

Lennot kaivosvalvonnan tukena (LeKaT) -hankkeen loppuraportti

Anne Tuomela¹, Anssi Rauhala¹, Hanna Rasi-Koskinen¹, Hannu Panttila², Heini Postila¹, Jouni Lerssi², Juuso Ikonen², Raija Pietilä² ja Riku-Olli Valta²

1) Oulun yliopisto, 2) Geologian tutkimuskeskus

Lennot kaivosvalvonnan tukena-hanke oli rahoitettu Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskuksen myöntämällä Euroopan aluekehitysrahaston tuella. Hanketta rahoittivat myös Geologian tutkimuskeskus, Oulun yliopisto, AFRY Finland Oy, Geobotnia Oy, Mitta Oy, Boliden Oy, AA Sakatti Mining Oy, Radai Oy, Inno-Cad Oy, Fortum Waste Solutions Oy, Maa- ja vesiteknikan tuki ry ja Oulun rakentamistekniikan säätiö. Hankkeen kokonaisbudjetti oli 313 184 €.

1. Johdanto

Hankkeen tarkoitus oli edistää miehittämättömistä lennoista suoritettavaa kaivosvalvonnan monitorointia. Kaivostoimintaan liittyy aina ympäristö- ja onnettomuusriskejä, ja kaivostoiminnassa syntyvät jätteet voivat muodostaa ympäristöriskin vuosikymmenten ajaksi. Erityisesti toimintansa lopettaneet vanhat kaivokset ovat ongelmallisia vaatimusten ja toimintatapojen muututtua. Usein myös ympäristöongelmien aiheuttaneet ja vastuussa olevat toimijat ovat ehtineet lopettaa toimintansa. Hankkeen perimmäisenä tavoitteena olikin kaivosten turvallisuuden parantamiseen ja riskien minimoimiseen pyrkivien monitorointitekniikoiden kehittäminen. Erityisesti hanke keskittyi suuria ympäristöongelmia aiheuttavien kaivosten suotovesien monitorointiin, ja toisaalta mahdollisesti pitkän ajan ongelmia aiheuttavien jätealueiden sulkemistoimenpiteiden tukemiseen.

Olemassa olevista riskeistä johtuen sekä kaivosyhtiöt että valvovat viranomaiset hyötyvät uusista työkaluista monitorointiin ja operaatioiden hallintaan. Yksi erittäin potentiaalinen työkalu on voimakkaasti suosittu kasvattaneet miehittämättömät lennot, jotka mahdollistavat kattavan seurannan resurssitehokkaasti ja pienellä hiilijalanjäljellä. Ilmasta käsin tapahtuva kattava monitorointi auttaa edelleen kohdentamaan rajalliset resurssit ympäristönsuojelun ja kunnostuksen kannalta olennaisimpiin seikkoihin ja osa-alueisiin. Lennot myös mahdollistavat nopean monitoroinnin vaikeakulkuisessa maastossa sekä alueilla, joissa onnettomuusriski on liian suuri paikan päällä suoritettaville mittauksille.

Idea hankkeelle syntyi osittain kaivostoimijoiden ja viranomaisten esittämistä käytännön ongelmista, ja toisaalta halusta yhdistää Oulun yliopiston ja GTK:n tietotaitoa lennokkien käyttämisestä kaivosturvallisuuden parantamiseksi. Hankeidea oli näiltä osin jatkoa vuonna 2018 päättyneille, Interreg Pohjoinen 2014–2020-rahoitteisille RESEM (REmote SENSing supporting surveillance and operation of Mines) ja Min-North (Development, Evaluation and



Optimization of Measures to Reduce the Impact on the Environment from Mining Activities in Northern Regions) - projekteille, joissa tämän hankkeen tutkijat olivat mukana.

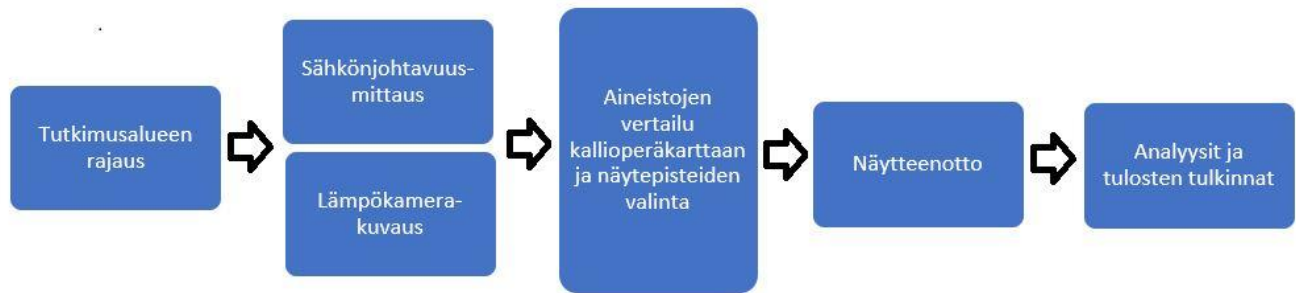
RESEM-hanke keskittyi tutkimaan mahdollisuuksia hyödyntää kaukokartoitusta (satelliitit, lennokit) kaivosalueisiin liittyvän valvonnan ja operaatioiden hallinnan tukena. Hankkeen puitteissa selvitettiin mm. lennokkien käyttömahdollisuuksia rikastushiekan painumien seurannassa sekä puhdistuskosteikon lämpökamerakuvaamisessa. RESEM-hanke antoi hyvää pohjatietoa lennokkien käytöstä ja mahdollisuuksista, joskin useita kehityskohteitakin ilmeni. RESEM-hankkeen yhteydessä huomattiin lämpökamerakuvauksista saatavan aineiston käsittelyn olevan huomattavasti haastavampaa verrattuna tavallisella kamaralla kerättyyn kuvamateriaaliin. Lämpökameramittauksista saatavan aineiston hyödyntäminen vaatii lisää koekohteita ja menetelmän systematisointia. Min-North hanke puolestaan keskittyi mm. kaivosten sivukivialueiden aiheuttamiin pitkäaikaisvaikutuksiin ja peittorakenteiden toimintaan. Min-North hankkeen puitteissa tutkittiin mm. maaperän sähkönjohtavuuksia suotovesien virtausreittien tunnistamiseksi Saattoporan kaivoksella. Min-Northin sähkönjohtavuusmittaukset Saattoporan kaivoksella toivat esiin suotovesien reittejä kaivannaisjätkeasojen ja Levijoen välisellä alueella. Tulosten tarkastelu osoitti kuitenkin, että tietyin paikoin olisi syytä täydentää mittauksia muun muassa Levijoen rannalta havaitun korkeamman sähkönjohtavuuden syyn selvittämiseksi sekä laajentaa mittausaluetta kaivospiirin länsipuolella.

Lisäksi tässä hankkeessa hyödynnettiin EAKR-rahoitteisia UAV-MEMO- ja Lapin POSKI vaihe 2 -hankkeissa opittuja asioita lämpökamerakuvauksista. UAV-MEMO-hankkeessa lämpökameralla varustettua multikopteria käytettiin kaivosympäristössä kaivospatojen tarkkailussa. Lapin POSKI vaihe 2-hankkeessa lämpökameralla varustettua lennokkia käytettiin lähteiden etsinnässä harjualueelta. Lapin Kaiku -hankkeessa (EAKR-rahoitteinen) testattiin kaivosten alapuolisten virtavesien kasvien kuormitustutkimusta, jossa ilmakehän kuvausta tehtiin kapealla jokialueella. Kuvauskokemuksesta opittuja asioita hyödynnettiin hankkeessa vastaavan kaltaisilla vaikeakulkuisilla alueilla.

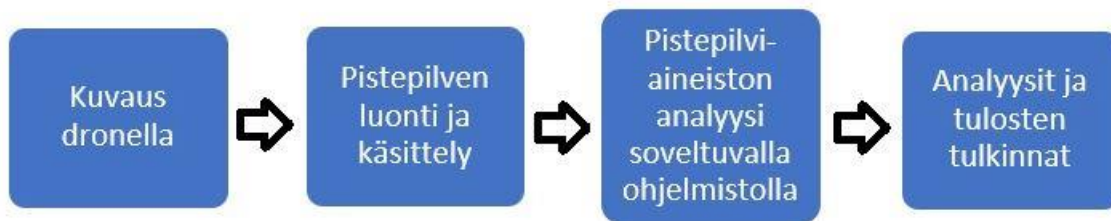
Aiemmissä hankkeissa saatuja tuloksia ja kokemuksia sekä kohderyhmien kanssa käytyjä keskusteluja käytettiin hyödyksi suunnitellessa, miten lennokkimittauksia voidaan jatkojalostaa tässä hankkeessa, ja mitkä ovat suurimmat kehittämiskohteet. Hankkeen taustalla oli myös halu tuoda jatkuvasti kehittyviin lennoki- ja sensoriteknikoihin perustuvat mittaukset akateemiselta tasolta yritysten ja muiden sidosryhmien saataville.

Tässä hankkeessa tutkitut dronemenetelmät voidaan yksinkertaistaa kuvissa 1 ja 2 esitettyihin prosessikaavioihin. Yksityiskohtaisemmat kuvaukset menetelmien eri vaiheista löytyvät jäljempänä loppuraportista:





Kuva 1. Kaivosvesisuotaumien etsintä ja veden alkuperän varmennus prosessikaaviona.

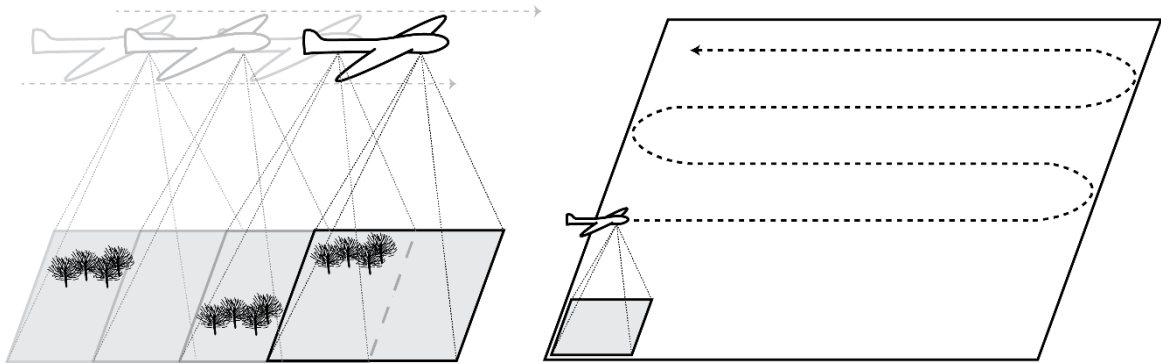


Kuva 2. Sivukivikasojen stabiliteetin ja peittorakenteen deformaation tutkimukset prosessikaaviona.

2. Menetelmät

2.1 Ilmakuvaus

Ilmakuvausella tarkoitetaan tässä kontekstissa erityisesti ilmakuva-fotogrammetriaa, jossa valokuvien avulla tuotetaan reaali maailman kohteesta 3D-malli. Kun kohdetta kuvataan riittävän monesta kulmasta, voidaan sen näkyvän osan 3D-malli rekonstruoida liki täydellisesti. Tämän tyyppisessä fotogrammetriassa kameran liike on olennaisessa osassa ja tekniikkaa kuvataankin yleensä englanninkielisellä termillä Structure from Motion (SfM). Tyypillisimmässä ilmakuvausskenaariossa kohdetta voidaan sarjakuva dronesta suoraan alaspäin lentämällä riittävän tiheissä linjoissa (Kuva 3), jotta varmistetaan kohteen eri osien näkyminen riittävän monesta kuvakulmasta.



Kuva 3. Esimerkki ilmakuvafotogrammetriasta, jossa kohteena olevaa maastoa kuvataan dronesta suoraan alaspäin ja alue kartoitetaan vierekkäisistä lentolinjoista kuvaten.

Ilmakuvafotogrammetrian pyrkimyksenä on usein tuottaa 3D-mallien lisäksi myös ns. ortomosaiikkeja (ts. ortokuvamosaiikkeja). Termi viittaa siihen, että luotu kuvamosaiikki on geometrisesti ortokorjattu niin, että sen skaala on yhdenmukainen ja kuvamosaiikki noudattaa haluttua karttaprojektioita. Ortokorjattu kuvamosaiikki pyrkii olemaan tarkka 2D-kuvaus maan pinnasta, jolloin siitä voidaan mitata todellisia etäisyyksiä kohteiden välillä.

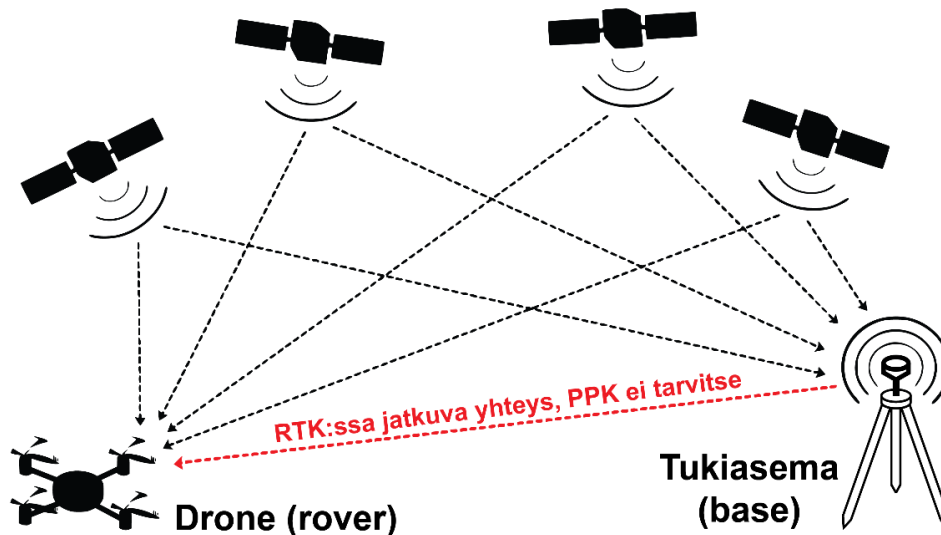
Ortomosaiikin luominen vaatii tuekseen korkeusmallin alueen pinnanmuodoista. Korkeusmalli on erityisen merkittävässä roolissa varsinkin dronella suoritettussa kuvauksessa, jossa pinnanmuodon vaihteluista johtuvat erot kohteen ja kameran (dronen) välisessä etäisyydessä ovat suhteellisesti varsin suuria verrattuna esim. satelliittikuvaan. Näin ollen fotogrammetria on siis myös varsin merkittävässä roolissa myös ortomosaiikkien luomisessa, sillä samalla tekniikalla voidaan luoda samalla kertaa sekä tarvittava korkeusmalli että hankkia kuva-aineisto mosaiikkiin. Niin korkeusmallin luominen kuin ortomosaiikin onnistuminenkin puolestaan vaativat kattavan määrän kuvia kartoitettavalta alueelta, jotta mahdollisimman suuri osa maanpinnan kohteista näkyy jossain kuvassa suoraan yläpuolelta kuvattuna.

Käytännön toiminnan kannalta olennaista on hankkia sopiva kuva-aineisto sekä mitata kontrollipisteitä, mikäli lopputuotteet täytyy georeferoida. Käytännön toiminta voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin: 1) ilmakuvauslennon suunnittelu, 2) kontrollipisteiden mittaaminen, 3) ilmakuvauslennon suorittaminen ja 4) aineiston käsittely.

Georeferoinnilla tarkoitetaan sijaintitiedon liittämistä tuotettuun kartoitusaineistoon. Georeferoinnin avulla aineiston sijainti- ja korkeustieto voidaan liittää esimerkiksi kansalliseen tai kunnalliseen koordinaatistoon, mikä on erityisen tärkeää, jos aineistoa tullaan käyttämään esimerkiksi suunnittelun ja rakentamisen tukena. Yleensä jo muutaman sadan euron arvoisissa droneissa on GNSS-vastaanotin, jolloin aineistoon saadaan käytetystä ohjelmasta riippuen jo vähintään karkea georeferointi.

Mallin tarkan georeferoinnin tukena käytetäänkin ns. signalointia eli maahan merkittäviä kontrollipisteitä, joiden tarkat sijainnit mitataan esimerkiksi GNSS-tukiasemaa hyödyntävällä paikantimella. Signaloinnin avulla "pseudokoordinaatistoon" luotu malli voidaan kiinnittää

todelliseen koordinaatistoon ja samalla malli voidaan "sitoa" maanpintaan minimoiden siten mallin vääristymiä. Toinen nopeasti yleistävä vaihtoehto on hyödyntää ammattilaistason dronea, joka jo itsessään kykenee korjaamaan sijaintitietoaan GNSS-tukiaseman avulla joko reaaliaikaisesti (ns. RTK eli real-time kinematic) tai jälkikäsitteilynä (ns. PPK eli post-processing kinematic) (Kuva 4).



Kuva 4. Dronen paikkatiedolle tehtävä RTK-/PPK-korjaus. RTK-korjauksessa drone on jatkuvassa yhteydessä joko fyysiseen tai virtuaaliseen verkkotukiasemaan, josta korjausdata saadaan reaaliaikaisesti. PPK-korjauksessa dronen sijaintitieto tarkennetaan tukiaseman tallentaman datan avulla jälkilaskentana.

Perinteinen signalointi on usein enemmän aikaa vievä toimi kuin varsinainen lentäminen, sillä tyypillisesti se vaatii useamman kontrollipisteen merkitsemistä maastoon ja niiden sijainnin mittaamista, mikä voi etenkin vaikeakulkuisessa maastossa olla varsin työlästä. Varsin hyvään, eli noin muutamien senttimetrien keskimääräisiin korkeustarkkuuksiin, on päästy jo sijoittamalla pisteet n. 100–200 metrin välein. Erityistä korkeustarkkuutta (n. 1–2 cm) vaativissa töissä voidaan käyttää vielä tiheämpää, n. 70 metrin välein sijoitettua kontrollipisteiden verkostoa. Yleisenä havaintona voidaan todeta, että RTK/PPK-dronet voivat parhaassa tapauksessa saavuttaa yhtä kontrollipistettä käyttäen lähes saman tarkkuuden kuin "perinteinen" pelkkään kattavaan signalointiin nojaava mittaus. Tarkkuutta vaativiin töihin on myös kirjallisuudessa esitetty peukalosääntöä, että RTK-/PPK-korjausta hyödyntävä mittaus mahdollistaa signaalien lukumäärän puolittamisen verrattuna perinteiseen signalointiin perustuvaan mittaukseen.

2.2 Lämpökamera

Lämpökamera on laite, joka muodostaa kuvan kohteen pinnalta heijastuneesta lämpö-, eli infrapunasäteilystä. Ne voidaan jakaa toimintatapansa perusteella mittaaviin ja ei-mittaaviin. Mittaavat lämpökamerat antavat tuotetun kuvan jokaiselle pikselille lämpötila-arvon, kun taas

ei-mittaavat näyttävät vain suhteellisen lämpötilajakauman. Kerätyistä lämpökamerakuvista on mahdollista luoda koko kuvausalueen kattava mosaiikki vastaavasti kuin RGB-kameralla tapahtuvassa ilmakuvauksessa.

Tässä hankkeessa lämpökameran käyttö perustuu pinta- ja pohjaveden lämpötilaeroon, joka voi olla kesällä 15–20 °C pohjaveden ollessa tyypillisesti vain muutaman asteen lämpöistä. Hankkeen molemmat kohteet kuvattiin iltapäivällä, jolloin aurinko oli lämmittänyt maastoa useamman tunnin ajan ja lämpötilakontrasti vesien välillä oli mahdollisimman suurin.

2.3 Sähkönjohtavuusmittaus

Sähkönjohtavuusmittauksessa mitataan maankamaraan kykyä johtaa sähköä. Sen sovelluskohteita ovat muun muassa malminetsintä ja kaivosympäristötutkimukset, joissa menetelmän käyttö perustuu samaan asiaan, eli etsittävä asia on usein ympäristöään paremmin sähköä johtavaa. Kaivosympäristötutkimuksissa kyseessä ovat pohjaveteen liuenneet metalli-ionit ja suolat, jotka kohottavat pohjaveden sähkönjohtokykyä. Sähkönjohtavuusmittauksia voidaan tehdä erilaisilla laitteistoilla. Tässä hankkeessa käytettiin GEM-2 nimistä laitetta, jota käytetään kävellen kulkien ja olkahihnan varassa kantaen.

2.4 Kallioperäkartta

Kallioperäkartta on maastohavaintojen, kairausten ja geofysiikan mittausten perusteella muodostettu tulkinnallinen kuva kallioperän kivilajien jakautumisesta. Suomen peruskallio on suurelta osin irtaimen maa-aineksen, turpeen tai vesistöjen peittämää ja varsinaiset peruskallion paljastumat ovat varsin harvinaisia. Tästä johtuen esimerkiksi useimmat kivilajirajat ovat määritetty geofysiikan mittausten, kuten esimerkiksi sähkönjohtavuuden, perusteella ja ovat siten tulkintaa ja yleistystä.

2.5 Vedenjohtavuusmittaus

2.5.1 Menetelmä yleisesti

Hydraulinen vedenjohtavuus tai vedenläpäisevyys, k -arvo [m/s], voidaan määrittää useilla erilaisilla menetelmillä sekä maastossa (in situ), laboratoriossa tehtävillä kokeilla (ex situ tai off site) tai arvioida materiaaliominaisuuksien perusteella kirjallisuudesta olevilla empiirisillä kaavoilla tai taulukoilla. Vedenjohtavuuden mittaaminen on melko haasteellista, varsinkin pienillä vedenjohtavuuksilla, koska siihen vaikuttaa moni muuttuja tai tekijä. Esimerkiksi saataviin k -arvoihin vaikuttavat tutkittavan materiaalien vesipitoisuus ja tiiveysaste sekä käytettävän menetelmän rajoitteet. Erilaisista olemassa olevista mittausten menetelmistä, niiden hyödyistä ja haasteista, on koottu projektin aikana oma raportti. LeKaT-hankkeessa testasimme kahta in situ -mittausmenetelmää, Guelph- ja rengas-infiltrometrimittauksia.

2.5.2 Guelph-infiltrometri

Guelphin infiltrometri on siirrettävä kyllästyneen tilan vedenläpäisevyyttä mittaava in situ -menetelmä. Menetelmä perustuu säädettävään painekorkeuteen, ja veden imeytymisen mittaamiseen maaperästä. Laitteen hyvä puoli on säädettävä mittakärki, jolla voidaan mitata maaperän vedenjohtavuutta pinnan alapuolelta jopa 3 metrin syvyydestä. Laitteessa on ilmatiivis säiliö, josta vesi voi vapautua vain huokoisen mittakärjen kautta. Mittakärki asetetaan esimerkiksi kairausreikään tai vastaavaan reikään tai koloon haluttuun syvyyteen. Kun sylinteriä nostetaan, reiän pohjalle pääsee kärjen pohjan ja sylinterin korkeuden erotuksen korkuinen vesipatsas ja säiliöön muodostuu menetetyt veden tilalle tyhjiö. Kairausreiässä vesipinnan korkeus ja säiliön vesipinnan korkeus pysyvät vakiona, jos vesi ei imeydy maahan. Laitteella pitää kairausreiän vedenpintaa vakiona, joten se päästää imeytyvän määrän verran vettä kärjen kautta. Maaperän kyllästyessä mittausreiän ympäriltä veden imeytymisnopeus vakioituu. Kun tätä vedenkulutusta seurataan, saadaan laskettua ajan suhteen infiltraationopeus. Kentällä yhden mittauksen tekemiseen kaikkineen valmisteluineen menee 1–2 tuntia. Havainnoista pidetään kirjaa ja laitevalmistajan ohjeiden mukaan voidaan laskea maa-aineksen vedenläpäisevyys.

2.5.3 Kaksoisrengasinfiltrometri

Kaksoisrengasinfiltrometri on yleisimpiä in situ -vedenjohtavuuslaitteistoja. Sen periaate on melko yksinkertainen. Siinä on kaksi erikoista rengasta, jotka lyödään noin 5 cm syvyyteen maahan. Uloimman renkaan tehtävä on pitää mittausalue vedellä kyllästyneenä ja sisemmästä renkaasta seurataan veden liikettä suoraan alaspäin. Maaperän kyllästyneen jälkeen, kun veden virtausnopeus on vakioitunut, aloitetaan sisemmän renkaan vedenpinnan mittaus ajan funktiona. Mikäli haihtuminen on suurta, voidaan renkaiden päälle asettaa suoja estämään auringon suora säteily. Koe soveltuu pienille vedenläpäisevyyksille, mutta on huomioitava, että kokeen suorittaminen vie enemmän aikaa, mitä heikommin maahan vesi imeytyy.

2.6 Hydrogeokemia ja Isotooppitutkimukset

2.6.1 Hydrogeokemia

Vesien luonnolliseen koostumukseen vaikuttaa olennaisesti paikallinen maa- ja kallioperän ominaisuus ja hydrologia. Kaikenlainen maankäyttö, kuten rakentaminen, teollisuus sekä maa- ja metsätalous, voi muuttaa ympäristön vesien kemiallista koostumusta. Hydrogeokemia tutkii eri alkuaineiden asemaa ja alkuperää vesissä sekä veden ja maankamaran välistä vuorovaikutusta. Veden laatua voidaan tutkia paikan päällä mittaamalla moniparametrimittalaitteilla veden laatuparametrejä, jotka tavallisesti ovat veden lämpötila, pH, liuennut happi, sähkönjohtavuus, kiintoainekeskitys (TDS) ja hapettumis-pelkistymispotentiaali (ORP). Kenttämäärityksinä tehdään yleisesti myös aistinvaraiset havainnot veden väristä, sameudesta, hajusta sekä näytteenottosijainnin ympäristöstä ja näytteenottohetken säätilasta.

Veden laadun tarkempi määrittäminen vaatii vesinäytteenoton ja laboratoriomääritykset. Vesikemian koostumuksen määrittämisen edellytyksenä on edustava ja laadukas vesinäytteenotto, joka käsittää kattavan näytteenoton suunnittelun, oikeanlaisien näytteenottovälineiden ja -menetelmien käyttämisen, sopivan näytteiden säilytyksen ja kuljetuksen sekä näytteiden esikäsittelyn toteuttamisen. Näytteen esikäsittely suoritetaan heti näytteenoton jälkeen ja se käsittää näytteen suodattamisen ja kestävännin typpi- tai fosforihapolla. Esikäsittely on aina analyysi- ja menetelmäkohtaista, minkä osalta tulee olla yhteydessä näytteitä vastaanottavaan laboratorioon. Laboratoriomäärityksissä veden koostumusta ja sen ominaisuuksia voidaan määrittää lukuisilla tekniikoilla, kuten ICP-MS, ICP-OES, ioninvaihtokromatografia ja spektrofotometria, riippuen halutusta mittaustarkkuudesta ja mitä ainepitoisuuksia näytteestä halutaan tutkia.

2.6.1 Isotoopit

2.6.2.1 Veden hapen ja vedyn ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ja $^2\text{H}/\text{H}$) stabiilit isotoopit merkkiaineina

Veden kierron aikana tapahtuva veden hapen ja vedyn isotooppien fraktioituminen tuottaa luonnon vesiin erilaisia isotooppikoostumuksia ja antaa tietyille vesityypille oman ainutlaatuisen tunnusmerkin. Fraktioitumista tapahtuu alkuaineen isotooppien massaerosta johtuen esimerkiksi haihtumisen tai vesihöyryn tiivistymisen yhteydessä. Fraktioitumisprosessien vuoksi esimerkiksi pinta- ja pohjavesi eroavat toisistaan merkittävästi isotooppikoostumukseltaan. Veden isotooppikoostumuksen määrittämisellä voidaan myös selvittää päätejäsenten sekoitussuhteita, mikäli selkeät päätejäsenet ovat erotettavissa. Sadannan veden isotooppikoostumus siirtyy muuttumattomana pohjaveden isotooppikoostumukseksi. Veden isotoopit ovat ns. konservatiivisia merkkiaineita sillä veden happi ja vety eivät reagoi maa- ja kallioperän alhaisissa lämpötiloissa. Toisin sanoen veden imeytyttyä maan pinnan alle sen isotooppikoostumus muuttuu vain sekoittumisen kautta.

2.6.2.2 Strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)

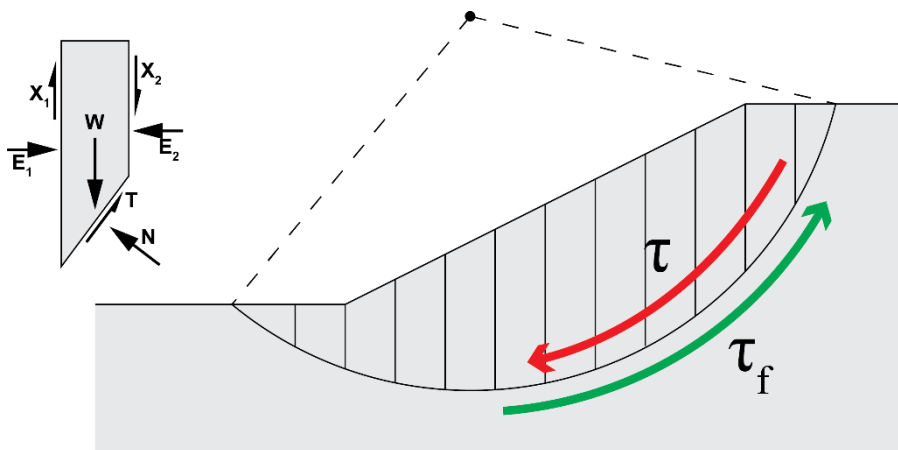
Strontiumin käyttö isotooppimerkkiaineena perustuu sen konservatiiviseen luonteeseen, joka johtuu siitä, että raskaana alkuaineena sen isotooppien suhteellinen massaero on pieni. Vesinäytteestä analysoitu Sr:n isotooppikoostumus vastaa tutkimusalueen tai akviferin mineraalikoostumusta, sillä Sr ei fraktioitu kemiallisissa tai biologisissa reaktioissa. Sitä voidaan käyttää myös pohjavesien sekoittumista tutkittaessa.

2.6.2.3 Rikki ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$)

Rikin isotooppikoostumus fraktioituu biologisissa prosesseissa ja se on ns. ei-konservatiivinen merkkiaine. Merkittävin fraktioitumisprosessi on mikrobiaalinen sulfaatin pelkistys, joka suosii rikin kevyempää ^{32}S isotooppia poistaen sitä liuoksesta. Rikin isotooppikoostumukseen vaikuttaa paikallisesti myös hapetus-pelkistys (redox) olosuhteet.

2.7 Geotekninen stabiliteettilaskenta

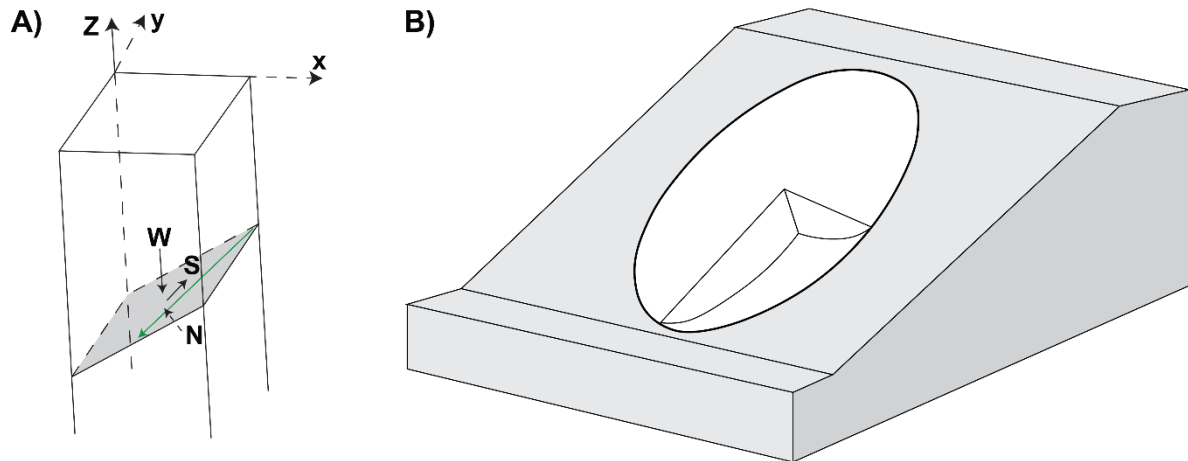
Stabiliteettilaskennalla tarkoitetaan tässä kontekstissa erityisesti geoteknistä analyysimenetelmää, jonka pyrkimyksenä on arvioida erilaisten maarakenteiden, kuten maapatojen, penkereiden sekä rakennettujen ja luonnollisten luiskien stabiilisuutta sortumia vastaan. Stabiliteettia kuvataan usein varmuuskertoimella F , joka voidaan määrittää sortumaa vastustavan leikkauslujuuden (τ_f) ja sortumaa ajavan leikkausjännityksen (τ) suhteena (Kuva 3). Stabiliteetin laskemiseen on erilaisia menetelmiä, joista yksi käytetyimmistä on erilaiset tasapainomenetelmät. Perinteisessä 2D-analyysissä tasapainomenetelmät perustuvat yleensä potentiaalisen sortumaliukupinnan jakamiseen pystysuoriin lamelleihin, joiden voima- ja/tai momenttitasapainoyhtälöiden avulla varmuuskerroin F voidaan laskea (Kuva 5). Erilaisia tasapainomenetelmiä on useita, merkittävimpinä eroina mitä yksinkertaistuksia mallissa tehdään tuntemattomien muuttujien vähentämiseksi. Esimerkiksi ns. Bishopin menetelmä olettaa lamellien välisten leikkausvoimien (X_1 ja X_2 kuvassa 5) olevan merkityksettömiä. Käytännön tasolla tietokonepohjainen 2D-stabiliteettilaskenta voidaan karkeasti jakaa seuraaviin vaiheisiin: 1) Valitaan kohteesta edustava 2D-läpileikkaus, joka mallinnetaan, 2) syötetään mallinnetuille maakerroksille geotekniset ominaisuudet (tilavuuspaino, kitkakulma, koheesio) sekä 3) annetaan mallinnusohjelman etsiä läpileikkauksesta esim. tuhansia erikokoisia ja ympyränmuotoisia liukupintoja, tavoitteena löytää niistä epävakain (ts. pienin varmuuskerroin).



Kuva 5. Varmuuskertoimen arvioinnin peruseriaate tasapainomenetelmässä voimien ja/tai momenttien avulla sekä liukupinnan jakaminen lamelleihin ja lamelliin kohdistuvat voimat.

Perinteinen 2D-stabiliteettianalyysi kärsii joistain rajoituksista, kuten i) liukupinta ajatellaan sylinterin muotoiseksi, ii) luiskan geometrian oletetaan olevan muuttumaton kolmannessa ulottuvuudessa, ja iii) maakerrosten oletetaan olevan muuttumattomia kolmannessa ulottuvuudessa. Näiden oletusten takia 2D-mallinnuksen on havaittu yleensä antavan n. 10–50 % pienempiä varmuuskertoimen arvoja verrattuna todelliseen 3D-varmuuskertoimeen (Fredlund et al. 2008). Edellä mainittujen seikkojen lisäksi 2D-mallinnuksen heikkoudeksi voidaan myös katsoa tarve löytää kohteesta edustavat läpileikkaukset, mikä ei epäsymmetristen kohteiden tapauksessa ole välttämättä helppo tai triviaali tehtävä.

Siirryttäessä 2D-tasapainomenetelmästä 3D-tasapainomenetelmään, mallin pystysuorat 2D-lamellit korvataan 3D-pilareilla (Kuva 6A). Lamellimenetelmän tapaan tavoitteena on laskea varmuuslukuja eri liukupinnoille, mutta esimerkiksi Bishopin menetelmän tapauksessa kaksiulotteisen ympyränmuotoisen liukupinnan sijaan etsitään pallonmuotoisia kolmiulotteisia liukupintoja (Kuva 6B). 3D-analyysin eduiksi voidaan laskea hieman käytetystä mallista riippuen mm. se, että sortumissuuntaa ja kohtaa ei tarvitse valita ennalta, koko kohde voidaan analysoida kerralla sekä analyysissä voidaan huomioida kohteen 3D-rakenne ja epäsymmetriat.



Kuva 6. A) 3-ulotteisen mallin pilari ja liukupintaan (harmaa) vaikuttavat pilarin paino W , normaalivoima N ja leikkausvoima S . B) Esimerkkihahmotelma palloliukupinnasta.

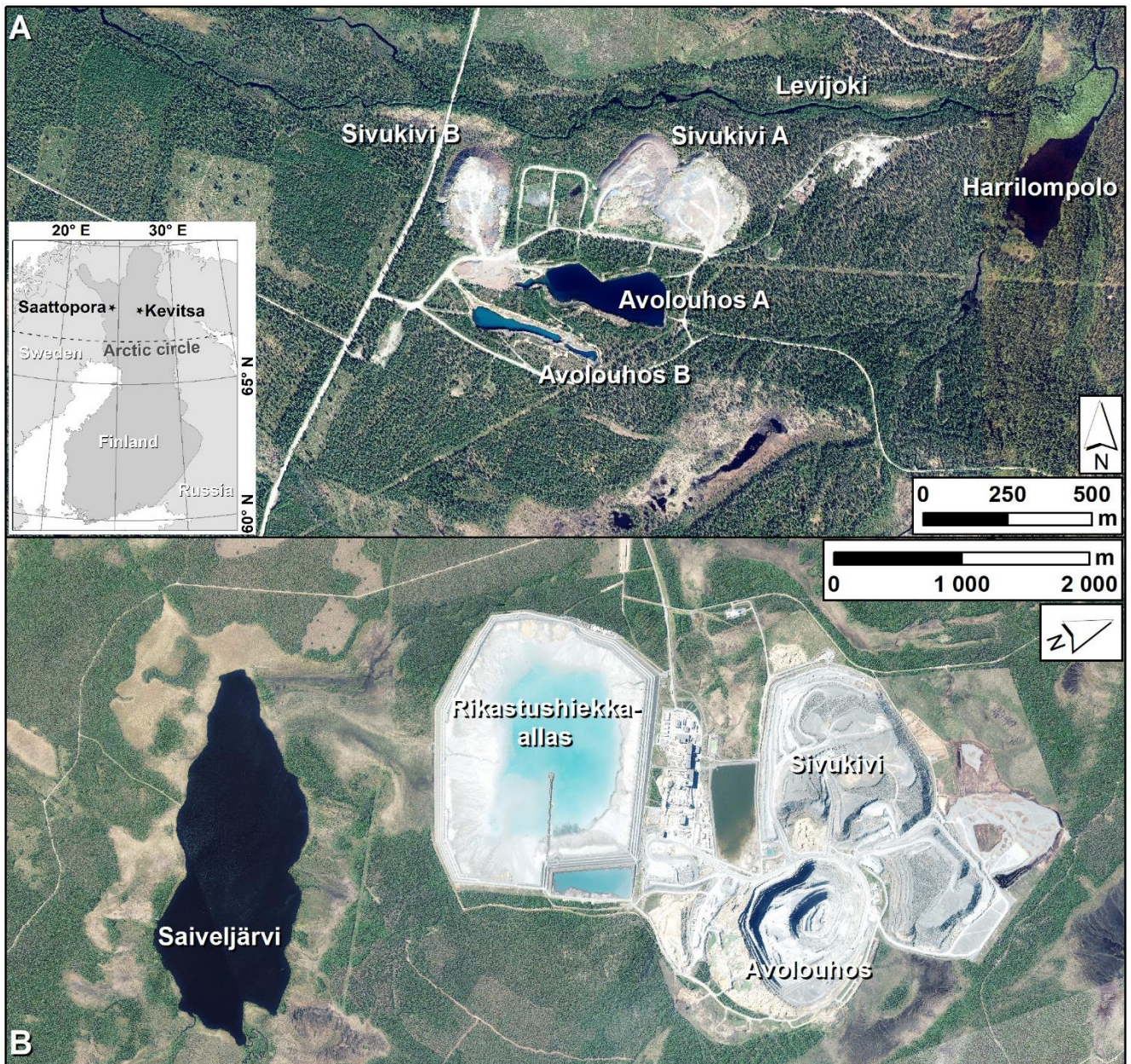
3. Työpaketti 1

3.1 Saattoporan kaivos

Saattoporan toimintansa lopettanut kaivos sijaitsee Kittilän kunnassa noin 25 km luoteeseen Kittilän kylästä (Kuva 7A). Alueen mahdollinen malmipotentiali on mainittu ensimmäisen kerran Erkki Mikkolan kirjoittamassa kallioperäkartan selostuksessa (Mikkola 1941). Outokumpu Oy aloitti alueella 1960-luvulla malminetsinnän, joka johti Pahtavuoman kupariesiintymän löytymiseen 1970 ja kaksi vuotta myöhemmin Saattoporan kupariesiintymän löytymiseen. Vuonna 1984 Outokumpu Oy:n geologi Tuomo Korkalo havaitsi Saattoporan malmissa samankaltaisuuksia Norjan Bidjovaggen kaivoksen kupari-kultamalmin kanssa. Koska aikaisemmat malminäytteiden analyysit eivät olleet sisältäneet kultaa, teetettiin Saattoporan kairasydännäytteille uudet analyysit, jotka paljastivat malmin kultapitoisuuden (Korvuo teoksessa Korkiakoski & Sorjonen-Ward 1997, s. 21).

Saattoporan kaivos aloitti toimintansa 1988 avolouhoksena siirtyen 1992 maanalaiseen louhintaan, joka kesti kaivostoiminnan päättymiseen asti vuoteen 1995. Tuona aikana kaivoksesta tuotettiin 6279 kg kultaa, 5177 tonnia kuparia sekä 3,5 miljoonaa tonnia sivukiveä

kaivannaisjätteenä. Saattoporan malmi rikastettiin Kolarin Rautuvaarassa, joten Saattoporassa on kaivannaisjätteinä pelkästään sivukiviä. Kaivostoiminnan loputtua toimito ym. rakennelmat ja parakit purettiin tai siirrettiin pois ja avolouhosten annettiin täyttyä vedellä.



Kuva 7. A) Saattoporan kaivos ja B) Kevitsan kaivos sekä niiden sijainti Suomessa. (Ilmakuvat: Maanmittauslaitos).

3.1.1 Saattoporan kallioperä

Saattopora sijaitsee Keski-Lapin vihreäkivivyöhykkeen länsiosassa. Saattoporassa esiintyvät vallitsevina kivilajeina mafiset tuffit ja laavat, fylliitit ja vaihtelevasti muuttuneet kiilleliuskeet, komatiitit ja diabaasijuonet (Niiranen et al. 2014).

Saattoporan malmista käytetään nimitystä Saattopora I, joka koostuu kahdesta malmilinnistä, jotka ovat noin 200 metrin etäisyydellä toisistaan. Ne liittyvät kahteen samansuuntaiseen albiittiliuskevyöhykkeeseen, joita erottavat ultramafiset ja metasedimenttiset kivet. Molempien malmilinnien isäntäkivenä on albiittiliuske, joka sisältää vaihtelevia määriä akessorista kvartseja ja biotiittia sekä paikoin turmaliinia. Kultraesiintymän pohjoisosassa albiittiliusketta leikkaa kohtisuoraan N-S-suuntaisia karbonaatti-kvartsijuonia, jotka ovat pääasialliset kultapitoiset yksiköt esiintymässä. Juonien karbonaatti on hyvin karkearakeista tekstuurltaan raekoon ollessa jopa useita senttimetrejä. Juonien läpimitta vaihtelee muutamasta millimetristä lähes metriin (Korkalo 2006).

3.1.2 Saattoporan maaperä

Saattoporan kaivoksen alueen maaperä koostuu hiekkamoreenista, turpeesta, sorasta ja hiekkaesiintymistä. Näiden lisäksi alueella on kalliopaljastumia. Mannerjäätikön reuna perääntyi alueelta etelälounaaseen noin 10 100 vuotta sitten. Perääntyvän jäätikön eteen patoutui kohdealueen luoteispuolelle laaja Muonion jääjärvi (Johansson 2005). Sen eräs lasku-uoma virtasi nykyisen Pahtavuoman laakson kautta itään. Pahtavuoman kautta virranneet purkausvedet kulkivat alkuvaiheissaan, perääntyvää jäätikön reunaa mukailleen myös Levijoen laaksoa pitkin. Samalla kerrostui Saattoporan vaihtelevasti lajittunut, extramarginaalinen hiekka- ja sorakerrostuma jättekivikasojen itäpuolelle. Hieman myöhemmin purkausvesiä ohjautui virtaamaan myös Pittaojan laaksoa pitkin pohjoiseen. Samalla aikaisemmin muodostuneeseen hiekka- ja sorakerrostumaan kului syvä kanava, jossa myös Harrilompolon lampi sijaitsee. Purkausvesien voimakas huuhtova toiminta heijastuu myös kalliopaljastumien runsautena kohdealueella. Myös moreenin pintaosat ovat hyvin kivisiä, hienoaineksen pois huuhtoutumisen takia. Esimerkiksi havaintopisteet itäisten jättekivikasojen lähistöllä sijoittuvat pääosin huuhtoutuneen moreenin alueelle. Alueelle sijoittuvat suot ovat ravinteikkaita sarasoita, joissa on paikoin lettomaisia osa-alueita.

3.2 Kevitsan kaivos

Kevitsan nikkeli-kuparikaivos sijaitsee Keski-Lapissa Sodankylän kunnassa, noin 35 km kirkonkylän pohjoispuolella (Kuva 7B). Kaivoksen rakentaminen alkoi vuonna 2010 ja sen tuotanto käynnistyi kaksi vuotta myöhemmin First Quantum Mineralsin toimesta. Vuonna 2016 Kevitsa toiminta siirtyi Boliden-konserniin, jonka omistuksessa kaivos jatkaa toimintaa tähänhetkiseen arvioon perustuen vuoteen 2034 saakka. Kaivos toimii avolouhoksena ja rikastettava malmi sisältää päätuotteiden nikkelin ja kuparin lisäksi platinaryhmän metalleja (PGE) ja kultaa. Malmin rikastus tapahtuu kaivosalueella sijaitsevassa rikastamossa. Rikastamon ja avolouhoksen lisäksi kaivosalueella on sivukiven läjitysalue, rikastushiekka-alueet A ja B ja vesienkäsittelyjärjestelmään kuuluva pintavalutuskenttä, saostusallas ja selkeytysaltaana toimiva vesivarastoallas. Rikastusprosessissa jäljelle jäävä sulfidirikaste läjitetään kahteen altaaseen, joista päärkastushiekka-altaaseen A läjitetään matala rikkipitoinen rikastushiekka ja altaaseen B, joka sijaitsee altaan A koillispuolella, korkea

rikkipitoinen rikastushiekka (Pöyry 2011). Hankkeen tutkimusalue kohdistui rikastushiekka-alueen ja Saiveljärven väliselle suovaltaiselle Kevitsanaavan alueelle.

Alueen ilmasto on subarktinen. Kaivosta lähinnä oleva Ilmatieteen Sodankylän säähavaintoasema sijaitsee noin 50 km kaivoksen eteläpuolella. Säähavaintoaseman vuosien 1981–2010 tarkastelujakson mukaan alueen vuotuinen keskilämpötila on ollut $-0,4$ °C ja keskimääräinen sademäärä 527 mm (Ilmatieteenlaitos 2022).

Kaivoksen lähiympäristö kuuluu Kemijoen vesistöalueeseen ja tarkemmin itse kaivos sijoittuu em. kuuluvaan Kitisen vesistöalueeseen ja sen kahdelle valuma-alueelle. Pääosa kaivosalueesta on Mataraojan valuma-alueella, jonka virtaussuunta on kaivosalueelta länteen kohti Mataraojaa ja Kitistä. Kaivosalueen etelä- ja kakkoisosa on osittain Moskujärvien valuma-alueella, jonka virtaussuunnat ovat kaivosalueen rajoilta itä- ja eteläsuuntiin. Alueen lähimpiin päävesistöihin kuuluvat matalavetiset järvet: Satojärvi kaivoksen kaakkoispuolella ja Saiveljärvi kaivoksen eteläpuolella, sekä kaivoksen länsipuolella virtaava Kemijoen sivujoki Kitinen, jossa sijaitsee Vajusen voimalaitos (Pöyry 2011).

3.2.1 Kevitsan kallioperä

Kevitsan Ni-Cu-sulfidimalmi on osa Kevitsan mafis-ultramafis intruusioesiintymää, jonka kallioperän pintaosa koostuu ultramafisesta pohjoisosasta ja eteläisistä gabrofyfri- ja gabrosista. Malmi on sitoutuneena pirotteisena sulfidimineraaleihin ja sijaitsee intruusion ultramafisen yksikön keskiosassa pääasiassa oliviinipyrokseeniittikivissä. Sivukivet koostuvat oliviinipyrokseeniiteista, oliviiniwebsteriitista, gabrosta ja duniitista. Kallioperä intruusioesiintymän ympärillä koostuu mm. mustaliuskeista, joita sijaitsee rikastushiekka-alueen padon eteläosan kohdalla ja patoalueen ja Saiveljärven välisellä Kevitsanaavan alueella (Santaguida et al. 2015).

3.2.2 Kevitsan maaperä

Kevitsan ympäristöä kuvastaa laajat suokentät ja niitä ympäröivät muutamat yksittäiset vaarat. Alueellisesti se sijoittuu Keski-Lapin jäänjakajavyöhykkeelle, jolle ominaista on maa- ja kallioperään kohdistuneen glasiaalieroosion vähäisyys, minkä vuoksi maaperä on myös osin heikosti paljastunutta. Paksuimmillaan maanpeite on alavilla alueilla, kuten Satovaaran kakkoispuolella, jossa paksuus on jopa 20–30 m. Keskimääräinen maapeitteen paksuus on noin 5 m. Paikoittain esiintyvät kalliopaljastumat ja rakkakivikot ovat syntyneet jäätikön sulamisvesien ja jääkausivaiheen jälkeisen jokitoiminnan vaikutuksesta. (Manninen et al. 1996, Pöyry 2009)

Maaperä on alueella pääosin moreenia, joka koostuu kahdesta eri-ikäisestä kerroksesta. Alavilla soistuneilla alueella pintamaalaji on pääasiassa saraturvetta ja on paksuudeltaan 0,1–4,2 m. Kaivoksen ja Saiveljärven välisellä Kevitsanaavan avosualueella turpeen paksuus vaihtelee 0,2–3,4 m (Pöyry 2011). Korkeuserot ovat sijainnista johtuen suhteellisen pieniä ja

alueen korkeimmat kohdat ovat Kevitsanvaara n. 310 mpy ja Satovaaran alue noin 220–280 mpy. Korkeus malmiesiintymän kohdalla on 220–240 mpy (Pietilä et al. 2014).

3.3 Saattoporan tutkimukset

3.3.1 Sähkönjohtavuus

Saattoporan kaivoksen alueella mitattiin sähkönjohtavuutta vuonna 2016 Interreg Min-North-hankkeessa ja niitä täydennettiin 2020 EAKR LeKaT-hankkeessa. Molemmilla kerroilla käytettiin samaa GEM-2 mittalaitetta. EAKR LeKaT-hankkeen mittauksilla pyrittiin saamaan vastauksia aikaisemman mittauksen tulosten nostattamille kysymyksille.

GEM-2 on 300–96000 Hz:n taajuusalueella toimiva matalan induktion (kelaväli 1,66 m) sähkömagneettinen mittalaite. Mittauksessa laitteen lähetinkelalla lähetetään 3–5 eritaajuuksista maankamaraan pyörrevirtoja indusoivaa sähkömagneettista primääriaaltoa. Pyörrevirrat aiheuttavat vuorostaan sekundäärikentän, joka mitataan GEM-2-laitteen vastaanotinkelalla. Laitteen syvyysulottuvuus on noin 10 metriä. Paikannus tapahtuu käsi-GPS:llä. Mitatuista vasteista voidaan laskea näennäinen sähköjohtavuus ja -suskeptibiliteetti sekä suotuisissa tapauksissa maankamaraan kerrosmalli.

3.3.2 Dronekuvaukset

Saattoporassa dronekuvaukset suoritettiin 26.8.2020, noin klo 14:20–16:40 pilvisissä olosuhteissa. Ilmatieteen laitoksen Kittilän sääaseman mukaan lämpötila kuvausten aikana oli n. 12,0–13,4 °C. Lämpökameradataa kerättiin käyttäen DJI Matrice 210 -multikopteria sekä DJI Xenmuse XT lämpökameraa, jossa on 650x512 pikselin resoluutio ja 13 mm linssi. Kaikkiaan 2453 lämpökamerakuvaa kerättiin n. 150 metrin korkeudesta kattaen n. 1,8 km² alueen. RGB-kuvia kerättiin käyttäen DJI Phantom 4 RTK -multikopteria, joka on varustettu 20 Mpix sensorilla ja 8,8 mm polttovälin linssillä (24 mm filmikamera ekvivalenttina). Phantom 4 RTK kykenee lisäksi hyödyntämään RTK-korjausta. Kaikkiaan 1550 RGB-kuvaa kerättiin n. 145 metrin lentokorkeudesta kattaen n. 2,4 km² alueen. Sekä lämpökamera että RGB-kuvat käsiteltiin fotogrammetriseen prosessointiin tarkoitetulla Agisoft Metashape Professional -ohjelmistolla.

3.3.3 Vesinäytteenotto

Saattoporassa vesinäytteitä on aiemmin kerätty vuosina 2016–2018. Tätä aiemmin tuotettua aineistoa käytettiin täydentämään projektin aikana suoritettujen näytteenoton tuloksia. Projektin aikainen näytteenotto toteutettiin vuoden 2020 elokuussa, jolloin näytteitä kerättiin yhteensä 19 kappaletta. Kokonaisuudessaan Saattoporan tutkimusaineisto sisältää vesikemian tuloksia yhteensä 46 vesinäytteestä.



Aiemmissa tutkimuksissa vesinäytteitä on otettu kaivosalueella ja sen läheisyydessä sijaitsevasta viidestä pohjavesiputkesta (GW1–GW5), joista yksi pohjavesiputki (GW5) sijaitsee puoli kilometriä kaivosalueen lounaispuolella ja toimii näin ollen vertailunäytteenä alueen pohjavedelle. Pohjavesinäytteiden lisäksi näytteitä on otettu pintavesistä – lammikoista, louhosaltaista, ojista sekä joista ja puroista. Vuosina 2016–2018 vesinäytteenotto kohdistettiin sijainteihin, joissa mahdollinen kaivosvaikutus erottuisi sekä alueen lähivesistöihin näiden geokemiallisen tilan selvittämiseksi. Näytteenotto suoritettiin vuonna 2016 elo- ja syyskuussa, vuonna 2017 syyskuussa ja vuonna 2018 kesäkuussa. Näytteenoton yhteydessä vesinäytteistä määritettiin moniparametrimittalaitteella (YSI Professional Plus) lämpötila, liuennut happi, pH, sähkönjohtavuus, ja hapetus-pelkistyspotentiaali (redox).

Projektissa toteutuneen näytteenoton kohdevalintaan vuonna 2020 käytettiin hyödyksi aiempien tutkimustulosten lisäksi GEM-2 sähkönjohtavuusmittausta aiempaa laajemmalla alueella ja lennolla tuotettua lämpökamerakuvaa. Lämpökamerakuvien perusteella ympäristöstä pystyttiin paikantamaan ympäristöä kylmemmät lammikot, joista näytteenottokohteet päämääräisesti valittiin. Näiden lisäksi näytteitä otettiin kaivosalueen pohjoispuolella virtaavasta Levijoesta, kahdesta louhosaltaasta (Kuva 8) ja kahdesta alueen pohjavesiputkesta. Osa näytteistä sijoitettiin kohteisiin, joista näytteitä oli otettu aiempina vuosina tulosten vertailukelpoisuuden vuoksi. Näytteenoton aikana näytevesistä määritettiin samat aiemmin mainitut parametrit WTW Multi 350i-mittalaitteella. Toisena kenttäpäivänä mittalaitteessa ilmeni toimintahäiriö, minkä vuoksi pH määritettiin osasta näytteistä pelkästään laboratoriossa. Kenttätöiden aikana vesinäytteet käsiteltiin vaadituin menetelmin suodattamalla ja kestäväimällä ja toimitettiin näytteenoton päätteeksi kylmälaukussa laboratorioon.





Kuva 8. Näytteenottoa Saattoporan louhosaltaasta syyskuussa 2020.

3.4 Kevitsan tutkimukset

3.4.1 Sähkönjohtavuus

Kevitsan kaivoksen tutkimusalueella mitattiin sähkönjohtavuutta GEM-2-laitteella elokuussa 2020, katso luku 3.3.1.

3.4.2 Dronekuvaukset

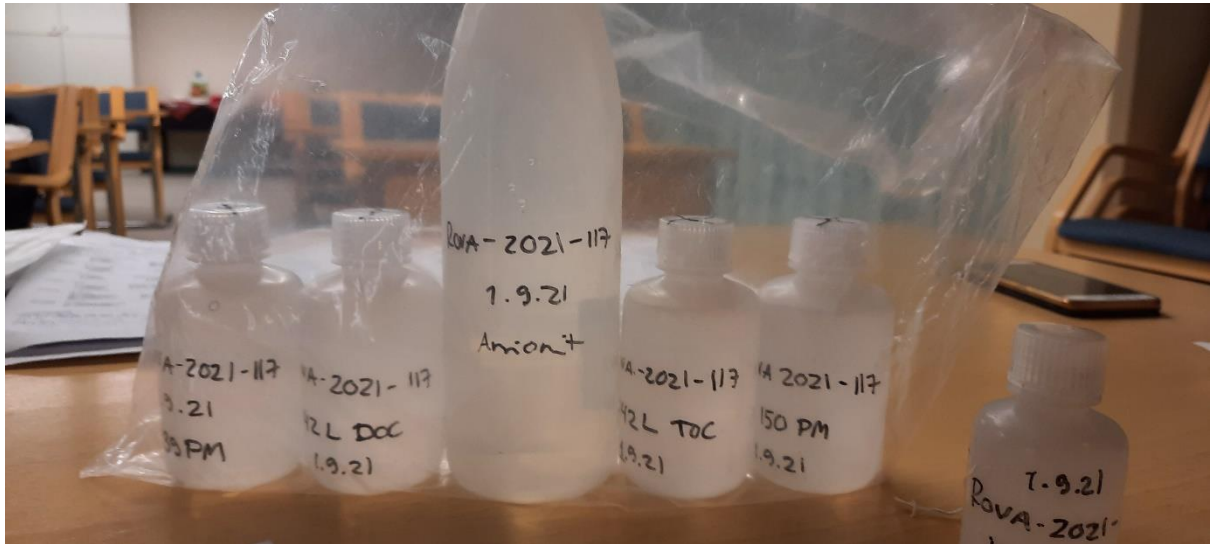
Kevitsassa dronekuvaukset suoritettiin 17.8.2021, noin klo 12:30–19:10 pääosin pilvisissä olosuhteissa. Sodankylän sääaseman mukaan lämpötila kuvausten aikana oli n. 12,3–14,0 °C. Kuvausalueen ilmatilaan oli etukäteen hankittu ns. tilapäinen vaara-alue (TEMPO D) dronetoimintaa varten, mikä mahdollisti dronelainsäädännön salliman 120 m maksimilentokorkeuden ylittämisen. Lämpökameradataa kerättiin käyttäen DJI Matrice 300 RTK -multikopteria sekä DJI Xenmuse H20T monisensorikameraa (Kuva 9), jossa on 650x512 pikselin lämpökamerasensori 13,5 mm linssillä sekä 12 Mpix RGB-sensori 4,5 mm linssillä (24 mm filmikamera ekvivalenttina). Kaikkiaan 3287 lämpökamera ja RGB-kuvaa kerättiin n. 240 metrin lentokorkeudesta kattaen n. 4,7 km² sekä n. 5,5 km² alueet. Sekä lämpökamera että RGB-kuvat käsiteltiin fotogrammetriseen prosessointiin tarkoitetulla Agisoft Metashape Professional -ohjelmistolla.



Kuva 9. Dronekuvaukset Kevitsassa DJI Matrice 300 RTK -multikopterilla (kuva: Anne Tuomela).

3.4.3 Vesinäytteenotto

Kevitsan näytteenotto suoritettiin 31.8–1.9.2021. Vesinäytekohteet valittiin alueelta projektissa kerättyjen lämpökamerakuvien ja GEM-2 sähköjohtavuustiedon perusteella kuten Saattoporan alueella vuotta aikaisemmin tehtiin. Vesinäytteitä kerättiin yhteensä 20 kpl. Näytteitä oli neljästä pohjavesiputkesta (GW1–GW4), jotka sijaitsevat tutkimusalueella rikastushiekka-altaan eteläpuolella. Pohjavesinäytteet GW5 ja GW6 otettiin alueella esiintyvistä lähteistä. Kaivosvettä edustava näyte MW1 otettiin kokooma-altaasta, joka sijaitsee rikastushiekka-altaan padon ulkopuolella ja johon ohjautuu rikastushiekka-altaasta vettä. Pintavesinäytteitä kerättiin joko metsälammikoista (FPW1–FPW5) tai suolammikoista (BPW1–BPW7) ja läheisestä Saiveljärvestä (LW1). Kenttäparametrit mitattiin näytteenoton yhteydessä YSI EXO1 -moniparametrimittalaitteella ja näytteiden käsittely suoritettiin samoin kuin Saattoporan näytteenoton yhteydessä (Kuva 10).



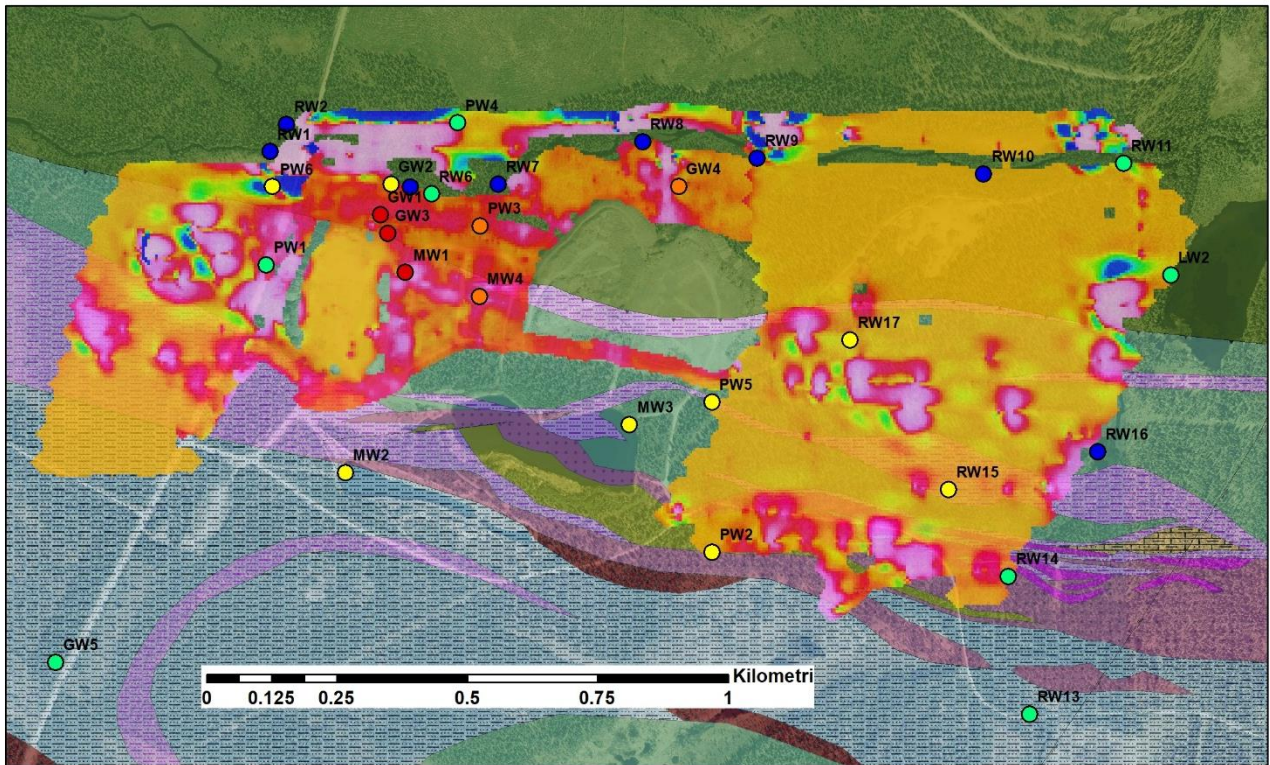
Kuva 10. Kevitsan näytteenottopisteestä 117 (MW1) otetut vesinäytepullot esikäsittelyn jälkeen valmiina laboratoriolähetyskseen.

3.5 Tulokset

3.5.1 Sähkönjohtavuus

GEM-2 mittaukset Saattoporan tutkimuskohteella tehtiin Interreg Min-North-hankkeessa elokuussa 2017 ja 2018 sekä täydennettiin EAKR LeKaT-hankkeessa elokuussa 2020 (Kuvat 11, 12 ja 13). Kevitsan mittaukset tehtiin elokuussa 2020 (Kuvat 14 ja 15). Tulokset prosessoitiin ja interpoloitiin Oasis Montaj –ohjelmistolla. Lopulliset kartta tulosteet laadittiin ArcGIS 10.6.1 -ohjelmistolla. Näennäinen sähkönjohtavuus laskettiin neljän mittaustaaajuuden (1475, 5825, 22225 ja 75525 Hz) vasteista Geophex Ltd.:n EMIinventor-ohjelmalla.

Saattoporan tuloksista nähdään selvästi hyvin sähköä johtavien kivilajien dominoiva vaikutus tuloksiin. Ainoastaan jätekasojen ja Levijoen välisillä alueilla on havaittavissa pinnanläheisiä sähkönjohtavuus ja korkean taajuuden (75525 Hz) anomaliaita, jotka viittaavat suotoon jätekasoilta kohti Levijokea. GEM-2 mittausten ja näytteenottopisteiden sähkönjohtavuuksien vaatimaton korrelaatio (Kuva 15) aiheutuu pääosin näytteenottopisteiden ja GEM-2 mittausten spatiaalisesta erosta.



Sähkönjohtavuus-vesikemia (m S/m)

- 1.3 - 2.7
- 2.7 - 18.8
- 18.8 - 45.8
- 45.8 - 82.3
- 82.3 - 228.5

Sähkönjohtavuus (GEM-2)

mS/m
 Korkea: 15755
 Matala: -1028

Kivilajjyksiköt

Vulkaaninen kivi 2112

- 21123113 T holeiittinen basaltti
- 211234 Mafinen tuffi
- 21124222 Peridotiittinen komatiitti

Puolipinnallinen kivi 2113

- 211321 Doleriitti

Harvinainen magmakivi (BGS) 2114

- 21147 Sulfidimalmi

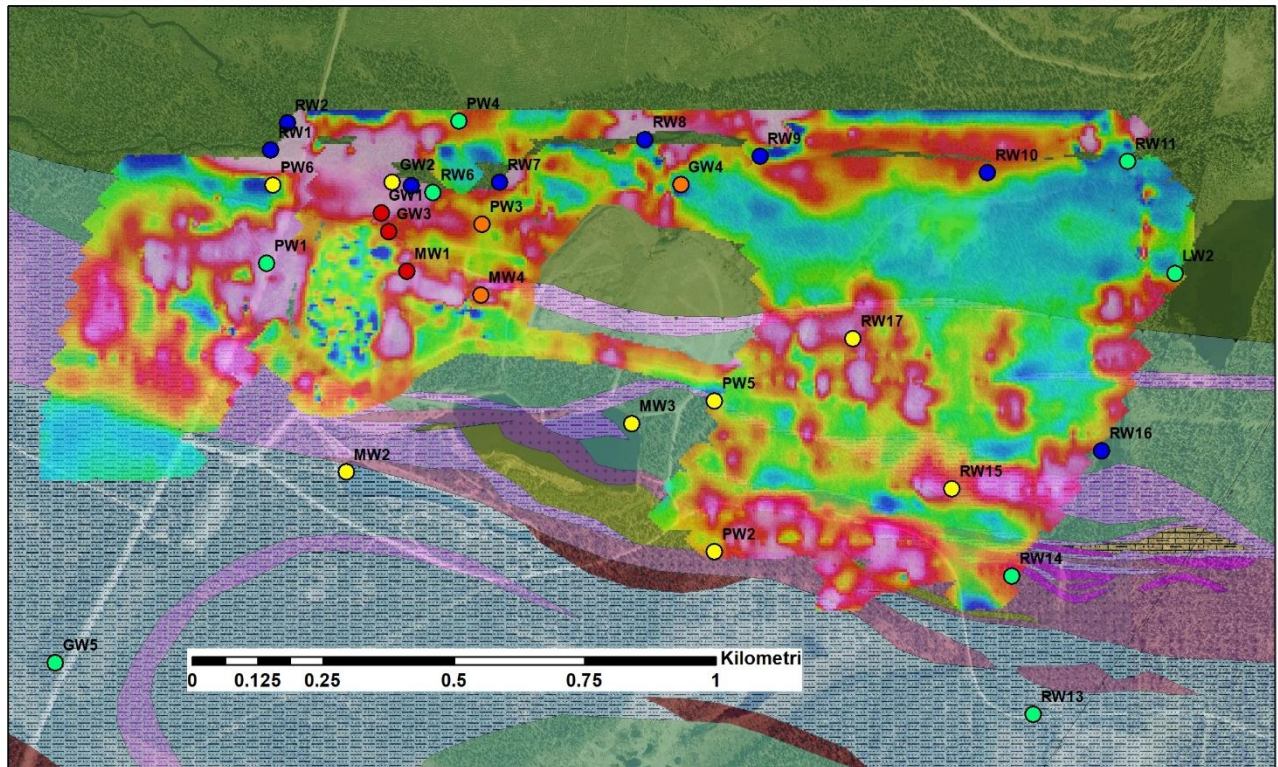
Metamorfinen kivi (sedimenttinen protoliitti-koostumus-tekstuuri) 2134

- 21345 Kalkkisili kaattikivi
- 213482 Fylliitti
- 213486 Grafiittiparaliuske

Metasomaattinen tai hydroterminen kivi 2137

- 213731 Felsinen albitiitti

Kuva 11. Saattoporan GEM-2 mittausten ja vesi-kemian tutkimuspisteiden sähkönjohtavuus.



Saattopora_vesikemia
Sähkönjohtavuus (m S/m)

- 1.3 - 2.7
- 2.7 - 18.8
- 18.8 - 45.8
- 45.8 - 82.3
- 82.3 - 228.5

GEM-2 Q_75525Hz

- ppm
- High : 58797
- Low : -5820

Kivilajiyksiköt

Vulkaaninen kivi 2112

- 21123113 Tholeiittinen basaltti
- 211234 Mafinen tuffi
- 21124222 Peridotiittinen komatiitti

Puolipinnallinen kivi 2113

- 211321 Doleriitti

Harvinainen magmakivi (BGS) 2114

- 21147 Sulfidimalmi

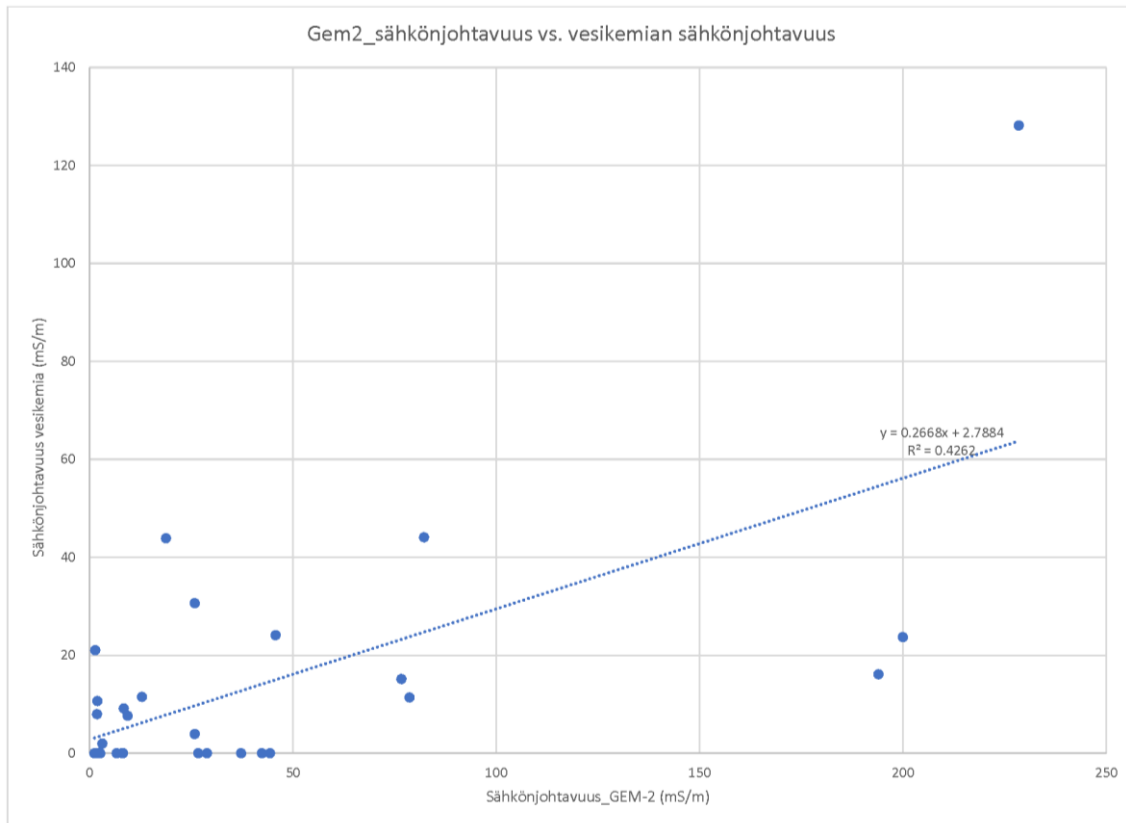
Metamorfinen kivi (sedimenttinen protoliitti-koostumus-tekstuuri) 2134

- 21345 Kalkisiikaattikivi
- 213482 Fylliitti
- 213486 Grafiittiparaliuske

Metasomaattinen tai hydroterminen kivi 2137

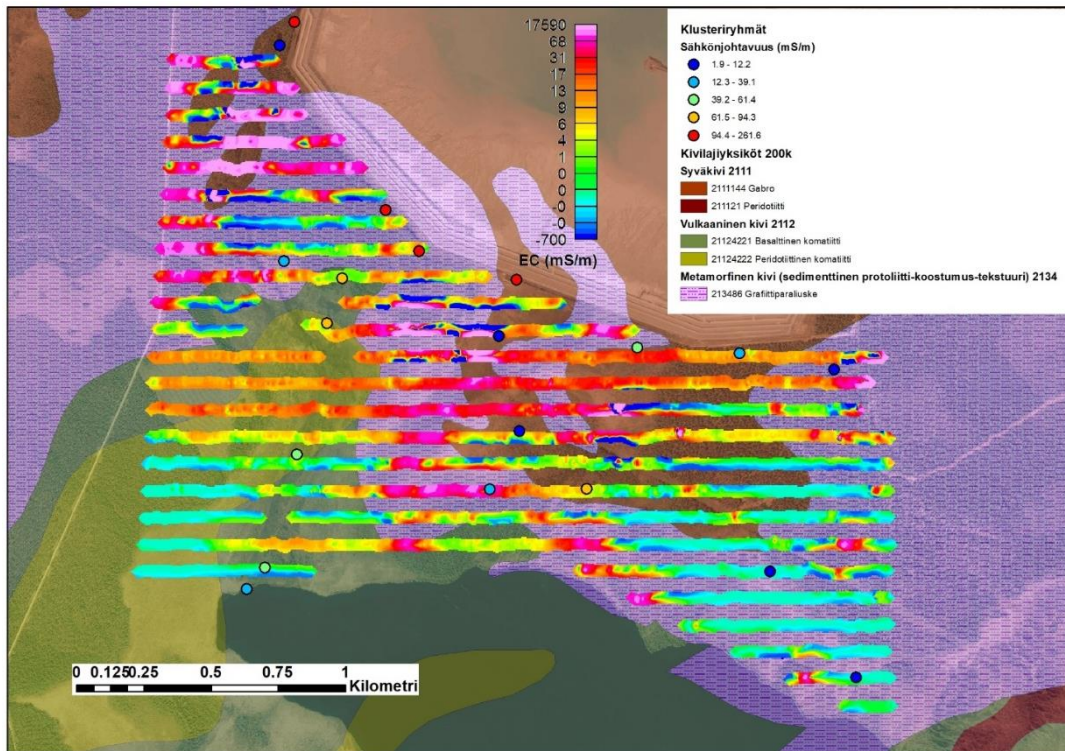
- 213731 Felsinen albitiitti

Kuva 12. Saattoporan GEM-2 mittausten korkean taajuuden (75525 Hz) imaginaarikomponentti.

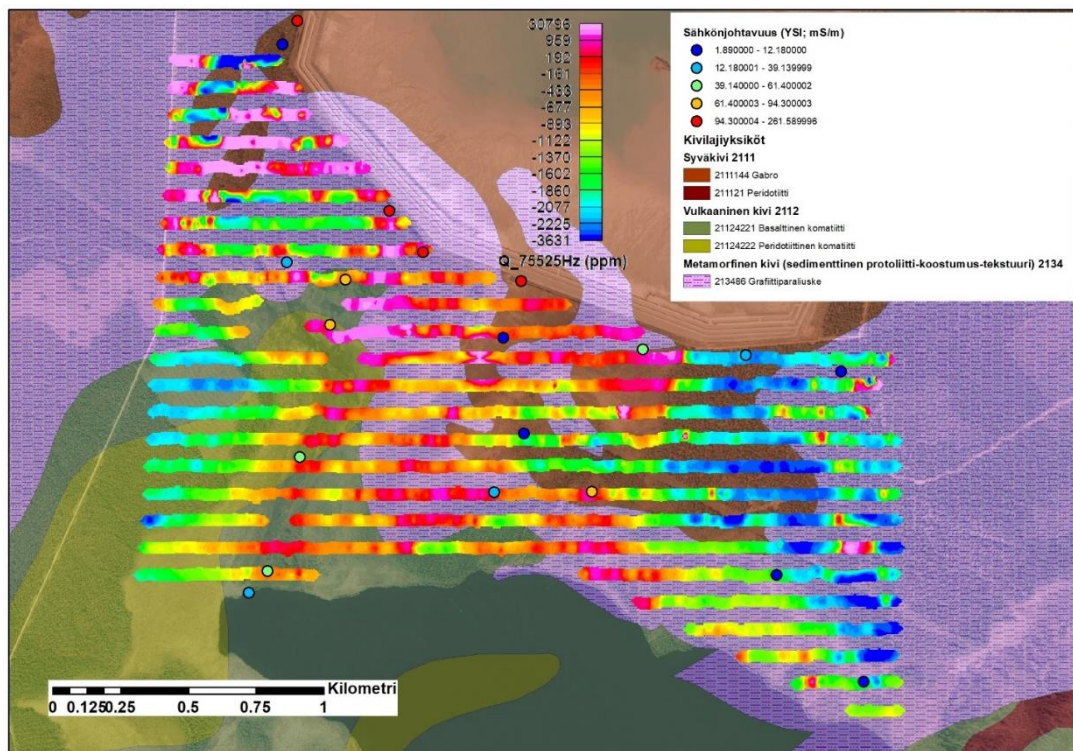


Kuva 13. Saattoporan GEM-2 mittausten ja vesi-kemian tutkimuspisteiden sähkönjohtavuuksien korrelaatio.

Kevitsan tuloksista nähdään selvästi, kuten Saattoporassakin, hyvin sähköä johtavien kivilajien dominoiva vaikutus tuloksiin. Ainoastaan rikastushiekka-altaan eteläpuolella havaitaan sähkönjohtavuudessa merkkejä mahdollisesta pintasuotautumisesta. Sen sijaan korkean taajuuden (75525 Hz) imaginäärikomponentin tuloksissa on havaittavissa pinnanläheisiä anomalioita (Kuva 15), jotka viittaavat mahdolliseen (pinta)suotoon rikastushiekka-altaan reunoilla ja rikastushiekka-altaalta kohti Saiveljärveä pitkin puroumaa. Näyttenottopisteistä mitatut kohonneet sähkönjohtavuudet tukevat tätä tulkintaa.



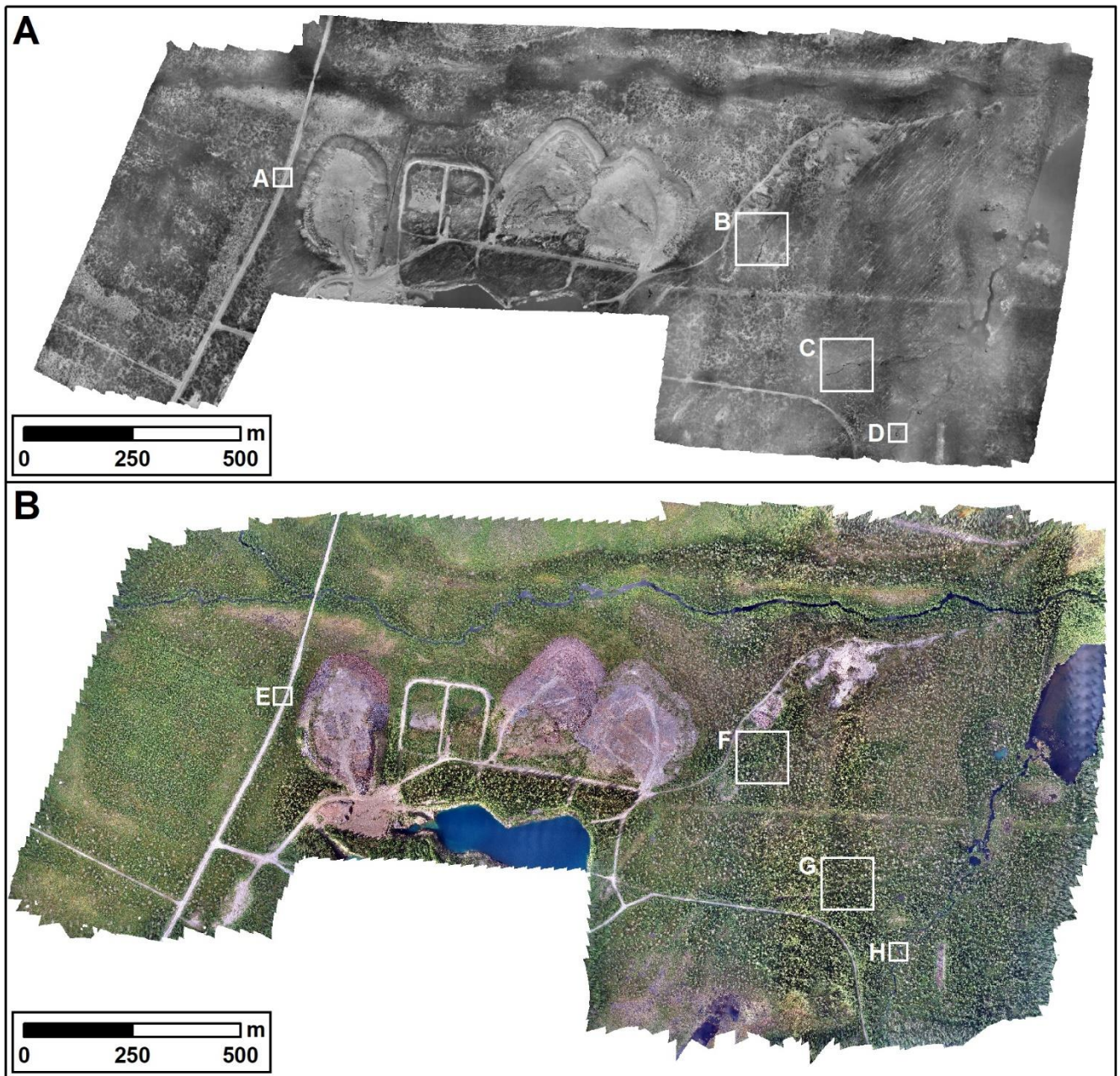
Kuva 14. Kevitsan GEM-2 mittausten ja vesi-kemian tutkimuspisteiden sähkönjohtavuus.



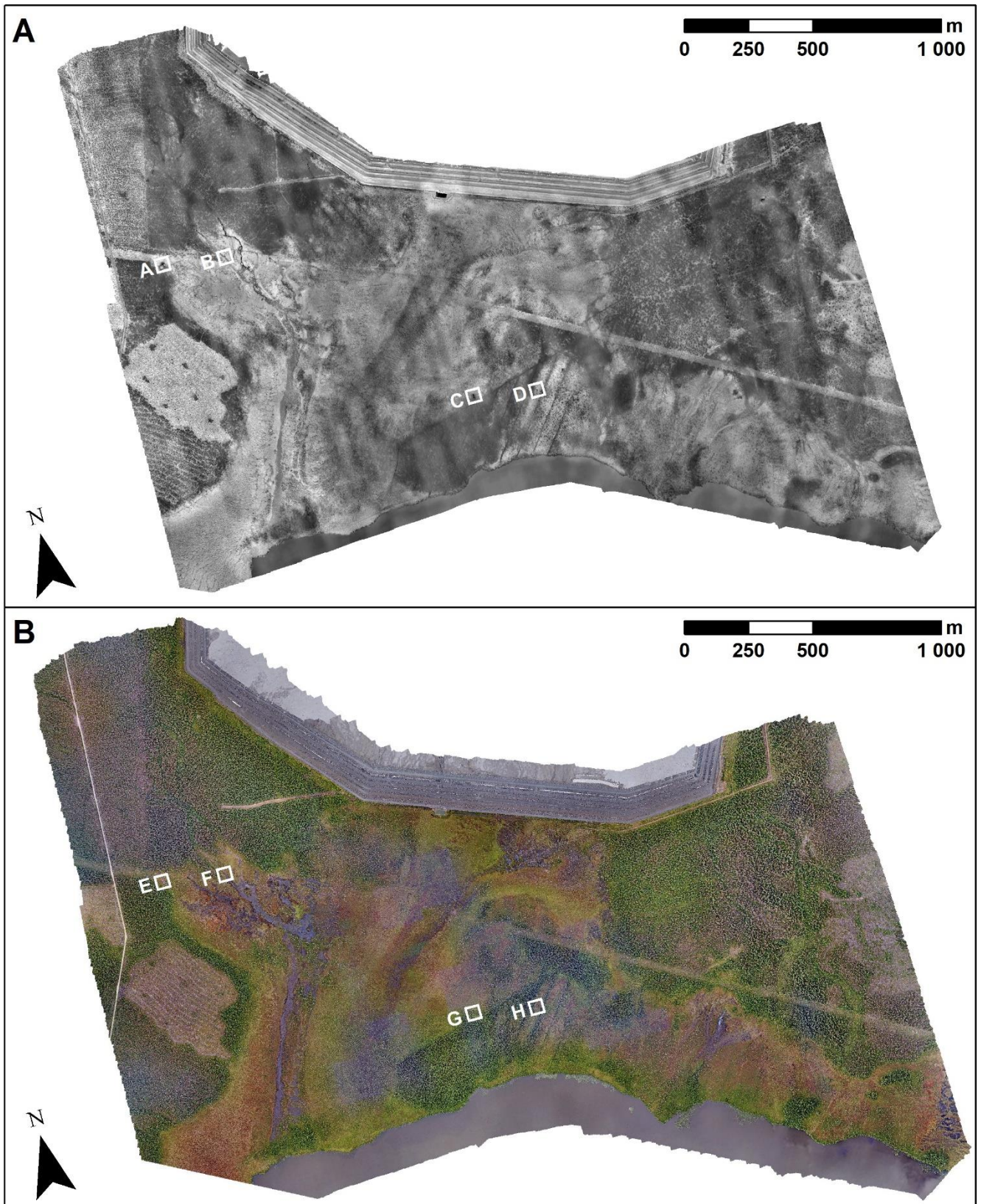
Kuva 15. Kevitsan GEM-2 mittausten korkean taajuuden (75525 Hz) imaginäärikomponentti ja vesi-kemian tutkimuspisteiden sähkönjohtavuus

3.5.2 Dronekuvaukset

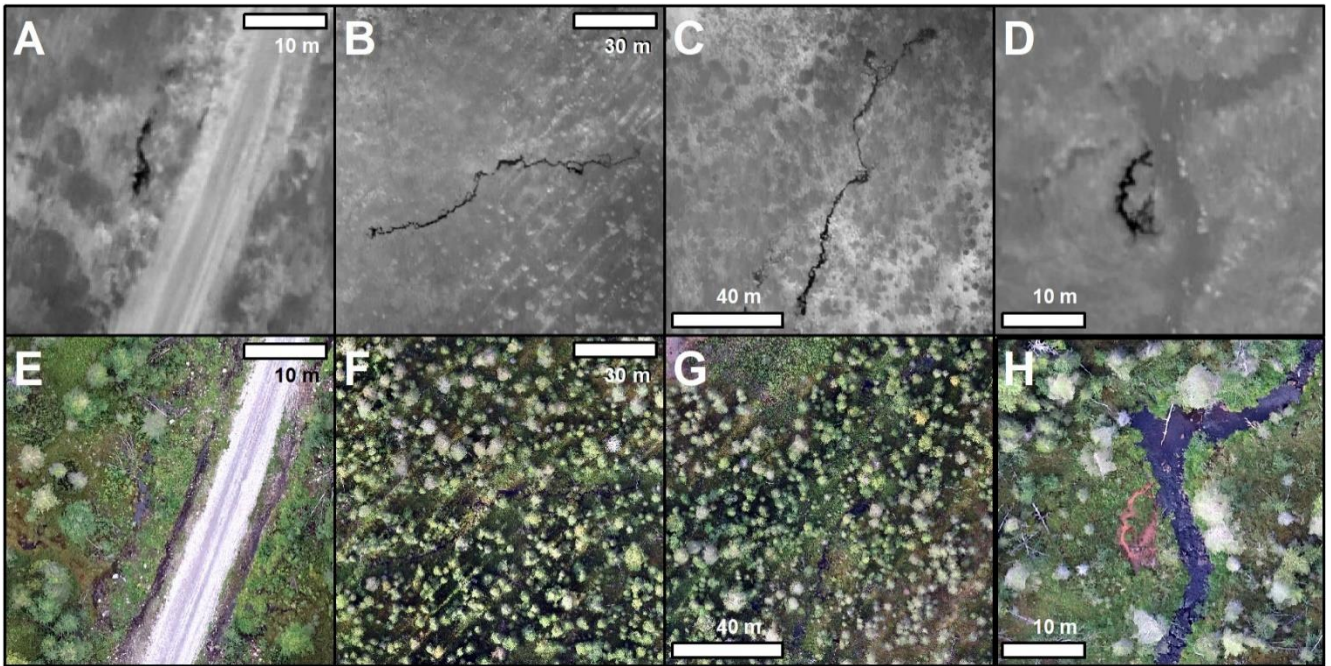
Saattoporan dronekuvausten lopputuotteena luotujen mosaiikkien resoluutiot olivat 18,7 cm lämpökamera-aineistolle ja 3,7 cm RGB-mosaiikille (Kuva 16). Kevitsan dronekuvauksista vastaavat mosaiikkien resoluutiot olivat 20,6 cm lämpökamera-aineistolle ja 7,8 cm RGB-mosaiikille (Kuva 17). Kylmien pisteiden, eli potentiaalisten pohjavesilähteiden tai pohjavesipintavesi sekoittumisalueiden tunnistaminen tapahtui lämpökuvamosaiikista visuaalisen tulkinnan avulla (Kuvat 16A-D & 17A-D).



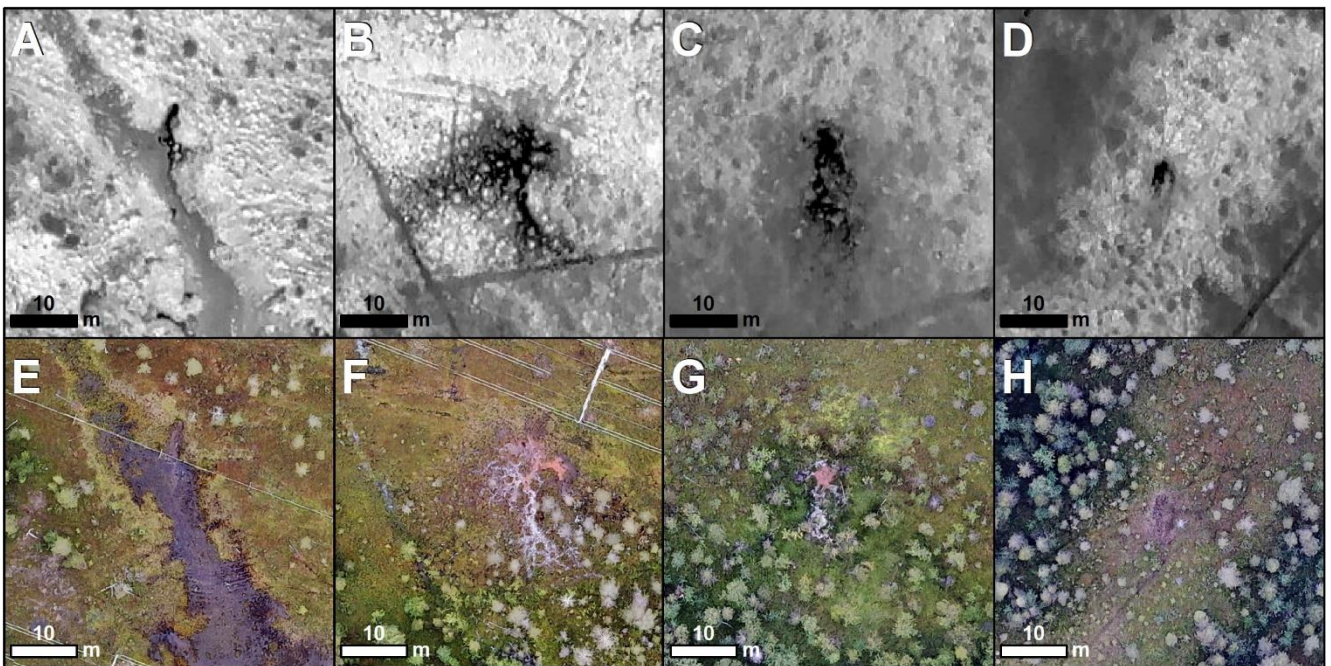
Kuva 16. A) Saattoporan dronekuvauksista luotu lämpökuvamosaiikki sekä B) RGB-ortokuvamosaiikki. Valkoiset neliöt näyttävät kuvan 18 lähikuvien sijainnit.



Kuva 17. A) Kevitsan dronekuvauksista luotu lämpökuvamosaiikki sekä B) RGB-ortokuvamosaiikki. Valkoiset neliöt näyttävät kuvan 19 lähikuvien sijainnit.



Kuva 18. A–D) Esimerkkejä Saattoporan lämpökamera-aineistossa näkyvistä kylmistä pisteistä sekä E–H) vastaavat alueet RGB-kuvissa.



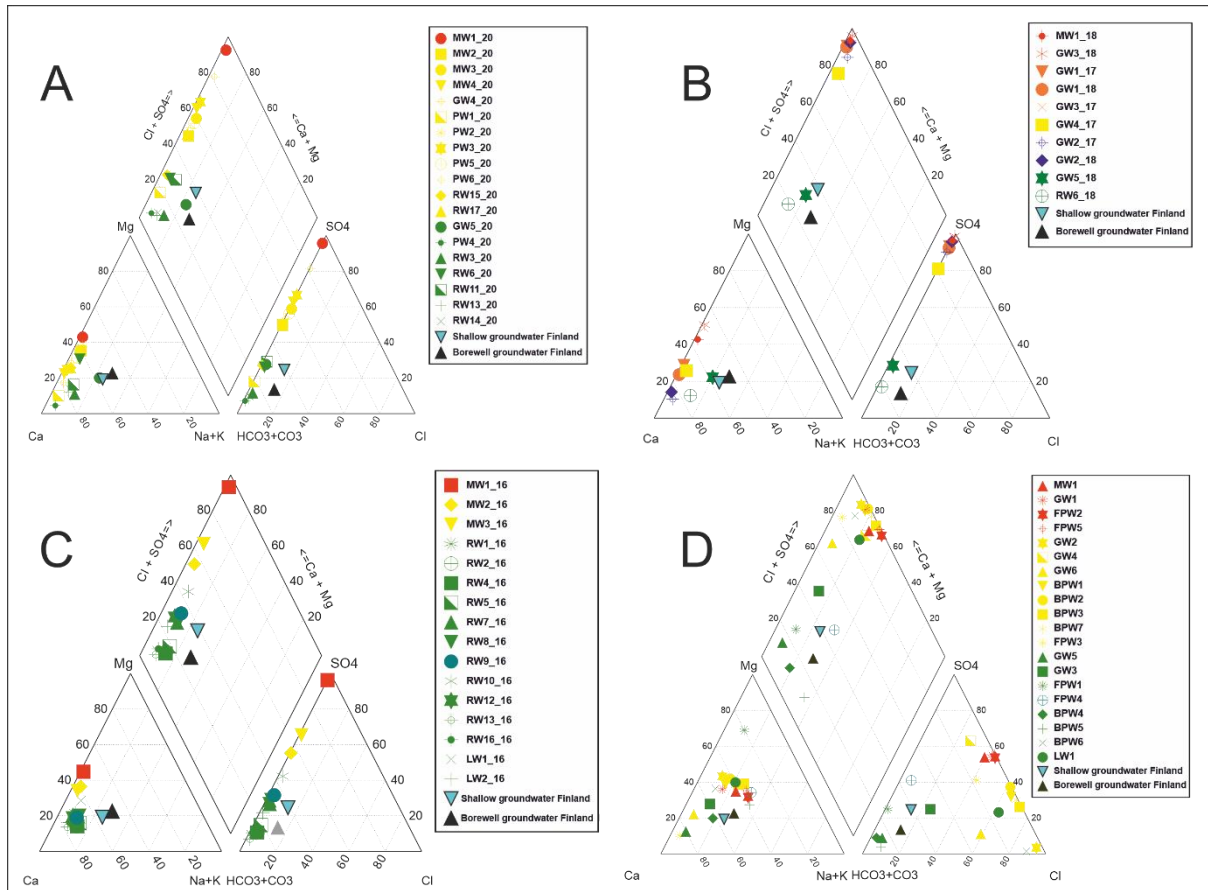
Kuva 19. A–D) Esimerkkejä Kevitsan lämpökamera-aineistossa näkyvistä kylmistä pisteistä sekä E–H) vastaavat alueet RGB-kuvissa.

3.5.3 Vesinäytteenotto

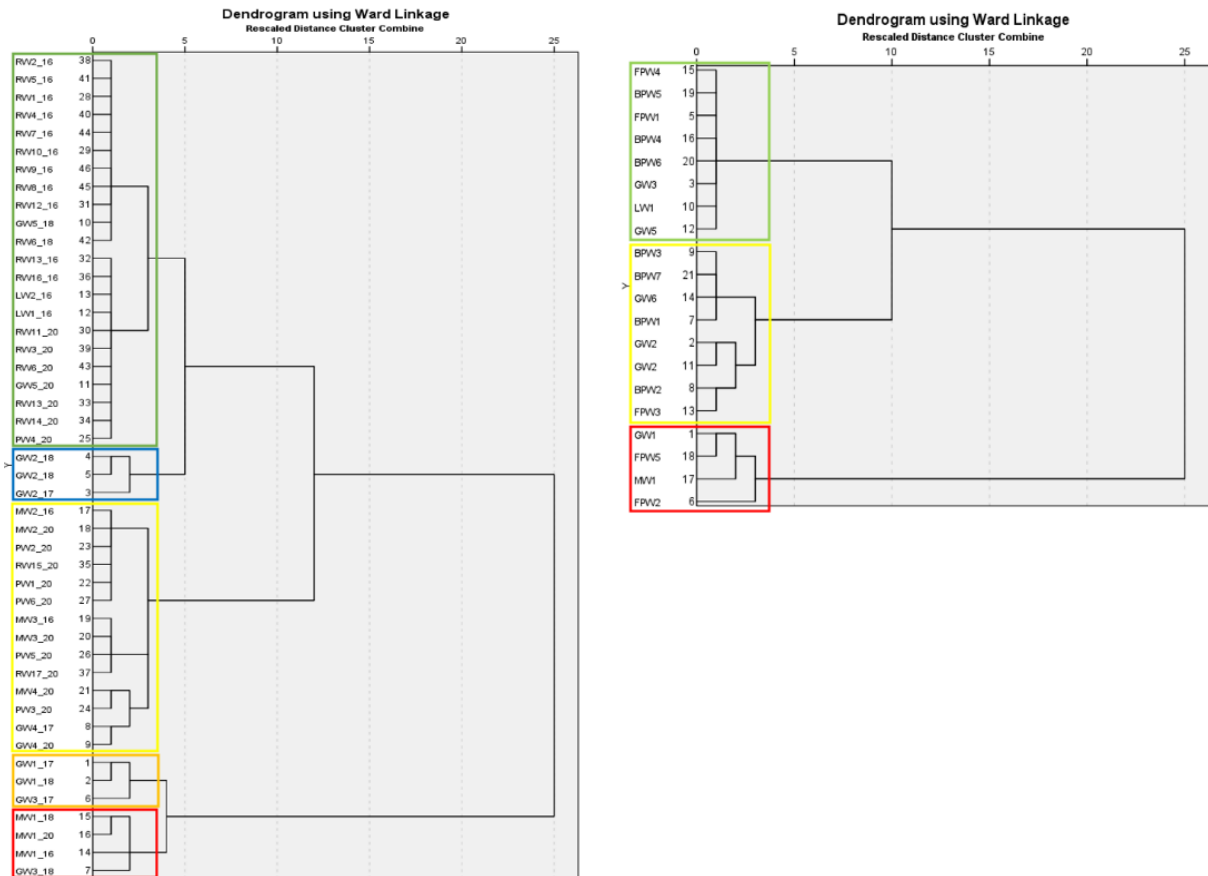
3.5.3.1 Pääionit ja klusterointi

Molempien tutkimusalueiden jokaisesta näytekohteesta kerättiin yhteensä 6 näytepulloa eri analyysejä varten. Vesinäytteiden laboratoriomääritykset, pois lukien isotooppimääritykset, teetettiin akkreditoitussa Eurofins Labtium Oy laboratoriossa. Isotooppimääritykset (O, H, Sr ja S) tehtiin Geologian tutkimuskeskuksen Espoon laboratoriossa käsittelemättömistä näytteistä. Suodatetuista (0,45 µm) ja typpihapolla (0,5 ml/100 ml HNO₃) kestäväidystä näytteistä määritettiin 34 alkuaineen liukoiset pitoisuudet ICP-MS- ja ICP-OES-menetelmillä. Kokonaispitoisuudet 33 alkuaineelle määritettiin samoilla menetelmillä märkäpoltetuista suodattamattomista ja typpihapolla kestäväidystä näytteistä. Anionit: Br, Cl, F, NO₃ ja SO₄ määritettiin suodattamattomista ja kestävimättömistä näytteistä ioninvaihtokromatografisella menetelmällä. Käsittelemättömistä näytteistä määritettiin myös alkaliteetti ja KMnO₄-arvo titrimetrisesti ja väriluku, sähkönjohtavuus ja kiintoainepitoisuus spektrofotometrisesti. Liukoisen orgaanisen hiilen (DOC) pitoisuus määritettiin suodatetuista (0,45 µm) ja fosforihapolla (0,5 ml/100 ml H₃PO₄) kestäväidystä näytteistä standardin SFS-EN 1484 mukaisesti. Orgaanisen hiilen kokonaispitoisuus (TOC) määritettiin edellä mainitulla menetelmällä suodattamattomista ja fosforihapolla kestäväidystä näytteistä.

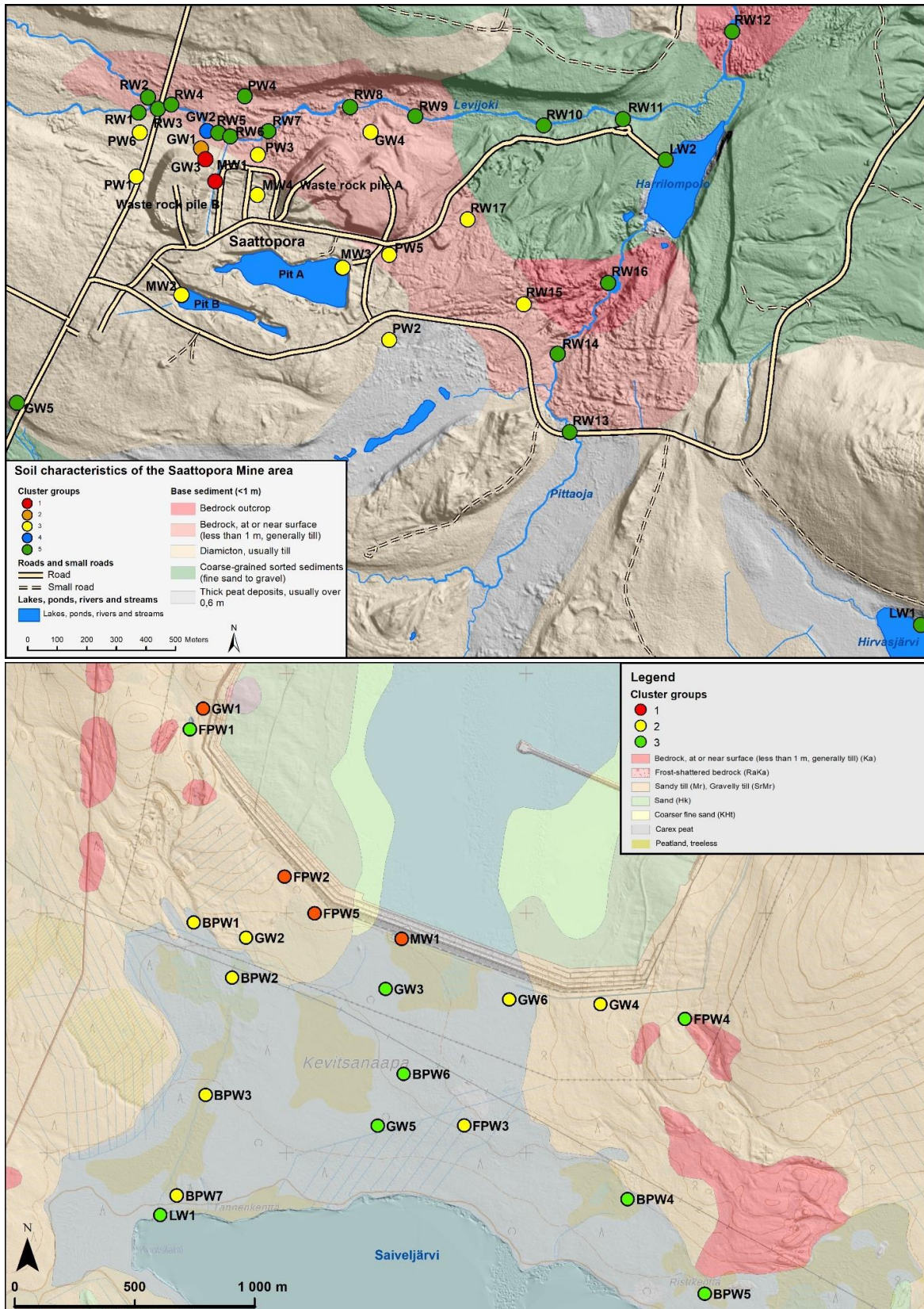
Vesinäytteistä analysoitu vesikemia analysoitiin SPSS, Aquachem ja MS-excel ohjelmilla. Hierarkiseen klusterianalyysiin valittiin muuttujiksi vesinäytteistä analysoidut pääioneiden pitoisuudet sekä kenttämittareilla mitatut sähkönjohtavuus arvot. Saattoporan vesinäytteisiin valikoitu viisi klusteriluokkaa, joiden väriluokitus ja jako on esitetty kuvissa 20, 21 ja 22. Kevitsan klusteriluokitus jaoteltiin kolmeen ryhmään (Kuva 21). Vesityypiltään Saattoporan vesinäytteet sijoittuvat melko lähelle Suomen pohjavesireferenssiä (Kuva 20) lukuun ottamatta klusteriryhmiä 1 ja 2 jotka näkyvät kuvan 18 Piper-diagrammissa sulfaattipitoisempina Ca-SO₄ tyyppin vesinä. Kevitsan vesinäytteet ovat klusteriryhmä 3 osalta lähellä pohjavesireferenssi Ca-HCO₃ vesityyppiä lukuun ottamatta Saiveljärven LW1 vesinäytettä, joka sijaitsee diagrammissa lähempänä 1 ja 2 ryhmän vesinäytteitä. Nämä ryhmät 1 ja 2 sijoittuvat sulfaattikloridi pitoisuudeltaan suuremmiksi Ca-SO₄-Cl tyyppin vesiksi (Kuva 20).



Kuva 20. Vesinäytteiden pääionipitoisuuksista tehdyt Piper-diagrammit. Saattoporan vesinäytteet diagrammeissa A–C (A 2016, B 2017 ja 2018, C 2020 näytteenotto) ja Kevitsan vesinäytteet diagrammissa D.



Kuva 21. Histogrammiesitys klusteriluokituksesta. Saattoporan vesinäytteet vasemmalla ja Kevitsan oikealla. Luokitus tehtiin SPSS-ohjelmalla ja siihen otettiin mukaan vesinäytteiden pääionit ja sähkönjohtavuus arvot.



Kuva 22. Näytteenotuspisteet klusteriluokituksittain maaperäkartalla. Ylempi Saattoporan (5 klusteriluokkaa) ja alempi Kevitsan (3 klusteriluokkaa) tutkimusalueilta.

3.5.3.2 Isotoopit

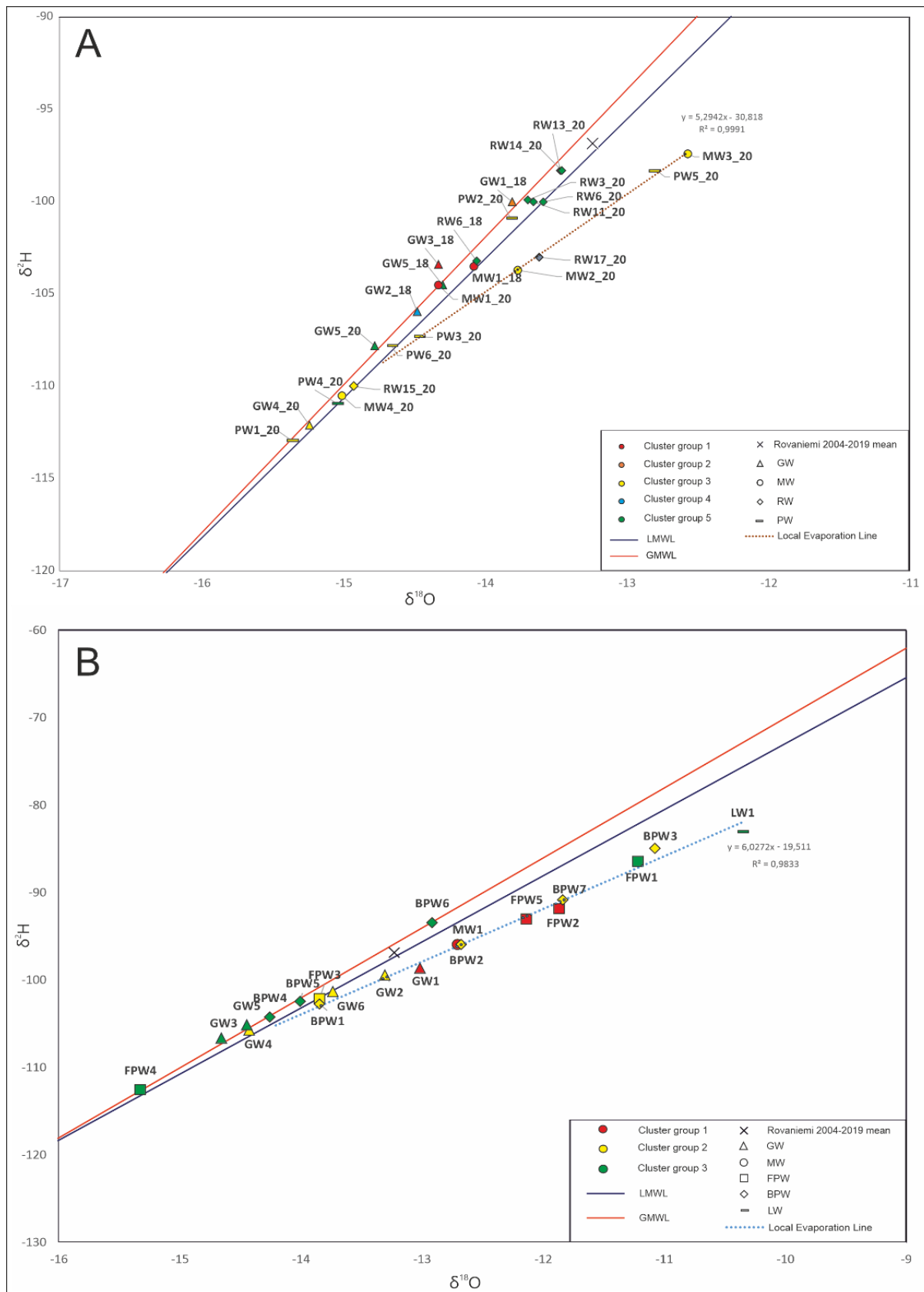
Hapen ja vedyn isotooppikoostumuksissa nähdään Saattoporan vesinäytteissä suurta hajontaa (Taulukko 1, Kuva 23). Tulokset ovat esitettyinä kuvassa 20 globaalia meteoristen vesien suoraa (GMWL) ja lokaalia meteoristen vesien suoraa (LMWL) vasten. Näiden suorien päälle tai välittömään läheisyyteen sijoittuvat isotooppikoostumukset indikoivat vesinäytteen olevan sadantaa vastaavaa haihtumatonta vettä. Hajonta suoralla voi kertoa veden eri kierron vaiheista peräisin olevasta vedestä (vrt. kevät-kesä-syys-talvi sadanta). Mikäli näytteen isotooppikoostumus sijoittuu suoran alapuolelle, on kyse eriaisteisesta haihtumisesta. Haihtumista kuvaa myös taulukkoon 1 laskettu d-excess arvo. Mikäli d-excess on 10 ± 1 ‰ edustaa näyte haihtumatonta vettä (pohjavesi, sadannan vesi) ja mikäli se on selkeästi alle 10 on kyseessä haihdunutta läpikäynyt vesi. D-excess voi saada myös negatiivisia arvoja. Usein tutkimusalueen vesinäytteistä piirtyy ns. lokaali haihtumissuora (LEL), jonka päätejäseneksi muodostuu jokin pintavesinäyte. Saattoporan tapauksessa päätejäseneksi muodostuu näyte MW3_20, joka on peräisin kaivosalueen suuremmasta louhosaltaasta. Haihtumissuoralle sijoittuu myös näytteet PW5_20, RW17_20, MW2_20 ja PW3_20. Näistä MW2_20 on pienempi louhosallas, PW3_20 ja PW5_20 lammikkoja, joissa on ollut seisovaa vettä ja RW17_20 purovettä, jossa on ollut heikko virtaama. Merkille pantavaa on myös Levijoen näytteiden esiintyminen meteoristen vesien suorilla. Tämä kertoo sadannan vahvasta vaikutuksesta Levijoen veden isotooppikoostumuksessa.

Taulukko 1. Tutkittujen aineiden (H, O, Sr, S) isotooppikoostumukset sekä Sr ja S pitoisuudet vesinäytteissä.

| Sample ID | date | $\delta^2\text{H}$, in ‰ | $\delta^{18}\text{O}$, in ‰ | d-excess | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | Sr ($\mu\text{g/l}$) | $\delta^{34}\text{S}$ | S (mg/l) |
|-------------------|----------|---------------------------|------------------------------|----------|---------------------------------|------------------------|-----------------------|----------|
| Saattopora | | | | | | | | |
| GW1_18 | 6.6.2018 | -100.0 | -13.80 | 10.40 | 0.72369 | 92.2 | 1.46 | 366 |
| GW2_18 | 6.6.2018 | -106.0 | -14.47 | 9.76 | 0.71806 | 52 | 2.49 | 62.8 |
| GW3_18 | 6.6.2018 | -103.4 | -14.32 | 11.16 | 0.73109 | 128 | 4.00 | 342 |
| GW5_18 | 6.6.2018 | -104.5 | -14.29 | 9.82 | 0.74273 | 11.6 | 10.10 | 2.68 |
| MW1_18 | 5.6.2018 | -103.5 | -14.07 | 9.06 | 0.72141 | 248 | 0.72 | 451 |
| RW6_18 | 6.6.2018 | -103.2 | -14.05 | 9.20 | 0.72217 | 10.1 | -0.54 | 1.39 |
| GW4_20 | 9.9.2020 | -112.1 | -15.23 | 9.74 | 0.72718 | 93.1 | 2.85 | 118 |
| GW5_20 | 9.9.2020 | -107.8 | -14.77 | 10.36 | 0.75058 | 12.6 | 3.84 | 2.76 |
| MW1_20 | 8.9.2020 | -104.5 | -14.32 | 10.06 | 0.72090 | 260 | 0.80 | 474 |
| MW2_20 | 9.9.2020 | -103.7 | -13.76 | 6.38 | 0.73913 | 27.4 | 1.53 | 25.2 |
| MW3_20 | 8.9.2020 | -97.4 | -12.56 | 3.08 | 0.73314 | 56.9 | 1.76 | 46.4 |
| MW4_20 | 8.9.2020 | -110.5 | -15.00 | 9.50 | 0.71758 | 128 | 2.43 | 115 |
| RW3_20 | 9.9.2020 | -99.9 | -13.69 | 9.62 | 0.72292 | 12.6 | 2.39 | 1.26 |
| RW6_20 | 8.9.2020 | -100.0 | -13.58 | 8.64 | 0.72210 | 19.8 | 1.97 | 13 |
| RW11_20 | 8.9.2020 | -100.0 | -13.65 | 9.20 | 0.72150 | 15.2 | 1.08 | 4.02 |
| RW13_20 | 8.9.2020 | -98.3 | -13.46 | 9.38 | 0.73021 | 18.2 | 7.97 | 1.3 |

| | | | | | | | | |
|----------------|-----------|--------|--------|-------|---------|-------|-------|--------|
| RW14_20 | 8.9.2020 | -98.3 | -13.45 | 9.30 | 0.73037 | 18.9 | 6.83 | 1.52 |
| RW15_20 | 8.9.2020 | -110.0 | -14.92 | 9.36 | 0.72417 | 33.1 | -0.15 | 13.4 |
| RW17_20 | 8.9.2020 | -103.0 | -13.61 | 5.88 | 0.71959 | 56.8 | 1.58 | 31.8 |
| PW1_20 | 9.9.2020 | -112.9 | -15.36 | 9.98 | 0.71617 | 24.5 | -0.08 | 6.21 |
| PW2_20 | 8.9.2020 | -100.9 | -13.81 | 9.58 | 0.74578 | 21.7 | -3.04 | 13.4 |
| PW3_20 | 8.9.2020 | -107.3 | -14.46 | 8.38 | 0.71913 | 128 | 2.54 | 110 |
| PW4_20 | 9.9.2020 | -110.9 | -15.04 | 9.42 | 0.71257 | 20.8 | 1.44 | 1.54 |
| PW5_20 | 9.9.2020 | -98.3 | -12.78 | 3.94 | 0.72824 | 68.2 | 1.42 | 48.2 |
| PW6_20 | 9.9.2020 | -107.8 | -14.65 | 9.40 | 0.71724 | 39 | 1.58 | 30.9 |
| Kevitsa | | | | | | | | |
| GW1 | 31.8.2021 | -98.6 | -13.02 | 5.56 | 0.72893 | 724.8 | 4.7 | 187.75 |
| GW2 | 31.8.2021 | -99.4 | -13.31 | 7.08 | 0.76332 | 186.9 | 14.9 | 3.52 |
| GW3 | 31.8.2021 | -106.6 | -14.66 | 10.68 | 0.76939 | 14.8 | 18.7 | 8.82 |
| GW4 | 31.8.2021 | -105.7 | -14.43 | 9.74 | 0.76021 | 82.8 | 4.4 | 21.45 |
| GW5 | 31.8.2021 | -105.1 | -14.45 | 10.50 | 0.74269 | 37.0 | 19.8 | 3.87 |
| GW6 | 1.9.2021 | -101.3 | -13.74 | 8.62 | 0.7525 | 76.5 | 15.7 | 9.52 |
| FPW1 | 31.8.2021 | -86.4 | -11.22 | 3.36 | 0.72522 | 3.0 | 11.2 | 1.01 |
| FPW2 | 1.9.2021 | -91.8 | -11.87 | 3.16 | 0.73228 | 884.0 | 4.8 | 241.00 |
| FPW3 | 31.8.2021 | -102.1 | -13.85 | 8.70 | 0.75210 | 149.0 | 5.4 | 59.90 |
| FPW4 | 1.9.2021 | -112.5 | -15.33 | 10.14 | 0.73639 | 7.1 | 16.2 | 1.92 |
| FPW5 | 1.9.2021 | -93 | -12.14 | 4.12 | 0.74022 | 658.5 | 6.1 | 203.50 |
| BPW1 | 1.9.2021 | -102.7 | -13.85 | 8.10 | 0.74686 | 214.5 | 10.7 | 33.25 |
| BPW2 | 31.8.2021 | -95.9 | -12.68 | 5.54 | 0.74681 | 222.5 | 10.5 | 47.25 |
| BPW3 | 1.9.2021 | -85.1 | -11.14 | 4.02 | 0.74274 | 124.0 | 15.5 | 19.18 |
| BPW4 | 1.9.2021 | -104.2 | -14.26 | 9.88 | 0.74235 | 11.3 | 15.3 | 0.98 |
| BPW5 | 1.9.2021 | -102.4 | -14.01 | 9.68 | 0.73731 | 6.6 | 10.1 | 0.29 |
| BPW6 | 31.8.2021 | -93.4 | -12.92 | 9.96 | 0.72574 | 11.9 | 9.2 | 0.35 |
| BPW7 | 1.9.2021 | -90.8 | -11.84 | 3.92 | 0.74441 | 136.5 | 13.6 | 21.87 |
| MW1 | 1.9.2021 | -95.9 | -12.71 | 5.78 | 0.73751 | 415.5 | 5.4 | 160.50 |
| LW1 | 1.9.2021 | -83 | -10.35 | -0.20 | 0.74034 | 41.3 | 14.2 | 5.81 |

Kevitsan vesinäytteiden hapen ja vedyn isotooppikoostumuksissa nähdään pienimuotoisempaa hajontaa. Meteoristen vesien suorille osuvat "äärijäsenet" BPW6 ja FPW4 ovat mahdollisesti eri kierron vettä edustavia näytteitä. Haihtumissuoran päätejäseneksi muodostuu pintavesinäyte Saiveljärvestä LW1. Eriasteista haihtumista on nähtävissä myös näytteissä BPW3, FPW1, BPW7, FPW2, FPW5, MW1, BPW2, GW1, GW2 ja BPW1. MW1 edustaa kaivoksen rikastushiekka-altaan ulkopuolella sijaitsevan kokooma-altaan vettä, jossa on selkeä haihduntakomponentti. BPW-näytteet ovat suolammikkovesiä ja FPW-näytteet metsälammikko vesiä, joihin purkautuu eriasteisesti pohjavettä ja näissä on vaihtelevan suuruinen haihduntakomponentti. Vesinäytteet GW1 ja GW2 ovat pohjavesiputkista, joissa nähdään myös selkeä pintavesikomponentti. Lähdevesinäytteet GW5 ja GW6 sijaitsevat suorien välittömässä läheisyydessä ja ne edustavat haihtumatonta pohjavettä.



Kuva 23. Vesinäytteistä analysoidut hapen ja vedyn isotooppikoostumukset (A – Saattopora, B – Kevitsa).

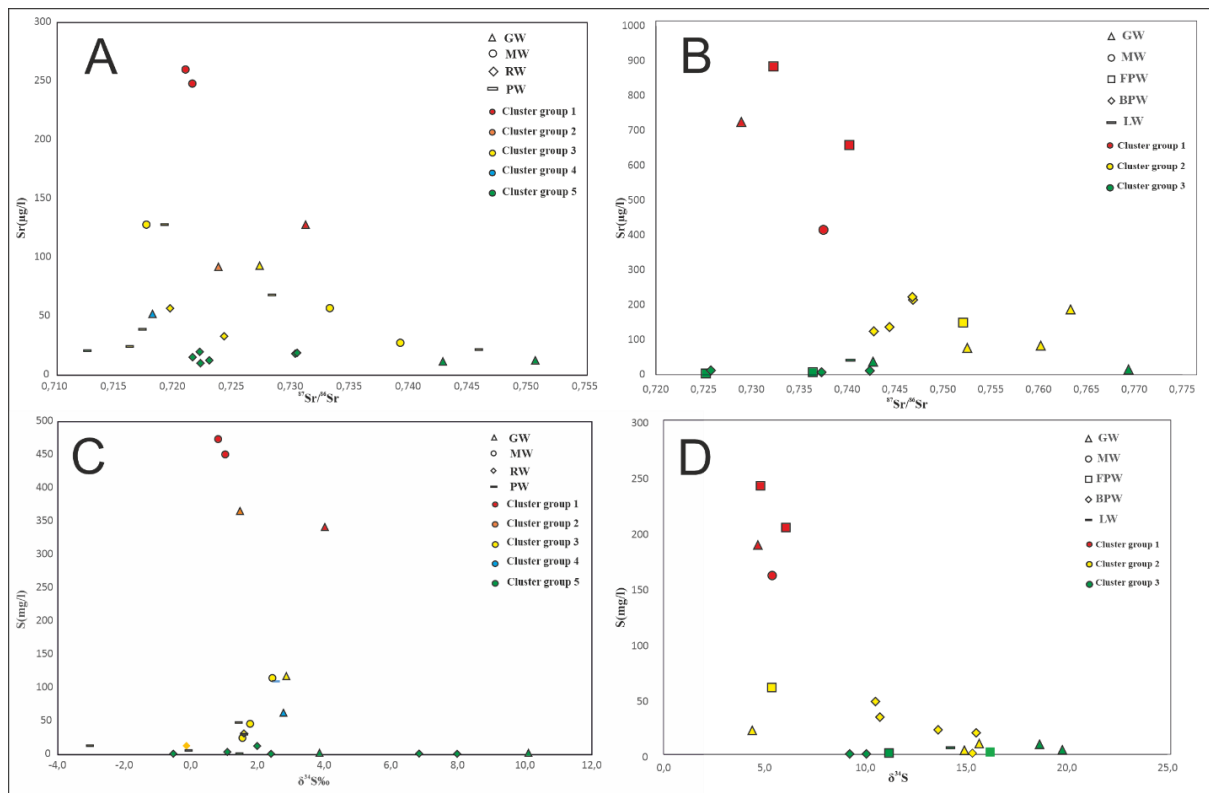
Vesinäytteistä analysoitujen strontiumin ja rikin isotooppikoostumuksissa nähdään suurta hajontaa. Saattoporan vesinäytteiden Sr ja S isotooppikoostumukset ovat kuvan 24 kohdissa A ja C esitettyinä niiden analysoituja pitoisuuksia vasten ja Kevitsan vesinäytteiden vastaavat analyysit saman kuvan kohdissa B ja D. Strontiumin isotooppikoostumus vaihtelee Saattoporan vesinäytteissä välillä 0,71257–0,75058, pitoisuuden vaihteluvälin ollessa 10,1–260 µg/l. Kevitsan vesinäytteiden strontiumin vastaavat vaihteluvälit ovat 0,72522–0,76939 ja 3,05–884 µg/l. Rikin isotooppikoostumuksen vaihteluväli Saattoporan vesinäytteissä on -3,04–10,1 ja pitoisuuden 1,26–474 mg/l. Kevitsan vesinäytteiden rikin vastaavat vaihteluvälit ovat 4,40–19,8 ja 0,29–241 mg/l.

Saattoporan alueen sadannan strontiumin isotooppikoostumuksen voi Levijoen ja pohjavettä edustavien vesinäytteiden pohjalla arvioida olevan noin 0,720. Tutkimusalueen geologia määrittää vesinäytteiden strontiumin isotooppikoostumusta niin, että felsisemmän kiviaineksen (fylliitti ja felsinen albiitti) alueelta otetut vesinäytteet PW2 ja GW5 ovat selkeästi raskaimmat isotooppikoostumuksiltaan. Felsinen mineraaliaines saa aikaan raskaammat isotooppikoostumukset strontiumille, kun taas mafisempi kiviaines aiheuttaa kevyemmän tai alhaisemman isotooppikoostumuksen. Mafista kiviainesta Saattoporan alueella edustaa mustaliuske, joka aiheuttaa myös anomaliaita GEM-2 sähköjohtavuus arvoihin. Kevitsan kiviaines on pääasiassa mafista mustaliusketta, komatiittia, gabroa ja peridotiittia mutta alueella Kevitsan vesinäytteissä nähdään myös melko korkeita strontiumin isotooppikoostumuksia. Tämä saattaa osaltaan aiheutua rubidiumin esiintymisestä mineraaliaineksessa, joka aiheuttaa radiogeenisemmän isotoopin ⁸⁷Sr runsaampaa esiintymistä. Lapin vihreäkivivyöhykkeen strontiumin isotooppikoostumus on Kaisalniemen (2011) mukaan noin 0,7203–0,7429 ja Saattoporan malmikiven Sr isotooppikoostumus osuu tälle välille. Kevitsan malmikiven Sr-isotooppikoostumus on matala (n. 0,710), mutta tämä vaikutus ei selkeästi ole näkyvissä tässä otetuissa vesinäytteissä, joiden arvot ovat selkeästi korkeammat.

Rikin isotooppikoostumus vaihtelee sadannassa välillä 4–10. Saattoporan malmikiven isotooppi vaihteluväli rikin osalta on noin 2–4 ja Kevitsassa 4–4,5. Paikallisesti rikin suurta hajontaa selittää redox-olosuhteiden, eli hapetus-pelkistysolosuhteiden vaihtelu ja tärkeimpänä mikrobialinen sulfaatin pelkistys, mikä saa aikaan raskaampia isotooppikoostumuksia kevyemmän isotoopin (³²S) poistuessa prosessin myötä liuksesta.

Molempien tutkimusalueiden strontiumin ja rikin isotooppitulosten osalta voidaan nähdä klusteriluokituksen avulla päätejäsenet, jotka muodostavat molemmissa ryhmän 1 luokan näytteet ja toisaalta ryhmän 5 (Saattopora) ja ryhmän 3 (Kevitsa) vesinäytteet. Ryhmä 1 luokitellaan molemmilla tutkimusalueilla eniten kaivosvesivaikutusta sisältäväksi vedeksi (suotovesi) ja ryhmät 5 ja 3 ns. puhtaammaksi taustavedeksi (Kuva 24). Päätejäsenen sekoittumisen tarkkailua hankaloittaa, tai siihen tuo oman päätejäsenen, alueen geologian vaikutus isotooppikoostumukseen nimenomaan strontiumin osalta. Kahden päätejäsenen sekoittumissuora isotooppikoostumus vs. pitoisuus -käyrällä muodostaisi hyperbolin, joka

kuvissa on nähtävissä, mutta kolmannen päätejäsenen mukaan tulo aiheuttaa mahdollisesti kolmionmuotoisen päätejäsenen tarkkailun. Nämä strontiumin ja rikin isotooppitulokset eivät kuitenkaan helpota suotovesien ilmentymisen seuranta kaivosalueilla, sillä niiden koostumukseen vaikuttaa lähinnä paikallinen mineraaliaines ja mahdollinen biologinen toiminta. Edelleen vaikka strontiumin ja rikin kuvitteellisen sekoittumiskäyrä kuvaajissa voidaan nähdä samankaltaisina, eivät ne silti edusta välttämättä päätejäsenten sekoittumissuoraa, joka pikemmin näkyy näissä kuvaajissa x-akselin suuntaisena. Sekoittumissuorien esiintyminen samanaikaisesti näiden kahden eri aineen, strontiumin ja rikin, isotooppien kuvaajissa vaatisi kahden selkeästi eroavan päätejäsenen, joita näissä tutkimuskohteissa ei voida sanoa yksiselitteisesti löytyvän. Rikin osalta tällainen sekoitussuora Kevitsan vesinäytteiden isotooppikuvaajassa kuitenkin vaikuttaisi olevan.



Kuva 24. Sr ja S isotooppikoostumukset vesinäytteissä niiden pitoisuuksia vasen. Strontium: A – Saattopora 2016 ja B – Kevitsa. Rikki: C – Saattopora ja D – Kevitsa.

4. Työpaketti 2

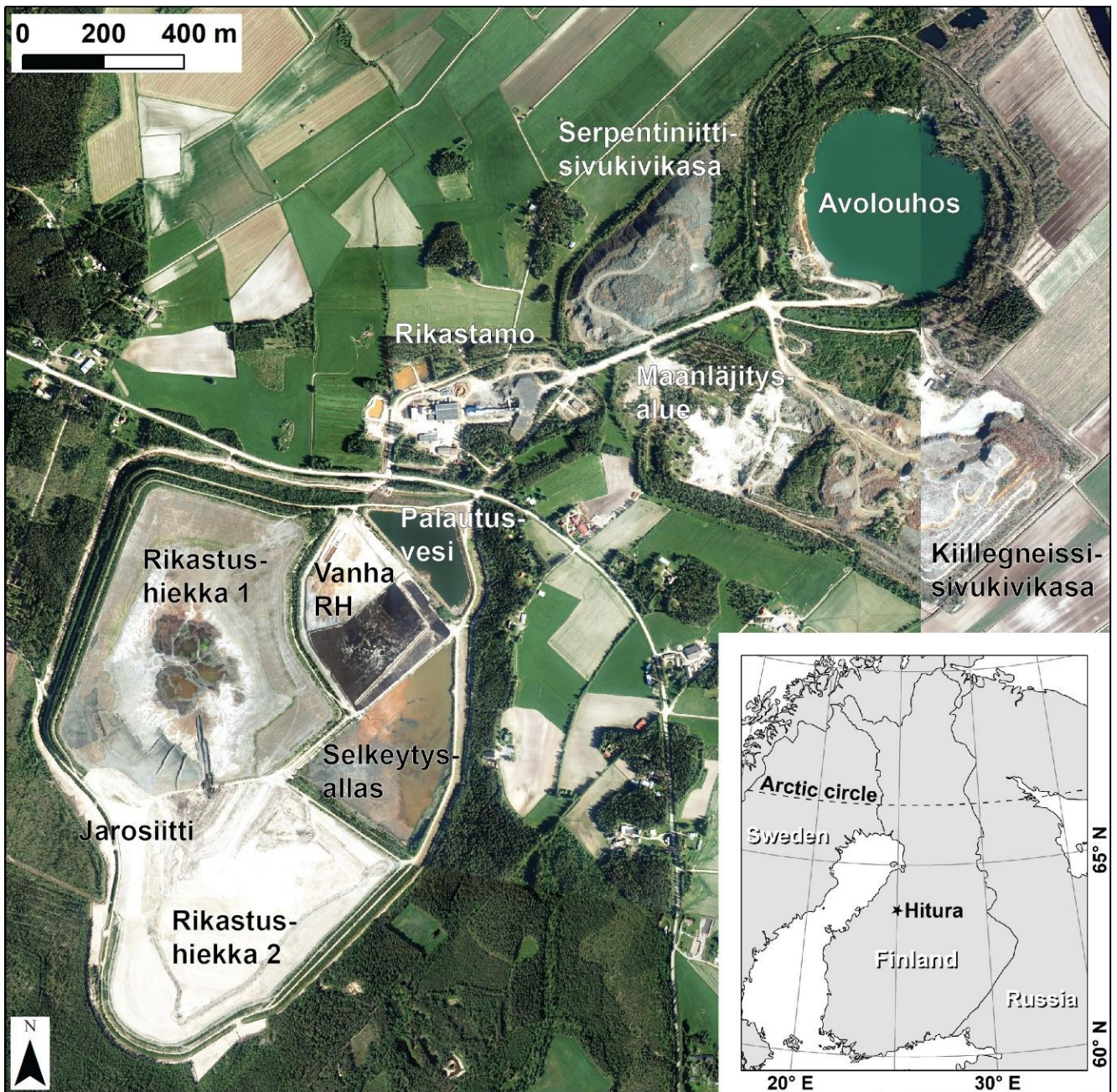
4.1 Hituran kaivos

Hituran kaivos (63°50'41"N, 25°01'26"E) sijaitsee Pohjois-Pohjanmaalla, valtakunnallisesti arvokkaalla maisema-alueella Kalajokilaaksossa, n. 14 km päässä Nivalan keskustasta

kaakkoon. Kaivoksen avaamispäätös tehtiin vuonna 1969 ja tuotanto kaivoksessa pääsi käyntiin vuonna 1970. Vuosien varrella kaivoksen toiminta on ollut useasti keskeytettynä nikkelin hinnan heikkenemisen ja malmin alhaisen metallipitoisuuden vuoksi. Kaivoksen omisti alun perin Outokumpu Mining Oy, joka myi sen keväällä 2007 kanadalaiselle Belvedere Resources Ltd -yhtiölle. Vuonna 2015 Belvedere Resources Ltd asetettiin konkurssiin, minkä seurauksena Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus ympäristönsuojelun valvontaviranomaisena teki päätöksen Hituran kaivoksen kaivannaisjätealueiden sulkemistoimenpiteistä. Sulkemistyöt alkoivat elokuussa 2017 ja ne saatiin päätökseen kesällä 2021.

Hituran kaivospiiri on kokonaispinta-alaltaan n. 330 hehtaaria. Kaivoksen merkittävimmät kaivannaisjätealueet koostuvat alueella olevista rikastushiekka-alueesta sekä serpentiniitti- ja kiillegneissi-sivukivikasoista (Kuva 25). Rikastushiekka-alue on kokonaisuudessaan pinta-alaltaan n. 100 ha ja se koostuu useammasta eri osa-alueesta. Alueen länsiosassa ovat pinta-alaltaan n. 37 ha kokoinen rikastushiekka-allas 1 ja n. 34 ha kokoinen rikastushiekka-allas 2, jonka länsireunassa sijaitsee myös alue, johon on tuotu muualta mahdollisesti suurimmat ympäristöriskit aiheuttavaa jarosiittia varastoitavaksi. Rikastushiekka-alue mukaan lukien jarosiittialue on rakennettu piiloharjun päälle ilman pohjarakenteita. Alueen itäosassa ovat ns. vanha rikastushiekka-allas sekä selkeytys- ja palautusvesialtaat. Avolouhoksen lounaispuolella sijaitseva serpentiniittikiven läjitysalue on korkeudeltaan n. 35 metriä ja pohjan pinta-alaltaan n. 13 ha. Serpentiniittikasan tilavuus on n. 2,2 Mm³. Avolouhoksen eteläpuolella sijaitseva kiillegneissin läjitysalue on vastaavasti korkeudeltaan enimmillään n. 35 m ja pinta-alaltaan n. 47 ha. Kasassa olevan gneissikivien määrä on n. 3,5 Mm³, mutta alueen luoteisreunaan on lisäksi kasattu maanpoiston massoja n. 3 Mm³.





Kuva 25. Hituran kaivosalueen sijainti ja keskeisiä kohteita.

4.2 Hituran tutkimukset

4.2.1 Dronekuvaukset

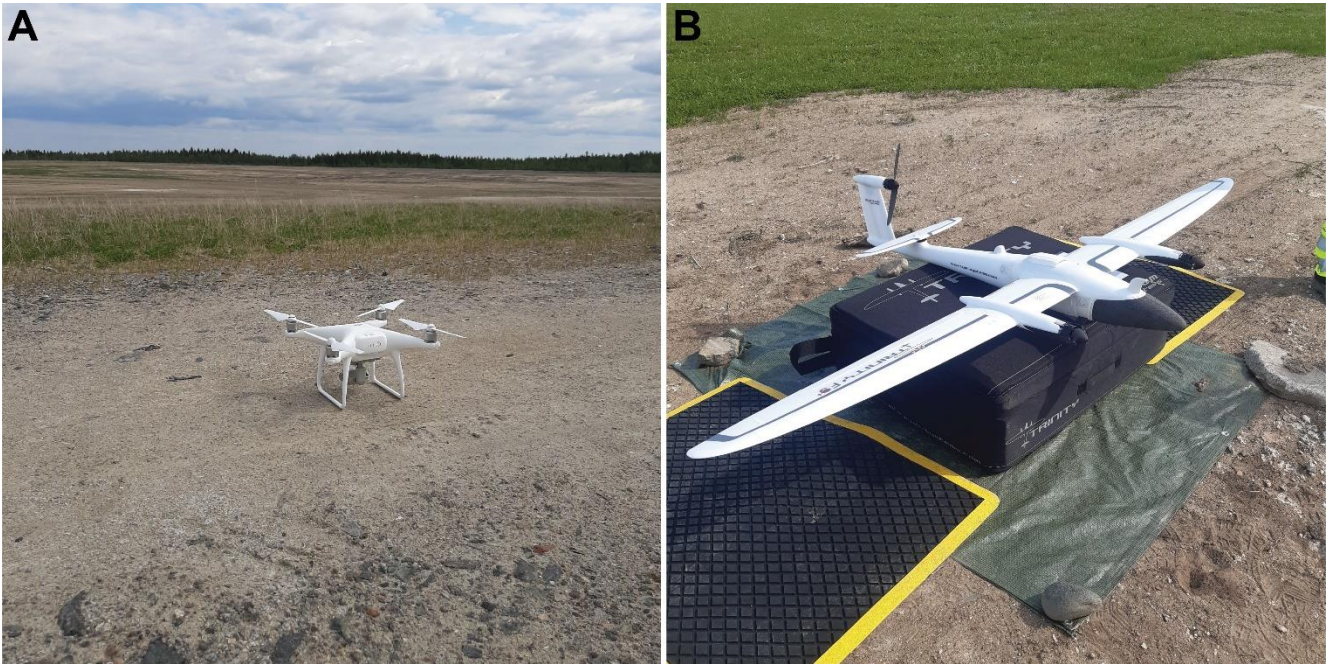
Hituran rikastushiekka-allas 2:lla (RH2) toteutettiin kuvauksia pintarakenteen valmistumisen (9/2018) jälkeen jo ennen LeKaT-hankkeen alkamista 19.11.2018 ja 16.05.2019 (Taulukko 2). Altaan pintarakenteeseen on kuitenkin toteutettu mm. vesieroosiovaurioiden korjauksia, kasvukerroksen lisäämistä, kivien poistoa ja täydennyskylvöjä myös rakenteen valmistumisen

jälkeen vuosina 2019 ja 2020. LeKaT-hankkeen puitteissa RH2:lla suoritettiin kuvauksia 3.6.2020, 28.9.2020, 3.6.2021 ja 28.10.2021. Rikastushiekka-allas 1 (RH1) kuvattiin pintarakenteen valmistumisen (9/2020) jälkeen 28.9.2020, 3.6.2021 ja 28.10.2021. Serpentiiniitti-sivukivikasat kuvattiin 3.6.2020 ja molemmat sivukivikasat kuvattiin 4.6.2021.

Taulukko 2. Hiturassa toteutetut dronekuvaukset

| Päivämäärä | Kohde | Laite | Kuvien / kontrollipisteiden lkm |
|------------|----------------------|-----------------|---------------------------------|
| 19.11.2018 | RH2 | DJI P4 Advanced | 547 / 25 |
| 16.5.2019 | RH2 | DJI P4 Advanced | 579 / 29 |
| 3.6.2020 | RH2 | DJI P4 Advanced | 556 / 32 |
| 3.6.2020 | Serpentiiniitti-kasa | DJI P4 Advanced | 277 / 16 |
| 28.9.2020 | RH1, RH2 | DJI P4 Advanced | 996 / 61 |
| 3.6.2021 | RH1, RH2 | Trinity F90+ | 2488 / 24 |
| 4.6.2021 | Sivukivikasat | Trinity F90+ | 1799 / 5 |
| 28.10.2021 | RH1, RH2 | Trinity F90+ | 1366 / 12 |

Kaikki kuvaukset ennen vuotta 2021 toteutettiin DJI Phantom 4 Advanced -multikopterilla (Kuva 26A). Kyseessä on melko kompakti (n. 20x30x30 cm ja 1,4 kg) ja edullinen multikopteri, jossa on kuitenkin varsin hyvä kamera, joka mahdollistaa laadukkaiden ilmakuvauksien tuottamisen. Kyseinen multikopteri ei kuitenkaan kykene RTK-/PPK-korjausdatan hyödyntämiseen, eli georeferointi tulee tehdä pelkkiin kontrollipisteisiin perustuen. Vuonna 2021 kuvauksissa siirryttiin käyttämään erityisesti kartoituslentoihin suunniteltua Quantum Systems Trinity F90+ VTOL-kiinteäsiipistä (Kuva 26B), joka kykenee hyödyntämään PPK-jälkilaskentaa tarkan sijaintitiedon saavuttamiseksi. Erittäin pitkä lentoaika (n. 90 min per akku) sekä pienempi kontrollipisteiden tarve PPK-laskennan myötä tekee kyseisestä lennosta erittäin hyvän työkalun suurten alueiden kartoitukseen. Kyseessä on kuitenkin kooltaan paljon isompi laite, siipien kärkivälin ollessa n. 2,4 metriä ja painon ollessa n. 5 kg.



Kuva 26. A) DJI Phantom 4 Advanced (kuva: Anne Tuomela), B) Quantum Systems Trinity F90+ (kuva: Tero Toivonen).

Kontrollipisteiden mittaamiseen käytettiin Leica GS08+ ja/tai Topcon Hiper-V GNSS-vastaanottimia, jotka hyödynsivät HxGN Smartnet verkko-RTK korjausdataa. Trinity F90+ PPK-laskennassa käytettiin laitteen oman iBase-tukiaseman keräämää dataa sekä 3.6.2021 kuvauskerralla vertailun vuoksi myös Topcon Hiper-V:n tukiasemadataa sekä Maanmittauslaitoksen FinnREF-tukiasemaverkoston dataa.

Dronemittauksista hankittu kuvamateriaali käsiteltiin fotogrammetriseen prosessointiin tarkoitettulla Agisoft Metashape Professional -ohjelmistolla. Aineistot käsiteltiin ohjelmiston parhaalla Ultra High -prosessointitarkkuudella, joka säilyttää alkuperäisen kuvamateriaalin resoluution luotuihin korkeusmalleihin. Prosessoinnin tuotteina ohjelmistosta tallennettiin rikastushiekka-altaiden tapauksessa ortomosaiikit sekä korkeusmallit 4 cm/pikseli tarkkuudella ja sivukivien tapauksessa ortokuvat 4 cm/pikseli tarkkuudella sekä pistepilvet täydellä pistetiheydellä.

Rikastushiekka-alueiden painumia pyrittiin arvioimalla laskemalla erotukset eri aikoina tehdyille korkeusmalleille. Mallit tuotiin ArcGIS Desktop -ohjelmistoon, jossa korkeusmallit ensin aggregoitiin keskiarvoistamalla alkuperäisestä 4 cm resoluutiosta 40 cm/pikseli resoluution pienten yksityiskohtien mahdollisten virheiden minimoimiseksi. Tämän jälkeen mallien erotukset laskettiin pikselikohtaisesti korkeusmuutoksen (painumat) arvioimiseksi.

Sivukivikasojen pistepilville tehtiin jatkoprosessointia CloudCompare -ohjelmistolla, jossa pistepilvistä suodatettiin mm. kasvillisuus ja ajoneuvot pois käyttäen Cloth Simulation Filtering -tekniikkaa. Suodatetut pistepilvet tuotiin ArcGIS Desktop -ohjelmistoon, jossa pistepilvi muutettiin ASCII-muotoiseksi korkeusmalliksi. Vertailun mahdollistamiseksi korkeusmallit

tehtiin 25, 50, 100 ja 200 cm/pikseli tarkkuuksilla. Lisäksi ArcGISissä luotiin korkeusmallit maaperän saviselle silttikerrokselle sekä kuivakuorelle 3D-stabiliteettianalyysiä varten.

Vaikka tässä hankkeessa käytettiin droneaineiston prosessointiin sekä aineiston analysointiin kaupallisia Agisoft Metashape ja ArcGIS Dekstop -ohjelmistoja, vastaavat toiminnot ovat toistettavissa myös vapaasti saatavilla olevia avoimen lähdekoodin ohjelmistoja, kuten OpenDroneMap ja QGIS käyttäen. Näin ollen esim. koko dronedataan perustuva 3D-stabiliteettianalyysi on toteutettavissa täysin avoimen lähdekoodin ohjelmistoja käyttävällä prosessointiketjulla: OpenDroneMap → CloudCompare → QGIS → Scoops3D → QGIS.

4.2.2 Stabiliateetilaskenta

Stabiliateetilaskenta 3D-olosuhteissa suoritettiin U.S. Geological Surveyn (USGS) kehittämällä Scoops3D-laskentaohjelmistolla (Reid et al., 2015), joka perustuu stabiliateetin laskentaan käyttäen lähtötietoina digitaalisia korkeusmalleja. Ohjelma käyttää laskennassa kolmiulotteista pilarimenetelmää stabiliateetin laskentaan ja arvioi mahdolliset liukupinnat pallonmuotoisten pintojen avulla. Varsinaisena laskentamenetelmänä käytettiin kolmiulotteista versiota Bishopin yksinkertaistetusta menetelmästä

Liukupintojen etsintää varten ohjelma luo solmupisteitä, jotka toimivat liukupintoja mallintavien pallopintojen keskipisteinä. Potentiaalisien sortumaliukupintojen etsinnässä käytettiin koko mallin alueella 2 m horisontaalisella ja vertikaalisella resoluutiolla jaolla olevia solmupisteitä 90–230 m korkeudelle sijoitettuna (vrt. maanpinnan alin korkeus 70 m, ja kasojen korkeimmat kohdat n. 106 m ja 110 m korkeudella). Solmupisteiden kautta etsittävien pallopinnan muotoisten liukupintojen sädettä kasvatettiin 2 metrin välein. Mallista on mahdollista löytää ääretön määrä mahdollisia liukupintoja, minkä rajoittamiseksi ohjelmassa käytettiin minimi- ja maksimitilavuuksia potentiaaliselle sortumalle. Analyysija ajettiin eri tilavuuden minimi- ja maksimiarvoilla, jotta voitiin arvioida varmuus erikokoisia potentiaalisia sortumia vastaan, pienimmän ollessa 200–20000 m³ ja suurimman 100 000–1000 000 m³.

Ohjelma ottaa lähtötietoina vastaan luodut korkeusmallit pinnanmuodoille ja maakerroksien rajoille sekä materiaalien geotekniset ominaisuudet (tilavuuspaino, kitkakulma ja koheesio) numeerisina parametreina. Sivukivikasojen stabiliateettimallinnuksessa hyödynnettiin lähtötietoina Sulin (2019) opinnäytetyössä Hituran sivukiville suoritetuista mittauksista sekä kaivosalueen sulkemisen suunnittelun ohessa toteutetuista kairauksista ja laboratoriotesteistä saatuja maaperätietoja (Ramboll 2018; TTY 2018).

Mallinnuksessa päädyttiin käyttämään Sulin (2019) tekemien rasialeikkauskokeiden tulosten keskiarvojen mukaisesti 38° kitkakulmaa serpentiniitille ja 40° kitkakulmaa kiillegneissille. Pohjamaan ylimmälle kuivakuorikerrokselle valittiin Rambollin (2018) tekemiä 2D-stabiliateettimallinnuksia mukaillen kitkakulmaksi konservatiivinen 30° ja sen alapuoliselle savelle vastaavasti 31°. Tilavuuspainoina käytettiin vastaavia arvoja, kuin Rambollin (2018) mallinnuksessa (Taulukko 3). Kuivakuorikerroksen paksuudeksi valittiin 1 m ja sen alapuolisen savikerroksen paksuudeksi 5 m. Pohjavedenpinnan oletettiin olevan kuivakuorikerroksen

alapinnassa. Mallinnusteknisistä syistä kaikille materiaaleille oletettiin myös pieni 1 kPa koheesio.

Taulukko 3. 3D-stabiliteettimallinnuksessa käytetyt materiaaliparametrit.

| Materiaali | Tilavuuspaino [kN/m ³] | Kitkakulma [°] | Koheesio [kPa] |
|----------------|------------------------------------|----------------|----------------|
| Serpentiniitti | 21 | 38 | 1 |
| Kiillegneissi | 21 | 40 | 1 |
| Kuivakuori | 16 | 30 | 1 |
| Savi | 17 | 31 | 1 |

3D-stabiliteettimallinnuksessa testattiin aluksi korkeusmallien tarkkuuden sekä liukupintojen Simple- ja Coarse-to-fine-etsintämetodien vaikutusta tuloksiin. Simple-metodissa ohjelma etsii liukupintoja suoraan jokaisesta solmupisteestä annetun pisteiden jaon mukaisesti. Coarse-to-fine-metodi puolestaan aloittaa harvemmalla solmupisteverkostolla ja tihentää sitä alustavan laskentakierroksen jälkeen alhaisimpia varmuuslukuja antavien solmupisteiden ympäristössä, tavoitteena löytää kriittiset alueet. Kummallakaan tekijällä ei ollut merkitsevää vaikutusta lopputuloksiin, saatujen minivarmuuskertoimien erojen ollessa noin puolen prosentin luokkaa. Asetukset vaikuttivat kuitenkin huomattavasti laskenta-aikaan, sillä 25 cm resoluutiolla ja Simple-metodilla yksi laskenta kesti yli 13 vuorokautta, kun taas 200 cm resoluutiolla ja Coarse-to-fine-metodilla laskenta kesti n. 31 minuuttia. Lopullisiin mallinnuksiin tarkkuudeksi valittiin 100 cm resoluutio ja etsintämetodiksi Coarse-to-fine, minkä todettiin olevan tarkkuuden ja kuluvan laskenta-ajan suhteen optimaalinen vaihtoehto.

4.2.3 Vedenjohtavuusmittaukset

In situ vedenjohtavuusmittaukset suoritettiin Hituran kaivoksen suljetulla rikastushiekka-allas 2:lla valmiista pintarakenteesta 28.–29.9.2020. Mittauspaikat, seitsemän pistettä, on merkitty karttaan (Kuva 27). Rengasinfiltrometrimittaukset suoritettiin pisteistä 1–6 ja Guelph-infiltrometrimittaukset pisteistä 1–7. Sää mittausten aikana oli syyskuulle poikkeuksellinen, sillä lämpötila oli lähellä +20 °C, aurinkoinen tai puolipilvinen sekä vähätuulinen. Olosuhteet olivat siten erinomaiset. Kokeisiin tarvittava vesi kuljetettiin pakettiautolla rikastushiekka-altaille isoissa noin 50 litran kanistereissa. Kanisterit täytettiin kaivoksen huoltotiloissa (vanha kaivoksen henkilökunnan peseytymistila).



Kuva 27. Vedenjohtavuusmittausten sijainti Hituran suljetulla rikastushiekka-allas 2:n alueella.

Rengasinfiltrometrimittauslaite on esitetty kuvassa 28 ja Guelphin infiltometri kuvassa 29. Menetelmistä yleisesti on kerrottu kappaleessa 2. Rengasinfiltrometrissä on käytetty halkaisijaltaan 53 cm ja 28 cm teräksisiä renkaita. Ne upotettiin maahan noin 5...10 cm syvyydelle lyömällä ulkoreunalta. Sen jälkeen renkaat täytettiin noin 10 cm pinnankorkeuteen. Vedenpinta pidetään molemmissa renkaissa samalla korkeudella. Maaperän kyllästymisen jälkeen voidaan aloittaa itse mittaus, jossa vedenpinnan laskua ajan suhteen mitataan. Guelph-mittausta varten maahan on ensin kairattu halutulle syvyydelle kairareikä. Tässä tapauksessa kairareikä oli tehtävä pintarakenteeseen eli syvyydet vaihtelivat noin 10...25 cm maanpinnasta. Kun kairareikään laskettiin mittalaite ja vesipatsas, odotettiin alkuun, että lukemat tasaantuivat ajan suhteen. Siitä voitiin päätellä, että kairareikäinen alue kyllästyi vedellä. Sen jälkeen aloitettiin mittaamaan vedenkulutusta ajan suhteen.



Kuva 28. In situ -mittauksissa käytetty rengasinfiltrometri. Kuvassa näkyy valkoisena pintarakenteesta käytetty opasakka.

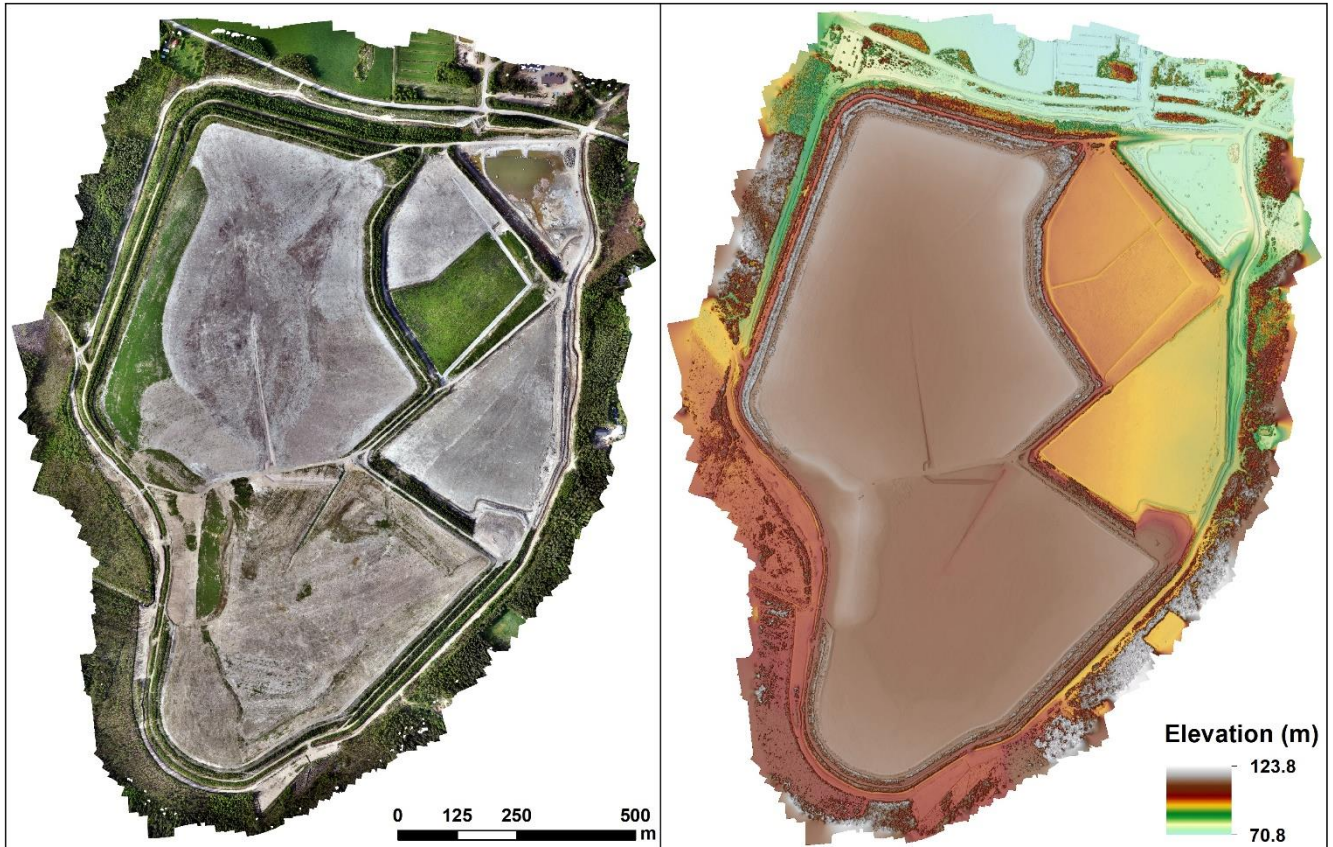


Kuva 29. In situ -mittauksissa käytetty Guelph-infiltrometrilaitteisto. Vasemmalla ollaan tekemässä kairausreikää mittausta varten. Oikealla näkyy hyvin mittalaitteisto ja sitä ollaan juuri asentamassa kairareikään, johon mittakärki lasketaan.

4.3 Tulokset

4.3.1 Dronekuvaukset

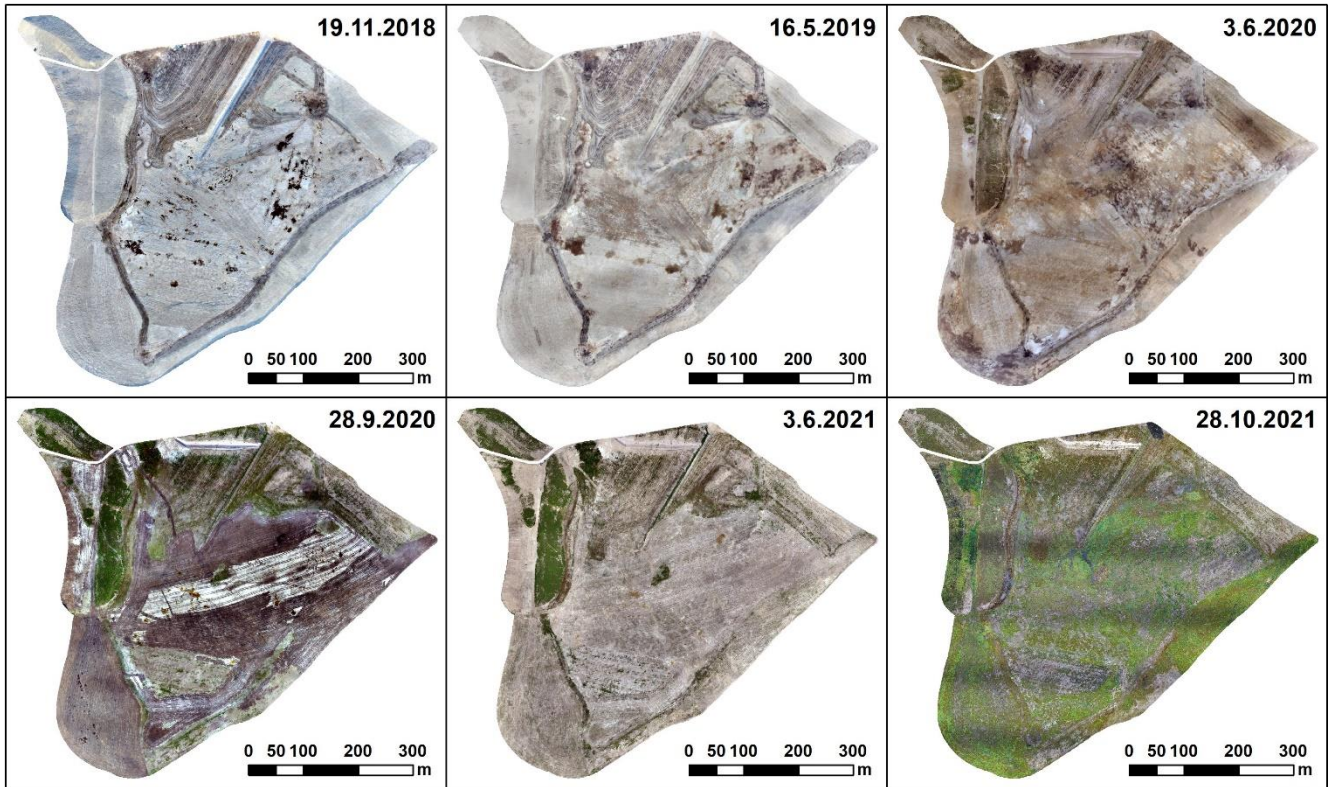
Dronekuvauksissa 3.6.2021 luodut koko Hituran rikastushiekka-alueen kattavat ortokuvamosaiikki ja korkeusmalli on esitetty kuvassa 30. Ko. ajankohtana työt rikastushiekka-alueella olivat melkein päätöksessä, töiden ollessa enää käynnissä alueen koillisosan vanhoilla palautus- ja selkeytysvesialtailla.



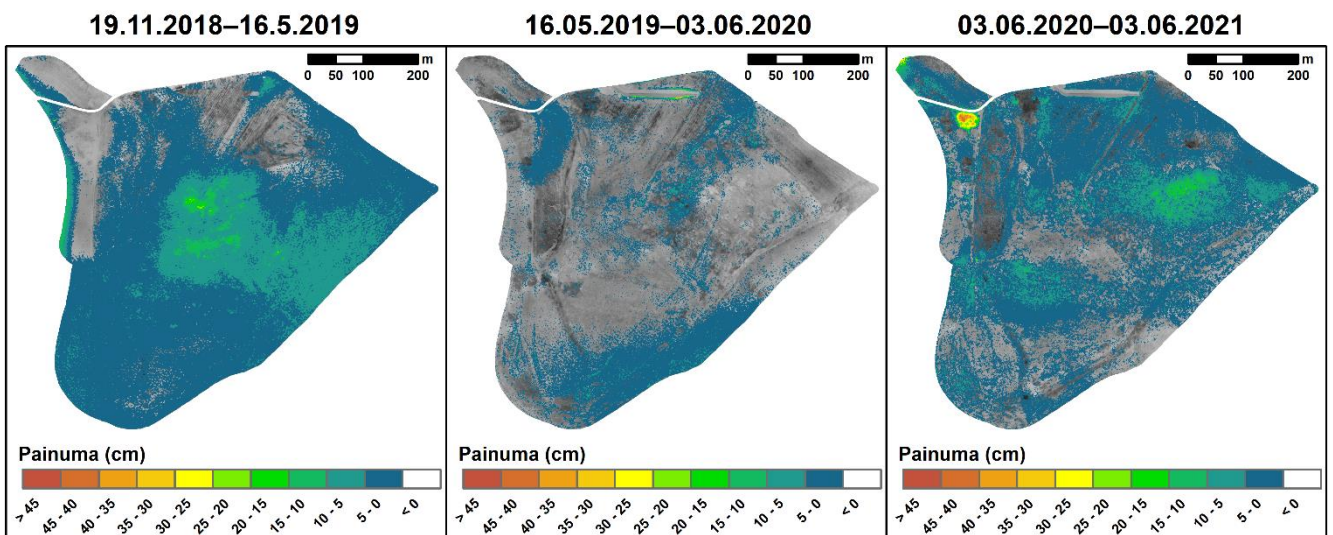
Kuva 30. Hituran rikastushiekka-alueesta dronekuvauksen (3.6.2021) avulla tehty ortomosaiikki ja korkeusmalli.

Hituran RH2:n dronekuvauksista eri kerroilla luodut ortokuvamosaiikit on esitetty kuvassa 31. Kuvista selkeästi näkyy esim. altaalla tehdyt korjaustyöt ja lisäkylvöt mm. kesän 2020 aikana. Vasta syksyyn 2021 mennessä altaan kasvillisuus oli levinnyt kunnolla koko altaan alueelle, joskin paikoin kasvillisuus on melko harvaa. Kasvillisuus on kuitenkin osalla alueesta niin tiheää ja korkeaa, että se selkeästi vaikuttaa luotuun korkeusmalliin, jossa ei enää näy altaan pinta vaan kasvillisuuden korkeus. Näin ollen syksyn 2021 korkeusmallia ei enää pystynyt hyödyntämään painuman arvioinnissa.

Kuvassa 32 on esitetty RH2:lle tehdyt painumakartat laskemalla erotukset korkeusmallien välillä. Ajanjaksot on valittu niin, että korjaustöillä ja kylvöillä olisi mahdollisimman pieni vaikutus ja kartat esittäisivät todellisia painumia. Kuten kuvasta nähdään, kauttaaltaan merkittävimmät painumat RH2:lla nähdään jo pian pintarakenteen valmistuttua, ensimmäisen talven jälkeen. Suurimmat painumat, paikoin n. 20–25 cm luokkaa, nähdään altaan keskiosan paikoilla.



Kuva 31. Hituran rikastushiekka-allas 2:n dronekuvauksista luodut ortomosaikit.

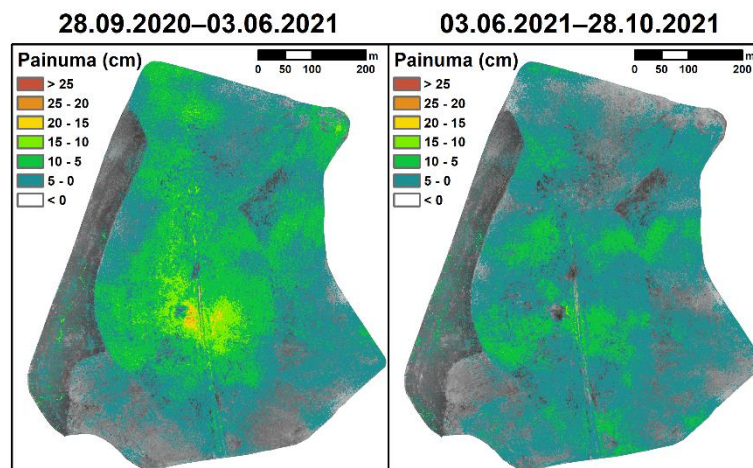


Kuva 32. Hituran rikastushiekka-allas 2:n dronekuvauksista tehdyt painumakartat eri ajanjaksoille.

Kuvassa 33 on esitetty RH1:n dronekuvauksista pintarakenteen valmistumisen jälkeen luodut ortomosaiikit. RH1:n kasvillisuus ei vielä syksystä 2021 peittänyt koko allasta niin merkittävässä määrin, että pinnan korkeusmalli häiriintyisi siitä. Kuvassa 34 on esitetty vastaavasti RH1:lle luodut painumakartat. Suurimmat painumat nähdään talven 2020–2021 jälkeen altaan keskiosissa, ulottuen aina n. 25 cm asti.



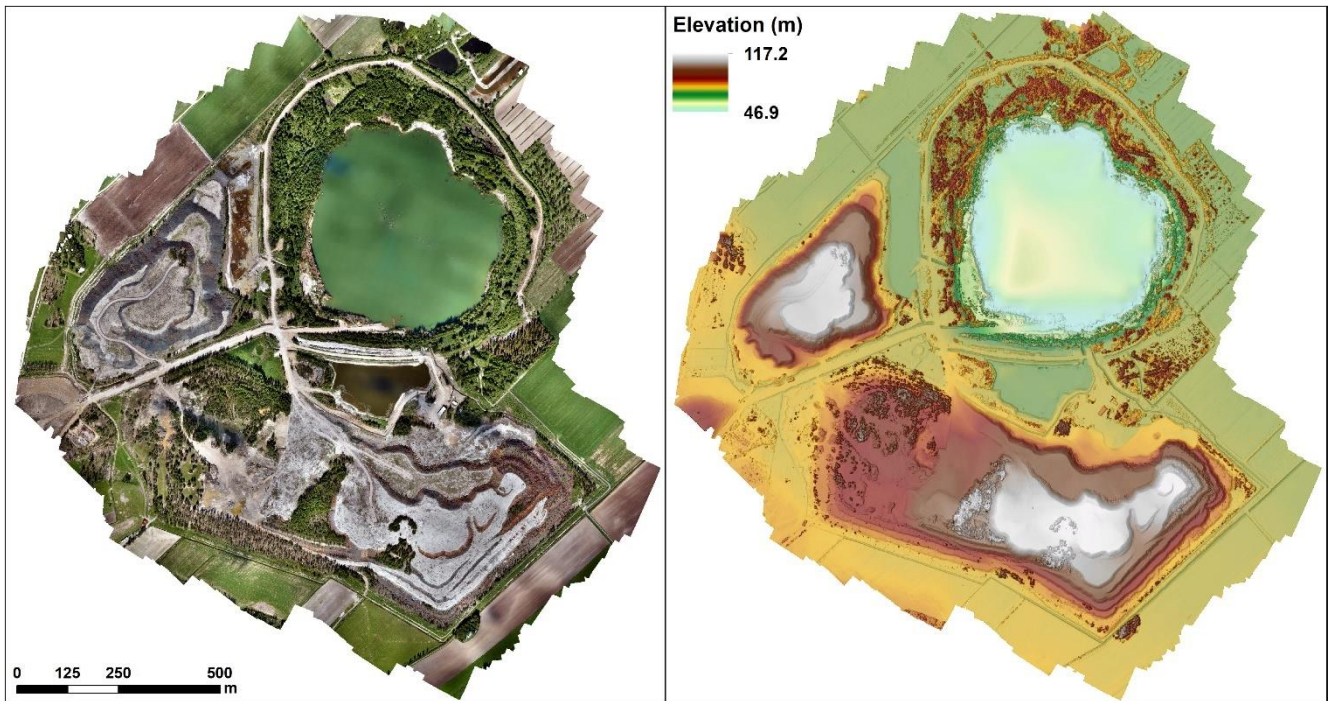
Kuva 33. Hituran rikastushiekka-allas 1:n dronekuvauksista luodut ortomosaiikit.



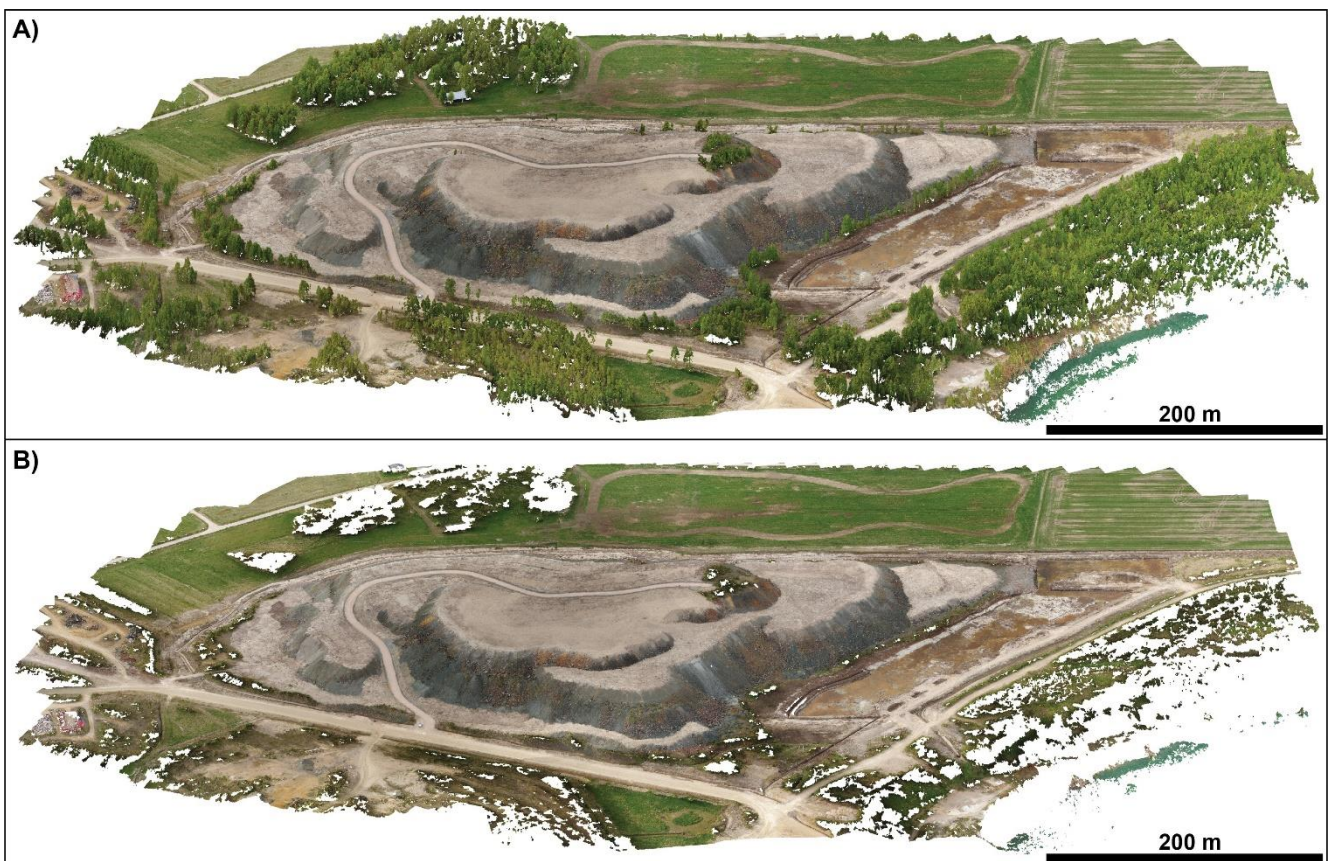
Kuva 34. Hituran rikastushiekka-allas 1:n dronekuvauksista tehdyt painumakartat eri ajanjaksoille.

4.3.2 Stabiiliteetilaskenta

Hituran sivukivialueista ja avolouhoksesta dronekuvauksissa 4.6.2021 luodut ortomosaiikki ja korkeusmalli on esitetty kuvassa 35. Koska avolouhos on täytetty vedellä, korkeusmalli näyttää virheellisiä lukemia sen kohdalla. Kuvassa 36 puolestaan on esimerkkinä serpentiinittikasan pistepilvi ennen ja jälkeen kasvillisuuden poistoa filteröimällä.

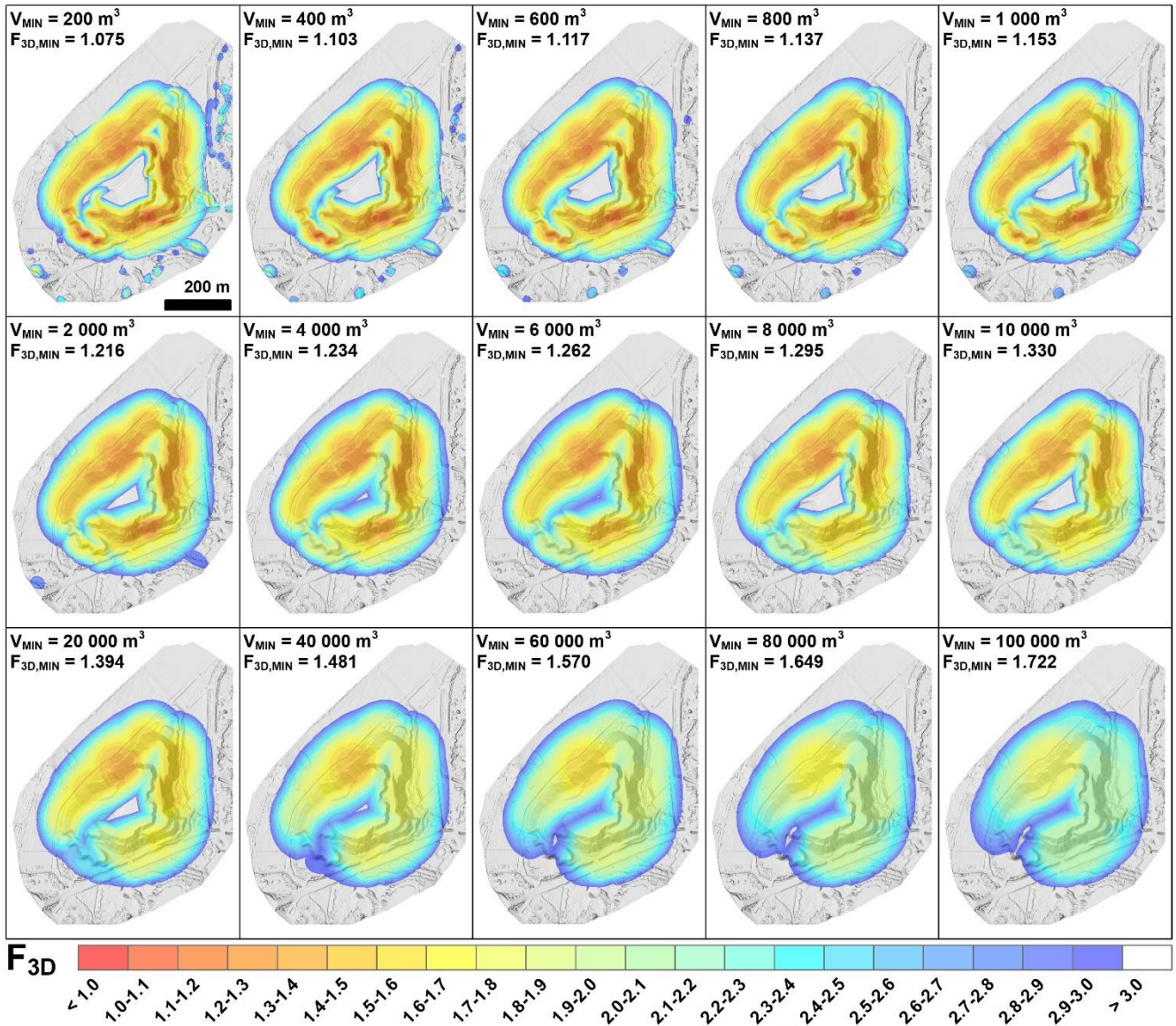


Kuva 35. Hituran sivukivialueesta ja avolouhoksesta dronekuvauksen avulla tehty ortomosaiikki ja korkeusmalli.



Kuva 36. Serpentiinikasan pistepilviaineisto A) ennen ja B) jälkeen kasvillisuuden suodatusta.

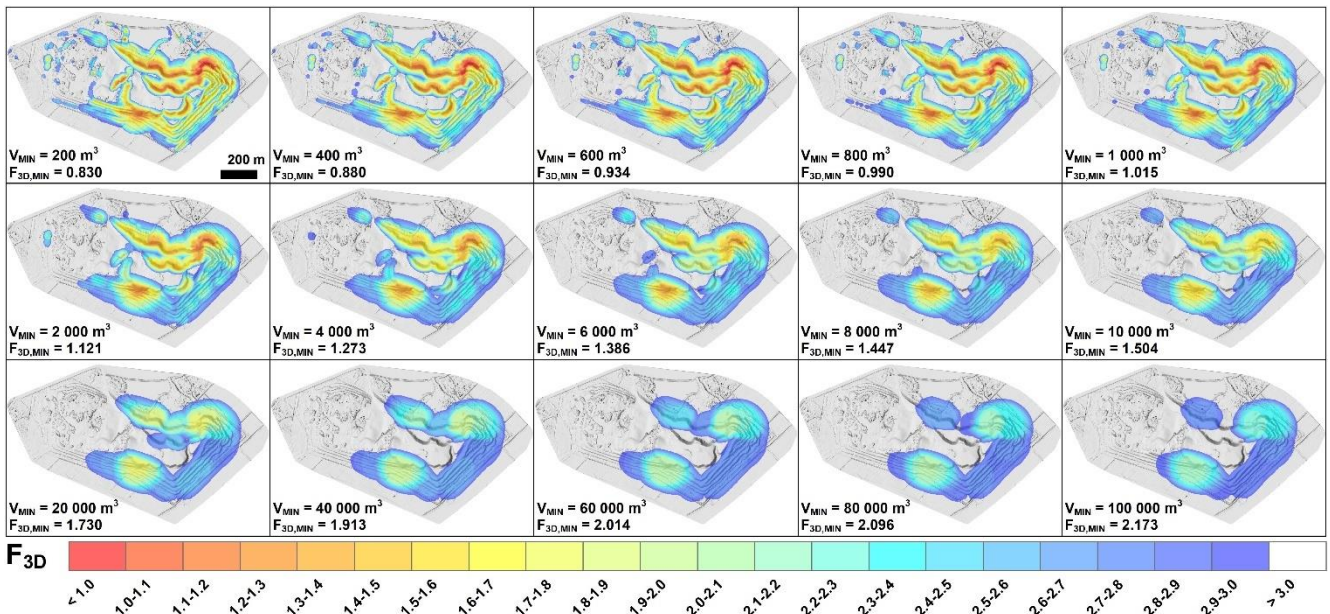
Hituran serpentiniittikasalla tehdyt 3D-stabiilettimallinnukset eri minimisortumistilavuuksilla on esitetty kuvassa 37. Kuten kuvasta nähdään, serpentiniittikasan tapauksessa minimivarmuuskerroin on yli kriittisen $F=1$ arvon jo 200 m^3 minimisortumistilavuudella, minimivarmuuskerroimen kasvaessa tasaisesti sortumistilavuuden kasvaessa.



Kuva 37. Hituran serpentiniittikasan 3D-stabiilettianalyysin varmuuskertoimen minimi eri sortumistilavuuksilla.

Kuvassa 38 puolestaan on esitetty kiillegneissikasalle vastaavat 3D-stabiilettimallinnukset eri minimisortumistilavuuksilla. Kiillegneissikasan tapauksessa minimivarmuuskerroin on alle kriittisen $F=1$ arvon $200\text{--}800 \text{ m}^3$ minimisortumistilavuuksilla, mikä indikoisi, että kiillegneissikasan jyrkät luiskat voivat olla epästabiileja pienten sortumien tapauksessa. Tarkastellessa 3D-stabiilettimallinnuksia ja ortokuvaa lähemmin kuitenkin osoittautuu, että

vaarallisimmat alueet ovat yksittäisen jyrkän luiskan alueella, joka on kuvissa hieman varjossa. Näin ollen kyseessä voi olla myös osin varjojen aiheuttama artifakti korkeusmalliin, joka osaltaan vaikuttaisi myös 3D-stabiliateettimallinnukseen. Lisäksi on myös syytä huomioida mallinnuksessa materiaalille käytetty hyvin pieni 1 kPa koheesio, mistä keskustellaan myöhemmin lisää. Syvien, pohjamaan kautta kulkevien liukupintojen ts. isompien sortumien tapauksessa varmuuskertoimet ovat kauttaaltaan yli $F=1$.



Kuva 38. Hituran serpentiniittikasan 3D-stabiliateettianalyysin varmuuskertoimen minimi eri sortumistilavuuksilla.

Taulukossa 4 on esitetty kiillegneissikasan stabiliateettimallinnuksissa saadut 3D-varmuuskertoimien ja 2D-varmuuskertoimien minimi, varmuuskertoimien suhteet ja prosentuaaliset erot, sekä sortuman liukumissuunnat eri sortumistilavuuksilla. 2D-varmuuskertoimien tapauksessa tulee huomioida, että ne on laskettu vastaavan 3D-mallinnuksen minimivarmuuskertoimen antavan liukupinnan avulla, ”muuttamalla” malli ko. kohdasta 2D-malliksi ja liukupinta pallosta ympyräksi. Kaikkien muiden paitsi 1000 m³ minimisortumistilavuuden tapauksessa 3D-mallinnus antaa suuremman varmuuskertoimen kuin 2D-malli vastaavasta kohtaa. Prosentuaalisesti erot vaihtelevat eri sortumistilavuuksilla alle prosentin eroista aina liki 15 % eroon saakka. Akhtar (2011) sekä Kalatehjari & Ali (2013) ovat tehneet kirjallisuuskatsaukset erilaisia 3D-stabiliateettianalyysimetodeja käsitelleeseen tutkimukseen. Suuri osa tutkimuksista raportoi 3D-stabiliateettianalyysin tuottavan suurempia varmuuskertoimia kuin 2D-stabiliateettianalyysi vastaavassa tilanteessa. Muutama tutkimus kuitenkin totesi 3D-mallinnuksen tuottavan tietyissä tapauksissa pienempiä varmuuskertoimia koheesiottomien tai pienen koheesioita kitkamaiden tapauksessa.

Taulukko 4. Kiillegneissikasan 3D-varmuuskertoimen ja 2D-varmuuskertoimen minimi, varmuuskertoimien suhde ja prosentuaalinen ero, sekä sortuman liukumissuunta eri sortumistilavuuksilla.

| Min. til. | Max til. | F _{3D} , MIN | F _{2D} , MIN | F _{3D} /F _{2D} | F _{3D} /F _{2D} %-ero | Suunta [°] |
|-----------|----------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|--|------------|
| 200 | 20000 | 0.886 | 0.847 | 1.047 | 4.56 | 87.76 |
| 400 | 40000 | 0.940 | 0.934 | 1.007 | 0.65 | 88.98 |
| 600 | 60000 | 1.000 | 0.995 | 1.004 | 0.44 | 88.63 |
| 800 | 80000 | 1.060 | 1.054 | 1.006 | 0.61 | 88.78 |
| 1000 | 100000 | 1.086 | 1.087 | 0.999 | -0.12 | 131.40 |
| 2000 | 200000 | 1.202 | 1.198 | 1.003 | 0.32 | 131.36 |
| 4000 | 400000 | 1.319 | 1.292 | 1.020 | 2.00 | 89.30 |
| 6000 | 600000 | 1.372 | 1.326 | 1.035 | 3.43 | 87.37 |
| 8000 | 800000 | 1.453 | 1.447 | 1.004 | 0.39 | 57.88 |
| 10000 | 1000000 | 1.529 | 1.525 | 1.003 | 0.26 | 64.21 |
| 20000 | 1000000 | 1.744 | 1.553 | 1.123 | 11.57 | 132.29 |
| 40000 | 1000000 | 1.936 | 1.669 | 1.160 | 14.80 | 127.96 |
| 60000 | 1000000 | 2.020 | 1.873 | 1.078 | 7.54 | 250.58 |
| 80000 | 1000000 | 2.128 | 2.007 | 1.061 | 5.88 | 250.57 |
| 100000 | 1000000 | 2.263 | 2.151 | 1.052 | 5.07 | 250.45 |

Taulukossa 5 (on esitetty kiillegneissikasan 3D-stabiliteettimallinnukselle tehty parametrien herkkyytarkastelu mallinnuksessa käytetyn kiillegneissin kitkakulman ja koheesion osalta 200–20000 m³ sortumistilavuudella. Herkkyytarkastelussa siis verrataan miten kitkakulman ja koheesion muuttaminen vaikuttaa saavutettuun minivarmuuskertoimeen. Kuten taulukosta nähdään, malli on melko herkkä koheesion arvon suhteen, mutta ei niin herkkä kitkakulman suhteen. Kitkakulman kasvattaminen 44 asteeseenkaan ei nosta varmuuskerrointa yli yhden, mutta sinänsä maltillinen 5 kPa:n koheesio riittää nostamaan varmuuskertoimen yli yhden jo 36 asteen kitkakulmalla.

Taulukko 5. Parametrien herkkyytarkastelu (vaikutus varmuuskertoimeen) kiillegneissikasan 200–20000 m³ sortumistilavuudella.

| | | Kitkakulma [°] | | | | | | | | |
|----------------|---|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 |
| Koheesio [kPa] | 0 | 0.71 | 0.74 | 0.77 | 0.79 | 0.82 | 0.85 | 0.88 | 0.91 | 0.95 |
| | 1 | 0.78 | 0.81 | 0.84 | 0.86 | 0.89 | 0.92 | 0.95 | 0.98 | 1.02 |
| | 2 | 0.85 | 0.88 | 0.90 | 0.93 | 0.96 | 0.99 | 1.02 | 1.05 | 1.09 |
| | 3 | 0.92 | 0.95 | 0.97 | 1.00 | 1.03 | 1.06 | 1.09 | 1.12 | 1.15 |
| | 4 | 0.99 | 1.02 | 1.04 | 1.07 | 1.10 | 1.13 | 1.16 | 1.19 | 1.22 |
| | 5 | 1.06 | 1.08 | 1.11 | 1.14 | 1.17 | 1.20 | 1.23 | 1.26 | 1.29 |
| | 6 | 1.11 | 1.15 | 1.17 | 1.19 | 1.22 | 1.26 | 1.30 | 1.33 | 1.36 |

Taulukossa 6 on esitetty 3D- ja 2D-stabiliteettimallinnuksien antamien minimivarmuuskertoimien prosentuaalinen ero mallinuksessa käytetyn kiillegneissin kitkakulman ja koheesioin eri arvoilla. Taulukosta nähdään, että koheesioin arvon kasvattaminen selkeästi kasvattaa eroa 3D:n ja 2D:n välillä niin, että 3D-mallinnus antaa suhteellisesti paljon parempia (isompia) varmuuskertoimia 2D:hen verrattuna koheesioin kasvaessa. Kitkakulman osalta tilanne on päinvastainen eli erot menetelmien välillä pienenevät kitkakulmaa kasvattaessa, jos materiaalilla on edes pieni koheesio.

Taulukko 6. 3D/2D-stabiliteettimallinnuksien varmuuskertoimen prosentuaalinen ero kiillegneissikasan 200–20000 m³ sortumistilavuudella.

| | | Kitkakulma [°] | | | | | | | | |
|----------------|---|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 |
| Koheesio [kPa] | 0 | 1.13 | 1.13 | 1.13 | 1.14 | 1.14 | 1.14 | 1.14 | 1.13 | 1.15 |
| | 1 | 4.30 | 4.19 | 4.10 | 4.00 | 3.91 | 3.81 | 3.73 | 3.64 | 3.56 |
| | 2 | 7.06 | 6.86 | 6.68 | 6.51 | 6.35 | 6.19 | 6.04 | 5.88 | 5.74 |
| | 3 | 9.41 | 9.17 | 8.95 | 8.72 | 8.51 | 8.29 | 8.08 | 7.88 | 7.68 |
| | 4 | 11.50 | 11.22 | 10.94 | 10.67 | 10.42 | 10.16 | 9.91 | 9.67 | 9.44 |
| | 5 | | | 12.73 | 12.43 | 12.13 | 11.85 | 11.57 | 11.30 | 11.03 |
| | 6 | | | | | | | | 12.77 | |

Parametrien valinta sivukivikasojen stabiliteettilaskentaa varten ei ole itsestään selvää. Sivukivikasojen kylkien luiskat asettuvat materiaalia läjitettäessä usein ns. luonnolliseen kaatumiskulmaan, joka tyypillisesti on noin 35–40° (Williams, 2015). Tällaiset luiskat eivät yleensä ole tiivistetty ja ne altistuvat sateelle, tehden niiden geoteknisestä stabiliteetista huolenaiheen (Xu et al., 2017). Geoteknisessä mallinuksessa materiaalin kitkakulmaksi (leikkauskestävyyskulma) oletetaan usein aineksen luonnollinen kaatumiskulma. On kuitenkin

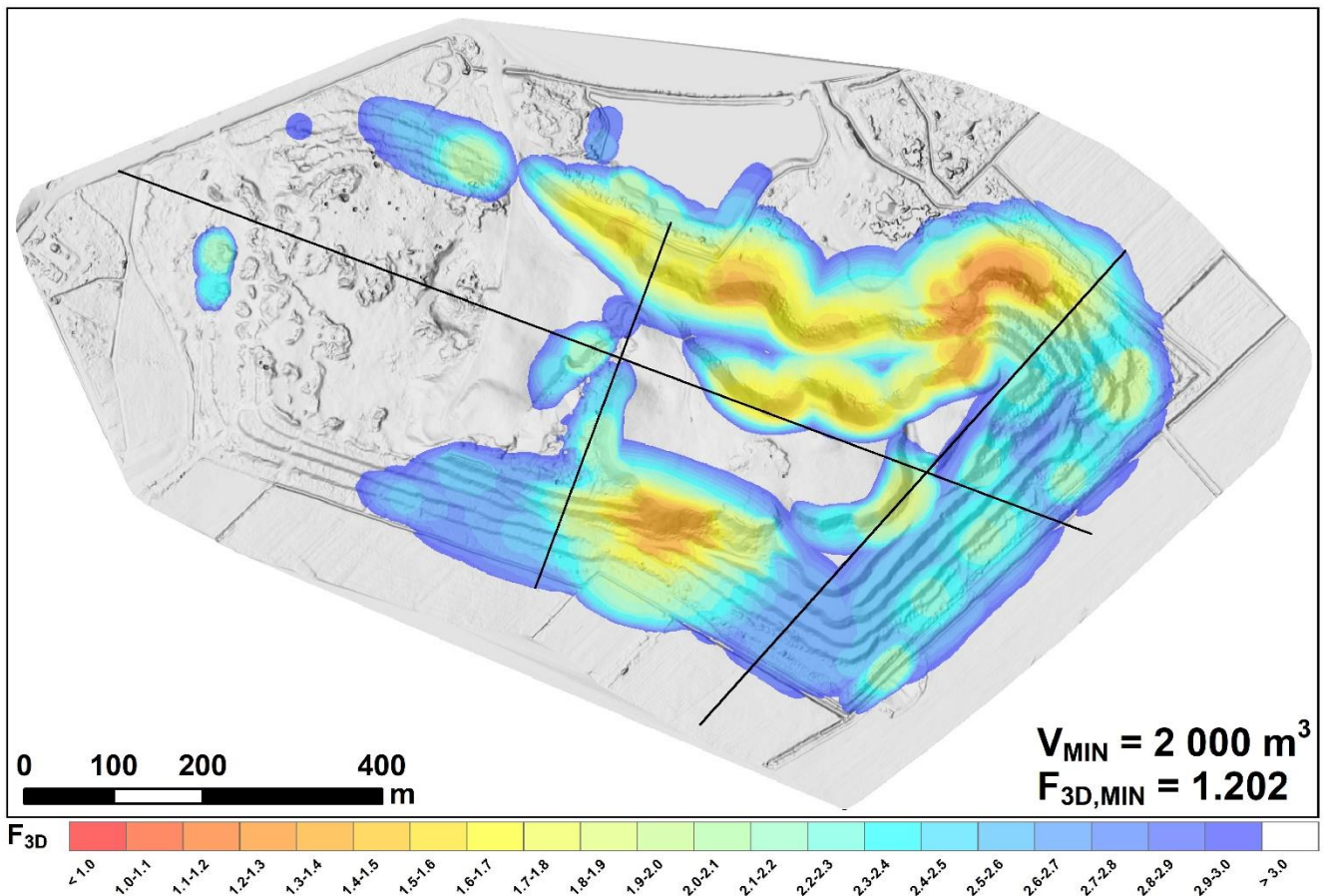
syitä ottaa huomioon, kaatumiskulma heijastelee materiaalin löyhintä mahdollista pakkaantumista ilman materiaaliin kohdistuvaa normaalijännitystä. Näin ollen materiaalin kitkakulman voidaan olettaa olevan tyypillisesti n. 4–6° luonnollista kaatumiskulmaa suurempi johtuen päälle kasattavan materiaalin aiheuttamasta jännityksestä (Williams, 2015).

Maamateriaalin leikkauslujuus voidaan määrittää laboratoriossa rasialeikkauskokeen avulla. Riippuen käytettävän rasialeikkauskojeen koosta, sivukivinäytteen raekokojakauma tyypillisesti joudutaan ”katkaisemaan” niin, että suuret raekoot poistetaan, sillä ISO-standardin 17892-10 mukaisesti näytteen suurin sallittu raekoko saa olla korkeintaan kaksikolmasosaa rasian koosta. Tällainen raekokojakauman skalpeeraus voi tutkimusten nojalla laskea sivukivinäytteelle mitattua kitkakulmaa usealla asteella verrattuna koko raekokojakauman kattavaan näytteeseen (Williams, 2015). Esim. Sulin (2019) tekemissä rasialeikkauskokeissa Hituran serpentiniitti- ja kiillegneissisivukiville käytetyn rasian pohjan dimensiot olivat n. 60x60 mm, kun esim. Xu et al. (2017) tekemissä tutkimuksissa sivukiven ominaisuuksille rasian koko oli selkeästi isompi 300x300 mm. Näin ollen on hyvin mahdollista, että Sulin (2019) mittaukset aliarvioivat sivukivimateriaalien kitkakulman.

Toinen huomioitava seikka on materiaalin koheesio, jolle näissä mallinuksessa käytettiin hyvin pientä 1 kPa arvoa. Xu et al. (2017) kuitenkin esittävät yleisenä linjana, että sivukivikasojen mallinuksessa voitaisiin kasan pintakerroksille käyttää kitkakulman ja näennäisen koheesio arvoja $40 \pm 3^\circ$ ja 50 ± 25 kPa, sekä syvemmillä kasassa olevalle materiaalille arvoja $35 \pm 3^\circ$ ja 100 ± 50 kPa. Perusteena esitetään, että sivukivikasojen tapauksessa materiaali ei yleensä pääse kyllästymään vedellä ja näin ollen maa-aineksen imusta johtuvaan näennäiskoheesioon voidaan luottaa stabiliteettia arvioitaessa. Kitkakulman ja koheesio kasvattaminen esim. pintamateriaaleille parantaisi selkeästi etenkin pienempien sortumistilavuuksien varmuuskerrointa, sillä tällaiset sortumat olisivat välttämättä pinnallisia. Kuten taulukosta 5 nähdään, jo hyvin maltillinen koheesio kasvatus nostaisi varmuuskertoimen yli yhden. Lisäksi on huomioitava käytetyn tasapainomenetelmän ominaisuudet. Chaudhary et al. (2016) vertailivat eri tasapainomenetelmiä (Bishop, Spencer, Morgenstern-Price, GLE) 3D-stabiliteettianalyyseissä ja totesivat kaikkien tuottavan melkein saman varmuuskertoimen riippumatta luiskan geometriasta, joskin Bishop on hieman konservatiivisempi (pienempi varmuuskerroin) verrattuna muihin.

Näin ollen kokonaisuutena voidaan todeta, että kiillegneissikas voi olla epästabiili pienten sortumien tapauksessa, mutta mallinuksessa voisi olla perusteltua käyttää myös vähemmän konservatiivisia arvoja, jolloin esim. materiaalin koheesio nosto jo muutaman kPa:n verran kasvattaisi minimivarmuuskertoimen yli $F=1$ arvon jo pienilläkin sortumilla. Joka tapauksessa 3D-stabiliteettilaskenta onnistuu paljastamaan potentiaalisesti vaarallisia alueita, jotka jäisivät helposti 2D-stabiliteettimallinuksessa huomaamatta, jos/kun läpileikkaukset valitaan a priori tuntematta alueen kokonaistilannetta. Kuvassa 39 on esitetty kiillegneissikasan 3D-stabiliteettimallinnus $2\,000\text{ m}^3$ minimisortumistilavuudella, johon on lisäksi lisätty konsulttitoimiston tekemien 2D-mallinnusten läpileikkausten sijainti. Kuten kuvasta nähdään,

2D-mallinnuksen läpileikkaukset eivät osu 3D-mallin mukaisille pienimmän varmuuskertoimen alueille.



Kuva 39. Kiillegneissikasan 3D-stabiliteettimallinnus 2000 m³ minimisortumistilavuudella sekä konsulttitoimiston tekemien 2D-stabiliteettimallinnuksien läpileikkausten sijainnit mustilla viivoilla.

4.3.2 Vedenjohtavuusmittaukset

Mittaustulokset ajansuhteen kerättiin maastossa käsin. Tulokset laskettiin myöhemmin Microsoft Excelissä. Taulukkoon 7 on kerätty havainto mitatusta materiaalista ja laskennallinen k_{ka} -arvo rengasinfiltrometrimittauksista. Vastaavasti taulukossa 8 on tulokset Guelphin infiltrometrimittauksista. Laskennallisesti k -arvot vaihtelivat paljon, erot olivat satakertaisia vaihteluvälin ollessa $5,8 \cdot 10^{-6}$ m/s... $6,9 \cdot 10^{-8}$ m/s.

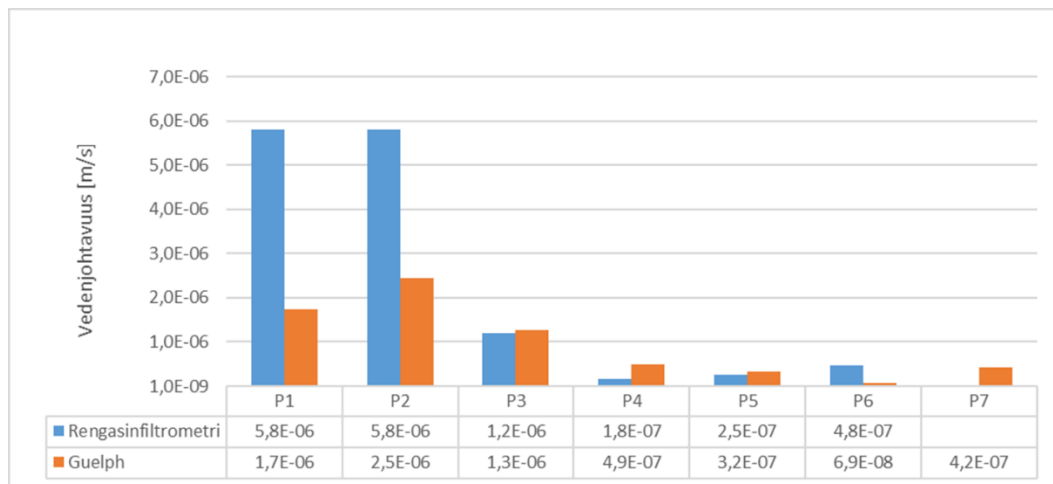
Taulukko 7. Rengasinfiltrometrin laskennalliset vedenjohtavuustulokset, ja havainto käytetystä tiivistysmateriaalista.

| Tuloskoonti, Rengasinfiltrometri | | |
|----------------------------------|------------------------|---------------------|
| Piste | Havainto materiaalista | k_{ka} (m/s) |
| P1 | moreeni | $5.8 \cdot 10^{-6}$ |
| P2 | opasakka | $5.8 \cdot 10^{-6}$ |
| P3 | opasakka | $1.2 \cdot 10^{-6}$ |
| P4 | moreeni | $1.8 \cdot 10^{-7}$ |
| P5 | moreeni | $2.5 \cdot 10^{-7}$ |
| P6 | opasakka | $4.8 \cdot 10^{-7}$ |

Taulukko 8. Guelphin infiltrometrillä mitattujen materiaalien laskennallisen vedenjohtavuudet sekä havainto käytetystä tiivistysmateriaalista.

| Tuloskoonti, Guelph | | |
|---------------------|------------------------|---------------------|
| Piste | Havainto materiaalista | k_{ka} (m/s) |
| P1 | moreeni/opasakka | $1.7 \cdot 10^{-6}$ |
| P2 | opasakka | $2.5 \cdot 10^{-6}$ |
| P3 | opasakka | $1.3 \cdot 10^{-6}$ |
| P4 | moreeni | $4.9 \cdot 10^{-7}$ |
| P5 | moreeni | $3.2 \cdot 10^{-7}$ |
| P6 | moreenista | $6.9 \cdot 10^{-8}$ |
| P7 | opasakka | $4.2 \cdot 10^{-7}$ |

Tulokset vaihtelivat samalta alueelta tehdyillä mittauksilla myös menetelmien välillä (kuva 40). Eli esimerkiksi pisteestä 1 tehtiin sekä rengasinfiltrometri- että Guelphin infiltrometrimittaus. Eroja mittaustuloksiin tulee jo menetelmästä itsestään ja mittauksissa tapahtuneista inhimillisistä asioista, kuten lukemavirheistä tai mittauksen aloittamisajankohdan valinnasta. Myös menetelmät itsessään ovat erilaiset ja mittaavat pinta-alaltaan eri suuruiselta alueelta veden imeytymistä.



Kuva 40. Rengasinfiltrometrillä ja Guelphin infiltrometrillä mitattujen näytteiden laskennallisten vedenjohtavuusarvojen vertailua pisteittäin.

Johtopäätöksenä tehdyistä mittauksista voidaan sanoa, että kaivosolosuhteissa mittaaminen voi olla haasteellista. Alueelle on saatava vettä ja etäisyydet voivat olla pitkiä. Yhden mittauksen tekeminen vie aikaa ja niitä olisi hyvä toistaa useampia, jotta voidaan varmistua siitä, että esimerkiksi maaperä on varmasti ehtinyt kyllästyä ennen mittauksen aloittamista, tai että vesi ei pääse virtaamaan erityistä virtauskanavaa pitkin, jolloin itse materiaalin k-arvo jää mittaamatta. Lisäksi olisi hyvä tehdä rinnakkain erilaisia mittauksia. Eli mikäli alussa on tehty materiaalille mittauksia laboratorio-olosuhteissa. Olisi hyvä tehdä vastaavalle materiaalille in situ -koe käytettävillä menetelmillä ja verrata, miten tulokset eroavat. Laboratorio-olosuhteissa materiaalien k-arvo voidaan helpommin mitata ja näytteen tiivistäminen ym. tehdä juuri halutulla tavalla. Maasto-olosuhteissa rakentamisessa käytettävät työtavat vaihtuvat, samoin käytettävät menetelmät ja mittasuhteet muuttuvat laboratorion pienestä kaivosalueen todella laajaksi. Eri olosuhteissa ja erilaisilla menetelmillä tehtyjä mittauksia on siksi vaikea verrata. Lisäksi pintarakenteet, kuten myös pohjarakenteet, saattavat sisältää keinotekoisia eristeitä kuten geosynteettisiä kalvoja, jolloin in situ -mittauksia ei voida tehdä. Käytetyt in situ -menetelmät rikkovat rakennetta ja se on huomioitava soveltuvuutta miettiessä.

5. Työpaketti 3

Hankkeessa tuotettiin selvitys erilaisista dronemenetelmistä, joita hankkeen toteuttajat ovat olleet kehittämässä tai läheltä seuranneet. Droneselvitys sijaitsee GTK:n palvelimella ja sitä päivitetään menetelmien kehittyessä ja uusien ilmaantuessa. Esitellyt menetelmät voidaan jakaa kuvantamistutkimuksiin, mittauksiin ja näytteenottoon. Kuvantamistutkimuksissa hyödynnetään erilaisia kameroita ja analysoidaan niillä tuotettua tietoa. Kameravalikoiman monipuolisuuden ansiosta kuvantamistutkimusten sovellusalue on hyvin laaja ja palvelee monia tieteenaloja. Mittaukset käsittävät lähinnä droneilla tehtäviä fyysikaalisten suureiden mittaamista, joita tehdään yleensä miniaturisoiduilla geofysiikan mittalaitteilla. Myös mittausmenetelmien sovellusalue on hyvin laaja. Tällä dronemenetelmien osa-alueella tuleamme näkemään paljon kehitystä lähivuosina menetelmien jalostuessa ja uusien

ilmaantuessa. Näytteenotto käsittää toistaiseksi vain EAKR Drominä-hankkeessa kehitetyt ja sitemmin kaupallistetun vesinäytteenotuksen.

Hanketta ja siinä saatuja tuloksia esiteltiin FinDrones2020-konferenssissa 12.11.2020 (etänä), Oulun yliopiston Tekniikan torstai -seminaarissa 10.12.2020 (etänä) sekä 7th International Young Geotechnical Engineers Conference -konferenssissa 29.4.2022 (etänä). Hankkeen puitteissa toteutettiin myös kaksi yhteisseminaaria: ”Kiertotalous ja kaivosympäristö: kiinteä jäte ja vedet” -seminaari 1.12.2020 yhteistyössä Biopeitto-, HybArkt- ja KAIVASU-hankkeiden kanssa, sekä ”Uudet mahdollisuudet kaivosympäristöjen kiertotaloudessa ja kestävässä kehityksessä” -seminaari 16.3.2022 yhteistyössä KAIVASU- ja UPACMIC-hankkeiden kanssa. Yhteisseminaarit keräsivät noin 100 osallistujaa per seminaari. Lisäksi hankkeessa kerättyyn tutkimusdataan liittyen on tekeillä kaksi manuskriptiä tieteellisiin joulalehtiin toimitettavaksi.

Hankkeen sosiaalisen median kanaville (Facebook, Twitter, Instagram) lisättiin kuvia, videoita, yms. julkaisuja hankkeen toimintaan liittyen. Sosiaalisen median kanavista eniten näkyvyyttä hanke keräsi Facebookissa, jossa yksittäiset julkaisut tavoittivat keskimäärin parikymmentä henkilöä ja suosituin julkaisu tavoitti yli 450 henkilöä. Lisäksi hankkeen toimintaan (esim. mittausreissut) liittyvät julkaisut ovat keränneet satoja tykkäyksiä tutkijoiden henkilökohtaisilla sosiaalisen median kanavilla. Hankkeesta on lisäksi tiedotettu osallistujaorganisaatioiden tilaisuuksissa sekä hanketta on esitelty organisaatioiden web-sivuilla.

6. Yhteenveto ja johtopäätökset

LeKaT-hanke oli kaikin puolin hyvin onnistunut hanke, ja mielestämme osoitimme selvästi dronemenetelmien edut verrattuna tavanomaisiin menetelmiin. Dronemenetelmät voittavat tavanomaiset menetelmät nopeudessa ja varsinkin työturvallisuudessa. Ilmakuvauksen sovelluksilla voidaan osoittaa tarkasti toimenpiteitä vaativat ongelmakohdat ja välttää liikkuminen vaarallisilla alueilla. Työpakettin 2 vedenjohtavuustutkimukset osoittivat jälleen kerran kuinka haastavaa maastomittaus voi olla ja kuinka niiden tekemiseen on syytä panostaa riittävästi resursseja.

Yhtenä hankkeen onnistumisen mittarina voidaan pitää sen johdosta syntyneiden jatkoideoiden määrää. Tässäkin mielessä LeKaT-hanketta voidaan pitää hyvin onnistuneena, koska jatkoideoita ja uusia tutkimuskysymyksiä on useita. Havaitsimme myös kehityskohteita, joista osa on jo niin sanotusti työn alla. Työpakettin 1 tutkimuksia hidasti hieman jalkaisin tehty sähkönjohtavuusmittaus, johon on olemassa H2020 NEXT-hankkeessa prototyyppiasteelle kehitetty ja sen jälkeen jatkokehitetty dronepohjainen sähkönjohtavuusmittaus. Toinen tutkimusta nopeuttava kehityskohde voisi olla vesinäytteiden kenttäanalytiikka, koska vesinäytteiden analyysitulosten valmistumisessa menee useita viikkoja. Havaitsimme myös vesinäytteiden kuljetusketjussa laboratorioon olevan koko näytesarjan laadun vaarantavia heikkoja lenkkejä, mikä sekin puoltaa näytteiden analysointia maastossa. Alkuaineiden totaalipitoisuuksia mittaavia siirrettäviä laitteita on ollut markkinoilla jo usean vuoden ajan, mutta ainakin kaivosympäristötutkimuksissa kaivattaisi tiettyjä molekyyliä tunnistavia laitteita.



Lähdeluettelo

- Akhtar, K., 2011. Three dimensional slope stability analyses for natural and manmade slopes. Ph.D. dissertation. Urbana, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Johansson, P. 2005. Jääjärvet. In publication Johansson, P. & Kujansuu, R. (Ed.). Pohjois-Suomen maaperä: Maaperäkarttojen 1:400 000 selitys, 127-149. Geologian tutkimuskeskus. Espoo. 2005.
- Kalatehjari, R. & Ali, N., 2013. A Review of Three-Dimensional Slope Stability Analyses based on Limit Equilibrium Method. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 18, p. 119–134.
- Korkalo, T. 2006: Gold and copper deposits in Central Lapland, Northern Finland, with special reference to their exploration and exploitation. Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu. *Acta Universitatis Ouluensis A* 461, 2006 University of Oulu, Finland. 2006.
- Korkiakoski Esko and Sorjonen-Ward Peter (ed) 1997: Ore deposits of Lapland in northern Finland and Sweden. Edited by Esko Korkiakoski and Peter Sorjonen-Ward Research and Exploration – where do they meet? 4th Biennial SGA Meeting. August 11-13, 1997, Turku, Finland, excursion guidebook B1. Geologian tutkimuskeskus, Opas – Geological Survey of Finland, Guide 43. 1997.
- Mikkola, Erkki 1941: Suomen geologinen yleiskartta The general geological map of Finland. *Lehdet – Sheets B 7 – C 7 – D 7 Muonio-Sodankylä-Tuntisajoki. Kivilajikartan selitys Explanation of the map of rocks.* Suomen geologinen toimikunta, Helsinki 1941. Valtioneuvoston kirjapaino. 1941.
- Niiranen, T., Lahti, I., Nykänen, V. and Karinen, T. 2014: Central Lapland Greenstone Belt 3D modeling project Final report. Geologian tutkimuskeskus Tutkimusraportti 209 Geological Survey of Finland Report of Investigation 209. 2014.
- Ramboll, 2018. Hituran sivukivikasojen pohjatutkimukset ja vakavuustarkastelut tehokkailla parametreilla.
- Reid, M. E., Christian, S. B., Brien, D. L. & Henderson, S. T., 2015. Scoops3D—Software to Analyze Three-Dimensional Slope Stability Throughout a Digital Landscape. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, book 14, 2015, 218 s.
- Suli, A., 2018. Hituran kaivoksen sivukivikasojen geoteknisten ominaisuuksien tilavuuspainon sekä kitkakulman määrittäminen. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.
- TTY, 2018. Testausselostus MPR/226/2018, Hituran sivukivikasojen pohjatutkimuksien kolmiakksiaalikoheet, Tampereen teknillinen yliopisto.
- Williams, D.J., 2015. How stable are angle-of-repose coarse-grained mine waste slopes? In *Proceedings of Slope Stability 2015*, Cape Town, South Africa, 12-14 October 2015.

Xu, Y., Williams, D.J. & Serati, M., 2017. Investigation of Shear Strength and Breakdown of Mine Waste Rock. In Proceedings of 51st US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, San Francisco, California, USA, 25-28 June 2017.

