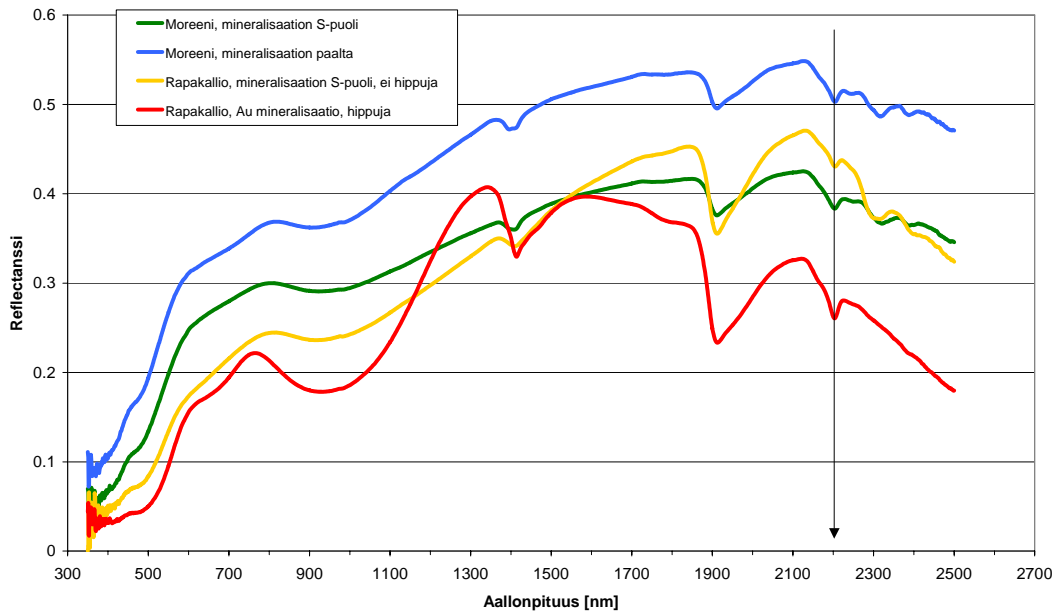


Mineraalien optinen etätunnistus, teemallisia esitutkimuksia

Viljo Kuosmanen ja Jukka Laitinen



Teemat:

- **Kultaesiintymään liittyvät hydrotermisen muuttumisen indikaatiot**
- **Muuttumismineraalien tutkimuksen laajentaminen alueelliseksi**
- **Virtuaalinen kairansydänarkisto**
- **Kaivosta palveleva mineraalien reaaliaikainen etätunnistus**

Mineraalien optinen etätunnistus, teemallisia esitutkimuksia

Viljo Kuosmanen ja Jukka Laitinen
Geologian tutkimuskeskus, Betonimiehenkuja 4, 02150 Espoo, Finland
<http://www.gsf.fi/>

TIIVISTELMÄ

Aiempien tutkimusten perusteella tiedetään, että kohteen reflektanssiin perustuvan optisen etätunnistuksen avulla on mahdollista nopeuttaa ja varmentaa kentällä ja laboratorioissa mineraalien määrittämiä ja laatia automaattisia proseduureja mineralogian ”skannaamiseksi” suuremmista geologisista kohteista. Tämän raportin tarkoituksena on esittää alustava arvio seuraavien teemojen jatkotutkimusten toteutettavuudesta GTK:ssa:

- Mitä Suomen kultaesiintymiin liittyviä hydrotermisen muuttumisen indikaatioita voidaan tutkia ja kartoittaa optisen etätunnistuksen keinoin?
- Mahdollisuus laajentaa mainittu muuttumism mineraalien tutkimus alueelliseksi, esimerkiksi koskemaan moreenigeokemian näytteitä?
- Mikä on virtuaalinen kairansydänarkisto ja mitä hyötyä siitä olisi GTK:ssa?
- Kaivosta palveleva mineraalien reaaliaikainen etätunnistus?

Kutakin teemaa koskien annetaan suositus jatkotoimiksi:

Suositus 1: Valitaan tunnettu kultaesiintymä pilottitutkimuksen kohteeksi. Tutkitaan samanaikaisesti sekä kallionäytteitä ja maaperänäytteitä. Muodostetaan tämän avulla hydrotermisen muuttumisen spektrinen karakteristiikka, jota jatkossa käytetään malminetsinnässä mallina analogisten kohteiden määrittämisessä. Hankitaan software mineraalien reflektanssien systemaattiseen tulkintaan. Analysoidaan osa näytteistä mikroprobella ja FT-IR menetelmällä.

Suositus 2: Aloitetaan GTK:n moreeni- ja petrofysiikan näytteiden muuttumista indikoivien mineraalien reflektanssien/koostumuksen tutkimus pienellä pilottihankkeella.

Suositus 3: HyLogger-tyyppisen virtuaalisen kairansydänarkiston mahdollisuus ja hyöty GTK:lle ja kustannukset selvitetään tarkemmin. Virtuaaliarkisto antaisi tilaisuuden entistä tarkempaan ja monipuolisempaan kairansydänten (myös Outokummun syvän reiän) tutkimukseen, arkiston kopioimiseen, lähettämiseen tai paikasta riippumattomaan käyttämiseen internetin välityksellä riippumatta siitä onko itse kairansydämiä olemassa vaiko ei. Jatkossa kannattaa tarkkaan harkita riittääkö GTK:lle VIS-SWIR aallonpituusalue vai olisiko TIR välttämätön.

Suositus 4: Kaivoksella määritellään ne teemat ja kohteet, joissa mineralogian kuvallisesta reaaliaikaisesta etäkartoittamisesta on hyötyä. Määritetään fysikaalisten olosuhteiden (kosteus, lämpötila, epäpuhtaudet) vaihteluvälit koskien edellä määritettyjä teemoja ja kohteita. Määritetään kaikkien malmi- ja raakkukivien mineraalien VIS-SWIR reflektanssit. Määritetään spektrisesti vähäilmeisten tärkeimpien mineraalien sulkeumat ja TIR spektrit. Edellisistä laaditaan mineraalien tunnistus algoritmi. Tunnistusalgoritmin mukainen tekniikka toteutetaan soveltuvin osin.

Kansikuva: Ruosselän moreeni ja rapakallionäytteiden heijastusspektrejä. Muskoviitin absorptiokohta merkitty nuolella.

Sisällysluettelo

1. Johdanto	4
2. Etätunnistuksen taustatietoja	4
2.1. Soveliaat aallonpituudet/mineraalit	4
2.2. Mineraalien spektriseen käyttäytymiseen vaikuttavia seikkoja.....	5
3. Kultaesiintymään liittyvät hydrotermisen muuttumisen indikaatiot	7
3.1. Härmänkylä	7
3.2. Ruoselkä.....	9
4. Muuttumismineraalien tutkimuksen laajentaminen alueelliseksi	10
5. Virtuaalinen kairansydänarkisto	11
6. Kaivosta palveleva mineraalien reaaliaikainen etätunnistus	14
6.1. Mineraalien etätunnistumahdollisuuksista Kemira Oy:n Siilinjärven kaivoksella.	14
7. Kiitokset	20
8. Kirjallisuutta.....	20

1. JOHDANTO

Malminetsintä, geologinen kartoitus, ympäristötutkimus ja useat teollisuudenhaarat, missä tarvitaan aineiden nopeaa identifiointia, käyttävät nykyisin melko yleisesti aineen reflektanssiin perustuvaa optista etätunnistusta. On huomionarvoista, että hyvinkin erilaiset tutkimusalat voivat käyttää täsmälleen samoja alan menetelmiä. Tällä hetkellä optinen etätunnistus ei kilpaile yksittäisen näytteen tapauksessa perinteisten kemiallisten ja mineralogisten menetelmien tarkkuuden kanssa, mutta eräillä mineralogian sektoreilla se on kuitenkin jo nykyisellään tarkka työväline, kuten jäljempänä selostetaan. Nopeudessa se ylivoimainen muihin verrattuna ja lisäksi se on ala, joka kulkee kohti 'etäkemiaa', eli kohteen pintamateriaalin koostumus ja määrä voidaan mitata tarkasti sen avulla lähitulevaisuudessa.

2. ETÄTUNNISTUKSEN TAUSTATIETOJA

2.1. Sovelliaat aallonpituudet/mineraalit

Mineralogisissa tutkimuksissa, jotka tehdään optisen etätunnistuksen avulla, toimitaan luonnollisesti sellaisilla sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuksilla, joilla tiedetään olevan mineraalien absorptiopiirteitä, eli kyseinen mineraali sitoo itseensä energiaa näillä aallonpituuksilla. Tämä näkyy mineraalin heijastaman $[W/m^2/nm]$ ja vastaanottaman säteilyn $[W/m^2/nm]$ osamäärän, eli reflektanssin minimeinä. Reflektanssi ilmoitetaan ykkösen fraktionana, ja se on määritelmästä johtuen dimensioton suure/nm. Jäljempänä käytetyt termit spektri ja spektrinen viittaavat kohteen reflektanssiin.

Kirjallisuudessa etätunnistuksen käyttämät sähkömagneettisen säteilyn aallonpituudet jaetaan osa-alueisiin (Taulukko 1 ja Taulukko 2). Näiden aallonpituusrajojen käyttö ei ole täysin vakiintunut, johtuen siitä, että jotkut laitevalmistajat haluavat määritellä rajat sensorien herkkyyalueiden mukaan ja toiset taas esimerkiksi atmosfääriin absorptiokohtien tai muiden luonnonilmiöiden mukaisesti. Tässä raportissa käytetään ainoastaan Taulukon 1 mukaisia nimityksiä.

Taulukko 1 Optiseen etätunnistukseen käytetyt sähkömagneettisen säteilyn aallonpituudet ja niiden nimitykset kaukokartoituksen kirjallisuudessa. $SWIR = SWIR1+SWIR2$.

	Aallonpituusväli nm	Lyhenne
Näkyvä l. visuaalinen	400-700	VIS
Lähi-infra	700-1 300	NIR
Lyhytaalto infra 1	1 300-1 900	SWIR1
Lyhytaalto infra 2	1 900-2 500	SWIR2
Keski-infra	2 500-25 000	MIR
Lämpöinfra	5 000-15 000	TIR

Taulukko 2 Laboratoriolaitteiden valmistajan Bruker Opticsin optiseen spektroskopiaan käyttämät sähkömagneettisen säteilyn aallonpituudet ja niiden nimitykset.

	Aallonpituusväli nm	Lyhenne
Näkyvä l. visuaalinen	400-800	Visible light
Lähi-infra	800-2 500	NIR
Keski-infra	2 500-25 000	MIR
Kaukoinfra	25 000-2 000 000	FIR

Mikäli toimitaan ainoastaan aallonpituusalueella 400-2500 nanometriä (VIS-SWIR, kuten GTK:n kaukokartoituksessa vuonna 2004), mineraalien tunnistamisessa käytetään hyväksi absorptiopiikkejä, mutta jos sellaiset ovat hyvin laimeita, tunnistamisessa käytetään reflektanssikäyrän koko muotoa. Jälkimmäisestä aiheutuu tiettyä epävarmuutta tunnistusproseduuriin, ja siksi mineraalit on asetettava tunnistuksen otollisuusjärjestykseen, mikä karkeasti ottaen on VIS-SWIR alueella seuraava:

1. OH-ryhmiä sisältävät mineraalit: kiilteet, savimineraalit, amfibolit
2. Karbonaatit, fosfaatit, sulfaatit
3. Rautaoksidit, REE-mineraalit,
4. Muut oksidit
5. Sulfidit
6. Granaatit, kvartsi, maasälvät, pyrokseenit
7. Muut

Kohtien 4-7 mineraalit ovat vaikeasti erotettavia VIS-SWIR aallonpituusalueella. Nämä mineraalit kuitenkin voivat saada sulkeumista siinä määrin paikallista luonnetta reflektanssiinsa, että ko. puhtaan mineraalin spektrin sijasta voidaan käyttää mineraali+sulkeumat kombinaation reflektanssia (Kuosmanen et al. 2002). Kehittyneet kannettavat spektrometrit (esim. FieldSpecFR) ja hyperspektriset kaukokartoituslaitteet, kuvaavat spektrometrit (esim. HyMap) kattavat VIS-SWIR aallonpituudet, eli mainittu rajoitus koskee näiden käyttöä. Mikäli käytettävissä on ainoastaan VIS-SWIR mittalaitteet, paikallinen spektrikirjasto on välttämätön. Paikallinen spektrikirjasto mahdollistaa parhaiten sen, että mineraalien identifioinnissa voidaan absorptiopiikkien lisäksi käyttää hyväksi myös reflektanssikäyrän yleismuotoa. King et al. (2004) ovat koonneet aiheesta kattavan raportin. Aallonpituusalue VIS-SWIR antaa mahdollisuuden kartoittaa esimerkiksi malmiesiintymiin liittyviä muuttumishuntuja suoraan kentällä.

Jos lämpö-infra alueen spektrometria (TIR, 5 000-15 000 nm) on käytettävissä, myös kvartsi, maasälvät, pyrokseenit ym. voidaan identifioida suoraan, ja siten käytännössä lähes kaikki mineraalit voidaan tunnistaa. Aallonpituuksilla 5 000-15 000 nm toimiva kenttäkelpoinen 'micro-FTIR' – niminen kannettava spektrometri on kaupallisesti saatavissa. Vastaavia kuvaavia spektrometreja on jo olemassa - ainakin koekäytössä. (FTIR = Fourier Transform Infrared)..

Kannettavien spektrometrien mittaussnopeus on luokkaa 1/10 s, joten mittaukset voidaan suorittaa ja tulkita suoraan kentällä. Siksi maailman suurimmat malmiyritykset käyttävät yleisesti esimerkiksi **Pima** ja **FieldSpec** merkkiä kannettavia spektrometreja. Kuvaavien spektrometrien yhden pikselin mittaussnopeus luokkaa 1/100 000 s. Kun aallonpituusalue laajenee kattamaan myös lämpö-infran tuoman lisätarkkuuden, on selvää, että menetelmä on geologeille korvaamaton työväline, joka antaa myös kilpailuetua kovenevilla alan markkinoilla.

2.2. Mineraalien spektriseen käyttäytymiseen vaikuttavia seikkoja

Kationien ja sidosten laatu määrittävät reflektanssin absorptiopiikkien paikat. Siten esimerkiksi mineraalien isomorfisissa seossuhteissa piikkien paikkojen muutokset antavat tietoa kationien suhteellisesta osuudesta mineraalissa.

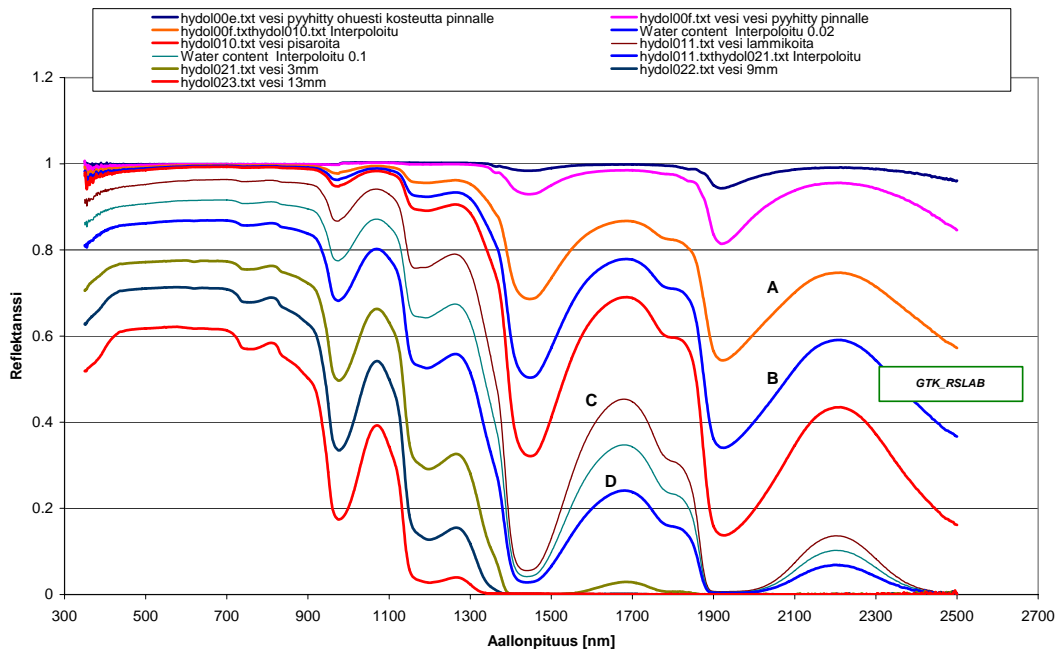
Kiteisyysaste (järjestys – epäjärjestys) vaikuttaa myöskin joidenkin absorptiopiikkien paikkaan ja intensiteettiin. Tätä seikkaa on käytetty hyväksi esimerkiksi arvioitaessa regoliitissa olevan kaoliinin paikallisuutta.

Vesi (vapaa, adsorboitunut ja kidevesi) näyttelee käytännössä hyvin merkittävää osaa mineraalien optisessa etätunnistamisessa. Jo millimetrin paksuinen vapaa vesikerros mineraalin päällä estää SWIR-säteilyn heijastumisen. Sensijaan adsorboitunut vesi voidaan usein laskennallisesti 'kuivattaa' pois

ohessa kuvattujen veden läpäisevyyskäyrien avulla (Kuva 1, Kuosmanen et al. 2001). Rakenteellisesti sitoutunut kidevesi ei häiritse tulkintaa vaan tuo lisää karakteristiikkaa tutkimukseen.

Raekoko vaikuttaa reflektanssiin kääntäen verrannollisesti: kun raekoko pienenee, reflektanssi kasvaa.

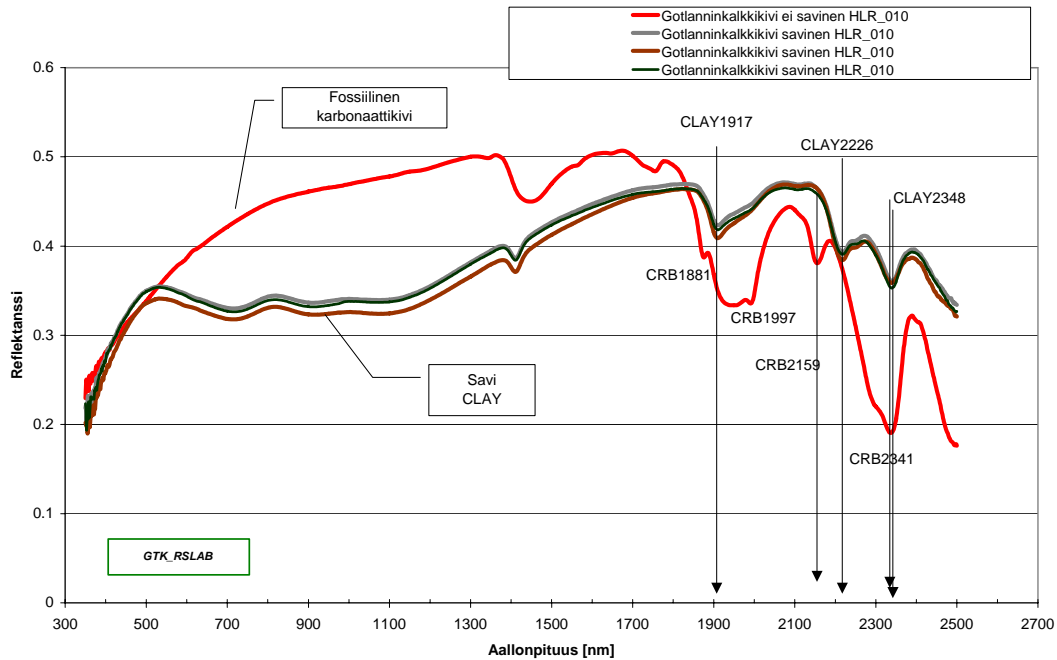
Mineraalien (pintojen) *kiilto tai mattamaisuus, orientaatio ja etäisyys* säteilylähteestä ja sensorista vaikuttavat heijastuksen määrään ja kohteessa olevien eri yksityiskohtien painottumiseen reflektanssissa. Siksi nämä asiat yleensä normalisoidaan ns. BRDF-funktion ja *topografiakorjauksen* avulla. BRDF on funktio, joka ilmaisee kohteen spektrisen variaation eri katselukulmissa. Mikäli kohteen, säteilylähteen ja sensorin etäisyydet ovat suuremmat kuin muutamia metrejä, mittausaineistolle joudutaan tekemään myös *atmosfäärikorjaus*, eli ilmamolekyylien aiheuttama vääristymä korjataan pois.



Kuva 1 Eripaksuisten (0-13 mm) vapaavesikerrosten absorboima säteily standardivalkoisen referenssipinnan heijastuksesta. Käyrät ovat mitattuja, paitsi A-D, jotka on interpoloitu viereisistä. Standardivalkoisella referenssipinnalla on vakio heijastus = 1, aallonpituusvälillä 400-2500 nm.

Mineraaliseoksen spektri on komponenttiensa spektrien painotettu summa. Painot määräytyvät sen mukaan paljonko komponenttimineraalit peittävät kohteen mitatusta pinta-alasta. Eri mineraalien väliset pinta-aktiivisuusominaisuudet aiheuttavat käytettävien painokertoimien epälineaarisuutta, mikä kylläkin voidaan ottaa laskelmissa huomioon. Epälineaarisuus täytyy tutkia tapauskohtaisesti.

Orgaaninen aines ja muut *epäpuhtaudet* aiheuttavat luonnollisesti epätarkkuutta tuloksiin. Jos epäpuhtauksien laatu ja paikka kohteessa voidaan mitata ja kuvata spektrisesti, sen aiheuttama virhe voidaan useimmiten korjata. Esimerkkinä tästä on Partek NordKalkin Suomeen tuoma Gotlannin kalkkikivi. Se sisältää epäpuhtautena savea, mikä voidaan spektrisesti erottaa itse fossiilisesta kalkkikivestä (Kuva 2, Kuosmanen et al. 2002). Karbonaattien ja saven fyysinen erottaminen ei ole toteutettu tällä menetelmällä, mutta suuri spektrinero antaisi tähän hyvän mahdollisuuden.



Kuva 2 Gotlannin kalkkikiven (punainen) ja sitä peittävän saven spektriset karakteristiikat ovat keskenään täysin erilaiset. Voimakkaimmat absorptiokohdat (aallonpituudet) merkitty nuolilla tai pelkillä numeroilla.

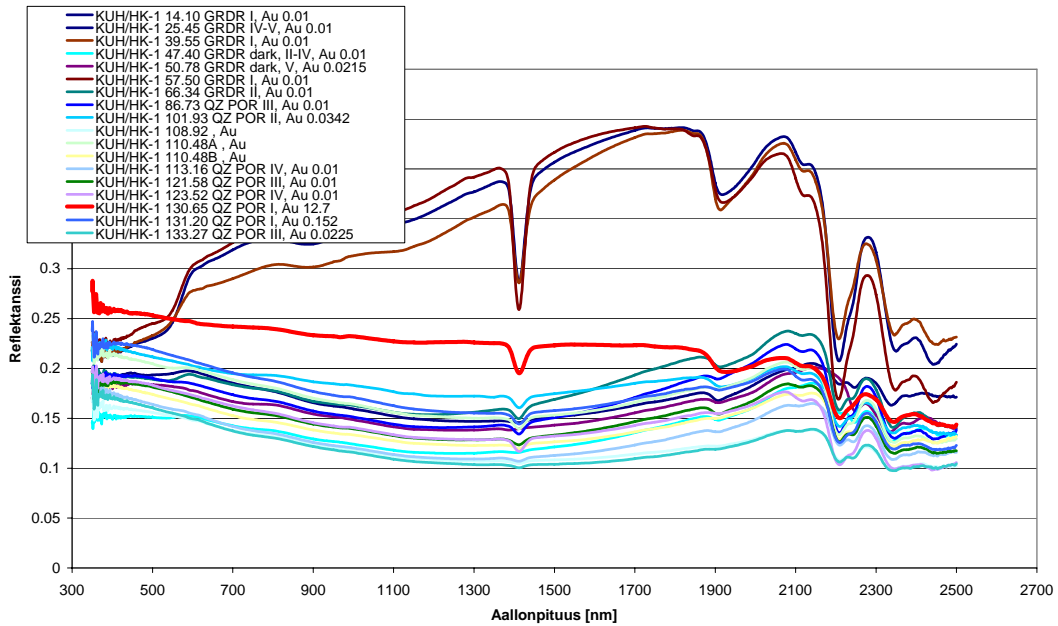
3. KULTAESIINTYMÄÄN LIITTYVÄT HYDROTERMISEN MUUTTUMISEN INDIKAATIOT

Orogeeniin kultamalmeihin liittyvät kemialliset muuttumiset (+K, +Na, +CO₂) ilmenevät tyypillisesti kielteinä (kloriitti, muskoviitti, biotiitti) ja karbonaateina, jotka ovat optisen VIS-SWIR alueen etätunnistuksen kannalta otollisimpia mineraaleja. Lisäksi muuttuminen kultaesiintymien ympärillä ulottuu kymmenistä satoihin metreihin ekonomisten pitoisuuksien ulkopuolelle. Vaikka muuttuminen tiedetään nykyään hyvin, sen tunnistaminen ja määrän arvioiminen makroskooppisesti on kokoneellekin geologille vaikeaa.

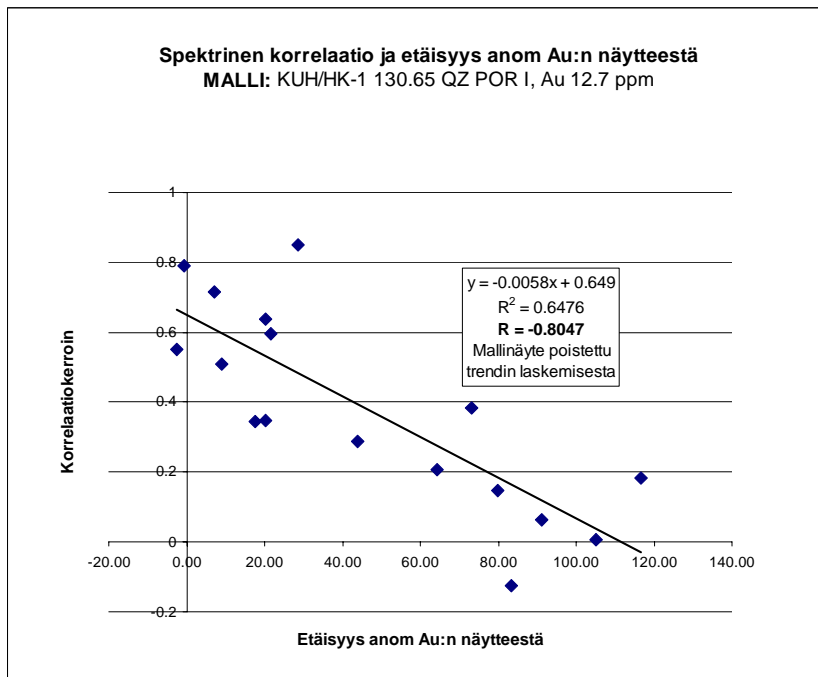
Myös Suomen kultaesiintymien tai kultapotentialisten kohteiden muuttumismineralogian selvittäminen saattaa olla mahdollista optisen etätunnistamisen avulla (vrt. esim. Cudahy 2004). Jotta optista etätunnistusta voidaan käyttää, tutkittavien mineraalien pitoisuudet näytteissä on oltava prosenttien luokkaa. Tällöin kullannetsintään liittyviä pistemäisiä kohteita tai pieniä alueita mitataan käsikäyttöisellä spektrometrillä senttien tai metrien etäisyydeltä. Kohteet voivat olla kivinäytteitä tai moreenia. Menetelmällä pystytään jo VIS-SWIR alueella mittaamaan tämän tehtävän kannalta tärkeitä muuttujia kuten esimerkiksi serisiitin ja phengitiin, biotiitin ja kloriitin absorptioita sekä näiden sisäisiä koostumusvaihteluja. Suomen olosuhteissa tehtävä vaatii kuitenkin kehitystyötä. Thompson et al. (2002) ovat todenneet, että menetelmällä voidaan osoittaa Ruotsissa Kristineberg’in VMS malmin ympärillä oleva kloriitin ja muskoviitin anomaalinen jakauma, joka edustaa hydrotermista muuttumishuntua.

3.1. Härmänkylä

Tässä alustavassa työssä mitattiin 57 kpl Pasi Eilun toimittamia kairansydännäytteitä Polar Mining Oy:n tutkimuskohteelta Härmänkylästä.



Kuva 3 Härmänkylän kultaesiintymään liittyvien kairansydänten reflektansseja. Korkeimman kultapitoisuuden (12,7 ppm) näytteen heijastuskäyrä on pürretty paksulla punaisella viivalla.



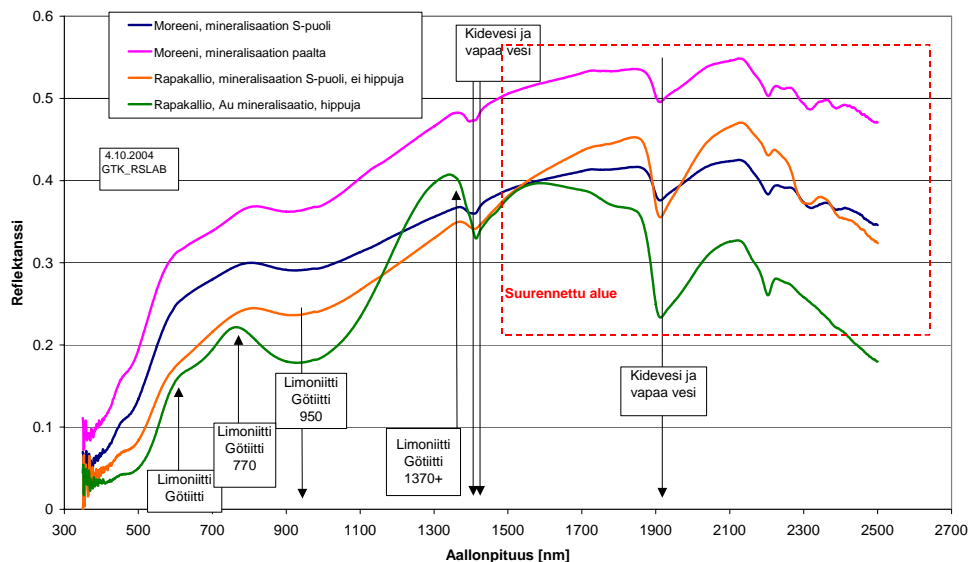
Kuva 4 Härmänkylän kairansydännäytteiden spektrien ja mallinäytteen spektrin korrelaatiot versus syvyysetäisyys (metriä) mallista, jonka spektri on pürretty paksulla punaisella viivalla edelliseen kuvaan. Korrelaatiokertoimien laskennassa on käytetty aallonpituusväliä 400-2500 nm.

Härmänkylän kairanreiän KUH/HK-1 näytteissä on selvä kahtiajakoisuus tummien ja vaaleiden näytteiden/mineraalien välillä, mikä aiheuttaa spektrikäyriin tasoerot (Kuva 3). Molemmissa näyttäisi kuitenkin olevan samantapainen spektrinen muuttumiskarakteristiikka. Muskoviitin absorptioaallonpituus 2200 nm on merkittävä.

Kuva 4:n esittämää spektrien korrelaatiota kairansydämen kulta-anomaalisen osan ja muiden osien välillä voi pitää mielenkiintoisena. Korrelaation selitys voi olla kultamineralisaatioon liittyvän muuttumisen väheneminen etäisyyden funktiona. Koska tämä tutkimus on alustava, kysymys voi olla myös näennäiskorrelaatiosta. Asia vaatii lisätutkimuksia.

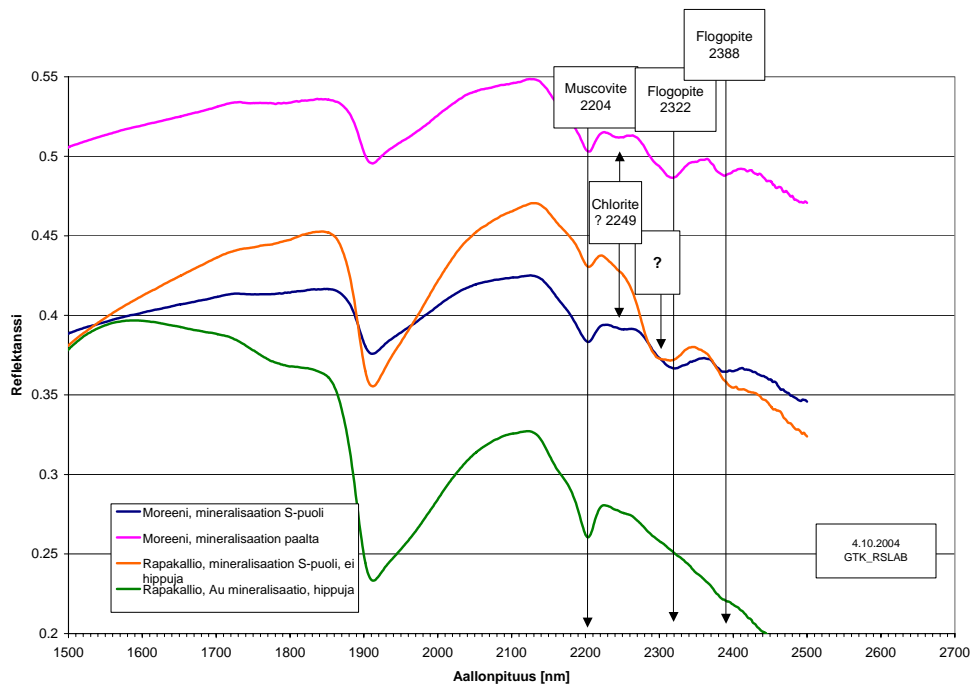
3.2. Ruoselkä

Tässä alustavassa työssä mitattiin spektrejä Juhani Ojalan neljästä moreeni- ja rapakallionäytteestä GTK:n Au malminetsintäkohteesta Sakiatievan Ruoselästä. Näytteiden spektreissä oli havaittavissa Fe-(hydr)oksidien sekä muskoviitin ja flogopiitin absorptiopiirteet (Kuva 5 ja Kuva 6). Näytteistä voidaan tässä vaiheessa todeta vain se, että selkeitä mineralogiasta johtuvia eroja on olemassa. Jatkossa myös moreenin ja rapakallion spektrien tutkimusta helpottaa merkittävästi, jos niiden komponenttimineraalien spektrit voidaan määrittää erikseen. Tällöin on mahdollista seurata (alueellisesti) lähekkäisten näytteiden spektrien eroja, jotka ovat verrannollisia mineralogiin eroavaisuuksiin.



Kuva 5 Ruoselkä, moreeni ja rapakallio, seulottu < 1 mm

Tämän esitutkimuksen ja kirjallisuuden perusteella on ilmeistä, että muuttumisen mineralogian ja intensiteetin arviointi on mahdollista myös optisen etätunnistuksen keinoin. Mikäli ainoastaan VIS-SWIR aallonpituudet ovat käytettävissä, arviointi rajoittuu etupäässä savi-, kiille-, talkin ja karbonaattimineraalien, sekä sulfidien rapautumistulosten tutkimiseen, mutta suotuisassa tapauksessa saattaa tulla kysymykseen myöskin kalimaasälpä, kvartsi, kordieriitti ja granaatit. Mikäli TIR alueen spektrometria on käytettävissä, tilanne on jo lähtökohtaisesti helpompi, eli mineraalit voidaan määrittää lähes aukottomasti.



Kuva 6 Yksityiskohtia edellisestä kuvasta. Muskoviitin absorptiokohta 2204 nm ja flogopiitin 2322 ja 2388 nm.

Suositus 1: Valitaan tunnettu kultaesiintymä pilottitutkimuksen kohteeksi. Tutkitaan samanaikaisesti sekä kalliionäytteitä ja maaperänäytteitä. Muodostetaan tämän avulla hydrotermisen muuttumisen spektrinen karakteristiiikka, jota jatkossa käytetään malminetsinnässä mallina analogisten kohteiden määrittämisessä. Hankitaan software mineraalien reflektanssien systemaattiseen tulkintaan. Analysoidaan osa näytteistä mikroprobella ja FT-IR menetelmällä.

4. MUUTTUMISMINERAALIEN TUTKIMUKSEN LAAJENTAMINEN ALUEELLISEKSI

Kiilteiden koostumus hydrotermisen muuttumisen ja siten myös malmitumisen indikaattorina on selkeästi osoitettu kuten myös se, että VIS-SWIR alueen optista spektrometriaa voidaan käyttää kiilteiden koostumuksen vaihteluiden kartoittamiseen (ks. esim. Cudahy et al. 2001). Mitattujen heijastusspektrien tulkinnessa otetaan huomioon esimerkiksi kullekin kiilteelle tyypilliset, hilasta, muuttumisen aineosista ja sidoksista riippuvaiset absorptiopiikit, joiden aallonpituudet siirtyvät hydrotermisen muuttumisen myötä. Kiilteiden hienorakeisuus tai muiden mineraalien samanaikainen läsnäolo näytteissä ei häiritse tätä tutkimusta. Malminetsinnässä näytteitä tulee tietysti olla riittävä määrä tilastollisen merkitsevyyden esille saamiseksi.

Kiilteiden koostumuksen vaihtelun mittaaminen voidaan tehdä myös perinteisin keinoin, mutta kiilteiden hienorakeisuus tai muiden mineraalien samanaikainen läsnäolo näytteissä hidastaa perinteisten menetelmien käyttöä, koska jokaiselle näytteelle joudutaan tekemään mikroskoopointia, mineraalien separointia ja kemiallinen tai mikroprobeanalyysi. Näytteen kemiallisesta analyysistä voidaan laskea normatiivinen mineraalikoostumus, joka kuitenkin perustuu oletukseen saatavilla olevien standardimineraalien joukkoon (Räisänen et al. 1995, Tarvainen et al. 1996). Kokokiven tai moreenin kiilteiden koostumusvaihtelujen määrittäminen normilaskujen avulla lienee hyvin vaikea tehtävä.

Mikäli näytteitä on paljon, perinteisten menetelmien ajan käyttö ja kustannukset nousevat korkeiksi. Tämä pätee myös kenttäkäyttöiseen XRF analysointiin (esim. X-met), koska se ei erottele kiilteiden ja matrixin alkuainepitoisuuksia ja lisäksi muuttumisen kannalta tärkeät alkuaineet K, Na, Al, Mg, Fe eivät ole sille mahdollisia/helppoja. Toisaalta, mikäli kiilteitä tutkitaan optisen spektrometrian keinoin, näytteiden joukosta kannattaa aina valita pieni otos, joka tutkitaan myös perinteisin keinoin, ja optisen menetelmän tulos tulee siten tarkistetuksi.

Jos pyritään muuttumishuntujen tutkimisen laajentamiseen alueelliseksi, optinen spektrometria kohdistetaan luonnollisesti alueellisesti kattaviin näytemateriaaleihin. GTK:ssa sellaisia ovat moreeni- ja petrofysiikan näytteet, sekä kairansydämet. Näistä joista mitataan joukko yksittäisiä spektrejä. Malmivyyöhykkeiden moreenia ja kallioperän kiilteitä voitaisiin tällä menetelmällä tutkia siten, että vertailukohtana olisi joukko analogisia näytteitä tunnetuista malmiesiintymistä.

Moreenin tutkimus (paleo-hydrotermisen toiminnan indikaattorina) voisi aloittaa pilottitutkimuksilla, jossa mitataan ja tulkitaan yksittäisten näytteiden spektrejä, kohteena esimerkiksi moreenigeokemian näytteet tai jopa metsäautoteiden pientareet. Näytteiden valinta ja esille asettelu tai esikäsittely vie suurimman osan ajasta, itse mittaus käy muutamassa sekunnissa. Moreenissa primääriset mineraalirakeet saattavat olla sekundäärisen saostuman peitossa. Tällöin näytteet joudutaan homogenisoimaan jauhamalla tms. tekniikalla ja se hidastaa tietysti esikäsittelyä. Mikäli esille asetteluun lisäksi muuta esikäsittelyä ei tarvita, yksittäisten näytteiden spektrien mittaussnopeus käsipelillä on noin 100 näytettä päivässä. Alueellisen moreenigeokemian näytteitä on GTK:ssa noin 82000 kpl. Mikäli työ tehtäisiin puhtaasti käsipelillä, aikaa koko näytemäärän mittaamiseen menee noin 820 työpäivää, eli 3,7 htv. Automatisointi nopeuttaa tätä työtä merkittävästi. Mittaustulosten tulkintaan tarvitaan luonnollisesti tietokone ja sopiva tulkintaohjelma, joita on parikin kaupallisesti saatavissa.

Suositus 2: Aloitetaan GTK:n moreeni- ja petrofysiikan näytteiden muuttumista indikoivien mineraalien reflektanssien/koostumuksen tutkimus pienellä pilottihankkeella.

5. VIRTUAALINEN KAIRANSYDÄNARKISTO

Virtuaalinen kairansydänarkisto on helposti käytettävä kairansydänten tutkimustietokanta, joka sisältää niin monipuolisen mittaus- ja kuvausaineiston kohteesta, että sitä voidaan käyttää pitkäjänteisesti itse kairansydänten sijasta esimerkiksi malminetsintään tai kallioperän kehityksen tutkimuksiin. Virtuaalisen kairansydänarkiston hyödyntäminen edellyttää kehittyneitä graafista käyttöliittymää tietokantaan.

GTK:n TEKES-hankkeen HYDO:n kokemusten perusteella tiedetään, että temaattisia kairansydän- ja soijatutkimuksia voidaan nopeuttaa optisen spektrometrian avulla (Kuosmanen et al. 2002). GTK:n kairansydänarkisto sisältää suuren määrän näytteitä, joiden säilyttäminen on parasta aikaa tarkastelun alaisena.

Eräs tapa säilöä tarkat kairansydäntiedot ja taata datan aktiivikäyttö, olisi muodostaa - CSIRO:n mallin mukaan, GTK:een tarpeisiin soveltaen - virtuaalinen kairansydänarkisto: CSIRO:ssa on viime vuosina kehitetty 'HyLogger' niminen laite-ohjelmistokokonaisuus kairansydänten mineralogiseen ym. monipuoliseen tutkimukseen ja tietojen arkistointiin (Kuva 7).

HyLogger soveltuu erityisesti malmiesiintymiin liittyvien muuttumisilmiöiden tutkimiseen (kiilteet, sulfaatit, savimineraalit, karbonaatit, talkki, muut OH-ryhmiä sisältävät silikaatit ym.). Nykyisillä VIS-SWIR sensoreilla se ei tunnista suoraan metallimalmien mineraaleja eikä kvartssia, maasälpä ja pyrokseeneja. Laite mittaa ja tallentaa kairansydämistä heijastusspektrit (400-2500 nm aallonpituusvälillä) 10 mm välein, tiheyden, magneettisen susceptibiliteetin, korkeusvaihtelun

laserprofiloinnilla ja lisäksi se tallentaa kohteesta korkearesoluutioisen digitaalisen valokuvan. Samaan systeemiin voidaan liittää myös muita mittauksia/sensoreita. ATK-ohjelma nimeltä 'The Spectral Geologist' (TSG) tarjoaa geologille nämä tiedot grafiikkana tietokoneen näytöllä ja lisäksi mineraalien/mallien spektrikirjaston sekä tulkintaehdotuksia tarkastelun alla olevasta kairansydämen kohdasta. Koko tämä aineisto ja tulkintatulokset tallentuvat virtuaaliseen kairansydänarkistoon (Kuva 8, katselusuunta: pitkä sivu vaakasuoraan).

Käytännön tulkintanopeus HyLoggerilla on keskimäärin 1000 metriä kairansydäntä päivässä. HyLoggerilla on tulkittu ja tallennettu mm. 12,5 km Mt Isan, 14,0 km Olympic Dam'in sekä 34,0 km muiden malmiesiintymien kairansydämien tietoja. Nykyinen HyLogger laitteisto on kuitenkin vasta prototyyppi, jonka kaupallistaminen on tekeillä. Seuraavan sukupolven vastaava laite HyLogger-II on suunnitteilla. Tämä käyttää mineraalien identifiointiin myös lämpö-infrapunasäteilyä ja -spektrometriä, jolloin mineraalien identifiointi on käytännössä aukoton.

Laitteella on myös pikkuveli 'HyChips', joka mittaa robotiohjauksella spektrejä hieistä ym. pienistä palanäytteistä.

Vastaavalla menetelmällä, mutta pyörivää peiliä spektrien skannaajana käyttäen, on kartoitettu myöskin kaivoksen seinämien mineralogaa (Ramanidou et al. 2003 ja 2004).



Kuva 7 HyLogger ja sen kehittäjä Jon Huntington oikealla. (Ks linkki kirjallisuusviitteissä: HyLogger esittely).

Suositus 3: HyLogger-tyyppisen virtuaalisen kairansydänarkiston mahdollisuus ja hyöty GTK:lle ja kustannukset selvitetään tarkemmin. Virtuaaliarkisto antaisi tilaisuuden entistä tarkempaan ja monipuolisempaan kairansydänten (myös Outokummun syvän reiän) tutkimukseen, arkiston kopioimiseen, lähettämiseen tai paikasta riippumattomaan käyttämiseen internetin välityksellä riippumatta siitä onko itse kairansydämiä olemassa vai ei. Jatkossa kannattaa tarkkaan harkita riittääkö GTK:lle VIS-SWIR aallonpituusalue vai olisiko TIR välttämätön.

6. KAIVOSTA PALVELEVA MINERAALIEN REAALIAIKAINEN ETÄTUNNISTUS

Etäältä tapahtuva reaaliaikainen mineraaliaineksen sensorointi ja tunnistus kaivoksilla saattaa tuottaa tietoa, jonka avulla malmia ja sivukiveä voidaan siirtää aiempaa selektiivisemmin ja prosesseja voidaan säätää entistä tarkemmin. Tämä vaikuttaa rikasteiden määrään ja laatuun sekä jätteiden määrään ja koostumukseen. Kysymykseen tulee ainakin mahdollisuus raakkulaimennuksen vähentämiseen ja malmisyötteen mineralogian reaaliaikaiseen etäkartoitukseen ja sen mukaiseen prosessin säätöön. Mittaukset tehdään tällöin 0,1-100 m etäisyydeltä. Tehtävä vaatii kehitystyötä.

Siilinjärven apatiittikaivoksen mineralogia (Taulukko 3 ja Taulukko 4) on sellainen, että sen tärkeimpien mineraalien erottelu voi tulla kysymykseen jo VIS-SWIR alueen säteilyn avulla. Siksi tämän kaivoksen mineraalit on valittu tähän alustavan tarkastelun kohteeksi. Mikäli lämpöinfra-alueen (TIR) sensoreita on käytettävissä, tunnistus helpottuu, mutta sovellettava tekniikka tulee monimutkaisemmaksi.

Jouko Kallioinen (GTK:n mineraalitekniikan laboratoriosta) toimitti 10 apatiittirikaste- ja 10 rikastushiekkanäytettä Siilinjärven apatiittikaivokselta tätä esitutkimusta varten.

6.1. Mineraalien etätunnistumahdollisuuksista Kemira Oy:n Siilinjärven kaivoksella.

Kokemuksesta tiedetään, että malmimineraalit apatiitti, kalsiitti, dolomiitti, flogopiitti (Taulukko 3) ja richteriitti voidaan erotella optisesti VIS-SWIR-aallonpituuksilla. Magnetiitti, magneettikiisu, kuparikiisu ja rikkikiisu toimivat lähinnä vain reflektanssia alentavina tekijöinä VIS-SWIR-alueella, mutta niiden paikallinen karakteristiikka voi käytännössä sallia tarkemmankin tulkinnan. Tämä asia vaatii lisäselvityksiä.

Taulukko 3 Kemira Oy:n Siilinjärven apatiittikaivoksen malmimineraalit (J. Aaltonen 2004, pers. comm.).

nimi	kemiallinen kaava	määrä %	huom.
Apatiitti	Ca ₅ (PO ₄) ₃ F	10.0	
Karbonaatit:			
Kalsiitti	CaCO ₃	15.0	
Dolomiitti	CaMg(CO ₃) ₂	4.0	
Flogopiitti	K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH,F) ₂	65.0	
Richteriitti	NaKCaMg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	5.0	
Aksessoriset:		1.0	
Zirkoni	ZrSiO ₄		67,2% ZrO ₂
Magnetiitti	Fe ₃ O ₄		
Magneettikiisu	FeS		
Kuparikiisu	CuFeS ₂		
Rikkikiisu	FeS ₂		

Raakkukivien mineraalien (Taulukko 4) tunnistaminen VIS-SWIR säteilyn avulla on sikäli ongelmallista, että plagioklaasi, mikrokliini ja pyrokseenit ovat spektrisesti 'vähäilmeisiä' näillä aallonpituuksilla. Raakkukivien osalta on tutkittava, sisältävätkö sen vähäilmeiset mineraalit paikallisesti homogeenisia sulkeumia siinä määrin, että niitä voitaisiin käyttää tunnistuksessa hyväksi. Muussa tapauksessa näiden kohdalla on käytettävä hyväksi TIR-aallonpituuksia.

Taulukko 4 Kemira Oy:n Sülinjärven kaivoksen raakkukivien mineraalit (J. Aaltonen 2004, pers. comm.).

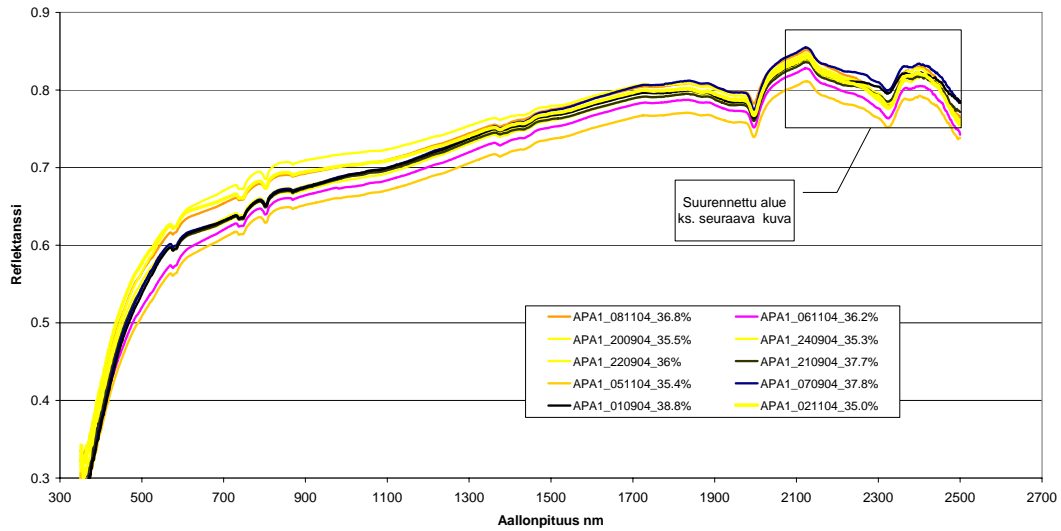
nimi	Kemiallinen kaava	määrä %	huom.
Diabaasi:			
Sarvivälke	(Ca,Na,K)2-3(Mg,Fe2+,Fe3+,Al)5 Si6(Si,Al)2O22(OH)2	50-70	nauhasilikaatti, Fe-rikas (Mg,
Plagioklaasi	NaAlSi3O9	20-40	Albiitti
Biotiitti	K(Mg,Fe)3(Al,Si3O10)(OH)2		verkkosilikaatti
Aksessoriset:			
Titaniitti	CaTiOSiO4		
Epidootti	HCa2(Al,Fe)3Si3O13		jalosilikaatti
Rikkikiisu	FeS2		
Apatiitti	Ca5(PO4)3F		
Kvartsi	SiO2		
Zirkoni	ZrSiO4		67,2% ZrO2
Feniitti:			
Mikrokliini	KAlSi3O8	50	Kalimaasälpä
Amfiboli	NaKCaMg5Si8O22(OH)2	0-30	Richteriitti
Plagioklaasi	NaAlSi3O9	20-30	An(Ca)10-15
Pyrokseeni	Ca(Mg,Fe,Al)(Si,Al)3O6	0-15	Egiriiniaugiitti, ketjusilikaatti,
Aksessoriset:			
Biotiitti	K(Mg,Fe)3(Al,Si3O10)(OH)2		
Karbonaatti	CaCO3		
Apatiitti	Ca5(PO4)3F		
Kvartsi	SiO2		
Titaniitti	CaTiOSiO4		
Zirkoni	ZrSiO4		
Dioriitti:			
Plagioklaasi	NaAlSi3O9		An(Ca)10-15
Sarvivälke	(Ca,Na,K)2-3(Mg,Fe2+,Fe3+,Al)5 Si6(Si,Al)2O22(OH)2		
Aksessoriset:			
Epidootti	HCa2(Al,Fe)3Si3O13		jalosilikaatti
Kvartsi	SiO2		
Titaniitti	CaTiOSiO4		
Biotiitti	K(Mg,Fe)3(Al,Si3O10)(OH)2		
Karbonaatti	CaCO3		
Magneetiitti	Fe3O4		

Taulukko 5 Kemira Oy:n Sülinjärven kaivoksen apatiittirikasteen mineraalien jakauma eri seulafraktioihin (paino-%). Apatiittirikaste tuotettu A-reseptillä. Tyhjät paikat osoittavat, että mineraalin pitoisuus on <0,005%. * = Mineraalien pitoisuutta ei voida laskennallisesti määrittää. (J. Aaltonen 2004, pers. comm.)

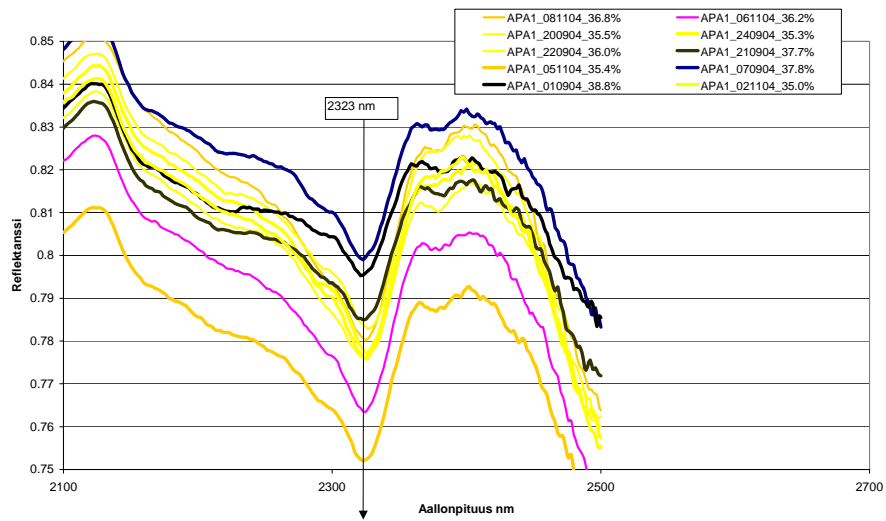
Mineraalit	Seulafraktiot (um)					yhteensä	laskettu
	180	90	45	20	-20		
Apatiitti	18.92	25.57	22.83	12.50	11.41	91.23	90.75
Kalsiitti	0.13	0.95	0.26	0.73	2.48	4.55	4.08
Dolomiitti	0.36	0.37	1.01	0.19	0.27	2.21	2.50
Flogopiitti	0.08	0.12	0.06	0.02	0.35	0.62	1.10
Richteriitti			0.10	0.02	0.13	0.25	1.31
Riebeckiitti		0.10	0.17	0.05	0.07	0.39	*
Sarvivälke			0.06	0.10		0.16	*
Klinopyrokseeni		0.07	0.09	0.07	0.03	0.26	*
Biotiitti						1.06	*
Kvartsi							*
Plagioklaasi							*
Mikrokliini					0.02	0.02	*
Baryytti		0.01	0.02	0.02	0.14	0.17	*
Titaniitti							*
Zirkoni							*
Monatsiitti		0.01			0.02	0.03	*
Pyrokloori							*
Strontianiitti							*
Baddelyiitti							*
Magnetiitti				0.01	0.09	0.11	*
Ilmeniitti							*
Rikkikiisu							*
Magneetikkiisu							*
Kuparikiisu							*
Yhteensä	19.50	27.20	24.60	13.70	15.00	100.10	99.74

Rikasteen apatiittipitoisuus on yli 90 %, mutta se sisältää myös useita harmemineraaleja (Taulukko 5). Pyrittäessä rikasteen tai rikastushiekkojen mineralogian optiseen etätunnistamiseen ensimmäinen kysymys on asetettava seuraavasti: Voidaanko näiden kohteiden VIS-SWIR reflektansseissa nähdä sellaisia eroja, jotka liittyvät niiden mineralogisiin eroihin?

Asiaa selvitettiin alustavasti mittaamalla kymmenen erillisen apatiittirikasteen näytteen reflektanssit (Kuva 9 ja Kuva 10). Erot rikasteiden reflektansseissa ovat paikoin yli 5 % luokkaa ja erot ovat noin 12 kertaiset verrattuna kohinaan. Erot eivät myöskään voi johtua kosteuseroista, koska käyrissä ei ole nähtävissä veden absorptiopiirteitä (vertaa kuvaa 9 kuvaan 1). Siten on todennäköistä, että ne liittyvät mineralogisiin eroihin. Jatkossa näytteet on kuitenkin homogenisoitava paremmin, jotta suljetaan pois rakeiden mineraloginen lajittumismahdollisuus näytettä liikuteltaessa mittaustilanteessa.



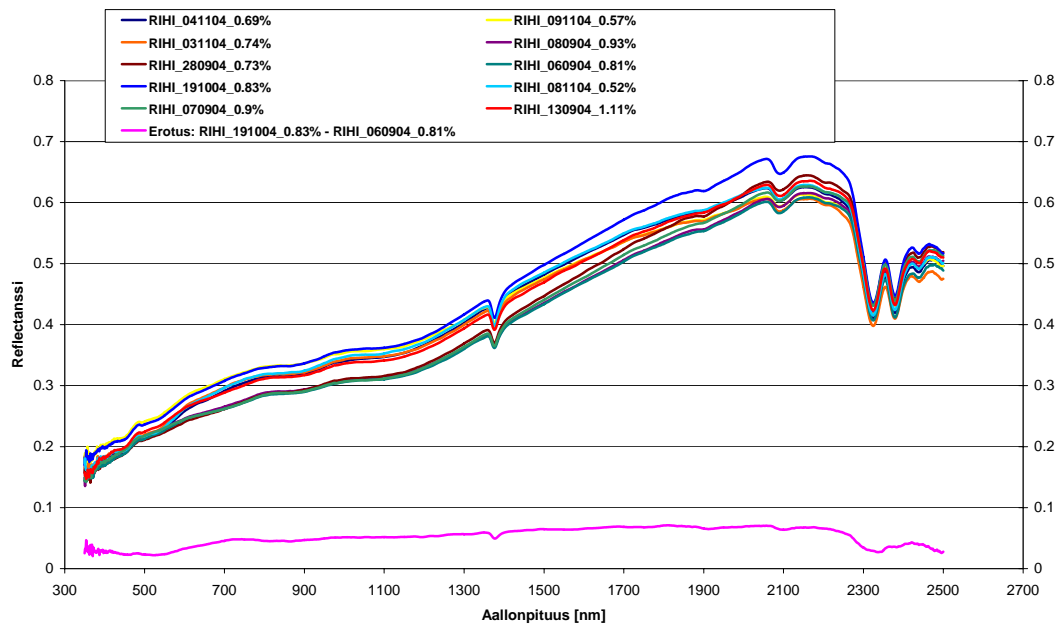
Kuva 9 Siilinjärven apatiitikaivoksen rikastenäytteiden reflektansseissa on yli 5 %:n eroja, joita voitaneen käyttää hyväksi reaaliaikaisessa rikasteen mineralogian tutkimuksessa. Näytteiden P₂O₅ pitoisuudet vaihtelevat välillä 35,0-38,8%.



Kuva 10 Korkean P₂O₅ pitoisuuden rikasteissa reflektanssi SWIR-2 alueella on tässä tapauksessa kohonnut muihin nähden.

Mitattujen rikastushiekkänäytteiden reflektansseissa (Kuva 11) on yli 7 %:n eroja. Nämäkään erot eivät voi johtua mittauskohinasta eivätkä kosteuseroista (vertaa kuvaa 11 kuvaan 1). On siis todennäköistä, että rikastushiekkänäytteiden reflektanssien erot liittyvät mineralogisiin eroihin. Jatkossa myös nämä näytteet on homogenisoitava paremmin, jotta suljetaan pois rakeiden mineraloginen lajittumismahdollisuus itse mittaustilanteessa.

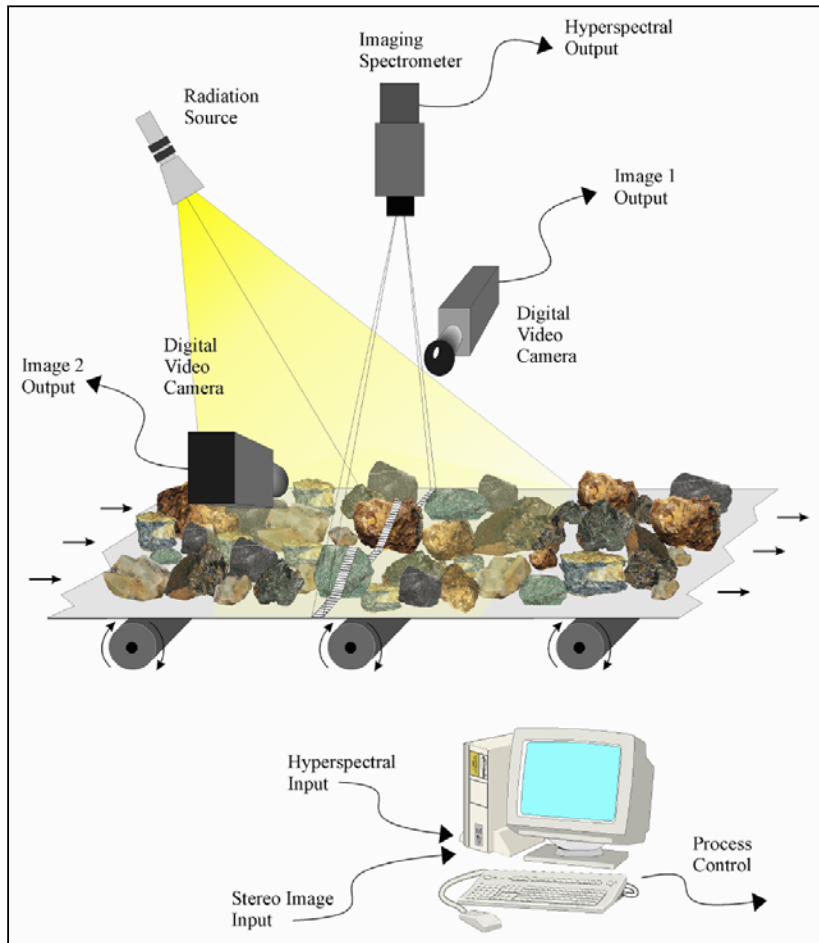
Tämä esitutkimus vahvistaa käsitystä, että VIS-SWIR reflektansseja voidaan käyttää hyväksi reaaliaikaisessa kuivan rikasteen ja rikastushiekan mineralogian tutkimuksessa Siilinjärven apatiittikaivoksella.



Kuva 11 Siilinjärven apatiittikaivoksen rikastushiekkänäytteiden reflektansseja. Näytteiden P₂O₅ pitoisuudet vaihtelevat välillä 0,52-1,11%. Eniten poikkeavien reflektanssien erotuskäyrä alimpana.

Rikasteiden, rikastushiekkojen, sivukivien ja malmisyötteen mineralogian arviointi VIS-SWIR optiikalla edellyttää, että mineraalien seoksissa olevien 'puhtaiden' mineraalien spektrit määritetään erikseen huolellisesti. Tämä edellyttää kenttätöitä ja spektrimäärittämiä kaivoksilla.

Kuivan tai 'vähän kostean' malmisyötteen reaaliaikainen mineralogian etätunnistus voi olla mahdollista tällä menetelmällä. Syötteen reflektanssia täytyy rekisteröidä jatkuvasti ja kuvantavasti, so. pikselijonon spektrien rekisteröimistä keskeytyksettä kulkevan kuljetushihnan poikkisuunnassa. Tarvitaan myös kaksi valvontakameraa tai laserprofilometri jatkuvan stereokuvan ottamista tai korkeusprofiilin muodostamista varten, ja tietysti riittävä VIS-SWIR (ja ehkä TIR) säteilylähde (Kuva 12). Häiriötekijät kuten kosteus, lämpötila ja likaisuus/pölyisyys mitataan myöskin samanaikaisesti.



Kuva 12 Malmisyötteen reaaliaikaiseen mineralogian kartoittamiseen tarvittava laitteisto.

Stereokuvasta laaditaan reaaliajassa ensin korkeusmalli, jolla reflektanssikuvaan tehdään etäisyyskorjaus. Häiriötekijöiden osuus eliminoidaan mittauksista johdetuilla korjaustermeillä. Mineralogia tulkitaan erikoisohjelmilla. Lopputulokseksi saadaan malmisyötteen mineraloginen jakauma syötteen pinnassa. Tämä tieto johdetaan rikastusprosessin ohjaukseen.

Suositus 4: Kaivoksella määritellään ne teemat ja kohteet, joissa mineralogian kuvallisesta reaaliaikaisesta etäkartoittamisesta on hyötyä. Määritetään fysikaalisten olosuhteiden (kosteus, lämpötila, epäpuhtaudet) vaihteluvälit koskien edellä määritettyjä teemoja ja kohteita. Määritetään kaikkien malmi- ja raakkukivien mineraalien VIS-SWIR reflektanssit. Määritetään spektrisesti vähäilmeisten tärkeimpien mineraalien sulkeumat ja TIR spektrit. Edellisistä laaditaan mineraalien tunnistusalgoritmi. Tunnistusalgoritmin mukainen tekniikka toteutetaan soveltuvin osin.

7. KIITOKSET

Prof. Juhani Ojala (GTK, PSY) ja erikoistutkija Pasi Eilu (GTK, ESY) ovat hankkineet kultatutkimuksiin liittyvät näytteet tähän työhön. Lisäksi he ovat lukeneet tämän tekstin ja tehneet siihen arvokkaita korjauksia. Erikoistutkija Jouko Kallioinen (GTK, GP, Mineraalitekniikka) on toimittanut työssä tutkitut Siilinjärven rikaste- ja rikastushiekkanäytteet. Kehityspäällikkö Jarmo Aaltonen (Kemira GrowHow) on toimittanut Siilinjärven kaivoksen mineralogiatiedot tähän työhön. Erikoistutkija Peter Sorjonen-Ward'in (GTK, ISY) kanssa on keskusteltu raportin eräistä ideoista.

8. KIRJALLISUUTTA

Cudahy, T. (2004), Mine Face and Bench Mapping. 12ARSPC Workshop-2 presentation. CSIRO workshop manual.

T.J Cudahy, R. Hewson, J.F. Huntington, M.A. Quigley P.S. Barry T (2004,) The Performance of the Satellite-borne Hyperion Hyperspectral VNIR-SWIR Imaging System for Mineral Mapping at Mount Fitton, South Australia, CSIRO Exploration and Mining Australia, TRW Space and Electronics Group USA.

http://eo1.gsfc.nasa.gov/new/validationReport/Technology/TRW_EO1%20Papers_Presentations/11.pdf

Gingerich J.C. Peshko, M. and Ross, D. (2001), Enhancing the effectiveness and success rate of exploration? Mineral Mapping – A Snapshot. AMIRA 4th Biennial Exploration Managers Conference “Globalization of Exploration R&D”. Noranda Inc.

HyLogger esittely:

http://www.em.csiro.au/em/newsandinformation/earthmatters/archive/documents/earthmatters05_03.pdf

King. P.L., Ramsey, M.S. and Swayze, G.A., editors, (2004), Infrared Spectroscopy in Geochemistry, Exploration Geochemistry and Remote Sensing. Short Course Series Volume 33, Series Editor Raeside, R., Mineralogical Association of Canada. 283 p.

Kuosmanen, Viljo, Laitinen, Jukka, Arkimaa, Hilikka and Kuosmanen, Eira (2002), Hyperspectral characterization of selected remote detection targets for the mines of HYDO partners. Geological Survey of Finland, Archive report RS/2002/2, 55 p.

Morris, R.C. (1980), A Textural and Mineralogical Study of the Relationship of Iron Ore to Banded Iron-Formation in the Hamersley Iron Province of Western Australia. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists 75:184-209.

Ramanaidou, E.R., Morris, R. C. and Horwitz, R.C. (2003),. The Channel Iron Deposits (CID) of the Hamersley Province, Western Australia. Australian Journal of Earth Sciences, 50:669-690.

Ramanaidou, E.R., Connor, P., Wells, M., Yang, K., Whitbourn, L., Cudahy, T. (2004). Multiscale mine imaging for enhanced ore grade definition in mining operations. 12ARSPC Proceedings, pp. 169-175.

Räsänen, Marja Liisa; Tarvainen, Timo; Aatos, Soile (1995). NORMA - a program to calculate a normative mineralogy for glacial tills and rocks from chemical analysis. GFF 117 (4), 215-224.

Tarvainen, Timo, Aatos, Soile, Räisänen, Marja Liisa (1996). A method for determining the normative mineralogy of tills. In: Fuge, R., Billett, M. & Selinus, O. (eds.) Environmental geochemistry : selected papers from the 3rd International Symposium, Kraków, Poland, 12-16 September 1994. Applied Geochemistry 11 (1-2), 117-120.

Thompson, A.J.B., Hannington, M., Deyell, C., Toma, A. and Hauff, P. (2002). Mapping alteration mineralogy with reflectance spectroscopy; Application to northern Sweden. Final Report. PetraScience Consultants Inc. 15. p.