



Oamk Journal

Oulun ammattikorkeakoulun julkaisu

Tämä on alkuperäisen artikkelin rinnakkaistallenne. Rinnakkaistallenne saattaa erota alkuperäisestä sivutukseltaan ja painoasultaan.

This is an electronic reprint of the original article. This version may differ from the original in pagination and typographic detail.

Käytä viittauksessa alkuperäistä lähdettä/Please cite the original version:

Middleton, M., Järveläinen, T., Alakiuttu, T., Kangas, J., Kallio, V., Sankari, T., Kosamo, J. & Käyhkö, V. 2021. Kenttäanalysointireitit ja droneihin perustuvilla mittausmenetelmillä voidaan edistää ylijäämämaiden kiertotaloutta. Oamk Journal 23/2021. <http://urn.fi/urn:isbn:978-951-597-214-9>



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto
Euroopan sosiaalirahasto

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Uudenmaan liitto
Nylands förbund

6Aika

Kenttäanalysointoreihin ja drooneihin perustuvien mittaustekniikoiden soveltuvuus ylijäämämaiden kiertotalouden edistämiseksi

18.6.2021 Middleton Maarit, Järveläinen Titta, Alakiuttu Tapani, Kangas Jere, Kallio Vesa, Sankari Toni, Kosamo Joni, Käyhkö Virpi

Maarakentamisesta syntyy ylijäämämaa-aineksia, joita voitaisiin hyödyntää uusiomateriaalina. Maamassojen tehokas ja järkevä uusiokäyttö vaatii, että maamassojen laatu ja määrä on tarkasti tiedossa. Kiertotalouden näkökulmasta massalle voidaan tällöin löytää sopiva uusiokäyttökohde mahdollisimman nopeasti ilman ylimääräistä logistiikkaa ja ympäristövaikutusta.

Sisällys

[1 Johdanto](#)

[2 Kenttäkäyttöisiä mittalaitteita testattiin pilaantuneiden maiden kunnostuskohteissa](#)

[2.1 PIMA-kohteen kunnostustöissä korostuvat kustannukset, ohjaus ja vaikutukset ympäristöön](#)

[2.2 Ajankäyttöön ja näyttöönottotarkkuuteen liittyvät haasteet](#)

[2.3 Asioita, joihin PIMA-kunnostuskohteiden toteutuksen osalta kannattaa perehtyä jatkossa](#)

[3 Kierrätysmateriaalien käyttömahdollisuudet infrarakentamisessa](#)

[3.1 Kierrätysmateriaalien ympäristökelpoisuus](#)

[3.2 Tekniset laatuominaisuudet](#)

[3.3 Kierrätysmateriaalien infrarakentamisen käytön edellytyksiä](#)

[3.4 Kierrätysmateriaalien mahdollisia käyttökohteita](#)

[4 Hankkeen maastokohteiden ja niissä tehtyjen mittausten esittely](#)

[4.1 Maastotutkimuskohteiden esittely](#)

[5 Spektroskopiaan perustuvat mittalaitteet](#)

[5.1 Hankkeen aikana käytössä oli monipuolinen laitteisto](#)

[5.2 Spektroskopian osaaminen ja laitetekniikka tki-organisaatioissa ja yrityksissä](#)

[6 Spektridatan käsittelytekniikoista pitoisuuksien mallintamisessa](#)

[7 Spektroskopiaan perustuvilla mittalaitteilla toteutetut mittaukset ja niiden tulokset](#)

[7.1 Näytesarjojen ominaisuudet ja spektriirteet](#)

[7.2 Mallinnustulokset](#)

[8 Maamassojen tilavuuksien mittaaminen dronista](#)

[8.1 Maamassakasojen tilavuuksien mittaaminen kuluttajamittaluokan droneilla](#)

[8.2 RTK-paikannusta hyödyntävän dronin käyttö tilavuuslaskennoissa](#)

[8.3 Kaivannon 3D-mallintaminen ja etäisyyksien mittaaminen mallista](#)

[8.4 Oulun ammattikorkeakoulun dronikalusto laajenee ja osaaminen kehittyy](#)

[9 Yhteenveto ja johtopäätökset](#)

1 Johdanto

CircVol-hankkeessa Oulun ammattikorkeakoulu (Oamk) ja Geologian tutkimuslaitos (GTK) selvittivät uusia mittausmenetelmiä ylijäämämaiden kiertotalouden tehostamiseen. Hankkeen aikana Oamkilta saatiin monipuolista osaamista eri osastojen välillä, sillä hanke yhdisti asiantuntijat informaatioteknologian, rakennustekniikan, liiketalouden ja luonnonvara-alan osastoilta. Lisäksi hankkeessa oli vankka yhteistyö GTK:n geoasiantuntijoiden kanssa. Maastokohteiden kanssa yhteistyötä tehtiin Oulun kaupungin ja ympäristöalan yrityskonsulttien kanssa.

Hankkeessa selvitettiin sekä hyperspektritekniikkaan perustuvia menetelmiä haitta-ainepitoisuuksien havaitsemiseen että dronien sovellusmahdollisuuksia maamassojen määrän arviointiin. Spektroskopiaan perustuvia kameroita ja mittalaitteita testattiin sekä maasto- että laboratorio-olosuhteissa. Maastokohteita oli kolme kappaletta, minkä lisäksi kerättiin mittausaineistoa näytesarjoilla, jotka sekoitettiin puhtaaseen maa-ainekseen laboratoriossa. Alustavien tuloksen perusteella menetelmät soveltuvat haitta-ainepitoisuuksien havaitsemiseen maamassoista, spektrimenetelmät tosin tiettyjen reunaehtojen rajoissa.

Aineiston keräämisen lisäksi uusissa menetelmissä korostuu aineiston käsittely. Aineiston mallinnusta pyrittiin hankkeen aikana hahmottamaan ja laatimaan

mallinnustuloksia. Spektridatan käsittelyn kehittämällä pyrittiin maan öljyhiilivetytipoisuuksien kemometriseen mallintamiseen. Etenkin polttoöljyn spektriirteiden tunnistamisen avulla pystyttiin kehittämään haitta-aineiden havaitsemista maaperästä. Spektrimittausten ja kemometrisen mallinnuksen avulla kenttätyöskentely voi nopeutua, mikä vähentäisi muun muassa tilantarvetta ja turvallisuusriskejä kunnostusmaakohteella, kun esimerkiksi maanvaihdon yhteydessä tehtävät kaivannot saataisiin suljettua nopeammin.

Droonien avulla maamassojen tilavuuksien mittaaminen on helpompaa ja nopeampaa. Hankkeen aikana tehtiin tilavuusmäärytyksiä maamassakosoista sekä niin sanotuilla kuluttajamittaluokan drooneilla, että RTK-droonilla. Menetelmät vaikuttivat varsin toimivilta, ja drooneista saatua dataa voidaan jatkokäyttää esimerkiksi 3D-mallinnuksien laatimiseen.

2 Kenttäkäyttöisiä mittalaitteita testattiin pilaantuneiden maiden kunnostuskohteissa

CircVol-hankkeen yhtenä osa-alueena oli testata ja selvittää kenttäkäyttöisten mittalaitteiden käytettävyyttä ja mahdollisuuksia sekä niiden sovellettavuutta pilaantuneiden maiden (PIMA) kunnostuskohteissa. Laitteiden käytettävyyttä selvitettiin PIMA-kohteiden kunnostustöiden ohjauksessa ylijäämämaiden pilaantuneisuusasteen ja siten puhdistustarpeen määrittelyssä sekä kunnostustöiden tavoitteiden ja vaatimuksien todentamisessa riittävän puhdistustason saavuttamiseksi.

Edellä mainittujen tavoitteiden saavuttamiseksi hankkeessa testattiin metallien ja muiden alkuaineiden tutkimisessa röntgenfluoresenssimenetelmään pohjautuvaa kenttäkäyttöistä analysaattoria (XRF-laite). Hiilivetyketjujen määrän ja -laadun tutkimisessa hyödynnettiin uuttomenetelmään perustuvaa testilaitteistoa (PetroFlag). Lisäksi kaivannon kaasupitoisuuksia tutkittiin infrapuna-anturitekniikkaan perustuvalla monikaasumittarilla. Kaivannon kaasupitoisuuksien mittauksella on ensisijaisesti työturvallisuuteen liittyvät tavoitteet, mutta hankkeen kenttätyövaiheessa pyrittiin löytämään myös mahdollisia yhtymäkohtia

kaasupitoisuuden määrän riippuvuudesta kaivannon alueella mahdollisesti oleviin hiilivetypitoisuuksiin.

Öljyhiilivetypitoisuuksien määrän kenttäanalysoitiin testattiin spektrometriaan perustuvia laitteita: kannettavaa lähi-infrapuna-alueen käsikäyttöistä (350–2 500 nm, TerraSpec HALO) ja laboratoriokäyttöistä Fuoriermuunnos-teknoologiaan perustuvaa keski-infrapuna-alueen laitteistoa (2 222–15 385 nm, Spectrum One).

Kenttäkäyttöisten laitteiden avulla tutkittiin kolmea PIMA-kohdetta. Oulun Hietasaaren alueella palaneen tanssilavan maaperän pilaantuneisuuskartoituksen yhteydessä tutkittiin metallipitoisuuksia röntgenfluoresenssimenetelmällä ja kaivantojen kaasupitoisuuksia infrapuna-anturitekniikalla. Rovaniemellä sijaitsevan niin sanotun Shell Erottajan tontin PIMA-kunnostustöiden yhteydessä kerätyistä maa-ainesnäytteistä tutkittiin metallipitoisuudet röntgenfluoresenssimenetelmällä sekä hiilivetypitoisuudet uuttomenetelmällä ja spektroskopian menetelmillä. Oulun Karjasillan Rehulantiellä sijaitsevan tontin PIMA-kunnostuksen yhteydessä kerätyistä maa-ainesnäytteistä tutkittiin niiden hiilivetypitoisuudet uuttomenetelmätestauksien avulla, ja spektroskopian menetelmillä.

Tutkittujen maaperänäytteiden metallipitoisuuksien osalta tutkittavat kohteet olivat melko puhtaat. Erottajan kohteessa tutkittujen metallien pitoisuudet vastasivat maaperän luontaisia pitoisuuksia ja Hietasaaren kohteessa havaittiin elohopean ja kuparin osalta alimman ohjearvon ylittäviä pitoisuuksia muutaman yksittäisen näytteen osalta. Tutkimuskohteilta kerättyjen maanäytteiden metallipitoisuuksista ei ollut käytettävissä kattavaa laboratorioanalyysiin perustuvaa vertailuaineistoa. Hiilivetyketjujen osalta Erottajan ja Rehulantien tutkittavista kohteista saatiin selkeitä kynnysarvon ja ohjearvorajojen ylittäviä tutkimustuloksia hiilivetyjakeiden osalta. Saaduilla tutkimustuloksilla on vertailukäyttömahdollisuuksia kohteesta otettujen laboratoriotutkimustulosten osalta etenkin ns. puhtaiden näytteiden vertailun kautta.

Kaivannon huokoskaasupitoisuuksia mitattiin pelkästään Hietasaaren kohteesta. Kyseisessä kohteessa maaperän haitta-ainepitoisuudet olivat suhteellisen pieniä ja selkeää kaasumittarin reagointia avattujen kaivantojen osalta ei tapahtunut. Kunnostuskohteista saadun vertailudatan suppeuden takia PIMA-

kunnostuskohteissa testattavana olleita kenttäkäyttöisiä mittalaitteita ja niiden toimintaa tarkastellaan tässä raportissa vain yleisellä tasolla. Spektroskopian menetelmillä saadut tulokset esitellään kappaleissa kuusi ja seitsemän.

2.1 PIMA-kohteen kunnostustöissä korostuvat kustannukset, ohjaus ja vaikutukset ympäristöön

PIMA-kunnostuskohteiden yleisiä tavoitteita ovat muun muassa kustannustehokkuus, tarkkuus, nopeus, ympäristöystävällisyys, kohteen kunnostustöiden dokumentointi sekä turvallisuus. Tavoitteiden painoarvot vaihtelevat riippuen kunnostustöihin osallistuvien osapuolten tavoitteista. Maanomistajan, tai sen yrityksen tai yhteisön, jolle puhdistusvelvoitteen täyttäminen kustannusmielessä kuuluu, pääpainoarvona on kustannustehokkuus.

Kunnostettavan kohteen jatkokäyttäjän osalta pääpaino on kunnostustöiden ja koko PIMA-kunnostusprosessin nopeassa etenemisessä. Usein kunnostustöiden nopeaa etenemistä toivovat myös muut kunnostustöiden vaikutuspiirissä olevat tahot kuten asukkaat tai yhteisöt. Viranomaisia sen sijaan kiinnostaa PIMA-kunnostustöiden tarkka dokumentointi sekä varmuus siitä, millaiseen tilaan kunnostettava kohde on jäänyt kunnostustöiden päätyttyä. Ympäristön osalta puolestaan oleellista on, että PIMA-kunnostuksen aikainen ja sen jälkeinen ympäristökuormitus on mahdollisimman pientä.

Kunnostuksen jälkeen kunnostuskohteen tulisi lisäksi saavuttaa mahdollisimman suuri luonnontilaisuus. Toisin sanoen kunnostettava kohde ja sen mahdolliset vaikutukset kunnostuskohteen ulkopuoliseen ympäristöön olisi palautettava mahdollisimman lähelle luonnollista lähtötilannettaan. Turvallisuustason kasvu hyödyttää puolestaan kaikkia osapuolia niin kustannus- kuin ympäristömielessäkin.

Kunnostustöiden kestoajalla on vaikutusta myös turvallisuuteen. Lyhytkestoinen kunnostusvaihe lisää työturvallisuutta esimerkiksi siten, että kaivantaja ei tarvitse pitää avoinna pitkiä aikoja. Tämä ehkäisee kuoppaan kerääntyvät veden aiheuttamia ongelmia ja vähentää lisäpuhdistusta. Samalla erilaisten altistumisten aika ja riskit pienenevät esimerkiksi ilmapäästöjen osalta. Mikäli PIMA-maiden kuljetusmatkat

lyhenevät saavutetaan myös sitä kautta ympäristö-, kustannus-, ja työturvallisuusetua.

Edellä mainittuihin tavoitteisiin pääsemiseksi on tarkasteltava PIMA-kunnostustyöprosessia erityisesti seuraavista näkökannoista:

- Kuinka lyhentää työskentelyaikaa kohteessa?
- Kuinka tehostaa PIMA-maiden pitoisuusanalysointia ja tarkkuutta kohteessa? Analysoinnin avulla ylös nostetut tutkitut maa-ainekset voidaan jakaa tarkemmin eri puhtausluokkiin, kuten käsittelyä tarvitseviin maihin sekä niin sanottuihin ”puhtaisiin” maihin, jotka voidaan hyödyntää kohteessa tai muussa rakentamisessa kunnostuskohteen ulkopuolella.
- Kuinka jakaa käsittelyä tarvitsevat maat mahdollisimman tarkasti pilaantuneisuusasteittain eri maa-aineksien käsittelymenetelmien vaatimukset täyttäväksi?
- Kuinka vähentää maa-aineksien välivarastointitarvetta ja välivarastointiaikaa?
- Kuinka tehostaa näytteenotto- ja tutkimusaikaa sekä pienentää näytteenotto- ja tutkimuskustannuksia?

Kenttäkäyttöiset mittalaitteet vastaavat asetettuihin tavoitteisiin osittain.

Tutkimuskohteissa keskityttiin etenkin metalli- ja hiilivetypitoisuuksien tutkimiseen ja pitoisuuksien määrittämiseen. Laajemmalla kenttätutkimuslaitteistolla tutkimuksia ja pohdintaa olisi voinut laajentaa muun muassa kaivannoissa olevan tai sinne purkautuvan veden ja kaivannon kaasujen kenttätutkimuksiin. Edellä esitettyjä periaatteita voidaan soveltaa osittain myös niihin.

2.2 Ajankäyttöön ja näyttöönottotarkkuuteen liittyvät haasteet

Mikäli tutkimuskohteen maaperän pitoisuustason tutkiminen suoritetaan pelkästään laborioriotutkimuksin, jää tutkittavien näytteiden kappalemäärä kustannus- ja aikataulusyistä usein suhteellisen pieneksi. Pienimmillään kunnostuskohteesta toimitetaan laborioriotutkimuksiin pelkästään niin sanotut puhtaat näytteet, joilla

varmistetaan se, että kunnostettu kohde ja sinne jäävät maa-ainekset ovat riittävän puhtaita kunnostustavoitteen täyttämiseksi. Lisäksi otetaan muutama kokoomanäyte puhdistustarvetta vaativista maa-aineksista.

Kohteesta kaivetut, pääosin pelkästään aistinvaraisesti havainnoidut maa-ainekset, välivarastoidaan ja suojataan odottamaan laboratoriotulosten valmistumista. Laboratoriotulosten valmistumisen jälkeen, yleensä muutaman päivän kohteessa toteutetun välivarastointivaiheen päätteeksi, varastoidut maa-ainekset kuljetetaan puhdistettavaksi. Joissain tapauksissa kunnostuskohteesta jatkokäsiteltäviksi ohjattujen maiden tarkka määrä selviää vasta maiden käsiteltäväksi vastaanottovaiheessa. Kunnostusketjun aikana ei ole riittävän ajoissa riittävän tarkkaa tietoa maaperän laadusta ja määrästä, mikä lisää riskiä ”turhaan” puhdistettavaksi toimitetun maa-aineksen vastaanotolle ja käsittelylle.

Mikäli kunnostuskohteessa olisi käytettävissä laajempi kenttätutkimuslaitteisto, voitaisiin sen avulla saavuttaa useita hyötyjä, kuten:

1. Kunnostettavan kohteen kartoitus voitaisiin tehdä tarkemmin ja nopeammin.
2. Pilaantuneisuusalueen oletetut rajat löydettäisiin lähes reaaliaikaisesti ja kohteen kunnostaminen voitaisiin aloittaa tarkemmin pilaantuneimmasta kohteesta käsin. Tällä toimintamallilla olisi mahdollista vähentää mm. riskiä voimakkaammin pilaantuneen maa-aineksen leviämisestä ja sekoittumisesta puhtaampiin maa-aineksiin. Samoin voimakkaammin pilaantuneen maa-aineksen mahdollinen ympäristöriskiaika kohteessa lyhenisi.
3. Kenttätutkimuslaitteilla saadaan mittaustulos laitekohtaisesti sekunneista kymmeneen minuutteihin -aikaikkunan sisällä. Nopeasti saatava mittaustulos mahdollistaa parhaimmillaan pilaantuneen maa-aineksen lastaamisen suoraan kuorma-auton lavalle, jolloin kentällä tehtävä välivarastointivaihe voidaan välttää kokonaan. Kuorma-auton kuljettaja saa lähtiessään pilaantuneisuustiedon mukaansa, jolloin maa-aineksen vastaanottaja voi vastaanottaa kuorman. Kentältä saatava mittaustulos ohjaa kuorman myös havaitun pitoisuustason mukaan oikeaan

vastaanottopaikkaan. Kun kaivannon (kohteen) reunoista ja pohjalta otettujen näytteiden pitoisuudet on havaittu riittävän puhtaiksi, voidaan kohteen kaivanto sulkea alueelta pois nostetuilla, kenttätestein varmistetuilla, riittävän alhaisen pitoisuustason omaavilla mailla.

Jotta riittävän puhtaustason todentava tarkkuus saavutetaan kenttäkäyttöisillä mittalaitteilla, olisi hyvä kerätä tietoa mittaussaineiston laadusta sisältäen alamääritysrajat, mittaustarkkuuden hajonnasta ja mittaustulosten täsmällisyydestä ja toistettavuudesta. Kenttämittausmenetelmien ei ole tarkoitus korvata laboratoriomittausmenetelmiä, vaan tavoitteena on laboratoriossa analysoitavien näytteiden oton ohjaus ja määrän optimointi. Kunnostettavan alueen puhtaustaso on varmistettava laboratoriotuloksin, mikä osaltaan viivästyttää luvallisia kaivantojen sulkemisia. Kenttämittalaitteilla prosessia pystyttäisiin tulevaisuudessa mahdollisesti nopeuttamaan.

Kenttäkäyttöiset mittalaitteet mahdollistavat niiden nykyisessä kehitysvaiheessa nopeat ja suhteellisen tarkat mittaustulokset. Tämä mahdollistaa tiheämmän ja nopeamman näytteenottotaajuuden laboratoriotesteihin verrattuna. Yhtenä etuna on kunnostuskohteessa ylös nostetun maa-aineksen luokittelun tehostuminen pitoisuustasojen mukaan. Etenkin suurempien kaupunkien alueella rakeisuudeltaan sopivasta, routimattomasta maa-aineksesta on pulaa.

Toisaalta kaupunkien alueilta löytyy rakennuskohteita, joiden maa-aines voi olla raja-arvojen puitteissa jonkin verran pilaantunutta. Tällaisissa kohteissa, kuten esimerkiksi pohjavesialueiden ulkopuolisissa tierakenteissa, teollisuusalueiden täytöissä ja parkkipaikoilla, meluntorjuntarakenteissa, betonin ja asfaltin valmistuksessa, murskaamoissa ja muissa vastaavissa kohteissa, joissa ympäristölupa sen mahdollistaa, voidaan hyödyntää myös matalan pilaantuneisuustason omaavia maita.

Rakentamisen kannalta geoteknisesti heikkotasoisempia maita voidaan hyödyntää myös meluvalleihin ja puistorakenteisiin. Mikäli kunnostuskohteesta ylös nostettu maa-aines on tutkittu riittävän pienen pilaantuneisuustason omaavaksi, voitaisiin maa-aines kuljettaa suoraan seuraavaan käyttökohteeseensa. Tämä vähentäisi edelleen välivarastointitarvetta ja maa-aineksen ylimääräisiä siirtoja kohteesta

toiselle. Samalla tällä menetelmällä vähennetään hieman myös neitseellisten maa-ainesten käyttöä. Maa-aineskauppa ja kunnostustyön toteutus vaativat kuitenkin riittävän tarkkojen massatietojen dokumentoinnin. Painotiedon dokumentointiin ja kaivettujen maa-aineskaivantojen tilavuustietojen selvittämiseen kannattanee tulevaisuudessa hyödyntää esimerkiksi kunnostuskohteessa toteutettavia RTK-droonikuvauksia.

Kunnostustöiden etenemisen nopeutta voidaan kasvattaa kenttäkäyttöisten mittalaitteiden käytön avulla, mikä vaikuttaa myös kunnostuskohteen kone- ja henkilöstökustannuksiin. ”Perinteisessä” kunnostustyön toteutuksessa työmaalla olevalle konekalustolle tulee helposti odottelua useaan otteeseen. Monesti koneiden ja henkilöiden saapuessa paikalle heillä on suuri halu saada näkyvää tulosta. Kaivutyöt aloitetaan nopeasti ja maa-aineksia on saatettu kasata jo tonneittain ilman kunnostustyötä ohjaavaa henkilöä.

Kaikki ylös nostettu maa-aines on kuitenkin tutkittava ja raportoitava. Lisäksi kaivettu maa-aines on läjitettävä välivarastokasoihin, kuormattava käsiteltäväksi toimitusta varten tai palautettava maa-aines kaivantoon. Pienissä kunnostuskohteissa kaivutyön vaiheet saattavat kestää vain tunteja, mutta käyntikertoja on useampia. Tällaisissa tapauksissa koneen siirtoihin ja odotteluun kuluu aikaa, joka lisää kustannuksia sekä päästöjä. Samoin sopivia urakoitsijoita on tällaisille lyhytkestoisille työmaille vaikeampi löytää ja tuntikohtaiset työhinnat nousevat. Lisäksi välivarastokasojen suojaamiseen ja työmaan aitaamiseen ynnä muu työturvallisuuteen liittyvään toimintaan kuluu myös enemmän aikaa ja kustannuksia.

Mikäli kunnostettava kohde pystyttäisiin nopeasti rajaamaan mahdollisimman tarkkaan, kunnostustyö saataisiin ohjattua mahdollisimman reaaliaikaisesti. Mikäli välivarastointiin liittyvät työvaiheet vältetään, voidaan kunnostuskuluissa saavuttaa säästöjä. Lisäksi välttyttäisiin harvan näytteenoton ja analyysitiheyden mukanaan tuomasta riskistä toimittaa pilaantuneisuustasoltaan matalia maa-aineksia turhaan jatkokäsiteltäviksi. Näistä aiheutuu ylimääräisiä kustannuksia maamassojen jatkokäsittelystä ja kuljetuksista sekä ympäristökuormitus lisääntyy.

Hiilivetypitoisuuden kenttäanalyysin hinta PetroFlag-laitteella muodostuu henkilökustannusten lisäksi analyyseissä tarvittavien reagenssiaineiden hinnasta. Niiden suuruusluokka vaihtelee joidenkin kymmenien eurojen luokassa testiä kohden. PetroFlagin hankintahinta on alhainen liikkuen tuhansien eurojen hintaluokassa. Kenttäkäyttöisen röntgenfluoresenssianalysaattorin ja spektrometrien käyttökustannuksista pääosa muodostuu henkilökustannusten lisäksi laitteen huolloista ja kalibroinneista, joiden osuus yhden testin hintaan on testimääristä riippuen kymmenistä senteistä euroihin. XRF-laitteen hankintahinnat liikkuvat kymmenissä tuhansissa euroissa.

Spektrometriaan perustuvien kannettavien kentälaitteiden hinnat ovat samaa luokkaa kuin XRF-laitteiden. Myös niissä muut kulut kertyvät lähinnä laitehuolloista. Kenttäkäyttöisillä mittalaitteilla olisi mahdollista vähentää laboratorioon toimitettavien ja siellä testattavien näytteen määrää, välttää ”turhien” maamassakuormien kuljettaminen jatkokäsittelyyn kalliilla vastaanottohinnalla, muita työ- ja toteutuskustannuksia tarkemmin erittelemättä.

2.3 Asioita, joihin PIMA-kunnostuskohteiden toteutuksen osalta kannattaa perehtyä jatkossa

Kenttäkäyttöisten mittalaitteiden osalta tulisi tutkia niiden mittausaineiston laatua ja soveltuvuutta verrattuna vastaaviin laboratoriotutkimuksiin. Mikäli laatu ja soveltuvuus vaikuttavat riittävästi, tulee viranomaiset saada vakuuttuneiksi kenttäkäyttöisten mittalaitteiden käytön soveltumisesta ensisijaisiksi ja riittäviksi PIMA-maiden analysointilaitteiksi tai riittäviksi ohjaamaan laboratorioon lähetettäviä näytteitä. Tällä tavoin pystyttäisiin mahdollisesti jatkossa välttämään tai vähentämään kunnostettujen maa-alueiden kaivantojen puhtauden varmistamisen tehtävää laboratorioanalytiikkaa.

PIMA-kunnostuskohteiden maa-aineksien jaottelun tarkkuuteen ja niiden painon sekä tilavuuksien mittausmenetelmien kehittämiseen kannattaa panostaa. Esimerkiksi voidaan kehittää kunnostuskohteessa droonivusteisten tai vastaavien RTK-kuvausmenetelmien hyödyntämisestä pinta-alojen määrittämisessä ja työmaan dokumentoinnissa. Näitä seikkoja parantamalla saavutettaisiin tilanne, jossa sopivan ominaisuudet maa-ainekset saataisiin kunnostuskohteista suoraan

hyötykäytettäväksi mahdollisimman tehokkaasti. Lisäksi toimittaja ja vastaanottaja tietävät tarkasti kuinka suurista toimituksista on kyse, jolloin suunnittelu helpottuu.

Tehokkaampaa maa-ainesten hyötykäyttöä etenkin kaupunkimaisissa ympäristöissä saavutettaisiin kunnostuskohteiden dokumentointia parantamalla ja dokumentoinnin tehokkuutta sekä kehittämällä jaettavuutta yhteistyössä maa-ainespörssien tai vastaavien järjestelmien kanssa. Suhtautumista lievästi pilaantuneita maa-aineksia kohtaan tulisi kehittää ja niiden jatkokäytön lupakäytäntöjä muuttaa avoimempaan suuntaan.

3 Kierrätysmateriaalien käyttömahdollisuudet infrarakentamisessa

3.1 Kierrätysmateriaalien ympäristökelpoisuus

Poistettavia jäteperäisiä uusiomateriaaleja voidaan käyttää uudelleen, mikäli ne täyttävät MARA-asetuksessa VNa 843/2017 [1] esitetyt vaatimukset tai jos materiaalin käyttöön on hankittu ympäristölupa. MARA-asetuksen soveltamisesta on laadittu soveltamisohje 7/2019 [2], jossa määritellään tarkemmin asetuksessa mukana olevat materiaalit. Soveltamisohjeessa on annettu haitta-aineiden raja-arvot ja ohjeistettu materiaalien tuottajia toteuttamaan siihen liittyvää jatkuvaa laadunvalvontaa. Asetuksen perusteella kyseisiä materiaaleja voidaan käyttää ilmoitusmenettelyn perusteella ilman varsinaista ympäristölupaa. Ilmoitusmenettelyssä on siirrytty sähköiseen järjestelmään.

MARA-asetus koskee seuraavia materiaaleja:

- betoni- ja kevytbetonimurske sekä kevytsorajätteet
- kivihiiilen, turpeen ja puuperäisen aineksen polton lento- ja pohjatuhkat ja leijupetihiekka
- tiilimurske
- käsitelty jätteenpolton kuona

- asfalttimurske ja -rouhe
- kokonaiset renkaat ja rengasrouhe
- valimohiekat
- kalkit
- rakenteesta poistettu jäte

Muiden materiaalien käyttäminen vaatii edelleen hankekohtaisen ympäristöluvan. Hyödynnettävien materiaalien tulee täyttää PIMA-ohjeavot. Valmisteilla on uusi MASA-asetus 2.0 [3], jossa ohjeistetaan hyödyntämiskelpoisten maa-ainesten uusiokäyttöä.

MASA-asetus tulee koskemaan seuraavia jätteitä:

- pilaantumaton maa-aines
- haitallisia aineita sisältävä maa-aines
- rakennusjätettä sisältävä maa-aines
- stabiloitu maa-ainesjäte ja sedimentti
- käytetty hiekoitushiekka ja raidesepeleli

Asetuksessa tultaneen pitäytymään samoissa haitta-aineiden raja-arvoissa kuin MARA-asetuksessakin. Asetuksessa tullaan ohjeistamaan edellytykset ja vaatimukset asetuksen soveltamiselle. Tarkoituksena on, että tässäkin toimittaisiin ilmoitusmenettelyllä varsinaisen ympäristöluvan asemasta. Luonnos- ja lausuntovaiheineen uuden MASA-asetuksen on arvioitu valmistuvan keväällä 2022.

Uusien ohjeistuksien tavoitteena on lyhentää hallinnollista prosessia ja saada yleistymään entisten jätemateriaalien hyödyntämistä maarakentamisessa. Kaivumassoja voidaan käyttää rakentamiskohteissa, mikäli pitoisuuksien kynnysarvot alittuvat. Hankkeen aikana on tutkittu uusia kenttämittausmenetelmiä, joilla voitaisiin reaaliaikaisesti varmistaa kaivumassojen haitta-ainepitoisuuksia.

Tällä hetkellä kenttäkokeiden tulokset pitää kuitenkin aina varmistaa laboratorioskokeilla.

3.2 Tekniset laatuominaisuudet

Väylävirasto on yksi suurimmista maarakenteiden tilaajatahoista. Virasto julkaisee paljon teknisiä ohjeita, joiden mukaisia ratkaisuja kunnat ja kaupungit usein käyttävät. Väylävirasto on ohjeistanut uusiomateriaaleista määritettävät tärkeimmät tekniset laatuominaisuudet [4] seuraavasti:

- rakeisuus
- routivuus
- vesipitoisuus
- optimivesipitoisuus
- tiivistettävyyys
- vedenläpäisevyys
- leikkauskestävyysskulma (kitkakulma)
- hienonemisherkyys
- jäätymis-sulamiskestävyys (kantava ja jakava kerros)
- kapillaarisuus (suodatinkerros)

Jos uusiomateriaalia on tarkoitus käyttää päällysy- ja kevennysrakenteissa, selvitetään suunnittelua varten lisäksi seuraavat mitoitusparametrit:

- routaturpoama t , (%)
- mitoitusmoduuli E , MPa
- materiaalin vastaavuus eristävyden kannalta, a
- rakenteen vaurioitumisherkyys painumille ja routanousuille

- tilavuuspaino eri kosteustiloissa, kN/m³

3.3 Kierrätysmateriaalien infrarakentamisen käytön edellytyksiä

Kierrätysmateriaalien käytön yksi suurimpia esteitä on se, että niiden olemassaolosta ei välttämättä tiedä juuri kukaan muu kuin itse materiaalin tuottaja. Kierrätysmateriaalien käyttämistä edistäisivät erilaisten alueellisten materiaalipankkien perustaminen. Materiaalipankista tulisi löytää ainakin seuraavia tietoja:

- materiaalin ympäristökelpoisuus ja käytön edellytykset
- materiaalin tekniset laatuominaisuudet
- materiaalin määrä ja saatavuus
- materiaalin sijaintipaikka
- materiaalin toimitusehdot
- miten materiaalin voi ilmoittaa materiaalipankkiin
- mitä kustannuksia materiaalipankki veloittaa materiaalin toimittajalta

Materiaalipörssitoimintaa on ollut jo ainakin pääkaupunkiseudulla. Siellä on yksityinen selainpohjainen ”massapankki”, johon materiaalitoimittaja voi ilmoittaa omia materiaalejaan. Lisäksi Helsingin seudulla on tavoitteena luoda seudullinen rekisteri- ja paikkatietopohjainen tietojärjestelmä eli SeutuMassa pääkaupunkiseudun maamassojen hallintaan. Oulussa tehdyn taustaselvityksen [5] perusteella toimiva materiaalipankki vaatii onnistuakseen koordinoinnista ja organisoimisesta vastaavan operaattorin.

Maarakennuskohteen suunnitteluvaiheessa olisi jo tiedettävä mahdollisten vaihtoehtoisten kierrätysmateriaalien käyttömahdollisuudet, jotta materiaalien mahdolliset erityisominaisuudet voitaisiin jo suunnitteluvaiheessa huomioida. Rakentamisen aikana kynnys kierrätysmateriaalin käyttöönottamiseen voi olla liian suuri, jos siitä aiheutuu isoja aikaa vieviä suunnitelmamuutoksia.

Ympäristökelpoisuuden varmistaminen ei saisi vaatia rakentajalta myöskään sitoutumista pitkäaikaisiin seurantatutkimuksiin.

Kierrätysmateriaalien käytön esteeksi voi myös tulla kerralla käytettävissä olevan materiaalin määrä. Materiaalin tuottaja voi helposti pitää muutaman kymmenen tai sadan tonnin materiaalimäärää merkittävänä eränä, mutta kiinnostaakseen maarakentajia materiaalimäärien pitäisi mieluummin olla tuhansia tonneja. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tarvitaan pysyviä materiaalien välivarastointipaikkoja, joihin voidaan kerätä eri materiaaleja järkevän käytön kannalta riittäviä määriä. Toisaalta välivarastointi aiheuttaa aina myös lisäkustannuksia. Maarakentajaa kiinnostaa kertaluonteisia materiaali-eräitä enemmän sellaiset kierrätysmateriaalit, joita syntyy koko ajan lisää.

Julkisen rakennuttajan oma rakentajaorganisaatio voi omissa rakentamiskohteissaan käyttää myös pienempiä määriä kierrätysmateriaaleja. Julkinen rakennuttaja voi myös helpommin järjestää myös kaikille toimittajille avoimia ylijäämämassojen vastaanottopaikkoja, joihin voidaan toimittaa myös pienempiä materiaalimääriä.

Maarakentamisessa merkittäviä osa kustannuksista ja hiilidioksidipäästöistä aiheutuu maamateriaalien kuljetuksista. Tämän vuoksi kuljetusmatkat saisivat mielellään olla korkeintaan muutamia kymmeniä kilometrejä. Teollisuuden sivutuotteiden kuljetuksista pidemmällä toimitusmatkoilla on käytetty hyväksi tehtaiden meno- tai paluukuljetuksia. Vastaavaa toimintamallia olisi ehkä mahdollista käyttää hyväksi myös kierrätysmateriaalien kohdalla. Kuljetusten järkevä suunnittelu olisi myös materiaalipankin toiminnasta vastaavan operaattorin tehtävä.

Maarakentajan täytyy saada jotain hyötyä maa-ainesten uusiokäytöstä, jotta intressi käyttää kierrätysmateriaaleja luonnonmateriaalien sijasta olisi riittävä. Hyötynä voisi olla se, että rakentaja saisi materiaalin kohteeseen toimitettuna halvemmin kokonaiskustannuksin kuin vastaavan luonnonmateriaalin. Eräiden teollisten sivutuotteiden osalta (esimerkiksi masuunihiekka ja oktohiekkä) tuotteiden laatuominaisuudet ovat luonnonmateriaaleja paremmat ja kustannussäästöt tulevat pienenentyneinä kaivumassoina ja ohuempina rakennekerroksina. Usein

kierrätysmateriaalit ovat laadultaan luonnonmateriaaleja huonompia, jolloin niiden ainoa kilpailuetu on pelkkä toimitushinta.

Liikenneviraston ohjeissa [4] uusiomateriaalien käyttöä koskevassa riskiarviossa huomioidaan muun muassa seuraavat asiat:

- uusiomateriaalin ja sen raaka-aineen sekalaatuisuus ja laatuvaihtelu
- uusiomateriaalin teknisten ominaisuuksien ja rakennettavuuden herkkyyys vesipitoisuuden nousulle
- rakentamisajankohdan lämpötilan vaikutus lujittuvien materiaalien tiivistymiseen ja lujittumiseen
- mahdolliset materiaalin hauraus- tai paisumisominaisuudet
- materiaalin saatavuuden vaihtelut
- varastointitavan ja ajan vaikutus uusiomateriaalien ominaisuuksiin

Kierrätysmateriaalien käyttäminen saattaa tulevaisuudessa motivoida käyttäjiä myös imagosyistä. Kierrätysmateriaaleja käyttämällä säästetään ehtyviä luonnonvaroja ja pienennetään rakentamisesta aiheutuvaa hiilijalanjälkeä. Suomen hallitus on linjannut, että Suomi on hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä, joten myös lainsäädäntö ja politiikka ohjaavat kierrätysmateriaalien käyttöön.

Useimmiten imago ei ole kuitenkaan maarakentajalle riittävä peruste, ellei samalla saavuteta myös muita hyötyjä. Kierrätysmateriaalien käyttäminen ei ainakaan saisi aiheuttaa loppukäyttäjälle lisäkustannuksia. Rakennuttajat voisivat edistää kierrätysmateriaalien käyttämistä, jos heidän laatimissaan tuotevaatimuksissa vaadittaisiin kierrätysmateriaalien käyttämistä. Laatupisteytettyssä urakassa kierrätysmateriaalien käyttäjälle voitaisiin myös antaa laatupisteitä. Väylävirasto on omissa suunnitelmissaan valmistelemassa hankinnan ohjeistusta, jossa otetaan kantaa mahdollisten kannusteiden käyttämiseen uusiomateriaalin käytön edistämiseksi [2].

3.4 Kierrätysmateriaalien mahdollisia käyttökohteita

Kierrätysmateriaalin tekniset maarakennusominaisuudet ratkaisevat sen, mihin tarkoitukseen kierrätysmassaa on mahdollista käyttää. Useimmiten kierrätysmateriaalit täyttävät käsittelemättöminä pengermailta vaadittavat laatuominaisuudet. Tällöin niitä voidaan käyttää pengermaina sekä erilaisissa maisemoinneissa ja meluvalleissa sellaisenaan. Tätä heikkolaatuisempia maamassoja voidaan käyttää meluvalleissa ”kapseloituina” rakenteina, jolloin ne sijoitetaan parempilaatuisten maamassojen väliin. Kuvassa 1 on esitetty tuhkapenkereen rakentamista sillan tulopenkereellä Seinäjoella [6].



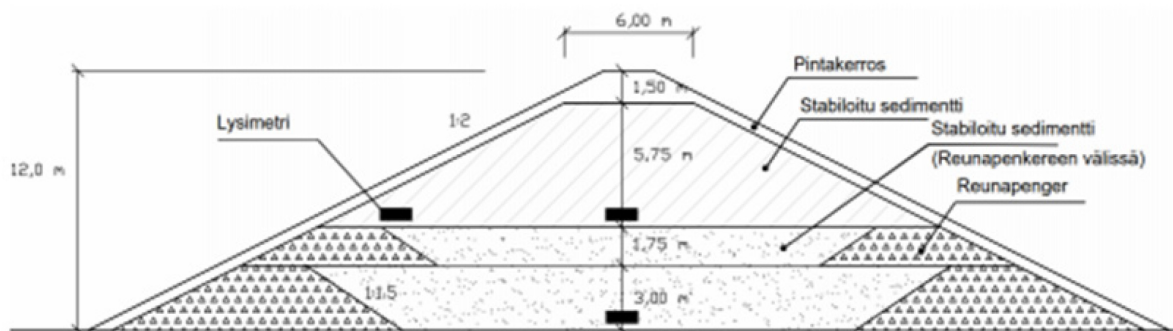
KUVA 1. Tuhkakuljetuksen purku rakenteilla olevaan pengerrakenteeseen vt3/Vt8 [6]

Kierrätysmateriaalien lujittaminen sideaineilla on myös mahdollista. Se voi kuitenkin aiheuttaa käytön estäviä lisäkustannuksia, mikäli kierrätysmateriaalin laatuominaisuudet eivät samalla muutu vastaavia luonnonmateriaaleja paremmiksi.

Kuvassa 2 on esitetty stabiloidusta sedimentistä rakennettu meluvalli, kehä 1 Sepänmäki [3]. Kohteessa on käytetty Helsingin edustalta ruopattuja ja osin pilaantuneita sedimenttejä, jotka on ennen meluvalliin pengertämistä massastabiloitu tuhkasideaineilla. Kuviossa 1 on esitetty saman meluvallin periaatekuva.



KUVA 2. Kehä 1 Sepänmäki. Stabiloidusta sedimentistä rakennettu meluvalli [6]



KUVIO 1. Sepänmäen meluvallin periaatekuva [6, muokattu]

Kierrätysmateriaaleja voidaan käyttää myös maisemoinneissa ja muussa viherrakentamisen infrahankkeissa. Esimerkiksi eritasoliittymien alueilla sijaitseville korkeille penkereille ja penkereiden välialueille voitaisiin läjittää kierrätysmaita, jos se katsotaan maisemallisista syistä tarkoituksenmukaiseksi. Näitä risteysalueiden sisäalueita voitaisiin periaatteessa täyttää myös varsinaisen rakennusajan jälkeen pääurakasta erillisinä urakoina. Tällöin ne voisivat toimia läjitysmaiden vastaanottoalueina.

Kierrätysmateriaaleja voidaan käyttää myös varsinaisissa kerrosrakenteissa, mikäli niiden tekniset laatuominaisuudet ovat riittävät. Kerrosrakenteissa materiaalin tulee täyttää kyseessä olevan kerroksen materiaalin laatuvaatimukset, kuten rakeisuus- ja lujuusvaatimukset. Suomen vuodenaikojen vaihtelut asettavat omat vaatimuksensa kerrosrakenteille. Materiaali ei saa olla routivaa, ja sen tulee olla vedenkestävää ja rapautumatonta (jäätymis-sulamiskestävyys).

Kierrätysmateriaaleja voidaan käyttää materiaalin teknisien ominaisuuksien mukaan esimerkiksi seuraavissa käyttökohteissa:

- tie- ja katurakenteiden kerrosrakenteet
- paikoitusalueiden, urheilualueiden, virkistysalueiden ja puistoalueiden kenttärakenteet
- maisemoinnin täytöt
- satamarakenteet ja rantarakenteet
- meluvallit ja tulvavallit
- kaatopaikkojen suojarakenteet
- kerrosstabilointien tai syvästabilointien sideaineena
- pehmeikköjen esirakentaminen

4 Hankkeen maastokohteiden ja niissä tehtyjen mittausten esittely

CircVol-hankkeessa toteutettiin reilun vuoden aikana tutkimuksia kolmessa eri maastokohteessa. Kohteet olivat toisistaan hyvin erilaisia, ja niissä havaittujen polttoaineiden ja öljyhiilivetyjen määrät vaihtelivat suuresti. Maastokohteiden avulla voitiin pienimuotoisesti testata laitteiston käyttöä itse maasto-olosuhteissa. Lisäksi saatiin monipuolista näkemystä muun muassa kunnostustyön toteutusta edistävistä mittaustarpeista.

Maastokohteiden lisäksi laadittiin polttoöljylle sekoitusnäyte eri polttoöljypitoisuuksista. Tämän niin sanotun standardisuoran tulokset toimivat vertailupohjana maastokohteiden tuloksille. Standardisuora muodostui 19 näytteestä ja se kuvattiin kahdella erispektrometrillä.

4.1 Maastotutkimuskohteiden esittely

Ensimmäiset maastomittaukset tehtiin syyskuussa 2019 Oulun Hietasaarella. Kohteessa oli noin 10 vuotta sitten palaneen tanssilavan kohdalla havaittu

kaavoitukseen liittyvien maaperäselvitysten yhteydessä yhdellä pisteellä PAH-yhdisteitä. Tähän liittyen alueelle tehtiin koekuoppia maaperän puhtauden tarkempaa selvitystä varten Oulun kaupungin ja konsulttina toimineen Pöyryn (nykyinen ARFY Finland Oy) toimesta.

Koekuopista otetuista maanäytteistä tehtiin mittauksia maastossa ja laboratoriossa XRF-laitteella sekä näkyvän valon ja infrapuna-alueen spektrometrillä (TerraSpecHALO) ja kameralla (Senop Rikola-malli). Kohteessa tehtyjä toimenpiteitä on esillä kuvissa 3–5.



KUVAT 3–5. Vasemmalla jakonäytteiden otto, keskellä TerraSpecHALO-mittaukset maastossa ja oikealla Senop-kuvaus maastossa (kuvat: Järveläinen Titta, 2019, hankkeen käytössä olevat kuvat)

Laboratoriotutkimuksia varten otettiin 39 niin sanottua jakonäytettä. Jakonäytteellä tarkoitettiin sitä, että konsultin ottamat näytteet homogenisoitiin sekoittamalla ja näytteestä puolet otettiin hankkeen jatkotutkimuksia varten. Tällä tavoin konsultin teettämät labratulokset ja hankkeessa saadut tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään.

Hietasaaresta kerätyt näytteet mitattiin laboratoriossa luonnonkosteina ja kuivattuina. Näytteet otettiin maastosta aamupäivällä, ja kuvattiin ensimmäisen kerran samana iltapäivänä. TerraSpecHALO:lla yhdestä näytteestä mitattiin neljä spektriä, Senop-kameralla otettiin yksi kuva ja XRF-laitteella tehtiin kolme mittausta yhdestä näytteestä. Lisäksi näytteet punnittiin. Punnituksen jälkeen näytteet siirrettiin kuivumaan uuniin +115 C:n lämpötilaan. Aamulla näytteet punnittiin uudestaan, minkä jälkeen ne kuvattiin ja mitattiin samoilla laitteilla kuin luonnonkosteina.

Seuraavana maastomittauskohde oli heinäkuussa 2020 Erottajalla Rovaniemellä toteutunut St1 Oy:n kohde. Kohteessa sijaitsee lähes 50 vuotta toiminut huoltoasema (kuva 6). Kohteessa oli tehty aiemmin maaperätutkimuksia, joiden yhteydessä oli tullut esille, että maaperässä on haitta-aineena eri öljyhiilivetyjä raja-arvot ylittäviä määriä. Konsulttina kohteessa toimi AFRY Finland Oy, joka vastasi muun muassa kunnostuksen yhteydessä tehtävien pilaantuneiden maa-ainesten öljyhiilivetypitoisuuden määrittämisestä kenttätesteillä (PetroFLAG, PID) sekä laboratorioanalyysien varten otettavien maanäytteiden ottamisesta.

Hankkeen mittauksen vertailuarvoksi saatiin käyttöön sekä kenttätestien että laboratorioanalyysien tulokset. Erottajan kohteesta maastossa käytiin mittaamassa TerraSpecHALO:lla 20 pistettä. Jakonäytteitä kohteesta saatiin 46, jotka mitattiin TerraSpecHALO:lla, FTIR-spektrometrillä ja XRF-laitteella laboratoriossa. Näytteet kerättiin kaasutiiviin pusseihin ja ne säilytettiin kylmiössä (+4 C) muutamasta päivästä 4 viikkoon ennen mittauksia.



KUVA 6. Erottajan kohde (kuvat: Järveläinen Titta, 2019, hankkeen käytössä olevat kuvat)

Kolmantena maastokohteena (kuvat 7–9) oli Oulun Karjasillalla sijaitseva Oulun kaupungin omistuksessa oleva iäkäs Rehulantien asuinkiinteistö, jonka öljysäiliöstä

on päässyt vuotamaan lämmityspolttoaineena käytettyä polttoöljyä maaperään. Öljysäiliö ja osa pilaantuneista maista oli jo kohteelta aiemmin poistettu, mutta maaperän kunnostus oli siirtynyt haasteellisen sijainnin myötä elokuussa 2020 toteutettavaksi.



KUVAT 7–9. Karjasillan maastokohteen havainnollistamista (kuvat: Järveläinen Titta, 2019, hankkeen käytössä olevat kuvat)

Karjasillan kohteella kunnostustyön valvojana ja ohjaajana toimi Geobotnia Oy, joka vastasi kunnostuksen etenemistä ja pilaantuneisuuden (kuva 10) rajaamista ohjaavista kenttämäärityksistä. Lisäksi Geobotnia huolehti tarvittavien laboratorioon analysoitavaksi lähetettävien kontrollinäytteiden ottamisesta. Hankkeen mittausten vertailuarvoiksi saatiin käyttöön laboratorioanalyysien tulokset.

Maastomittauksia tehtiin TerraSpec HALO:lla kaivannon reunamilta yhteensä 25 pisteestä. Jakonäytteitä oli käytössä 26, ja ne otettiin samoista kohdista kuin mistä maastomittaukset TerraSpec HALOlla tehtiin. Nämä maanäytteet jaettiin kahteen näytepussiin, joista toinen toimitettiin tarkkaan laboratorioanalyysiin Eurofinsille, toisesta puoliskosta tehtiin laboratoriossa mittaukset uudestaan TerraSpec HALOlla ja FTIR-spektrometrillä.



KUVA 10. Karjasillan likaantunutta maa-ainesta (kuvat: Järveläinen Titta, 2019, hankkeen käytössä olevat kuvat)

5 Spektroskopiaan perustuvat mittalaitteet

CircVol-hankkeen aikana käytössä oli monipuolisesti spektroskopiaan perustuvia laitteistoja sekä kenttä- että laboratoriomittauksissa. Hankkeen edetessä ja menetelmien selkeytyessä saatiin testaukseen projektisuunnittelussa huomiotta jääneitä laitteistoja. Hankkeen aikana selvitettiin myös tki-organisaatioiden ja yritysten spektroskopian laitteistokantaa ja osaamista Suomessa.

Spektroskopian laitteiden toiminta perustuu valon takaisinheijastukseen, absorptioon ja läpäisevyyteen näytteessä. Näkyvän valon aallonpituusalue on 350–700 nm välillä. Esimerkiksi tavalliset kamerat kuvaavat kohdetta aallonpituuskaistoilla punainen, vihreä ja sininen. Spektrometreillä pystytään kuvaamaan kohdetta useilla, kapeilla aallonpituusalueilla, jotka ulottuvat myös näkyvän valon ulkopuolelle pidemmille niin sanotuille infrapunasäteilyn

aallonpituuksille (700–15 000 nm). Eri materiaalit muodostavat uniikin spektrin, jonka avulla niiden tunnistaminen on mahdollista.

5.1 Hankkeen aikana käytössä oli monipuolinen laitteisto

Malvern-Panalytical:n TerraSpec HALO [7] (kuvat 11–13) on näkyvän valon ja infrapunasäteilyä mittaava VSWIR-spektrometri (Visible to Short Wavelength InfraRed), joka toimii aallonpituusalueella 350–2500 nm. TerraSpec HALO kuuluu GTK:n laitekantaan. Laite on suunniteltu kenttäkäyttöön, mutta soveltuu käytettäväksi myös maastossa.

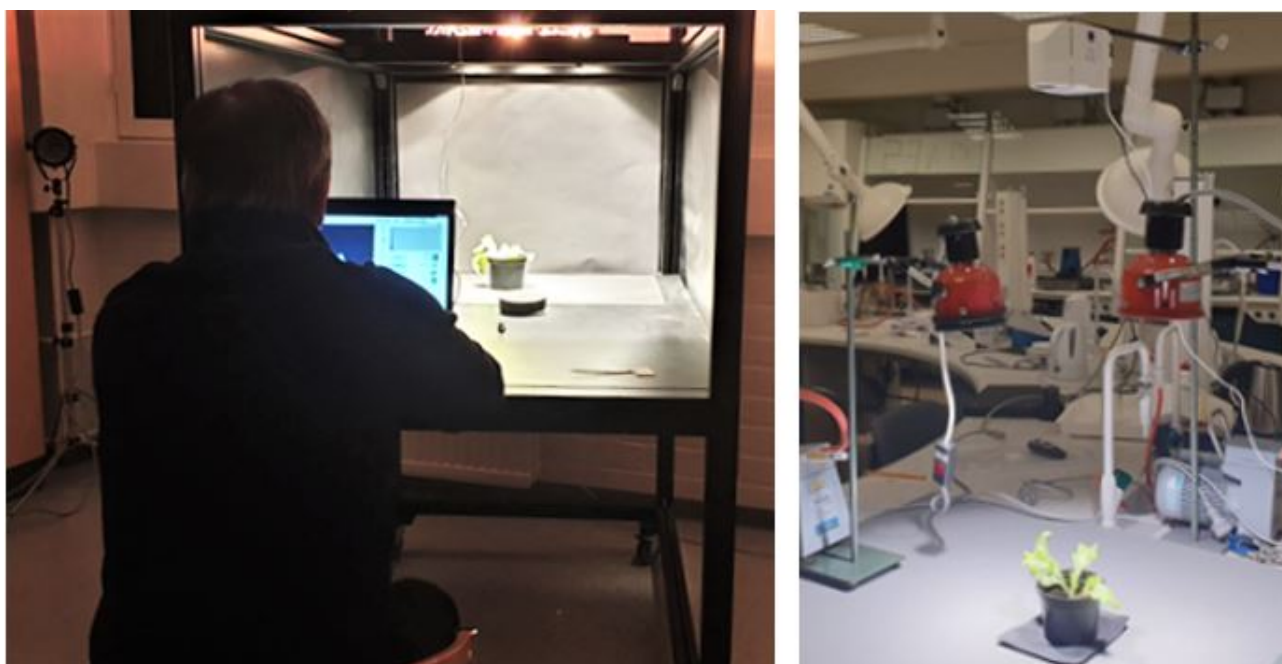


KUVAT 11–13. TerraSpecHALO (kuvat: Järveläinen Titta, 2019, hankkeen käytössä olevat kuvat)

Laitteessa on 80 000 mineraalin sisäänrakennettu kirjasto. Se soveltuu myös pilaantuneiden maiden mittaamiseen, koska se tallentaa mineraalitulkinnan lisäksi koko VSWIR-spektrin riittävän pitkillä aallonpituuksilla. Öljyhiilivetyjen absorptiopiirteet ovat tämän vuoksi havainnoitavissa aineistosta. Koska laitteella pystyy mittaamaan vain pistemäisesti noin yhden senttimetrin alueen kerrallaan, yhdestä näytteestä tehtiin neljä mittausta ja ne keskiarvoistettiin edustamaan näytettä.

Oamkin kalustoon kuuluu Senop:in hyperspektrikamera (kuvat 14–15), joka on alun perin suunniteltu droniin liitettäväksi. Kamera kuvaa aallonpituusalueella 500–900 nm. Hankkeen aikana huomattiin, että tämä aallonpituusalue ei ole riittävä öljyjen tai polttoaineiden kuvaamiseen. Senop:in kameralla suoritettiin kuitenkin jonkin verran kuvauksia niin maastossa kuin labrassa. Koska kamera kuvaa koko kohteen kerralla, voidaan näytteestä ottaa vain yksi kuva. Kuvauksia voidaan tehdä niin, että

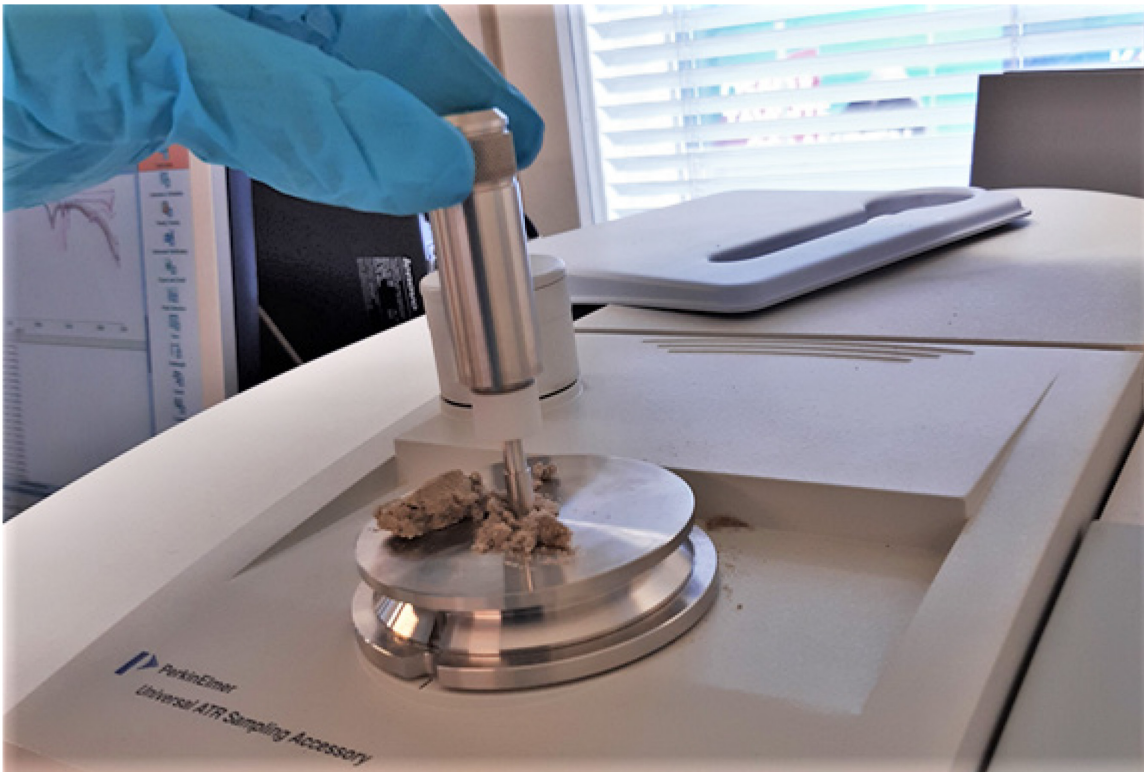
kamera on kiinni kannettavassa tietokoneessa. Tällä tavoin aineistoa voidaan raaka-analysoida välittömästi kuvauksen jälkeen.



KUVAT 14–15. Senop-kameran käyttö laboratorio-olosuhteissa (kuvat: Järveläinen Titta, 2019, hankkeen käytössä olevat kuvat)

Laboratorio-olosuhteissa haasteeksi muodostui kameran käyttö. Koska kamera on suunniteltu dronikäyttöön, sen tarkennusominaisuudet eivät olleet ideaalit laboratorio-olosuhteisiin. Kamera täytyikin asettaa riittävän kauas kuvattavasta kohteesta. Kuvattavan kohteen päälle ei myöskään saanut muodostua varjoa, sillä olosuhteiden olisi hyvä pysyä mahdollisimman samankaltaisena eri kuvauskohteiden ja kertojen välillä. Lopulta laitteelle päädyttiin rakentamaan kolmelta seinältä umpinainen koppi, jonka päällä kamera oli alustalla. Kameran ympärille rakennettiin valaistus niin että voitiin varmistua siitä, että valaistus on samanlainen eri kuvauskerroilla.

Laboratoriolaittaista Oamkilla on käytössä Spectrum One FTIR -spektrometri (Perkin Elmer) (kuva 16). Laite perustuu infrapunaspektroskopiaan ja mittaa aallonpituusalueella 2 222–15 385 nm. Infrapunasäteily aiheuttaa eri molekyyliissä pyörimis- ja värähtelyliikkeitä, jotka aiheuttavat säteilyn absorptiota aineeseen. Spektrometri mittaa valon interferenssikuvion ja muuttaa sen Fourier-muunnoksen avulla spektriiksi. Lopullinen spektri on näytteen spektrin ja taustan spektrin suhde.



KUVA 16. FTIR-spektrometrin näytteen asettaminen (kuvat: Järveläinen Titta, 2019, hankkeen käytössä olevat kuvat)

Sekä maasto- että laboratoriomittauksissa käytettiin Oamkin XRF-laitetta eli röntgenfluoresenssi analysaattoria. Laite tunnistaa 93 eri alkuaineita ja siksi sillä voidaan etsiä luonnon metallipitoisuuksista poikkeavia arvoja. Laite on suunniteltu kenttäkäyttöön eli se on helppokäyttöinen sekä maastossa että laboratoriossa. Laite mittaa pistemäisesti, joten yhdestä näytteestä otettiin vähintään kolme mittausta. Tiiviillä savimailla tulkintasäde ulottuu laitteella noin 2 cm syvyyteen. Huokoisemmissa maalajeissa myös tulkintasäteen syvyyden ulottuvuus kasvaa.

5.2 Spektroskopian osaaminen ja laitetekniikka tki-organisaatioissa ja yrityksissä

Suomessa hyperspektrikameroita ja spektrometrejä löytyy eri organisaatioilta ja koulutuslaitoksilta monipuolisesti. Suomessa on myös laitteistoa kehittäviä ja valmistavia toimijoita. CircVol-hankkeessa tehtiin vuoden 2020 alkupuolella kartoitusta sähköpostikyselyllä. Kartoituksella pyrittiin selvittämään yritysten ja organisaatioiden osaamista ja laitteistoa. Pääpaino kohdistui hyperspektrikamerakantaan.

Osa laitteistosta oli käytössä drooniin kiinnitettävänä, ja osa pelkästään laboratorioolosuhteissa. Useilla organisaatioilla tai yrityksillä oli myös investointisuunnitelmia liittyen hyperspektrikameroihin tai spektrometreihin. Suomesta alkuvuonna 2020 löytyi laitteistoa kahdeksalta eri laitevalmistajalta ja lisäksi käytössä oli organisaatioiden itsensä valmistamia prototyyppkejä. Laitevalmistajista korostui muutama. Suomessa yleisin laitteiston aallonpituusalue on 400–1 000 nm välillä. Laajimmillaan laitteistoilla voidaan kattaa aallonpituusalueet 250–15 385 nm välillä.

Laitteiston investoinnit olivat oppilaitoksissa yleensä sidottuna hankkeisiin tai projekteihin. Spektroskopiaan perustuvia laitteita oli tyypillisesti yhdellä toimijalla vain muutama kappale. Suomesta löytyy kuitenkin myös toimijoita, joilla on useita laitteita, joilla voidaan kattaa hyvin laaja aallonpituusalue.

Monilla toimijoilla oli yksittäisiä laitteita tiettyä tarkoitusta varten. Mukana oli kuitenkin myös toimijoita, joilla on useita laitteita käytettäväksi useassa eri tehtävässä. Kartoituksessa kävi ilmi, että laitteistoa sovellettiin hyvin moniin erilaisiin käyttökohteisiin. Drooniin liitettävien laitteiden kanssa korostui ympäristön monitorointi ja kartoitus sekä metsien kuvantaminen. Sisällä tehdyissä kuvauksissa hajontaa oli enemmän. Teemoja olivat esimerkiksi muovien tai tekstiilien tunnistus ja lajittelu, maan ominaisuuksien tarkastelu ja lääketieteelliset sovellukset.

6 Spektridatan käsittelytekniikoista pitoisuuksien mallintamisessa

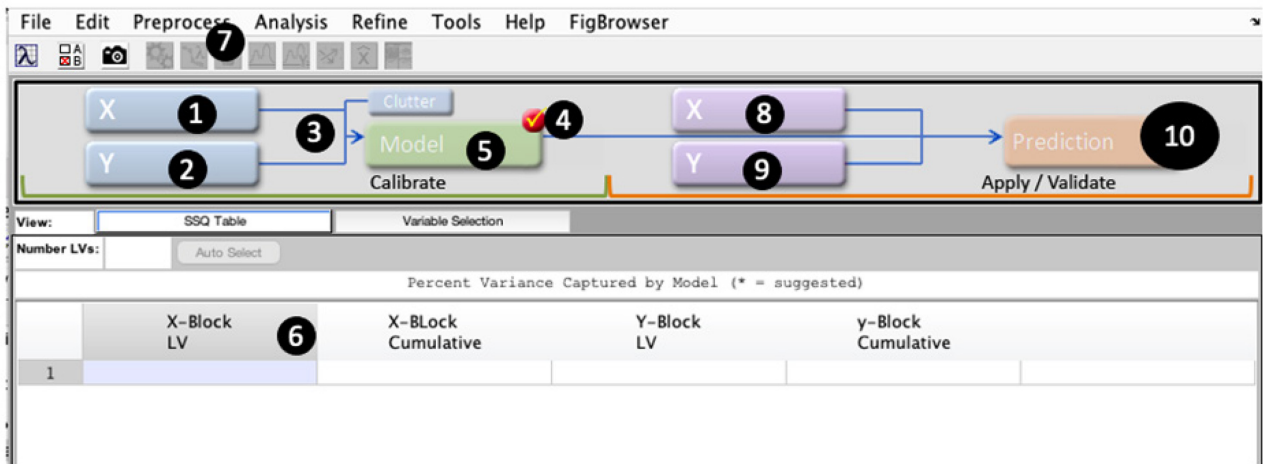
Spektrien analysointi suoritettiin MATLAB-laskentaympäristöön kehitetyllä PLS_Toolbox-ohjelmistopakettilla (julkaisija Eigenvector Research Inc). PLS_Toolbox:ssa on kokoelma perus ja kehittyneitä kemometrisiä menetelmiä. Kemometrialla tarkoitetaan kemian haaraa, joka käyttää hyväkseen tilastollisia ja matemaattisia menetelmiä sekä tietotekniikkaa kemian ongelmien ratkaisemiseen.

Tämän hankkeen puitteissa tavoitteena oli selvittää se, voidaanko maaperänäytteessä olevan öljyhiilivetyjen määrää päätellä niistä mitattujen spektrien perusteella. Mittausmenetelminä käytettiin jo aiemmin kuvattuja VSWIR-mittausta (Visual and Short Wave Infrared) ja FTIR-mittausta (Fourier Transform

Infrared). VSWIR-mittaukset suoritettiin laboratoriossa ja kentällä TerraSpec HALO VSWIR-spektrometrillä sekä FTIR-mittaukset laboratoriossa Spectrum One FTIR-spektrometrillä. Kenttämittauksia tehtiin vain TerraSpec HALO VSWIR-laitteistolla.

PLSR ja SVM PLS on lineaarinen menetelmä ja SVM on epälineaarinen tukivektorikone. Analysoinnin vaiheet (kuvio 2) PLS_Toolbox ohjelmistolla mittausten jälkeen ovat seuraavat:

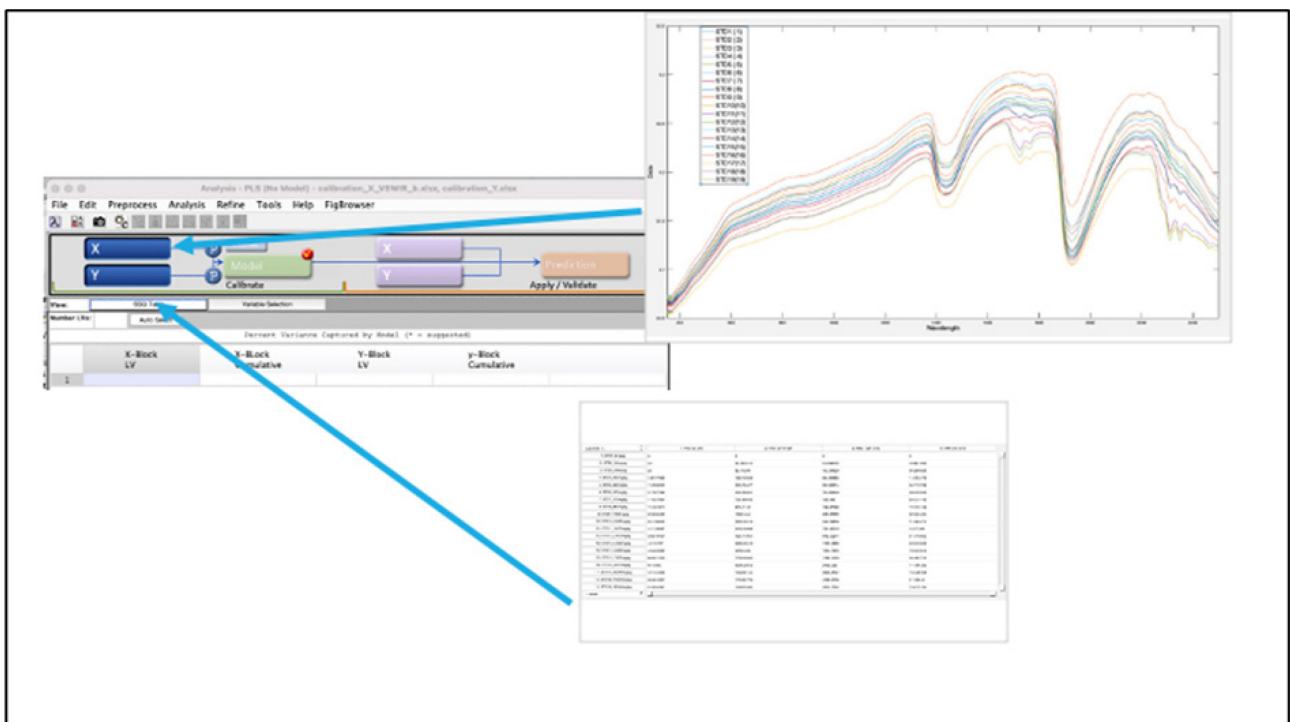
1. Ladataan kalibroinnissa käytettävä spektridata X-Calibrate-lohkoon
2. Ladataan laboratoriotulokset Y-Calibrate-lohkoon
3. Valitaan esiprosessoinnit (Preprocessing)
4. Valitaan ristiinvalidointimenetelmä (Cross Validation)
5. Lasketaan malli
6. Valitaan asteluku LVx eli kuinka monta merkitsevää komponenttia mallissa on
7. Käydään läpi Scores- ja Loadings-kuvaajat sekä korrelaatiot
8. Ladataan kenttänäytteiden spektridata X-Validate-lohkoon
9. Jos kenttädatasta on tehty laboratorioanalyysit niin ne ladataan Y-Validate-lohkoon
10. Käytetään laskettua mallia kenttänäytteistä saatuun spektridataan



KUVIO 2. PLS_Toolbox mallinnuksen vaiheet

PLS_Toolbox työkalulla laskettiin aluksi malli laboratoriossa analysoitujen todellisten öljypitoisuuksien ja VSWIR- ja FTIR-spektrien välille. Määrittäminen perustui 19 näytteeseen, joiden öljypitoisuudet olivat välillä 0–19 000 mg/kg.

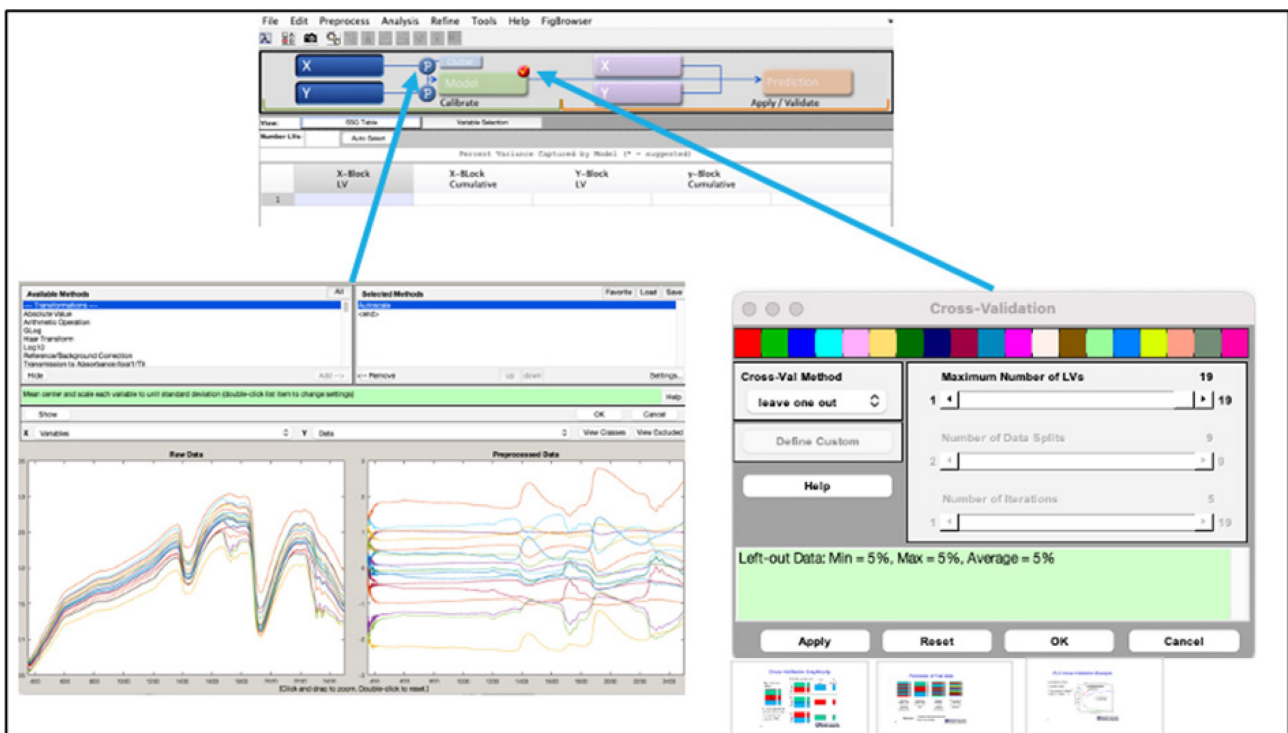
Malli tehdään erikseen VSWIR- ja FTIR-spektreille. Mallin muodostaminen tapahtuu sijoittamalla X-Calibrate-lohkoon analysoitavat spektrit. Tässä tapauksessa 19 näytteestä mitatut joko VSWIR- tai FTIR-spektrit. Y-Calibrate-lohkoon sijoitetaan laboratoriossa 19 näytteestä analysoidut pitoisuudet. (Kuvio 3.)



KUVIO 3. X-Calibrate-lohkoon on sijoitettu lähtötiedot eli 19 VSWIR spektriä ja vastaavat laboratorioanalyysit Y-Calibrate-lohkoon

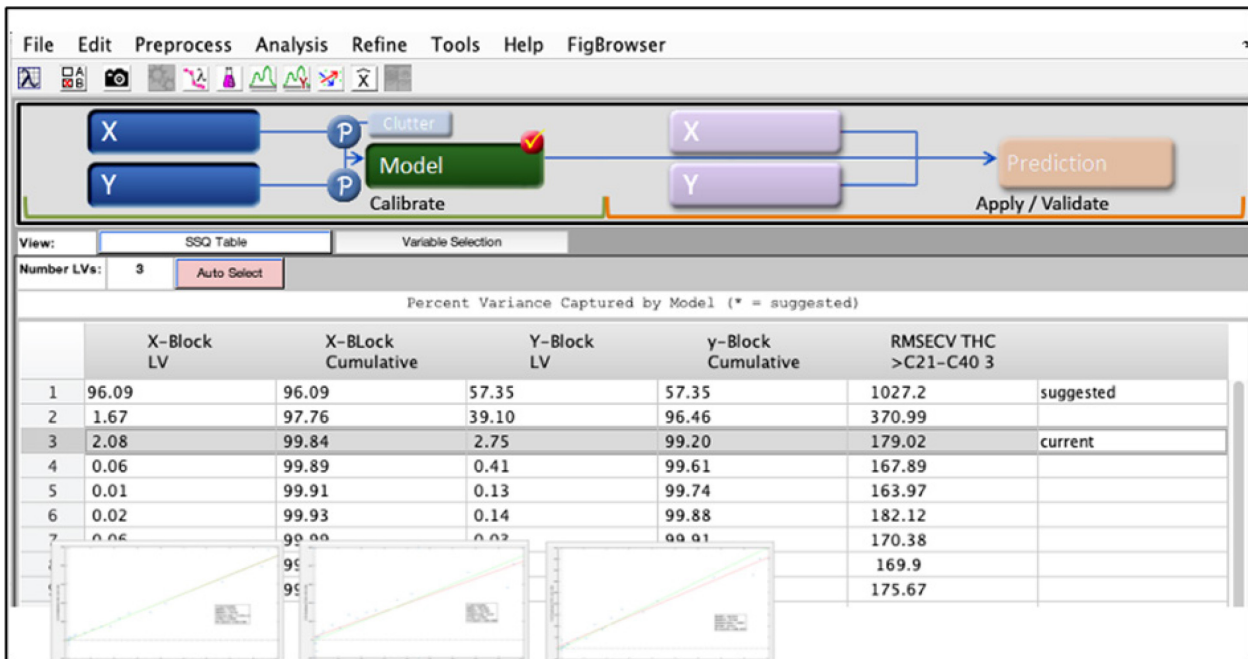
Lähtötietojen lataamisen jälkeen voidaan tehdä erilaisia esikäsittelytoimenpiteitä. Esikäsittelytoimenpiteet annetaan pyöreää P(Preprocessing)-ikonia napsauttamalla. Esikäsittelyyn on laaja valikoima erilaisia funktioita, kuten autoskaalaus, derivointi, ja erilaisia keskiarvoistuksia.

Kuvion 4 tilanteessa esikäsittely on autoskaalaus. Esikäsittelyikkunan vasemmalla puolella näkyy alkuperäinen spektri ja oikealla spektri esikäsittelyn jälkeen. Varsinainen malli perustuu esikäsiteltyyn spektriin. Esikäsittely voidaan tehdä sekä X-Calibrate- että Y-Calibrate-lohkojen aineistolle erikseen.



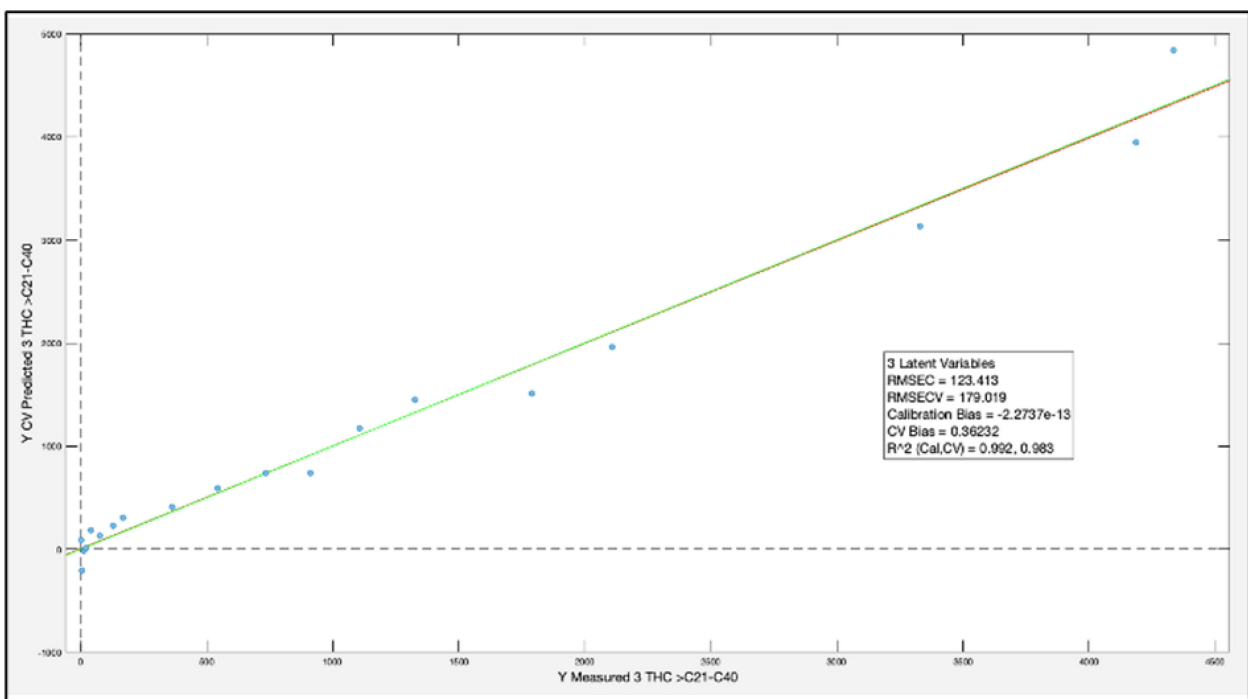
KUVIO 4. Aineiston esikäsittely

Seuraavana vaiheena on mallin laskennassa validointi. Validointimenetelmiä on useita ja tässä tapauksessa käytetään Leave one out -menetelmää. Tämä menetelmä sopii pienille aineistoille eli näytteitä on alle 20. Menetelmä toimii siten, että mallin laskentaan valitaan 18 näytettä ja saatua tulosta validoidaan 19. näytteellä. Eri vaihtoehdot käydään läpi ja niiden antamien virheiden RMSEC (kalibroinnin keskimääräinen neliövirhe) ja RMSECV (ristiinvalidoinnin keskimääräinen neliövirhe) perusteella valitaan paras muuttujien määrä malliin. Kuvio 5 tapauksessa on valittu 3 muuttujaa, joka selittää 99,84 % VSWIR-spektrien vaihtelusta.



KUVIO 5. Laskenta on suoritettu ja malli lasketaan 3 muuttujan avulla

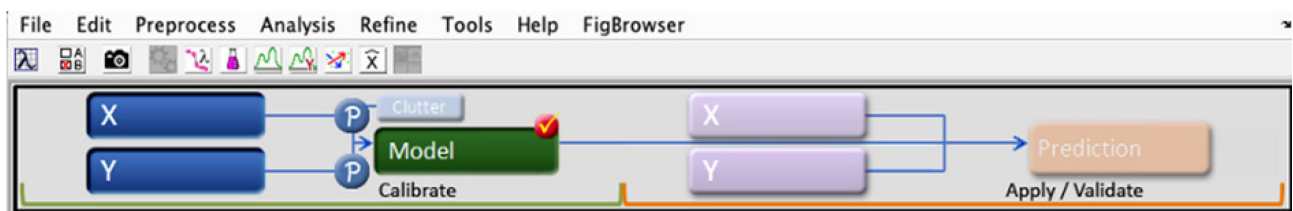
Laboratoriomääritys on tehty eri hiilivetyjakeille eli kevyille hiilivedyille (THC C5-C10), keskitisleille (THC C10-C21), raskaille tisleille (THC C21-C40) ja kokonaispitoisuudelle (TPH C10-C40), missä C tarkoittaa hiiliatomien määrää molekyylissä, THC tarkoittaa Total Hydrocarbons ja TPH Total Petroleum Hydrocarbons. Regressiomallit voidaan luoda erikseen jokaiselle jakeelle. (Kuvio 6.)



KUVIO 6. Regressiokuvaaja laboratoriomäärityksestä THC C21-C40 mallin ennustamaan pitoisuuteen

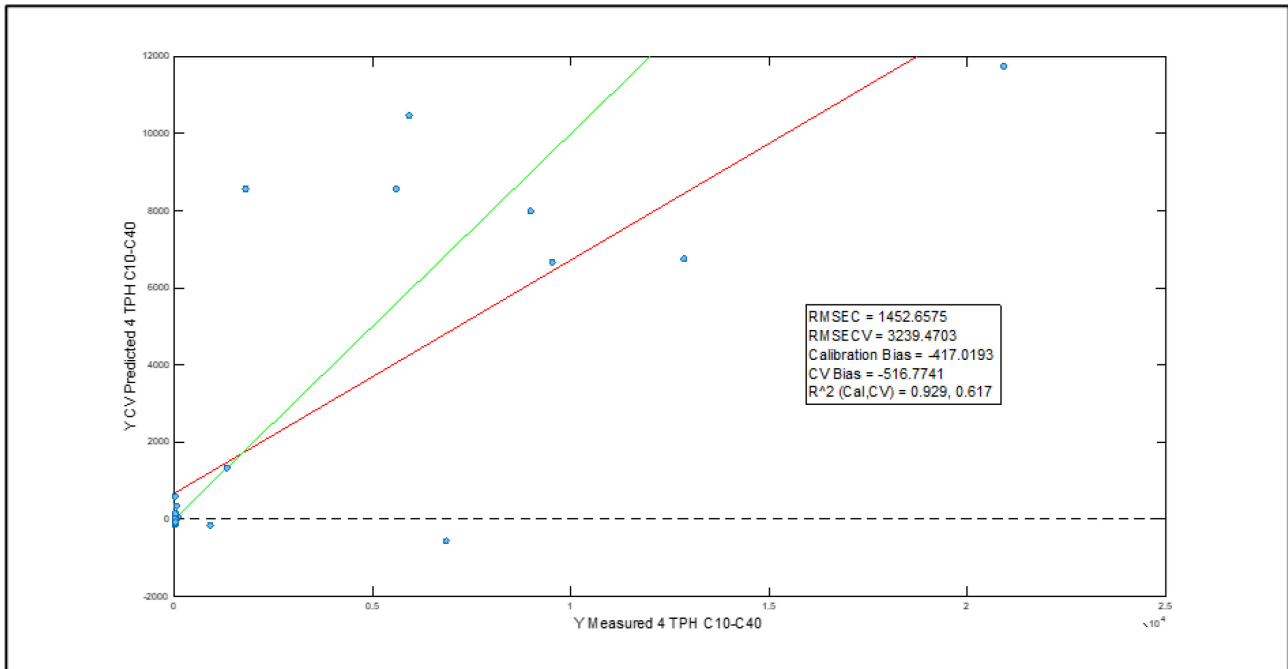
Kuviossa 7 on mallin antama regressiokuvaaja tilanteeseen, jossa on mallinnettu VSWIR-spektriä ja laboratoriossa mitattuja THC C21-C40 arvoja. Vaaka-akselille tulee laboratoriossa analysoitu THC C21-C40, joka tässä tapauksessa on välillä 0–4 300 mg/kg. Pysty-akselilla on mallin ennustama arvo.

Kuvaajasta olevasta infotaulusta nähdään, että malli käyttää 3 muuttujaa ja virhe $RMSEC=123$ ja $RMSECV=179$. $RMSEC$ tarkoittaa mallinuksessa olevaa virhettä ja $RMSECV$ mallin validoinnissa olevaa virhettä. Arvojen tulisi olla suhteellisen lähellä toisiaan, jotta mallin ennuste olisi hyvä. $RMSEC$ -arvo on yleisesti parempi kuin $RMSECV$ -arvo. R^2 on selitysaste, joka tässä tapauksessa kalibroinnille on 0.992 ja validoinnille 0.983 eli erittäin hyvä.



KUVIO 7. Malli valmiina

Saadulla mallilla voidaan nyt laskea öljyn määrä kentältä otetuista näytteistä. Kenttänäytteestä mitattu spektri syötetään violettiin X-Validate-lohkoon ja halutessa samasta näytteestä laboratoriossa mitattu öljypitoisuus laatikkoon Y-Validate vertailua varten. Prediction-lohkoon tulee tulos, paljonko kenttänäytteessä on mallin mukaan öljyä (kuvio 8).



KUVIO 8. Mallin ennustama öljypitoisuus kenttänäytteistä

7 Spektroskopiaan perustuvilla mittalaitteilla toteutetut mittaukset ja niiden tulokset

Varsinaisissa tutkimuksissa käytettyjä näytesarjoja käsiteltiin hankkeen aikana neljä kappaletta. Laboratoriossa tehtiin kaksi sekoitussarjaa, joista ensimmäinen oli karkeaan hiekkaan tehty sekoitus eri haitta-aineilla ja toinen polttoöljyllä kontaminoitu standardisuora. Lisäksi käytössä oli kaksi eri maastokohteista saatua näytesarjaa (Rehulantie ja Erottaja).

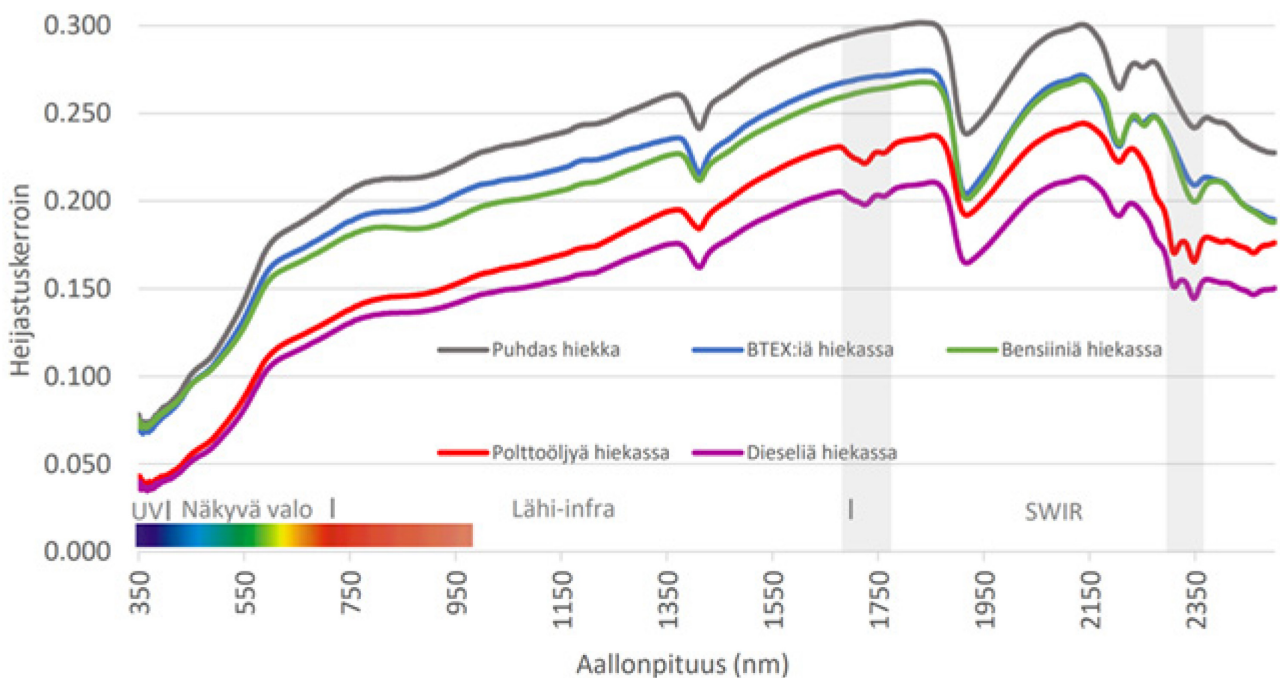
Laboratoriossa näytteistä määritettiin kevyiden öljyhiilivetyjen (C5-C10), keskihiilivetyjä (C10-C21) eli keskitisleiden (C10-C21, diesel, polttoöljy) ja raskaiden hiilivetyjen (C21-C40) määrät. Spektreillä keskityttiin ennustamaan keskitisleitä ja kokonaisuuspitoisuutta (C10-40). Rehulantien ja Erottajan kohteet olivat kontaminoituneet keskitisleillä ja toisaalta öljyhiilivetyjen kokonaisuuspitoisuus on käytännössä mielenkiintoinen silloin, kun kontaminaation lähdettä ei vielä tunneta.

7.1 Näytesarjojen ominaisuudet ja spektriipiirteet

Ensimmäinen testi tehtiin sekoittamalla haitta-aineita karkeaan hiekkaan. BTEX:n, bensiinin, polttoöljyn ja dieselin vaikutus maa-aineksessa havaittiin

heijastuskertoimen pienenemisenä koko spektrin VSWIR- spektrin alueella. Tämä tarkoittaa, että heijastuskertoimen arvo pienenee eli takaisinsironta vähenee.

BTEX:llä ei havaittu spektriirteitä alueella. Bensiinillä nähtiin vain pieni spektriipirre 2 350 nm kohdalla. Tätä spektriipirrettä olisi hyvä tulevaisuudessa tutkia paremmin. Polttoöljy ja diesel aiheuttivat näytteissä kaksi tupla-absorptiota noin 1 700 nm ja 2 300 nm aallonpituuksilla (kuvio 9).



KUVIO 9. Laboratoriossa TerraSpec HALO:lla mitattu karkea hiekka, johon sekoitettu BTEX:siä, bensiiniä, polttoöljyä tai dieselä

Toinen testi tehtiin sekoittamalla polttoöljyä puhtaaseen hienoon hiekkaan. Hiekka oli otettu Rehulantieltä, ja siitä laadittiin standardisuora lisäämällä siihen polttoöljyä kulumatiivisesti (taulukko 1). Hiekan heikutushäviö oli 10.4 %. Silmämääräisesti näytteestä ei erotettu orgaanista ainesta. Vesipitoisuus näytteessä oli 3 p-%. Standardisuorasta saatuja arvoja on koottu taulukkoon 2.

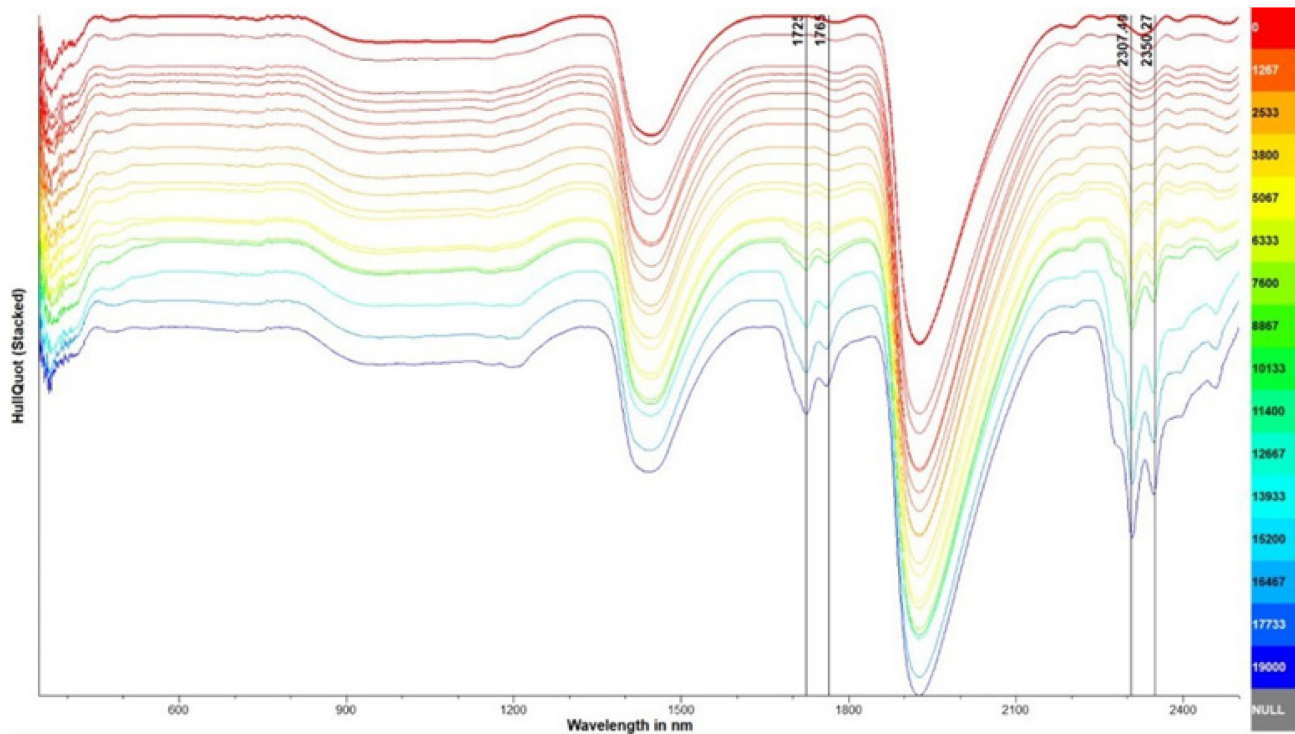
TAULUKKO 1. Standardisuora

Näytteen nimi	pitoisuus ~ (mg/kg)															pitoisuus ~ (mg/kg)			
	STD1	STD2	STD3	STD4	STD5	STD6	STD7	STD8	STD9	STD10	STD11	STD12	STD13	STD14	STD15	STD16	STD17	STD18	STD19
kevyt polttoöljy / öljyhiilivedyt C10-C21	0	85	170	255	425	680	1000	1700	3400	5100	6800	8500	10000	13000	17000	20000	30000	40000	50000
pipetoitava määrä ml/kg	0	0,1	0,2	0,3	0,5	1	1,5	2	4	6	8	10	12	16	20	24	36	48	60
pipetoitu määrä ml/0,5 kg	0	0,05	0,1	0,15	0,25	0,5	0,75	1	2	3	4	5	6	8	10	12	18	24	30

TAULUKKO 2. Standardisuoran (STD), Rehulantien (RT) ja Erottajan (ER) maanäytteiden kevyiden öljyhiilivetyjen (TCH C5-C10), keskihiilivetyjen (TCH C10-C21) eli keskitisleidien (C10-C21, diesel, polttoöljy) ja raskaiden hiilivetyjen pitoisuudet (THC C21-C40) sekä kokonaispitoisuus (TPH C10-C40). Lisäksi Erottajalta PetroFLAG:illä mitatut pitoisuudet, standardisuoden sekoitusvaiheen laskennalliset pitoisuudet (STD sekoitus), hehkutushäviö ja vesipitoisuus

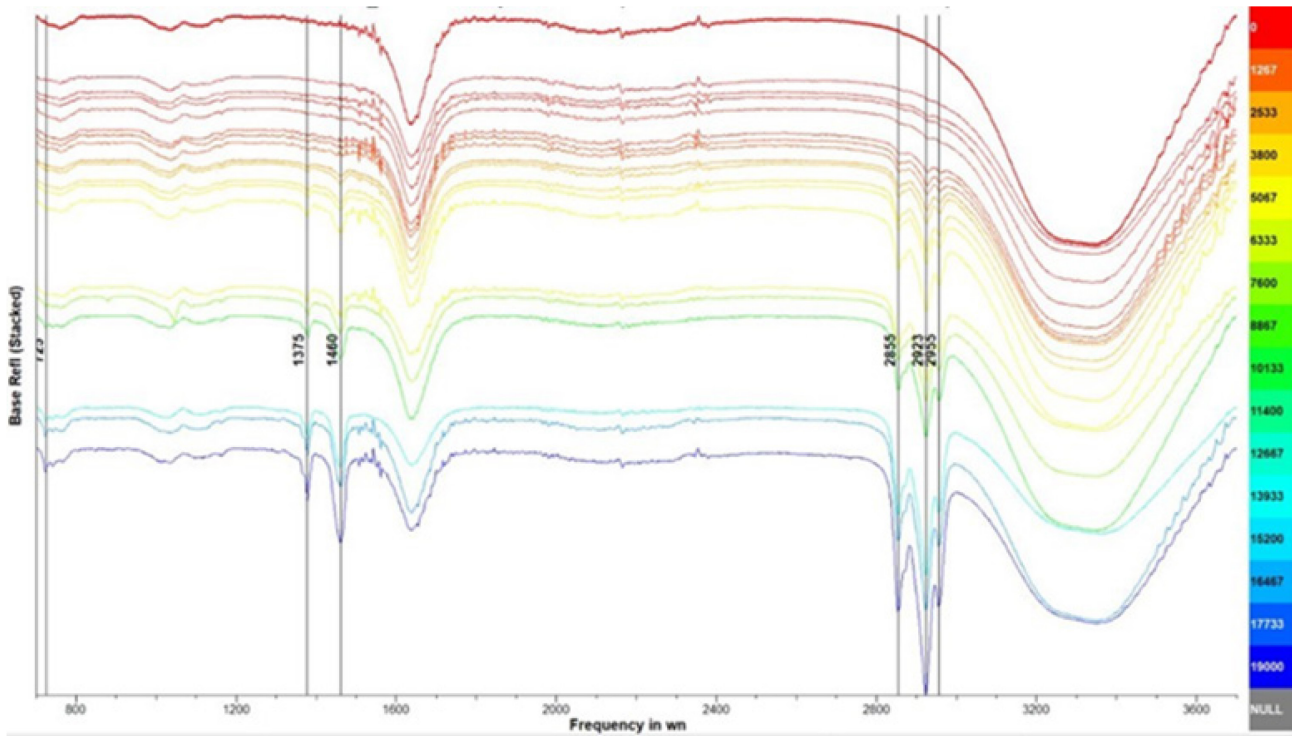
	THC C5-C10	THC C10-C21	THC C21-C40	TPH C10-C40	PetroFLAG	STD sekoitus	Hehk. häv.	Vesipit.
Kynnys-arvo	-	-	-	300				
Alempi ohjearvo	100	300	600	-				
Ylempi ohjearvo	500	1 000	2 000	-				
yksikkö	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	p-%	p-%
määritys-raja	<50	<50	<25	<50				
STD, n	19	19	19	19		19	1	1
min.	0	0	0	0		0	10.4	3
maks.	910.8	19482.5	4334.7	23817.2		50000.0	10.4	3
ka.	340.2	4894.3	1115.2	6009.5		10953.4	10.4	3
med.	292.0	2625.6	544.3	3169.8		5100.0	10.4	3
kh.	295.3	5834.6	1381.5	7213.4		14214.7	0	0
RT, n	26	26	26	26			25	25
min.	25.0	12.5	2.3	25.0			4.1	2.2
maks.	748.6	17051.7	3865.3	20917.0			29.0	6.0
ka.	127.0	2383.2	509.1	2892.6			15.3	4.0
med.	25.0	19.1	12.5	26.5			14.2	3.9
kh.	187.1	4179.1	921.8	5099.4			6.3	0.9
ER, n	41	41	41	41	37			41
min.	2.5	10.0	10.0	0.0	0.0			2.5
maks.	2100.0	2800.0	720.0	3290.0	6900.0			15.2
ka.	100.2	232.4	68.5	291.4	696.8			6.7
med.	2.5	10.0	24.0	36.0	237.0			6.7
kh.	384.2	574.2	133.4	668.1	1272.6			2.9

TerraSpec HALO:lla mitatuissa standardisuoran 19 näytteestä näkyvät vahvat polttoöljyn spektri-irteet (kuvio 10). Selvimät piirteet ovat 2 307–2 350 nm välistä oleva tupla-absorptio (minimit 2 307 nm ja 2 350 nm), ja toinen tupla-absorptio 1 725–1 765 nm välistä (minimit 1 723 nm ja 1 765 nm). Kirjallisuudesta löytyvä 1 200 nm absorptio-irre näkyy heikosti vain suurimpien pitoisuuksien näytteissä. Absorptio-irteet ovat sitä syvemmät, mitä enemmän näytteessä on polttoöljyä.



KUVIO 10. Näkyvän ja lähi-infrapuna alueen kontinuum-normalisoidut heijastusspektrit eri keskitislepitoisuuksille (mg/mk, punainen=pienet pitoisuudet, sininen=suuret pitoisuudet). Mitattu TerraSPEC HALO spektrometrillä Rehulantien hienoon hiekkaan sekoitetusta näytesarjasta (standardisuora)

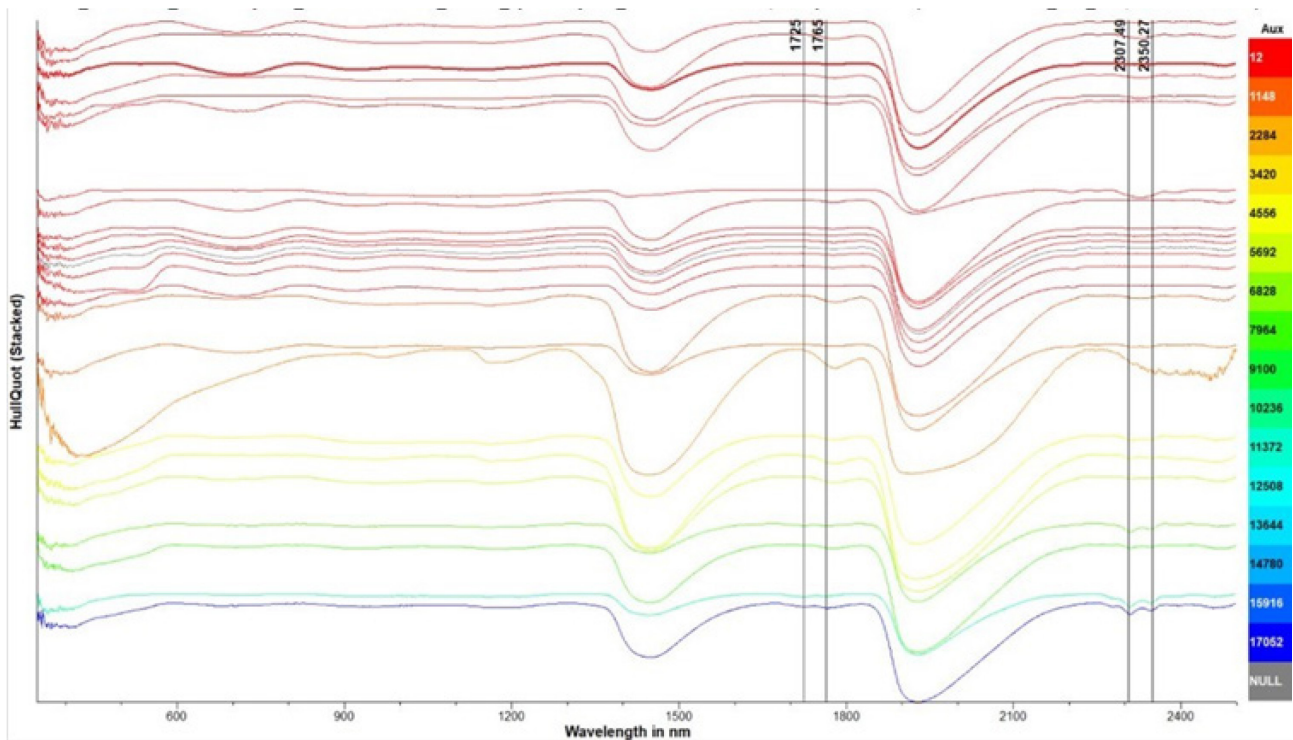
FTIR-laitteella mitatussa aineistossa huomio kiinnittyy kolmeen eri spektrialueeseen (kuvio 11). Tripla-absorptio havaitaan 2 855–2 955 cm^{-1} välistä. Suuremmilla pitoisuuksilla on havaittavissa tupa-absorptio-irre 1 375–1 460 cm^{-1} välistä. Hyvin heikko absorptio havaitaan myös 725 cm^{-1} aaltoluvun kohdalla. Kaikki absorptiot vahvistuvat suurempiin pitoisuuksiin siirryttäessä. Standardisuoran näytteissä tulee huomioida, että ne ovat tehty samaan homogenisoituun Rehulantieltä otettuun hienoon hiekkaan, eli maa-aineksen, sen mineralogian, orgaanisen aineksen pitoisuuden ja vesipitoisuuden muutokset ei aiheuta vaihtelua spektreihin.



KUVIO 11. Keski-infrapuna alueen ATR spektrit (Transmittance%) eri keskitistepitoisuuksille (mg/mk, punainen=pienet pitoisuudet, sininen=suuret pitoisuudet). Mitattu Spectrum One FTIR spektrometrillä Rehulantien hienoon hiekkaan sekoitetusta näytesarjasta (standardisuora)

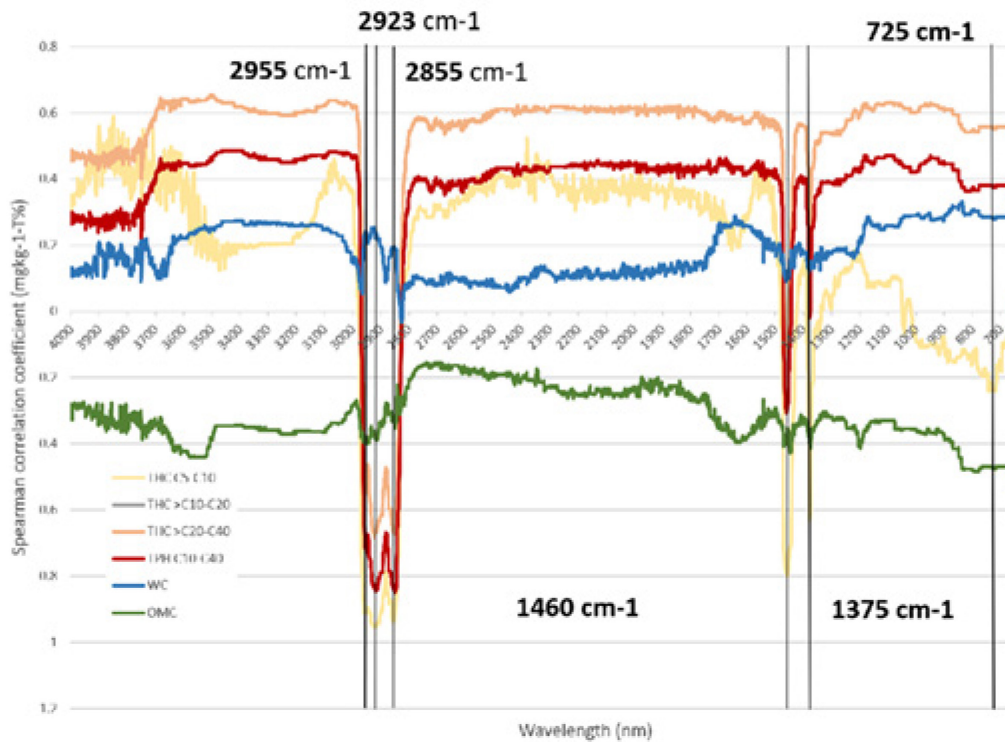
Rehulantieltä otettiin 26 näytteen sarja lähtien pienistä polttoöljypitoisuuksista mahdollisimman suuriin polttoöljypitoisuuksiin (TPH C10-C21). Maalajeina oli ylemmissä maakerroksissa hieno hiekka ja alemmissä maakerroksissa märkä siltti. Näytteiden hehkutushäviö vaihteli 4,1–29 p-% ja vesipitoisuus 2,2–6 p-% välillä (taulukko 2).

Rehulantien maastonäytteissä maa-aineksen vaihtelu tuo vaihtelua myös VSWIR spektreihin, mutta erityisesti korkeilla pitoisuuksilla voidaan nähdä samat spektrisiirteet kuin sekoitesarjasta kohdissa 1 725–1 765 nm ja 2 307–2 350 nm (kuva 12). Mitä pienempiin pitoisuuksiin mennään, sitä heikommin piirteet näkyvät. Spektripiirteiden näkymiseen vaikuttavat veden määrä, maalaji, orgaanisen aineksen määrä ja rakeisuuden muutokset.



KUVIO 12. Näkyvän ja lähi-infrapuna alueen Continuum removal-normalisoidut heijastusspektrit eri keskitistepitoisuuksille (mg/mk, punainen=pienet pitoisuudet, sininen=suuret pitoisuudet). Mitattu TerraSPEC HALO spektrometrillä Rehulantien polttoöljyllä pilaantuneista näytteistä

Rehulantien FTIR-spektreissä on havaittavissa spektrialueiden $1\,375\text{ cm}^{-1}$, $1\,460\text{ cm}^{-1}$, $2\,855\text{ cm}^{-1}$, $2\,923\text{ cm}^{-1}$ ja $2\,955\text{ cm}^{-1}$ absorptiopiirteiden reagointi hiilivetyjen määrän kohotessa. Spektrien ja pitoisuuksien välille laskettiin Spearmanin järjestyskorrelaatiokerroin, josta voidaan yllä mainittujen spektrialueiden olevan negatiivisessa korrelaatiossa hiilivetyjen määrään (kuvio 13). Lisäksi havaittiin heikko spektriipirre aallonpituusalueella 725 cm^{-1} .

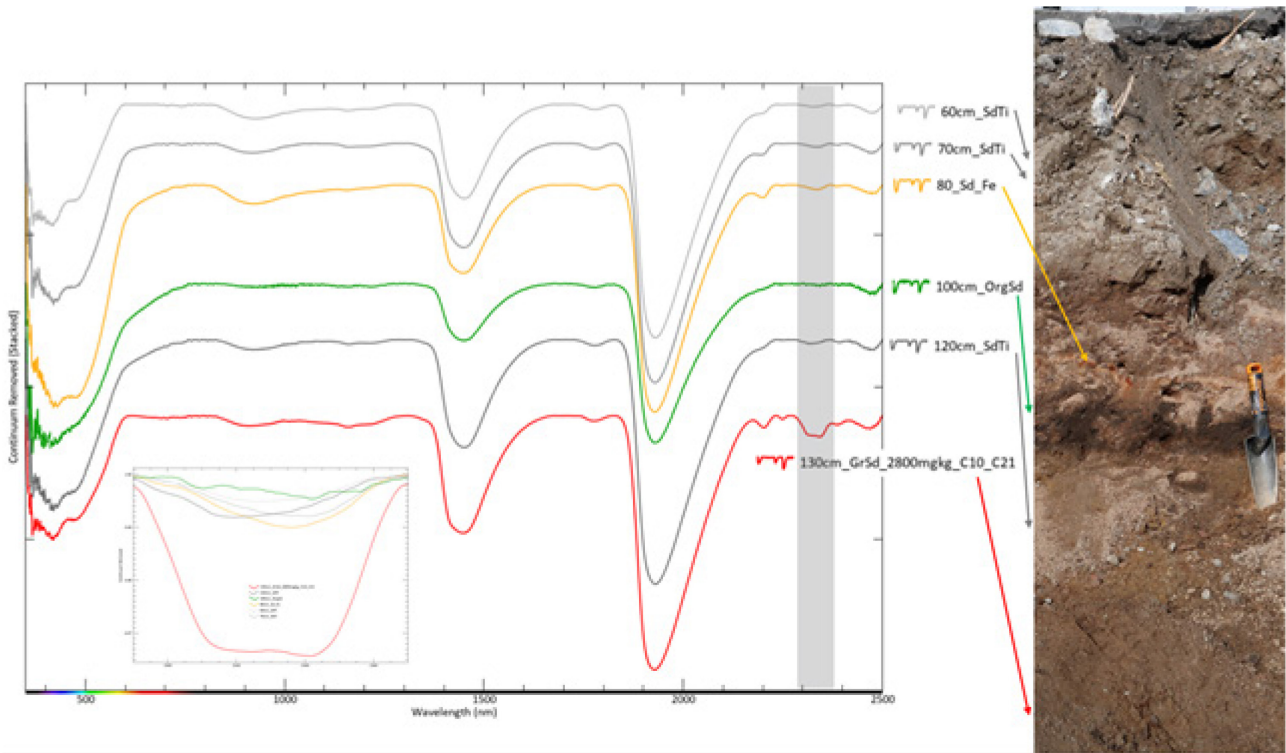


KUVIO 13. Rehulantien maastonäytteiden FTIR-spektrien kuvaaja

Viimeinen kohde oli Rovaniemen Erottajan mittarikenttä, jossa maalajien kirjo oli runsas sisältäen rakennussoraa, silttistä hiekkaa, karkeaa moreenia, orgaanista ainesta sisältävää moreenia ja lisäksi maarakennuslaattoja. Lisäksi alueella oli niin bensiinillä, dieselillä kuin polttoöljyllä pilaantuneita maita. Näytesarjan erityispiirre on se, että korkean hiilivetypitoisuuksien näytteitä 41 näytteestä on vain muutamia. Hehkutushäviötä ei määritetty laboratoriossa, mutta vesipitoisuus vaihteli 2,5–15,2 p-% välillä. (Taulukko 2.)

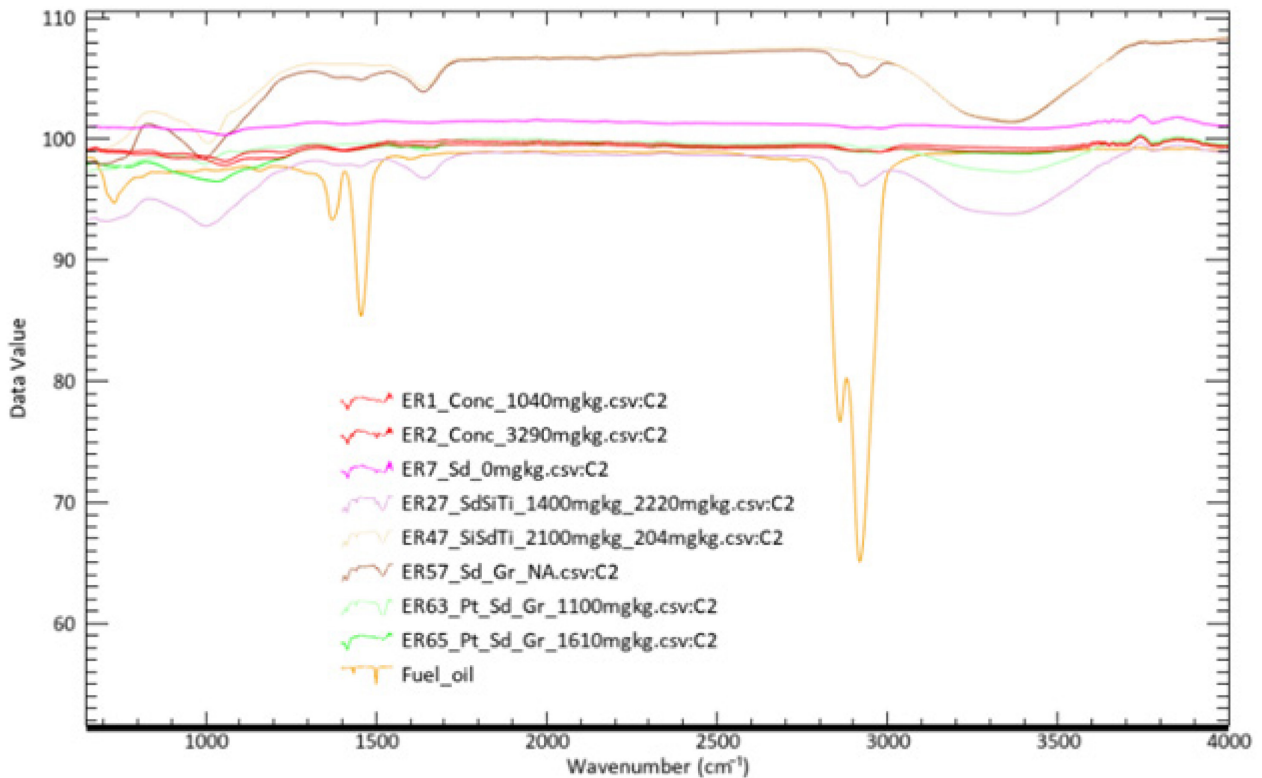
Maastossa ja laboratoriossa tehdyissä VSWIR mittauksissa havaittiin korkeilla hiilivetypitoisuuksilla absorptiot erityisesti 2 307–2 350 nm välillä.

Absorptiopiirteitä 1 725–1 765 nm välillä havaittiin muutamissa näytteissä, mutta ne olivat heikkoja. Kuviossa 14 on esitettyä maastossa mitatun leikkausprofiilin VSWIR-spektrit, joista alimmassa näytteessä keskitisleidien pitoisuus oli 2 800 mg/kg. Spektreissä tavallisesti 2 307–2 350 nm välillä esiintyvät tupla-absorptiot näkyvät yhtenä laajana absorptiopiirteenä.



KUVIO 14. Erottajan mittarikentästä maastossa mitatut VSWIR-spektrit. Alimmassa näytteessä keskitisleiden pitoisuus oli 2 800 mg/kg

Erottajan FTIR-spektreistä havaitaan sama ilmiö kuin VSWIR-spektreistä: polttoöljylle tyypilliset spektriipiirteet 2 855–2 955 cm^{-1} ja 1 375–1 460 cm^{-1} välillä on havaittavissa korkeiden pitoisuuksien näytteillä (kuvio 15).



KUVIO 15. Erottajan näytesarjan valikoituja FTIR-spektrejä maanäytteistä, joiden keskitisleiden (THC C10-C21) pitoisuudet olivat korkeimpia (mg/kg pitoisuudet legendassa). Vertailuspektrinä polttoöljyn FTIR spektri (Fuel oil)

VSWIR- ja FTIR-spektrien tarkastelu osoittaa, että kaikissa näytesarjoissa esiintyy hiilivedyille tyypillisiä absorptiopiirteitä. Maastossa mitatussa näytteissä, joissa veden määrä vaihtelee, absorptiopiirteitä havaitaan vain korkeimpien pitoisuuksien näytteissä ja ne ovat usein heikompia kuin laboratoriossa mitatuissa homogenisoidussa standardisuoran näytteissä. Seuraavassa kappaleessa selvitetään, kuinka pieniä pitoisuuksia monimuuttujamallinnusmenetelmillä (PLS, SVM) pystytään ennustamaan.

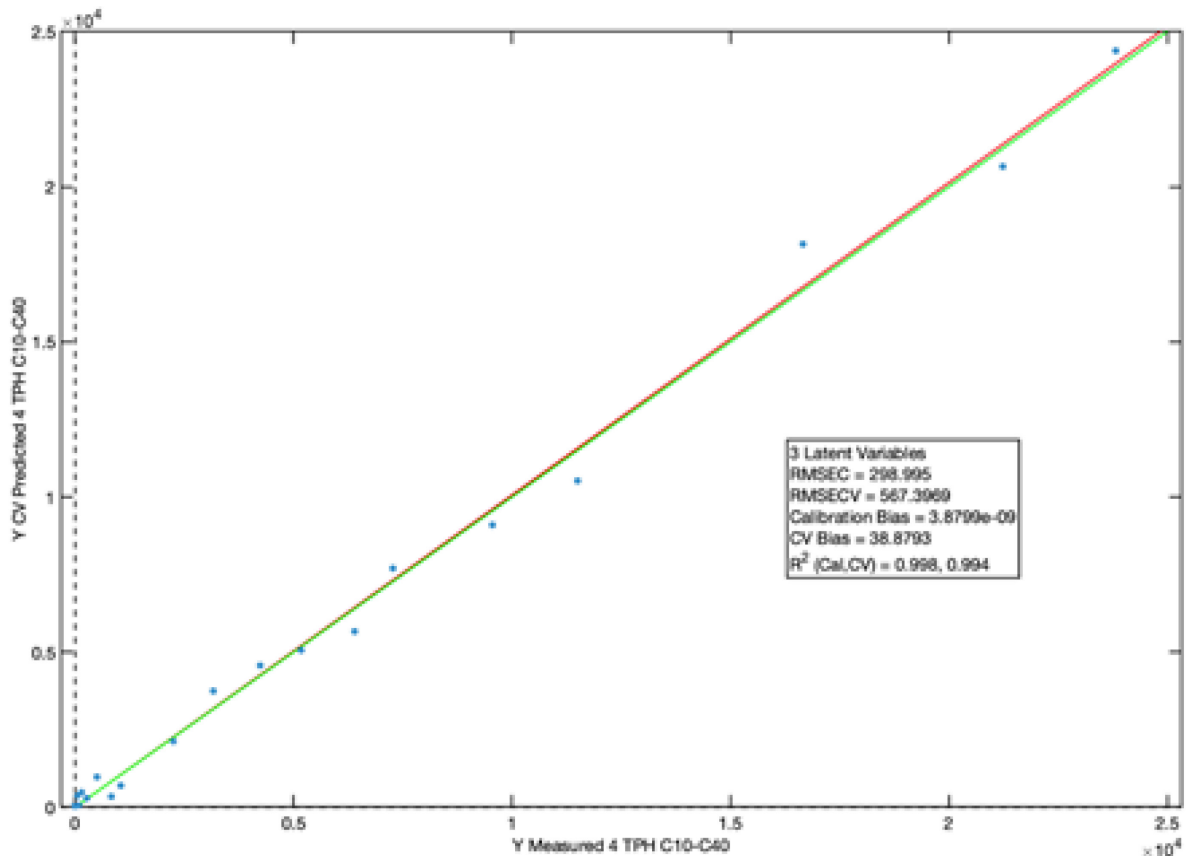
7.2 Mallinnustulokset

Hankkeen aikana pyrittiin selvittämään, onko järkevintä syöttää koko spektri mallinnusalgoritmiin vai käytetäänkö vain öljyhiilivedyille diagnostisia absorptiokohtia (ks. kappale 6) tehdessä kemometrissä mallinnusta. Standardinäytesarjasta (STD) mallinnettuihin keskitisleiden (THC) ja kokonaispitoisuuksiin (TPH) spektriipiirteiden valinnalla ei ollut merkittävää vaikutusta: sekä VSWIR- että FTIR-aineistossa diagnostiset spektriipiirteet syvenivät lähes lineaarisesti THC-pitoisuuksien kasvaessa.

Maastossa kerätyille näytesarjoille (RT, ER), joiden fysikaalisissa ominaisuuksissa (taulukko 2) on vaihtelua, diagnostisten spektriirteiden valinta osoittautui mallinnustuloksia parantavaksi. Maastonäytesarjojen (RT, ER) VSWIR- ja FTIR-heijastuskerroin- ja absorptio/transmissio tasoissa havaittiin epälineaarista vaihtelua (ks. esimerkiksi kuvio 15).

Ilmiön poistamiseen testattiin kirjallisuuteen perustuen PLS_Toolbox-ohjelmiston normalisointi- ja muunnosmenetelmistä. Lopulta spektrien esikäsittelyyn käytettiin ENVI-ohjelmistolla (Harris Geospatial Solutions Ltd.) laskettua Continuum removal-algoritmia, joka normalisoi spektrit yhteiseen tasoon. Tässä raportissa esitetään vain Continuum removal -algoritmilla esikäsitelyihin ja valittuihin spektriirteisiin (VSWIR: 1 655–1 835 nm, 2 240–2 380 nm; FTIR: 2 995–2 796 cm⁻¹, 1 493–1 425 cm⁻¹, 1 391–1 356 cm⁻¹) perustuvat mallinnustulokset.

Luotettavimmat mallinnustulokset saatiin VSWIR-aineistosta STD-näytesarjalle (RMSE_{CV}=477,8–601,9, R²=0,992–0,994). Sekä TPH- että THC-pitoisuuksien ennustaminen onnistui tälle näytesarjalle hyvin. Paras yksittäinen mallinnustulos saatiin STD-näytesarjalle ennustamiseen VSWIR-aineistosta PLSR-algoritmilla TPH (RMSE_{CV}=567,4; R²=0,994) ja THC (RMSE_{CV}=477,8; R²=0,993) pitoisuuksien ennustamiseen. Näistä ensin mainittu tulos esitetään kuviossa 16. Näiden tulosten pohjalta voidaan todeta, että Continuum removal -muunnos normalisoi aineistojen spektrivasteessa olevaa epälineaarisuutta, minkä takia myös lineaarinen PLS mallinnusmenetelmä toimii hyvin pitoisuuksien mallinnuksessa.

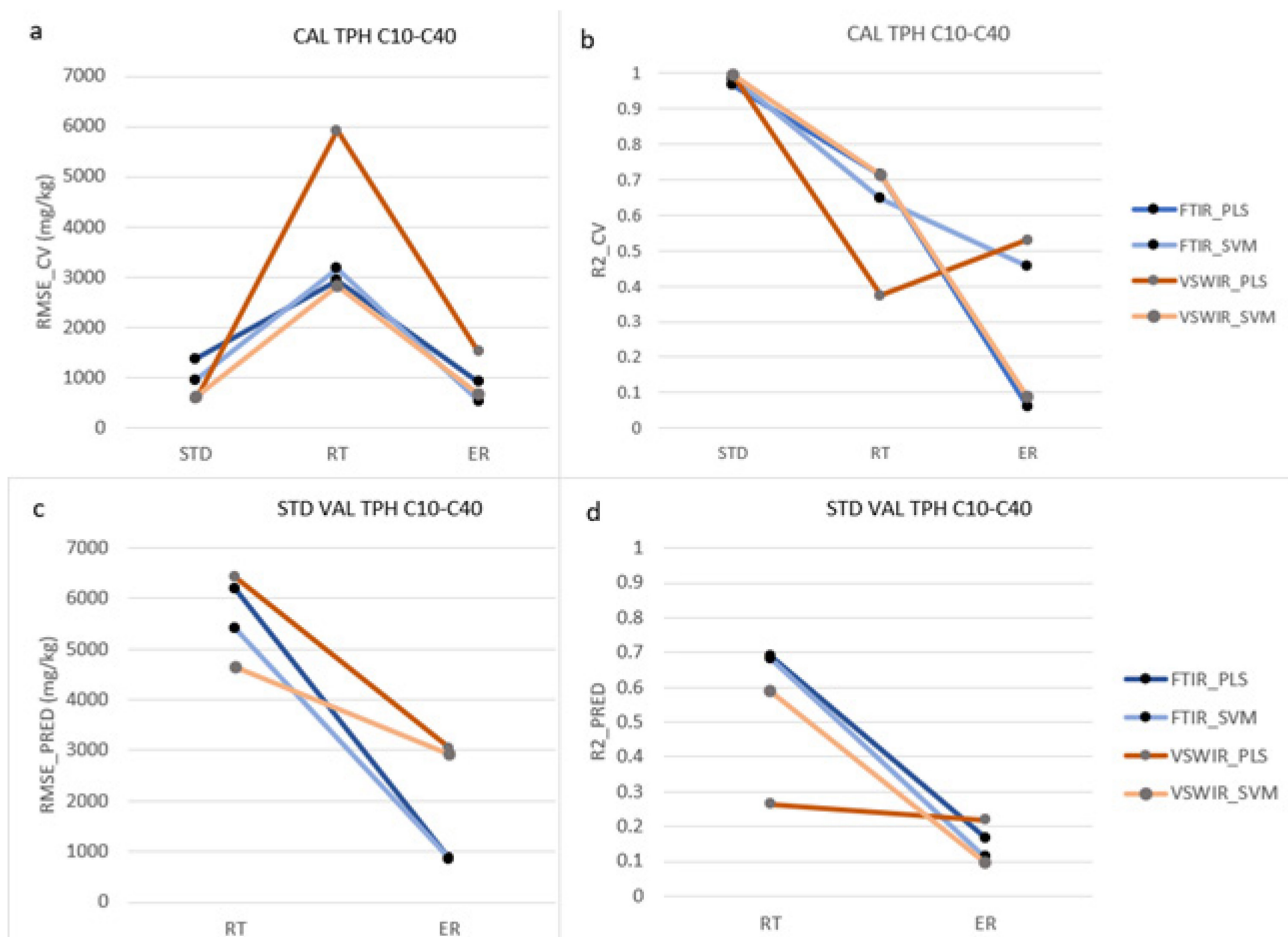


KUVIO 16. Öljyhiilivetyjen kokonaispitoisuuden mallinnustulos (Y-akseli) vs. kalibrointiin käytetyt laboratorioissa määritetyt pitoisuudet (X-akseli) PLS-menetelmällä Continuum removal -normalisoidusta VSWIR aineistosta

Kuviossa 16 esitetään öljyhiilivetyjen kokonaispitoisuuksien (TPH C21-C40) mallinnustulokset kalibrointimalleille (a, b), jotka luotiin kullekin näytesarjoille (STD, RT, ER) itsenäisesti, ja ennustemalleille, jotka luotiin maastosta kerätyille näytesarjoille (RT, ER) käyttäen STD kalibrointimallia (c, d). Keskitisleiden pitoisuuksien (THC) malleja ei tässä raportissa esitetä, koska mallinnustulokset ovat hyvin samanlaisia kuin TPH-tulokset eli keskitisleiden määrä pystyttiin mallintamaan hyvin samoin tuloksin kuin öljyhiilivetyjen kokonaispitoisuudet.

Kuten aiemmin todettiin, korkeimmat mallitarkkuudet saatiin STD-näytesarjalle. Ristiinvalidoinnin keskimääräiset virheet olivat pieniä (RMSE_CV=567,4–601,9 mg/kg, kuvio 17a), vaikka pitoisuusväli STD näytesarjassa oli laaja (0–20 917,0 mg/kg), ja selitysasteet korkeita (R²_CV=0.993–0.994, kuvio 17b) riippumatta tehtiinkö mittaukset VSWIR- vai FTIR-spektrialueilla tai PLS- vai SVM-mallinnusmenetelmällä.

Maastosta kerätyille näytesarjoille kokonaispitoisuuden mallinnus toimi kohtalaisen hyvin. Rehulantien (RT) ristiinvalidoinnin keskimääräiset virheet ovat korkeammat kuin Erottajan (ER) mallinnustuloksissa (kuvio 17a), koska Rehulantien keskitisleiden pitoisuudet ja sitä kautta kokonaispitoisuudet olivat korkeammat kuin Erottajalla (ks. taulukko 2). Vertailtavuuden takia virheluvut tulisi esittää suhteellisina virhelukuina. Selityksasteita vertailtaessa (kuvio 17b) Rehulantien ja Erottajan PLS ja SVM mallinnetut pitoisuudet sekä VSWIR- että FTIR-aineistoista tuottivat heikkoja malliennusteita ($R^2 < 0.713$), joita käytännössä ei voi soveltaa käytäntöön. Valituilla polttoöljyn absorptioalueilla vaikuttavat myös muut maan ominaisuudet (vesi, orgaaninen aines, mineralogia yms.) ja mallinnuksessa tulisi laskennallisesti huomioida näiden muuttujien vaikutus. Yllä mainitut maan muut maan ainesosat vaimentavat öljyhiilivetyjen absorptiota.



KUVIO 17. PLS- ja SVM-mallinnustulokset öljyhiilivety kokonaispitoisuuksille (TPH C21–C40) VSWIR- ja FTIR-aineistoilla. Kalibrointi mallien (CAL, a, b) epävarmuus arvioidaan ristiinvalidoitu keskimääräinen neliövirhe (RMSE_CV, a) ja ristiinvalidoinnin selityksasteen (R^2_{CV} , b) perusteella. STD-näytesarjalla luotuja kalibrointimalleja (a, b) käytettiin ennustamaan Rehulantien (RT) ja Erottajan (ER) maastosta kerättyjen näytesarjojen

pitoisuuksia (VAL, c, d), jolloin mallin tarkkuutta arvioidaan ennustamisen keskimääräisen neliövirheen (RMSE_PRED, c) ja selitysasteen (R2_PRED, d) avulla

STD kalibrointimalleja (CAL) sovellettiin maastosta kerättyjen Rehulantien ja Erottajan näytesarjojen mallinnukseen (VAL, kuvio 17c, d). Kun kemometrasta mallinnusta sovelletaan käytännössä, käytetään etukäteen luotuja kalibrointimalleja tuntemattomien näytteiden pitoisuuksien mallinnukseen. Tässä tutkimuksessa kalibrointimalli luotiin pienellä laboratoriossa mitatulla STD-näytesarjalla, jolla luotua mallia käytettiin maastossa kerättyjen näytteiden pitoisuuksien ennustamiseen. Maastosta kerättyjen näytteiden ennusteiden keskimääräiset neliövirheet olivat jälleen suurempia Rehulantien (RMSE_PRED=4 650,2–6 417,5 mg/kg) kuin Erottajan näytteille (RMSE_PRED=858,9–3 042,6 mg/kg), koska Rehulantien pitoisuustasot olivat Erottajan pitoisuuksia suuremmat (kuvio 17c, taulukko 2). Selitysasteet olivat sen sijaan Rehulantien näytteille suuremmat kuin Erottajan näytesarjalle lasketut, mutta molemmille näytesarjalle tulokset olivat heikkoja (R2_PRED=0,098–0,691).

Tutkimus osoittaa, että homogeeniseen hienon hiekan keskitisleiden (polttoöljyn) pitoisuudet ja niiden aiheuttama kokonaispitoisuudet pystytään luotettavasti ennustamaan VSWIR- ja FTIR-spektreistä kemometrisellä mallinnuksella, kun näytteet mitataan <3 p-% vesipitoisuudessa. Kun mitattavien näytteiden heterogeisuus kasvaa, kemometrinen mallinnus häiriintyy mineralogian, kosteuden, orgaanisen aineksen, tiheyden, raekoon yms. vaihtelun seurauksena. Tässä tutkimuksessa näytesarjojen koot olivat pieniä. Kun pyritään mallintamaan öljyhiilivetyjen määrää, kalibrointisarjojen tulisi olla satojen tai tuhansien näytteiden kokoisia ja niiden olisi katettava maalajien ja muiden maan ominaisuuksien kirjo, jotta kemometrisiä malleja ei olisi tarvetta käyttää ekstrapolointiin.

8 Maamassojen tilavuuksien mittaus dronista

CircVol-hankkeessa hyödynnettiin ja jatkokehitettiin Oamkin osaamista dronien käyttöön perustuvan kartoitus- ja mittaustiedon tuottamisessa. Hankkeessa tehtiin maamassakasojen tilavuusmäärittäystä niin sanotun kuluttajamittaluokan drooneilla, joiden käyttö edellyttää kuvausalueella tehtäviä tukitoimia varsinaisen kuvaus- ja mallintamistyön lisäksi. Hankkeen toimintaan kytketyllä opinnäytetyöllä selvitettiin

myös tarkempaa paikannusta käyttävän RTK-droonin hyödyntämistä tilavuusmittauksissa.

Maanpinnalla olevien maamassakasojen tilavuusmääritysten ohella kokeiltiin droonilla tuotettuun kuvamateriaaliin perustuvaa 3D-mallinnusta ja mittausta kaivannosta, joka oli tehty pilaantuneen maa-aineksen poistamiseksi kohteesta. Tässä raportin osassa esitellään edellä mainittua toimintaa ja kuvataan drooniperustaisen aineiston yleistä tuotanto- ja käsittelyprosessia. Raporttiosuuden lopussa arvioidaan Oamkin mahdollisuuksia operoida jatkossa drooniperustaisessa kuvantamis- ja mittaamistoiminnassa lento- ja sensorikaluston kasvaessa.

8.1 Maamassakasojen tilavuuksien mittaaminen kuluttajamittaluokan drooneilla

Yksittäisten valokuvien ja videoiden kuvaaminen ilmasta käsin onnistuu jo edullisilla alle tuhat euroa maksavilla kuluttajamittaluokan drooneilla. Pilotti voi itse säätää droonin kameran kuvauskulmaa kauko-ohjaimen välityksellä, ja ohjaimen avulla annetaan myös käskyt yksittäisten valokuvien ja videoiden ottamiselle.

Edullisella droonikalustolla pystytään toteuttamaan myös lentosuunnitelmia, jolloin drooni ottaa automaattisesti valokuvia kuvauslinjoilta ennalta määriteltujen asetusten mukaisesti. Kuvauslinjoilta otetusta kuvamateriaalista voidaan sen jälkeen tuottaa yhteen sidottua ilmakuvausmateriaalia eli niin sanottua ortokuvaa, josta on poistettu yksittäisissä kuvissa ilmenevät projektioväristymät.

Suoraan alaspäin otetussa yksittäisessä valokuvassa ainoastaan kuvan keskellä sijaitsevat kohteet kuvautuvat siten, että niitä ”katsotaan suoraan ylhäältä päin” eli esimerkiksi puista näkyy kuvan keskellä vain latvukset, kun kuvan reunoilla puista tulee myös runko-osaa näkyviin (kuva 17). Ortoilmakuva kuvaa kartoitettua aluetta kokonaisuudessaan kohtisuoraan ilmasta katsottuna ja kuvan geometria vastaa karttaa (kuva 18). Ortokuva muodostetaan tavallisesti useista sadoista tai tuhansista yksittäisistä valokuvista.



KUVAT 17 ja 18. Oulun Toppilassa dronilla CircVol-hankkeessa tuotettua ilmakuvamateriaalia. Vasemmanpuoleisessa yksittäisessä ilmakuvassa ainoastaan kuvan keskellä näkyvät kohteet kuvautuvat ”suoraan ylhäältä päin katsottuna” ja kuvan reunoilla ilmenee tyypillistä projektiovääristymää. Oikeanpuoleinen laajemman alueen kattava ortoilmakuva on koostettu useista yksittäisestä ilmakuvasta ja siinä projektivääristymät on korjattu (kuvat: Järveläinen Titta, 2019, hankkeen käytössä olevat kuvat)

Ortoilmakuvan muodostamiseen tarvittava kuva-aineisto voidaan siis tuottaa kuluttajamittaluokan droneilla hyödyntäen apuna lentosuunnitteluovelluksen ilmaisversiota. Itse ortokuvan tuottamiseen tarvitaan maksullista työkalua. Markkinoilla on tällä hetkellä useita pilvipohjaisia ohjelmistoja, joiden avulla pilotti voi ilman ohjelmiston lisenssimaksuja tehdä lentosuunnitelman. Siinä määritetään muun muassa kuvattavan alueen laajuus, lentokorkeus ja yksittäisten kuvien väliset päällekkäisyysasteet. Kuvien keskinäistä päällekkäisyyttä sekä linjalta peräkkäin otettujen kuvien että vierekkäisten lentolinjojen suhteen tarvitaan, jotta kuvamateriaalista on mahdollista muodostaa fotogrammetrisin menetelmin yhtenäinen ortoilmakuva.

Lentosuunnitelman tekeminen ja lennon toteutus onnistuu maksuttomasti esimerkiksi [DroneDeploy](#), [Pix4D](#) tai [PrecisionHawk](#) -pilvipohjaisten työkalujen avulla. Nämä ohjelmistoratkaisut mahdollistavat myös tuotetun kuvamateriaalin automaattisen lähettämisen välittömästi lennon jälkeen pilvilaskentapalveluun. Palvelussa kuvamateriaalista prosessoidaan ortokuva ja maanpinnan korkeutta esittävä korkeusmalli (DEM eli Digital Elevation Model). Tämä ominaisuus ei kuitenkaan kuulu ohjelmistojen maksuttomiin toimintoihin vaan ortokuvan ja

korkeusmallin tuottaminen edellyttää esimerkiksi kuukauden käyttöoikeuden myöntävää lisenssin ostamista.

Pilvipohjaisten automaattisten laskentapalvelujen lisäksi markkinoilla on työasemasovelluksia, joilla ortokuvien ja korkeusmallien muodostamiseen ja prosessissa käytettäviin asetuksiin pääsee vaikuttamaan huomattavasti enemmän. Useat ilmakuvauksen ammattilaiset luottavat [Agisoft Metashape](#) -ohjelmistoon, jota myös Oamkissa hyödynnetään.

Kuluttajamittaluokan droonilla tuotettu kuvamateriaali ei yksin riitä, mikäli ortokuvasta ja korkeusmallista halutaan saada koordinaatistoon täsmällisesti sijoittuva aineisto ja mikäli kartoitetun alueen korkeutta halutaan tarkastella edes suuntaa antavasti. Kuvamateriaaliin tallentuu droonin sisäänrakennettuun GNSS-vastaanottimeen (satelliittipaikannusvastaanottimeen) perustuva paikkatieto, jonka sijaintitarkkuus on varsinkin korkeustiedon osalta liian epätarkka maastomallinnustarkoitukseen. Näin ollen esimerkiksi maamassakasojen tilavuuksien määrittämistä ei voida tehdä yksinomaan kuluttajamittaluokan droonikuviin ja niistä tuotettuihin korkeusmalleihin perustuen, vaan avuksi tarvitaan niin sanottua signalointia.

Signaloinnissa maastoon sijoitetaan kartoitettavalle alueelle ilmakuvista riittävän selvästi erottuvia kohteita, joiden sijainnit mitataan senttimetritarkkuuteen kykenevällä GNSS-laitteistolla. Kuvissa 19 ja 20 on kaksi esimerkkiä tyypillisesti käytössä olevista signalointitavoista. Kuvassa 19 näkyvää katuun maalattua rastia voidaan hyödyntää useilla eri aikaan tehtävillä lennoilla, mikäli tarpeen on tehdä toistuvaa kuvausta. Kuvassa 20 on esimerkki liikuteltavasta signaalista, joka asetetaan maastoon lennon ajaksi ja kerätään sitten kuvauksen jälkeen pois. Signaalit tulee asettaa kattavasti kuvauslennon kohdealueelle avoimeen maastoon. Jos hankittavaa kuva-aineistoa on tarkoitus käyttää maamassakasojen tilavuuksien laskentaan, tulee tarkkuuspaikannettavia signaaleja asettaa maaston eri korkeuksille ja myös kasojen päälle korkeusmallin tarkkuuden parantamiseksi.



KUVAT 19 ja 20. Kaksi esimerkkiä yleisesti käytetystä tavasta tehdä signalointi dronilla tuotetun aineiston sijaintitarkkuuden parantamiseksi [8]

Jos dronin kuva-aineistoa käsitellään esimerkiksi aiemmin mainitulla Agisoft Metashape -ohjelmistolla, syntyy käsittelyprosessin aikana niin sanottu pistepilviaineisto. Se sisältää jo pienilläkin kuvausprojekteilla useita miljoonia yksittäisiä pisteitä, joilla on yksilölliset x-, y- ja z-ulottuvuuksien koordinaattitiedot sekä kuvamateriaaliin perustuva väriarvo.

Kuvassa 21 on kuvankaappaus pistepilvestä, joka esittää Oulun Toppilassa hankkeen työnä kuvannettua maamassakasaa. Pistepilven yhteydessä on näkyvissä pienillä lippusymboleilla kuvauksen tukena käytettyjen signaalipisteiden sijainnit. Pistepilven näkymää voi liikutella eri suuntiin ja tarkentaa/loitontaa esimerkiksi Agisoft Metashape -ohjelmistolla. Kun pistepilvestä johdettavassa korkeusmallissa on mukana tarkka ja yksityiskohtainen korkeustieto, voidaan sen perusteella tehdä tilavuuslaskentoja. Tätä varten tulee määrittää käytettävä maanpinnan pohjataso, jonka yläpuolella olevan "kasan" tilavuus otetaan laskennassa huomioon. Tilavuusmäärittäminen voi tehdä samalla ohjelmalla, millä toteuttaa tässä raportissa aiemmin kuvattua mallinnustyötä tai sen voi tehdä myös esimerkiksi erillisellä paikkatieto- tai CAD-ohjelmistolla.



KUVA 21. Oulun Toppilassa CircVol-hankkeen aikana sijainneen maamassakasan mallinnus pistepilveksi. Pistepilven pinnalla näkyvät lippusymbolit esittävät kartoituksen tukena käytettyjen signaalipisteiden sijainteja (kuvat: Järveläinen Titta, 2019, hankkeen käytössä olevat kuvat)

Fotogrammetrialla tuotettuun aineistoon aiheutuu virhettä myös silloin, jos kuvattavalla alueella on esimerkiksi puuston tai rakennusten aiheuttamaa varjostusta vallitsevan kuvassään ollessa aurinkoinen. Lumipeite puolestaan aiheuttaa virhettä paitsi maanpinnan korkeutta nostavan vaikutuksen vuoksi niin myös siksi, että fotogrammetria ei erota hyvin kohteita valkoisesta pinnasta eri valokuvista.

8.2 RTK-paikannusta hyödyntävän dronin käyttö tilavuuslaskennoissa

CircVol-hankkeen aikana Oamkissa tehtiin opinnäytetyö, jossa selvitettiin RTK-paikannusta hyödyntävän dronin käyttämistä maamassojen tilavuuksien määrittämisessä [9]. Opinnäytetyön tekijä **Joonas Pesonen** toteutti selvityksen Ramboll Finland Oy:n tilaamana. Pesonen käytti kuvauksissa DJI Phantom 4 RTK dronia, joka pystyy sisäänrakennetun RTK-moduulin avulla jopa senttimetritarkkaan paikannukseen [10]. Tarkka paikannus edellyttää kuvauksen

aikana D-RTK 2 -mobiiliaseman käyttämistä paikannuksen tukena. Kuvissa 22–24 on esitetty opinnäytetyön aineistonhankinnassa käytetty laitteisto.



KUVAT 22–24. Vasemmallä DJI Phantom 4 RTK drooni ilmassa, keskellä D-RTK 2 mobiili GNSS-tukiasema ja oikealla droonin ohjain varustettuna iPad-näytöllä (kuvat: Titta Järveläinen, 2019) [3]

RTK-paikannukseen kykenevän droonin käytön etuna on se, että maastossa tehtävään signalointiin kuluva aika oletusarvoisesti vähenee merkittävästi mobiilin GNSS-aseman tuottaessa tukea paikannukseen. Opinnäytetyössä dokumentoitiin sekä ”tavallisen” droonin että RTK-droonin kuvaus- ja mittausaineiston käsittelymenetelmää ilmakuvauksesta ja siihen käytetyistä laitteista datan käsittelyprosessiin siten, että käsittelymenetelmää voidaan toistaa ja jatkokehittää.

8.3 Kaivannon 3D-mallintaminen ja etäisyyksien mittaaminen mallista

CircVol-hankkeeseen kytkeytyen tehtiin droonin kuvamateriaaliin perustuvaa 3D-mallinnusta eräästä pilaantuneita maalajeja käsittävästä pienkohteesta. Oulun kaupungin Karjasillan kaupunginosassa sijaitsee kaupungin omistama kiinteistö, jossa tapahtui öljyvuoto lämmitysöljysäiliöstä talven 2018 aikana. Kohteessa jouduttiin poistamaan lämmitysöljyn pilaama maa-aines sekä korvaamaan se puhtaalla aineksella. Oamkin Vähähiiliset drooni ratkaisut (VED) -hankkeen henkilökunta sekä informaatioteknologian opiskelijat kuvasivat droonilla tämän

kohteen ja tuottivat aineistoon pohjautuen mallin Agisoft Metashape -ohjelmistolla. Kuvaus tehtiin DJI Mavic Pro 2 -dronilla ja siinä käytettiin signaalipisteitä mallin tarkkuuden parantamiseksi.

Kuvaus ja mallintaminen tapahtuivat samalla tavalla kuin kyseessä olisi ollut maan päällä sijainnut maamassakasa. Signaloinnin jälkeen dronilla lennettiin kohteen yllä ristikkomaisella lentoreitillä ja otettiin yhteensä 104 kuvaa. Kuvista luodusta 3D-mallista voidaan laskea tilavuuksia, mitata välimatkoja sekä määrittää yksittäisten pisteiden x- ja y-koordinaattilukemia ja korkeustietoja. Tuotettua 3D-mallia ja sen pohjalta tehtäviä mittauksia on esitelty videossa 1.



VIDEO 1. Esittelyvideo dronilla tuotettuun kuvamateriaaliin perustuvasta 3D-mallista ja sen mahdollistavista mittauksista

Mallista olisi saatu tuotettua tarkempi, mikäli käytössä olisi ollut RTK-paikannusta hyödyntävä droni. Koska kohde sijaitsi tiheästi asutulla alueella, oli Oamkin kalustoon kuuluvan DJI Matrice 210 RTK -dronin käyttäminen kiellettyä laitteen suuren painon vuoksi. Toisaalta käytetty signointipisteiden tiheä verkko poisti RTK-tarkennukseen kykenevän dronin käyttötarvetta.

Fotogrammetriaan eli valokuviiin perustuvaa mallintamista käytetäänkin maanpäällisten kasojen mittaamisen lisäksi kaivannaisteollisuudessa kaivantojen tilavuuksien määrittämisessä esimerkiksi Nordkalk Oy:ssä [11]. Fotogrammetrisen

mallinnuksen vaihtoehtoisena menetelmänä on hyödyntää kartoituksessa LiDAR-tekniikkaa eli laserkeilausta. Laserkeilauksessa sensori lähettää tiheitä lasersädekimppuja, ja säteiden kimmotessa esteestä (esimerkiksi maan pinnasta) keilain laskee pistepilvelle etäisyydet ja koordinaatit. Laserkeilauksella saadaan tuotettua pistepilven pisteiden tarkat sijainnit ja pisteiden värit saadaan yhdistettyä pistepilveen kuvamateriaaliin pohjautuen.

8.4 Oulun ammattikorkeakoulun droonikalusto laajenee ja osaaminen kehittyy

Oamk on kasvattanut droonikalustoaan ja tekniikkaan liittyvää osaamista viimeisen viiden vuoden aikana useiden TKI-hankkeiden ja niiden opetuskytkennän kautta. Oamk koordinoi [Arctic Drone Labs](#) -toimintaa, joka kuuluu Euroopan Komission akkreditoimaan Digital Innovation Hub (DIH) -kokonaisuuteen.

Vuoden 2020 lopulla Oamkilla on käytössään yhteensä 20 droonia. Kalustosta valtaosa on laitteita, joissa kamera on integroitu drooniin valmiiksi laitevalmistajan toimesta. Drooneista kolmeen on mahdollista vaihtaa kamera tai muu sensoryksikkö kulloisenkin tarpeen mukaan. Tämän raportin X-osiossa on käsitelty hyperspektrikuvaamista, ja siellä esiteltyä Oamkin hyperspektrikameraa on mahdollista käyttää droonilla ilmasta käsin tapahtuvaan kuvaamiseen.

Hyperspektrikameran ohella Oamkilla on käytössään lentotoimintaan soveltuva multispektrikamera, ja myös järjestelmäkameran hyödyntäminen droonikuvauksissa on mahdollista. Oamkin kalustoon kuuluu myös lämpökameraintegroitu drooni. Lentotoimintaan päteviä pilotteja Oamkissa on vuoden 2020 lopulla yhteensä noin 30 henkilöä, josta 20 on opiskelijoita ja henkilökuntaan kuuluvia pilotteja on kymmenen.

Vuonna 2021 Oamkin droonikalusto laajenee huomattavasti, kun Vähähiilisyttä edistävät drooniratkaisut (VED) -hankkeessa tehtävät investoinnit toteutuvat. Hankintalistalla on nykyistä kalustoa huomattavasti järeämpää laitteistoa, sillä niin sanottuun heavy lift drone -kategoriaan kuuluva laite pystyy kuljettamaan jopa 15 kg:n hyötykuorman.

Erityinen harppaus mittaustoiminnassa on mahdollista hankittavan LiDAR-sensorin eli laserkeilaimen käyttöönoton myötä. LiDAR-sensorin käytön etuna fotogrammetriseen menetelmään on se, että lasertutka ei ole auringon valaisuolosuhteista riippuvainen eikä esimerkiksi puiden tai rakennusten varjot aiheuta ongelmia. Merkittävä etu on myös se, että LiDAR-sensorilla voidaan tuottaa aineistoa kohteiden mittaamiseen myös puustoisella alueella.

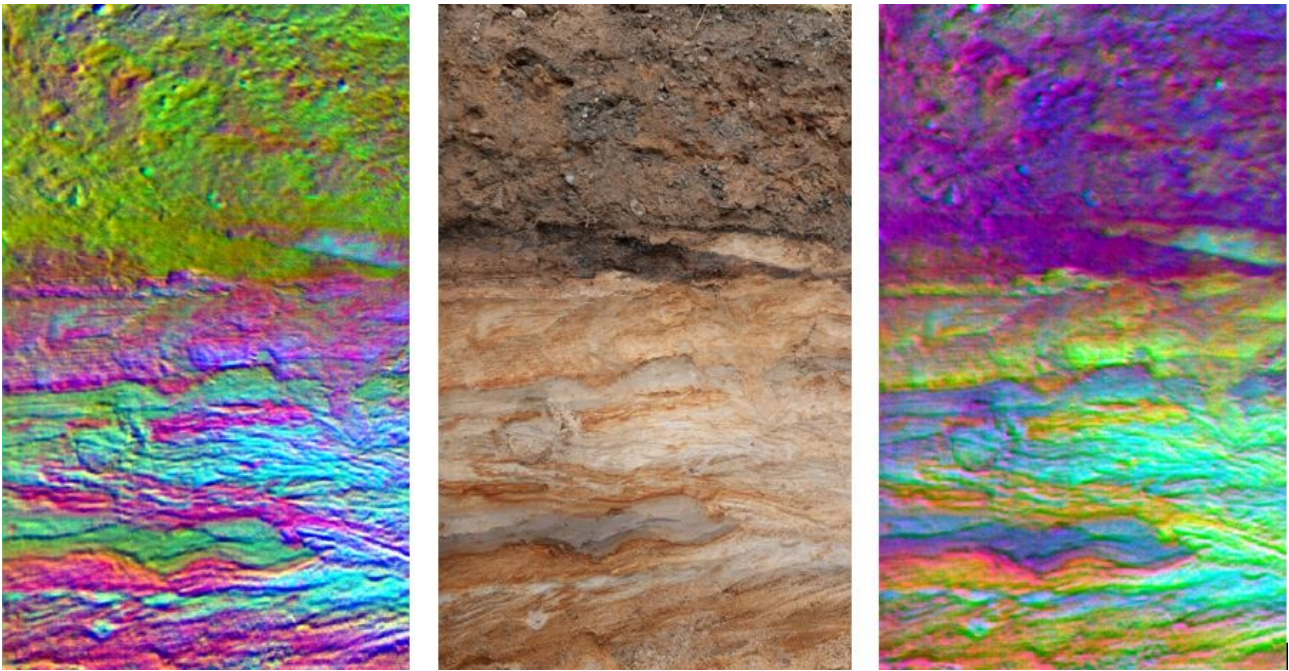
Uutta teknologiaa edustaa myös hankittava VTOL-drooni, joka nousee ilmaan suoraan ylöspäin perinteisen nelikopterin tavoin, mutta joka lentää ilmaan päästyään kiinteäsiipisen droonin tavoin. Tämä laite mahdollistaa suurten pinta-alojen kuvaamisen yhden työpäivän aikana. Edelleen uutta kalustoa edustaa nestemäisten aineiden ruiskutuksiin kykenevä drooni sekä lentokalusto, jolla voidaan operoida tiheästi asutulla alueella ja yleisötapahtumien välittömässä läheisyydessä. Hankintalistalla on myös ominaisuuksiltaan nykyistä parempi lämpökamera. Kuvaustoiminnan tehostamiseksi ollaan kehittämässä autolla siirrettävää maatukikeskusta, jossa on tilat kuuden henkilön työskentelyä varten.

9 Yhteenveto ja johtopäätökset

CircVol-hankkeen aikana selvitettiin hyperspektrometrian ja droonien mahdollisuuksia PIMA-maiden kunnostuksessa. Hankkeen aikaisesta selvitystyöstä ja tuloksista on hyötyä mahdollisiin jatkoselvitykseen. Tutkituissa menetelmissä on potentiaalia, mutta niiden käyttöönotto vaatii vielä tarkempia selvityksiä.

Osa hankkeen aikana käytetyistä menetelmistä osoittautui sopimattomiksi PIMA-maiden tunnistamiseen, mutta näitä menetelmiä voidaan soveltaa toisaalla. Esimerkiksi Senopin kamera ei soveltunut PIMA-maiden tunnistamiseen, koska sen aallonpituusalue ei yllä öljyhiilivetyjen keskeisten absorptiopiirteiden alueelle. Sillä voidaan kuitenkin ajatella olevan muita potentiaalisia käyttötarkoituksia.

Hyperspektrikuvantamista voidaan käyttää sedimentologisessa tulkinnessa sedimenttirakenteiden visualisointiin. Hyperspektrikuva-aineistosta voidaan tulkita esimerkiksi maan rakenteiden piirteitä, jotka ovat liian heikkoja paljain silmin nähtäväksi (kuvat 25–27). Sovellettavuus tällä voisi olla esimerkiksi akateemiseen tutkimukseen [esim. 13].



KUVAT 25–27. Ensimmäisenä MNF R:1, G:2, B:3, toisena kamerakuva RBG, kolmantena MNF R:2, G:4, B:1 (kuvat: Järveläinen Titta, 2019, hankkeen käytössä olevat kuvat)

Menetelmien tarkkuuden arviointiin tarvittaisiin laajempia, eri pitoisuusalueille sijoittuvia ja eri maalajeja paremmin kattavia maanäytesarjoja. Spektroskopia ei voi korvata laboratoriomäärittelyä, koska se ei ole ISO standardisoitu menetelmä. Menetelmiä voitaisiin kuitenkin käyttää näytteenoton ohjaukseen, sillä se on nopeaa ja helppokäyttöistä.

Laitteiden alkuinvestointi on suuri, mutta tämän jälkeen itse mittaus on halpaa ja tämän vuoksi mittaustiheyttä voidaan kasvattaa. Toki tämä vaatii, että laitteen aineistoille on olemassa luotettavat kalibrointimallit. Spektrometrian avulla aistinvaraista ohjausta voidaan vähentää, jolloin myös terveysriskit pienenevät. Esimerkiksi Australiassa on patentoitu mittaus- ja mallinnusjärjestelmä nimeltään RemScan. Järjestelmä mahdollistaa sen, että jo maastossa laite kertoo kokonaishiilivetyjen määrän mitattavasta kohteesta.

Tulevaisuudessa tutkimuskohteita ovat bensiinin MWIR- ja LWIR-alueiden spektriirteet. Suuremmilla näytemäärillä tulisi myös selvittää orgaanisen aineksen, vesipitoisuuden, raekoon ja mineralogian vaikutusta öljyhiilivetyjen mallinnustuloksiin. Näytesarjojen tulisi olla riittävän suuria ($n=300-1\ 000$), jotta mukaan saataisiin riittävästi eri maalajeja ja riittävän suuret vaihteluvälit esimerkiksi orgaanisen aineksen ja veden määrissä.

Hyödyllistä voisi olla myös selvittää, kuinka FTIR-laitteiden DRIFT-moodi toimii hiilivetyjen tunnistamiseen ja havainnointiin. Itse mallinnuksessa voitaisiin vielä paremmin selvittää, miten spektrien esikäsittely on viisainta toteuttaa, jotta tulokset eivät vääristyisi. Esimerkiksi näytteitä suositellaan kuivattavaksi ennen mittausta [12], mutta toisaalta kuivaus aiheuttaa hiilivetyjen haihtumisen.

Hankkeen tuloksista käy ilmi, että lisäselvitystä tarvitaan, jotta voidaan varmistua parhaista etenemistavoista näytteiden oton ja käsittelyn suhteen. Lisäksi selkeyttä ja hyviä käytänteitä tulisi saada tuloksien käsittelyn yksinkertaistamiseen ja tulkintaan. Mahdollisesti kenttäanalyysointia voidaan tulevaisuudessa käyttää likaantuneiden maa-ainesten käsittelyn helpottamiseksi ja nopeuttamiseksi. Kun kierrätysmateriaalien pitoisuudet saadaan aiempaa nopeammin ja helpommin selville, on mahdollista tehostaa myös näiden materiaalien käyttöä.

Maa-aineksen käsittelyä voidaan helpottaa ja nopeuttaa myös dronien avulla. Dronien tekemät maamassojen tilavuuksien mittaukset ovat mielenkiintoinen vaihtoehto, mutta myös tähän menetelmään tarvitaan vielä jatkoselvitystä. Lisäksi Suomen olosuhteet, kuten talvi, asettavat omat haasteensa dronien käytölle.

Teknologian kehittyminen mahdollistaa, että yli-jäämämaita voidaan käyttää entistä tehokkaammin hyödyksi kiertotalouden näkökulmasta. Teknologian kehittyessä ja yleistyessä, on loogista, että myös laitteistojen hinnat tulevat jossakin vaiheessa laskemaan. Lisäselvityksien avulla prosesseja voidaan helpottaa ja nopeuttaa, jolloin kiertotaloudesta tulee entistä houkuttelevampi vaihtoehto. Kun pilaantuneeksi epäilty kohde saadaan kartoitettua kustannustehokkaasti ja nopeasti, on näytteenottoa helpompia ohjata oikeaan suuntaan. Myös laboratoriossa analysoitavat näytteet on helpompi valita.

Maarit Middleton, apulaistutkimusprofessori
Geologian tutkimuskeskus, Tietoratkaisut yksikkö

Titta Järveläinen, lehtori
Oulun ammattikorkeakoulu, Luonnonvara-ala

Tapani Alakiuttu, lehtori

Oulun ammattikorkeakoulu, Liiketalouden yksikkö

Jere Kangas, lehtori

Oulun ammattikorkeakoulu, Rakentamis-, yhdyskunta- ja talotekniikka

Vesa Kallio, lehtori

Oulun ammattikorkeakoulu, Rakentamis-, yhdyskunta- ja talotekniikka

Toni Sankari, lehtori

Oulun ammattikorkeakoulu, Luonnonvara-ala

Joni Kosamo, projektipäällikkö

Oulun ammattikorkeakoulu, Luonnonvara-ala

Virpi Käyhkö, projektipäällikkö

Oulun ammattikorkeakoulu, Luonnonvara-ala

Lähteet

[1] Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017. Hakupäivä 5.5.2021.

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170843>

[2] MARA-asetuksen soveltamisohje 7/2019. Hakupäivä 5.5.2021.

<https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B39D6ABBA-49BE-4620-ACB1-B8A03700AB96%7D/143106>

[3] Reinikainen, J. 2020. Rakentamisen maa-ainesten hyödyntäminen sujuvammaksi – MASA 2.0. CircVol-blogi 5.10.2020. Hakupäivä 5.5.2021.

<https://circvol.fi/rakentamisen-maa-ainesten-hyodyntaminen-sujuvammaksi-masa-2-0/>

[4] Väylävirasto. 2020. Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa. Väyläviraston ohjeita 6/2020. Hakupäivä 5.5.2021. [https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo_2020-](https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo_2020-06_uusiomateriaalien_kaytto_web.pdf)

[06_uusiomateriaalien_kaytto_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo_2020-06_uusiomateriaalien_kaytto_web.pdf)

[5] Kuvaja, K., Palolahti, A., Ehrukainen, E. & Koukkula, M. Oulun Massapörssi – esiselvitys. Maanrakennushankkeiden maa-ainesten ja uusiomateriaalien käytön hallinnan kehittäminen. Oulun kaupunki, Yhdyskunta- ja ympäristöpalvelut. Hakupäivä 5.5.2021.

<https://www.ouka.fi/documents/64248/17062568/Oulu+Massap%C3%B6rssiraportti.pdf/b7d934c0-98b2-4f4c-a4f2-041a7d0a8aa0>

[6] Harju, I., Dettenborn, T., Forsman, J., Jyrävä, H. & Lahtinen, P. 2019. Kokemuksia uusiomateriaaleista tierakenteissa. Väyläviraston tutkimuksia 7/2019. Hakupäivä 5.5.2021. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-317-678-2>

[7] Malvern Panalytical. 2020. ASD TerraSpec Halo Mineral Identifier. Hakupäivä 4.12.2020. <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/asd-range/terraspec-range/terraspec-halo-mineral-identifier>

[8] DroneDeploy. 2017. How Do I Use Ground Control Points? A guide to using ground control points with drone mapping software. Hakupäivä 17.12.2020. <https://www.dronedeploy.com/blog/what-are-ground-control-points-gcps/>

[9] Pesonen, J. 2020. Maamassojen tilavuuksien mittausmenetelmän kehittäminen RTK-dronekuvausta käyttäen. Oulun ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Hakupäivä 21.1.2019. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202001081096>

[10] DJI. 2018. Next Generation Mapping – Saving Time in Construction Surveying with Drones. Hakupäivä 9.11.2018. <https://enterprise.dji.com/news/detail/next-generation-mapping>

[11] Leinonen, J. & Heimonen, T. 2019. Maanpäällisten kaivosalueiden 3D-mallintaminen. Automaattisten menetelmien mahdollisuudet. Lapin ammattikorkeakoulun julkaisuja. Sarja B. Tutkimusraportit ja kokoomateokset 12/2019. Hakupäivä 17.12.2020. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-316-293-8>

[12] Kirsch, M., Lorenz, S., Zimmermann, R., Andreani, L., Tusa, L., Pospiech, S., Jackisch, R., Khodadadzadeh, M., Ghamisi, P., Unger, G., Hödl, P., Middleton, M., Ojala, A., Mattila, J., Nordbäck, N., Palmu, J.-P., Tiljander, M., Ruskeeniemi, T., Sutinen, R. & Gloaguen, R. Hyperspectral outcrop models for palaeoseismic studies.

The Photogrammetric Record 34 (168), 385–407. Hakupäivä 5.5.2021.

<https://doi.org/10.1111/phor.12300>

METATIEDOT

Tyyppi: Raportti

Julkaisija: Oulun ammattikorkeakoulu

Julkaisunumero: 23/2021

Julkaisuvuosi: 2021

ISBN: 978-951-597-214-9

Tekijätiedot: Middleton Maarit, Järveläinen Titta, Alakiuttu Tapani, Kangas Jere, Kallio Vesa, Sankari Toni, Kosamo Joni, Käyhkö Virpi

Oikeudet: CC BY-SA 4.0

Kieli: suomi

Pysyvä osoite: <http://urn.fi/urn:isbn:978-951-597-214-9>

Tiivistelmä: 6Aika CircVol-hankkeessa kehitettiin suurivolyymisten maamassojen ja teollisuuden sivuvirtojen hyödyntämistä kaupungeissa. Oulun ammattikorkeakoulu ja Geologian tutkimuskeskus (GTK) selvittivät hankkeen puitteissa uusia mittausmenetelmiä maanrakentamisessa syntyvien ylijäämämaiden haitta-ainepitoisuuksien ja tilavuuksien määrittämiseen. Maamassojen tehokas ja järkevä uusiokäyttö vaatii, että maamassojen laatu ja määrä on tarkasti tiedossa. Kiertotalouden näkökulmasta tällöin massalle voidaan löytää sopiva uusiokäyttökohde mahdollisimman nopeasti ilman ylimääräistä logistiikkaa ja ympäristövaikutusta. Tässä julkaisussa kerrotaan hyperspektritekniikkaan perustuvien menetelmien hyödyntämisestä haitta-ainepitoisuuksien havaitsemisessa ja droonien sovellusmahdollisuuksista maamassojen määrän arvioinnissa. CircVol-hankkeen puitteissa testattiin maastossa ja laboratoriossa spektroskopiaan perustuvia kameroita ja mittalaitteita, sekä kehitettiin spektridatan käsittelyä pitoisuuksien mallintamiseen. Maastomittaukset toteutettiin yhteistyössä Oulun kaupungin ja alan yritysten kanssa Oulussa ja Rovaniemellä.

