

Eräitä näkökohtia moreenin raskasmineraalitutkimusten käytöstä malminetsinnässä

VESA PEURANIEMI

Maaperän sisältämien raskaiden mineraalien käyttöä malminetsinnässä voidaan luonnehtia sekä vanhaksi että nykyaikaiseksi menetelmäksi. Varhaisin tunnettu maininta menetelmästä on jo antiikin ajalta, jolloin kreikkalainen filosofi Theophrastus vuonna 300 B.C. kuvasi sinoperin, HgS, (ominaispaino 8,1) rikastamista jokihiekasta ja sen käyttöä elohopeamalmien etsinnässä (Stendal ja Theobald 1994).

Neuvostoliitossa tehtiin 1930-luvulla paljon alluviaalisedimenttien raskasmineraalitutkimuksia etsittäessä tinaa, volframia, tantalaa, niobia ja harvinaisia maametalteja (Sigov 1939). Sigov kuvasi myös kassiteriittirakeiden tunnistamisen värjäysmenettelyllä. Myöhemmin USA:ssa Theobald ja Thompson (1959) käyttivät purosoran ja rinteiden vyörysorakelojen raskasmineraalirikasteita volframin etsintään Coloradon Front Rangen volframiprovinssin alueella.

Moreenin käyttöä näytemateriaalina ryhdyttiin tutkimaan Ruotsissa 1960-luvulla Nils Brundinin johdolla. Menetelmätestaus tehtiin tunnettujen erityyppisten mineralisaatioiden alueella (Brundin 1966a,b). Saatujen tulosten perusteella Brundin päätteli moreenin raskasmineraalitutkimusten soveltuvan erittäin hyvin scheeliitin, volframiitin, kassiteriitin, py-

rokloorin, baryytin ja kromiitin etsintään. Hän totesi myös, että volframimalmien etsinnässä moreenin hienofraktion analysointi on epäluotettavampi menetelmä kuin raskaan fraktion analysointi. Myöhemmin Brundin ja Bergström (1977) käyttivät moreenin raskasmineraalitutkimusta alueellisena menetelmänä volframimalmien etsinnässä Ruotsissa.

Suomessa moreenin raskasmineraalitutkimukset malminetsinnässä käynnistyivät 1970-luvulla. Eurajoella sitä käytettiin tinamalmietsinnöissä (Lehmuspelto 1976), Reisjärvellä kullin etsinnässä (Kokkola ja Pehkonen 1976) ja Kaustisella volframin etsinnässä (Lindmark 1977). Rautaruukki Oy:n Malminetsintäosasto teki 1970- ja 1980-luvuilla alueellista raskasmineraalitutkimusta Heinolassa tinan etsinnässä (Peuraniemi ja Heinänen 1985) sekä Hämeenlinnassa ja Ylikiimingissä volframin etsinnässä (Peuraniemi 1990). Paitsi volframiin, Hämeenlinnassa ja Ylikiimingissä kiinnitettiin huomiota myös sulfidimineraalien esiintymiseen.

Kanadassa ryhdyttiin 1990-luvulla tekemään laajoilla alueilla moreenin raskasmineraalitutkimusta timantin etsinnöissä käyttäen apuna kimberliittien indikaattorimineraaleja, kuten Cr-diopsidi, Cr-spinelli ja Mg-ilmeniitti (McClenaghan ja Kjarsgaard 2001, McClenaghan 2005).

Määritelmiä

Raskailla mineraaleilla tarkoitetaan mineraaleja joiden ominaispaino tai tiheys on suurempi kuin tavallisten kivilajeja muodostavien mineraalien kuten kvartsin ja maasälpien (om.p. 2,5–2,8). Kirjallisuudessa esitetty ominaispainoraja kevyiden ja raskaiden mineraalien välillä vaihtelee kuitenkin varsin paljon. Glossary of Geology -sanakirjan mukaan raskaiden mineraalien ominaispaino on yli 2,85–2,9 (Bates ja Jackson 1980). Venäläiset Kuzin ja Egorov (1976) luokittelevat mineraalit neljään ominaispainoluokkaan: 1. Kevyet mineraalit (om.p. alle 2,5), 2. Keskiraskaat mineraalit (om.p. 2,5–3,3), 3. Raskaat mineraalit (om.p. 3,4–6) ja 4. Hyvin raskaat mineraalit (om.p. yli 6). Yleisimpien oksidisten ja sulfidisten malmimineraalien ominaispaino on yli 4, joten ne viimemainitussakin luokittelussa kuuluvat raskaisiin mineraaleihin. Aivan kaikki taloudellisesti tärkeät malmimineraalit eivät kuitenkaan ole tässä luokittelussa raskaita, esimerkiksi apatiitti (om.p. 3,2), spodumeni (om.p. 3,2) ja petaliitti (om.p. 2,4).

Oksidiset malmimineraalit, volframaatit sekä kimberliittien indikaattorimineraalit ovat hyvin kestäviä mekaanista kulutusta ja kemiallista rapautumista vastaan. Kulta on pehmeä mutta hyvin kestävä rapautumista vastaan. Sen sijaan sulfidimineraalit ovat mekaanisesti heikkoja ja kemiallisesti herkästi rapautuvia hap-pamissa ja hapettavissa oloissa.

Raskasmineraalitutkimuksissa ollaan tekemisissä selkeän mekaanisen dispersion eli jäätiköityneillä alueilla glasiogeenisen dispersion kanssa. Kuten edellä on jo tullut ilmi, moreenin raskasmineraalitutkimusta käytetään enimmäkseen malminetsinnän alueellisessa vaiheessa etsittäessä uusia malmiviitteitä. Tällöin käyttämällä harvaa näyteverkkoa voidaan kattaa laaja alue suhteellisen nopeasti. Menetelmällä pyritään osumaan yhdellä tai kahdella näytepisteellä malmimineralisaatiosta jääti-

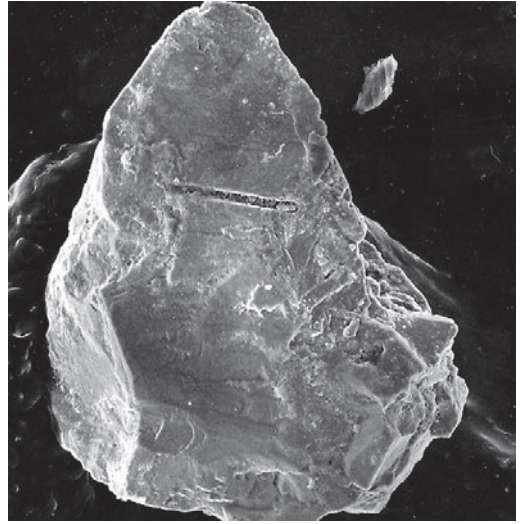
kön liikesuuntaan ulottuvan malmimineraalien dispersioviuhkan häntä- eli distaaliosaan, mikä on laajempi pinta-alaltaan kuin dispersioviuhkan proksimaaliosa (DiLabio 1990). Distaaliosassa anomalia on heikompi, ja tämä pyritään kompensoimaan rikastamalla näytteistä raskas fraktio. Mineraaliaineksen dispersio vaihtelee erityyppisissä morfologisissa moreenimuodostumissa ja tämä pitäisi huomioida näytteenoton suunnittelussa (Aario ja Peuraniemi 1992). Näytteet otetaan moreenin pintaosasta, yleisimmin 0,5–1 m syvyydestä. Paljon käytetty näytekoko on 5–12 litraa (Hirvas ja Nenonen 1990, McClenaghan 2005). Näytteistä pesuseulotaan useimmiten alle 2 mm fraktio, mistä sitten rikastetaan raskas fraktio. Rikastaminen voidaan tehdä monella tavalla, esimerkiksi vaskaamalla, rännittämällä, tärypöydällä, spiraalirikastimilla tai käyttämällä raskaita nesteitä (McMartin ja McClenaghan 2001). Laboratoriotutkimuksia varten raskasmineraalirikaste voidaan sitten jakaa seulomalla useisiin raekokofraktioihin esimerkiksi 0,5 mm ja 0,25 mm seuloilla.

Raskasmineraalirikasteiden tutkiminen

Raskasmineraalirikasteet on tärkeä tutkia sekä kemiallisesti että mineralogisesti. Monialkuaineanalyytit (XRF, INAA, ICP-AES, ICP-MS) antavat hyvän perustan näytteiden tarkemmalle mineralogiselle ja mineraalikemialliselle tutkimukselle. Moreenin raskas fraktio on mineraalisekoitus, mikä vaihtelevissa suhteissa edustaa niiden kivilajien mineraaleja, joista jäätikkö on louhinut ja kerrostanut ainesta. Käytännössä raskaan fraktion erottelu ei ole koskaan niin täydellistä, etteikö mukana olisi jonkin verran myös ominaispainoltaan kevyempiä mineraaleja. Mineraalien tunnistamisessa voidaan käyttää röntgendiffraktiota (XRD), stereomikroskooppia, polarisaatiomikroskooppia, pyyhkäisyelektronimikro-

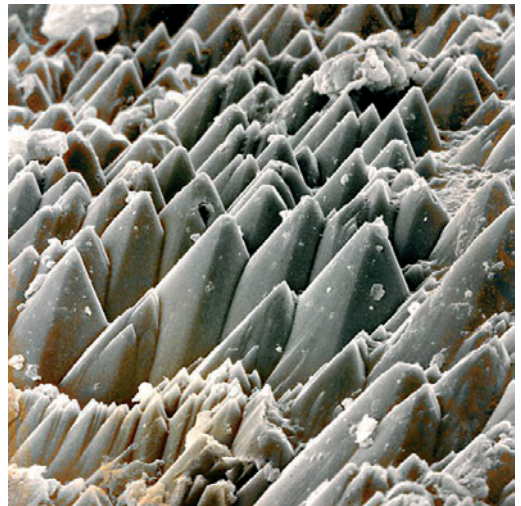
skooppiä (SEM) sekä mikroanalyyttoria (EPMA). Röntgendiffraktiolla saadaan kokonaiskuva raskaan fraktion yleisimmistä mineraaleista. Malmimineraalien diffraktiopiikit voivat kuitenkin peittyä muiden mineraalien piikkien alle. Stereomikroskooppi on nopein ja halvin tapa tarkastella rikasteen mineraalikoostumusta. Kuitenkaan mineraalien varma tunnistaminen pienen raekoon rikasteesta stereomikroskoopilla ei aina ole helppo tehtävä. Malmimineraaleista helpoin tunnistettava on scheeliitti, CaWO_4 , mikä UV-valossa fluoresoi kirkaan valkoisena tai sinertävänä. Näin voidaan nopeasti laskea scheeliittirakeiden määrä rikasteessa. Yksittäisten scheeliittirakeiden samoin kuin muidenkin mineraalirakeiden tarkkaa muotoa ja pintarakennetta voidaan parhaiten tutkia pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM). Samalla rakeesta voidaan tehdä energiadisersiivisellä röntgenspektrometrillä (EDS) alkuaineanalyysi ja näin varmistaa mineraalin tunnistus. Kuvassa 1 on mekaanisesti särkynyt, mutta rapautumaton scheeliittirake moreenin raskasmineraalirikasteesta Ylikiimingistä. Kuvassa 2 näkyy scheeliittirakeen täysin terve, rapautumaton murtopinta. Raskasmineraalinäyte on Hämeenlinnasta.

Tinan malmimineraali kassiteriitti, SnO_2 , ei ole stereomikroskoopilla helposti tunnistettava mineraali. Sen rakeet ovat useimmiten mustia, kiiltäviä ja pölkkymäisiä. Samannäköisiä mustia ja kiiltäviä mineraaleja on paljon muitakin, kuten magnetiitti (mikä kuitenkin poistetaan loppurikasteesta magneetilla), ilmeniitti, rutiili ja turmaliini. Apuna mineraalien erottelussa voidaan käyttää Frantzin isodynaamista separaattoria, jossa mineraalit saadaan jaettua osafraktioihin niiden magneettisen susceptibiliteetin mukaan. Esimerkiksi 1,8 A virran voimakkuudella kassiteriitti rikastuu täysin epämagneettiseen fraktioon (Peuraniemi ja Heinänen 1985). Kassiteriitin tunnistaminen voidaan varmistaa edellä mainitulla Sigovin



Kuva 1. Moreenin raskasmineraalirikasteen scheeliittirake, Ylikiimingi. SEM-kuva.

Figure 1. Scheelite grain from heavy mineral concentrate of till, Ylikiimingi. SEM image.

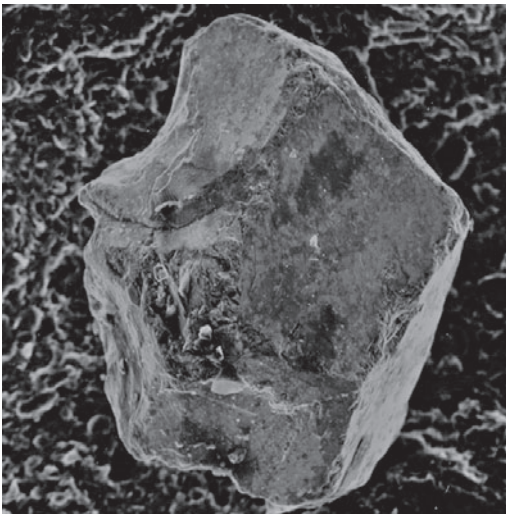


Kuva 2. Moreenin raskasmineraalirikasteen scheeliittirakeen rapautumaton murtopinta, Hämeenlinna. SEM-kuva.

Figure 2. Unweathered surface of the scheelite grain from heavy mineral concentrate of till, Hämeenlinna. SEM image.

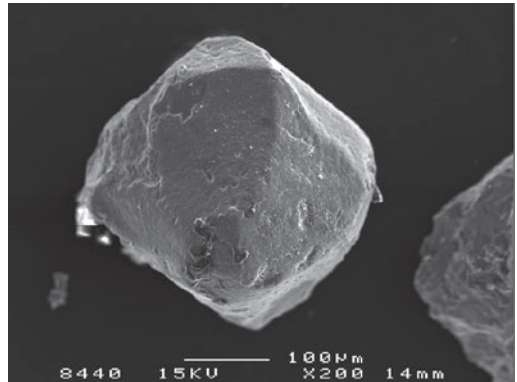
esittämällä värjäysmenettelyllä, jossa rakeet laitetaan sinkkilevyille ja päälle tiputetaan laimeaa suolahappoa. Tällöin syntyvässä reaktiossa kassiteriittirakeiden pinnalle muodostuu ohut tinakalvo, mikä hopeanharmaan värinsä vuoksi helposti erottuu muista mineraalirakeista. Kassiteriittirakeissa on myös monesti nähtävissä tetragonisen kidejärjestelmän prisma- ja pyramidipintoja (kuva 3). Raskasmineraalirikasteista tehdyistä kiillotetuista ohuthieistä voidaan mikroanalyysointilla määrittää kassiteriittirakeiden kemiallinen koostumus, missä etenkin Nb- ja Ta-pitoisuudet antavat tietoa jo etsintävaiheessa mahdollisen tinamalmien geneettisestä tyypistä (Wolf ja Espozo 1972, Haapala 1977, Peuraniemi ja Heinänen 1985).

Myös kromin malmimineraalin kromiitin, FeCr_2O_4 , rakeet ovat väriltään mustia. Yksit-



Kuva 3. Moreenin raskasmineraalirakeen kassiteriittirae, Heinola. Rakeen oikealla sivulla näkyy tetragonista kidemuotoa, vasemmalla sivulla jäätikkökulutuksen jälkiä. SEM-kuva.

Figure 3. Cassiterite grain from heavy mineral concentrate of till, Heinola. Tetragonal crystal form is seen on the right side and glacially quarried face on the left side of the grain. SEM image.



Kuva 4. Moreenin raskasmineraalirikasteen oktaedrisen kidemuodon omaava kromiittirae, Kiiminki. SEM-kuva.

Figure 4. Chromite grain with octahedral crystal form from heavy mineral concentrate of till, Kiiminki. SEM image.

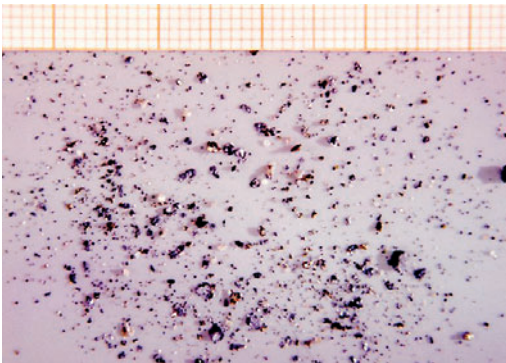
täisissä kromiittirakeissa näkyy usein kuutiolisen kidejärjestelmän oktaedrisia muotoja, jotka varsin hyvin näkyvät SEM-kuvissa (kuva 4).

Käyttökelpoisuus sulfidimalmien etsinnässä

Kuten edellä on jo todettu, sulfidimineraalit ovat pinnallisissa hapettavissa ja happamissa oloissa herkästi rapautuvia. Näin moreenin raskasmineraalitutkimusta, missä näytteet otetaan läheltä maan pintaa, ei ole yleensä pidetty luotettavana etsintämenetelmänä sulfidimalmeille. Viimeksi kuluneen vuosikymmenen aikana on kuitenkin enenevässä määrin tullut esiin tutkimustuloksia, jotka osoittavat sulfidimineraalien olevan yllättävänkin kestäviä pinnallisissa rapautumisoloissa (mm. Averill 2001, Sarala ja Peuraniemi 2007, Mc Clenaghan *et al.* 2011, Peuraniemi ja Eskola 2013). Averill pitää erityisesti kuparikiisua, CuFeS_2 , kestäväenä mineraalina ja hyvänä indikaattorina raskasmineraaligeokemiassa etsittäessä massiivisia sulfidimalmeja. Joissakin tutkimuksissa on tultu edelleen siihen tulokseen, etteivät sulfidimineraalit ole kestäviä pinnalli-

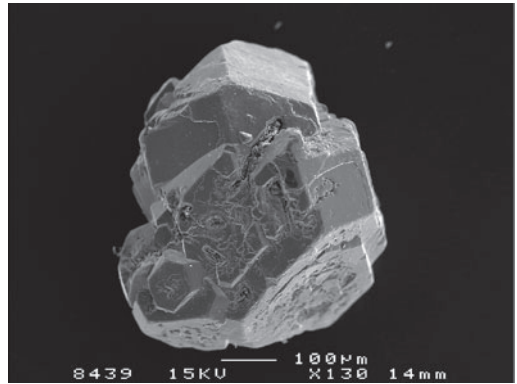
sessä rapautumisessa eivätkä siten käyttökel-
poisia indikaattoreita moreenin raskasmineraal-
litutkimuksissa (McMartin *et al.* 2011). Eri
alueiden paikalliset olosuhteet voivatkin vaih-
della suuresti ja vaikuttaa näin sulfidimineraal-
lien säilymiseen moreenin pintaosissa.

Sulfidimineraalien tunnistaminen pelkäs-
tään stereomikroskooppilla ei aina ole helppoa.
Esimerkiksi voidaan ottaa rikkikiisun ja kupari-
kiisun erottaminen toisistaan. Molemmat
ovat väriltään keltaisia, rikkikiisu vaalean kel-
tainen ja kuparikiisu tummemman keltainen
(kuva 5). Kuitenkin kun niitä molempia on
pienirakeisessa raskasmineraalirikasteessa mui-
den raskaiden mineraalien kanssa, on värieron
sen verran pieni, että ihmissilmä helposti ereh-
tyy. Toisinaan rikkikiisun tunnistamista aut-
taa rakeissa näkyvät kuutiollisen järjestelmän
yleiset kidemuodot kuutio, pentagonidodeka-
edri ja oktaedri (kuva 6). Aina ei kuitenkaan
rikkikiisurakeissakaan ole nähtävissä kidemu-
otoja. Kuparikiisu kuuluu tetragoniseen kide-
järjestelmään, mutta rakeissa ei juurikaan ki-
demuotoja näy (kuva 7). SEM-tutkimuksessa



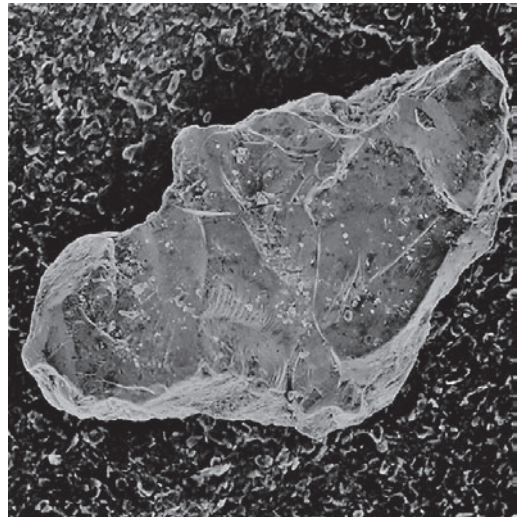
Kuva 5. Runsaasti keltaisia rikkikiisu- ja kupari-
kiisurakeita sekä teräksenharmaita molybdeeni-
hohdesuomuja moreenin raskasmineraalirikas-
teessa, Ilomantsi. Stereomikroskooppikuva.

Figure 5. Numerous yellow pyrite and chalcopyrite grains and steel grey molybdenite flakes in the heavy mineral concentrate of till, Ilomantsi. Stereomicroscope image.



Kuva 6. Moreenin raskasmineraalirikasteen
rikkikiisurakeen kuutiollis-oktaedrinen kidemu-
to, Kiiminki. SEM-kuva.

*Figure 6. Pyrite grain with cubic-octahedral
crystal form from heavy mineral concentrate of
till, Kiiminki. SEM image.*



Kuva 7. Moreenin raskasmineraalirikasteen
kuparikiisurake, Rovaniemi. SEM-kuva.

*Figure 7. Chalcopyrite grain from heavy mineral
concentrate of till, Rovaniemi. SEM image.*

rakeiden koostumus voidaan analysoida energiadi-
spersiivisellä röntgenspektrometrilla
(EDS) ja näin varmistaa tunnistus. Myös ri-
kasteista tehtyjen kemiallisten monialkuaine-
analyysien tuloksia on syytä tarkastella huol-
lella sulfidisten metallien osalta. Esimerkiksi

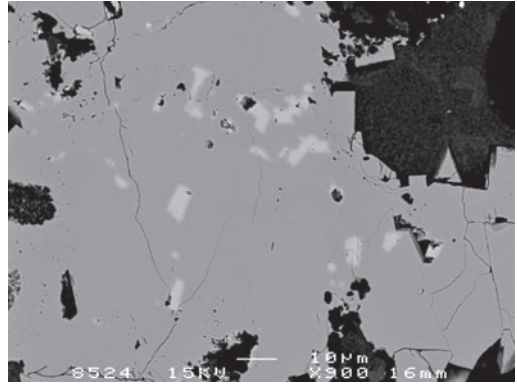
kuparin pitoisuuden kohoaminen normaalin taustapitoisuuden yläpuolelle voi olla merkittävää. Kuparihan ei, toisin kuin esimerkiksi nikkeli ja sinkki, sisälly juurikaan silikaattien hilaan vaan kohonneet Cu-pitoisuudet geologisissa näytteissä johtuvat Cu-mineraaleista, useimmiten sen sulfideista (Arndt *et al.* 2017). Nämä voivat esiintyä mikrometrin kokoluokkaa olevina sulkeumina muissa mineraaleissa, eikä niitä pysty havaitsemaan muuten kuin tutkimalla rikasteista tehtyjä kiillotettuja ohutheitä voimakkailla suurennuksilla (kuva 8).

Massiivisiin sulfidimalmeihin sisältyy usein myös sinkkispinelli gahniiattia, $ZnAl_2O_4$, joka on raskas ja rapautumista kestävä mineraali ja näin sitä voidaan käyttää sulfidalmalmien etsinnässä indikaattorimineraalina. Sen rakeissa on usein näkyvissä kuutiollisen järjestelmän kidemuotoja (kuva 9).

Päätelmiä tulosten tulkinnasta

Moreenin raskasmineraalirikasteiden sekä kemiallisista analyysituloksista että raelaskutuloksista on toisinaan tapana laskea rikasteen painolla korjatut arvot, jolloin näytteiden keskinäinen vertailtavuus helpottuu. Kuitenkin jos ns. raakatuloksista voidaan tehdä jo varsin pitkälle meneviä johtopäätöksiä seuraavasti:

- ① Kun malmimineraaleja on runsaasti moreenin raskasmineraalirikasteessa, ollaan dispersioviuhkan proksimaaliosassa eli varsin lähellä mineralisaation puhkeamaa. Puhkeama voi edustaa rikasta mutta kapeaa ja taloudellisesti merkityksetöntä juonta. Toisaalta se voi olla merkittävän malmiesiintymän pienialainen pintapuhkeama.
- ② Kun malmimineraalien määrä raskasmineraalirikasteessa on vähäinen, ollaan todennäköisimmin dispersioviuhkan distaaliosassa.
- ③ Yksikin malmimineraalirake raskasmineraalirikasteessa voi olla malminetsinnällisesti mielenkiintoinen indikaatio.



Kuva 8. Vaaleita kuparikiiususulkeumia harmaassa rikkikiisussa. Moreenin raskasmineraalinäyte, Kiiminki. Kiillotettu ohutheite. SEM-kuva.

Figure 8. Light inclusions of chalcopyrite in the grey pyrite. Heavy mineral concentrate of till, Kiiminki. Polished thin section. SEM image.



Kuva 9. Moreenin raskasmineraalirikasteen gahniiittirakeen alaosassa kuutiollista kidemuotoa, Hämeenlinna. SEM-kuva.

Figure 9. Gahnite grain with cubic crystal form on its lower face. Heavy mineral concentrate of till, Hämeenlinna. SEM image.

- ④ Jos tutkimusalueen moreenin raskasmineraalirikasteista ei löydy yhtään malmimineraaliraketta, se ei silti sulje pois malmiesiintymän mahdollisuutta alueella. Raskasmineraalitut-

kimus on siis malmiviitteitä antava mutta ei poissulkeva menetelmä, näin myös sulfidimalmien suhteen.

5 Edellä oleviin kohtiin vaikuttaa myös se, että moreeni on varsin epähomogeeninen materiaali. Lisäksi erityyppisten morfologisten moreenimuodostumien syntyyn ovat vaikuttaneet erilaiset kerrostumis- ja dispersiomekanismit. Tämä on hyvin tärkeää ottaa huomioon jo näytteenoton suunnittelussa ja myöhemmin tulosten tulkinnassa.

VESA PEURANIEMI
Notaarintie 6 B 22
90650 Oulu
vesa.peuraniemi@professori.fi

*Kirjoittaja on emeritusprofessori
ja Helsingin yliopiston dosentti.*

Summary:

Some aspects on the use of heavy mineral till geochemistry in ore exploration

The use of heavy minerals in surficial sediments for ore exploration is an old method. The Greek philosopher Theophrastus described already in 300 B.C. enrichment of cinnabar (HgS) from alluvial sediments. Heavy mineral research on alluvial sediments were used in the former Soviet Union in the 1930s in prospecting for Sn, W, Ta, Nb and REE. Tungsten content of stream sediments and colluvium was studied in Colorado, USA in the 1950s in prospecting for W ores. Glacial till as a sampling material was tested for the first time in Sweden in the 1960s and in Fin-

land in the 1970s. The main focus was then in the search for W and Sn ores. The heavy mineral method has been used in Canada in the 1990s for prospecting diamond-bearing kimberlites.

Heavy minerals are usually defined as minerals with higher specific gravity than the common rock-forming minerals such as quartz and feldspars. Many heavy minerals are also resistant to weathering, and thus the till samples can be taken from the surficial parts of the till deposits. This method is mainly used in the regional phase of exploration when new ore indications are being sought in vast areas. The heavy mineral fraction is concentrated with panning, sluicing, a shaking table, spiral concentrators and heavy liquids. Concentrates are analysed chemically with multi-element analysis (XRF, INAA, ICP-AES, ICP-MS). Mineralogical composition is studied with a stereo microscope, polarizing microscope, XRD, SEM+EDS and EPMA. The use of a stereo microscope is a fast method but not able to easily identify all minerals. There are some means to help this, for example scheelite grains are easy to identify and count under UV light. Cassiterite grains can be identified with the aid of HCl and a Zn plate.

During the last ten years, more research has been conducted on using the heavy mineral method of till in prospecting for sulphide ores. Although sulphide minerals are quite susceptible to weathering, they have in many instances been preserved surprisingly well in the surficial part of the till deposits, as can be seen in Figs. 5–8.

The heavy mineral method can give indications of ore deposits, however it cannot as easily *exclude* the possibility to find deposits. One ore mineral grain in the heavy mineral concentrate of till can be an important ore indication.

Kirjallisuus

- Aario, R. ja Peuraniemi, V., 1992. Glacial dispersal of till constituents in morainic landforms of different types. *Geomorphology* 6:9–25.
- Arndt, N.T., Fontbote, L., Hedenquist, J.W., Kesler, S.E., Thompson, J.F.H. ja Wood, D.G., 2017. Future Global Mineral Resources. *Geochemical Perspectives* 6, 171 s.
- Averill, S.A., 2001. The application of heavy indicator mineralogy in mineral exploration, with emphasis on base metal indicators in glaciated metamorphic and plutonic terrain. Teoksessa: McClenaghan, M.B., Bobrowsky, P.T., Hall, G.E.M. ja Cook, S.J. (toim.), *Drift Exploration in Glaciated Terrain*. Geological Society Special Publication No. 185, Lontoo, 69–81.
- Bates, P.L. ja Jackson, J.A., 1980. *Glossary of Geology*. American Geological Institute, Falls Church, Virginia, 749 s.
- Brundin, N., 1966a. Rapport över utförda arbeten i malmfundsprojektet nr 122 "Moränundersökningar för prospekteringsändamål". Grängesberg-bolaget Förvaltningen i Stråssa Prospekteringen, 45 s + 38 liitettä.
- Brundin, N., 1966b. Study of heavy minerals in glacial soils. Symposium on geochemical prospecting, Ottawa, Geological Survey of Canada Paper 66–54, s. 267.
- Brundin, N. ja Bergström, J., 1977. Regional prospecting for ores based on heavy minerals in glacial till. *Journal of Geochemical Exploration* 7:1–19.
- DiLabio, R.N.W., 1990. Glacial dispersal trains. Teoksessa: Kujansuu, R. ja Saarnisto, M. (toim.), *Glacial Indicator Tracing*. A.A. Balkema, Rotterdam, 109–122.
- Haapala, I., 1977. Petrography and geochemistry of the Eurajoki stock, a rapakivi-granite complex with greisen-type mineralization in southwestern Finland. *Geological Survey of Finland Bulletin* 286, 128 s.
- Hirvas, H. ja Nenonen, K., 1990. Field methods for glacial indicator tracing. Teoksessa: Kujansuu, R. ja Saarnisto, M. (toim.), *Glacial Indicator Tracing*. A.A. Balkema, Rotterdam, 217–248.
- Kokkola, M. ja Pehkonen, E., 1976. Kangaskylä – gold in till. *Journal of Geochemical Exploration* 5:239–244.
- Kuzin, M. ja Egorov, N., 1976. *Field Manual of Minerals*. Mir Publishers, Moskova, 194 s.
- Lehmuspelto, P., 1976. Eurajoki – tin in till. *Journal of Geochemical Exploration* 5:218–221.
- Lindmark, B., 1977. Till-sampling methods used in exploration for scheelite in Kaustinen, Finland. Teoksessa: Jones, M.J. (toim.), *Prospecting in Areas of Glaciated Terrain*. Institution of Mining and Metallurgy, Lontoo, 45–48.
- McClenaghan, M.B., 2005. Indicator mineral methods in mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 5:233–245.
- McClenaghan, M.B. ja Kjarsgaard, B.A., 2001. Indicator mineral and geochemical methods for diamond exploration in glaciated terrain in Canada. Teoksessa: McClenaghan, M.B., Bobrowsky, P.T., Hall, G.E.M. ja Cook, S.J. (toim.), *Drift Exploration in Glaciated Terrain*. Geological Society Publication No. 185, Lontoo, 83–123.
- McClenaghan, M., Averill, S.A., Kjarsgaard, I.M., Layton-Matthews, D. ja Matile, D., 2011. Indicator mineral signatures of magmatic Ni-Cu deposits, Thompson Nickel Belt, central Canada. 25th IAGS Workshop, Indicator mineral methods in mineral exploration, Vuorimiesyhdistys Serie B, Nro B92-4, 67–72.
- McMartin, I., Corriveau, L. ja Beaudoin, G., 2011. An orientation study of the heavy mineral signature of the NICO Co-Au-Bi deposit, Great Bear magmatic zone, NW Territories, Canada. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 11: 293–307.
- McMartin, I. ja McClenaghan, M.B., 2001. Till geochemistry and sampling techniques in glaciated shield terrain: a review. Teoksessa: McClenaghan, M.B., Bobrowsky, P.T., Hall, G.E.M. ja Cook, S.J. (toim.), *Drift Exploration in Glaciated Terrain*. Geological Society Publication No. 185, Lontoo, 19–43.
- Peuraniemi, V., 1990. Heavy minerals in glacial material. Teoksessa: Kujansuu, R. ja Saarnisto, M. (toim.), *Glacial Indicator Training*. A.A. Balkema, Rotterdam, 165–185.
- Peuraniemi, V. ja Heinänen, K., 1985. Mineralogical investigations in the interpretation of heavy-mineral geochemical results from till. *Journal of Geochemical Exploration* 23:315–328.
- Peuraniemi, V. ja Eskola, T., 2013. Glacial dispersal and mode of occurrence of metals in till and esker gravel at Kumpuselkä, northern Finland. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 13:195–203.
- Sarala, P. ja Peuraniemi, V., 2007. Exploration using till geochemistry and heavy minerals in the ribbed moraine area of southern Finnish Lapland. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 7:195–205.
- Sigov, A.P., 1939. Prospecting by heavy mineral studies. *Ural Scientific Research Institute of Geological Prospecting and Economic Mineralogy Transactions* 4, 64 s. [venäjänkielinen]
- Stendal, H. ja Theobald, P.K., 1994. Heavy-mineral concentrates in geochemical exploration. Teoksessa: Hale, M. ja Plant, J.A. (toim.), *Handbook of Exploration Geochemistry* 6, Drainage Geochemistry, 185–225.
- Theobald, P.K. ja Thompson, C.E., 1959. Geochemical prospecting with heavy-mineral concentrates used to locate a tungsten deposit. *US Geological Survey Circular* 411, 13 s.
- Wolf, D. ja Espozo, E., 1972. Zur Geochemie bolivianischer Kassiterite. *Zeitschrift für Angewandte Geologie* 18:459–468.