2009. Noble-Metal Minerals in Ores of the Black-Shale Type in the Voronezh Crystalline Massif, Central Russia. *Geology of Ore Deposits*, vol. 51, No 8: 684–697.
- Dobretsov, N.L., Konnikov, E.G. ja Dobretsov, N.N. 1992. Precambrian ophiolite belts of southern Siberia, Russia, and their metallogeny. *Precambrian Research* 58: 427–446.
- Ervamaa, P. ja Heino, T. 1980. Sotkamon Talvivaaran nikkeli-kupari-sinkki-esiintymän tutkimukset. Geologian tutkimuskeskus, Julkaisematon raportti, M19/3344/-80/1/10. 73 s.
- Ervamaa, P. ja Heino, T. 1983. The Ni-Cu-Zn mineralization of Talvivaara, Sotkamo. In: Exogenic processes and related metallogeny in the Svecokarelian geosynclinals complex. Geological Survey of Finland Guide 11, 79–83.
- Hautaniemi, H., Kurimo, M., Multala, J., Leväniemi, H. ja Vironmäki, J. 2005. The 'three in one' aerogeophysical concept of GTK in 2004. Teoksessa: Airo, M.-L. (toim.). Aerogeophysics in Finland 1972–2004: Methods, System Characteristics and Applications, Geological Survey of Finland, Special Paper 39:21–74.
- Havola, M. 1981. Geological map of Finland, sheet 3343 Sotkamo. Geological Survey of Finland.
- Jowett, E.C., Rydzewski, A. ja Jowett, R.J. 1987. The Kupferschiefer Cu-Ag ore deposits in Poland: a reappraisal of the evidence of their origin and presentation of a new genetic model. *Canadian Journal of Earth Sciences* 27: 2016–2037.
- Kontinen, A. ja Eskelinen, J. 2005. Geological map of Finland, sheet 3344 Laakajärvi. Geological Survey of Finland.
- Koistinen, T. (comp.); Stephens, M.B. (comp.); Bogatchev, V. (comp.); Nordgulen, Ø. (comp.); Wennerström, M. (comp.); Korhonen, J. (comp.) 2001. Geological map of the Fennoscandian Shield, scale 1:2 000 000. Espoo : Trondheim : Uppsala : Moscow : Geological Survey of Finland : Geological Survey of Norway : Geological Survey of Sweden : Ministry of Natural Resources of Russia.
- Kontinen, A. 1987. An early Proterozoic ophiolite – The Jormua mafic-ultramafic complex, northeastern Finland. *Precambrian Research* 35, 313–341.
- Kukkonen, I.T. (toim.) 2011. Outokumpu Deep Drilling Project 2003–2010. Geological Survey of Finland, Special Paper 51.
- Kuroda, J., Ohkouchi, N., Ishii, T., Tokuyama, H. ja Taira, A. 2005. Lamina-scale analysis of sedimentary components in Cretaceous black shales by chemical compositional mapping: Implications for paleoenvironmental changes during the Oceanic Anoxic Events. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69 (6): 1479–1494.
- Loukola-Ruskeeniemi, K. 1990. Karelidien mustaliuskeiden hiili- ja rikkiptitoisuudet kerrostumisjärjestyksen kuvastajina. *Geologi* 42:95–101.
- Loukola-Ruskeeniemi, K. 1991. Geochemical evidence for the hydrothermal origin of sulphur, base metals and gold in Proterozoic metamorphosed black shales, Kainuu and Outokumpu areas, Finland. *Mineralium Deposita* 26:152–164.

- Loukola-Ruskeeniemi, K. 1992. Geochemistry of Proterozoic metamorphosed black shales in eastern Finland, with implications for exploration and environmental studies. Geological tutkimuskeskus. 86 s.
- Loukola-Ruskeeniemi, K. 1995. Origin of the black-shale-hosted Ni-Cu-Zn deposit at Talvivaara, Finland. Geological Survey of Finland, Special Paper 20:31–46.
- Loukola-Ruskeeniemi K. 1999. Origin of black shales and the serpentinite-associated Cu-Zn-Co ores at Outokumpu in Finland. Economic Geology 94:1007–1028.
- Loukola-Ruskeeniemi, K. 2011. Graphite- and sulphide-bearing schists in the Outokumpu R2500 drill core: comparison with the Ni-Cu-Co-Zn-Mn –rich black schists at Talvivaara, Finland. Teoksessa: Kukkonen, I.T. (toim). Outokumpu Deep Drilling Project 2003–2010. Geological Survey of Finland, Special Paper 51:229–252.
- Loukola-Ruskeeniemi, K. ja Heino, T. 1996. Geochemistry and genesis of the black shale -hosted Ni-Cu-Zn deposit at Talvivaara, Finland. Economic Geology 91:80–110.
- Loukola-Ruskeeniemi, K., Heino, T., Talvitie, J. ja Vanne, J. 1991. Base-metal-rich metamorphosed black shales associated with Proterozoic ophiolites in the Kainuu schist belt, Finland: a genetic link with the Outokumpu rock assemblage. Mineralium Deposita 26:143–151.
- Loukola-Ruskeeniemi, K., Uutela, A., Tenhola, M. ja Paukola, T. 1998. Environmental impact of metaliferous black shales at Talvivaara in Finland, with indication of lake acidification 9000 years ago. Journal of Geochemical Exploration 64 (1–3):395–407.
- Moore, G. 2008. Finland's national airborne geophysical mapping programme and the '3-in-1' approach. First Break, 26, Special Topic on Airborne Geophysics, November 2008.
- Nenonen, E. 1964. Sotkamon Talvivaaran ympäristön kivilajeista, niiden stratigrafiasta ja tektoniikasta. Julkaisematon pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto. 70 s.
- Puustinen, K. 2003. Suomen kaivosteollisuus ja mineraalisten raaka-aineiden tuotanto vuosina 1530–2001, historiallinen katsaus erityisesti tuotantokujien valossa. Geologian tutkimuskeskus, arkistoraportti, M 10.1/2003/3. 578 s.
- Ruskeeniemi, K., Sarapää, O. ja Rehtijärvi, P. 1986. Proterotsoisten hiilipitoisten metasedimenttien kemiallisesta koostumuksesta. Geologi 38:90–95.
- Talvitie, J., Damsten, M., Heino, T., Niemelä, M., Vanne, J., Äikäs, O. ja Tervo, T. 1980. Väliaraportti Kai-
nuun ja Ylä-Savon mustaliuske-serpentiiniittijakson malmitutkimuksista vuonna 1980. Geologian tutkimuskeskus. Julkaisematon raportti, M 19/3432/-80/1/10. 53 s., 8 l.
- Talvivaaran kaivososakeyhtiö Oyj 2010. Stock exchange release 27 October 2010.
- Virtasalo, J. ja Kotilainen, A. 2010. Hienosedimenttien kerrostumisesta ja pohjaeläinyhteisöjen toiminnasta Itämeren syvänteissä. Geologi 62: 140–146.
- Västi, K. 2008. Chemical composition of metamorphosed black shale and carbonaceous metasedimentary rocks at selected targets in the Vihanti area, western Finland. Geological Survey of Finland. Report of Investigation 173. 22 s.

KIRSTI LOUKOLA-RUSKEENIEMI,
EIJÄ HYVÖNEN, MERI-LIISA AIRO,
HILKKA ARKIMAA, JUKKA ESKELINEN,
JOUNI LERSSI, JOUKO VANNE,
SATU VUORIAINEN

Etunimi.sukunimi@gtk.fi

Mustaliusketietokantaa päivitetään parhaillaan. Toivomme Geologi-lehden lukijoilta tietoja kuvassa 2 sinisillä viivoilla merkityistä alueista, jotka eivät perustu geologisiin havaintoihin vaan geofysikaaliseen tulkintaan.

Onko teillä mustaliuskenäytteitä tai havaintoja mustaliuskeista tieleikkauksista, louhoksilta tms. tai jopa mahdollisesti kairasydäntietoja näiltä alueilta?

Toivomme yhteydenottoja seuraaviin sähköpostiosoitteisiin:

**hilkka.arkimaa@gtk.fi
jouni.lerssi@gtk.fi ja
eija.hyvonen@gtk.fi
tai puh. 020 550 11.**