

# Uudet teknologiat uomien ja kaivosaltaiden kartoitukseen (UOMARI) – hankkeen loppuraportti

Kaisa Turunen<sup>1</sup>, Petri Valasti<sup>1</sup>, Hannu Panttila<sup>1</sup>, Oli Nurmilaukas<sup>1</sup>, Tatu Lahtinen<sup>1</sup>, Juha Davidila<sup>1</sup>, Hannele Hallett<sup>1</sup>, Veijo Sutinen<sup>2</sup>, Pasi Karjalainen<sup>2</sup>, Roope Koponen<sup>2</sup>, Kyösti Karttunen<sup>2</sup>, Harri Kaartinen<sup>3</sup>, Matias Mäki-Leppilampi<sup>3</sup>, Joonas Kahiluoto<sup>4</sup>, Jarno Turunen<sup>4</sup>, Kimmo Tolonen<sup>4</sup>, Tuomas Hirvonen<sup>4</sup>

Geologian tutkimuskeskus<sup>1</sup>

Oulun yliopisto, Mittaustekniikan yksikkö<sup>2</sup>

Maanmittauslaitos, Paikkatietokeskus FGI<sup>3</sup>

Suomen ympäristökeskus<sup>2</sup>



## Tiivistelmä

UOMARI-hankkeessa kehitettiin droonipohjaisia mittaus- ja kuvantamismenetelmiä virtavesien ja kaivosaltaiden kartoittamiseen. Menetelmät, kuten maatutkadrooni, laserkeilaimet, lämpö- ja multispektrikuvantaminen sekä autonominen vesitutkimusalue, mahdollistavat kolmiulotteisen, tarkan ja kustannustehokkaan kartoituksen eri ympäristöissä. Menetelmien toimivuutta verrattiin perinteisiin tekniikoihin kuten manuaalisiin virtausmittauksiin ja muihin geofysikaalisiin menetelmiin. Kenttämittauksia tehtiin kaivos- ja uomakohteissa Kainuussa ja Lapissa. Tulokset osoittivat, että eri menetelmillä on selviä vahvuuksia ja rajoitteita: esimerkiksi samea vesi heikentää bathymetristä laserkeilausta, kun taas maatutkadrooni toimii hyvin avoimilla alueilla mutta ei tiheässä rantapuustossa. Kaivosalueilla suuri sähköjohtavuus heikensi maatutkan suorituskykyä, jolloin syvyyskartoitus toteutettiin parhaiten autonomisella vesialuksella. Paras tulos saavutettiin yhdistämällä eri menetelmien tuottama data. Useilla kohteilla tämä mahdollisti tarkan mallin uoman syvyyksistä, muodoista ja kerrosrakenteista. Droonipohjaiset menetelmät osoittautuivat erityisen hyödyllisiksi vaikeakulkuisissa ja turvattomissa ympäristöissä, mutta perinteisiä menetelmiä voidaan käyttää sääolosuhteissa, joissa droonilento ei ole mahdollista. Hanke paransi uomien, virtavesien ja kaivosrakenteiden kartoituksen luotettavuutta, turvallisuutta ja kustannustehokkuutta. Menetelmät soveltuvat laajasti myös vesistö- rakentamisen, ruoppausten, voimalaitos- ja siltaselvitysten, sedimenttitutkimusten ja suotovesikartoitusten tarpeisiin.

## Abstract

In the UOMARI project, drone-based measurement and imaging methods were developed for mapping streams, mine tailings facilities and ponds. Methods such as ground-penetrating radar drones, laser scanners, thermal and multispectral imaging, and an autonomous water survey vessel enable three-dimensional, accurate, and cost-effective mapping in various environments. The performance of these methods was compared with traditional techniques such as manual flow measurements and more traditional geophysical methods. Field measurements were conducted at mining sites, streams and rivers in Kainuu and Lapland. The results showed that the different methods have clear strengths and limitations: for example, turbid water weakens bathymetric laser scanning, whereas ground-penetrating radar drones perform well in open areas but not in densely wooded shorelines. In mining areas, high electrical conductivity reduced the performance of ground-penetrating radar, in which case depth mapping of water ponds was carried out using an autonomous water vessel. The best results were achieved by combining data produced by different methods. At several sites, this enabled the creation of accurate models of channel and pond depths, shapes, and stratification. Drone-based methods proved particularly useful in hard-to-access and hazardous environments, but traditional methods can be used in weather conditions where drone operation is not possible. The project improved the reliability, safety, and cost-effectiveness of mapping channels, ponds, and mining structures. The methods are also widely applicable to water infrastructure construction, dredging, power plant and bridge studies, sediment research, and seepage water mapping.

## SISÄLLYSLUOTTELO

1.	JOHDANTO .....	5
2.	MITTAUSMENETELMÄT JA TUTKIMUSKOHTEET .....	5
3.	MITTAUSMENETELMIEN VERTAILU JA HYÖDYNNETTÄVYYS .....	8
4.	JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO .....	8
5.	KIITOKSET .....	11

## LIITTEET - TUTKIMUSRAPORTIT

1.	Droonipohjainen batymetria Rautuvaaran suljetun uoman arvioinnissa .....	12
2.	Droonipohjainen batymetria Ristijärven Emäjoen uoman muodon arvioinnissa .....	20
3.	Droonipohjainen batymetria Mondo Mineralsin kaivosaltaan arvioinnissa .....	30
4.	Droonipohjainen batymetria Valkeajoen uoman muodon arvioinnissa .....	38
5.	Droonipohjainen batymetria Otanmäen lintuvesialtaan pohjamuodon arvioinnissa .....	44
6.	Droonipohjainen maatumkamittaus Otanmäen rikastushiekka-altaan pohja ja penkkarakenteen arvioinnissa .....	57
7.	Droonit virtauksen mittauksessa .....	70
8.	Droonilla tuotetut paikkatietoaineistot habitaattimallinnuksen tukena .....	81
9.	Maatumkien soveltuvuuden testaus vedenalaisten rakenteiden ja jään mittaamisessa.....	94

## 1. JOHDANTO

Suomen virtavesien tila on heikko: noin kolmasosa jokivesistä on ekologisesti heikentyneitä, ja luonnontilaisia uomia on vähän myös Lapissa, jossa uomia on muokattu tulvasuojelun, voimatalouden ja maankuivatuksen vuoksi. Nämä muutokset ovat heikentäneet veden laatua ja elinympäristöjä, erityisesti vaelluskalojen kannalta.

Kaivosalueilla rikastushiekka- ja vesialtaiden rakenteet ovat kriittisiä. Rakenteiden vauriot ovat usein olleet syynä viimeaikaisiin ympäristöonnettomuuksiin, mutta nykyiset menetelmät eivät paljasta ongelmia riittävän varhaisessa vaiheessa.

Vesistöjen tilan parantaminen edellyttää kunnostustoimia, joiden suunnittelu perustuu tarkkaan tietoon uoman nykytilasta ja elinympäristöjen rakenteista. Kunnostustarpeiden arviointi vaatii yksityiskohtaista ymmärrystä virtausolosuhteista sekä pohjan, ranta-alueiden ja kasvillisuuden muodostamasta kokonaisuudesta. Virtausmallinnus on keskeistä sekä elinympäristöjen arvioinnissa että päästöjen leviämisen ennustamisessa.

Perinteiset kartoitusmenetelmät ovat kuitenkin hitaita, raskaasti toteutettavia ja paikoin riskialttiita, erityisesti vaikeakulkuisissa maastoissa ja sortumavaarallisilla kaivosalueilla. Uomien ja altainen monimutkaiset muodot edellyttävätkin tehokkaampia menetelmiä, joiden avulla virtaus ja pohjageometria voidaan kuvantaa tarkasti ja kolmiulotteisesti.

Uudet teknologiat uomien ja kaivosaltaiden kartoitukseen (UOMARI) -hankkeessa kehitettiin drooneihin perustuvia mittaus- ja kuvantamismenetelmiä, joita voidaan hyödyntää hyvin erilaisissa ympäristöissä. Menetelmiä testattiin muun muassa kaivosalueilla, voimalaitosten alapuolisissa muokatuissa virtavesissä sekä luonnontilaisissa uomissa, ja niiden toimivuutta verrattiin perinteisiin kartoitusmenetelmiin. Hankkeen tavoitteena oli parantaa mittausten luotettavuutta, kustannustehokkuutta ja työturvallisuutta. Droonipohjaiset menetelmät mahdollistavat tarkat ja kustannustehokkaat

3D-mallit virtavesistä ja kaivosaltaista, kalojen elinympäristöjen habitaattimallit sekä teollisuusvesien sekoittumissimuloinnit purkuputkien sijoittelun tueksi. Kaivos- ja uomakohteiden lisäksi kehitettyjä ratkaisuja voidaan hyödyntää laajasti muun muassa vesistö rakentamisen luvituksessa, ruoppausten suunnittelussa, voimalaitos- ja siltarakenteiden selvityksissä, järvisedimenttien tutkimuksessa sekä kaato- paikkojen suotovesien kartoituksessa.

Uomari-hanke osarahoitettiin Pohjois-Pohjanmaan toimintaympäristön EAKR-rahoituksesta. Hanketta koordinoi Geologian tutkimuskeskus (GTK) ja tutkimuskumppaneina toimivat Oulun yliopiston Mittaustekniikan yksikkö (MITY), Suomen ympäristökeskus (Syke) ja MML Paikkatietokeskus FGI. Yhteistyökumppaneina toimivat Hannukainen Mining Oy, Otanmäki Mine Oy, Mitta Oy, Geo-Work Oy, Radai Oy sekä Energiateollisuus. Hanke kesti lokakuusta 2023 maaliskuun loppuun 2026. Tässä raportissa esitellään lyhyesti hankkeen tutkimuskohteet, käytetyt tutkimuslaitteet sekä vedetään yhteen erillisten tutkimustapausten keskeisimmät tutkimustulokset. Lisäksi esitellään johtopäätökset eri mittausmenetelmien eduista ja heikkouksista, sekä hyödynnettävyydestä erityyppisissä ympäristöissä. Jokainen tutkimus ja sen tulokset on esitelty yksityiskohtaisemmin raportin liitteissä.

## 2. MITTAUSMENETELMÄT JA TUTKIMUSKOhteet

Hankkeessa hyödynnettiin useita toisiaan täydentäviä mittaus- ja kuvantamisteknologioita. Alla on esitelty lyhyesti tutkimuksissa käytetyt menetelmät. Tarkemmat menetelmä kuvaukset löytyvät tapauskohtaisista tutkimusraporteista tämän raportin liitteinä.

**Maatutkaa** (GPR, ground penetrating radar) käytettiin kaivosaltaiden pohjarakenteiden ja joenuomien vedenalaisten pohjamuotojen tutkimiseen. Perinteisesti maatutkaa on operoitu jalan tai veneestä, mikä on hidasta ja paikoin vaarallista, erityisesti vanhoilla louhosalueilla.

UOMARI-hankkeen sisarhankkeessa Uomari\_Infra hankittiin Oulun yliopiston mitaustekniikan yksikölle (MITY) Maatutkadrooni. Drooni nopeuttaa mittauksia ja parantaa työturvallisuutta. Hankkeessa käytetty Mitaustekniikan yksikön maatutkadrooni koostuu miehittämättömästä ilma-aluksesta, maatukajärjestelmä sekä turvavarusteesta (kuva Y). GPR-droonimittausjärjestelmä sisältää DJI Matrice 350 RTK -droonin, jossa on RTK (Real Time Kinetic) -tarkkuuspaikannus sekä laaja käyttölämpötila-alue (-20 ... 50 °C) ja IP55 vedenpitävyysluokitus.



Kuva 1. Maatutkadrooni Kajaanin Karankalahdella

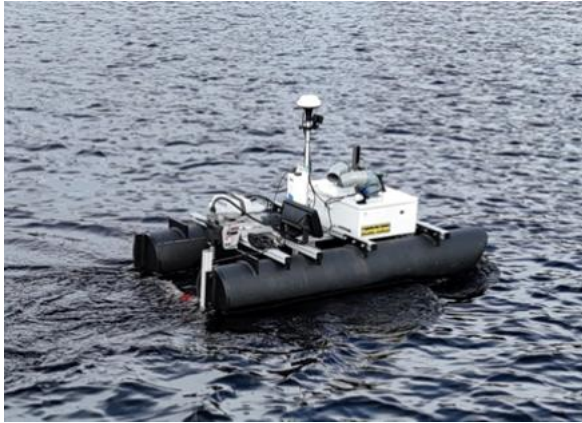
**Laserkeilain** on mittalaite, joka tuottaa tarkkaa kolmiulotteista mittaustietoa kohteesta. Hankkeessa käytettiin MITYn droonimittausjärjestelmä koostuu DJI Matrice 350 RTK -droonista ja DJI Zenmuse L2 -laserkeilaimesta. Lisäksi laserkeilauksessa testattiin ensimmäistä kertaa **kahden aallonpituuden droonilaserkeilainta**, jossa yhdistyvät vihreä (batymetrinen) ja lähi-infrapuna (topografinen) lasersäde. Tämä mahdollistaa sekä vedenalaisten että vedenpäällisten rakenteiden samanaikaisen kartoituksen. Hankkeessa käytettiin Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskus FGI:n droonilla operoitavaa Fraunhofer IPM:n (Saksa) valmistamaa ABS-laserkeilainta (Airborne Bathymetric Scanner, Kuva 2).



Kuva 2. Kahden aallonpituuden laserkeilaindrooni.

**Lämpökameran** (FLIR) avulla voidaan havaita lämpötilaeroja, joita hyödynnetään esimerkiksi pohjavesipurkaumien ja haitta-ainesten kulkeutumisen seurannassa. RGB-kamera tuottaa tarkkaa kuvamateriaalia ja mahdollistaa videopohjaisen virtauslaskennan. MITY:n multispectridroonimittausjärjestelmä koostuu DJI Mavic 3M -droonista ja sisäänrakennetusta multispectrikamerasta. Data-aineisto prosessoidaan ortokuviksi DJI Terra -ohjelmistolla.

Lisäksi tutkimuksissa käytettiin **autonomista vesitutkimusalusta**, joka on varustettu yksisäteisellä ja sivuttaissuuntaisella kaikuluotaimella (Humminbird Helix 9), kanavan syvyyškartan luomiseen. Vesitutkimusalus on Syken itse rakentama kokonaisuus, jonka keskeisimmät osat ovat Ardupilot/Mission planner –yhteensopiva ohjausjärjestelmä Cube Orange ja Torqeedo Travel Ultralite -sähköperämoottori. Järjestelmä toimii sekä kauko-ohjaimella, että tietokoneen kautta mahdollistaen ohjelmoitujen reittien ajon. Autonominen mittauslautta tukee virtausmallinusta ja rakenteiden selvitystä.



Kuva 3 Autonominen vesitutkimusalus

Modernien mittausmenetelmien toimivuutta verrattiin perinteisiin kartoitusmenetelmiin, kuten perinteisiin geofysiikan menetelmiin (maatutka, GEM-2H, tTEM) sekä manuaalisiin virtaamamittauslaitteisiin (mm. flowtracker, kiinteä mittausasema).



Kuva 4. Perinteinen maatutka moottorikelkkaan asennettuna ja korotettuna.

Projektissa kehitettiin myös datanhallintaa, jossa eri sensorien tuottama aineisto yhdistettiin yhtenäiseksi kokonaisuudeksi.

Maatutkadroonin sisäänajo ja testaus sekä vertailu perinteiseen maatutkaan aloitettiin laboratorio-olosuhteissa (suolaisuuden vaikutus tutkasignaaliin) sekä Kainuun Nuasjärvellä (ilmavälin vaikutus tutkasignaaliin). Varsinaisia kenttätutkimuksia eri laitteilla tehtiin kaivos- ja uomakohteissa Kainuun ja Lapin alueilla (kuva N). Kaivoskohteita olivat Otanmäen vanha kaivos Kajaanissa, Rautuvaaran vanha kaivos Kolarissa. Uomakohteita olivat Valkeajoki sivu-uomineen Kolarissa, Pirttikoski

Rovaniemellä sekä Emäjoen Seitenoikea Risti-järvellä. Näiden kaikkien tutkimusraportit ovat tämän raportin liitteinä. Lisäksi hankkeessa tehtiin yhteistyömittauksia mm. Cryo-ri-, Biopeitto Kainuu- ja GoldenRAM-hankkeiden sekä Mondo Mineralsin kanssa. Näistä yhteistyötutkimuksista ei ole erillisiä raportteja, mutta niiden tuloksia on käytetty mittausmenetelmien vertailussa ja hyödynnettävyyssarvioissa.



Kuva 5. Tutkimuskohteiden sijainti kartalla

Tutkimusten tarkoituksena oli testata droonipohjaisten menetelmien soveltuvuutta vedenalaisen topografian kartoittamiseen (Rautuvaara, Valkeajoki, Emäjoki ja Otanmäki), kaivosten rikastushiekka-altaan tutkimuksiin (Otanmäki), ympäristövirtaaman määrittelyyn (Valkeajoki, Seitenoikea ja Pirttikoski) ja uomien habitaattimallinnukseen (Pirttikoski) (Kuva 5).

### 3. MITTAUSMENETELMIEN VERTAILU JA HYÖDYNNETTÄVYYS

Droonipohjaisten menetelmien soveltuvuutta vedenalaisen topografian kartoitukseen arvioitiin yhteensä seitsemällä tutkimuskohteella. Samea vesi rajoitti **kahden aallonpituuden laserkeilaimen** käyttöä Emäjoella ja Rautuvaarassa, joissa ensimmäisessä havaintoja saatiin vain noin metrin syvyyteen asti ja toisessa ei lainkaan. Otanmäen lintukosteikolla sekä Kolarin Valkeajoella laserkeilaimella saatiin tarkkaa mittausdataa sekä veden alta, että veden yläpuolisista rakenteista. **Maatutkadroonilla** pystyttiin kartoittamaan Emäjoella lähes koko alue lukuun ottamatta rantavyöhykkeitä, joissa puunoksat estivät turvallisen lentämisen.

*Kuva 6. Tutkimuskohteiden sijainti kartalla*

Rautuvaarassa maatutka havaitsi **vesialuksen kaikuluotainta** syvemmälle ulottuvia rakenteita ja useampia kerroksia, mutta kerrosrajapinnat olivat epätasaisempia. Fyysiset esteet – kuten Emäjoen uoman päällä roikkuvat puunlatvat sekä Rautuvaaran puun tyngät ja turvelautat – vaikeuttivat sekä vesialuksen että matalalla lentävän maatutkadroonin liikkumista.

Kaivosalueilla, Otanmäen rikastushiekka-alueella ja Mondo Mineralsin Sotkamon kaivoksen vesialtaalla korkea sähkönjohtavuus vaimensi sekä droonipohjaisen, että perinteisen maatutkan signaalin, eikä veden alaisten pohjanmuotojen tai rikastushiekan sisäisten rakenteiden määrittäminen onnistunut luotettavasti. Sen sijaan autonominen ADCP-luotaimella varustettu vesialus tuotti vesialtaasta nopeasti selkeää ja käyttökelpoista syvyysdataa, joka toimi vertailuaineistona muille menetelmille. Lautan mittalaitteilla ei kuitenkaan nähnyt pohjan sisäisiä rakenteita, eikä siten voitu käyttää pohjarakenteiden kunnon selvittämisessä. Laserkeilaus täydensi aineistoa mahdollistamalla vesialtaan ympäristön tarkat pintamallit. Otanmäen rikastushiekka-alueen rakenteiden ja paksuuksien määrittämisessä päädyttiin lopulta käyttämään muita geofysiikan menetelmiä (GEM2 ja tTEM)

Kahden aallonpituuden laserkeilaus on parhaimmillaan matalissa ja kirkkaissa vesissä, missä muilla menetelmillä, kuten veneestä tehtävällä kaikuluotauksella ja matalaa lentokorkeutta vaativassa maatutkauksessa, on haasteita. Kahden aallonpituuden laserkeilauksen etuna on nopeus ja tuotetun pistepilven tiheys. Esimerkiksi 4,5 km pitkä valkeajoki saatiin mitattua neljällä 20 minuutin mittaisella lennolla.

Vesialusta voidaan operoida myös tuulisena ja sateisena päivänä toisin kuin droonipohjaisia menetelmiä. Vesialukseen saadaan myös asennettua useampia eri mittalaitteita samaan aikaan.

Useammalla kohteella tulokset osoittivat, että paras kokonaiskuva syntyy yhdistämällä eri menetelmien vahvuudet. Esimerkiksi Emäjoella uoman keskiosat saatiin mitattua nopeimmin maatutkalla, tarkimmin kaikuluotaimella ja rantavyöhykkeet ainoastaan laserkeilaimella.

Menetelmien yhdistäminen mahdollisti useammassa kohteessa kattavan mallin uoman syvyyksistä, muodoista ja kerrosrakenteista ja osoitti, että droonipohjaiset ratkaisut soveltuvat hyvin tilanteisiin, joissa perinteiset mittausmenetelmät ovat saavutettavuuden vuoksi haastavia. Perinteisempiä menetelmiä voi kuitenkin usein käyttää myös huonolla säällä toisin kuin droonipohjaisia menetelmiä.

Taulukossa 1 on esitelty UOMARI-hankkeessa käytettyjen droonipohjaisten ja automisten tutkimuslauttojen vahvuudet, heikkoudet ja soveltuvat tutkimuskohteet.

### 4. JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

UOMARI-hankkeessa kehitettiin ja testattiin droonipohjaisia mittaus- ja kuvantamistekniikoita virtavesien ja kaivosympäristöjen kartoitukseen. Tulokset osoittivat, että droonit ja muut modernit sensorit voivat merkittävästi parantaa kartoitusten turvallisuutta, tarkkuutta ja kustannustehokkuutta verrattuna perinteisiin menetelmiin.

Hanke havaitsi kuitenkin, että ympäristöolosuhteet – kuten veden sameus, sähkönjohtavuus ja maaston esteellisyys – rajoittavat yksittäisten menetelmien käyttöä. Siksi paras lopputulos saavutettiin yhdistämällä useiden menetelmien dataa, jolloin saatiin tarkka ja monipuolinen 3D-kuva uomien ja altaiden rakenteista sekä virtauksista.

Droonipohjaiset ratkaisut tarjoavat uuden, tehokkaan työkalun vesistöjen tilan arviointiin, kunnostussuunnitteluun, kaivosten turvallisuusseurantaan ja moniin muihin ympäristö- ja infra-alan käyttökohteisiin.

Taulukko 1. UOMARI-hankkeessa käytettyjen menetelmien vertailu

Menetelmä	Käyttökohteet kaivosympäristöissä ja uomissa	Vahvuudet	Heikkoudet / rajoitteet
<b>Maatutkadronni (GPR-UAV)</b>	Padot ja vesialtaat, routa/jäätutkimus, vesialtaiden ja uomien pohjamuodot, eri maakerrokset.	Nopea, turvallinen vaikeilla alueilla, erityisen hyvä ohuisiin maapeitteisiin, UAV mahdollistaa laajemman alueen mittaamisen kuin jalkaisin tehty maatutkaus.	Signaalin heikkeneminen korkean sähköjohtavuuden takia (mm. rikastushiekka, kaivosaltaat), UAV-kantavuus rajoittaa antennikokoa. Lakisääteinen matala lentokorkeus.
<b>Kahden aallonpituuden laserkeilain</b>	Uomien morfologia, kasvillisuuden läpäisy, eroosioriskien kartoitus, topografia	Kaksi aallonpituutta → parempi erotus kasvillisuuden ja maanpinnan välille sekä veden alle, erinomainen tarkkuus	Kallis laitteisto, veden sameus ja syvyys rajoittavat käyttöä.
<b>Autonominen mittauslautta</b>	Vesialtaiden ja uomien pohjan muoto, vesikemian kerrostuneisuus, virtaama	Turvallinen, voi kantaa useita sensoreita, tarkka uoman poikkileikkaus. Toimii myös haastavissa sääolosuhteissa (tuuli, sade).	Ei sovellu mataliin, kivisiin tai vuolaana virtaaviin uomiin; jää ja kasvillisuus rajoittavat käyttöä; ei anna tietoa sedimentin alta, kauko-ohjattava, mutta pitää saada veteen ja sieltä pois (turvallisuus ja saavutettavuus)
<b>RGB-kamera (ortokuvaukset)</b>	Eroosio, louhosten kartoitus, sortumien seuranta, topografiset muutokset, padon reunavyöhykkeet, veden pinnan laajuus, virtaamalaskenta kuvasta	Erittäin tarkka, edullinen, nopea, helppo analysoida	Vain pintadataa, vedessä rajoittaa näkösyvyys.
<b>Lämpökamera</b>	Vuotojen havaitseminen rikastushiekka-alueilla, lämpöanomalioiden seuranta, vesistövuodot ja pohjaveden purkautuminen	Hyvä sisäisen kosteuden ja vuotojen epäsuoraan havaitsemiseen	Sääherkkä, ei suoraa kemiallista tietoa
<b>Ilmalaserkeilaus (LiDAR)</b>	Rikastushiekka- ja vesialtaiden padot, morfologiset muutokset, uomien geometria, eroosio, sortumat	Erittäin tarkka 3D-malli, läpäisee kasvillisuuden, hyvä padon vakauden seurantaan	Vain pintadataa, pölyäminen ja sade heikentävät laatua.
<b>Perinteinen maatutka (GPR maasta käsin)</b>	Padot ja vesialtaat, routa/jäätutkimus, vesialtaiden ja uomien pohjamuodot, eri maakerrokset.	Tarkka pintarakenteissa, useita antennitaajuuksia saatavilla, hyvä maaston erottelukyky. Käyttökelpoinen myös haastavissa sääolosuhteissa (tuuli, sade)	Heikko erotuskyky sähköä johtavissa ja todella hienorakeisissa sedimenteissä, työ on hidasta verrattuna maatutkadronniin.

## 5. KIITOKSET

Tutkimus kuuluu Uudet teknologiat uomien ja kaivosaltaiden kartoitukseen (UOMARI) -tutkimushankkeeseen, joka on saanut rahoitusta Euroopan unionin aluekehitysrahastosta (EAKR), rahoittajana Pohjois-Suomen elinvoimakeskus (Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus).

UOMARI-ryhmäprojektissa toteuttajia ovat Geologian tutkimuskeskus (koord.), Oulun yliopiston Mittaustekniikan yksikkö, Suomen ympäristökeskus ja Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskus. Yhteistyökumppaneina toimivat Hannukainen Mining Oy, Otanmäki Mine Oy, Mitta Oy, Geo-Work Oy, Radai Oy sekä Energiateollisuus.



**Euroopan unionin  
osarahoittama**

### LIITTEET (TUTKIMUSRAPORTIT)

- Liite 1. Droonipohjainen batymetria Rautuvaaran suljetun uoman arvioinnissa
- Liite 2. Droonipohjainen batymetria Ristijärven Emäjoen uoman muodon arvioinnissa
- Liite 3. Droonipohjainen batymetria Mondo Mineralsin kaivosaltaan arvioinnissa
- Liite 4. Droonipohjainen batymetria Valkeajoen uoman muodon arvioinnissa
- Liite 5. Droonipohjainen batymetria Otanmäen lintuvesialtaan pohjamuodon arvioinnissa
- Liite 6. Droonipohjainen maatutkamittaus Otanmäen rikastushiekka-altaan pohja ja penkkarakenteen arvioinnissa
- Liite 7. Droonit virtauksen mittauksessa
- Liite 8. Droonilla tuotetut paikkatietoaineistot habitaattimallinnuksen tukena
- Liite 9. Maatutkien soveltuvuuden testaus vedenalaisten rakenteiden ja jään mittaamisessa

# Droonipohjainen batymetria Rautuvaaran suljetun uoman arvioinnissa

Veijo Sutinen<sup>1</sup>, Pasi Karjalainen<sup>1</sup>, Roope Koponen<sup>1</sup>, Joonas Kahiluoto<sup>2</sup>, Jukka Hirvonen<sup>2</sup>, Harri Kaartinen<sup>3</sup> ja Matias Mäki-Leppilampi<sup>3</sup>

Oulun yliopisto, Mittaustekniikan yksikkö<sup>1</sup>

Suomen ympäristökeskus<sup>2</sup>

Maanmittauslaitos, Paikkatietokeskus FGI<sup>3</sup>

## Tiivistelmä

Uomien pohjanmuotojen kartoitus on erityisen tärkeää silloin, kun suunnitellaan uomien muokkausta tai niiden käyttötarkoitusten muutoksia. Huolellinen suunnittelu edellyttää tietoa uoman vedenalaisista rakenteista sekä mielellään myös pohjan alla olevista maakerroksista.

Uudet teknologiat uomien ja kaivosaltaiden kartoitukseen (UOMARI) -tutkimushankkeessa tutkittiin droonipohjaisten teknologioiden soveltuvuutta vedenalaisten rakenteiden kartoittamiseen. Yhtenä tutkimuskohteena oli Kolarissa sijaitseva Niesajoesta padottu vesialue, joka mahdollisesti tullaan jakamaan kahteen osaan, mikäli kaivostoiminta käynnistyy alueella uudestaan. Padon rakentamista varten tarvitaan tarkempaa tietoa altaan pohjasta.

Rautuvaaran tutkimusalueella tehtiin syksyllä 2024 mittauksia drooniin liitetyllä kahden aallonpituuden laserkeilaimella sekä keväällä 2025 drooniin liitetyllä maatutkalla ja autonomisella vesialuksella. Tutkimuskohde osoittautui haastavaksi mittausympäristöksi, sillä vedenpinnan yläpuolella olevat puiden latvukset ja turvelautat vaikeuttivat sekä maatutkadroonin että autonomisen vesitutkimusaluksen toimintaa. Esteitä jouduttiin jatkuvasti väistelemään, minkä vuoksi mittauksia ei voitu toteuttaa täysin autonomisessa reittimoodissa. Tulokset osoittivat, että veden sameus esti kahden aallonpituuden laserkeilainta mittaamasta pohjanmuotoja, koska lasersäde absorboitui sameaan veteen. Sen sijaan maatutkadrooni pystyi havaitsemaan pääosin pohjanmuodot sekä osittain eri pohjarakenteiden kerroksia. Maatutkan tuloksia verrattiin vesialuksen kaikuluotausmittauksiin, ja vertailu osoitti, että maatutkamittaukset vastasivat hyvin kaikuluotaintuloksia.

## JOHDANTO

Suljettujen ja padottujen uomien tarkka muodon ja pohjarakenteen kartoittaminen on keskeistä vesirakentamisen suunnittelussa, virtausten arvioinnissa sekä uomien kunnossapidon ja turvallisuuden varmistamisessa. Tässä tutkimuksessa keskitytään erityisesti padotun joenuoman pohjarakenteisiin, sillä pohjan muodot, materiaalit ja kerroksellisuus vaikuttavat ratkaisevasti virtausolosuhteisiin, sedimentaation kulkuun ja rakenteellisen vakauden arviointiin.

Uoman toiminnan ymmärtämiseksi on avattava muutamia keskeisiä käsitteitä. Virtauskäyttäytymisellä tarkoitetaan veden virtausominaisuuksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä, kuten virtausnopeutta, vedenpinnan korkeutta, paine-eroja ja virtausvastusta. Nämä tekijät määrittävät, miten vesi liikkuu uomassa ja on vuorovaikutuksessa pohjan ja rakenteiden kanssa. Morfologia puolestaan viittaa uoman fyysiseen muotoon, sen rakenteellisiin piirteisiin ja niitä muokkaaviin prosesseihin. Morfologinen tieto on keskeistä esimerkiksi eroosion, sedimentaation ja uoman kehityksen arvioinnissa. Batymetria tarkoittaa vedenalaisen topografian mittaamista ja syvyysvaihteluiden kartoittamista, ja se muodostaa perustan uoman geometrian ja pohjan rakenteen analysoinnille.

Perinteisesti batymetriaa on tehty kaikuluotaimilla, mutta suljetuissa ja padotuissa uomissa perinteiset mittausalukset voivat olla hankalia käyttää kapeuden, syvyysvaihteluiden tai rakenteellisten esteiden vuoksi. Droonipohjaiset menetelmät tarjoavat tähän uudenlaisen ratkaisun, sillä ne mahdollistavat uoman kartoituksen nopeasti, tarkasti ja kustannustehokkaasti myös vaikeapääsyisissä ympäristöissä.

Tässä tutkimuksessa padotun joenuoman pohjarakenteita tutkittiin hyödyntämällä useita toisiaan täydentäviä kaukokartoitusmenetelmiä. Keskeisinä mittausjärjestelminä käytettiin droonilla kuljetettava kahden aallonpituuden laserkeilainta sekä maatutkaa (GPR), jotka oli mukautettu droonialustoihin soveltuviksi. Kahden aallonpituuden laserkeilaus mahdollistaa vedenpinnan läpäisevän mittauksen erityisesti matalissa ja kirkasvetisissä olosuhteissa, kun taas maatutka tarjoaa tietoa pohjan sisäisistä rakenteista ja sedimenttikerroksista.

Vertailuaineiston tuottamiseksi tutkimuksessa hyödynnettiin myös autonomista vesitutkimus-

alusta, joka oli varustettu yksisäteisellä kaikuluotaimella sekä sivuttaissuuntaisella kaikuluotaimella. Näiden avulla tuotettiin tarkka syvyyskartta, jonka avulla droonipohjaisen batymetrian tuloksia voitiin arvioida. Menetelmien yhdistäminen mahdollisti padotun joenuoman pohjarakenteiden monipuolisen ja korkean resoluution analyysin.

Raportissa tarkastellaan käytettyjen menetelmien toimintaperiaatteita, aineistonkeruuprosessia ja tulosten tarkkuutta sekä arvioidaan, miten yhdistetty mittausaineisto soveltuu padotun uoman pohjarakenteiden ja morfologian toiminnan arviointiin.

## 1. TUTKIMUSKOHDDE

Tutkimuskohde sijaitsee Kolarin kunnassa, Rautuvaaran entisen kaivoksen alueella, padotun Niesajoen varrella (kuva 1).



*Kuva 1. Rautuvaaran padottu uoma.*

Keskeinen osa Rautuvaaran kaivostoiminnan vesienhallintaa liittyi Niesajoen valuma-alueen käyttöön ja muokkaukseen. Kaivoksen rikastushiekka- ja sivukivialueet sijoitettiin Niesajokilaaksoon, mikä edellytti veden virtausten hallittua ohjaamista. Kaivostoiminnan aikana rakennettiin laaja vesivarastoallas sekä selkeytysallas, jotka erotettiin luonnonvesistä pato- ja eristerakentein. Tämä rakenteellinen vesien uudelleenohjaus ja patoaminen muodostivat kokonaisuuden, jota nykyisin kutsutaan padotuksi Niesajoksi.[1]

## 2. TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimuksessa tutkittiin padotun joenuoman keskikohdan pohjarakennetta, käyttämällä kahden aallonpituuden laserkeilainta ja maatutkaa (GPR), jotka on mukautettu droonien käyttöön. Lisäksi vertailumittaukseen käytettiin autonomista vesitutkimusalusta.

## 2.1. KAHDEN AALLONPITUUDEN LASER-KEILAINDROONI

Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskus FGI:n droonilla operoitava Fraunhofer IPM:n (Saksa) valmistama ABS-laserkeilain (Airborne Bathymetric Scanner, kuva 2) käyttää kohteiden mittaukseen samanaikaisesti 510 nm ja 1030 nm aallonpituuksia, joissa lyhyempi aallonpituus (vihreä) läpäisee veden ja pidempi (infrapuna) heijastuu veden pinnasta.

Vesialueen lisäksi ympäröivistä alueista, kuten rantojen kasvillisuudesta, maanpinnasta ja rakenteista, saadaan havainnot molemmilla aallonpituuksilla. Useamman aallonpituuden havaintoja voidaan hyödyntää tarkempaan kohteen tunnistamiseen, kuten puulajien määrittämiseen. Optimiolosuhteissa ABS:llä on mahdollista saada havaintoja veden alta 1,75 kertaa näkösyvyyttä syvemmältä, yleensä kuitenkin vähintään näkösyvyyden verran [2].

Laserkeilain lähettää lyhyen laserpulssin ja määrittää etäisyyden kohteeseen pulssin lentoajan perusteella. Kun yhdistetään havaittu etäisyys ja pulssin lentosuunta keilaimen yhdistetyn paikannusjärjestelmän antamaan paikka- ja asentotietoon, voidaan laskea laserpulssin osumakohdan eli mittauskohteen 3D-koordinaatit. Keilain pystyy havaitsemaan yhden laserpulssin lentomatkan varrelta useita paluukaikuja. Jos esimerkiksi osa säteestä osuu puunkasaan ja osa jatkaa matkaa maahan, saadaan yksi 3D-piste oksasta ja toinen maanpinnasta.



*Kuva 2. Kahden aallonpituuden laserkeilaindrooni.*

## 2.2. MAATUTKADROONI

Mittausmekaniikan yksikön (MITY) GPR-drooni koostuu miehittämättömästä ilma-aluksesta, maatutkajärjestelmästä sekä turvavarusteesta (kuva 3).



*Kuva 3. GPR-drooni Rautuvaarassa keväällä 2025.*

### *Miehittämätön ilma-alus – drooni, drone*

GPR-droonimittausjärjestelmä sisältää DJI Matrice 350 RTK -droonin, jossa on RTK (Real Time Kinetic) -tarkkuuspaikannus sekä laaja käyttölämpötila-alue (-20 ... 50 C) ja IP55 suojaus. Ominaisuudet mahdollistavat toistettavat lentoreitit ja tarkat paikkatiedot mittausdatalle erilaisissa sääolosuhteissa.

### *Maatutka – GPR (Ground Penetrating Radar)*

Maatutka on 1950-luvulla maantutkimiseen kehitetty mittalaite, jonka toiminta perustuu radiotaajuisten (MHz - GHz) sähkömagneettisten aaltojen lähettämiseen maaperään ja takaisin heijastuneiden signaalien vastaanottamiseen. Heijastuneiden signaalien kulkuajasta voidaan määrittellä etäisyys ja voimakkuudesta (amplitudi) eri kerrosten ominaisuuksia, mikäli näiden eri kerrosten aallon etenemisnopeus tunnetaan.

MITYn maatutkajärjestelmä koostuu Radar Systems Zond Aero LF -maatutkasta, SkyHub-tiedonkeruuyksiköstä ja Terrain Follow -pinnan seuranta-järjestelmästä. Maatutkassa on vaihdettavat antennit, joiden avulla mittaustaajuus voidaan valita 100, 150 tai 300 MHz väliltä. Tiedonkeruuyksikkö tallentaa mittausdatan reaaliaikaisella näytteistyksellä hyödyntäen hardware stacking -ominaisuutta. Pinnan seuranta-järjestelmän avulla drooni säilyttää asetetun etäisyyden maanpintaan automaattilennon aikana.

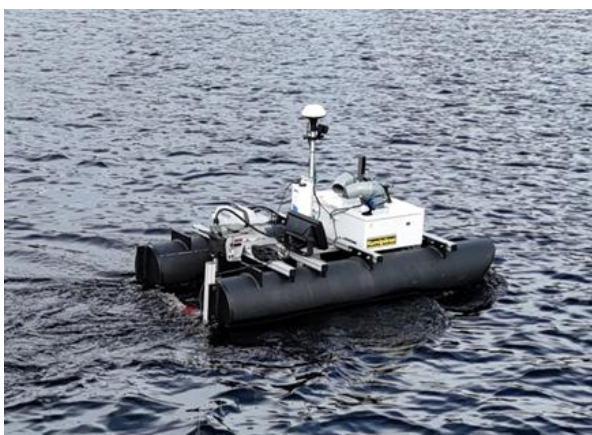
## Lentotoiminta

GPR-droonin lentotoimintaa ohjaa Traficom määrittelemät avoimen kategorian A3 -lentosääntöt sekä erilliset määräykset maatutkan käytöstä miehittämättömässä ilma-aluksessa. Kun drooniin liitetään maatutka, sen käyttö edellyttää Traficom myöntämää lupaa.

MITY:lle myönnetty lupa mahdollistaa maatutkalennot yhden metrin etäisyydellä maanpinnasta valituilla testikohteilla avoimessa kategoriassa A3. Matalalla lentämistä tukevat lento-ohjelmiston autopilotti- sekä pinnan seurantaominaisuus, jotka mahdollistava autonomiset lennot asetetulla etäisyydestä maanpinnasta. Lennon aikana etäisyys maanpintaa mitataan järjestelmään kuuluvan etäisyystutkan avulla. Vikaantumisen varalle droonissa on automaattisesti toimiva pelastusliivi, joka estää droonin vajoamisen pohjaan teknisessä vika tilanteessa.

### 2.3. AUTONOMINEN VESITUTKIMUSALUS

Tutkimuksessa käytettiin autonomista vesitutkimusalusta (kuva 4), joka oli varustettu yksisäteisellä ja sivuttaissuuntaisella kaikuluotaimella (Humminbird Helix 9), kanavan syvyyskartan luomiseen. Vesitutkimusalus on Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) itse rakentama kokonaisuus, jonka keskeisimmät osat ovat Ardupilot/Mission planner -yhteensopiva ohjausjärjestelmä, gps-laite, kamerat ja Torqeedo Travel Ultralite -sähköperämoottori. Järjestelmä toimii sekä kauko-ohjaimella, että tietokoneen kautta mahdollistaen enakkoon ohjelmoitujen reittien ajon.



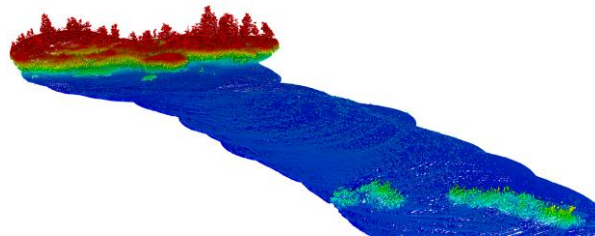
**Kuva 4.** Autonominen vesitutkimusalus.

## 3. MITTAUSTULOKSET

Tutkimuskohteessa suoritettiin mittauksia drooniin liitetyllä kahden aallonpituuden laserkeilaimella ja maatutkalla. Lisäksi alueella tehtiin vertailumittauksia autonomisella vesitutkimusaluksella.

### 3.1. KAHDEN AALLONPITUUDEN LASERKEILAIN

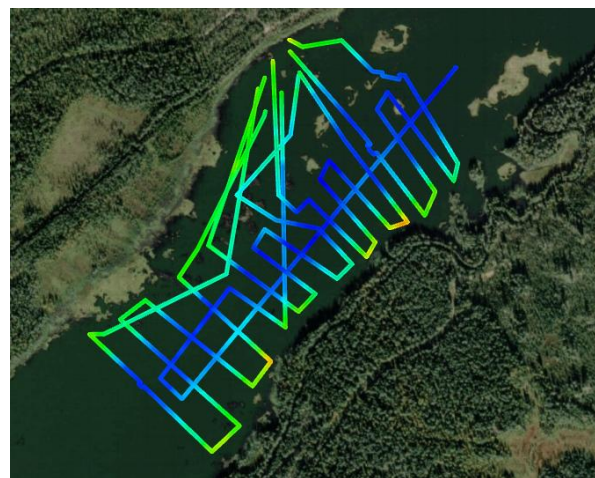
Kahden aallonpituuden laserkeilainta lennätettiin useampia linjoja eri lentokorkeuksilta altaan poikisuunnassa. Veden sameuden takia laserkeilaimella ei saatu havaintoja vedenpinnan alta, joten tässä kohteessa pohjaa ei pystytty laserkeilauksella määrittämään. Kerätty pistepilvi kuvaa siis vain vedenpinnan ja sen yläpuoliset alueet (kuva 5).



**Kuva 5.** Kahden aallonpituuden laserkeilaimella kerättyä 3D-pistepilveä korkeuden mukaan väritettynä. Kuvassa näkyy vedenpinta, rannan kasvillisuus ja etualalla altaassa olevia saaria.

### 3.2. MAATUTKADROONI

Maatutkalla varustetulla droonilla suoritettiin viisi mittaussenttoa, joiden avulla tarvittava tutkimusalue saatiin katettua kokonaisuudessaan (kuva 6)



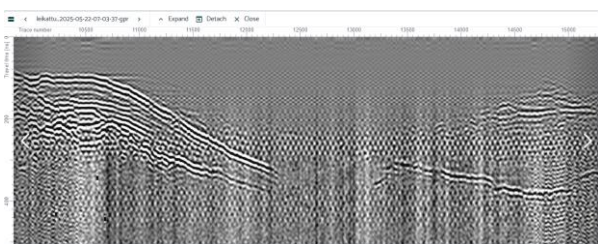
**Kuva 6.** GPR-Droonin lentoreitti.

Lennot toteutettiin autonomisesti, mikä edellytti lentoreittien huolellista suunnittelua uomassa esiintyvien saarekkeiden sekä pystyssä olevien puunrunkojen vuoksi. Maatutka vastaanottaa signaalia 366 nanosekunnin ajan, ja tallentaa tämän jakson 2048 näytteen tarkkuudella. Lentoreittien välinen etäisyys oli suurimmassa osassa poikkilentoja 30–50 metriä ja keskimäärin noin 35 metriä.

Maatutkadatasta oli käsittelyn jälkeen mahdollista erottaa sekä uoman kova pohja että sedimenttinen kerros. Näistä kahdesta rajapinnasta kova pohja erottui selkeämmin, mikä johtuu sen materiaalikoostumuksen voimakkaammasta kontrastista ympäröiviin aineisiin. Esimerkiksi veden suhteellinen permittiivisyys on noin 81, kun taas kivien, maaperän ja betonin tyypillinen permittiivisyys on noin 6 ja ilman arvo noin 1.

Näiden materiaalien sähkömagneettisten ominaisuuksien erot parantavat rajapinnan havaittavuutta maatutkakuvassa. Kova pohja kuitenkin häviää näkyvistä syvimmillä alueilla, joissa ainoastaan sedimenttikerros on edelleen havaittavissa.

Kuvassa 7 uoman pohjarajapinta on havaittavissa lähes koko profiilin matkalla rannalta rannalle. Lisäksi sedimenttikerros erottuu yhtenäisenä koko poikkileikkauksen leveydeltä. Kuvassa 8 sen sijaan uoman pohjarajapinta ei ole havaittavissa merkittäväällä osalla profiilia ja ylempi sedimenttikerros näkyy selvästi heikompana ja paikoin katkonaisena. Kuvien välinen ero osoittaa, että maatutkan kyky havaita pohjarakenteita vaihtelee paikallisten olosuhteiden mukaan, mikä lisää tulkinnan epävarmuutta erityisesti syvemmillä alueilla.

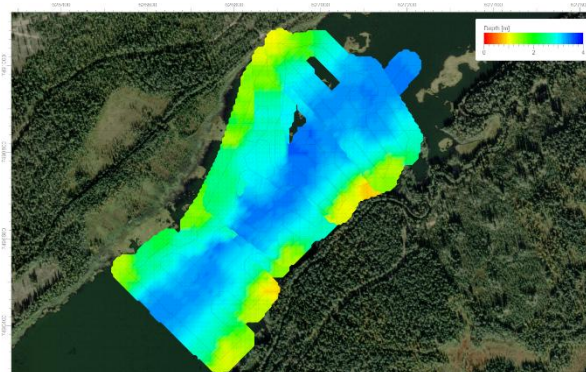


**Kuva 7.** Rannalta rannalle lennetty maatutkaprofiili.



**Kuva 8.** Rannalta rannalle lennetty maatutkaprofiili.

Datan käsittelyä seuraa horisontin tulkinta, jonka perusteella merkatusta kerroksesta tuotetaan syvyyskartta joko suoraan käsittelyohjelmassa tai viemällä data jatkokäsittelyyn erilliseen ohjelmistoon. Lentoreittien tiheys vaikuttaa suoraan uoman pohjan kartoitustarkkuuteen, sillä harvemmin mitatuilta alueilta pohjan syvyyttä ja muotoa joudutaan arvioimaan laskennallisesti. Kuvassa 9 on esitetty Geolitix-ohjelmalla tehty maatutkan syvyyskartta.



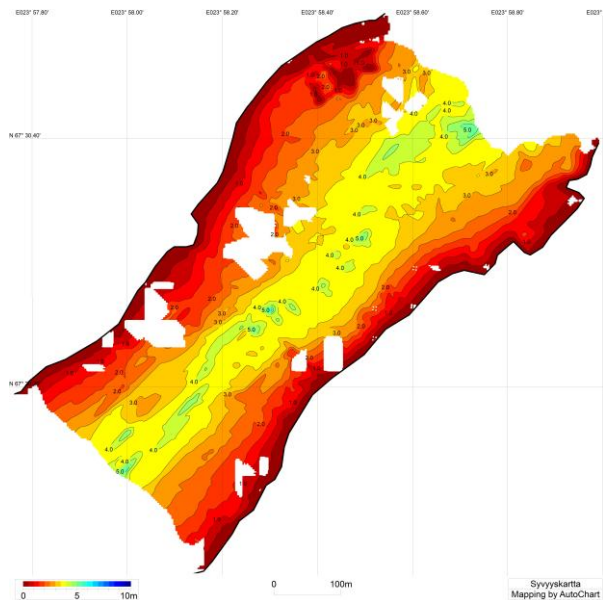
**Kuva 9.** Syvyyskartta GPR-droonin tuotetusta datasta Geolitix ohjelman avulla.

### 3.3. AUTONOMINEN VESITUTKIMUSALUS

Autonomisella vesitutkimusaluksella ei voitu käyttää ennakkoon ohjelmoituja reittejä vedessä olleiden puunlatvusten, turvelautojen ja jääautojen takia, kuten kuvasta 10 havaitaan. Suunniteltu tutkimusalue altaan keskiosasta pyrittiin kattamaan mahdollisimman hyvin manuaalisesti lauttaa ohjaten ja esteitä väistellen. Alue saatiin katettua, mutta ajolinjoista muodostui huomattavan epäsäännöllisiä ja niin muodon kuin linjojen välisten etäisyyksien osalta. Luotausdata purettiin ja siitä muodostettiin alustava syvyyskartta Humminbirdin AutoChart-ohjelmalla (kuva 11). Lisäksi data tallennettiin taulukkomuotoon jatkokäsittelyä ja vertailuja varten.



**Kuva 10:** Miehittämättömän vesitutkimusalueksen toteutunut luotausreitti.



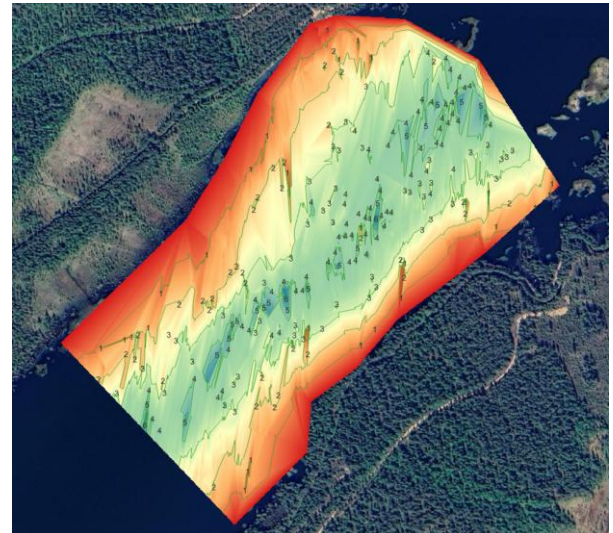
**Kuva 11.** Syvyyskartta autonomisen vesitutkimusalueksen luotausdatasta AutoChart-ohjelmasta.

### 3.4. TULOSTEN VISUALISOINTI

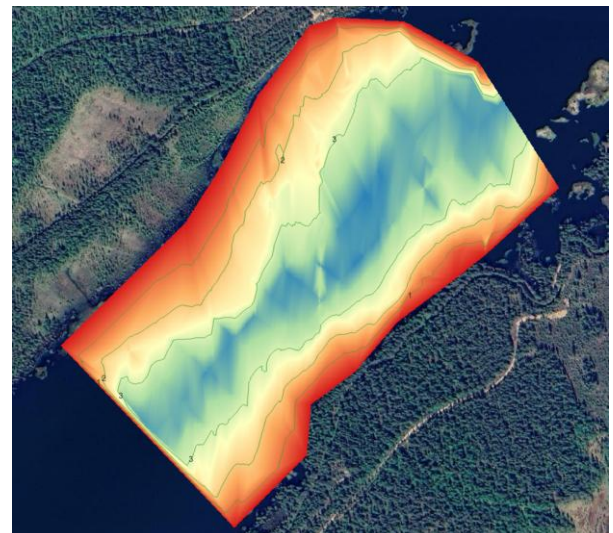
Pistemäisestä GPR- ja luotaindatasta interpoloitiin syvyyskartat QGIS-ohjelmalla kolmiointiin perustuen tulosten visualisoimista ja vertailua varten. Näin syvyyskarttoihin saatiin sama väripaletti ja skaala, mikä helpotti visuaalista tulkintaa verrattuna eri laitteiden omista ohjelmista saatuihin syvyyskarttoihin.

Syvyyskartoissa (kuvat 12 ja 13) on havaittavissa käytännössä identtinen uoman muoto, mutta mitatuissa syvyyksissä on jonkin verran eroa.

Luotausdatasta tuotettu kartta (kuva 12) sisältää myös huomattavasti enemmän terävää vaihtelua verrattuna maatukadadatasta tuotettuun karttaan. Tämä johtuu todennäköisesti suurelta osin epä-säännöllisen reitin vaikutuksesta interpolointiin. Ideaalitapauksessa syvyyskarttoja laskettaessa kartoitettava alue olisi katettu säännöllisillä rinnakkaisilla linjoilla ja lisäksi kerran kartoitusalueen ympäri kiertäen läheltä reunoja.



**Kuva 12:** 3D-näkymä uoman pohjasta vesitutkimusalueksen kaikuluotauksella.

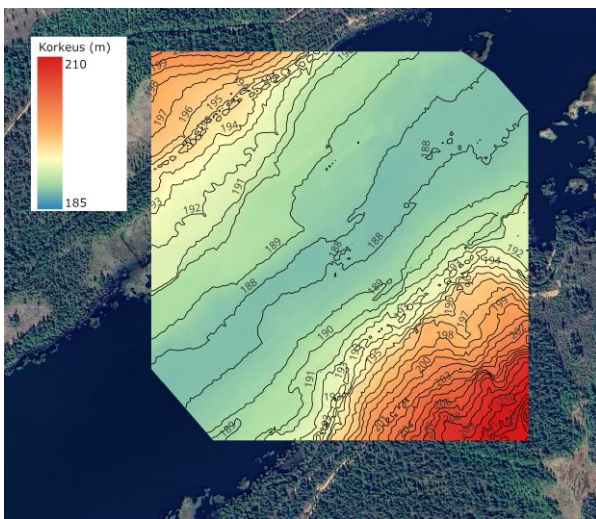


**Kuva 13:** 3D-näkymä uoman pohjasta maatukadroonilla.

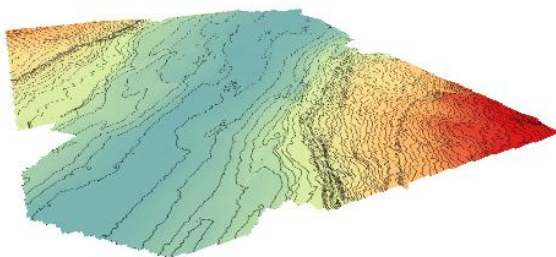
GPR-data kertoo pohjan syvyyden lentoreitin alapuolelta. Tämä laajennettiin peittämään suuremman osan joen uomaa ottamalla keskiarvo lähialueen pisteiden arvoista joen suuntaisen ellipsin sisällä. Näin saatu korkeusdata vähennettiin

pistepilviaineiston avulla luodusta korkeuskartasta, jolloin saatiin joen uoman muoto näkyville lähialueen maanmuotoihin suhteutettuna.

GPR-data ei jatku uoman reunoihin asti, joten jyrkkien korkeusmuutoksien välttämiseksi korvattiin veden korkeudella olevat pisteet rannan ja GPR-droonilentojen välillä interpoloidulla datalla. Korkeuskaavioon (kuva 14) lisättiin automaattisesti luodut korkeuskäyrät. Alueesta luotiin myös kolmiulotteinen näkymä (kuva 15), mutta pienten korkeuserojen ja suuren mittausalueen vuoksi korkeuserot eivät näy selvästi kuvassa. Kaikki kappaleessa mainittu prosessointi tehtiin QGIS-ohjelmistolla.



**Kuva 14:** Kansallisesta laserkeilausdatasta ja maatutkadroonin datasta luotu korkeuskartta alueesta. Vedenpinnan korkeus on noin 191,5 m.

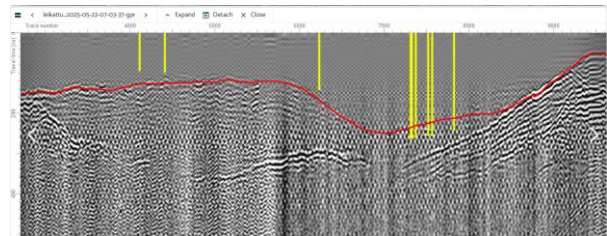


**Kuva 15:** 3D-näkymä uoman pohjasta.

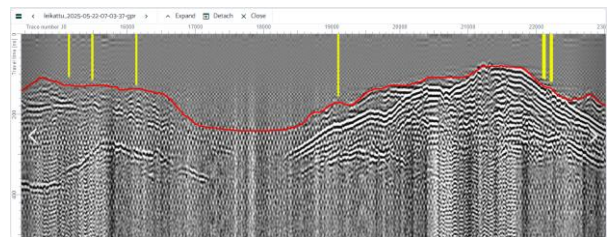
Käytetty pistepilviaineisto on Maanmittauslaitoksen avointa kansallista laserkeilausaineistoa ajalta 06/2023, joka ladattiin käyttöön 12/2025.

#### 4. TULOSTEN VERTAILU

Maatutka- ja kaikuluotaindatan vertailussa havaittiin, että maatutka kykenee havaitsemaan kaikuluotainta syvemmälle ulottuvia rakenteita sekä useampia kerroksia, mutta muodostaa heikommin yhtenäisen kerrosrajapinnan. Kaikuluotain antaa tuloksena vain yhden syvyyden pisteestä. Kaikuluotaimen mittaama pohjapinta poikkeaa kuitenkin jonkin verran maatutkan havaitsemasta ensimmäisestä kerroksesta. Kuvassa 16 esitetyt kaikuluotainmittaukset on valittu kohdista, joissa poikkeama maatutkadatan osoittamasta pohjasta on suurimmillaan. Kuvassa 17 esitetyt kaikuluotainmittaukset on valittu kohdista, joissa ne vastaavat parhaiten maatutkan havaitsemaa välikerrosta ja pohjaa.

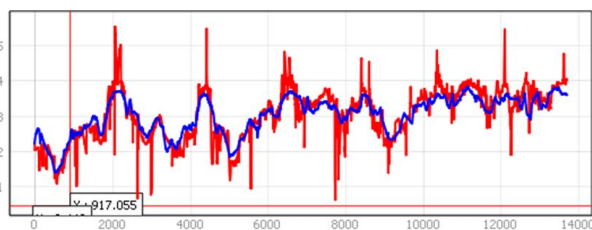


**Kuva 16.** Keltaiset palkit kuvaavat kaikuluotaimen mittaamia syvyyksiä ja punainen viiva kuvaa GPR-datasta löytyvän ensimmäisen rajapinnan.



**Kuva 17.** Keltaiset palkit kuvaavat kaikuluotaimen mittaamia syvyyksiä ja punainen viiva kuvaa GPR-datasta löytyvän ensimmäisen rajapinnan.

Kuvassa 18 vertaillaan luotain- ja maatutkadatan syvyyksiä samalla mittausreitillä. Kuvasta näkyy, kuinka pohjanmuoto on enimmäkseen hyvin samanlainen, mutta punaisella värillä kuvatussa luotaindatassa on enemmän kohinaa ja erottuvia piikkejä. Mahdollisia selityksiä erottuville piikeille voisivat olla esimerkiksi tuulen nostattaman aallokon vaikutus luotaimen kulmaan tai hetkellinen huokoisen ylimmän pohjakerroksen läpäisy.



**Kuva 18.** Syvyysprofiili luotain- ja maatukadasta muodostetulla reitillä. Maatutkan ilmoittama syvyys sinisellä ja luotaimen punaisella.

## 5. YHTEENVETO

Tutkimuksessa arvioitiin dronipohjaisten mittausmenetelmien soveltuvuutta padotun Niesajoen vedenalaisen topografian ja pohjarakenteiden kartoittamiseen Rautuvaarassa. Samea vesi esti erityisesti kahden aallonpituuden laserkeilaimen käytön, eikä veden alta saatu sen avulla lainkaan mittaushavainnot. Maatutkadroni sen sijaan osoittautui toimivaksi menetelmäksi: se kykeni havaitsemaan uoman pohjan ja sen alaisia kerroksia, vaikka havaittavuus heikkeni uoman syvimmissä kohdissa.

Autonomisen vesialuksen tuottama kaikuluotaindata tarjosi tärkeän vertailuaineiston, jonka avulla maatutkan tuloksia voitiin arvioida. Mittausten suorittamista hankaloittivat kohteen fyysiset esteet – veden yläpuolella kohoavat puunlatvat ja turvelautat – jotka vaikeuttivat erityisesti vesitutkimus-

aluksen liikkumista ja häirtasivat myös matalalla lentävän maatutkadronin reititystä.

Menetelmien yhdistäminen mahdollisti kuitenkin kattavan kuvan muodostamisen uoman syvyyksistä, muodoista ja kerrosrakenteista sekä osoitti, että dronipohjaiset ratkaisut toimivat hyvin tilanteissa, joissa perinteinen mittauskalusto ei sovellu haastaviin olosuhteisiin.

## 6. KIITOKSET

Tutkimus kuuluu Uudet teknologiat uomien ja kaivosaltaiden kartoitukseen (UOMARI) -tutkimushankkeeseen, joka on saanut rahoitusta Euroopan unionin aluekehitysrahastosta (EAKR), rahoittajana Pohjois-Suomen elinvoimakeskus (Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus). Kiitämme Teemu Hakalaa Paikkatietokeskukselta kahden aallonpituuden laserkeilaimen dronilentojen operoinnista.

## VIITTEET

- [1] Kaivostutkijoiden blogi, Rautuvaaran kaivos, kaivostutkijat.bloggaajat.fi, <https://kaivostutkijat.bloggaaja.fi/rautuvaaran-kaivos/>, viitattu 10.2.2026.
- [2] Kousa, J., Hakala, T., Kukko, A., and Kaartinen, H.: Performance Evaluation of Drone Operated Dual Waveform Bathymetric LiDAR, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., X-2/W2-2025, 101–108, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-2-W2-2025-101-2025>, 2025.

# Droonipohjainen batymetria Ristijärven Emäjoen uoman muodon arvioinnissa

Veijo Sutinen<sup>1</sup>, Pasi Karjalainen<sup>1</sup>, Roope Koponen<sup>1</sup>, Joonas Kahiluoto<sup>2</sup>, Jukka Hirvonen<sup>2</sup>, Harri Kaartinen<sup>3</sup> ja Matias Mäki-Leppilampi<sup>3</sup>

Oulun yliopisto, Mittaustekniikan yksikkö<sup>1</sup>

Suomen ympäristökeskus<sup>2</sup>

Maanmittauslaitos, Paikkatietokeskus FGI<sup>3</sup>

## Tiivistelmä

Uomageometrian kartoitusta tarvitaan, kun suunnitellaan uomien muokkausta tai käyttötarkoitusten muutoksia. Huolellinen suunnittelu edellyttää tietoa uoman vedenalaisista rakenteista sekä mielellään myös pohjan eri maakerroksista.

Uudet teknologiat uomien ja kaivosaltaiden kartoitukseen (UOMARI) -tutkimushankkeessa tutkittiin droonipohjaisten teknologioiden soveltuvuutta vedenalaisten rakenteiden kartoittamiseen. Yhtenä tutkimuskohteenä oli Emäjoen Seitenoikean voimalaitoksen alapuolinen osuus uomasta. 1960-luvulla valmistunut voimalaitos sijaitsee Hyrynsalmen reitillä Emäjoessa Ristijärven ja Hyrynsalmen kunnissa. Emäjoki lähtee Kiantajärvestä ja laskee Oulujärveen. Fortum Power and Heat Oy ovat selvittäneet kalojen ylösvaelluksen mahdollistavaa ohitusuoman rakennettavuutta alueelle. Tutkimuksessa testattiin drooniin liitettyjä kahden aallonpituuden laserkeilainta ja maatutkaa, lisäksi tehtiin vertailumittauksia autonomisella vesitutkimusaluksella.

Tutkimuksessa tehtiin mittauksia keväällä 2025 kaikilla kolmella teknologialla, maatutkadroonilla ja autonomisella vesitutkimusaluksella samaan aikaan ja kahden aallonpituuden laserkeilaimella hieman myöhemmin. Mittaukset onnistuivat kaikilla tekniikoilla pääpiirteittäin hyvin. Maatutkadrooni toimi kokonaisuutena parhaiten, ainoana ongelmana olivat uoman reunoilla roikkuvat puut, jotka estivät lentämisen joissain kohdissa. Michittämättömällä vesitutkimusaluksella suhteellisen kova virtaus ja epätasaiset rannat pakottivat kaivantamaan suunniteltuja tutkimuslinjoja uoman reunojen läheisyydestä rantaan ajautumisen estämiseksi. Kahden aallonpituuden laserkeilain näki tässä kohteessa noin metrin syvyyteen. Kattavin kuva uomasta saatiin yhdistelemällä eri teknologioiden dataa. Uoman keskiosa saatiin parhaiten maatutkalla tai kaikuluotaimella ja rannat taas kahden aallonpituuden laserkeilaimella. Maatutkan tuloksia verrattiin vesialuksen kaikuluotausmittauksiin. Vertailu osoitti, että maatutkamittaukset vastasivat hyvin kaikuluotaintuloksia.

## 1. JOHDANTO

Vesistöjen morfologian eli vesistöjen muotoon, rakenteeseen ja niiden fyysisten piirteiden kehitykseen liittyvien ominaisuuksien tarkka kartoittaminen on keskeistä uomien toiminnan ja muutosten ymmärtämisessä. Samalla hydrologia – tieteenala, joka tutkii veden kiertokulkua, virtaamia, veden liikettä ja siihen vaikuttavia prosesseja – tarjoaa taustan sille, miten virtaavan veden voimat muokkaavat uomaa. Tässä raportissa tutkimuksen painopiste on uoman muodon arvioinnissa ja sen tarkassa mittaamisessa miehittämättömiin alustoihin asennettujen sensorien avulla.

Perinteiset menetelmät, kuten veneestä tehtävät kaikuluotaukset tai manuaaliset poikkileikkausmittaukset, tarjoavat luotettavaa tietoa uoman pohjanmuodoista, mutta niiden käyttö on usein hidasta, työvoimavaltaista ja paikallisesti rajoittunutta. Kaukokartoitusteknologioiden nopea kehitys on mahdollistanut uudenlaisia, entistä kattavampia ja nopeampia tapoja kartoittaa uomien syvyyttä ja muotoa sekä tarkastella hydrologisten prosessien vaikutuksia uoman rakenteeseen.

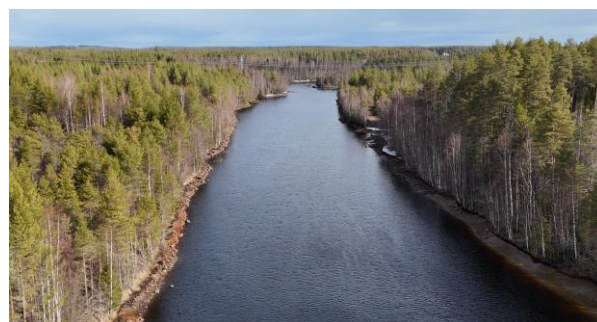
Tässä tutkimuksessa hyödynnettiin kolmea toisiinsa täydentävää mittausrjestelmää kanavan syvyykskartan tuottamiseksi: dronissa kulkevaa kahden aallonpituuden laserkeilainta ja maatutkaa sekä autonomista vesitutkimusalusta, joka oli varustettu yksisäteisellä ja sivuttaissuuntaisella kaikuluotaimella. Moniaallonpituuksinen laserkeilaus mahdollistaa vedenpinnan läpäisevän mittauksen erityisesti matalissa ja kirkasvetisissä olosuhteissa. Maatutka puolestaan tarjoaa tietoa sedimenttikerroksista ja pohjan rakenteesta, täydentäen laserkeilauksen tuottamaa pintamallia. Autonominen vesialus tuottaa tarkkaa syvyystietoa myös syvemmissä ja sameammassa kohdissa, joissa optiset menetelmät eivät toimi luotettavasti.

Näiden teknologioiden yhdistäminen mahdollistaa uoman muodon monipuolisen ja korkean resoluution kartoituksen, jossa eri sensorien vahvuudet tukevat toisiaan. Raportissa tarkastellaan käytettyjen menetelmien toimintaperiaatteita, aineistonkeruuprosessia ja tulosten tarkkuutta sekä arvioidaan, miten yhdistetty mittaustietä soveltuu kanavan morfologian analysointiin ja erityisesti uoman muodon arviointiin.

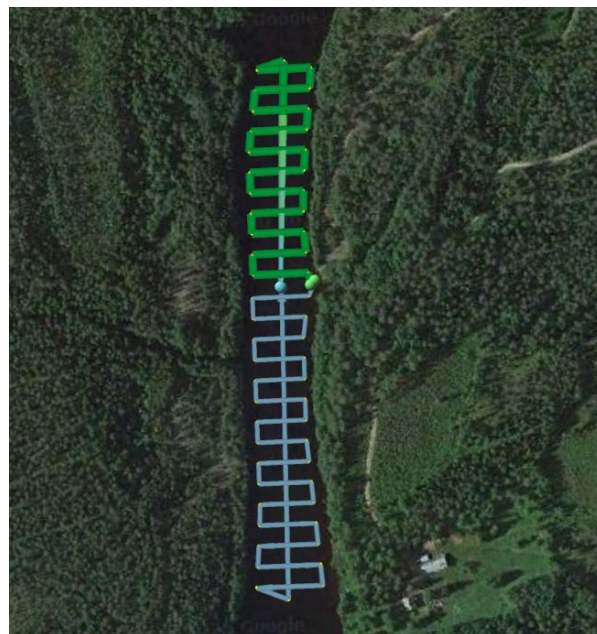
## 2. TUTKIMUSKOHDE

Tutkimuskohteet sijaitsivat Ristijärven Emäjoella, mittauspaiikka 1 sijaitsi Fortumin vesivoimalaitokselta noin 600 m lounaaseen ja mittauspaiikka 2 noin kuusi kilometriä lounaaseen. Voimalaitoksen lähistöllä on aiemmin selvitetty uoman muotoa kajojen ylös vaelluksen mahdollistavasta ohitusratkaisun suunnittelun yhteydessä 2024 (Kupiainen et al. 2024).

Kuvassa 1 on ilmakuva Ristijärven mittauspaiikalta 1 ja kuvassa 2 siihen liittyvät mittaussuunnitelmat. Kuvassa 3 vastaavasti mittauspaiikan 2 ilmakuva ja kuvassa 4 kohteen mittaussuunnitelmat.



*Kuva 1. Ristijärven mittauspaiikka 1.*



*Kuva 2. Mittauspaikalle 1 suunnitellut mittaussuunnitelmat (reitti kahdessa osassa, pohjoinen ja eteläinen).*



**Kuva 3.** Ristijärven mittausspaikka 2.



**Kuva 4.** Mittauspaikalle 2 suunnitellut mittauslinjat.

### 3. TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimuksessa tutkittiin Emäjoen pohjanmuotoa käyttämällä kahden aallonpituuden laserkeilainta ja maatumkaa (GPR), jotka on mukautettu droonien käyttöön. Lisäksi vertailumittaukseen käytettiin kaikuluotaimella varustettua autonomista vesitutkimusalusta.

#### 3.1. KAHDEN AALLONPITUUDEN LASERKEILAIN

Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskus FGI:n droonilla operoitava Fraunhofer IPM:n (Saksa) valmistama ABS-laserkeilain (Airborne Bathymetric Scanner, Kuva 5) käyttää kohteiden mittaukseen samanaikaisesti 510 nm ja 1030 nm aallonpituuksia, joissa lyhyempi aallonpituus (vihreä) läpäisee veden ja pidempi (infrapuna) heijastuu veden pinnasta. Vesialueen lisäksi ympäröivistä alueilta, kuten rantojen kasvillisuudesta, maanpinnasta ja rakenteista, saadaan havainnot molemmilla aallonpituuksilla. Useamman aallonpituuden havainnot voidaan hyödyntää tarkempaan kohteen

tunnistamiseen, kuten puulajien määrittämiseen. Optimiolosuhteissa ABS:llä on mahdollista saada havainnot veden alta 1.75 kertaa näkösyvyyttä syvemmältä, yleensä kuitenkin vähintään näkösyvyyden verran (Kousa et al. 2025).

Laserkeilain lähettää lyhyen laserpulssein ja määrittää etäisyyden kohteeseen pulssin lentoajan perusteella. Kun yhdistetään havaittu etäisyys ja pulssin lentosuunta keilaimen yhdistetyn paikannusjärjestelmän antamaan paikka- ja asentotietoon, voidaan laskea laserpulssein osamakohdan eli mittauskohteen 3D-koordinaatit. Keilain pystyy havaitsemaan yhden laserpulssein lentomatkan varrelta useita paluukaikuja. Jos esimerkiksi osa säteestä osuu puunoksaan ja osa jatkaa matkaa maahan, saadaan yksi 3D-piste oksasta ja toinen maanpinnasta.



**Kuva 5.** Kahden aallonpituuden laserkeilaindrooni.

#### 3.2. GPR-DROONI

Mittaustekniikan yksikön GPR-drooni koostuu miehittämättömästä ilma-aluksesta, maatumkajärjestelmä sekä turvavarusteesta (kuva 6).



**Kuva 6.** GPR-drooni Ristijärvellä keväällä 2025.

## Miehittämätön ilma-alus – drooni

GPR-droonimittausjärjestelmä sisältää DJI Matrice 350 RTK -droonin, jossa on RTK (Real Time Kinetic) -tarkkuuspaikannus sekä laaja käyttölämpötila-alue (-20 ... 50 C) ja IP55 suojaus. Ominaisuudet mahdollistavat toistettavat lentoreitit ja tarkat paikkatiedot mittausdatalle erilaisissa sääolosuhteissa.

## Maatutka – GPR (Ground Penetrating Radar)

Maatutka on 1950-luvulla maantutkimiseen kehitetty mittalaite, jonka toiminta perustuu radiotaajuisten (MHz - GHz) sähkömagneettisten aaltojen lähettämiseen maaperään ja takaisin heijastuneiden signaalien vastaanottamiseen. Heijastuneiden signaalien kulkuajasta voidaan määrittää etäisyys ja voimakkuudesta (amplitudi) eri kerrosten ominaisuuksia, mikäli näiden eri kerrosten aallon etenemisnopeus tunnetaan.

MITY:n maatutkajärjestelmä koostuu Radar Systems Zond Aero LF -maatutkasta, SkyHub-tiedonkeruuyksiköstä ja Terrain Follow -pinnan seuranta-järjestelmästä. Maatutkassa on vaihdettavat antennit, joiden avulla mittaustaajuus voidaan valita 100, 150 tai 300 MHz väliltä. Tiedonkeruuyksikkö tallentaa mittausdatan reaaliaikaisella näytteistyksellä hyödyntäen hardware stacking -ominaisuutta. Pinnan seuranta-järjestelmän avulla drooni säilyttää asetetun etäisyyden maanpintaan automaattilennon aikana.

## Lentotoiminta

GPR-droonin lentotoimintaa ohjaa Traficom määrittelemät avoimen kategorian A3 -lentosäännöt sekä erilliset määräykset maatutkan käytöstä miehittämättömässä ilma-aluksessa. Kun drooniin liitetään maatutka, sen käyttö edellyttää Traficom myöntämää lupaa.

MITY:lle myönnetty lupa mahdollistaa maatutkalennot yhden metrin etäisyydellä maanpinnasta valituilla testikohteilla avoimessa kategoriassa A3. Matalalla lentämistä tukevat lento-ohjelmiston autopilotti- sekä pinnan seurantaominaisuus, jotka mahdollistava autonomiset lennot asetetulla etäisyydestä maanpinnasta. Lennon aikana etäisyys maanpintaa mitataan järjestelmään kuuluvan etäisyystutkan avulla. Vikaantumisen varalle droonissa on automaattisesti toimiva pelastusliivi, joka

estää droonin uppoamisen teknisessä vikatilanteessa.

## 3.3. LASERKEILAINDROONI

Laserkeilain on mittalaite, joka tuottaa tarkkaa kolmiulotteista mittaustietoa kohteesta. Sen toimintaperiaate perustuu lasersäteiden lähettämiseen ja kohteesta heijastuneiden signaalien vastaanottamiseen. Heijastuneiden signaalien kulkuajasta ja intensiteetistä voidaan määrittää kohteen etäisyydet ja muodot. Näistä mitatuista pisteistä muodostetaan 3D-pistepilvi, josta voidaan edelleen tuottaa maastopintamalleja eli DEM-karttoja (Digital Elevation Model).

MITYn droonimittausjärjestelmä koostuu DJI Matrice 350 RTK -droonista ja DJI Zenmuse L2 -laserkeilaimesta. Data-aineisto prosessoidaan maastopintamalleiksi DJI Terra -ohjelmistolla.

## 3.4. AUTONOMINEN VESITUTKIMUSALUS

Tutkimuksessa käytettiin autonomista vesitutkimusalusta (kuva 7), joka oli varustettu yksisäteisellä ja sivuttaissuuntaisella kaikuluotaimella (Humminbird Helix 9), kanavan syvyyskartan luomiseen. Vesitutkimusalus on SYKEN itse rakentama kokonaisuus, jonka keskeisimmät osat ovat Ardupilot/Mission planner -yhteensopiva ohjausjärjestelmä Cube Orange, gps-laite, kamera ja Torqeedo Travel Ultralite -sähköperämoottori. Järjestelmä toimii sekä kauko-ohjaimella, että tietokoneen kautta mahdollistaen ohjelmoitujen reittien ajon.



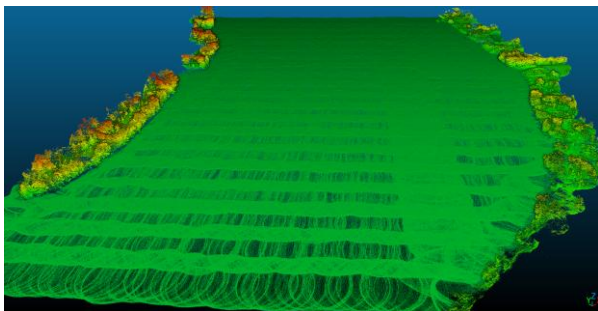
Kuva 7. Autonominen vesitutkimusalus Emäjoella.

## 4. MITTAUSTULOKSET

Tutkimuskohteessa suoritettiin mittauksia drooniin liitetyllä kahden aallonpituuden laserkeilaimella ja maatutkalla. Lisäksi alueella tehtiin vertailumittauksia autonomisella vesitutkimusaluksella sekä tavallisella yhden aallonpituuden laserkeilaimella (laserkeilaindrooni).

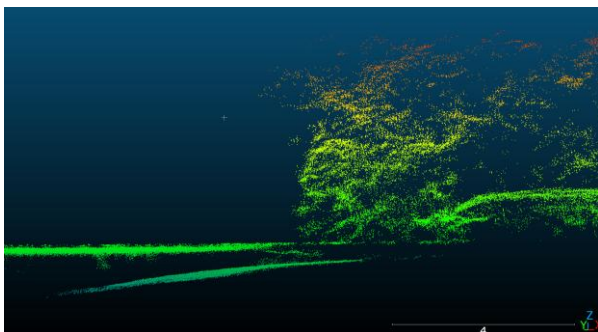
### 4.1. KAHDEN AALLONPITUUDEN LASERKEILAIN

Kahden aallonpituuden laserkeilaimella lennettiin samat alueet kuin muilla tutkittavilla laitteistoilla, mutta eri mittaussinjoilla. Keilaus suoritettiin 30 m korkeudesta niin, että kerätty 3D-pistedata kattoi molemmat alueet saumattomasti (kuva 8). Pistepilven tiheys on noin 700 pistettä/m<sup>2</sup>.



**Kuva 8.** Mittauspaikan 2 3D-pistepilvi korkeuden mukaan väritettynä. Kuvakaappauksessa on erotettavissa vedenpinta ja rantojen kasvillisuus. Keilaimen kartiomainen mittausero näkyy kuvan etualalla ellipsin muotoisina profiileina.

Terrascan-ohjelmalla pistepilvi luokiteltiin eri osiin, maanpintaan, joenpohjaan ja vedenpintaan (kuva 9).

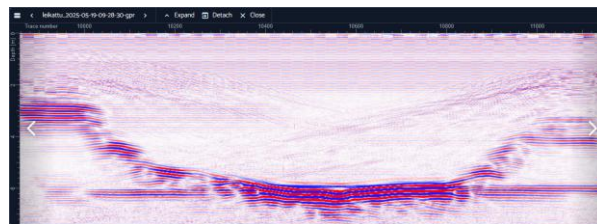


**Kuva 9.** Poikkileikkaus joen ranta-alueen pistepilvestä, pisteet on väritetty korkeuden mukaan. Vedenpinta ja sen alainen joenpohja näkyy kuvan vasemmassa osassa, pohja erottuu 1 metrin syvyyteen. Kuvassa oikealla erottuu maanpinta ja sen yläpuolinen rantakasvillisuus.

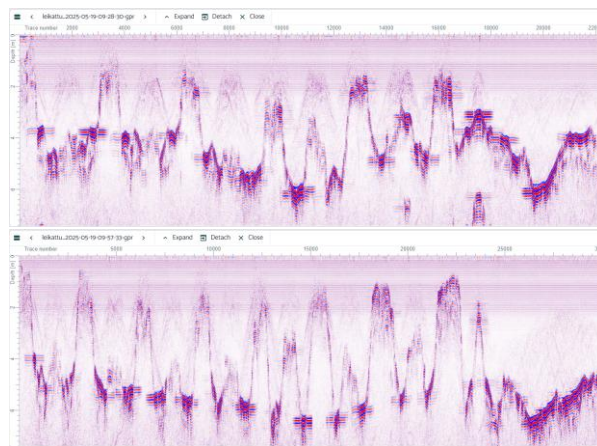
### 4.2. MAATUTKADROONI

Maatutkalla varustetulla droonilla suoritettiin yhteensä viisi lentoa, joista kaksi mittausspaikalla 1 ja kolme mittausspaikalla 2, jotka kattoivat suunnitellun tutkimusalueen. Lennot toteutettiin autonomisesti, mikä edellytti lentoreittien huolellista suunnittelua. Maatutka vastaanottaa signaalia 1280 nanosekunnin ajan ja tallentaa tämän jakson 1024 näytteen tarkkuudella. Lentoreittien välinen etäisyys oli suurimmassa osassa poikkilentoja 15 metriä.

Maatutkadatan käsittelyssä aineistosta poistettiin ensin lentoreiteille siirtymiseen liittyvät meno- ja paluulennot. Varsinaiseen käsittelyyn riittivät signaalin vahvistaminen, taustasignaalin vähentäminen sekä kaistasuodatus. Näiden toimenpiteiden jälkeen maatutkadatasta oli mahdollista erottaa uomien pohjarakenteet. Seuraavissa kuva-aineistoissa (kuvat 10 ja 11) näkyy uoman poikkileikkaus sekä koko mittaussalueen data mittausspaikalta 1.

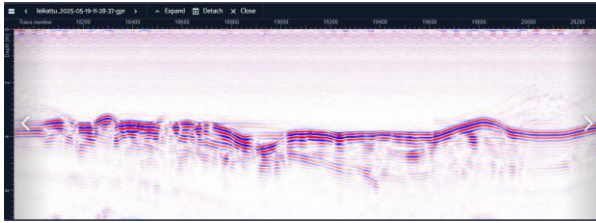


**Kuva 10.** Mittauspaikka 1 poikkileikkausprofiili.

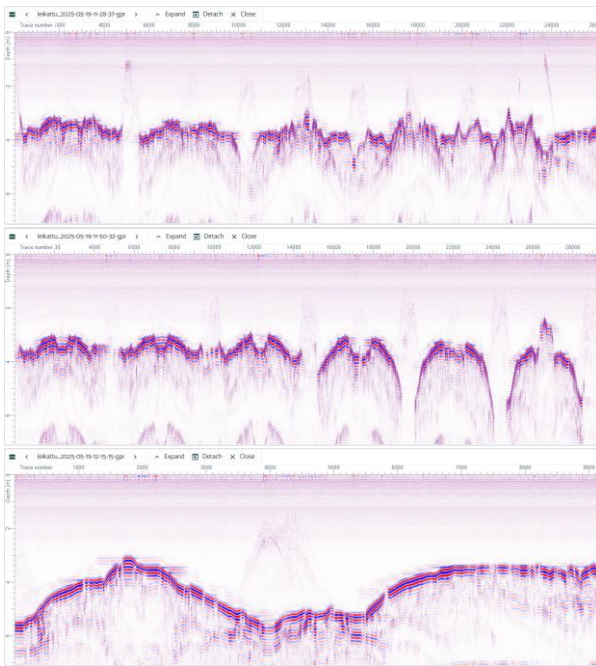


**Kuva 11.** Mittauspaikan 1 maatutkadatat. Mittausdata on kahdessa osassa, ylempi kuva on joen pohjoispuoli ja alempi joen eteläpuoli. Aiemmassa kuvassa 2 on esitetty nämä mittaussreitit.

Mittauspaikan 2 osalta uomanprofiili on esitetty kuvassa 12 ja koko mittauslinjan profiili kuvassa 13.



**Kuva 12.** Mittauspaikka 2 poikkileikkausprofiili.

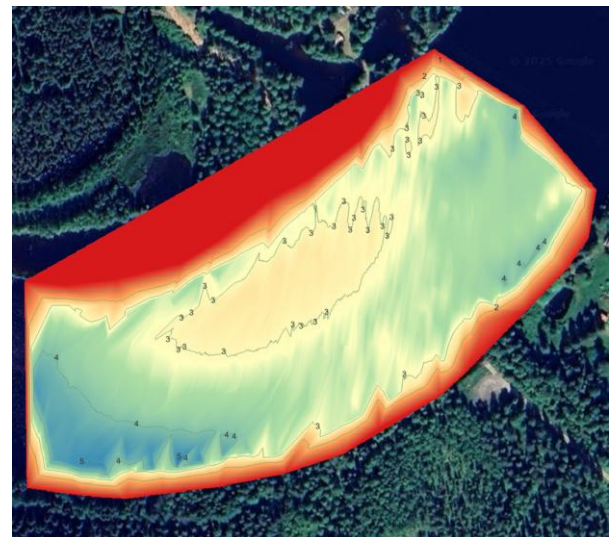


**Kuva 13.** Mittauspaikan 2 maatumkatadat. Mittausalue 2 on jaettu keskeltä kahteen alueeseen (mittausreitit esitetty kuvassa 4). Ylempi kuva on joen koillisen puoleinen mittausreitti, keskimmäinen joen lounaan puoleinen mittausreitti ja alin kuva on mittausreitti länsi-itäsuuntaan. Aineistoja ei pystytty yhdistämään, joten ne esitetään erillisinä.

Datan käsittelyä seuraa horisontin tulkinta, jonka perusteella merkatusta kerroksesta tuotetaan syvyyskartta joko suoraan käsittelyohjelmassa tai viemällä data jatkokäsittelyyn erilliseen ohjelmistoon. Lentoreittien tiheys vaikuttaa suoraan uomanpohjan kartoitustarkkuuteen, sillä harvemmin mitatuilta alueilta pohjan syvyyttä ja muotoa joudutaan arvioimaan laskennallisesti. Kuvassa 14 on esitetty syvyyskartta mittauspaikasta 1 ja kuvassa 15 mittauspaikasta 2.



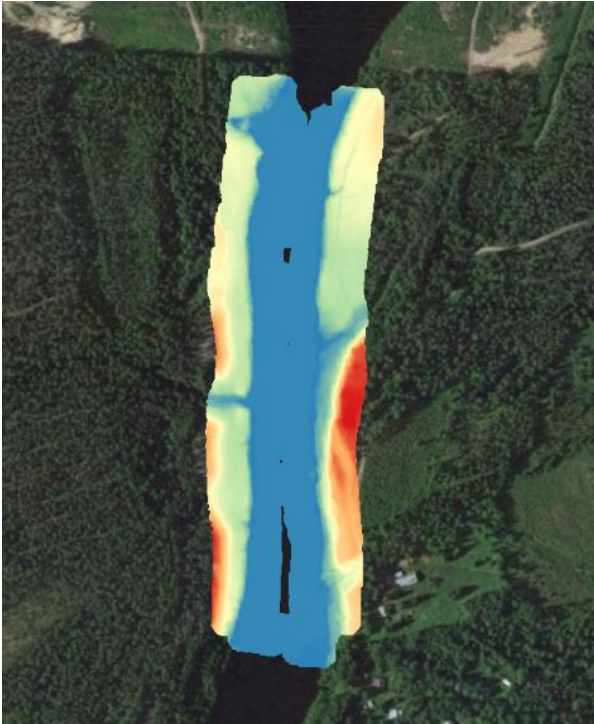
**Kuva 14.** Mittauspaikan 1 syvyyskartta tehtiin GPR droonin tuottamasta mittausdatasta QGIS-ohjelman avulla.



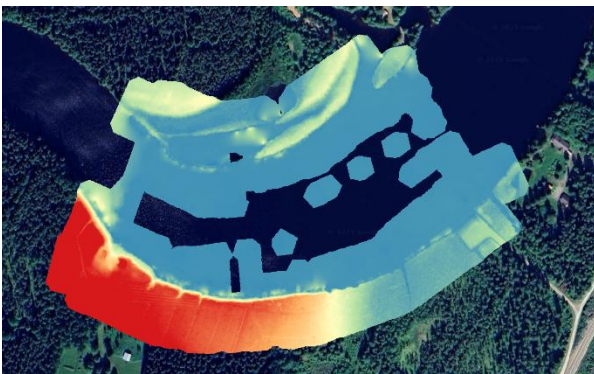
**Kuva 15.** Mittauspaikan 2 syvyyskartta tehtiin GPR droonin tuottamasta mittausdatasta QGIS-ohjelman avulla.

#### 4.3. LASERKEILAUS

Mittauskohteissa toteutettiin perinteinen laserkeilaus DJI:n L2-laserkeilaimella. Laserkeilausdatan käsittely toteutettiin DJI Terra -ohjelmistolla, joka tuottaa 3D-pistepilven. Tästä pistepilviaineistosta muodostettiin edelleen maastopintamalli eli digitaalinen korkeusmalli (Digital Elevation Model, DEM). Kuvassa 16 ja 17 on esitetty mittauskohteiden DEM-kartat.



**Kuva 16.** Mittauspaikasta 1 laserkeilauksen tuottama maastopintamalli.

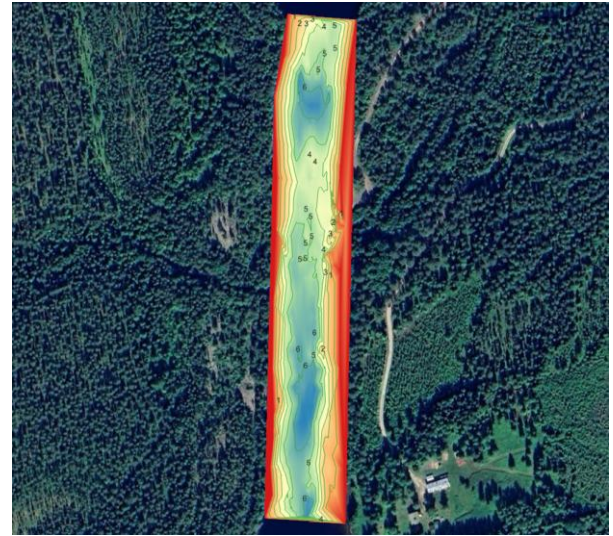


**Kuva 17.** Mittauspaikasta 2 laserkeilauksen tuottama maastopintamalli.

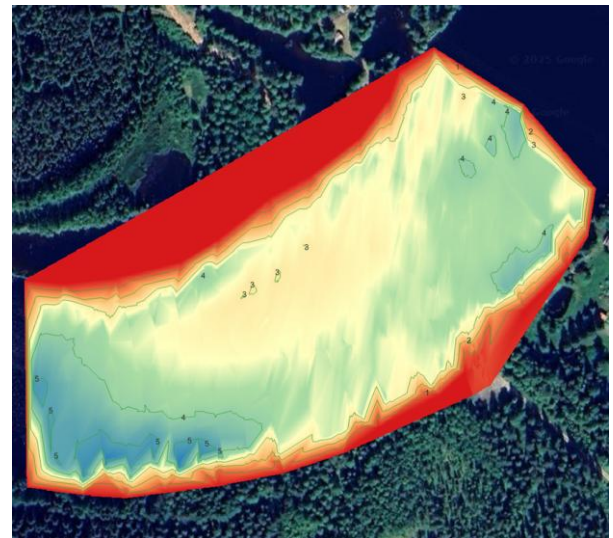
#### 4.4. AUTONOMINEN VESITUTKIMUSALUS

Molemmat mittausalueet ajettiin ennakkoon suunniteltujen linjojen pohjalta, mutta alueita jouduttiin kaventamaan mittauslinjojen päistä rantaan ajautumisen estämiseksi. Kohteessa oli merkittävä virtaus ja jonkin verran epätasaiset sekä kiviset rannat. Mittauslautta ei käänny paikallaan toisin kuin drooni vaan ajaa tiukat mutkat jonkun verran pitkäksi, estäen linjojen suunnittelun täysin rantoja hipoen. Myös taustakartoissa ja lautan sijaintitarkkuudessa on jonkin verran epätarkkuutta mikä tulee ottaa huomioon. Erot suunnitelluissa ja toteutuneissa mittauslinjoissa on esitetty myöhemmin

kuissa 24 ja 25. Kuvassa 18 on kaikuluotauksen syvyyskartta mittaustaikasta 1 ja kuvassa 19 syvyyskartta mittaustaikasta 2.



**Kuva 18.** Kaikuluotaimen mittausdatasta tehty syvyyskartta mittaustaikalle 1.



**Kuva 19.** Kaikuluotaimen mittausdatasta tehty syvyyskartta mittaustaikalle 2.

#### 4.5. TULOSTEN VISUALISOINTI

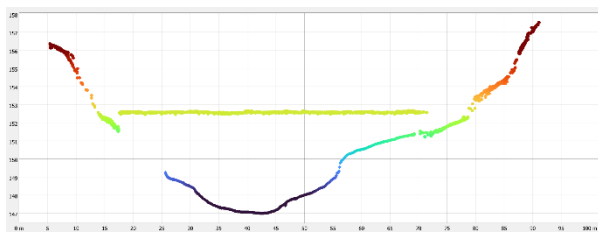
Kahden aallonpituuden laserkeilain kykenee mitaamaan rannan muodon sekä joen uomat matalilta vesialueilta. GPR-droonin avulla voidaan mitata jokea syvemmiltä alueilta, mutta matalan lentokorkeuden vuoksi rantojen lähellä lentäminen voi olla haastavaa rantakasvillisuuden ja uoman yllä roikuvien oksien takia. Yhdistämällä datat saadaan

hyvä arvio joen uoman muodosta koko sen leveydeltä. Tämä prosessointi tehtiin QGIS-ohjelmistolla.

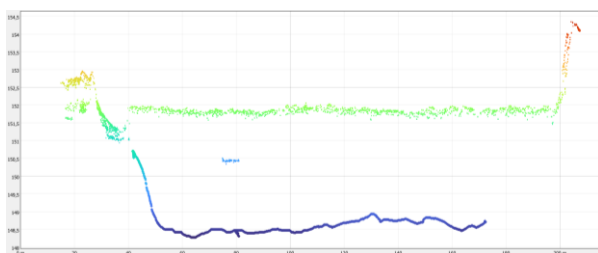
Kahden aallonpituuden laserkeilaimen avulla luodusta pistepilvestä luotiin ensin syvyyskartta. Tämän jälkeen luotiin myös GPR-datasta samaa muotoa oleva syvyyskartta, mutta vain alueelle, josta laserkeilain ei saanut uomadataa. Kun tämä kartta vähennettiin laserkeilaimen kartasta, saatiin arvio joen uomasta. Tästä kartasta valittiin manuaalisesti alueet, joille ei ollut laskettu syvyysdataa kummallakaan keinolla, ja korvattiin arvot lähialueelta interpoloiduilla arvoilla.

Joen länsiranta oli kierretty liian kaukaa GPR-droonilla, jättäen noin 5 m leveän kaistan ilman uomadataa (roikkuvat puuston oksat estivät lentämisen lähelle rantaa). Lisäksi käytetty tapa rajata GPR-data sopivalle alueelle aiheutti puutteellisia alueita joen itärannalla.

Kuvassa 20 on esitetty mittauspaikan 1 uoman profiili, jossa on hyödynnetty kahden aallonpituuden laserkeilausdataa ja GPR-mittausdataa. Kuvassa 21 on esitetty vastaava kuva mittauspaikan 2 osalta.

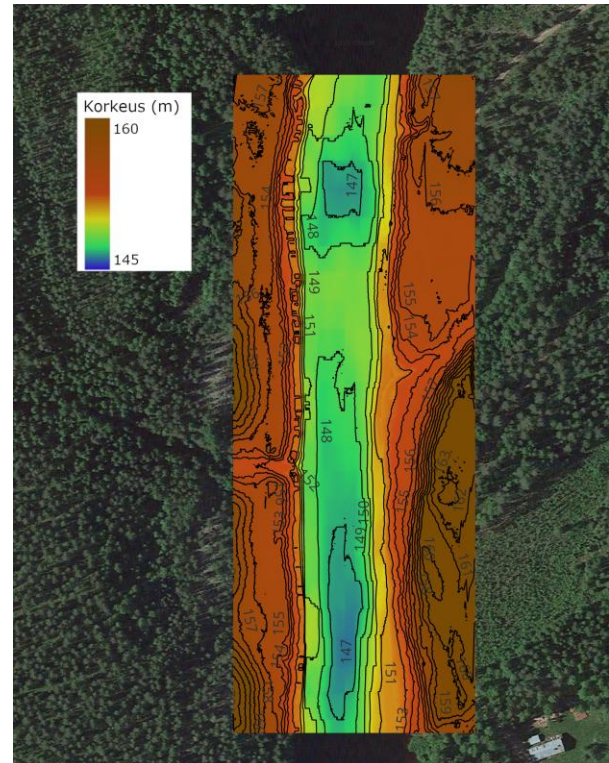


**Kuva 20.** Poikkileikkaus mittauspaikalta 1, jossa näkyy kahden aallonpituuden laserkeilaimen pistepilveä ja GPR-dataa.

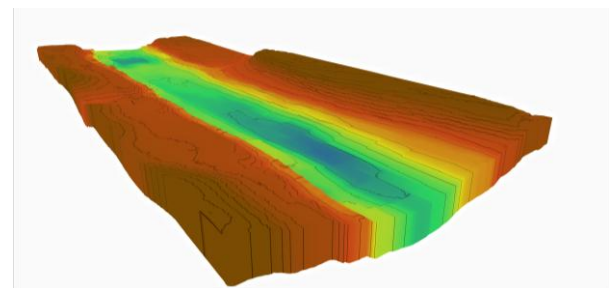


**Kuva 21.** Poikkileikkaus mittauspaikalta 2, jossa näkyy kahden aallonpituuden laserkeilaimen pistepilveä ja GPR-dataa.

Saatu uomakartta on kuvattu alla sekä normaalina syvyyskarttana että 3D-näkymänä kuvissa 22 ja 23.



**Kuva 22.** Mittauspaikan 1 syvyyskartta, jossa yhdistetty kahden aallonpituuden laserkeilausdataa ja GPR-mittausdataa. Veden korkeus on noin 152,6 m metriä merenpinnasta.



**Kuva 23.** Mittauspaikan 1 syvyyskartta 3D-näkymänä.

## 5. TULOSTEN JA MITTAUSMENETELMIEN VERTAILUT

Suunniteltujen mittauslinjojen noudattaminen onnistui droonijärjestelmällä huomattavasti tarkemmin kuin autonomisella vesitutkimusaluksella, jota jouduttiin ajoittain ohjaamaan manuaalisesti ja jonka kulkua uomassa esiintyvä virtaus vaikeutti, aiheuttaen pieniä poikkeamia suunnitelluista mittausreiteistä.

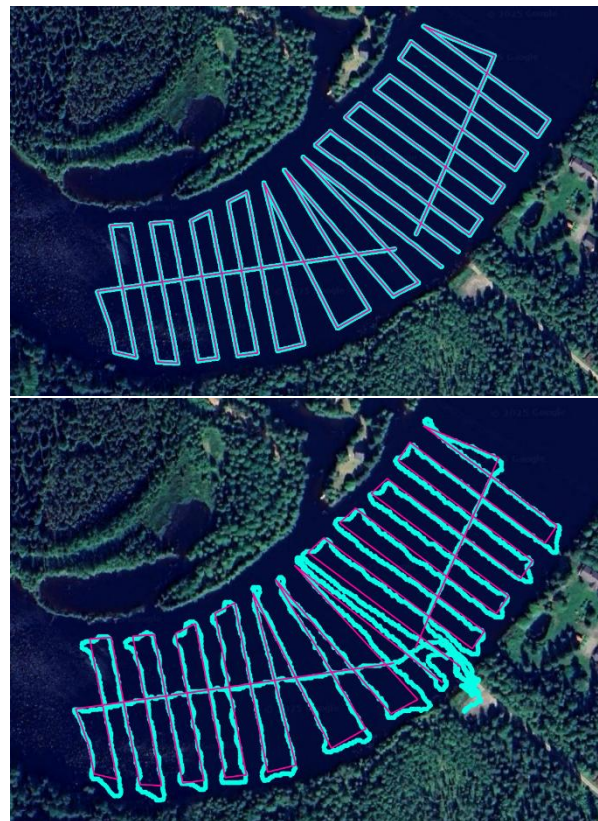
Mittauspaikan 1 joen pohjoisosan droonilennot poikkesivat suunnitellusta linjasta keskimäärin

0,155 m ja maksimissaan 0,794 m. Lennon pohjoispuoli toteutettiin suunnitellun lentoreitin peilikuvana, joten myös laskelmissa käytettiin lentoreitin peilikuvaa vertailukelpoisempien arvojen saamiseksi. Joen pohjoisosan lauttareitti poikkesi suunnitellusta keskimäärin 2,48 m ja maksimissaan 8,11 m. Eteläosan reitit poikkesivat droonin osalta keskimäärin 0,158 m ja maksimissaan 0,689 m sekä lautan osalta keskimäärin 2,03 m ja maksimissaan 12,07 m. Lautan reittidata sisälsi selkeästi reittiin kuulumattomia mittauspisteitä rannalta, joita ei otettu huomioon laskuissa.

Kuvissa 24 ja 25 esitetään suunnitellut ja toteutuneet mittauslinjat, joissa punainen viiva kuvaa suunniteltua reittiä ja sininen paksumpi viiva kuvastaa mittauslaitteiden mittausreittejä.



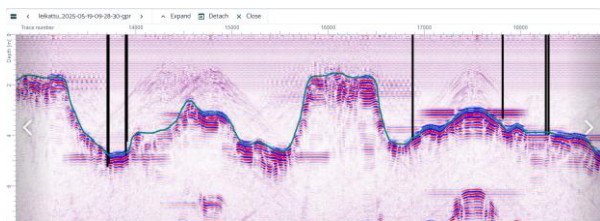
**Kuva 24.** Vasemmalla GPR-droonin – ja oikealla luotauslautan toteutuneet mittauslinjat mittauspaikassa 1.



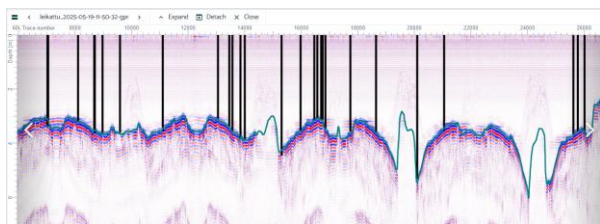
**Kuva 25.** Ylempänä GPR-droonin – ja alempana luotauslautan toteutuneet mittauslinjat mittauspaikassa 2.

Vaikka maatukan ja kaikuluotaimen mittausreitit eivät ole täysin yhteneviä, reitit risteävät useissa kohdissa samoissa pisteissä, mikä mahdollistaa aineistojen luotettavan keskinäisen vertailun. Seuraavissa kuvissa 26 ja 27 esitetään näiden yhteisten pisteiden vertailu maatukadatan näkökulmasta. Mustat palkit kuvaavat kaikuluotaimen ilmoittamaa syvyyttä kyseisissä pisteissä.

Vertailupisteet on valittu mahdollisimman läheltä reittien leikkauskohtia siten, että keskimääräinen etäisyysero on noin 5 cm. Vertailun perusteella kaikuluotaimen ilmoittamat syvyydet sijoittuvat pääosin maatukassa havaittavan ensimmäisen selkeän rajapinnan alkuun. Yksittäisissä kohdissa kaikuluotain kuitenkin osoittaa syvempää pohjatasoa, mikä voi viitata menetelmien erilaiseen vasteeseen tai pohjarakenteen tulkinnan epävarmuuteen.

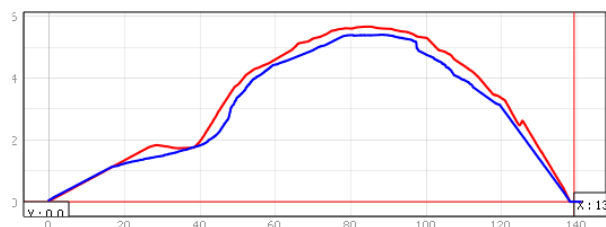


**Kuva 26.** Maatutkadata, johon lisätty kaikuluotaimen näyttämiä syvyyksiä kohtaavilta pisteiltä mittauspai-  
kalta 1.

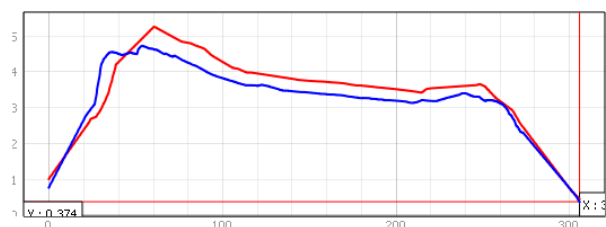


**Kuva 27.** Maatutkadata, johon lisätty kaikuluotaimen näyttämiä syvyyksiä kohtaavilta pisteiltä mittauspai-  
kalta 2.

Kuvissa 28 ja 29 on vertailtu GPR-droonilla ja vesialuksella mitattuja pohjaprofiilimuotoja molemmilta mittauspaikeilta. Profiilimuodot ovat lähes vastaavia.



**Kuva 28.** Profiili Kaikuluotain-(punainen) ja maatut-  
kadatan (sininen) perusteella tehdystä syvyyskartasta  
mittauspaikalta 1.



**Kuva 29.** Profiili Kaikuluotain-(punainen) ja maatutka-  
datan (sininen) perusteella tehdystä syvyyskartasta mit-  
tauspaikalta 2.

## 6. YHTEENVETO

Tutkimuksessa arvioitiin droonipohjaisten mittausmenetelmien soveltuvuutta voimalaitoksen alapuolisen Emäjoen vedenalaisen topografian kartoittamiseen. Näkösyvyys rajoitti kahden aallonpituuden laserkeilaimen toimivuutta ja havaintoja saatiin vain noin 1 metrin syvyyteen asti. Maatutkadroonilla pystyttiin kartoittamaan lähes koko tutkimusalue, lukuun ottamatta pieniä kaistaleita rantojen läheisyydessä, joilla uoman päällä roikkuvat puunoksat estivät lentämisen. Autonominen vesitutkimusalueen luotausdataa käytettiin vertailuaineistona, jota vasten muita aineistoja voitiin verrata. Paras kuva koko uomasta saatiin yhdistelemällä dataa eri lähteistä. Uoman keskiosa maatutkasta tai luotaimesta ja reunat & rannat kahden aallonpituuden laserkeilaimesta.

## 7. KIITOKSET

Tutkimus kuuluu Uudet teknologiat uomien ja kai-  
vosaltaiden kartoitukseen (UOMARI) -tutkimus-  
hankkeeseen, joka on saanut rahoitusta Euroopan  
unionin aluekehitysrahastosta (EAKR), rahoitta-  
jana Pohjois-Suomen elinvoimakeskus (Pohjois-  
Pohjanmaan ELY-keskus).



Euroopan unionin  
osarahoittama

## VIITTEET

- [1] Kousa, J., Hakala, T., Kukko, A., and Kaartinen, H.: Performance Evaluation of Drooni Operated Dual Waveform Bathymetric LiDAR, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., X-2/W2-2025, 101–108, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-2-W2-2025-101-2025>, 2025.
- [2] Kupiainen, V., Jalonen, J., Tiainen, J., Roikonen, T. & Talvinen, T. Esiselvitys kalojen ylösvaelluksen mahdollistavasta ohitusratkaisusta Seitenoikean voimalaitokselle. <https://energia.fi/energiatieto/vastuullisuus/vastuullisuushanke/seitenoikean-kalatie/>

# Droonipohjainen batymetria Mondo Mineralsin kaivosaltaan arvioinnissa

Veijo Sutinen<sup>1</sup>, Pasi Karjalainen<sup>1</sup>, Roope Koponen<sup>1</sup>, Tatu Lahtinen<sup>2</sup>, Olli Nurmilaukas<sup>2</sup>  
Oulun yliopisto, Mittaustekniikan yksikkö<sup>1</sup>  
Geologian tutkimuskeskus<sup>2</sup>

## Tiivistelmä

Suomessa on paljon kaivosteollisuutta, ja sen yhteydessä käytetään paljon runsaasti erilaisia allasrakenteita. Aiemmin altaat rakennettiin kaivosalueelle jääviin metsälampiin, mutta nykyään niihin vaaditaan erilaisia kalvo- ja pohjarakenteita. Altaiden rakenteellinen turvallisuus ja toiminnallinen luotettavuus perustuvat altaan pohjan, reunarakenteiden ja vedenalaisten muotojen tarkkaan tuntemiseen. Näiden muutosten havainnointi on erittäin tärkeää turvallisuuden näkökulmasta, sillä aikainen havaitseminen mahdollistaa toimenpiteet ennen vuotoja.

Uudet teknologiat uomien ja kaivosaltaiden kartoitukseen (UOMARI) -hankkeessa tutkittiin drooniin liitetyn maatutkan hyödyntämistä kaivosaltaiden pohjarakenteiden selvittämisessä. Hankkeen tutkimuskohteeksi valittiin Mondo Mineralsin Sotkamon tehtaalla, joka on perustettu pohjamooreenialueelle. Tutkimuskohteessa tehtiin mittauksia drooniin liitettyllä maatutkalla ja vertailumittauksia autonomisella Surfbee-mittauslautalla. Lisäksi tehtiin vedenlaadun mittauksia ja manuaalisia allassyvyyden referenssimittauksia YSI-multiparametrian turilla.

Mittauslennot ja vertailumittaukset toteutettiin syksyllä 2025. Maatutkadroonin osalta mittaustulokset olivat heikot, sillä tutka ei havainnut vedenalaisia rakenteita juuri lainkaan, ainoastaan rannasta muutaman kymmenen senttimetrin syvyyteen. Heikko tulos johtui siitä, että altaan sähkönjohtavuus oli niin suuri, että maatutkan signaali vaimeni ja absorboitui veteen. Autonomisen vesialuksen kaikuluotaus puolestaan havainnollisti pohjan syvyyden hyvin ja toimi luotettavana vertailumittauksena.

## 1. JOHDANTO

Kaivosaltaiden rakenteellinen turvallisuus ja toiminnallinen luotettavuus perustuvat altaan pohjan, reunarakenteiden ja vedenalaisten muotojen tarkkaan tuntemiseen. Altaan syvyysvaihtelut, pohjan epäsäännöllisyydet, sedimentaatioprosessit ja mahdolliset rakenteelliset heikentymät vaikuttavat suoraan siihen, miten vesi käyttäytyy altaassa ja millaisia riskejä tähän liittyy.

Altaan sisäisellä virtausdynamiikalla tarkoitetaan veden liikkeeseen liittyviä fysikaalisia ominaisuuksia, kuten virtausnopeutta, vedenpinnan korkeutta, paine-eroja ja virtausvastusta. Nämä tekijät määrittävät, miten vesi kiertää altaassa, miten sedimentti kulkeutuu ja mihin kohtiin altaan pohjalle kertyy painumia tai eroosiota. Veden liikkeen ja siihen vaikuttavien tekijöiden ymmärtäminen on siten keskeistä altaan turvallisuuden, kapasiteetin ja rakenteellisen vakauden arvioinnissa.

Altaan pohjan ja vedenalaisten rakenteiden kartoittamiseen käytettävä batymetria tarkoittaa vedenalaisen topografian mittaamista ja kuvaamista. Batymetrinen kartoitus tuottaa tietoa altaan syvyysvaihteluista, pohjan muodoista, sedimentaatiovyöhykkeistä ja mahdollisista rakenteellisista epäsäännöllisyyksistä. Kaivosaltaissa batymetria on tärkeä työkalu esimerkiksi sedimenttikertymien seurannassa, altaan tilavuuden arvioinnissa ja pohjarakenteiden kunnon tarkastelussa.

Perinteisesti batymetriaa on toteutettu venealustaisilla kaikuluotaimilla tai manuaalisilla mittauksilla, jotka tuottavat tarkkaa tietoa, mutta ovat usein hitaita, työvoimavaltaisia ja hankalia erityisesti matalissa, vaikeakulkuisissa tai rakenteellisesti suljetuissa altaissa. Lisäksi perinteiset menetelmät voivat olla haastavia tilanteissa, joissa vedenpinta on epävakaa, sedimentaatio on voimakasta tai altaan käyttö estää venealustaisen mittauksen.

Droonipohjainen batymetria on nopeasti yleistyvä menetelmä vesialueiden syvyyksien ja pohjamuotojen kartoittamiseen tilanteissa, joissa perinteiset mittausmenetelmät ovat hitaita, kalliita tai vaarallisia. Kaivosympäristöissä tätä tarvetta korostavat erityisesti allasrakenteiden suuren kokoluokan vaihtelut, sameat ja kemiallisesti haastavat vesistöolosuhteet sekä turvallisuusriskit, jotka liittyvät veneiden tai miehitettyjen alusten käyttöön. Droonien avulla syvyyskartoitus voidaan tehdä ilman kontaktia veteen, mikä vähentää

huomattavasti mittajien altistumista happamille valumavesille, metallisakoille ja sortumavaarallisille ranta-alueille. Menetelmä mahdollistaa suuren alueen kattavan, tarkan ja kustannustehokkaan seurannan sekä allastilavuuden, sedimenttikertymän että pohjan morfologian muutosten havaitsemisen [1].

Tässä tutkimuksessa keskitytään kaivosaltaan pohjarakenteiden arviointiin hyödyntämällä droonipohjaista kaukokartoitusmenetelmää, joka koostui maatutkalla varustetusta droonista (GPR-drooni). GPR-droonin toimintaa testattiin suolampipohjaisessa kaivosallaskohteessa, jonka sähköjohtavuudesta ei ollut tietoa ennakkoon.

Vertailumittauksia varten tutkimuksessa hyödynnettiin lisäksi autonomista vesitutkimusalustaa, joka mahdollisti altaan syvyys- ja pohjamuotojen mittaamisen perinteisillä kaikuluotaimilla. Tämä vertailuaineisto toimi tärkeänä referenssinä droonipohjaisille menetelmille ja mahdollisti niiden tarkkuuden ja soveltuvuuden arvioinnin kaivosaltaan pohjarakenteiden tutkimuksessa.

Raportissa esitellään käytettyjen menetelmien toimintaperiaatteet, mittausjärjestelyt ja aineiston käsittely sekä arvioidaan, miten eri mittausmenetelmien yhdistäminen soveltuu kaivosaltaan pohjarakenteiden luotettavaan ja kattavaan arviointiin.

## 2. TUTKIMUSKOHDDE

Tutkimuskohde sijaitsee Mondo Mineralsin kaivoksen alueella Sotkamossa. Allasta käytetään tehtaan suljetun prosessivesikierron vesialtaana. Allas on perustettu tyypilliselle pohjamoreenialueelle, jonka keskiosassa esiintyy turvetta (kuva 1).



*Kuva 1. Kaivosaltaan sijainti.*

### 3. TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimuksessa tutkittiin kaivosaltaan pohjarakennetta käyttämällä maatutkadroonia (GPR-drooni). Lisäksi vertailumittaukseen käytettiin autonomista ADCP-lauttaa. Allassyvyyden referenssitiedoksi mitattiin vesipatjan paksuutta ja veden laadun vertikaalista vaihtelua manuaalisesti kumiveneestä käsin YSI-multiparametrianurilla.

#### 3.1. GPR-DROONI

GPR-drooni koostuu miehittämättömästä ilma-aluksesta DJI Matrice 350 RTK, Radar Systems Zond Aero LF -maatutkasta, SkyHub-tiedonkeruuyksiköstä sekä Terrain Follow -pinnan seurantajärjestelmästä (kuva 2).



**Kuva 2.** GPR-drooni Rautuvaarassa keväällä 2025.

#### *Miehittämätön ilma-alus – drone, drooni*

GPR-droonimittausjärjestelmä sisältää DJI Matrice 350 RTK -droonin, jossa on RTK (Real Time Kinetic) -tarkkuuspaikannus sekä laaja käyttölämpötila-alue (-20 ... 50 °C) ja IP55 suojaus. Ominaisuudet mahdollistavat toistettavat lentoreitit ja tarkat paikkatiedot mittausdatalle erilaisissa sääolosuhteissa.

#### *Maatutka – GPR (Ground Penetrating Radar)*

Maatutka on 1950-luvulla maantutkimiseen kehitetty mittalaite, jonka toiminta perustuu radiotaajuisten (MHz - GHz) sähkömagneettisten aaltojen lähettämiseen maaperään ja takaisin heijastuneiden signaalien vastaanottamiseen. Heijastuneiden signaalien kulkuajasta voidaan määrittellä etäisyys ja voimakkuudesta (amplitudi) eri kerrosten

ominaisuuksia, mikäli näiden eri kerrosten aallon etenemisnopeus tunnetaan.

MITYn maatutkajärjestelmä koostuu Radar Systems Zond Aero LF -maatutkasta, SkyHub-tiedonkeruuyksiköstä ja Terrain Follow -pinnan seurantajärjestelmästä. Maatutkassa on vaihdettavat antennit, joiden avulla mittaustaajuus voi olla 100, 150 tai 300 MHz. Tiedonkeruuyksikkö tallentaa mitausdatan reaaliaikaisella näytteistyksellä hyödyntäen hardware stacking -ominaisuutta. Järjestelmään kuuluu lisäksi pinnan seurantajärjestelmä, jonka avulla drooni säilyttää asetetun etäisyyden maanpintaan automaattilennon aikana.

#### *Lentotoiminta*

GPR-droonin lentotoimintaa ohjaa Traficom määrittelemät avoimen kategorian A3 -lentosääntöt sekä erilliset määräykset maatutkan käytöstä miehittämättömässä ilma-aluksessa. Kun drooniin liitetään maatutka, sen käyttö edellyttää Traficom myöntämää lupaa.

MITY:lle myönnetty lupa mahdollistaa maatutkalennot yhden metrin etäisyydellä maanpinnasta tai vedestä valituilla testikohteilla avoimessa kategoriassa A3. Matalalla lentämistä tukevat lento-ohjelmiston autopilotti- sekä pinnan seurantaominaisuus, jotka mahdollistavat autonomiset lennot asetetulla etäisyydellä maanpinnasta. Lennon aikana etäisyys maanpintaa mitataan järjestelmään kuuluvan etäisyystutkan avulla. Vikaantumisen varalle droonissa on automaattisesti toimiva pelastusliivi, joka estää droonin uppoamisen teknisessä vikatilanteessa.

#### 3.2. LASERKEILAUSDROONI

Laserkeilain on mittalaite, joka tuottaa tarkkaa kolmiulotteista mittaustietoa kohteesta. Sen toimintaperiaate perustuu lasersäteiden lähettämiseen ja kohteesta heijastuneiden signaalien vastaanottamiseen. Heijastuneiden signaalien kulkuajasta ja intensiteetistä voidaan määrittää kohteen etäisyydet ja muodot. Näistä mitatuista pisteistä muodostetaan 3D-pistepilvi, josta voidaan edelleen tuottaa maastopintamalleja eli DEM-karttoja (Digital Elevation Model).

MITYn droonimittausjärjestelmä koostuu DJI Matrice 350 RTK -droonista ja DJI Zenmuse L2 -laserkeilaimesta. Data-aineisto prosessoidaan maastopintamalleiksi DJI Terra -ohjelmistolla.

### 3.3. AUTONOMINEN VESITUTKIMUSALUS

Batymetriseen vertailumittaukseen käytettiin etäohjattavaa, autonomista Xylem Surfbee Flow Seeker -vesitutkimusalusta (USV, Uncrewed Surface Vehicle), joka on suunniteltu erityisesti hydrometrisiin mittauksiin, kuten virtausnopeuksien ja virtaamien laskentaan sekä batymetristen profiilien laadintaan (kuva 3).



**Kuva 3.** Autonominen vesitutkimusalus.

Alus oli varustettu monitaajuusakustisella SonTek M9 -ADCP-kaikuluotaimella, jolla tehtiin batymetrinen luotaus altaan syvyyskartan luomiseksi. Luotaus päätettiin kohdistaa erityisesti altaan pohjoisosaan, jossa myös dronilennot tehtiin. Mittausohjelmistona käytettiin SonTek:n tukemaa Riversurveyor-sovellusta. Luotaussuunnitelma määritettiin esiasetuksena Surfbeen omassa ohjaussovelluksessa ennen luotausta.

### 3.4. MANUAALISET REFERENSSIMITTAUKSET

Allasyvyyden referenssimittauksia tehtiin muiden mittausmenetelmien tueksi manuaalisesti kumiveeneistä yhteensä seitsemästä pisteestä eri puolilta alasta. Mittauksiin käytettiin YSI ProDSS –multiparametrianuria. Sillä kerättiin samalla tietoa altaan vedenlaadusta keskeisten vedenlaatumuuttujien osalta sekä vedenlaadun mahdollisesta vaihtelusta eri syvyyksillä mm. suolaisuutta ilmaisevan sähkönjohtavuuden (EC) suhteen. Vedenlaatumittausten vertikaalisena mittausintervallina käytettiin yhtä metriä.

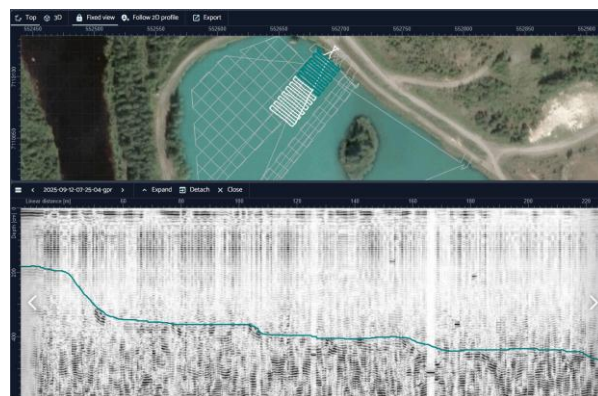
## 4. MITTAUSTULOKSET

Tutkimuskohteessa tehtiin maatutkamittauksia GPR-droonilla, patopenkan kuvantamista laserkeilausdroonilla, pohjanmuodon vertailumittauksia

autonomisella vesitutkimusaluksella ja manuaalisia sähkönjohtavuusmittauksia veneestä käsin vedenlaatusensorilla.

### 4.1. MAATUTKADROONI

Alueen ensimmäisessä testimittauksessa maatutkalla kerätystä aineistosta jäi epäselväksi, edustivatko havaitut rajapinnat todellista pohjaa vai muita ilmiöitä, kuten mittaushäiriöitä tai signaalin vaimenemisesta johtuvia heijastuksia (kuva 4).



**Kuva 4.** Suoritettu ensimmäinen testimittaus maatutkalla altaalla. Sinisellä merkitty mahdollinen rajapinta.

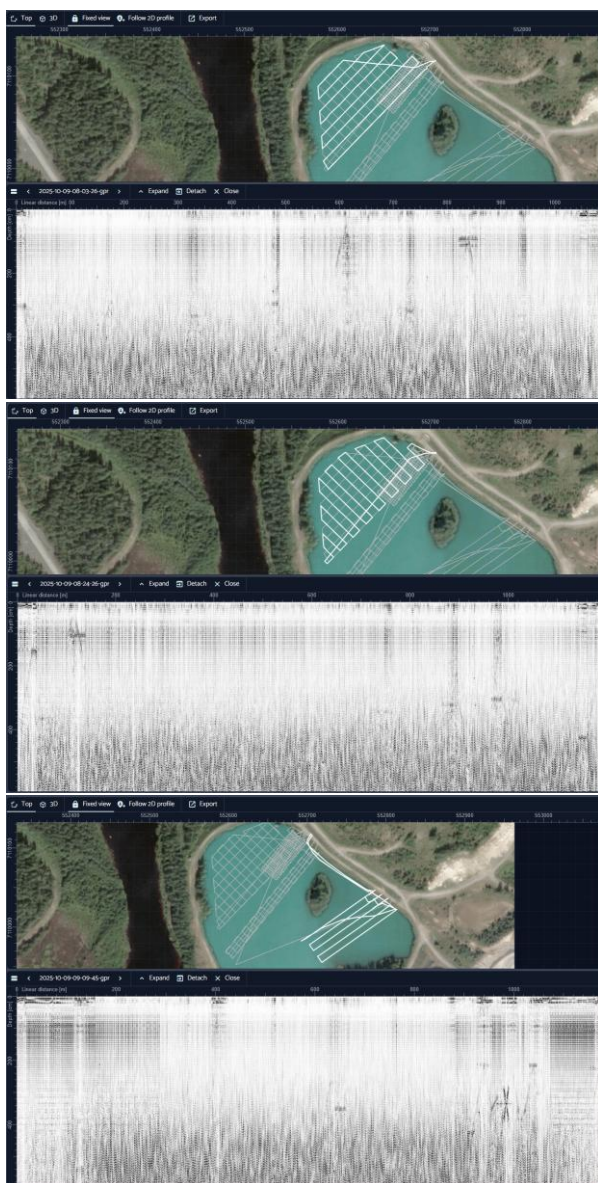
Maatutkalla varustetulla droonilla suoritettiin lennot sekä autonomisesti että manuaalisesti lentämällä. Maatutka vastaanottaa signaalia 1280 nanosekunnin ajan, ja tallentaa tämän jakson 1024 näytteen tarkkuudella (kuva 5).



**Kuva 5.** Maatutkadroonilla lennetyt reitit.

Maatutkadatan käsittely osoittautui haasteelliseksi veden korkean sähkönjohtavuuden vuoksi, minkä seurauksena pohjakerrosta ei näkynyt selvänä mittausaineistossa (kuva 6). Vaikka mittausvaiheessa testattiin useita eri maatutkan

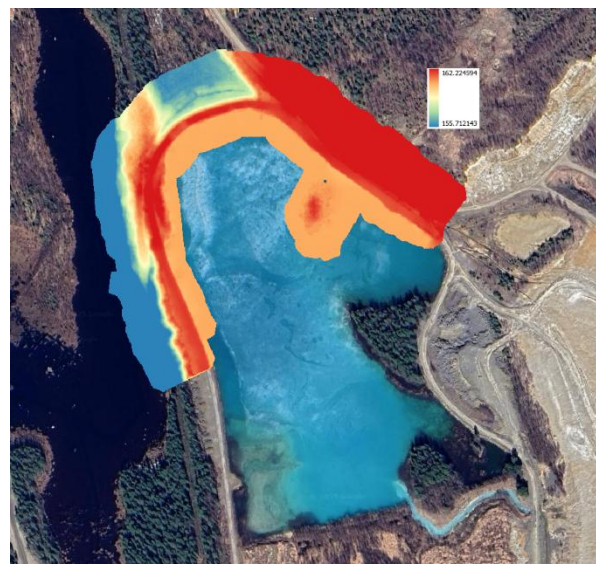
asetuskokonaisuuksia sekä eri taajuuksilla toimivia antennejä, näillä toimenpiteillä ei saavutettu parannusta tuloksiin.



**Kuva 6.** Maatutkadroonin mittausaineisto.

## 4.2. LASERKEILAUKSEN TULOKSET

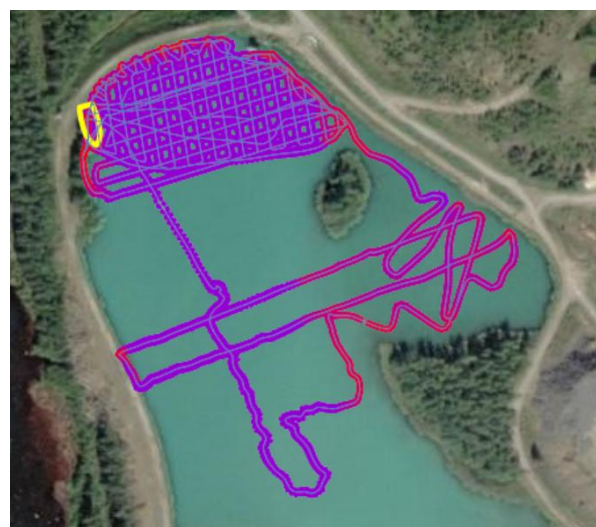
Laserkeilausta varten suunniteltiin yksinkertaiset ja nopeat lentoreitit mittausalueen rannan läheisyydessä siten, että aineisto olisi myöhemmin yhdistettävissä lammesta kerättäviin luotain- ja maatkasyvyysaineistoihin. Keilausaineiston prosessointi toteutettiin DJI Terra -ohjelmistolla, jonka avulla tuotettiin maastopintamalli (kuva 7).



**Kuva 7.** Laserkeilauksen datasta luotu DEM kartta.

## 4.3. AUTONOMINEN VESITUTKIMUSALUS

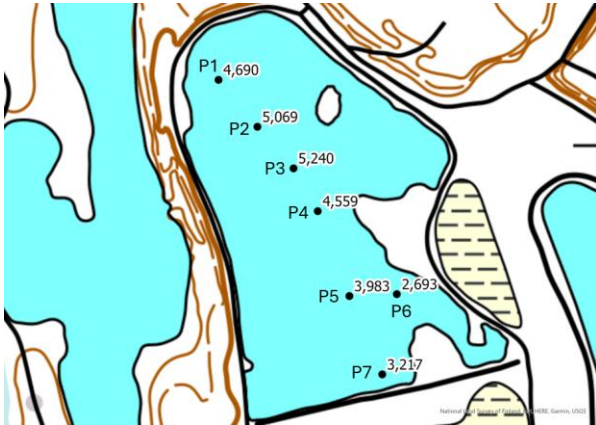
Autonomisella Surfbee –USV-aluksella tehdyn batymetrialuotauksen luotauslinjasto on esitetty kuvassa 8. Linjasto suunniteltiin tiheäksi altaan pohjoispäädyssä mahdollisimman hyvän vertailukelpoisuuden saavuttamista varten. Tulokset luotauksesta autonomisella aluksella ja SonTek-Riversurveyor-yhdistelmällä olivat hyviä. Luotauksen perusteella vedensyvyys kasvaa nopeasti altaan reuna-alueilla ja allaspohja on yleisesti ottaen melko tasainen. USV-batymetriassa mitattu altaan syvin kohta oli vain noin 5,9 metriä.



**Kuva 8.** Autonomisen mittauslautan luotausreitti.

#### 4.4. MANUAALISET SYVYYSMITTAUKSET JA VEDENLAATU

Käsintehdyissä YSI-mittauksissa altaan pohjan syvyys vedenpinnasta vaihteli välillä 2,69–5,24 m. Mitatut syvyydet seitsemässä eri mittauspisteessä on esitetty kuvassa 9.



**Kuva 9.** Allaspohjan referenssisyvydet YSI-mittauksista (m).

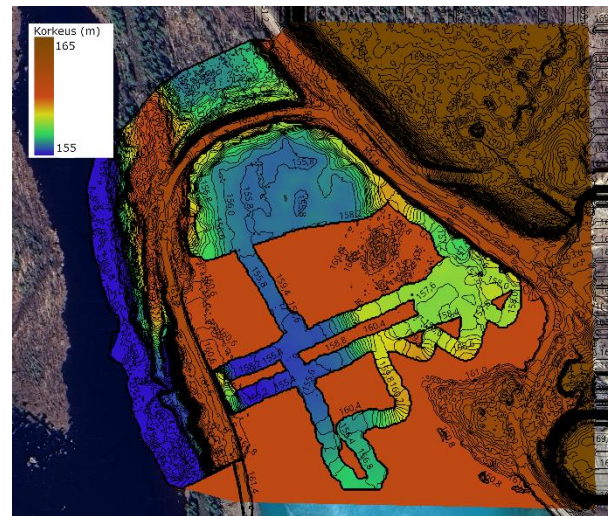
Veden laatuparametrit tallennettiin YSI-mittarin sisäiseen muistiin yhden metrin syvyysintervallilla. Tulosten perusteella altaan vesi oli kaikkien mitattujen parametrien suhteen erittäin tasalaatuista, eikä altaassa havaittu käytännössä lainkaan veden kerrostuneisuutta sähkönjohtavuuden (ts. suolaisuuden) tai muidenkaan laatuindikaattorien osalta. Altaan veden liuenneiden suolojen kokonaismäärää kuvaava sähkönjohtavuus (EC) oli korkea, noin 3200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , ja pH lähes 8. Mittauspistekohtaiset tulosten keskiarvot on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** YSI-mittausten tulokset (laatuparametrit syvyyden keskiarvona).

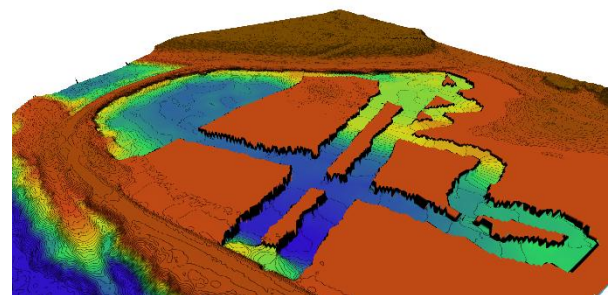
Mittauspiste	Kokonaissyvyys (m)	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	ORP (mV)
P1	4,69	3192	7,96	8,3	214
P2	5,07	3193	7,96	8,3	210
P3	5,24	3193	7,95	8,3	209
P4	4,56	3195	7,95	8,3	209
P5	3,98	3198	7,96	8,3	207
P6	2,69	3198	7,95	8,3	207
P7	3,22	3204	7,97	8,3	206

#### 5. TULOSTEN VISUALISOINTI

Lautan avulla saadut syvyystiedot eri pisteistä laajennettiin peittämään suurempi osa altaasta ottamalla pisteittäin lähialueen korkeusdatojen keskiarvo koko altaan alueelta. Näin saatu korkeusdata vähennettiin pistepilviaineiston avulla luodusta korkeuskartasta, jolloin saatiin altaan pohjan muoto näkyville lähialueen maanmuotoihin suhteutettuna. Maanpinnan muodot saadaan aiemmin mainitusta laserkeilausaineistosta, jota laajennettiin Maanmittauslaitoksen avoimella pistepilviaineistolla peittämään koko mittausalue. Pistepilviaineistojen korkeudet säädettiin vastaamaan toisiaan vertaamalla altaan vieressä kulkevan tien korkeutta, ja avoimen pistepilviaineiston veden korkeus muutettiin manuaalisesti vastaamaan mittausajankohdan korkeutta. Altaan reunojen lähellä olevien alueiden syvyydsarvot interpoloitiin rannan ja vedenpohjan väliseksi arvoiksi, ja kuvaan lisättiin automaattisesti luodut korkeuskäyrät. Prosessointi tehtiin QGIS-ohjelmistolla (kuva 10 ja 11).



**Kuva 10.** Korkeuskartta. Veden korkeus on noin 160,6 m.

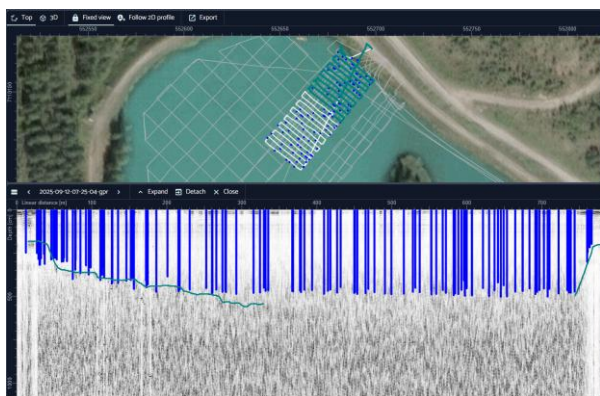


**Kuva 11.** 3D-näkymä alueesta.

Käytetty pistepilviaineisto on Maanmittauslaitoksen avointa kansallista laserkeilausaineistoa ajalta 06/2023, joka ladattiin käyttöön 12/2025.

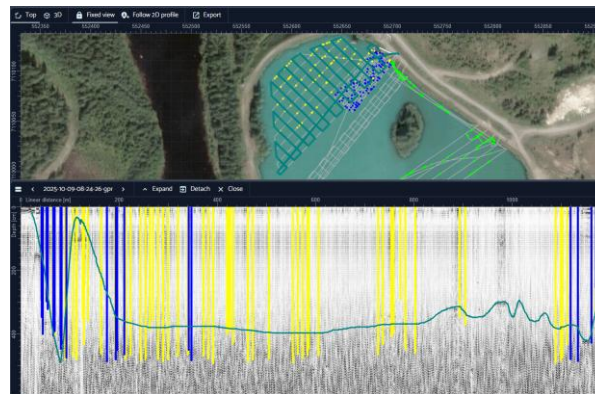
## 6. TULOSTEN JA MITTAUSMENETELMIEN VERTAILU

Alueella suoritetuissa aikaisemmissa testimittauksissa oli epäselvää, että edustivatko maatutkadatassa havaitut rajapinnat todellista pohjarakennetta vai mittaushäiriöitä. Jotka johtuisivat esimerkiksi ympäröivistä sähkökaapeleista, rannan läheisyydessä sijaitsevasta pumppaamosta tai veden korkeasta sähkönjohtavuudesta. Tulkinnan varmentamiseksi mittauskokonaisuutta laajennettiin sisällyttämällä myös kaikuluotainmittaukset maatutka-aineistoon. Näin muodostettu rinnakkaisaineisto mahdollisti pohjatason määrityksen vertailevan analyysin sekä menetelmien vasteiden keskinäisen tarkastelun. Vertailu osoitti, että menetelmien havaitsemat rajapinnat eivät olleet yhteneviä, mikä osoittaa pohjatulkinnan olevan osittain tulkinnanvaraista ja menetelmäriippuvaista (kuva 12).

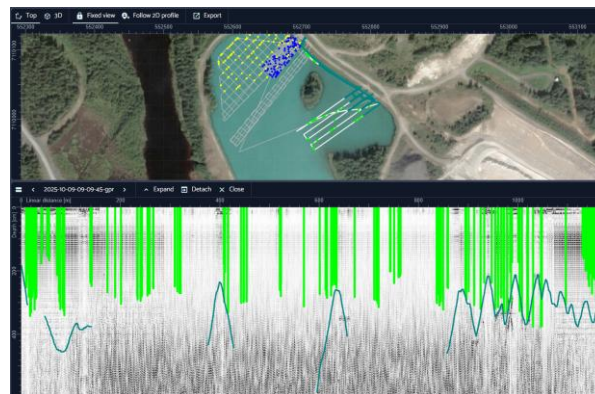


**Kuva 12.** Ensimmäisellä testimittauksella kerätyt maatutkadatat, johon lisätty lautan antamia syvyysksiä kuvassa esitetyillä sinisillä palkeilla.

Tämän vuoksi seuraavalla mittauskerralla suoritettiin lisämittauksia, joissa hyödynnettiin sekä kaikuluotainta että maatutkaa. Luotainmittaukset mahdollistivat lammen pohjan selkeän havaitsemisen, kun maatutkadatasta ei ollut tunnistettavissa yhteneviä tai luotettavia rajapintoja (kuvat 13 ja 14). Tämä osoittaa, että virheellinen tai epäselvä mittausdata voi vaikeuttaa aineiston käsittelyä ja tulkintaa. Mittausten perusteella todettiin, että useiden mittausmenetelmien yhdistäminen on tärkeää tulosten luotettavuuden arvioimiseksi.



**Kuva 13.** Luotaimen näkemä syvyys lisättyä maatutkadataan. Siniset ja keltaiset palkit kuvastavat luotaimen näkemän syvyyden (maksimissaan 1 m etäisyydellä maatutkan linjasta). Vaalean sininen poikkileikkaus kuvaa jokseenkin näkyvää rajapintaa, joka johtunee häiriöistä.



**Kuva 14.** Luotaimen näkemä syvyys lisättyä maatutkadataan. Vihreät palkit kuvastavat luotaimen näkemän syvyyden 0,5 m tarkkuudella maatutkan linjasta. Vaalean sininen poikkileikkaus kuvaa jokseenkin näkyvää rajapintaa, joka johtunee häiriöistä.

Autonomisella Surfbee –aluksella ja siinä käytetyillä mittauslaitteilla (SonTek ja Riversurveyor) saatiin hyviä tuloksia altaan batymetrialuotauksessa. Käytetty laiteyhdistelmä todettiin verrattain nopeaksi ja suoraviivaiseksi tutkimusmenetodiksi, joka on käyttökelpoinen myös haastavissa sääolosuhteissa (tuuli, sade).

## 7. YHTEENVETO

Tutkimuksessa arvioitiin kaivosaltaan pohjarakenteita hyödyntämällä droniin liitettyä maatutkaa, laserkeilausta sekä autonomisen vesialuksen kaikuluotauksia. Tulokset osoittivat, että maatutka ei soveltunut altaan pohjan kartoitukseen veden korkean sähkönjohtavuuden vuoksi, sillä signaali

vaimeni eikä vedenalaisia rakenteita voitu havaita luotettavasti. Sen sijaan autonominen ADCP-luotaimella varustettu vesialus tuotti selkeää ja käyttökelpoista syvyysdataa, joka toimi vertailuaineistona muille menetelmille. USV-lautalla tehtävä bathymetrinen luotaus osoittautui erittäin tehokkaaksi ja nopeaksi menetelmäksi ko. tutkimusympäristössä heikoissakin sääolosuhteissa. Laserkeilaus täydensi aineistoa mahdollistamalla altaan ympäristön tarkat pintamallit. Kokonaisuutena havaittiin, että kaivosaltaiden rakenteellisen turvallisuuden arviointi edellyttää useiden mittausmenetelmien yhdistämistä, sillä yksittäinen teknologia ei aina kykene tuottamaan riittävän luotettavaa tietoa haastavissa olosuhteissa.

## 8. KIITOKSET

Tutkimus kuuluu Uudet teknologiat uomien ja kaivosaltaiden kartoitukseen (UOMARI) -

tutkimushankkeeseen, joka on saanut rahoitusta Euroopan unionin aluekehitysrahastosta (EAKR), rahoittajana Pohjois-Suomen elinvoimakeskus (Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus).



**Euroopan unionin  
osarahoittama**

## VIITTEET

- [1] Stringari, C. E., Engelbrecht, J., & Eaton, B. (2024). Measuring tailings storage facility bathymetry using Sentinel-2 and Landsat-8/9 multispectral imagery and machine learning. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/383995388> [researchgate.net]

# Droonipohjainen batymetria Valkeajoen uoman muodon arvioinnissa

Harri Kaartinen<sup>1</sup>, Matias Mäki-Leppilampi<sup>1</sup>, Joonas Kahiluoto<sup>2</sup>, Tuomas Hirvonen<sup>2</sup>, Veijo Sutinen<sup>3</sup>, Pasi Karjalainen<sup>3</sup> ja Roope Koponen<sup>3</sup>

Maanmittauslaitos, Paikkatietokeskus FGI<sup>1</sup>

Suomen ympäristökeskus<sup>2</sup>

Oulun yliopisto, Mittaustekniikan yksikkö<sup>3</sup>

## Tiivistelmä

Uomageometrian kartoitusta tarvitaan, kun halutaan seurata uoman muutoksia esimerkiksi tulvien takia, suunnitellaan uomien muokkausta tai käyttötarkoitusten muutoksia. Huolellinen suunnittelu edellyttää tietoa myös uoman vedenalaisista osista.

Uudet teknologiat uomien ja kaivosaltaiden kartoitukseen (UOMARI) -tutkimushankkeessa tutkittiin droonipohjaisten teknologioiden soveltuvuutta uomien vedenalaisten rakenteiden kartoittamiseen. Tutkimuskohteena oli Valkeajoki Kittilässä. Tutkimuksessa testattiin drooniin liitetyn kahden aallonpituuden laserkeilaimen suorituskykyä pienen jokiuoman saumattomaan kartoitukseen. Tutkimusaineisto kerättiin syksyllä 2024. Laserkeilausaineiston tarkkuuden määrittämiseksi joesta mitattiin 251 referenssipistettä joen pohjasta RTK-GNSS-laitteistolla. Laserkeilauslennon aikana satelliittipaikannuksen laatu ei ollut optimaalinen, mikä näkyy laserkeilausjärjestelmän paikannuksen toivottua suurempana epävarmuutena. Tämä vaikuttaa suoraan myös laserkeilauspistepilven geometriseen tarkkuuteen. Korkeusvertailussa joen pohjan määritystarkkuus oli noin 20 cm (RSME), mikä on odotettua heikompi. Kahden aallonpituuden laserkeilauksen etuna on nopeus ja tuotetun pistepilven tiheys. 4.5 km pituinen jokiuoma saatiin kartoitettua neljällä droonilennolla, yksittäisen lennon kesto oli noin 20 min. Yhteen suuntaan lennettyinä pistepilven tiheys on 2500 pistettä/m<sup>2</sup>.

Kahden aallonpituuden laserkeilaus on parhaimmillaan matalissa ja kirkkaissa vesissä, missä muilla menetelmillä, kuten veneestä tehtävällä kaikuluotauksella ja matalaa lentokorkeutta vaativassa maatumauksessa, on haasteita.

## 1. JOHDANTO

Vesistöjen morfologian eli vesistöjen muotoon, rakenteeseen ja niiden fyysisten piirteiden kehitykseen liittyvien ominaisuuksien tarkka kartoittaminen on keskeistä uomien toiminnan ja muutosten ymmärtämisessä. Samalla hydrologia – tieteenala, joka tutkii veden kiertokulkua, virtaamia, veden liikettä ja siihen vaikuttavia prosesseja – tarjoaa taustan sille, miten virtaavan veden voimat muokkaavat uomaa.

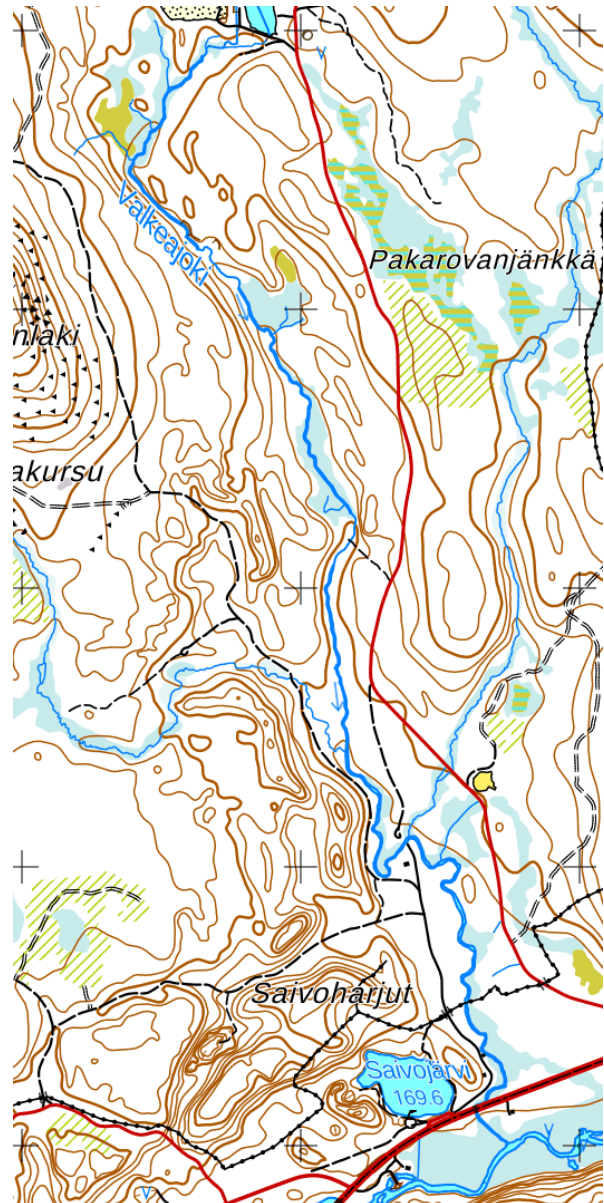
Perinteiset menetelmät, kuten veneestä tehtävät kaikuluotaukset tai manuaaliset poikkileikkausmittaukset, tarjoavat luotettavaa tietoa, mutta niiden käyttö on usein hidasta, työvoimavaltaista ja paikallisesti rajoittunutta. Kaukokartoitusteknologioiden nopea kehitys on kuitenkin mahdollistanut uudenlaisia, entistä kattavampia ja tarkempia tapoja kartoittaa uomien syvyyttä ja muotoa sekä tarkastella hydrologisten prosessien vaikutuksia uoman rakenteeseen.

Tässä tutkimuksessa hyödynnettiin dronissa kulkevaa kahdella eri aallonpituudella, vihreä ja lähi-infra, mittaavaa laserkeilainta. Vihreä aallonpituus mahdollistaa vedenpinnan läpäisevän mittauksen, eli batymetrisen mittauksen, erityisesti matalissa ja kirkasvetisissä olosuhteissa.

Raportissa tarkastellaan käytetyn menetelmän toimintaperiaatteita, aineistonkeruuprosessia ja tulosten tarkkuutta sekä arvioidaan, miten mittausaineisto soveltuu kanavan morfologian analysointiin ja erityisesti uoman muodon arviointiin.

## 2. TUTKIMUSKOHDDE

Tutkimuskohde sijaitsi Valkeajoella Kolarissa, noin 4.5 km pituisella osuudella Äkäsjoen pohjoiseen (Kuva 1).



**Kuva 1.** Tutkimuksessa käytetty Valkeajoen alue. Kartakuva: Paikkatietoikkuna 2025.

## 3. TUTKIMUSMENETELMÄ

Tutkimuksessa mitattiin Valkeajoen uomanmuotoa käyttämällä kahden aallonpituuden laserkeilainta. Menetelmän tarkkuuden arviointia varten joesta mitattiin vertailupisteitä RTK-GNSS-laitteella (Real Time Kinematic - Global Navigation Satellite System).

### 3.1. KAHDEN AALLONPITUUDEN LASERKEILAIN

Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskus FGI:n dronilla operoitava Fraunhofer IPM:n (Saksa)

valmistama ABS-laserkeilain (Airborne Bathymetric Scanner, Kuva 2) käyttää kohteiden mittaukseen samanaikaisesti 510 nm ja 1030 nm aallonpituuksia, joissa lyhyempi aallonpituus (vihreä) läpäisee veden ja pidempi (infrapuna) heijastuu veden pinnasta. Vesialueen lisäksi ympäröivistä alueilta, kuten rantojen kasvillisuudesta, maanpinnasta ja rakenteista, saadaan havainnot molemmilla aallonpituuksilla. Useamman aallonpituuden havaintoja voidaan hyödyntää tarkempaan kohteen tunnistamiseen, kuten puulajien määrittämiseen. Optimiolosuhteissa ABS:llä on mahdollista saada havaintoja veden alta 1.75 kertaa näkösyvyyttä syvemmältä, yleensä kuitenkin vähintään näkösyvyyden verran (Kousa et al. 2025).

Laserkeilain lähettää lyhyen laserpulssin ja määrittää etäisyyden kohteeseen pulssin lentoajan perusteella. Kun yhdistetään havaittu etäisyys ja pulssin lentosuunta keilaimeen yhdistetyn paikannusjärjestelmän antamaan paikka- ja asentotietoon, voidaan laskea laserpulssin osumakohdan eli mittauskohteen 3D-koordinaatit. Keilain pystyy havaitsemaan yhden laserpulssin lentomatkan varrelta useita paluukaikuja. Jos esimerkiksi osa säteestä osuu puunoksaan ja osa jatkaa matkaa maahan, saadaan yksi 3D-piste oksasta ja toinen maanpinnasta.



**Kuva 2.** Kahden aallonpituuden laserkeilausdrooni.

### 3.2. VRS-GNSS MITTAUKSET

Valkeajoella Syke kartoitti tarkalla satelliittipaikannuslaitteella (Topcon Hiper HR) maanpinnan ja joen pohjan 3D-pisteitä laserkeilaimen tuottaman datan tarkkuusarviointia varten. Paikannuslaite käyttää mobiiliverkon kautta saatavaa Maanmittauslaitoksen FINPOS-korjauspalvelua. Menetelmässä

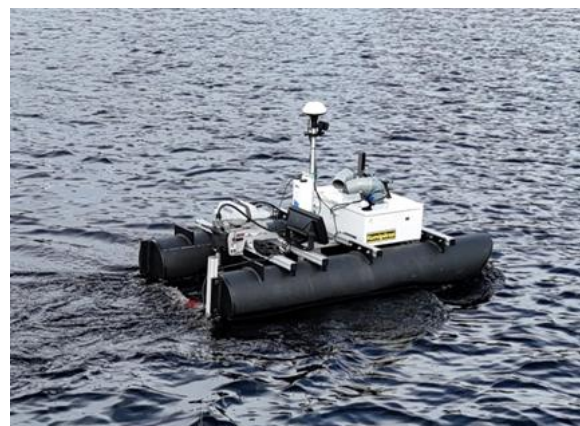
määritetään mittauskohteen läheisyyteen virtuaalinen tukiasema (Virtual Reference Station, VRS), jota käytetään RTK-mittauksen tukiasemana (Real-time Kinematic) määrittämään tarkka sijainti paikannussatelliittien perusteella (Global Navigation Satellite System, GNSS).

### 3.3. DROONIKUVAUKSET

Syke kuvasi Valkeajoen jokiuoman DJI Mavic 3T droonilla. Ilmakuvista tehtiin georeferoitu ortomosaiikki Pix4Dmapper-ohjelmalla, jota hyödynnettiin tunnistamaan joen pohjan näkyminen: missä joen hiekka- tai sorapohja on visuaalisesti havaittavissa, ja missä pohjaa ei voi erottaa sen tummuuden, kasvillisuuden tai vedensyvyyden takia.

### 3.4. AUTONOMINEN VESITUTKIMUSALUS

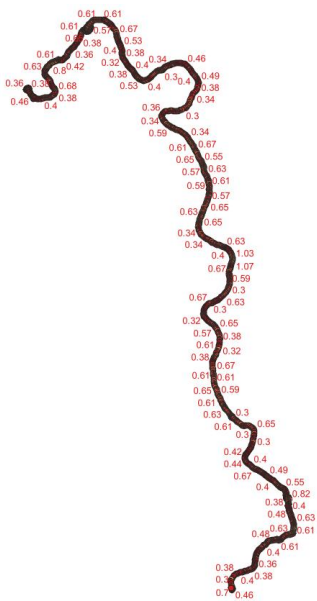
Valkeajoella yritettiin myös käyttää autonomista vesitutkimusalusta (Kuva 3), joka oli varustettu yksisäteisellä ja sivuttaissuuntaisella kaikuluotaimella syvyyskartan luomiseen, mutta uoma osoittautui vesitutkimusalukselle sopimattomaksi. Uomassa oli paljon erittäin matalia kohtia (alle 30 cm), paikoin huomattavasti kasvillisuutta ja kaatu-neita puita.



**Kuva 3.** Autonominen vesitutkimusalus.

Haasteista huolimatta lautalla onnistuttiin manuaalivusteisesti luotaamaan noin 1,5 km pätkä uomaa Ylläksentieltä pohjoiseen. Mitatut syvyydet olivat pääasiassa alle 1 m (Kuva 4). Lautan paikannusjärjestelmä tallentaa sijainnit vain reilun metrin resoluutiolla, mikä ei riitä tarkan vertailutuloksen saamiseen kapeassa uomassa, missä syvyys vaihtuu nopeasti. Koska lautaa ja pistepilven

syvyyshavaintojen sijaintitieto ei ole vertailukelpoinen, Valkeajoella ei tehty suoraa vertailua syvyyshavaintojen välillä.



**Kuva 4.** Kaikuluotaimen mitaamia syvyyksiä Ylläksentieltä pohjoiseen.

#### 4. MITTAUSTULOKSET

Mittaustulosten analyysi keskittyy kahden aallonpituuden laserkeilausaineiston tarkkuusarviointiin joen pohjan korkeusaseman määrittämisessä.

##### 4.1. KAHDEN AALLONPITUUDEN LASERKEILAIN

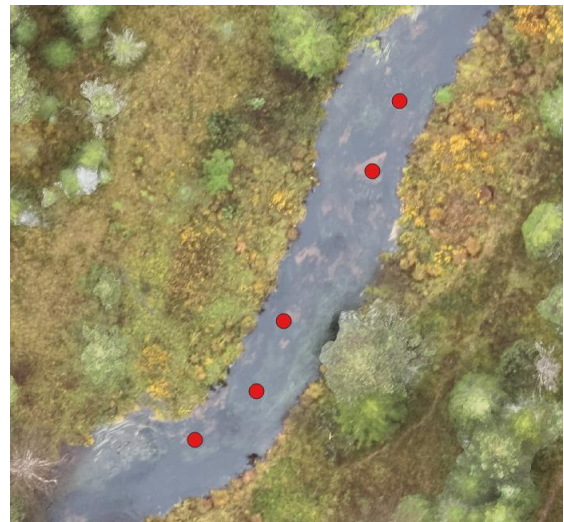
Valkeajoella lennettiin yhteensä neljä eri mittauslentoa, yksittäisen lennon kesto oli noin 20 min. Näin saatiin katettua koko 4.5 km pitkä osuus, joka oli valittu tutkimusalueeksi. Lentokorkeus oli 30 m, jolloin keilaimen näkemä kattoi 15 m leveän kaistan lentosuunnassa.

Valkeajoen 3D-pistepilvi laskettiin yhdistämällä mittausjärjestelmän paikannuslaitteiston määrittämä trajektori (keilaimen paikka ja asento 400 Hz taajuudella) ja laserkeilaimen tallentamat havainnot. Trajektorilaskennassa todettiin, että GNSS-ratkaisu ei ole optimaalinen, mistä syystä myös pistepilven ratkaisuun tulee ei-systemaattista epävarmuutta. Tämä näkyy erityisesti 3D-pisteiden korkeushavainnoissa. Tuotetun pistepilven tiheys on 2500 pistettä/m<sup>2</sup> yhteen suuntaan lennettäessä.

Pistepilvestä luokiteltiin maanpinta- ja joenpohjapisteet Terrscan ohjelmistolla. Luokiteltujen pisteiden perusteella määritetyn maanpinnan korkeutta verrattiin GNSS-laitteistolla mitattuihin referenssipisteisiin. Vertailua varten GNSS-pisteet jaettiin kahteen osaan: ensimmäisessä vertailupistejoukossa oli mukana kaikki joen alueelta mitatut pisteet (Kuva 5), ja toisessa ne pisteet, joiden kohdalta pystyttiin näkemään joen hiekka- tai sorapohja joen ortokuvamosaiikista (Kuva 6). Vertailun tulos on esitetty Taulukossa 1.



**Kuva 5.** Esimerkki GNSS-pisteistä joiden kohdalta joen pohjaa ei voimut erottaa ortokuvulta.



**Kuva 6.** Esimerkki GNSS-pisteistä joiden kohdalta joen pohja oli erotettavissa ortokuvulta.

**Taulukko 1.** Laserpistepilven joenpohjapisteiden ja GNSS-mitatus korkeuden erot.

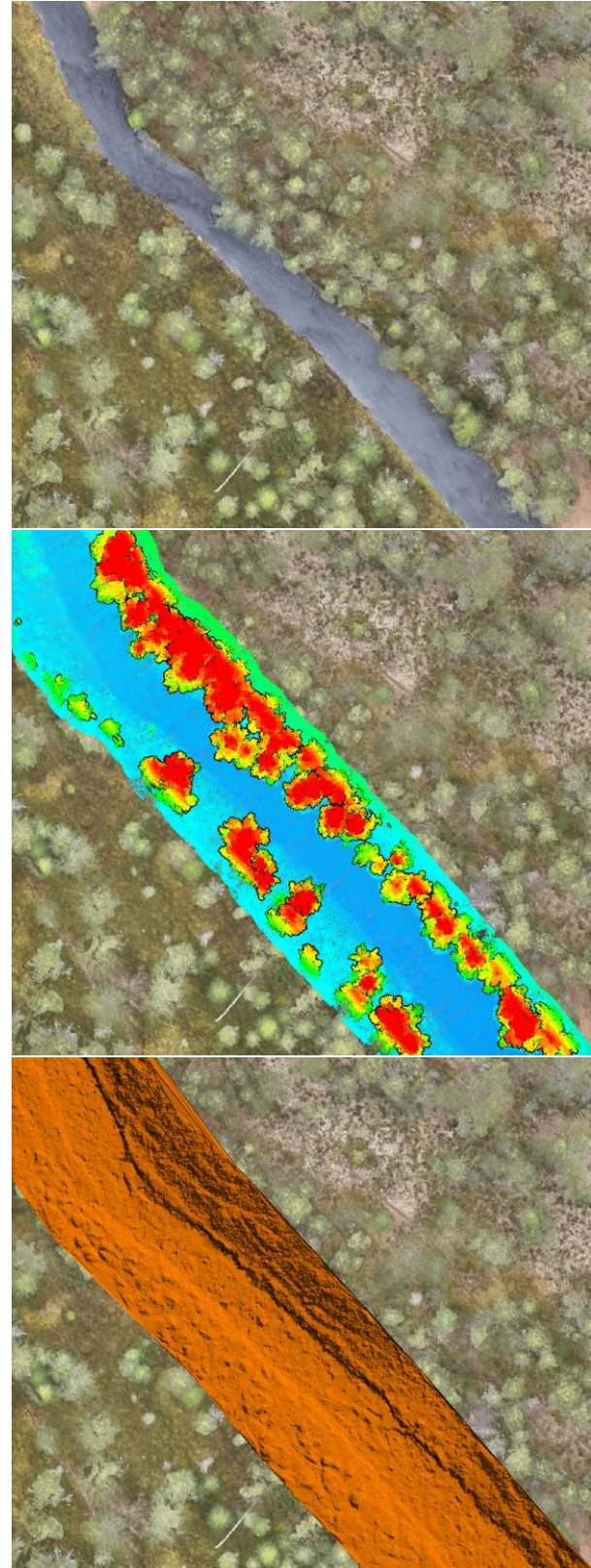
	Kaikki pisteet	Pohjapisteet
Lukumäärä	251	81
Keskiarvo	8.8 cm	9.2 cm
Keskimääräinen korkeusero	15.9 cm	16.1 cm
RMSE	19.8 cm	19.7 cm

Tulosten mukaan laserkeilauksen joenpohjapisteet ovat systemaattisesti noin 9 cm GNSS-pisteitä korkeammalla. Keskimääräinen korkeusero, noin 16 cm, kuvaa mikä on korkeushavaintojen korkeusero ottamatta kantaa siihen, onko erotus negatiivinen tai positiivinen. RMSE, noin 20 cm, kuvaa korkeuserojen hajontaa nollan ympärillä. Näiden kahden eri vertailun välillä ei ollut käytännössä eroa, minkä voi tulkita tarkoittavan, että monin paikoin laserkeilain tunnisti pohjan, vaikka sitä ei ortoilmakuvasta ihmissilmän voinut tunnistaa selvästi.

Kuten jo edellä kerrottiin, laserkeilauksen tarkkuustulosta heikentää keilaimen trajektorilaskennan epävarmuus. Trajektorilaskennan laatuestimaatit eivät ole parhaat mahdolliset jälkilasketun satelliittipaikannusratkaisun epätarkkuuden takia. Syytä tähän ei tiedetä varmasti, todennäköisesti siihen vaikuttavat mittausajankohdan häiriöt satelliittien havainnoinnissa. Myös käsikäyttöisen satelliittipaikannuslaitteen signaalissa oli ajoittain ongelmia ja välillä riittävän tarkkuuden saaminen tuloksen tallentamiseksi vaati minuutteja kestäneen laitteen liikuttelun ja odottelun. Tulevaisuudessa navigointijärjestelmän GNSS-antenni tullaan uusimaan paremmin häiriöiltä suojattuun malliin.

#### 4.2. TULOSTEN VISUALISOINTI

Kuvassa 7 on visualisoitu ortoilmakuvan päällä esimerkki mitatus 3D-pistepilvestä korkeuden mukaan väritettynä ja pistepilvestä laskettu maan- ja joenpohjan korkeusmalli rinnevarjostettuna.



**Kuva 7.** Ylhäällä kuvakaappaus Valkeajoen ortoilmakuvasta, keskellä jokuoman 3D-pistepilvi korkeuden mukaan väritettynä, ja alhaalla maanpinta/joenpohjapisteistä muodostettu korkeusmalli rinnevarjosteena.

---

## 5. YHTEENVETO

Paikannusratkaisuun liittyvästä epävarmuudesta huolimatta kahden aallonpituuden laserkeilauksella saatiin nopeasti kerättyä tiheä 3D-pistepilvi, joka kuvaa koko jokiuoman saumattomasti. Korkeusvertailussa joen pohjan määrittystarkkuus oli noin 20 cm (RSME).

Kahden aallonpituuden laserkeilaus on parhaimmillaan Valkeajoen kaltaisissa matalissa ja kirkkaissa vesissä, missä muilla menetelmillä, kuten veneestä tehtävällä kaikuluotauksella ja matalaa lentokorkeutta vaativassa maatutkauksessa, on haasteita.

## 6. KIITOKSET

Tutkimus kuuluu Uudet teknologiat uomien ja kaisvosaltaiden kartoitukseen (UOMARI) -

tutkimushankkeeseen, joka on saanut rahoitusta Euroopan unionin aluekehitysrahastosta (EAKR), rahoittajana Pohjois-Suomen elinvoimakeskus (Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus).



**Euroopan unionin  
osarahoittama**

## VIITTEET

- [1] Kousa, J., Hakala, T., Kukko, A., and Kaartinen, H.: Performance Evaluation of Drone Operated Dual Waveform Bathymetric LiDAR, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., X-2/W2-2025, 101–108, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-2-W2-2025-101-2025>, 2025.

# Droonipohjainen batymetria Otanmäen lintuvesialtaan pohjamuodon arvioinnissa

Petri Valasti<sup>1</sup>, Kaisa Turunen<sup>1</sup>, Hannu Panttila<sup>1</sup>, Veijo Sutinen<sup>2</sup>, Pasi Karjalainen<sup>2</sup>, Roope Koponen<sup>2</sup>, Harri Kaartinen<sup>3</sup> ja Matias Mäki-Leppilampi<sup>3</sup>  
Geologian tutkimuskeskus<sup>1</sup>  
Oulun yliopisto, Mittaustekniikan yksikkö<sup>2</sup>  
Maanmittauslaitos, Paikkatietokeskus FGI<sup>3</sup>

## Tiivistelmä

Tutkimuksessa kartoitettiin Otanmäen lintuvesialtaan pohjamuotoja droonipohjaisilla mittausmenetelmillä ja perinteisillä geofysikaalisilla tekniikoilla. Päämenetelminä olivat kahden aallonpituuden batymetrinen laserkeilain sekä maatumkadroni, joiden tuloksia verrattiin perinteisellä maatumkalla, GEM2-johtavuusmittauksilla ja sedimenttikairauksilla saatuihin tuloksiin. Laserkeilain havaitsi luotettavasti turpeen muodostaman pehmeän pintakerroksen, mutta ei aina yltänyt syvemmälle mineraalimaahan. Sen sijaan maatumka – sekä droonista että moottorikelkalla vedettynä – pystyi näkemään sekä turvekerroksen että kovemman pohjan 2–4,5 metrin syvyyteen. Sedimenttikairaukset vahvistivat näiden kahden eri kerroksen olemassaolon: turpeen paksuus vaihteli 0–6 m ja alla oleva kova pohja oli hiesua tai hietaa. GEM2-mittaukset tukivat kairaustuloksia, osoittaen veden ja sedimentin alhaisen johtavuuden (~2 mS/m). Lämpökamerakuvaukset auttoivat patorakenteiden mahdollisten vuotoalueiden erottamisessa talviolosuhteissa. Kokonaisuutena menetelmien yhdistäminen mahdollisti altaan pohjan rakenteen tarkan ja monipuolisen mallinnuksen.

## 1. JOHDANTO

Vesialueiden pohjamuodon tarkka tunteminen on keskeistä niiden ekologisen tilan arvioinnissa, hoidon suunnittelussa ja pitkäaikaisessa seurannassa. Tätä tarkoitusta varten hyödynnetään batymetriaa, eli vesialueiden syvyyden mittaamista ja pohjotopografian kartoittamista. Batymetria tuottaa tietoa muun muassa altaan tilavuudesta, syvyysvaihteluista sekä sedimentaation vaikutuksista – eli siitä, miten allas on ajan kuluessa mataloitunut ja kerrostunut.

Perinteisesti batymetrisia mittauksia on toteutettu kaikuluotaimilla veneestä käsin, mutta matalissa, kasvillisuuden täyttämässä tai vaikeakulkuisissa kohteissa nämä menetelmät voivat olla rajoittuneita. Viime vuosina droonipohjaiset mittausmenetelmät ovat kehittyneet merkittävästi ja mahdollistavat aiempaa tarkemman ja joustavamman vesistöjen kartoituksen. Droonien etuna on niiden kyky liikkua matalilla vesialueilla ja suorittaa mittauksia myös sellaisissa kohdissa, joihin veneellä pääsy on hankalaa.



**Kuva 1.** Otanmäen ja muiden UOMARI-hankkeen tutkimuskohteiden sijainti kartalla.

Tässä tutkimuksessa keskitytään Kajaanissa sijaitsevan Otanmäen lintuvesialtaan pohjanmuodon kartoittamiseen käyttämällä useita toisiaan täydentäviä mittausmenetelmiä. Pääasiallisena lähestymistapana hyödynnettiin droonikäyttöön mukautettuja kahden aallonpituuden laserkeilainta sekä maatumkaa (GPR), joiden avulla voidaan havainnoida sekä vedenpinnan alaista topografiaa että sedimenttikerrosten rakennetta. Näitä mittauksia täydennettiin perinteisellä maatumkalla ja GEM2-elektromagneettisella mittalaitteella, joiden avulla saatiin pohjan sähköisistä ominaisuuksista ja kerrosrakenteista yksityiskohtaista vertailutietoa. Lisäksi suoritettiin kairauksia, joiden avulla varmistettiin geofysikaalisten menetelmien tulkintaa ja saatiin suoria havaintoja sedimentin koostumuksesta.

Menetelmien yhdistäminen mahdollistaa lintuvesialtaan pohjan luotettavan ja yksityiskohtaisen mallintamisen. Saatua tietoa voidaan hyödyntää altaan tilan arvioinnissa sekä tulevien hoito- ja kunnostustoimenpiteiden suunnittelussa.

## 2. TUTKIMUSKOHDE

Tutkimuskohteena oli Otanmäen lintuvesiallas (kuva 2 ja 3). Allasta on alun perin käytetty Kajaanin Otanmäessä sijaitsevan entisen rauta-, vana-diini- ja ilmeniittikaivoksen laskeutusaltaana. Altaan tarkoituksena oli puhdistaa kaivosalueelta tulevia vesiä kiintoaineesta (rikastushiekasta ja metallipartikkeleista) ennen veden johtamista edelleen ympäristöön.

Allas on vuosikymmenten aikana kehittynyt merkittäväksi noin 150 ha kokoiseksi lintukosteikkoalueeksi. Rehevöitymisen myötä altaasta tuli lintuja houkutteleva ympäristö ja alueelta on havaittu yli 200 lintulajia, mikä tekee siitä yhden Kainuun monipuolisimmista lintukohteista. Alueella sijaitsee useita lintutorneja sekä valokuvauskoju ja metsästys on kielletty, vaikka virallista suojelustatusta ei ole. Viime vuosina umpeenkasvu on vähentänyt erityisesti kahlaajalajien esiintymistä, mutta lintuvesiallas on edelleen yksi Pohjois-Suomen tärkeimmistä muutto- ja pesimäympäristöistä [1].



**Kuva 2.** Lintuvesiallas sijaitsee rikastushiekka-altaan pohjoispuolella.



**Kuva 3.** Lintuvesiallas Otanmäessä.

### 3. TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimuksessa tutkittiin Lintuvesialtaan pohjanmuotoa käyttämällä kahden aallonpituuden laserkeilainta ja maatulkaa (GPR), jotka on mukautettu droonien käyttöön. Lisäksi vertailumittaukseen käytettiin perinteistä maatulkaa ja GEM2-mittalaitetta sekä lisäksi tehtiin kairausmittauksia.

#### 3.1. KAHDEN AALLONPITUUDEN LASERKEILAIN

Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskus FGI:n droonilla operoitava Fraunhofer IPM:n (Saksa) valmistama ABS-laserkeilain (Airborne Bathymetric Scanner, Kuva 4) käyttää kohteiden mittaukseen samanaikaisesti 510 nm ja 1030 nm aallonpituuksia, joissa lyhyempi aallonpituus (vihreä) läpäisee veden ja pidempi (infrapuna) heijastuu

veden pinnasta. Vesialueen lisäksi ympäröivistä alueista, kuten rantojen kasvillisuudesta, maanpinnasta ja rakenteista, saadaan havainnot molemmilla aallonpituuksilla. Useamman aallonpituuden havaintoja voidaan hyödyntää tarkempaan kohteen tunnistamiseen, kuten puulajien määrittämiseen. Optimiolosuhteissa ABS:llä on mahdollista saada havaintoja veden alta 1,75 kertaa näkösyvyyttä syvemmältä, yleensä kuitenkin vähintään näkösyvyyden verran [2].

Laserkeilain lähettää lyhyen laserpulssein ja määrittää etäisyyden kohteeseen pulssin lentoajan perusteella. Kun yhdistetään havaittu etäisyys ja pulssin lentosuunta keilaimeen yhdistetyn paikannusjärjestelmän antamaan paikka- ja asentotietoon, voidaan laskea laserpulssein osumakohdan eli mittauskohteen 3D-koordinaatit. Keilain pystyy havaitsemaan yhden laserpulssein lentomatkan varrelta useita paluukaikuja. Jos esimerkiksi osa säteestä osuu puunoksaan ja osa jatkaa matkaa maahan, saadaan yksi 3D-piste oksasta ja toinen maanpinnasta.



**Kuva 4.** Kahden aallonpituuden laserkeilaindrooni.

#### 3.2. MAATUTKADROONI

Mittaustekniikan yksikön GPR-drooni koostuu miehittämättömästä ilma-aluksesta, maatulkaajärjestelmästä sekä turvavarusteesta (kuva 5).



**Kuva 5.** GPR-drooni lintuvesialtaalla keväällä 2025.

### *Miehittämätön ilma-alue – drone, drooni*

GPR-droonimittausjärjestelmä sisältää DJI Matrice 350 RTK -droonin, jossa on RTK (Real Time Kinetic) -tarkkuuspaikannus sekä laaja käyttölämpötila-alue (-20 ... 50 °C) ja IP55 suojaus. Ominaisuudet mahdollistavat toistettavat lentoreitit ja tarkat paikkatiedot mittausdatalle erilaisissa sääolosuhteissa.

### *Maatutka – GPR (Ground Penetrating Radar)*

Maatutka on 1950-luvulla maantutkimiseen kehitetty mittalaite, jonka toiminta perustuu radiotaajuisten (MHz - GHz) sähkömagneettisten aaltojen lähettämiseen maaperään ja takaisin heijastuneiden signaalien vastaanottamiseen. Heijastuneiden signaalien kulkuajasta voidaan määrittää etäisyys ja voimakkuudesta (amplitudi) eri kerrosten ominaisuuksia, mikäli näiden eri kerrosten aallon etenemisnopeus tunnetaan.

MITY:n maatutkajärjestelmä koostuu Radar Systems Zond Aero LF -maatutkasta, SkyHub-tiedonkeruuyksiköstä ja Terrain Follow -pinnan seuranta-järjestelmästä. Maatutkassa on vaihdettavat antennit, joiden avulla mittausaajuus voidaan valita 100, 150 tai 300 MHz:n väliltä. Tiedonkeruuyksikkö tallentaa mittausdatan reaaliaikaisella näytteistykseällä hyödyntäen hardware stacking -ominaisuutta. Järjestelmään kuuluu lisäksi pinnan seuranta-järjestelmä, jonka avulla drooni säilyttää asetetun etäisyyden maanpintaan automaattilennon aikana.

### *Lentotoiminta*

GPR-droonin lentotoimintaa ohjaa Traficom määrittelemät avoimen kategorian A3 -lentosäännöt sekä erilliset määräykset maatutkan käytöstä miehittämättömässä ilma-aluksessa. Kun droonien liitetään maatutka, sen käyttö edellyttää Traficom myöntämää lupaa.

MITY:lle myönnetty lupa mahdollistaa maatutkalennot yhden metrin etäisyydellä maanpinnasta valituilla testikohteilla avoimessa kategoriassa A3. Matalalla lentämistä tukevat lento-ohjelmiston autopilotti- sekä pinnan seurantaominaisuus, jotka mahdollistava autonomiset lennot asetetulla etäisyydestä maanpinnasta. Lennon aikana etäisyys

maanpintaa mitataan järjestelmään kuuluvan etäisyystutkan avulla. Vikaantumisen varalle droonissa on automaattisesti toimiva pelastusliivi, joka estää droonin vajoamisen pohjaa teknisessä vikatilanteessa.

### 3.3. LASERKEILAUSDROONI

Laserkeilain on mittalaite, joka tuottaa tarkkaa kolmiulotteista mittaustietoa kohteesta. Sen toimintaperiaate perustuu lasersäteiden lähettämiseen ja kohteesta heijastuneiden signaalien vastaanottamiseen. Heijastuneiden signaalien kulkuajasta ja intensiteetistä voidaan määrittää kohteen etäisyydet ja muodot. Näistä mitatuista pisteistä muodostetaan 3D-pistepilvi, josta voidaan edelleen tuottaa maastopintamalleja eli DEM-karttoja (Digital Elevation Model).

MITY:n droonimittausjärjestelmä koostuu DJI Matrice 350 RTK -droonista ja DJI Zenmuse L2 -laserkeilaimesta. Data-aineisto prosessoidaan maastopintamalleiksi DJI Terra -ohjelmistolla.

### 3.4. LÄMPÖKAMERADROONI

Lämpökamera on laite, joka havaitsee kohteiden infrapunasäteilyn ja muuntaa sen lämpökuvaksi, jossa värit kuvaavat lämpötiloja. Kaikki esineet säteilevät lämpöä absoluuttisen nolapisteen yläpuolella. Kamera koostuu ilmaisimesta, optisesta järjestelmästä ja ohjelmistosta, jotka yhdessä tuottavat visuaalisen lämpökuvan lämpötilaerojen analysointiin.

MITY:n lämpökameradroonimittausjärjestelmä koostuu DJI Matrice 350 RTK -droonista ja DJI Zenmuse H30T -lämpökamerasta. Data-aineisto prosessoidaan lämpö-ortokuviksi DJI Terra -ohjelmistolla.

### 3.5. PERINTEINEN MAATUTKA

Maatutka lähettää ja vastaanottaa nimensä mukaisesti sähkömagneettisia aaltoja. Samassa yksikössä on sekä lähetin- että vastaanotinantennit. Lähettimen lähettämät aallot heijastuvat takaisin rajapinnoilta, joissa dielektrisyys muuttuu. Tyypillinen maatutkan käyttökohde on määrittää tällaisten rajapintojen syvyyksiä ja kulkua [3].

Mitä suurempi dielektrisyys on rajapinnan ylitse, sitä suurempi heijastus siltä saadaan. Esi-  
merkkejä dielektrisyysrajapinnoista

ovat pohjamaan ja kallion välinen rajapinta, vesistöjen ja niiden pohjan välinen rajapinta, ruhjeiden ja rakojen muodostamat rajapinnat ehjän kallion kanssa, turpeen ja suonpohjan välinen rajapinta sekä yksittäisten kappaleiden kuten säiliöiden, putkien, suurempien kivien ja johtojen muodostamat rajapinnat ympäröivän materiaalin suhteen [4].

Maatutkat eroavat toisistaan lähettimen taajuuden suhteen. Tyypillisesti yhdellä maatutkalla on yksi lähetintaajuus, mutta on olemassa myös kahdella taajuudella samanaikaisesti toimivia tutkia sekä kokonaisen taajuuskaistan hyppien lävitse käyviä tutkia [5]. Lähetintaajuudet vaihtelevat laajasti, matalimmat taajuudet ovat muutamista kymmenistä megahertseistä aina gigahertsiin (1000 MHz) asti. Kenties tyypillisimmät maatutkataajuudet ovat 100, 150, 200, 250 ja 300 MHz.

Samassa materiaalissa matalimmilla taajuuksilla tutka saavuttaa suuremman syvyysulottuvuuden kuin korkeammilla taajuuksilla, mikäli johtavuus ei vaimenna signaalia siten, että vastetta ei saada takaisin. Johtavissa ympäristöissä kuten savikoilla maatutka ei toimi, koska signaali vaimenee liian paljon matkalla heijastavalle rajapinnalle ja takaisin [6].

Otanmässä käytettiin GSSI:n maatutkia 100, 200 ja 300/800 (ns. dual frequency -maatutka) MHz:n taajuuksilla (kuva 5).



**Kuva 6.** Perinteinen maatutka moottorikelkan perässä olevassa ahkiassa, johon on liitetty myös RTK-GPS-vastaanotin.

### 3.6. GEM-2 JA GEM-2H

GEM-2 ja GEM-2H ovat taajuustason elektromagneettisia mittauslaitteita, jolla voidaan mitata maa-

ja kallioperän sähköjohtavuutta. Maatutkan tavoin laite koostuu lähettimestä ja vastaanottimesta, mutta lähetetyt taajuudet ovat kHz-alueella MHz:n sijaan. Elektromagneettisten mittalaitteiden lähettämät aallot eivät etene aineessa maatutkasignaalien tavoin selkeinä aaltorintamina vaan pikemminkin kuin lämpö kattilan reunaa pitkin epämääräisenä vyöhykkeenä muodostaen pieniä virtoja, ns. pyörrevirtoja, sähköisesti johtaviin kohtiin.

Pyörrevirrat aiheutuvat lähettimen lähettämästä sinimuotoisesta signaalista, ns. primäärikentästä, joka muuttuu koko ajan. Pyörrevirrat ovat sitä suurempia, mitä johtavampaa materiaali on. Mittaamalla näiden pyörrevirtojen aiheuttamaa magneettikenttää, ns. sekundäärikenttää, saadaan selville materiaalin johtavuus [7].

Maatutkan tavoin samassa materiaalissa matalimmat taajuudet saavuttavat suuremman syvyysulottuvuuden kuin korkeammat. Lisäksi syvyysulottuvuuteen vaikuttaa lähettimen ja vastaanotin kelojen välimatka, suuremman välimatkan antaessa periaatteessa suuremman syvyysulottuvuuden [8].



**Kuva 7.** GEM-2H-mittalaite liitettynä moottorikelkaan. Lähetin ja vastaanotin ovat kiinteästi 2.5 metrin päässä toisistaan laitteen vastakkaisissa päissä.

Otanmäessä käytettiin GEM-2:ssa lähetintaa-juuksia 1475, 5825, 22225 ja 75525 Hz. Lisäksi koetettiin uudempaa GEM-2H-laitetta (kuva 7), jossa on suurempi kelaväli (2,5 m) kuin vanhemmassa GEM-2:ssa (1,66 m) ja siten periaatteessa hieman suurempi syvyyssulottavuus. GEM-2H-laitteella taajuudet olivat toisaalta korkeammat, 5025, 10425, 21575, 44825 ja 93075 Hz, mikä alentaa syvyyssulottavuutta, mutta antaa paremman kuvan pinnasta.

### 3.7. SEDIMENTTIKAIRAUS

Laippakairaa eli ns. venäläistä kairaa (kuva 8) käytetään turve- ja järvisedimenttitutkimuksessa, kun halutaan selvittää esimerkiksi järven pohjasedimenttien laatua ja paksuutta tai turpeen maatumisuusastetta. Kairat on valmistettu ruostumattomasta teräksestä näytteiden kontaminaatoriskin minimoimiseksi.

Järvisedimentin näytteenotto suoritetaan talvella jäältä käsin. Jäähän tehdään laippakairalle avanto. Avannon läpimitaksi riittää yleensä jääkairan leveys, sen leveydestä riippuen. Kairaus tehdään työntämällä kaira haluttuun syvyyteen sedimentissä/turpeessa ja kääntämällä kairaa, jolloin laipan terä leikkaa sedimentistä näytteen ja sulkee sisäänsä. Lopuksi kaira näytteineen nostetaan ylös. Jos tavoitteena on saada näyte koko sedimentin paksuudelta, kairataan pinnasta pohjaa kohti. Jokaisen näytteen (n. 0,5 m) välillä kaira nostetaan ylös, näyte irrotetaan laipasta ja laippa puhdistetaan ennen seuraavaa näytteenottoa. Kaira laskeaan takaisin alas ja työnnetään seuraavaan syvyyteen. Kairaa pidennetään lisäämällä tarvittava määrä tankoja varteen.



*Kuva 8. Laippakairan eli ns. venäläisen kairan käyttöä Otanmäen lintukosteikolla tammikuussa 2026.*

## 4. MITTAUSTULOKSET

Mittauksia tehtiin lintuvesialtaalla kahden aallonpituuden laserkeilaimella, maatutkadroonilla, perinteisellä maatutkalla ja GEM-2:lla. Seuraavissa kappaleissa käydään lävitse niillä saadut tulokset.

### 4.1. KAHDEN AALLONPITUUDEN LASERKEILAIN

Kahden aallonpituuden laserkeilaimella lennettiin useita linjoja altaan pituus- ja poikkisuuntaan. Keilaus suoritettiin 30 m korkeudesta. Kerätty 3D-pistepilvidata luokiteltiin Terrascan-ohjelmalla pintapisteiksi (vedenpinta ja maa-alueet) ja pohjapisteiksi (keilaimen havaitsema altaan pohja) (kuva 9).



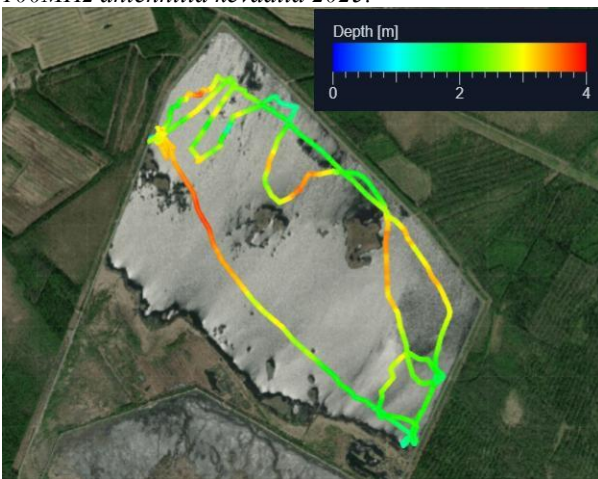
*Kuva 9. Poikkileikkaus yhden laserkeilauslinjan alkupäästä. Kuvassa näkyy altaan kiertävä pengertie ja sen penkereillä olevaa matalaa kasvustoa, ja kuvan oikeassa reunassa vedenpintaa ja sen alla altaan pohjaa.*

## 4.2. MAATUTKADROONI

Maatutkalla varustetulla droonilla suoritettiin mitauslentoja keväällä 2025 käyttäen 100 ja 150 MHz:n taajuuksilla toimivia antennia. Koska etäisyysanturin toiminta oli heikentynyt lumi- ja jääolosuhteiden myötä ei pinnan seurantajärjestelmää voitu käyttää luotettavasti, joutuimme lennot suorittamaan pääosin manuaalisesti (kuvat 10 ja 11). Maatutka vastaanotti signaalia 366 nanosekunnin ajan ja tallensi tämän jakson 1024 näytteen tarkkuudella.



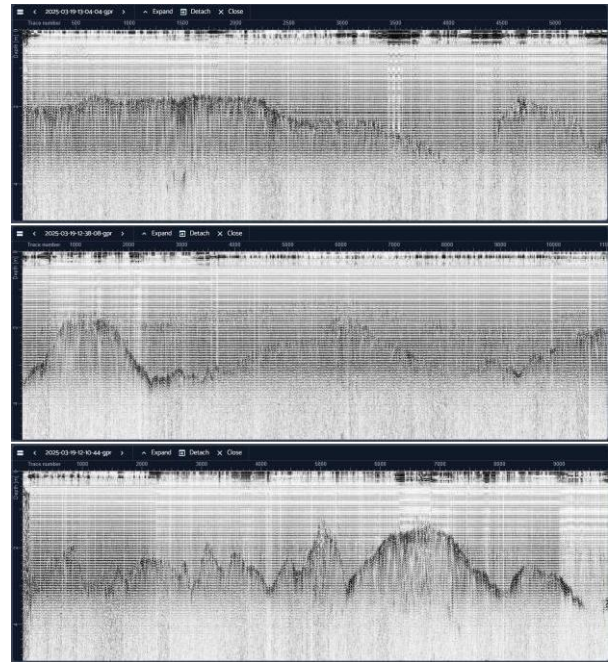
**Kuva 10.** GPR-Droonin suunniteltu reitti ja toteutettu 100MHz antennilla keväällä 2025.



**Kuva 11.** GPR-Droonin toteutuneet reitit 150MHz antennilla keväällä 2025.

Kerätyssä maatutkatatassa esiintyi paljon häiriöitä, jotka vaikeuttivat käsittelyä ja tulkintaa. Siitä huolimatta huolellisella maatutkankäsittelyllä oli mahdollista saada pohjakerros näkyviin. Kuvassa

12 on esitetty muutama esimerkki maatutkadatoista kuvan 11 reiteiltä.



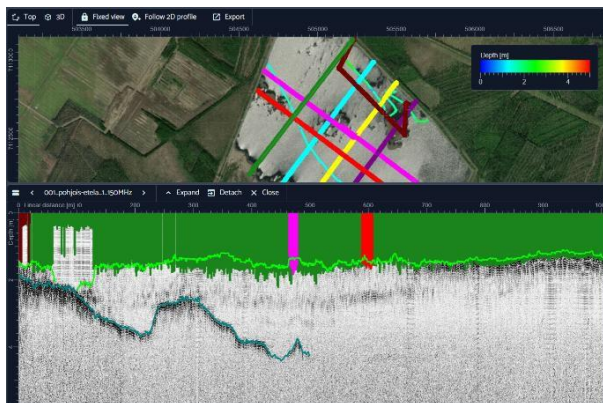
**Kuva 12.** 150 MHz:n antennilla kerätty aineisto saatiin manuaalisesti ohjattujen lentojen aikana.

Tammikuussa 2026 suoritimme uudelleen maatutkamittauksia, jolloin käytimme tutkassa 150 MHz:n antennia ja lennot toteutettiin myös manuaalisesti. Maatutka vastaanotti signaalia 366 nanosekunnin ajan ja tallensi tämän jakson 2048 näytteen tarkkuudella.

Tuloksiin on lisätty myös kahden aallonpituuden laserkeilaimella saadut mittaukset, jotka on esitetty kuvissa erivärisinä palkkeina. Kahdenaallonpituuden laserkeilaimen laserpulssi vaimenee vedessä nopeasti ja pysähtyy pääosin turvekerrokseen tai paikoin jo sen yläpuolelle. Kuvissa vihreällä merkitty rajapinta tulkitaan turvekerroksen yläpinnaksi, kun taas turkoosilla merkitty rajapinta edustaa oletettua kovempaa mineraalipohjaa. Merkittyjen kerrosten välissä on myös havaittavissa oletettu turvelautan pohja, jonka tulkinta on merkitty violetilla värillä. Sedimenttikairaukset on merkitty kuviin sinisenä (vesi) ja oransseina (sedimentti) pylvinä.

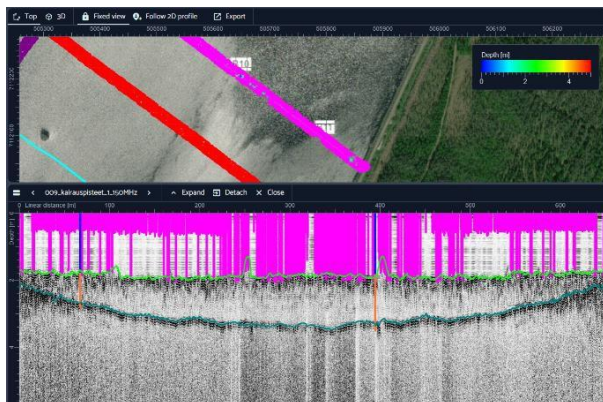
Kuvassa 13 esitetty maatutkadroonin mittausreitti suunniteltiin seuraamaan laserkeilaimen mittauslinjaa (tummanvihreä), jotta aineistoja voidaan vertailla keskenään. Mittausreitti lennettiin maatutkadroonilla koillisesta lounaaseen. Aloituspisteestä noin 400 metrin päässä pohja häviää näkyvistä

koillisnurkassa allasta noin 4,3 metrin syvyydessä. Mittauslinjan kokonaismatka oli noin 900 metriä.



**Kuva 13.** Maatutkadroonin data-aineisto tummanvihreän laserkeilaimen reitiltä.

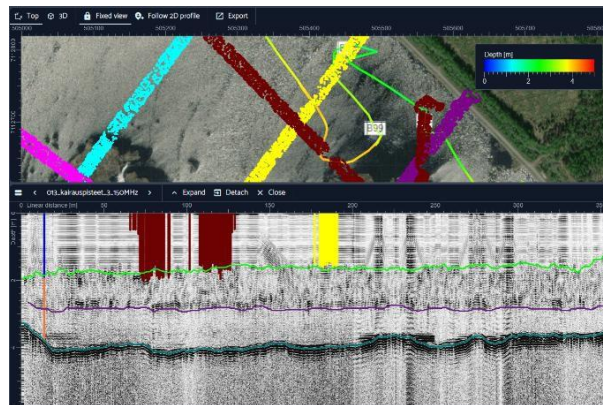
Kuvassa 14 maatutkadroonin mittausreitti sijoittuu myös laserkeilaimen mittauslinjalle, jolta otettiin lisäksi sedimenttikairaukset kahdesta kohdasta. Kairausnäytteet osoittivat sedimenttikerroksen sijaitsevan noin 1,8 metrin syvyydessä, mikä vastaa sekä maatutkan että laserkeilaimen havaitsemaa rajapintaa. Reitin kokonaispituus on noin 650 metriä ja pohjakerroksen syvin alue on edestakaisen lennon puolivälissä ja on syvyydeltään noin 3,4 metriä.



**Kuva 14.** Maatutkadroonin data-aineisto pinkin laserkeilaimen ja kahden kairauksen reitiltä.

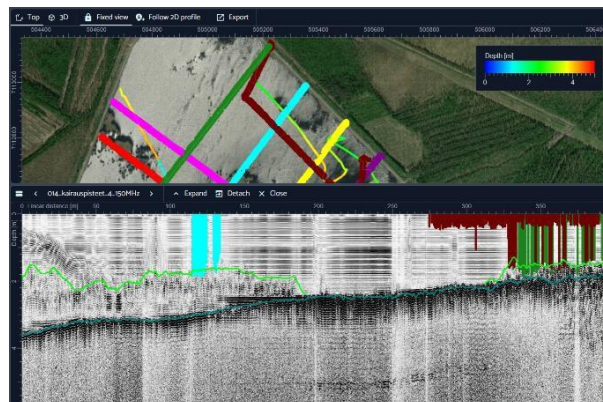
Kuvassa 15 maatutkadroonin mittausreitti risteää ruskealla ja keltaisella merkityt laserkeilaimen mittauslinjat, joiden mittaukset ulottuvat noin 1,8 metrin syvyyteen. Samalla tasolla maatutka havaitsee sedimenttikerroksen. Mittausreitillä tehty sedimenttikairaus osoitti sedimenttikerroksen alkavan noin 1,95 metrin syvyydessä, mikä vastaa hyvin maatutkadatan tulkintaa. Kairauksen kohdalla

havaittiin lisäksi kovempi pohjakerros noin 3,8 metrin syvyydessä, mikä näkyy myös maatutkadatan rajapinnassa. Mittauslinjan pituus on noin 350 metriä. Linja alkaa kairauskohdalla, kulkee etelään ja kaartuu mutkan jälkeen pohjoiseen. Syvyys mittauslinjalla on melko tasainen ja syvimmillään noin 4,1 metriä.



**Kuva 15.** Maatutkadroonin data-aineisto, jossa näkyvissä kolme rajapintaa.

Kuvassa 16 esitetty maatutkadatan jatkaa mittauslinjaa siitä, mihin edellä kuvattu maatutkamittaus päättyi. Mittausreitti risteää ensin sinisen laserkeilauslinjan ja myöhemmin ruskeat sekä vihreät keilauslinjat. Mittausreitillä puolivälissä sedimenttikerros katoaa ja aineistossa on havaittavissa ainoastaan kovempi pohjakerros noin 2,5 metrin syvyydessä. Rantaa lähestyttäessä, ruskean ja vihreän keilauslinjan risteyskohdan läheisyydessä, alkaa jälleen uusi sedimenttikerrostuma kovemman pohjakerroksen yläpuolella. Laserkeilaus näyttää pääosin ulottuvan tähän sedimenttikerrokseen, joka sijaitsee noin 1,6 metrin syvyydessä. Mittauslinjan pituus on noin 400 metriä.



**Kuva 16.** Maatutkadroonilla kerätty data-aineisto, jossa on havaittavissa myös sedimentitön alue.

### 4.3. LASERKEILAUS JA LÄMPÖKAMERA-KUVAUS

Laserkeilaus toteutettiin syksyllä 2024 (kuva 17) ja kerätystä laserkeilausaineistosta tuotettiin digitaalinen korkeusmalli (DEM). Lentojen vähäisen päällekkäisyyden vuoksi prosessointi ei mahdollistanut korkeusmallien tuottamista kaikista lennoista. Kuvassa 18 on esitetty pistepilvi altaan lounaisnurkasta.



**Kuva 17.** Laserkeilausalueet.



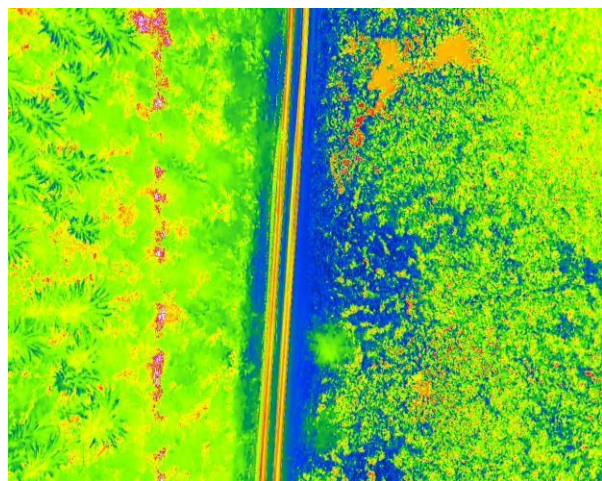
**Kuva 18.** Laserkeilauksesta tuotettu pistepilvimalli.

Lämpökamerakuvaukset toteutettiin talvella 2025 ja kerätystä lämpökamera aineistosta tuotettiin lämpökartta (kuva 19). Lämpökameralla kartoitettiin altaan padot keskittyen altaan ulkopuolelle etsien mahdollisia vuotoja. Lentoajankohta oli täydellinen, sillä lämpötilaerojen avulla oli erotettavissa lampi, ojat ja muut vesistöt punaisella ja oranssilla hohtaen, kun taas muu maasto ja

kasvillisuus kylmän sinisen ja vihreän värein. Myös padolla kuljettu reitti jätti havaittavia lämpötilavasteita autonrenkaista ja jalanjäljistä, kuten kuvassa 20 esitetään. Mahdollisia vuotoja ei kuitenkaan voida varmuudella osoittaa, sillä padon molemmilla puolilla esiintyy luonnostaan ojia ja lätäköitä, jotka vaikuttavat havaintoihin. Kuvassa 20 on esitetty lämpökamerakuva samalta alueelta kuin kuvassa 18.



**Kuva 19.** Lämpökamerakuvausalueet lintuvesialtaan padoilta.

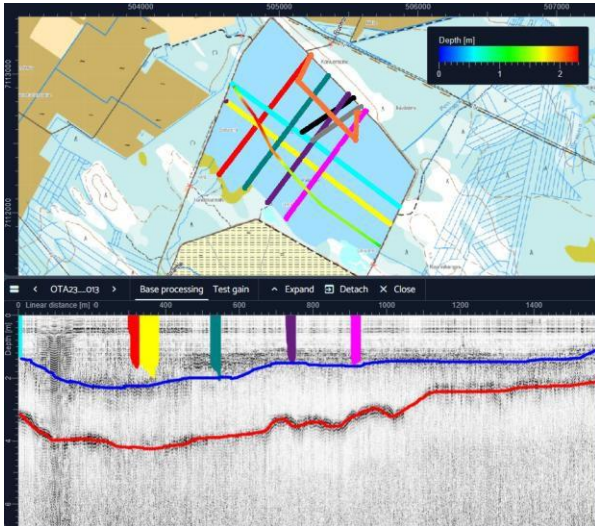


**Kuva 20.** Lämpökamerakuva lintuvesialtaan padon lounaspäädystä. Kuvassa 18 punaisella neliöllä merkitty alue.

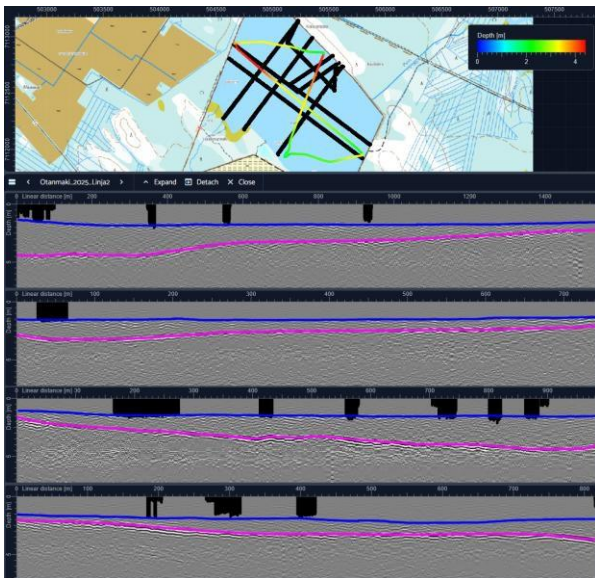
### 4.4. PERINTEISEN MAATUTKAN TULOKSET

Lintuvesiallas maatulattiin 100 MHz:n antennilla moottorikelkalla joulukuussa 2023 ja uudestaan 100 MHz:n antennilla maaliskuussa 2025.

Molemmilla kerroilla allas oli jääpeitteessä. Databassa, kuvat 21 ja 22, näkyy selvästi kaksi kerrosta, joista ylempi yhtyy kahden aallonpituuden laserkeilaimen antamiin tuloksiin (pystysuorat pylväät). Tämä rajapinta tulkittiin turpeen yläpinnaksi. Alempi rajapinta edustaa kovempaa pohjaa.



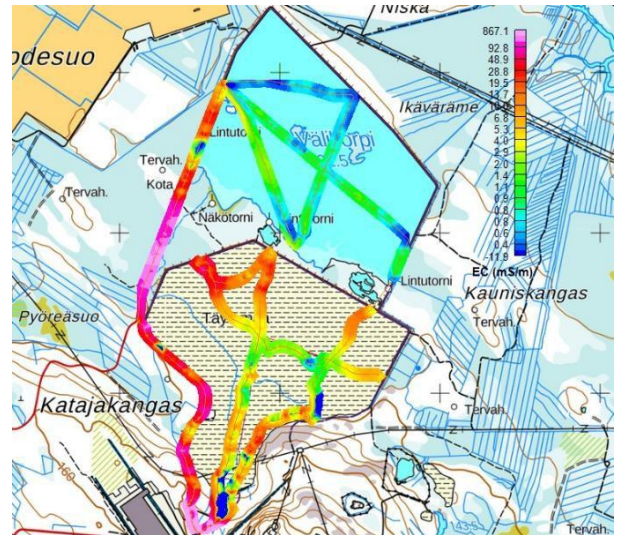
**Kuva 21.** Moottorikelkalla vedetty 100 MHz:n sektio lintualtaalla (2023, syvyyssväritys ylemmän ("pehmeä pohja") rajapinnan mukaan). Värilliset pystypylväät ovat kahden aallonpituuden laserkeilaimen antamia tuloksia.



**Kuva 22.** Moottorikelkalla vedetty 100 MHz:n sektio lintualtaalla (2025 syvyyssväritys alemman ("kova pohja") rajapinnan mukaan). Mustat pystypylväät ovat kahden aallonpituuden laserkeilaimen antamia tuloksia.

#### 4.5. GEM2 TULOKSET

GEM-2 mittaukset tehtiin maaliskuussa 2025 kairoalueella. Tulokset lintualtaalla (Kuva 23) ovat linjassa sen suhteen, että siellä saatiin vain pieniä johtavuusarvoja verrattuna muuhun alueeseen. Lisäksi tulokset ovat linjassa sedimenttikairauksista saatujen veden johtavuustulosten kanssa, kts. Taukukko 1, molempien antaessa  $\sim 2$  mS/m arvoja.



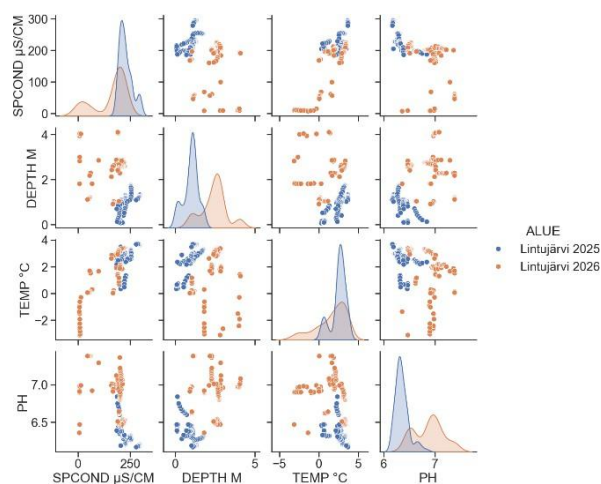
**Kuva 23.** GEM-2 mittauksen tulokset Lintualtaalla on pienet johtavuusarvot verrattuna muihin alueisiin.

#### 4.6. SEDIMENTTIKAIKAUSTEN TULOKSET

Maatutkakuvissa näkyy kaksi ominaisuudeltaan erilaista kerrosta eri syvyyksillä, kun taas kahden aallonpituuden lidarkuvissa näkyy vain ylemmän kerroksen yläpinta. Kairokselta ja vanhoista ilmakuvista satujen tietojen perusteella laskeutusallas on perustettu suoraan vanhan suon päälle ja siten pohja olisi todennäköisesti pääosin turvetta. Tämän vuoksi päätettiin tammikuussa 2026 selvittää kairoamalla onko maatutkassa näkyvät kerrokset todellisia, vaiko heijastuksia toisesta kerroksesta. Lintukosteikon pohjasedimenttien paksuutta ja materiaalia kairattiin ns. venäläisellä laippakairalla jäältä käsin. Kairaukset oli tarkoitus toteuttaa pisteissä, joista olisi tehty sekä maatutka-, että lidar-tutkimukset. Jostain syystä monikanavaisen käsi-GPS:n antamat koordinaatit kuitenkin heittivät toista sataa metriä varsinaisista pisteistä. Tästä johtuen tuloksia ei voi suoraan verrata mittaustuloksiin, vaan ne ovat suuntaa antavia selittämään maatutkakuvassa näkynyttä "tuplapohjaa". Samalla

mitattiin jään paksuus (40 cm), veden syvyys (1,3–2,55 m) sekä veden kemikaalisfysikaalisia ominaisuuksia (mm. pH, sähkönjohtavuus). Veden pH vaihteli 6,3 ja 7,2 välillä ja sähkönjohtavuus 190–220  $\mu\text{S}/\text{cm}$  välillä. Sedimentinäytteistä mitattiin sähkönjohtavuus (63–125  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Suurimmassa osassa pisteistä pohjasedimentit olivat pääosin turvetta, paksuuden vaihdellessa 0 ja 6 metrin välillä. Melkein joka pisteessä kairaus päättyi kovaan pohjaan, joka määriteltiin paikan päällä hiesuksi tai hiedaksi. Osassa pisteistä ei kova pohjaa tavoitettuja. Osasta pisteistä turve puuttui kokonaan ja kaira osui suoraan kovaan mineraalimaahan. Sama ilmiö näkyy osassa maatutkakuista, joissa ylempi pohja katkeaa.



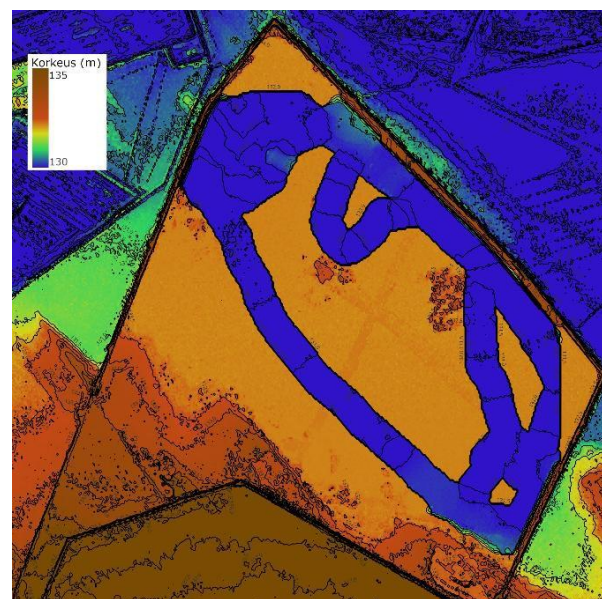
**Kuva 24.** Sedimenttikairausten mittaustulokset vuosilta 2025 ja 2026.

**Taulukko 1.** Sedimenttikairausten mittaustulosten tilastollinen yhteenveto, sisältää molemmat vuodet 2025 ja 2026.

	SPCOND [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]	DEPTH [m]	TEMP [ $^{\circ}\text{C}$ ]	PH
<b>Count</b>	193	193	193	193
<b>Mean</b>	194,69	1,89	2,11	6,6
<b>Std</b>	67,18	1,79	1,51	0,33
<b>Min</b>	7,1	0,07	-3,13	6,17
<b>25%</b>	194,4	1,01	1,51	6,32
<b>50%</b>	206,4	1,32	2,61	6,48
<b>75%</b>	224,2	2,59	3,16	6,9
<b>Max</b>	295,7	13,32	3,69	7,38

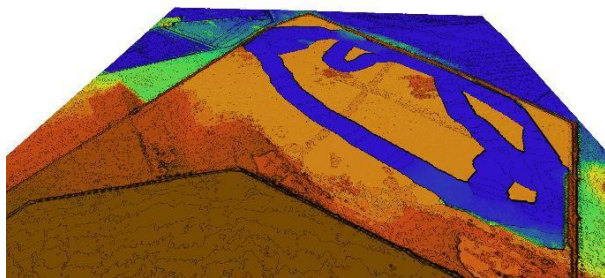
#### 4.7. TULOSTEN VISUALISOINTI

GPR-data kertoo pohjan syvyyden pisteissä lento-reitin alapuolelta. Tämä laajennettiin peittämään suuremman osan allasta ottamalla keskiarvo lähialueen pisteiden arvoista. Altaan reunoilta oli luotu dronin avulla erillinen laserkeilausmittaus, joka yhdistettiin Maanmittauslaitoksen harvempaan pistepilvidataan, jotta saataisiin laajempi visualisoitava alue. Mittausten korkeudet kalibroitiin vastaamaan toisiaan vertaamalla altaan vieressä kulkevan tien korkeuksia, jonka jälkeen dronin luoman korkeuskartan aukot täytettiin maanmittauslaitoksen pistepilviaineiston avulla luodulla korkeusdatalla. GPR-aineiston korkeusdata vähennettiin pistepilviaineiston avulla luodusta korkeuskartasta, jolloin saatiin altaan pohjan muoto näkyville lähialueen maanmuotoihin suhteutettuna. Altaan reunojen lähellä olevien alueiden arvot interpoloitiin rannan ja vedenpohjan väliseksi arvoiksi ja kuvaan lisättiin automaattisesti luodut korkeuskäyrät. Prosessointi tehtiin QGIS-ohjelmistolla.



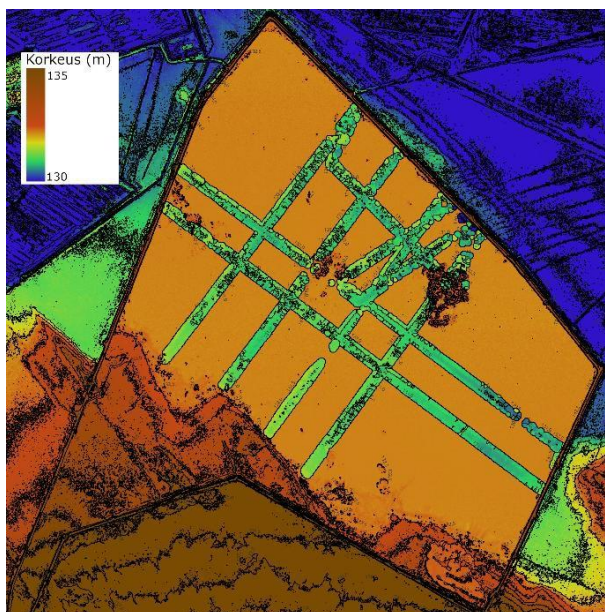
**Kuva 25.** GPR:n avulla luotu syvyyskartta yhdistettynä laserkeilausaineistoon. Vedenpinnan korkeus on noin 132 m.

Alueen pinnanmuodoista oli myös mahdollista luoda kolmiulotteinen näkymä. Korkeuserot ovat kuitenkin heikosti näkyvissä suuren alueen ja pienten korkeuserojen vuoksi.

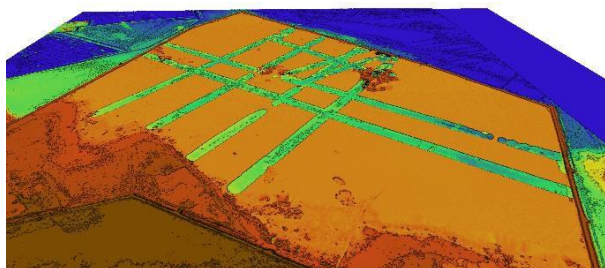


**Kuva 26.** 3D-näkymä alueesta.

Myös kahden aallonpituuden laserkeilaimen syvyysdatasta tehtiin samanlaiset kuvat samalla tekniikalla. Data oli pistepilvimuodossa, josta rajattiin käyttöön vedenpinnan alapuolella olevat pisteet pohjanmuotojen saamiseksi. Altaan reunojen osalta avoin data osui hyvin yhteen kahden aallonpituuden laserkeilaimen datan kanssa, joten korkeussäätöä ei tarvittu. Myös interpolointi oli tarpeetonta, koska laserkeilain näkee pohjan muodot reunoihin asti.



**Kuva 27.** Kahden aallonpituuden laserkeilaimen avulla luotu syvyyskartta yhdistettynä avoimeen laserkeilausaineistoon.



**Kuva 28.** 3D-näkymä laserkeilaimen syvyysdatasta.

Mainittu pistepilviaineisto on Maanmittauslaitoksen avointa laserkeilausaineistoa ajalta 06/2021, ladattu käyttöön 12/2025.

## 5. TULOSTEN JA MITTAUSMENETELMIEN VERTAILUT

Lintuvesialtaalla tehtiin maatutkausta moottorikelkalla vetäen ja dronilla lentäen, taajuusalueen EM-mittauksia GEM-2:lla, kahden aallonpituuden laserkeilaimella dronista sekä sedimenttikairauksia.

Sekä 100 MHz:n perinteiset maatutkaukset (2023 ja 2025) että dronilla tehdyt 100 ja 150 MHz:n maatutkaukset näkivät lintujärven pohjaan asti (2,0–4,5 m), kts. esimerkiksi kuvat 14 ja 21. Lisäksi molemmilla maatutkamenetelmillä erottautui myös matalampi kerros (1,5–2,5 m), josta kahden aallonpituuden laserkeilaimen heijastukset tulivat. Tämä rajapinta osoittautui sedimenttikairauksissa pehmeäksi turpeen muodostamaksi pinnaksi. Joissain kohdin, missä kahden aallonpituuden laserkeilaimella saatiin pohjahavainnoja tavallista harvemmin, osa vesipatsaasta tulleista havainnoista luokitui virheellisesti pohjapisteiksi, vaikka visuaalisesti tarkasteluna todellisesta pohjasta oli havainnoja. Tämä korostaa oikeiden luokitteluparametrien valintaa oikean tuloksen saamiseksi.

Moottorikelkalla tehdyt EM-mittausten tulokset yhtyvät hyvin sedimenttikairauksista saatuihin johdavuustuloksiin, molemmat antoivat luokkaa ~2 mS/m olevia tuloksia.

## 6. YHTEENVETO

Sekä perinteinen että maatutkadroni soveltuivat hyvin lintuvesialtaan pohjanmuotojen selvittämiseen, niillä näkyi sekä turpeen muodostama matalampi pehmeä pohja että altaan syvämpi kovempi pohja. Kahden aallonpituuden laserkeilain näki käytännössä vain turpeen muodostaman pehmeän pohjan, josta suurin osa heijastuksista tapahtui. Maatutkadronin vahvuus tulee esille sen käytön riippumattomuudesta vuodenaajoista, moottorikelkalla tehdyt mittaukset onnistuvat vain jääpeitteisenä aikana.

Lämpökameralla kartoitettiin altaan padot keskittyen altaan ulkopuolelle etsien mahdollisia vuotoja. Lentoajankohta oli täydellinen, sillä

lämpötilaerojen avulla oli erotettavissa lampi, ojat ja muut lammikot punaisella ja oranssilla hohtaen, kun taas muu maasto ja kasvillisuus kylmän sinisen ja vihrein värein.

## 7. KIITOKSET

Tutkimus kuuluu Uudet teknologiat uomien ja kaivosaltaiden kartoitukseen (UOMARI) - tutkimushankkeeseen, joka on saanut rahoitusta Euroopan unionin aluekehitysrahastosta (EAKR), rahoittajana Pohjois-Suomen elinvoimakeskus (Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus). Kiitokset myös Otanmäki Mine Oy:lle hyvästä yh-teistyöstä kenttätestausten aikana.



**Euroopan unionin  
osarahoittama**

## VIITTEET

- [1] otanmakikyläyhdistys.fi
- [2] Kousa, J., Hakala, T., Kukko, A., and Kaartinen, H.: Performance Evaluation of Drone Operated Dual Waveform Bathymetric LiDAR, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., X-2/W2-2025, 101–108, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-2-W2-2025-101-2025>, 2025.
- [3] Daniels, D. J. (2004). Ground Penetrating Radar (Second Edition). The Institution of Engineering and Technology (IET).
- [4] Rasol, M., Pérez-Gracia, V., Fernandes, F. M., Pais, J. C., Santos-Assunção, S., & Roberts, J. S. (2022). “Ground Penetrating Radar System: Principles.” In Handbook of Cultural Heritage Analysis (pp. 705–738). Springer.
- [5] Serhir, M. & Lesselier, D. (Eds.) (2024). Ground Penetrating Radar: From Theoretical Endeavors to Computational Electromagnetics, Signal Processing, Antenna Design and Field Applications. Wiley-ISTE. [ieeexplore.ieee.org]
- [6] Doolittle, J. A. & Butnor, J. R. (2015). “Soil Properties That Affect the Performance of Ground Penetrating Radar.” In Soils, Peatlands, and Biomonitoring (pp. 179–193). USDA Forest Service.
- [7] Salon, S. J., Chari, M. V. K., Ergene, L. T., Burow, D., & DeBortoli, M. (2023). Eddy Currents: Theory, Modeling, and Applications. Wiley-IEEE Press.
- [8] White, A. A. & McCullough, R. G. (2024). Electromagnetic Induction (EMI) as a Tool for Archaeological Geophysics. Illinois State Archaeological Survey, University of Illinois.

# Droonipohjainen maatutkamittaus Otanmäen rikastushiekka-altaan pohja- ja penkkarakenteen arvioinnissa

Petri Valasti<sup>1</sup>, Kaisa Turunen<sup>1</sup>, Hannu Panttila<sup>1</sup>, Olli Nurmilaukas<sup>1</sup>, Veijo Sutinen<sup>2</sup>, Pasi Karjalainen<sup>2</sup>, Roope Koponen<sup>2</sup>  
Geologian tutkimuskeskus<sup>1</sup>  
Oulun yliopisto, Mittaustekniikan yksikkö<sup>2</sup>

## Tiivistelmä

Tutkimuksessa arvioitiin Otanmäen rikastushiekka-altaan ja patorakenteiden rakennetta hyödyntämällä useita geofysikaalisia menetelmiä, erityisesti droonipohjaista maatutkaa (maatutkadrooni), laserkeilausta, multispektrikuvausta sekä perinteisiä maastomittauksia. Maatutka-droonilla saavutettiin hyviä tuloksia padoilla, mutta ei rikastushiekka-altaalla, missä signaali vaimeni voimakkaasti johtavan materiaalin ja ilma-maa -rajapinnan häviöiden vuoksi. Perinteinen maatutka toimi rikastushiekka-altaalla paremmin, ja sillä pystyttiin paikantamaan painokairauksia vastaava pohjarakenne 100 MHz:n taajuudella. EM-mittaukset (tTEM ja GEM-2/GEM2H) paljastivat alueen johtavuusvaihtelut ja toivat esiin mahdollisia suotautumisalueita sekä eroja pintarakenteiden ja syvemmän kerroksellisuuden välillä. Magnetometria täydensi tulkintaa näyttämällä rikastushiekassa magneettisten mineraalien jakautumista. Laserkeilaus ja multispektrikuvaukset tuottivat tarkat pintamallit ja kasvillisuusindeksit (NDVI), joita voidaan hyödyntää rakenteiden pintamuotojen ja kosteuden vaihtelujen arvioinnissa. Kokonaisuutena perinteinen maatutka osoittautui luotettavimmaksi rikastushiekka-altaalla, kun taas se ja droonimenetelmät toimivat hyvin padoilla ja pintarakenteiden kartoittamisessa.

## 1. JOHDANTO

Rikastushiekka-altaiden ja niihin liittyvien patorakenteiden rakenteellinen turvallisuus perustuu altaan pohjan, penkkojen ja sisäisten materiaalikerrosten geotekniseen vakauteen. Pohjarakenteiden ominaisuudet, kerroksellisuus, kosteuspitoisuus ja mahdolliset heikentyneet vyöhykkeet vaikuttavat suoraan siihen, miten kuormitukset siirtyvät rakenteisiin, miten huokospaineet kehittyvät ja millaisia riskejä liittyy painumiin, eroosioon tai rakenteellisiin muutoksiin. Näiden ominaisuuksien luotettava ja alueellisesti kattava arviointi on keskeistä sekä ympäristöturvallisuuden että kaivostoiminnan riskienhallinnan kannalta.

Perinteisesti rikastushiekka-altaiden pohja- ja penkkarakenteita on tutkittu pistekohtaisilla menetelmillä, kuten kairauksilla ja maanäytteillä. Vaikka nämä menetelmät tuottavat tarkkaa tietoa, ne ovat hitaita, paikallisesti rajoittuneita ja voivat jäädä puutteellisiksi erityisesti silloin, kun rakenteiden sisäisiä muutoksia tai kerroksellisuutta halutaan tarkastella laajalla alueella. Kaukokartoitusmenetelmien kehittyminen on avannut uusia mahdollisuuksia tutkia rakenteita nopeasti ja tarkasti laajalta alueelta, ilman että tutkittavaan materiaaliin tarvitsee koskea.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin rikastushiekka-altaan ja patorakenteen ominaisuuksia hyödyntämällä useita toisiaan täydentäviä drooni- ja maastomittausmenetelmiä. Keskeisenä menetelmänä käytettiin maatutkalla varustettua droonia (GPR-drooni), jonka avulla pyrittiin havaitsemaan altaan pohjan ja penkkojen sisäisiä rakenteita, materiaalirajoja ja mahdollisia heikentyneitä vyöhykkeitä. GPR-drooni mahdollisti laajojen alueiden nopean ja turvallisen kartoituksen myös sellaisissa kohdissa, joissa maastoliikkuminen olisi ollut haastavaa tai riskialtista.

GPR-mittauksia täydennettiin lämpökameradrooni-aineistolla, jonka avulla voitiin tunnistaa pintarakenteiden ja kosteuden vaihteluun liittyviä lämpötilaeroja, sekä laserkeilausdrooni-aineistolla, joka tuotti tarkkaa kolmiulotteista tietoa altaan ja patorakenteen pintamuodoista. Näiden kolmen droonipohjaisen menetelmän yhdistäminen tarjosi monipuolisen näkymän sekä rakenteiden ulkoisiin että sisäisiin ominaisuuksiin.

Vertailumittauksia varten tutkimuksessa käytettiin lisäksi perinteistä maatutkaa,

GEM2-mittalaitetta, tTEM-mittalaitetta sekä muita käsimittalaitteita. Nämä maasta käsin tehtävät mitaukset toimivat tärkeänä referenssinä droonipohjaisille menetelmille ja mahdollistivat eri mittausmenetelmien tarkkuuden, syvyysulottuvuuden ja soveltuvuuden arvioinnin rikastushiekka-altaan ja patorakenteen tutkimuksessa.

Raportissa esitellään käytettyjen menetelmien toimintaperiaatteet, mittausjärjestelyt ja aineiston käsittely sekä arvioidaan, miten eri mittausmenetelmien yhdistäminen soveltuu rikastushiekka-altaan pohja- ja penkkarakenteiden luotettavaan ja kattavaan arviointiin.

## 2. TUTKIMUSKOHDE

Tutkimuskohteena oli rikastushiekka-allas Otanmäen vanhan suljetun kaivoksen alueella (kuva 1, lähde: paikkatietoikkuna).



*Kuva 1. Rikastushiekka-allas Otanmäessä.*

Rikastushiekkaa on läjitetty alueelle Otanmäen rauta-, vanadiini- ja ilmeniittikaivoksen toimintajakana vuosina 1953–1985. Altaaseen on varastoitu yhteensä noin 9,8 miljoonaa tonnia rikastushiekkaa, jota kertyi kaivoksen erotusprosessin sivutuotteena ja joka sijoitettiin patoamalla rakennetulle, noin 145 hehtaarin laajuiselle allasalueelle. Rikastushiekka sisältää taloudellisesti merkittäviä määriä hyödyntämättömiä mineraaleja, erityisesti ilmeniittiä noin 16 %, sekä magnetiittia ja pyriittiä. Altaan materiaali on raekooltaan pääosin alle 0,5 mm ja sen koostumus heijastelee alkuperäistä malmia,

jota Otanmäessä tuotettiin runsaasti 1950–1980-lukujen kaivostoiminnan aikana. Kehittyneiden nykyteknologioiden avulla rikastushiekan sisältämät arvomineraalit voitaisiin hyödyntää. Tästä syystä alue on Otanmäki Mine Oy:n nykyisen ilme- niitin ja magnetiitin talteenottohankkeen keskeinen kohde ja sen mineraalipotentialia sekä ympäristö- vaikutuksia on viime vuosina tarkasteltu useissa GTK:n ja kaivos- ja kaivoshankkeen omissa tutkimuksissa. [1].

### 3. TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimuksessa tutkittiin rikastushiekka-altaan ja patorakenteen ominaisuuksia käyttämällä maatu- tulla varustettua droonia (GPR-Drooni), lämpöka- meradroonia ja laserkeilausdroonia. Lisäksi vertai- lumittauksiin käytettiin perinteistä maatu- tkaa, GEM2-mittalaitetta ja tTEM-mittalaitetta sekä muita käsimittalaitteita.

#### 3.1. MAATUTKADROONI

Mittaustekniikan yksikön GPR-drooni koostuu miehittämättömästä ilma-aluksesta, maatutka- järjestelmästä sekä turvavarusteesta (kuva 2).



**Kuva 2.** Maatutkadrooni rikastushiekka-altaalla 2025.

##### *Miehittämätön ilma-alus – drone, drooni*

GPR-droonimittausjärjestelmä sisältää DJI Matrice 350 RTK -droonin, jossa on RTK (Real Time Kinetic) -tarkkuuspaikannus sekä laaja käyttölämpö- tila-alue (-20 ... 50 °C) ja IP55 suojaus. Ominai- suudet mahdollistavat toistettavat lentoreitit ja tar- kat paikkatiedot mittausdatalle erilaisissa sääolo- suhteissa.

##### *Maatutka – GPR (Ground Penetrating Radar)*

Maatutka on 1950-luvulla maantutkimiseen kehi- tetty mittalaite, jonka toiminta perustuu

radiotaajuisten (MHz - GHz) sähkömagneettisten aaltojen lähettämiseen maaperään ja takaisin hei- jastuneiden signaalien vastaanottamiseen. Heijas- tuneiden signaalien kulkuajasta voidaan määritellä etäisyys ja voimakkuudesta (amplitudi) eri kerros- ten ominaisuuksia, mikäli näiden eri kerrosten aal- lon etenemisnopeus tunnetaan [2].

MITY:n maatutka- ja järjestelmä koostuu Radar Sys- tems Zond Aero LF -maatutkasta, SkyHub-tiedon- keruuyksiköstä ja Terrain Follow -pinnan- seuranta- järjestelmästä. Maatutkassa on vaihdettavat anten- nit, joiden avulla mittaustaajuus voidaan valita 100, 150 tai 300 MHz:n väliltä. Tiedonkeruuyksikkö tallentaa mittausdatan reaaliaikaisella näytteistyksellä hyödyntäen hardware stacking -ominaisuutta. Järjestelmään kuuluu lisäksi pinnan- seuranta- järjestelmä, jonka avulla drooni säilyttää asetetun etäi- syyden maanpintaan automaattilennon aikana.

##### *Lentotoiminta*

GPR-Droonin lentotoimintaa ohjaa Traficom- in määrittelemät avoimen kategorian A3 -lentosään- not sekä erilliset määräykset maatutkan käytöstä miehittämättömässä ilma-aluksessa. Kun drooniin liitetään maatutka, sen käyttö edellyttää Traficom- in myöntämää lupaa.

MITY:lle myönnetty lupa mahdollistaa maatu- kalennot yhden metrin etäisyydellä maanpinnasta valituilla testikohteilla avoimessa kategoriassa A3. Matalalla lentämistä tukevat lento-ohjelmiston au- topilotti- sekä pinnan- seurantaominaisuus, jotka mahdollistava autonomiset lennot asetetulla etäi- syydestä maanpinnasta. Lennon aikana etäisyys maanpintaa mitataan järjestelmään kuuluvan etäi- syytutkan avulla. Vikaantumisen varalle droon- nissa on automaattisesti toimiva pelastusliivi, joka estää droonin vajoamisen pohjaa teknisessä vikati- lanteessa.

#### 3.2. LASERKEILAUSDROONI

Laserkeilain on mittalaite, joka tuottaa tarkkaa kol- miulotteista mittaus- tietoa kohteesta. Sen toiminta- periaate perustuu lasersäteiden lähettämiseen ja kohteesta heijastuneiden signaalien vastaanotti- miseen. Heijastuneiden signaalien kulkuajasta ja in- tensiteetistä voidaan määrittää kohteen etäisyydet ja muodot. Näistä mitatuista pisteistä muodostetaan 3D-pistepilvi, josta voidaan edelleen tuottaa

maastopintamalleja eli DEM-karttoja (Digital Elevation Model).

MITY:n dronimittausjärjestelmä koostuu DJI Matrice 350 RTK -dronista ja DJI Zenmuse L2 -laserkeilaimesta. Data-aineisto prosessoidaan maastopintamalleiksi DJI Terra -ohjelmistolla.

### 3.3. MULTISPEKTRIDROONI

Multispektrikamera on laite, joka havaitsee kohteesta heijastuvaa sähkömagneettista säteilyä useilla aallonpituusalueilla ja tallentaa ne erillisinä kuvakanavina. Kamera ei mittaa pelkästään näkyvää valoa, vaan myös esimerkiksi lähi-infrapuna-alueen säteilyä, jota ihmissilmä ei havaitse. Kohteet heijastavat eri aallonpituuksia eri tavoin, ja tätä spektristä vaihtelua voidaan hyödyntää esimerkiksi kasvillisuuden, maaperän ja rakenteiden analysoinnissa. Näiden avulla voidaan laskea erilaisia indeksejä, kuten NDVI ja arvioida kohteiden biologisia ja fysikaalisia ominaisuuksia.

MITY:n multispektridronimittausjärjestelmä koostuu DJI Mavic 3M -dronista ja sisäänrakennetusta multispektrikamerasta. Data-aineisto prosessoidaan ortokuviksi DJI Terra -ohjelmistolla.

### 3.4. PERINTEINEN MAATUTKA

Maatutka lähettää ja vastaanottaa nimensä mukaisesti sähkömagneettisia aaltoja. Samassa yksikössä on sekä lähetin- että vastaanotinantennit. Lähettimen lähettämät aallot heijastuvat takaisin rajapinnoilta, joissa dielektrisyys muuttuu. Tyypillinen maatutkan käyttökohte on määrittää tällaisten rajapintojen syvyyksiä ja kulkua [3].

Mitä suurempi dielektrisysero on rajapinnan ylitse, sitä suurempi heijastus siltä saadaan. Esimerkkejä dielektrisyysrajapinnoista ovat pohjamaan ja kallion välinen rajapinta, vesistöjen ja niiden pohjan välinen rajapinta, ruhjeiden ja rakojen muodostamat rajapinnat ehjän kallion kanssa, turpeen ja suonpohjan välinen rajapinta sekä yksittäisten kappaleiden kuten säiliöiden, putkien, suurempien kivien ja johtojen muodostamat rajapinnat ympäröivän materiaalin suhteen [4].

Maatutkat eroavat toisistaan lähettimen taajuuden suhteen. Tyypillisesti yhdellä maatutkalla on yksi lähettintaajuus, mutta on olemassa myös kahdella taajuudella samanaikaisesti toimivia tutkia sekä kokonaisen taajuuskaistan hyppien lävitse käyviä

tutkia [5]. Lähetin taajuudet vaihtelevat laajasti, matalimmat taajuudet ovat muutamista kymmenistä megahertseistä aina gigahertsiin (1000 MHz) asti. Kenties tyypillisimmät maatutkataajuudet ovat 100, 150, 200, 250 ja 300 MHz.

Samassa materiaalissa matalimmilla taajuuksilla tutka saavuttaa suuremman syvyysulottuvuuden kuin korkeammilla taajuuksilla, mikäli johtavuus ei vaimenna signaalia siten, että vastetta ei saada takaisin. Johtavissa ympäristöissä kuten savikoilla maatutka ei toimi, koska signaali vaimenee liian paljon matkalla heijastavalle rajapinnalle ja takaisin [6].

Otanmäessä käytettiin GSSI:n maatutkia 100, 200 ja 300/800 (ns. dual frequency -maatutka) MHz:n taajuuksilla (kuva 3).



*Kuva 3. Perinteinen maatutka moottorikelkan perässä olevassa ahkiassa, johon on liitetty myös RTK-GPS-vastaanotin.*

### 3.5. GEM-2 JA GEM-2H

GEM-2 ja GEM-2H ovat taajuustason elektromagneettisia mittaustaitteita, jolla voidaan mitata maaja kallioperän sähköjohtavuutta. Maatutkan tavoin laite koostuu lähettimestä ja vastaanottimesta, mutta lähetetyt taajuudet ovat kHz-alueella MHz:n sijaan. Elektromagneettisten mittalaitteiden lähettämät aallot eivät etene aineessa maatutkasignaalin tavoin selkeinä aaltorintamina vaan pikemmin kuin lämpö kattilan reunaa pitkin epämääräisenä vyöhykkeenä muodostaen pieniä virtoja, ns. pyörrevirtoja, sähköisesti johtaviin kohtiin.

Pyörrevirrat aiheutuvat lähettimen lähettämästä sinimuotoisesta signaalista, ns. primäärikentästä, joka muuttuu koko ajan. Pyörrevirrat ovat sitä suurempia, mitä johtavampaa materiaali on.

Mittaamalla näiden pyörrevirtojen aiheuttamaa magneetikenttää, ns. sekundäärkenttää, saadaan selville materiaalin johtavuus [7].

Maatutkan tavoin samassa materiaalissa matalimmat taajuudet saavuttavat suuremman syvyysulottuvuuden kuin korkeammat. Lisäksi syvyysulottuvuuteen vaikuttaa lähettimen ja vastaanotin kelojen välimatka, suuremman välimatkan antaessa periaatteessa suuremman syvyysulottuvuuden [8].



**Kuva 4.** GEM2H-mittalaite liitettyä moottorikelkkaan. Lähetin ja vastaanotin ovat kiinteästi 2.5 metrin päässä toisistaan laitteen vastakkaisissa päissä.

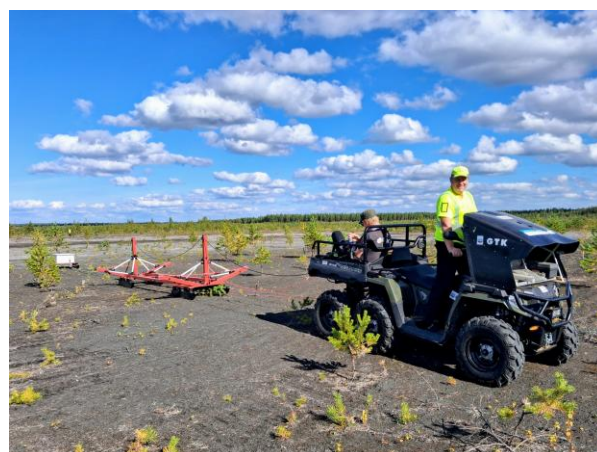
Otanmässä käytettiin GEM-2:ssa lähetintä 1475, 5825, 22225 ja 75525 Hz. Lisäksi koetettiin uudempaa GEM-2H-laitetta, jossa on suurempi kelaväli (2.5 m) kuin vanhemmassa GEM-2:ssa (1.66 m) ja siten periaatteessa hieman suurempi syvyysulottuvuus. GEM-2H-laitteella taajuudet olivat toisaalta korkeammat, 5025, 10425, 21575, 44825 ja 93075 Hz, mikä alentaa syvyysulottuvuutta, mutta antaa paremman kuvan pinnasta.

### 3.6. TTEM

tTEM on aikatason elektromagneettinen mittauslaite, jolla voidaan mitata maa- ja kallioperän sähköjohtavuutta. Ero taajuustason mittalaitteisiin on, että aikatasossa lähetettävä signaali ei ole

sinimuotoinen vaan vaihtuvamerkkinen (+/-) pulsijono. Pyörrevirrat muodostuvat, kun signaali vaihtaa merkkiään ja pyörrevirroista aiheutuva sekundäärkenttä mitataan signaalin eli primäärkentän ollessa pois päältä (eli pysyessä nollassa) [9].

Aikatason mittausten etuna onkin, että lähettimen ja vastaanottimen välisen geometrian ei tarvitse olla tarkkaan tiedossa kuten taajuustason mittalaitteissa, koska primäärkenttää ei tarvitse erikseen kompensoida sekundäärkentän mittaamiseksi [10].



**Kuva 5.** tTEM-mittalaite mönkijään liitettyä. Lähetin (punainen) ja vastaanotin (valkoinen) on yhdistetty kaapelilla, joka ei pidä etäisyyttä lähettimen ja vastaanottimen välillä täysin vakiona mutkissa. Kuvaa ottaessa systeemi on ollut paikallaan.

### 3.7. KÄSIMITTALAITTEET

Geofysikaalisten menetelmien tueksi tehtiin referenssimittauksia maan pintaosan sähköisistä ominaisuuksista käsikäyttöisillä mittalaitteilla (kuva 6). Vastustalikolla saadaan pistekohtainen tieto pintamaan ominaisvastuksesta eli ominaisresistivisyydestä upottamalla sen kondit maaperään. Maaperän ominaisvastus on sen resistiivisyyden keskiarvon tulo pituuden ja poikkileikkauspinta-alan suhteen ja ominaisvastuksen mittayksikkö on ohmimetri. Toinen käytetty käsimittalaite, perkometri, toimii teknisesti vastaavalla tavalla upottamalla sen kondit pintamaahan. Tässä käytetyllä M&L Testing Equipment:n H-4112 –perkometrillä saadaan yhden pisteen mittaustieto pintamaan sähköjohtavuudesta sekä dielektrisestä permittiivisyydestä ( $\epsilon_r$ ), joka on esimerkiksi maatutkatulkinnassa olennainen väliaineelle määritettävä

parametri, kun arvioidaan signaaliheijasteen syvyytasoa [2]. Käsimittalaitteilla tehtiin referenssimittaukset syyskuussa 2025. Ominaisvastusmittauksia tehtiin GEM2-linjalta yhteensä 87 kpl. Erilisiä perkometrimittauksia tehtiin rikastushiekka-altaan kaakkoisosasta.



**Kuva 6.** Käsimittalaitteet: ominaisvastustalikko (vas.) ja perkometri (oik.).

#### 4. MITTAUSTULOKSET

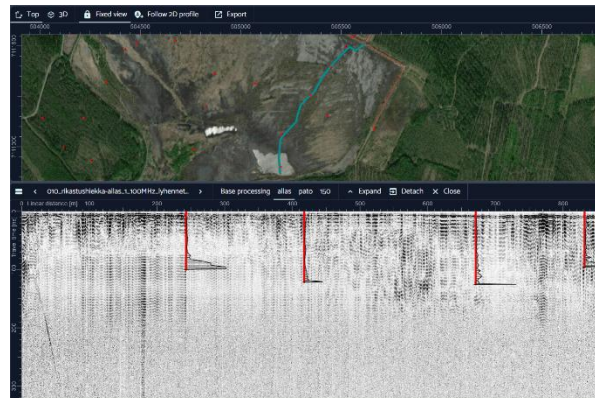
Mittauksia tehtiin lintuvesialtaalla maatutkadroonilla, perinteisillä maatutkilla, GEM-2:lla, GEM-2H:lla, TTEM:illä ja käsimittareilla (ominaisvastustalikko ja perkometri). Seuraavissa kappaleissa käydään lävitse niillä saadut tulokset.

##### 4.1. MAATUTKADROONI

Maatutkalla varustetulla droonilla suoritettiin mittauksia marraskuussa 2025 ja tammikuussa 2026 rikastushiekka-altaalla sekä rikastushiekka-altaan ja lintuvesialtaan padolla. Mittauslennot toteutettiin autonomisesti, mikä edellytti lentoreittien huolellista suunnittelua, kuten kääntöpisteiden kartoittamista RTK-paikantimella sekä mittausreitit raivaamista rikastushiekka-altaalla. Maatutkassa käytettiin pääosin 100 MHz:n taajuisia antennia, mutta yksi pato-osuus mitattiin myös 150 ja 300 MHz:n antennilla. Maatutka vastaanotti signaalia 366 nanosekunnin ajan ja tallensi tämän jakson 2048 näytteen tarkkuudella.

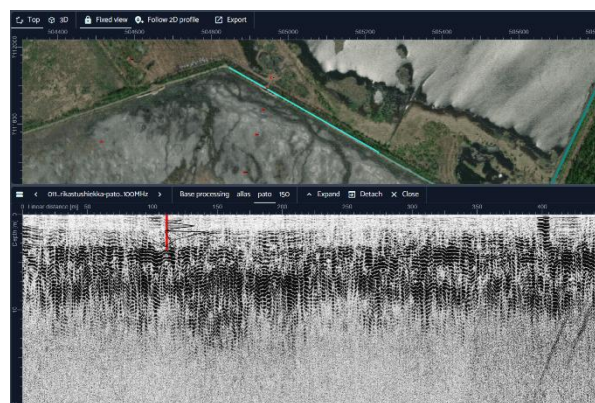
Kuvassa 7 esitetty maatutkadroonin lentoreitti jouduttiin raivaamaan ennen mittauksen toteuttamista. Mittauslento aloitettiin koillisesta

lintuvesialtaan ja rikastushiekka-altaan patojen risteyskohdasta ja se päättyi reitin lounaispäähen. Maatutkadatassa on havaittavissa ainoastaan satunnaisia materiaalikerrostumia, eikä aineistossa esiinny selkeitä horisontaalisia rajapintoja.

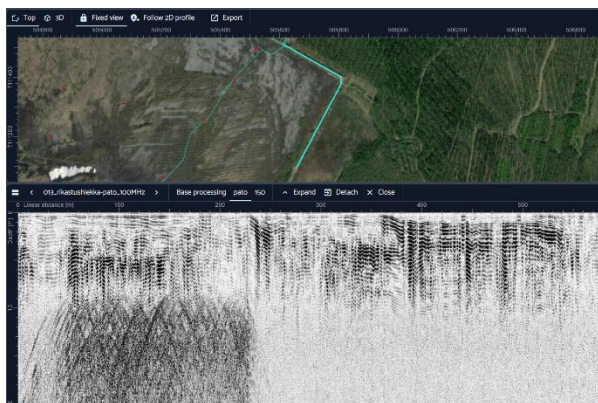


**Kuva 7.** GPR-droonilla mitattu rikastushiekka-allas (n. 800 m,  $\epsilon_r = 6$ ). Punaisella merkitty painokairauksien tulokset.

Patorakenteissa rajapinnat ovat sen sijaan havaittavissa selkeämmin kuin altaalla. Kuvassa 8 on nähtävissä horisontaalinen rajapinta, joka vastaa painokairauksella mitattua tasoa noin 3,6 metrin syvyydessä. Kuvassa 9 rajapinta näkyy lähellä pintaa ja syvenee mittausreitit loppuosaa kohti noin 1,1 metrin syvyyteen. Molemmille mittauksille yhteistä on, että rajapintakerrokset eivät ole enää havaittavissa noin 10 metrin syvyyden alapuolella.

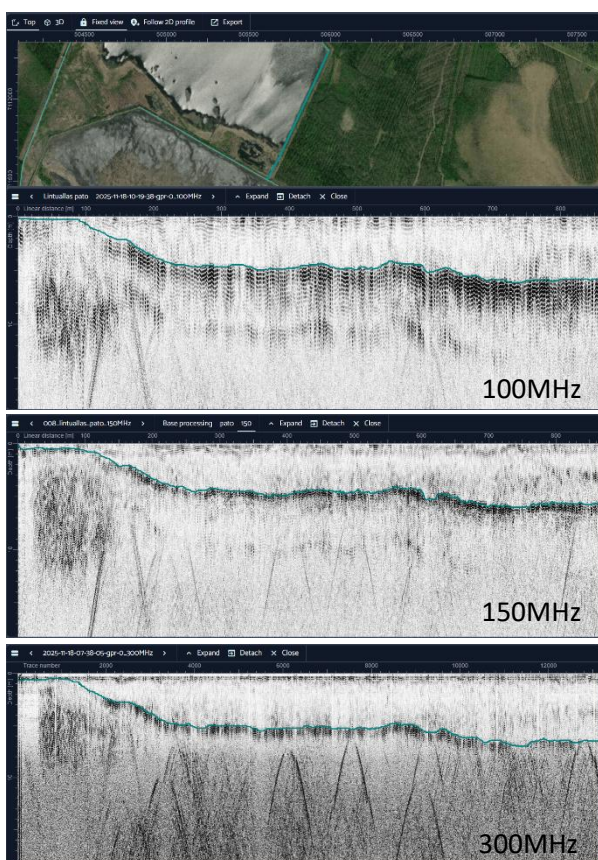


**Kuva 8.** GPR-droonilla mitattu rikastushiekka-altaan ja lintuvesialtaan pato (n. 450 m,  $\epsilon_r = 6$ ).



**Kuva 9.** GPR-droonilla mitattu rikastushiekka-altaan pato (n. 550 m,  $\epsilon_r = 6$ ). Profiilin alkupuolella esiintyy selkeitä hyperbelejä, jotka kuitenkin katoavat tien mutkan jälkeen.

Lintuvesialtaan padolla kerrosrajapinta erottuu erittäin selkeästi kaikilla MITY:n matalataajuisilla antennilla tehdyissä mittauksissa (kuva 10). Mittausreitti alkaa padon eteläpäästä, jossa rajapinta sijaitsee lähellä maanpintaa, ja syvenee lammen puolelle siirryttäessä noin 5 metrin syvyyteen. Reitin loppupuolella rajapinta syvenee vielä noin yhdellä metrillä.

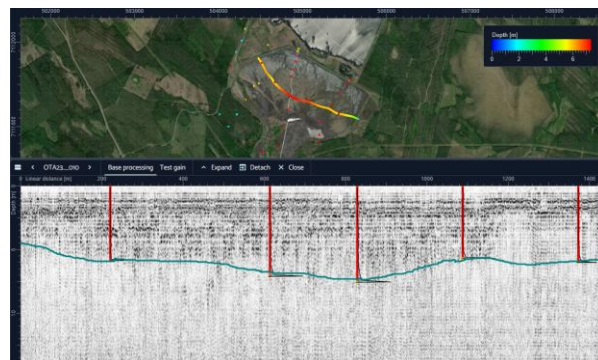


**Kuva 10.** GPR-droonilla mitattu lintualtaan pato 100, 150 ja 300 MHz:n antennilla (n. 850 m,  $\epsilon_r = 6$ ).

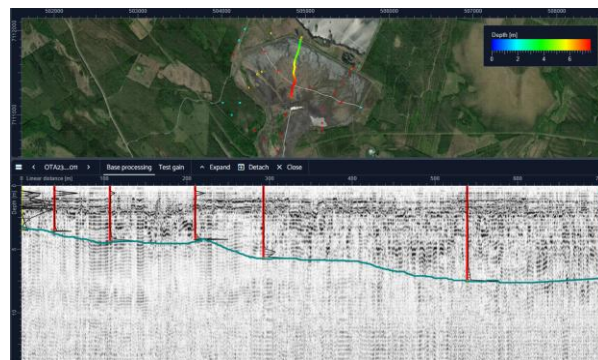
## 4.2. PERINTEINEN MAATUTKA

Maatutkauksia tehtiin rikastushiekka-altaalla 100 MHz:n taajuudella moottorikelkalla vetäen joulukuussa 2023. Yksittäinen linja tehtiin myös 200 MHz:lla. Rikastushiekka-altaalla tehdyt painokairaukset osoittautuivat erittäin hyödylliseksi referenssiksi muunnettaessa maatutkasektion pysty-akseli ajasta syvyydeksi. 100 MHz:n maatutkasektioissa, Kuvat 11, 12 ja 13, nähtiin selvästi paremmin heijastava alue, joka yhtyi hyvin painokairauksiin, kun dielektrisyys asetettiin arvoon  $\epsilon_r = 6$ , mikä vastaa hiekalle tyypillistä arvoa. 200 MHz:n sektiossa (kuva 15), vastaavaa korrelaatiota painokairauksen ja sektorin välillä ei huomattu, kenties korkeamman taajuuden ja siksi pienemmän syvyyssulottuvuuden vuoksi.

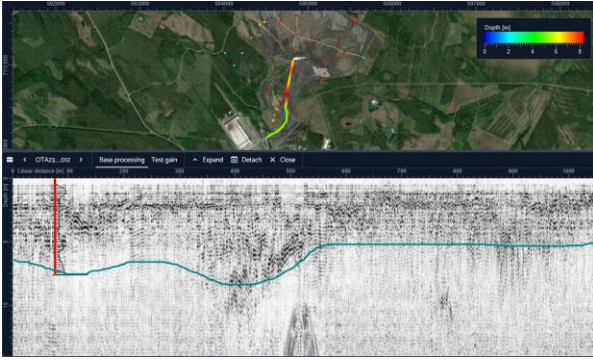
Padoilla mittaukset tehtiin 200 MHz:llä ja tulokset on koottu kuvaan 17.



**Kuva 11.** 100 MHz:n sektio rikastushiekka-altaan ylitse (n. 1400 m). Sektiossa ( $\epsilon_r = 6$ ) nähdään selvästi paremmin heijastava alue n. 0 ... 8 metrin syvyydellä, joka yhtyi hyvin painokairauksiin (punaisella) ja on rajattu vihreällä tulkintaviivalla. Väriskaala osoittaa tulkintaviivan syvyyden.



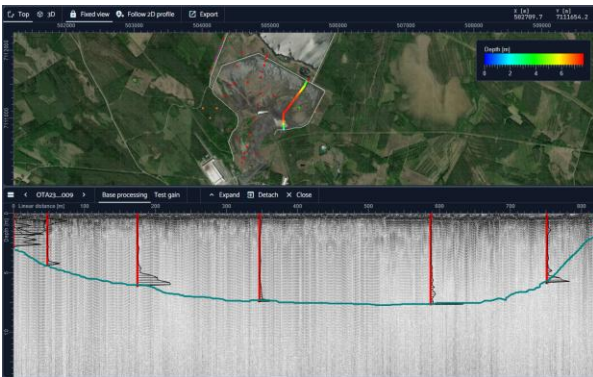
**Kuva 12.** 100 MHz:n sektio rikastushiekka-altaalta (n. 700 m,  $\epsilon_r = 6$ ).



**Kuva 13.** 100 MHz:n sektio rikastushiekka-altaalta (n. 1100 m,  $\epsilon_r = 6$ ). Hyperbeli n. 500 m:n kohdalla aiheutuu ilmaheijastuksesta linjan yläpuolella menevästä suurjännitelinjasta.



**Kuva 14.** 100 MHz:n mittausten tulokset (kuvat 11, 12 ja 13) yhdistettynä.



**Kuva 15.** 200 MHz:n sektio rikastushiekka-altaalta (n. 800 m,  $\epsilon_r = 6$ ). Tulkintaviiva on vedetty pelkästään painokairausten perusteella, koska maotkakuvasssa ei näy rakenteita. Tämä saattaa johtua linjalla käytetystä suuremmasta taajuudesta, jolloin syvyysulottuvuus on pienentynyt.



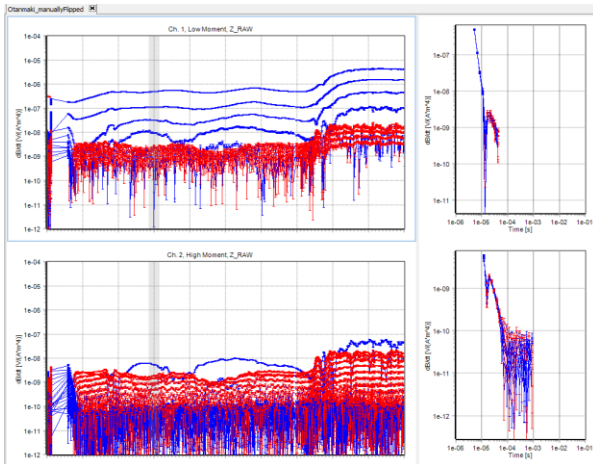
**Kuva 16.** Sama linja kuin maotkadroonilla Kuva 10 lennetty linja perinteisellä 200 MHz:n maotkalla vedettynä.



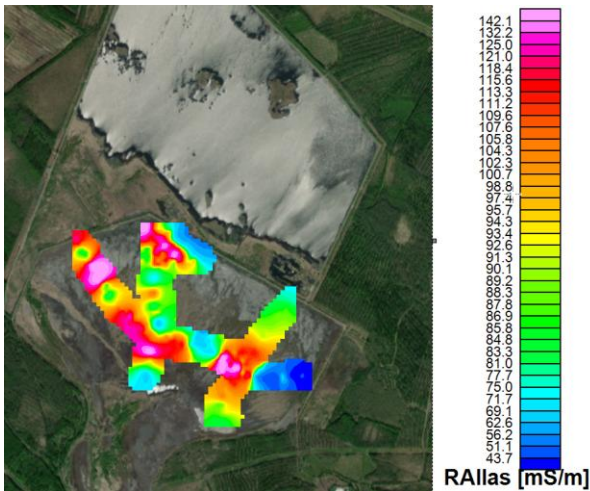
**Kuva 17.** 200 MHz:n maotkusten tulokset patorakenteiden syvyyttulkintoina.

#### 4.3. ELEKTROMAGNEETTISET MITTAUKSET: TTEM JA GEM-2

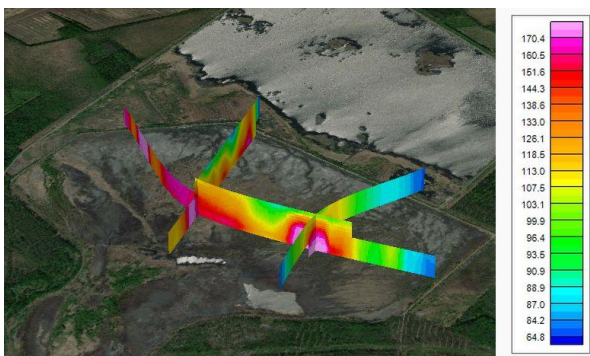
Aika-alueen tTEM-mittaukset tehtiin sykuussa 2025, jolloin mitattiin rikastushiekka-alueen lisäksi myös ympäröivät patorakenteet. Datassa (kuva 18) näkyy selvästi IP-ilmiö, joka kääntää mittausten polariteetin (merkin) positiiviseksi negatiiviseksi, kuvassa 11 sinisestä (+) punaiseksi (-). Tämän vuoksi datalle tehtävässä inversiossa käyttökelpoista dataa jää vain low momentin ensimmäisistä aikaikkunoista, kun taas syvemmälle näkevä low momentti on miltei kokonaan negatiivista ja siten inversiossa käyttökeltotonta. Haasteista huolimatta inversio saatiin tehtyä ja lopputuloksena saatiin kuvien 19 mukainen pintajohtavuusmalli ja 20 mukainen johtavuussektio.



**Kuva 18.** *tTEM*-mittaukset rikastushiekka-altaalla. Kuvassa näkyy vasemmalla data ja oikealla niitä vastaavat vaimenemiskäyrät. Datan merkin vaihtuminen (sininen -> punainen) viittaa IP-ilmiöön, joka vaikeuttaa johtavuusmallin tekemistä.



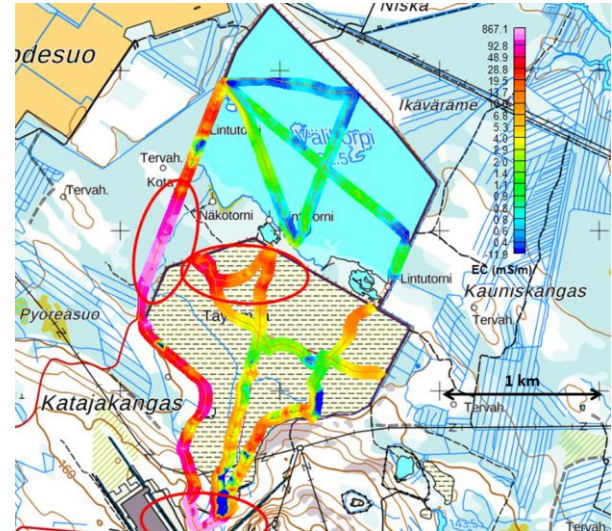
**Kuva 19.** *tTEM*. Horisontaalinen johtavuuspinta rikastushiekka-altaan alueelta.



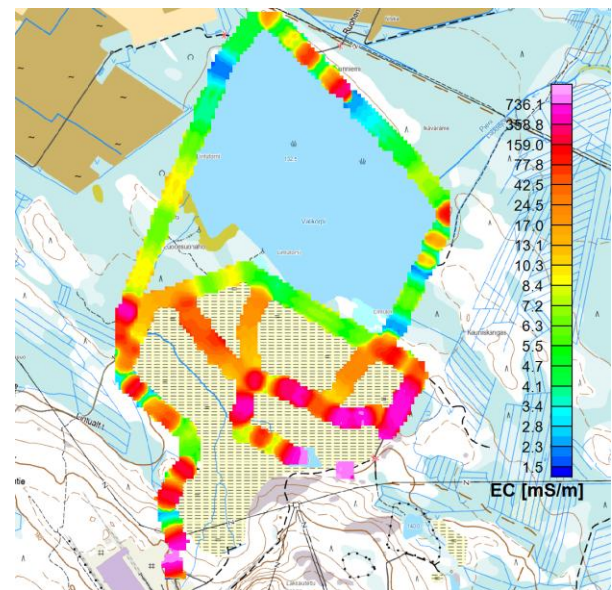
**Kuva 20.** *tTEM*. Vertikaalinen johtavuussektio rikastushiekka-altaan alueelta. Väriskaalan yksikkö on mS/m.

Taajuusalueen elektromagneettisia mittauksia tehtiin maaliskuussa ja syyskuussa 2025. Tulokset

on koottu kuvaan 21, johon on ellipsillä ympäröity korkeamman johtavuuden alueet. Rikastushiekka-altaan ulkopuolella olevat korkean johtavuuden alueista läntinen saattaa liittyä altaalta suotautumiseen, mutta eteläinen johtuu vaunutehtaan infrasta.



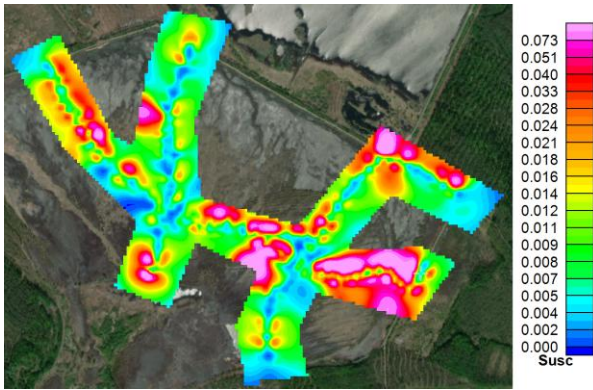
**Kuva 21.** GEM-2. Johtavuuspinta rikastushiekka-alueelta ja padoilta. Ellipsillä ympäröidyt alueet edustavat korkeamman johtavuuden alueita.



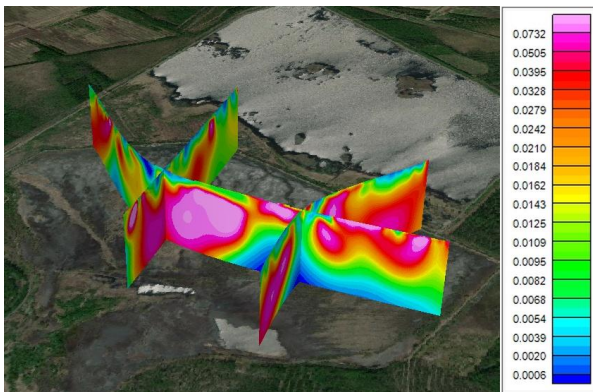
**Kuva 22.** *tTEM*. Johtavuuspinta rikastushiekka-alueelta ja padoilta (taso  $z = 135$ ).

#### 4.4. MAGNETOMETRAUS

Magnetometraus tehtiin samaan aikaan *tTEM*-mittausten kanssa syyskuussa 2025. Datalle tehtiin inversio, jonka lopputuloksena saatiin kuvien 23 mukainen susceptiivisuuspinta ja 24 mukainen susceptiivisuussektio.



**Kuva 23.** Horisontaalinen susceptiivisuuspinta (taso  $z = 125$  m).

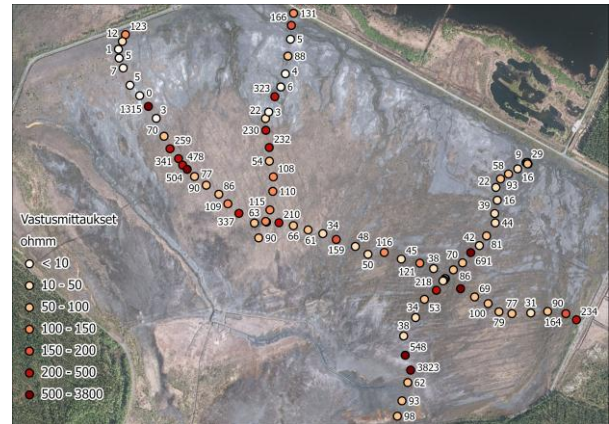


**Kuva 24.** Vertikaalinen susceptiivisuussektio.

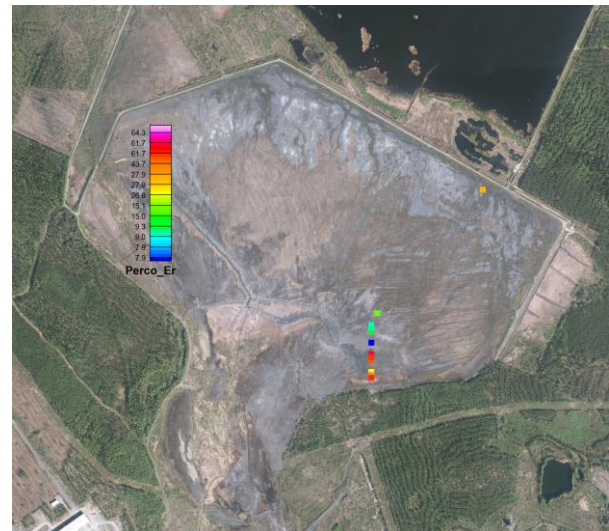
#### 4.5. KÄSIMITTAUSTULOKSET

Rikastushiekka-altaan ominaisvastusmittauksia tehtiin referenssitiedoksi GEM2-luotauslinjoilla syyskuussa 2025. Mittaukset tehtiin luotauksen yhteydessä ja mittauspisteväli oli keskimäärin 30 metriä. Mittauksia tehtiin yhteensä 87 kpl ja niissä pintamaan ominaisvastus vaihteli välillä 0–3823 ohmm. Matalimmat, alle 10 ohmimetrin tulokset saatiin rikastushiekka-altaan pohjoispäädystä. Yli 500 ohmimetrin mittaustuloksia saatiin vain seitsemässä pisteessä. Perkometrimittauksia tehtiin geofysikaalisten mittausten referenssitiedoksi 11 kpl altaan eteläkaakkoisosassa ja yksi mittaus koillis-päädystä. Niissä pintamaan dielektrisen permittii-visyyden ( $\epsilon_r$ ) arvo vaihteli karkeasti välillä 6–45. Korkeimpia ( $\epsilon_r > 10$ ) mittaustuloksia saatiin eteläisimmistä pisteistä, jotka sijaitsevat matalassa syvänteessä, jossa oli kuivuneita pintaveden virtausuomia sekä myös muutamia seisovan veden lammikoita. Ympäröivään alueeseen nähden suhteellisen korkeat  $\epsilon_r$ -arvot syvänteessä ovat johdonmukaisia ja ne indikoivat syvänteen pintamaan

korkeampaa huokosvesipitoisuutta. Käsintehtyjen mittausten tulosjakaumat on esitetty kuvissa 25 ja 26.



**Kuva 25.** Käsintehtyt pintamaan ominaisvastuksen referenssimittaukset GEM2-linjoilta.



**Kuva 26.** Käsintehtyt pintamaan dielektrisen permittii-visyyden referenssimittaukset.

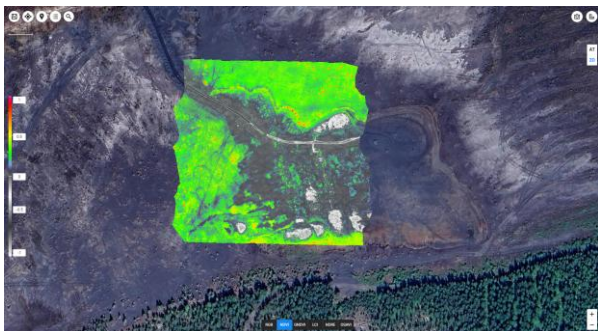
#### 4.6. LASERKEILAUS JA MULTISPEKTRIKUVAUS

Laserkeilaus toteutettiin syksyllä 2024 ja kerätystä laserkeilausaineistosta tuotettiin mm. digitaalinen korkeusmalli (kuva 27). Laserkeilauksen lentoreitit suunniteltiin perinteisen maatutkalinjojen pohjalta vastaamaan samoja alueita.



**Kuva 27.** Laserkeilauksen tuloksena tuotettu DEM-kartta rikastushiekka-altaasta ja sen padoista.

Multispektrikuvaukset toteutettiin syksyllä 2025, ja niiden ensisijaisena tavoitteena oli vastikään hankitun laitteiston käyttöönotto ja testaus varsinaisissa mittausolosuhteissa. Terra-ohjelmistolla prosessoitu aineisto tuotti eri spektrikanaviin perustuvia ortokuvia. Kuvassa 28 esitetään NDVI-indeksi, jonka avulla arvioidaan kasvillisuuden elinvoimaisuutta ja alueellista vaihtelua.



**Kuva 28.** Multispektrikuvauksen tuloksena tuotettu ortokuva rikastushiekka-altaasta ja sen padoista NDVI-indeksinä.

## 5. TULOSTEN JA MITTAUSMENETELMIEN VERTAILUT

Vertaamalla elektromagneettisten tTEM-mittausten tuloksia (kuvat 19 ja 20) Kuva 19 magneettisiin mittauksen tuloksiin (kuvat 23 ja 24), huomataan että ne ovat osin vastakkaiset toisilleen: johtavia alueita vastaa heikko susceptiivisuus ja päinvastoin, heikosti johtavia alueita vastaa korkea susceptiivisuus. Tämä näkyy mm. altaan itäpäädyssä, jossa susceptiivisuus on voimakas (Kuva 23), mutta johtavuus pieni (Kuva 19). Toisaalta itä-länsisuuntaisessa sektiossa, läntisemmässä sektioiden risteyskohdassa susceptiivisuus muodostaa matalien arvojen alueen (Kuva 24), mutta johtavuus

suurten arvojen (Kuva 20). Yhteneväisyyksiäkin kuitenkin löytyy, joten havainto ei ole yleispätevä.

Vertaamalla elektromagneettisia aika-alueen tuloksia (Kuva 22) taajuustuloksiin (Kuva 21) nähdään, että ne vastaavat pääpiirteiltään aika-alueen rikastushiekka-altaalla etenkin altaan luoteisosassa, jossa molemmat menetelmät näkevät johtavamman alueen (ellipsillä ympäröity). Eroavaisuusiakin löytyy, aika-alueen johtavuuspinnassa näkyy lännessä mittauslinjojen risteyksessä korkeamman johtavuuden alue, joka ei näy taajuusalueen johtavuuspinnassa. Selitys tälle erolle saattaa löytyä kuvan 20 sektioista, jossa pinnalla nähdään risteyskohdassa vähemmän johtava alue, jonka taajuusalueen mittaukset ovat havainneet, mutta aika-alueen mittauksissa näkyikin sektiossa syvemmällä oleva johtavampi alue.

Perinteinen maatutka (200 MHz) toimi hyvin patoaltailla, joissa erottui erilaisia horisontaalisia rakenteita (Kuva 16). Datoissa näkyi toisaalta usein myös ns. soimista, jossa signaali heijastuu lukuisia kertoja luoden toistuvan rakenteen tutkakuvaan. Koska soiminen lähtee useasti jo aivan pinnalta, se liittyyneeseen pintarakenteeseen. Rikastushiekka-altaalla 100 MHz:n maatutka havaitsi painokairauksilla varmistetun altaan pohjan (kuva 12), kun taas 200 MHz:n mittauksissa vastaava rajapinta ei ollut selkeästi erotettavissa (kuva 15).

Maatutkadroonin mittauksia varten aluetta jouduttiin valmistelemaan mittauskelpoiseksi muun muassa harventamalla pientareiden puustoa sekä poistamalla rikastushiekka-altaalla risuja, oksia ja pienikokoista puustoa noin viiden metrin levyiseltä mittausreitiltä. Toimenpiteet olivat välttämättömiä droonin turvallisen lennon ja häiriöttömän mittauksen varmistamiseksi. Valmistelutyön laajuuden vuoksi rikastushiekka-altaalla toteutettiin maatutkadroonilla vain yksi mittauslinja. Tämä rajoitti aineiston kattavuutta ja vaikutti osaltaan tulosten alueelliseen edustavuuteen.

Rikastushiekka-altaalta ei saatu maatutkadroonilla hyvää dataa (kuva 7), sillä kerrosrakenteita ei havaittu. Tosin samalta linjalta ei myöskään moottorikelkalla vedetty 200 MHz maatutka havainnut kerroksia (kuva 15). Tämä johtunee rikastushiekan johtavuuden aiheuttamasta vaimenemisesta. Patoaltailla maatutkadrooni antoi kuitenkin yhteneviä tuloksia perinteisen maatutkan kanssa, kts. Kuva 10 ja Kuva 16.

## 6. YHTEENVETO

Perinteisellä maatumkalla saatiin tulkintakelpoisia tuloksia sekä rikastushiekka-altaalla että padoilla, maatumkadroonilla vain jälkimmäisillä. Syitä tähän on useita. Maatumkadroonia ei voitu lennättää puuston vuoksi rikastushiekka-altaalla samoissa paikoissa missä pystyttiin kuljettamaan perinteistä maatumkaa moottorikelkalla. Siellä, missä pystyttiin, maatumkadroonidatassa ei näkynyt tulkittavia rakenteita todennäköisesti ilma-maarajapinnan voimakkaan häviön ja rikastushiekan johtavuudesta aiheutuvan vaimenemisen vuoksi. Tosin samalta linjalta ei myös moottorikelkalla vedetty perinteinen 200 MHz maatumka havainnut rajapintoja.

Maatumkadroonin suurimpana etuna perinteiseen maatumkaukseen nähden voidaan pitää sen käytön helppoutta. Ei tarvita moottorikelkkaa tai käyttäjää itseään vetämään maatumkaa. Maatumkadrooni mahdollistaa myös mittaukset vesistöjen ylitse ilman kelluvien ratkaisuiden käyttöä. Droonin avulla päästään myös alueille, joihin ei saavutettavuuden tai työturvallisuuden vuoksi päästä perinteisillä menetelmillä. Lisäksi etuna on, että maatumkadroonin kirjoittamat SGY-muotoiset datatiedostot sisältävät paikkatiedon itsessään eikä erillisiä tiedostoja tarvita GPS:lle. Lisäksi maatumkadroonilla saa kartoitettua nopeammin laajojakin alueita.

Maatumkadroonin rajoitteina voidaan pitää maksimissaan metrin lentokorkeutta (lakisääteinen), ilma-maarajapinnan aiheuttamaa voimakasta häviötä ja tarvittavaa pilottitaitoa droonin ohjauksiksi. Jos tutkimusalueen maaperän tai vesistön resistiivisyys on tarpeeksi suuri (eli johtavuus pieni), maatumkadroonilla on hyvät edellytykset saada tulkintakelpoisia tuloksia.

EM-mittauksilla voidaan kartoittaa alueen sisäistä johtavuusvaihtelua, jolloin suuri johtavuusarvo voi viitata vuotokohtaan padolla ja toisaalta metallisen johteen ympäristöään suurempaan määrään rikastushiekka-altaalla

Magneettisilla menetelmillä voidaan kartoittaa alueen sisäistä magneettisuutta (suskeptivisuutta), jolloin rikastushiekan suuremmat arvot viittaavat magneettisen mineraalin ympäristöään suurempaan määrään, jolla voi olla merkitystä rikastusprosessin ohjauksessa. Magneettisilla mittauksilla saadaan myös selville suuremmat ja syvemmät geologiset rakenteet (siirrokset, ruhjeet, jne.).

## 7. KIITOKSET

Tutkimus kuuluu Uudet teknologiat uomien ja kai-vosaltaiden kartoitukseen (UOMARI) -tutkimus-hankkeeseen, joka on saanut rahoitusta Euroopan unionin aluekehitysrahastosta (EAKR), rahoittajana Pohjois-Suomen elinvoimakeskus (Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus).



**Euroopan unionin  
osarahoittama**

## VIITTEET

- [1] otanmäkiyhdistys.fi
- [2] Neal, A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews* 66, 261 – 330. School of Applied Sciences, University of Wolverhampton.
- [3] Daniels, D. J. (2004). *Ground Penetrating Radar (Second Edition)*. The Institution of Engineering and Technology (IET).
- [4] Rasol, M., Pérez-Gracia, V., Fernandes, F. M., Pais, J. C., Santos-Assunção, S., & Roberts, J. S. (2022). “Ground Penetrating Radar System: Principles.” In *Handbook of Cultural Heritage Analysis* (pp. 705–738). Springer.
- [5] Serhir, M. & Lesselier, D. (Eds.) (2024). *Ground Penetrating Radar: From Theoretical Endeavors to Computational Electromagnetics, Signal Processing, Antenna Design and Field Applications*. Wiley-ISTE. [ieeexplore.ieee.org]
- [6] Doolittle, J. A. & Butnor, J. R. (2015). “Soil Properties That Affect the Performance of Ground Penetrating Radar.” In *Soils, Peatlands, and Biomonitoring* (pp. 179–193). USDA Forest Service.
- [7] Salon, S. J., Chari, M. V. K., Ergene, L. T., Burow, D., & DeBortoli, M. (2023). *Eddy Currents: Theory, Modeling, and Applications*. Wiley-IEEE Press.
- [8] White, A. A. & McCullough, R. G. (2024). *Electromagnetic Induction (EMI) as a Tool for Archaeological Geophysics*. Illinois State Archaeological Survey, University of Illinois.

[9] Joung, I., Cho, S. O., Kim, B., Jeong, J., Jeong, S., Jang, H., Reninger, P-A. & Nam, M. J. (2022). A Review of the Time-domain Electromagnetic Method: Research Trends and Applications. Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, 59(4), 364–378.

[10] Rao, S. M. (1999). Time Domain Electromagnetics. Academic Press.

# DROONIT VIRTAUKSEN MITTAUKSESSA

Veijo Sutinen<sup>1</sup>, Kim Palonen<sup>1</sup>, Roope Koponen<sup>1</sup>, Pasi Karjalainen<sup>1</sup>, Olli Nurmilaukas<sup>2</sup>, Tatu Lahtinen<sup>2</sup>, Joonas Kahu<sup>3</sup> ja Jukka Hirvonen<sup>3</sup>  
Oulun yliopisto, Mittaustekniikan yksikkö<sup>1</sup>  
Geologian tutkimuskeskus<sup>2</sup>  
Suomen ympäristökeskus<sup>3</sup>

## TIIVISTELMÄ

Virtausmittaukset ovat tärkeä osa uomien toiminnan arviointia, sillä ne antavat tietoa uomassa kulkevan veden virtausnopeudesta ja virtaamasta (tilavuusvirrasta  $m^3/s$ ). Näitä tietoja hyödynnetään mm. hydrologisessa seurannassa, vesirakentamisessa, vesivoiman suunnittelussa ja uoman ekologisen tilan arvioinnissa. Nykyisin käytössä olevat virtausmittalaitteet ovat pääsääntöisesti ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) -mittalaitteita, jotka ovat kiinnitettynä manuaaliseen tai autonomiseen mittauslauttaan. Manuaalisessa lauttaversiossa uoman yli kiinnitetään köysi, jonka avulla ADCP-mittalaitteella varustettu lautta vedetään uoman poikki manuaalisesti. Vedon aikana mittalaite mittaa uoman virtaus- ja syvyysprofiilin. Tämän käyttö vaatii köyden saamista vastarannalle, joten se täytyy viedä joko kahlaamalla tai venettä käyttäen. Nykyisin on tullut markkinoille autonomisia lauttaversioita, jotka mahdollistavat virtausmittaukset rannalta. Näiden lisäksi on kiinteitä virtausmittareita, jotka pohjautuvat tutkatekniikkaan, videokuvan analysointiin, pinnankorkeuden mittaamiseen, jne. Näiden yhteydessä käytetään laskennassa myös purkautumiskäyriä.

UOMARI-hankkeen yhtenä osatavoitteena oli tutkia drooniin liitetyn maatutkan (GPR) käytettävyyttä uomien pohjanmuotojen arvioinnissa sekä droonin videokuvan hyödyntämistä pintavirtauksen määrittämisessä. Hankkeessa verrattiin drooniin liitetyn maatutkan (GPR) antamia joenuoman pohjanmuodon mittaustuloksia perinteisellä kaikuluotaimella saatuihin tuloksiin. Lisäksi droonilla kuvatusta virtausvideosta ohjelmistojen avulla saatuja virtausprofiileja verrattiin ADCP-mittalaitteella mitattuihin sekä voimalaitoksen juoksutusmääriin.

Tutkimuksista saatujen tulosten perusteella drooni voisi olla käyttökelpoinen apu virtausmäärän nopeassa arvioinnissa, sillä maatutkan avulla saadaan mitattua uoman profiili ja videokuvasta pintavirtausprofiili, joista ohjelmistojen avulla voitiin laskea uomassa kulkevan veden virtaama (Q). Laskennan avulla saadut virtausmäärät olivat samansuuntaisia autonomisen virtausmittauslautan mittaamiin ja yläpuolisen vesivoimalaitoksesta saatuihin tuloksiin verrattuna.

## 1. JOHDANTO

Virtausmittauksia on pitkään suoritettu manuaalisesti veden pinnalle laitettavilla mittalaitteilla tai vedessä seisten. Tämä voi olla erityisesti suurikoisissa joissa ja voimakkaissa virtauksissa epäkäytännöllistä, kallista ja vaarallista. Tämän vuoksi on kehitetty erilaisia tapoja mitata virtauksia etäältä joesta, joista eräs yleinen tapa on hyödyntää videokuvaa.

Videokuva pyritään ottamaan mahdollisimman korkealta joen yläpuolelta ja joen virtauksen suuntaisesti mahdollisimman suuren ja laadukkaan kuva-alueen aikaansaamiseksi. Tiedossa olevien videossa näkyvien koordinaattipisteiden avulla kuvakulman ja linssien aiheuttamat vääristymät voidaan korjata, ja saadusta videosta voidaan seurata joen pinnan näkyvää liikettä eri algoritmeilla. Videokuvasta saadaan tietoa ainoastaan pintavirtauksesta, joten tieto pitää yhdistää joen uoman syvyysprofiiliin joen virtausmäärän laskemiseksi.

Menetelmää on testattu eri tutkimuksissa hyvin tuloksin. Esimerkiksi João P. Leitão, et al. [1] testasivat kaupunkiympäristöä vastaavissa laboratorio-olosuhteissa valvontakameroiden toimivuutta, ja Al-mamari, M., et al. [2] hyödynsivät videokuvaa tulvavirtausten mittausta varten. Toimivuutta on testattu myös valtameriolosuhteissa [3]. Suomessa Schlobies, K., et al. [4] käyttivät menetelmää tarkastellessaan Kangaskosken padon poiston vaikutusta Hiitolanjoen virtauksiin.

Droonin avulla saatu videokuva soveltuu teoriassa erityisen hyvin virtausmittauksien laskentaan, sillä kohdetta voidaan kuvata kohtisuoraan joen yläpuolelta. Näin videomateriaali on käyttökelpoinen ilman erillistä geometrista korjausta, joka olisi tarpeen sivusta kuvatussa videossa. Lisäksi videokuvan pikselikoko voidaan määrittää suoraan kameran tietojen ja droonin lentokorkeuden avulla ilman erillistä vertailukohdetta. Kuvan epävakaus voi kuitenkin aiheuttaa ongelmia. Kiinteällä kameralla ja droonilla kuvattujen videoiden avulla laskettuja virtausmittauksia on vertailtu toisiinsa esimerkiksi tutkimuksissa [5], [6] ja [7], ja droonikuvan on havaittu soveltuvan tarkoitukseen hyvin.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin, voidaanko droonia hyödyntää uomien virtausmäärityksessä siten, että mittaukset voidaan tehdä ilman työskentelyä virtaavassa vedessä. Virtausmääritystä varten

tarvitaan tietoa joen uoman pintavirtauksesta sekä uoman pohjaprofiilista. Uoman pinta voidaan videokuvata droonilla kohtisuoraan halutulta etäisyydeltä ja uoman syvyysprofiili määrittää drooniin liitettävän maatumkan (GPR, ground penetrating radar) avulla. Näiden mittaustietojen perusteella virtausmäärät voidaan laskea PIV-ohjelmistoilla (Particle Image Velocimetry).

## 2. UOMAN VIRTAAMAN MÄÄRITYS

Uoman virtaaman laskenta edellyttää tietoa sekä virtausnopeudesta että uoman poikkipinta-alaprofiilista. Virtausnopeus voidaan arvioida riittävällä tarkkuudella pintavirtauksen perusteella, jolloin hyödynnetään droonilla kuvattua videomateriaalia. Poikkipinta-alaprofiili voidaan puolestaan mitata droonin ja maatumkan avulla, tai kirkkaissa vesissä myös kahden aallonpituuden laserkeilaus tarjoaa toimivan vaihtoehdon.

Seuraavissa kappaleissa kuvataan pintavirtaukseen perustuvat menetelmät ja niitä tukevat ohjelmistot. Lisäksi esitellään, miten uoman poikkipinta-alaprofiili voidaan tuottaa maatumkalla varustetun dronen avulla sekä miten näiden tietojen perusteella lasketaan uoman virtaama.

### 2.1. PINTAVIRTAUSMÄÄRITYS VIDEOKUVASTA

Yleisesti ottaen pintavirtauksen määrittäminen videokuvasta vaatii pinnan sisältävän jotain selkeästi näkyvää ja virtauksen mukana kulkevaa materiaalia. Tätä voi olla esimerkiksi erilaiset roskat, vaahto tai pintaväreilyn aiheuttamat heijastukset. Eri menetelmät ovat eri tavalla herkkiä näiden puutteelle, ja tarvittaessa jokeen voidaan lisätä ekologisesti turvallista ainetta, kuten pieniä puupartikkeleita, näkyvyyden parantamiseksi. Näkyvyyttä voidaan myös parantaa hyödyntämällä erilaisia kameroita, kuten infrapuna- [1][3] tai NIR-kameroita [8].

Mittaustulosten laatu on myös riippuvaista kuvausresoluutiosta, kuvataajuudesta sekä kuvaus- etäisyydestä, eli droonikuvan tapauksessa lentokorkeudesta. Orus [9] suosittelee vähintään  $1920 \times 1080$  pikselin resoluutiota ja 24 Hz:n kuvataajuutta. Ylisuuret arvot näissä eivät kuitenkaan aiheuta ongelmia, koska molempia voidaan säätää tarvittaessa pienemmiksi prosessoinnin yhteydessä. Lentokorkeuden tulee olla tarpeeksi suuri,

jotta videolla näkyy koko joen uoma ja tarpeeksi rantaa kuvan vakauttamista sekä koordinaatistoon yhdistämistä varten. Korkeuden kasvaessa myös pikselikoko kasvaa ja käytettävissä olevan alueen resoluutiota laskee. WaMSTeC [10] suosittelee maksimissaan 5 cm pikselikokoa mittauksiin. Yleisesti parametrit on paras valita kuvaustilanteen mukaan siten, että joen virtaus on selkeästi videolta silmämääräisesti havaittavissa.

## 2.2 VIRTausMÄÄRITYSMENETELMÄT

PIV (Particle Image Velocimetry) on alun perin laboratoriomittauksiin kehitetty menetelmä, jolla seurataan ilmassa tai nesteessä liikkuvien hiukkasten nopeuksia. Menetelmää voidaan hyödyntää myös virtausmittauksissa, jolloin käytetään usein termiä LSPIV (large scale particle image velocimetry) [11]. Menetelmä jakaa videon kuvapareihin ja kuvan tutkittavan alueen osiin. Jokaista kuvan osaa verrataan seuraavan kuvan saman osan lähi-alueeseen, ja lasketaan näin alueen todennäköisin siirtymä. LSPTV (large scale particle tracking velocimetry) on samankaltaiseen ideaan perustuva menetelmä, joka seuraa yksittäisiä hiukkasia alueiden sijaan.

STIV (space-time image velocimetry) [12] on yksiulotteisen liikkeen mittaamiseen kehitetty menetelmä, joka soveltuu jokien pintavirtausmittaukseen. Perusideana on jakaa video virtaussuunnan mukaisesti ohuisiin siivuihin. Kun yhden mittausalueen siivut asetetaan vieretysten, saadaan kaksiulotteinen siivu mittauskohdan aika-avaruudesta, jossa toinen akseli kertoo paikan virtaussuunnassa ja toinen mittausajankohdan. Yksiulotteisen liikkeen vuoksi kuvaan ilmestyy vino raitarakenne, jonka kulmakertoimena saadaan virtausnopeus. Etuna menetelmässä on sen hyvä toimivuus tilanteissa, joissa vedenpinta sisältää vain vähän seurattavaa materiaalia.

## 2.3 VIRTausMÄÄRITYSOHJELMISTOT

Hankkeessa pintavirtauksen määrittämiseen käytettiin PIVlab-ohjelmiston [13] MatLab-versiota. Ohjelma perustuu avoimeen lähdekoodiin, ja siitä on myös olemassa MatLabista riippumaton täysin ilmainen versio. Ohjelmisto on yleispätevä ja tutkimuksessa yleisimmin käytetty PIV-ohjelma. Ohjelma ei ole erityisesti suunniteltu

virtausmittauksia varten, joten se sisältää tarkoitusta varten turhia ominaisuuksia, eikä mahdollista suoraan virtausmäärän laskentaa. Datan saa kuitenkin ulos ohjelmasta eri tarkoituksiin soveltuvissa muodoissa, joiden avulla virtausmäärän voi laskea. Toinen yleinen PIV-ohjelmisto on Python-pohjainen OpenPiv, jonka koodiin monet muut ilmaisohjelmat pohjautuvat.

RIVeR [14] ja SSIMS-Flow [15] ovat puhtaasti virtausmäärittämisä varten luotuja ilmaisia ohjelmistoja, joita testattiin myös hankkeessa. Ohjelmat ovat merkittävästi uudempia kuin PIVlab, ja myös sitä keskeneräisempiä, mutta silti pääosin toimivia. Molemmat ohjelmistot kykenevät laskemaan joen virtausmäärän uoman poikkileikkauksen avulla videoiden prosessoinnin jälkeen, ja suorittamaan vaaditut geometriset korjaukset sivusta kuvatulle videolle.

RIVeR pohjautuu PIV:n käyttöön kuten suurin osa virtausmäärittämisohjelmistoista, ja on suunniteltu mahdollisimman helppokäyttöiseksi. PIVlab:iin verrattuna ohjelmasta puuttuu myös osa hyödyllisistä kuvanprosessointialgoritmeista. SSIMS-flow puolestaan perustuu PIV:n sijaan samankaltaisiin algoritmeihin kuin videokuvan vakautus. Ohjelma sisältää testatuista ohjelmistoista eniten asetuksia kuvanlaadun parantamista varten, mutta vaatii kaikista eniten aktiivista työtä käyttäjältä.

Kaupallisia ohjelmistoja LSPIV:tä varten ovat esimerkiksi ILA\_5150:n PIVview ja LaVision'in DaVis. Mikäli haluaa käyttää jotain muuta menetelmää, kuten STIV:tä, kaupalliset ohjelmat ovat usein ainoa valmiina saatavilla oleva vaihtoehto.

Virtausmittaus videokuvasta on paljon tutkittu aihe, joten sitä varten on myös hyvin monia ohjelmistoja, joita ei mainita tässä tilan säästämisen vuoksi. Lisätietoa eri ohjelmistoista voi löytää esimerkiksi vuonna 2021 julkaistussa artikkelissa [16]. Wijaya, F., et al. [17] vertailivat myös mainittujen PIVLab'in ja OpenPIV:n lisäksi Fudaa-LSPIV, KLT-IV, ja RIVeR-STIV-ohjelmistojen soveltuvuutta droonikäyttöön, joista sopivimpana he pitivät Fuuda-LSPIV:tä.

Mainitsemisen arvoista on myös se, että osa eri tutkimuksissa mainituista ohjelmistoista ei ole enää helposti saatavilla. Monet ohjelmistoihin ohjaavat linkit eivät enää johda mihinkään, ja osaa ohjelmistoista ei ole enää päivitetty vuosiin, minkä lisäksi ne voivat olla riippuvaisia vanhentuneista taustakirjastoista.

## 2.4 UOMAN MUODON MÄÄRITYS GPR-DROONILLÄ

Pohjanmuotoja eli batymetriaa mitataan usein veden pinnalla kulkevilla aluksilla, mutta myös lentävien droonien on havaittu tuottavan hyviä tuloksia. Esimerkiksi D. Liška et al. [18] hyödynsivät droonia tutkiessaan joen soveltuvuutta liikennöintiä varten. Bandini ym. [19] vertasivat vedessä kulkevien ja lentävien GPR-järjestelmien tuottamaa batymetriadataa ultraäänitutkaan ja havaitsivat, että maatutkadatan olevan luotettavaa yleisesti noin 10 cm tarkkuudella ja toimivan paremmin rehevöityneillä alueilla.

Drooniin liitetyn maatutkan käyttöä on tutkittu maailmalla jonkin verran, mutta Suomessa UOMARI-hanke on todennäköisesti ensimmäinen tutkimusprojekti, joka tarkastelee tätä aihetta. Maatutkan avulla voidaan mitata vedenalaisia rakenteita, ja kun nämä mittaukset yhdistetään tarkkaan paikakatietoon, uoman profiili voidaan määrittää luotettavasti.

Kirkkaissa vesissä tarkka poikkipinta-alaprofiili voidaan tuottaa myös kahden aallonpituuden laserkeilaimella, joka mahdollistaa uoman muodon tarkan mallinnuksen.

## 2.5 VIRTAAMAN LASKENTA

Virtausanalyysiohjelmistojen käyttö edellyttää videokuvaava virtaavasta uomasta sekä tietoa uoman poikkipinta-alaprofiilista, sillä virtaama lasketaan näiden perusteella. Poikkileikkaustiedot yhdistetään pintavirtauksesta saatuihin nopeustietoihin pisteittäin, jolloin tuloksena saadaan arvoja, jotka kuvaavat kyseisen kohdan läpi kulkevaa vesimäärää. Lopuksi nämä arvot kerrotaan vakiolla, joka huomioi sen, että virtausnopeus on veden pinnan alapuolella pienempi kuin pinnalla. Luonnontilaisille joille yleisesti käytetty korjauskerroin on 0,85 [20]. Kun korjatut arvot integroidaan poikkileikkauksen yli, saadaan kyseisen leikkauksen läpi kulkeva kokonaisvesimäärä eli joen virtaama.

## 3. TUTKIMUSKOHTEET

Hankkeessa käytettiin kahta tutkimuskohdetta, Ristijärven sijaitsevaa Emäjokea ja Kolarissa sijaitsevaa Valkeajokea.

Emäjoen tutkimusalue sijaitsi Fortumin Seitenoikean voimalaitokselta noin 600 m länteen (kuva 1). Toinen kohde oli Valkeajoen uoma Kolarissa lähellä vanhaa Rautuvaaran kaivosaluetta noin 1 km Äkäsjoen pohjoiseen (kuva 2).



*Kuva 1. Emäjoen tutkimuskohde 2025.*



*Kuva 2. Valkeajoen tutkimuskohde 2024.*

## 4. TUTKIMUKSESSA KÄYTETYT LAITTEISTOT

Hankkeessa tutkittiin uoman pohjan kuvantamista drooniin liitetyllä maatutkalla sekä virtaaman määrittystä droonin avulla tehdyllä pintavirtausprofiilin videokuvauksella.

Vertailumittaukseen käytettiin ADCP-mittalaitteella varustettua autonomista mittausalutusta. Lisäksi toisen tutkimuskohteen osalta käytettiin

vertailutietona mittauskohdan yläjuoksulla olevan voimalaitoksen virtaamatietoja.

#### 4.1 MITYN GPR-MITTAUSJÄRJESTELMÄ

Mittaustekniikan yksikön GPR-Drooni koostuu miehittämättömästä ilma-aluksesta, maatutkajärjestelmästä sekä turvavarusteesta (kuva 3).



**Kuva 3.** GPR-Drooni Emäjoella syksyllä 2025.

##### *Miehittämätön ilma-alus – drone, drooni*

GPR-Droonimittausjärjestelmä sisältää DJI Matrice 350 RTK -droonin, jossa on RTK (Real Time Kinetic) -tarkkuuspaikannus sekä laaja käyttölämpötila-alue (-20 ... 50 °C) ja IP55 suojaus. Ominaisuudet mahdollistavat toistettavat lentoreitit ja tarkat paikkatiedot mittausdatalle erilaisissa sääolosuhteissa.

##### *Maatutka – GPR (Ground Penetrating Radar)*

Maatutka on 1950-luvulla maantutkimiseen kehitetty mittalaite, jonka toiminta perustuu radiotaajuisten (MHz - GHz) sähkömagneettisten aaltojen lähettämiseen maaperään ja takaisin heijastuneiden signaalien vastaanottamiseen. Heijastuneiden signaalien kulkuajasta voidaan määritellä etäisyys ja voimakkuudesta (amplitudi) eri kerrosten ominaisuuksia, mikäli näiden eri kerrosten aallon etenemisnopeus tunnetaan.

MITYn maatutkajärjestelmä koostuu Radar Systems Zond Aero LF -maatutkasta, SkyHub-tiedonkeruuyksiköstä ja Terrain Follow -pinnan seuranta-järjestelmästä. Maatutkassa on vaihdettavat antenit, joiden avulla mittaustaajuus voidaan valita 100, 150 tai 300 MHz väliltä. Tiedonkeruuyksikkö tallentaa mittausdatan reaaliaikaisesti ja hyödyntää lisäksi hardware stacking -toimintoa mittausten laadun parantamiseksi. Järjestelmään kuuluu lisäksi pinnan seurantajärjestelmä, jonka avulla drooni

säilyttää asetetun etäisyyden maanpintaan automaattilennon aikana.

##### *Lentotoiminta*

GPR-Droonin lentotoimintaa ohjaa Traficom määrittelemät avoimen kategorian A3 -lentosääntöt sekä erilliset määräykset maatutkan käytöstä miehittämättömässä ilma-aluksessa. Kun drooniin liitetään maatutka, sen käyttö edellyttää Traficomin myöntämää lupaa.

MITY:lle myönnetty lupa mahdollistaa maatutkalennot yhden metrin etäisyydellä maanpinnasta valituilla testikohteilla avoimessa kategoriassa A3. Matalalla lentämisestä tukevat lento-ohjelmiston autopilotti- sekä pinnan seurantaominaisuus, jotka mahdollistavat autonomiset lennot asetetulla etäisyydestä maanpinnasta. Lennon aikana etäisyys maanpintaan tai veteen mitataan järjestelmään kuuluvan etäisyystutkan avulla. Vikaantumisen varalle droonissa on automaattisesti toimiva pelastusliivi, joka estää droonin vajoamisen pohjaa teknisessä vikatilanteessa.

#### 4.2 KUVAUSDROONIT

Hankkeen virtauksen videokuvantamiseen käytettiin useampaa droonia, joiden kamerat olivat toisistaan poikkeavia. Kameroina oli RGB-, lämpö- ja multispektrikamera. Taulukossa 1 on listattu käytetyt droonit ja niiden video-ominaisuudet.

**Taulukko 1.** Tutkimuksessa käytetyt kuvausdroonit

Drooni	Kamera-tyyppi	Videon resoluutio
DJI Mini 4 Pro (MITY)	RGB	4K: 3840×2160 FHD: 1920×1080
DJI Mavic 3M3 (MITY)	RGB	4K: 3840×2160 FHD: 1920×1080
	Multispektri	FHD: 1920 x 1080
DJI Matrice 350 RTK (MITY)	P1-RGB	16:9 (1920×1080) 16:9 (3840×2160)
	H30T-FLIR	1280×1024
DJI Mavic 3E (SYKE)		4K: 3840×2160 FHD: 1920×1080

#### 4.3 AUTONOMINEN VIRTAUSMITTAUSLAUTTA

Hankkeen vertailumittauksiin käytettiin Emäjoella Xylem Surfbee Flow Seeker -mittauslauttaa (kuva 4). Surfbee on autonominen, etäohjattava pintalaite (USV, Uncrewed Surface Vehicle), joka on

suunniteltu erityisesti hydrometriisiin mittauksiin, kuten virtausnopeuksien ja virtaamien laskentaan sekä batymetristen profiilien laadintaan. Mittaukset tehtiin lauttaan kiinnitetyllä, monitaajuusakustiikkaan perustuvalla SonTek M9 -ADCP-anturilla ja RiverSurveyor-ohjelmistolla, joita Surfbee on suunniteltu erityisesti tukemaan.

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) on hydroakustinen kaikuluotausteknologia, jolla voidaan mitata veden virtausnopeutta ja sen vaihtelua eri syvyyksillä. Mittaus perustuu Doppler-ilmiön hyödyntämiseen; laitteen lähettämien ääniaaltojen heijastumiseen virtauksen mukana kulkevista partikkeleista ja anturin rekisteröimään vastesignaalin aallonpituuden vaihteluun, jonka pohjalta voidaan määrittää lähetinyksikön ja heijastuspintojen välinen suhteellinen liikenopeus. [21]

Autonominen mittauslautta on suunniteltu toimimaan kokonaan tai osittain itsenäisesti, esimääritetyn luotaussuunnitelman mukaan. Surfbee-lautalle voidaan RiverSurveyor:ssa määrittää luotausasetukseksi jatkuva luotaus, jossa lautta tekee mittaukset suoraan liikkeestä (moving boat), tai vaihtoehtoisesti ns. asemaluotaus, jossa lautta tekee mittaukset paikallaan halutulla pistevälillä ja liikkuu itsenäisesti mittauspisteestä seuraavaan (stationary).



**Kuva 4.** Autonominen virtausmittauslautta Emäjoella syksyllä 2025.

#### 4.4 MANUAALINEN VIRTAUSMITTAUSLAITE

Hankkeen vertailumittaukseen käytettiin Valkeajoella SonTekin FlowTracker -virtaamamittaria, joka on suosittu ammattilaiskäyttöön suunniteltu doppler-anturiin perustuva mittalaite erityisesti pieniin uomiin. Mittalaite soveltuu pieniin uomiin,

joissa voi kahlata ja virtausnopeus on välillä 0,001–4 m/s. Mittaus toteutetaan tekemällä noin 20 mitausta uoman poikkileikkaukselta, joiden perusteella laite tekee laskennan ja muodostaa raportin poikkileikkauksineen.

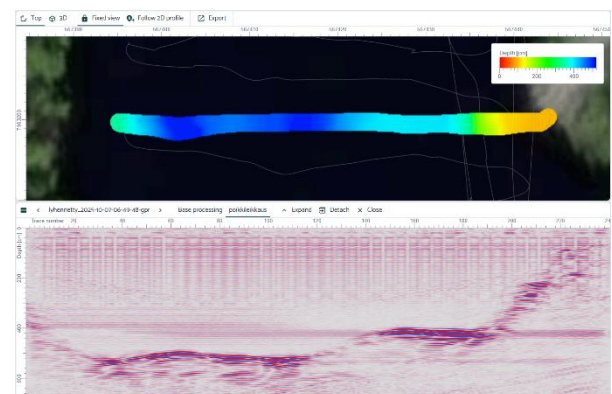
## 5. MITTAUSTULOKSET

Tutkimuskohteiksi valittiin Ristijärven Emäjoki ja Kolarin Valkeajoki. Ristijärvellä mittaukset tehtiin viikoilla 40 ja 41 vuonna 2025 ja Kolarin mittaukset kesällä 2024.

Tuloksien luotettavuuden arviointia varten tarvitaan tieto todellisesta virtaamasta. Emäjoen osalta vertailutuloksena käytettiin Fortumin voimalaitoksen virtaamatietoja sekä autonomisella virtausmittauslaitteistolla tehtyjä ADCP-mittalaitteen mitaustuloksia. Valkeajoen osalta vertailumittaukset toteutettiin manuaalisesti FlowTracker- ja ADCP-mittalaitteilla.

### 5.1 EMÄJOEN POIKKILEIKKAUSPROFIILIN MÄÄRITYS

Ristijärven Emäjoen uoman profiili mitattiin GPR-Droonilla samasta kohdasta, jossa videokuvaukset tehtiin. Kuvassa 5 on esitetty GPR-mittalaitteella saatu poikkileikkausprofiili uomasta.



**Kuva 5.** GPR-Dronen mittausprofiili Emäjoella syksyllä 2025.

GPR-Droonilla mittauksista ei pystytty suorittamaan täysin uoman reunaan asti, sillä uoman reunalla olevat puuston oksat roikkuivat uoman päälle. Dataa interpolointiin lineaarisesti tälle alueelle, valiten rannan veden syvyydeksi 0. GPR-datan avulla luotiin poikkileikkausprofiilit, joiden pinta-alat

olivat noin 190 m<sup>2</sup> viikolla 40 ja 200 m<sup>2</sup> viikolla 41, joita käytettiin virtausmäärien laskuissa.

## 5.2 RISTIJÄRVEN EMÄJOEN MITTAUSTU- LOKSET

Ristijärven uoman osalta mittauksia tehtiin kahdella eri viikolla. Viikolla 40 tehtiin videokuvauksia usealla droonilla eri korkeuksista ja eri videolaaduilla. Viikolla 41 tehtiin videokuvauksia kahdella eri droonilla ja vertailumittauksia Surfbee-virtausmittauslautalla. Molempien viikkojen osalta mittaustuloksia verrattiin voimalaitokselta saatuihin virtaamatietoihin.

Viikolla 40 mittauslentoja tehtiin eri drooneilla eri korkeuksilta, ja saatuja arvoja verrattiin toisiinsa. Useimmiten korkeammalta kuvatut videot antoivat suurempia virtausmääräarvoja kuin matalammalta kuvatut videot, ja samalta korkeudelta samalla droonilla kuvatut videot antoivat samaa suuruusluokkaa olevia tuloksia. Kuvausresoluutiolla ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta lopputuloksiin. Videoiden kuvataajuutta rajattiin prosessoinnin yhteydessä 2–10 Hz:iin käsittelyn nopeuttamiseksi. Muutoin kuvataajuudenkaan ei havaittu vaikuttavan lopputuloksiin.

DJI Mini 4 Pro -dronilla kuvatuista videoista saatiin virtausmääräksi 50 m korkeudella noin 77 m<sup>3</sup>/s, 75 m korkeudella noin 74 m<sup>3</sup>/s, ja 100 m korkeudella noin 80 m<sup>3</sup>/s. 40 m korkeudella otetuista videoista saatiin virtausmääräksi noin 75 m<sup>3</sup>/s ja 79 m<sup>3</sup>/s, joten mittaustulokset heittelivät tällä korkeudella enemmän kuin muilla korkeuksilla.

DJI Zenmuse P1 -kameralla kuvatuista videoista saatiin virtausmääräksi 110 m ja 75 m korkeuksilta 72-73 m<sup>3</sup>/s, ja 50 m korkeudelta noin 70 m<sup>3</sup>/s.

Kuvauksia toteutettiin myös DJI Mavic 3M -dronin multispektrikameralla ja DJI Zenmuse H30T -kameran normaali- ja lämpökuvastoilla. Näiden lentojen antamat virtausmäärät vaihtelivat merkittävästi kuvan häiriöisen ja epävakaan luonteen vuoksi. Tämä ongelma näkyi erityisesti lämpökameran kuvassa, joka seurasi virtausta, antaen merkittävästi liian pieniä tuloksia. Kuvaa koitettiin vakauttaa sekä SSIMS-flow:n avulla, että ulkoisilla ohjelmistoilla, mutta prosessointi heikensi videon laatua eikä siltikään poistanut kaikkea epävakautta. Tämä johtunee siitä, että joen länsipuolella videossa oli saatavilla vain hyvin vähän kiintopisteitä kapean kuvakulman vuoksi.

Viikon 40 videokuvista lasketut virtausmäärät on esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2.** Viikon 40 mittaustulokset

Droni	Video-resoluutio	Korkeus	Virtausmäärä
DJI Mini 4 Pro	3840×2160	40 m	75-79 m <sup>3</sup> /s
		50 m	77 m <sup>3</sup> /s
		75 m	74 m <sup>3</sup> /s
		100 m	80 m <sup>3</sup> /s
DJI Matrice 350 Zenmuse P1	3840×2160	50 m	70 m <sup>3</sup> /s
		75 m	75 m <sup>3</sup> /s
		110 m	75 m <sup>3</sup> /s
DJI Mavic 3M3	1920×1080	50 m	74-85 m <sup>3</sup> /s
		75 m	71-75 m <sup>3</sup> /s
		100 m	82-83 m <sup>3</sup> /s
DJI Matrice 350 H30T	RGB 3840×2160	40 m	62-64 m <sup>3</sup> /s
		50 m	52 m <sup>3</sup> /s
		75 m	55-56 m <sup>3</sup> /s
		100 m	51-54 m <sup>3</sup> /s
		FLIR 1024x512	100 m
	Vakautettu	100 m	56 m <sup>3</sup> /s

Videokuvan perusteella virtausnopeudeksi saatiin 70 -80 m<sup>3</sup>/s, mikä poikkeaa voimalaitoksen antamasta 86 m<sup>3</sup>/s virtausmäärästä enimmillään 20 prosenttia.

Viikon 41 kuvaukset toteutettiin vain DJI Zenmuse P1 -kameralla ja DJI Mavic 3M-dronin multispektrikameralla, keskittyen aiemmin hyväksi havaittuihin kuvauskorkeuksiin. Myös Geologian tutkimuskeskus (GTK) suoritti virtausmittauksia samana ajankohtana ADCP-mittalaitteella varustetulla Surfbee-mittauslautalla. Lautalla tehtiin yhteensä kolme luotausta, joissa virtaamaa mitattiin koko uoman läpäisevältä poikittaislinjalta. Mahdollisimman luotettavan tuloksen saamiseksi käytettiin mittausasetuksena stationary-menetelmää ja kahden metrin mittauspisteväliä.

Dronin videoista lasketut mittausarvot vaihtelivat 135- 150 m<sup>3</sup>/s välillä. Kameroiden tulosten välinen poikkeama selittyy osin DJI Mavic 3M3:n videoiden häiriöillä ja videon pienellä epävakaudella. Vertailumittauslautalla tehdyt mittaukset antoivat virtausmääräksi 150-155 m<sup>3</sup>/s. Sisäisesti RiverSurveyor raportoi kaikkien kolmen lauttamittauksen virhemarginaaliksi < 3 %, ja virtaamatulosten vaihteluväli oli hyvin pieni, noin 1,4 %. Dronikuvalla saadut arvot olivat näitä pienempiä, mutta lähempänä voimalaitoksen ilmoittamia arvoja. Voimalan ilmoittama virtausmäärä oli 143 m<sup>3</sup>/s. Poikkeama mittauslautan ADCP-mittalaitteen antamiin tuloksiin verrattuna oli 5 - 13 %.

Mittauslautan käyttämän uoman poikkileikkauksen pinta-ala oli noin 20 m<sup>2</sup> suurempi kuin droonilaskuissa käytetty. Jos lisätään tämä aluemäärä tasaisesti koko uoman leveydelle, kasvavaa virtausmäärä noin 10 m<sup>3</sup>/s, tuoden sen hyvin lähelle lautauksen vertailuarvoja. Taulukossa 3 on kootusti viikon 41 droonivideokuvista lasketut virtausmäärät, virtausmittauslautan mitaamat sekä voimalaitoksen ilmoittama virtausmäärä.

**Taulukko 3.** Viikon 41 mittaustulokset (\*)Virtausmäärä laskettu 220 m<sup>2</sup> poikkipinta-alalla)

Drooni	Video-resoluutio	Korkeus	Virtausmäärä
DJI Mavic 3Me	1920x1080	100 m	138 m <sup>3</sup> /s
	Multispektri	100 m	136 m <sup>3</sup> /s
DJI Matrice	3840x2160	70 m	140-144 m <sup>3</sup> /s
350 Zenm. P1		100 m	140-145 m <sup>3</sup> /s
*) DJI Matrice	3840x2160	100 m	150-155 m <sup>3</sup> /s
350 Zenm. P1			
Surfbee-mittauslautta	Stationary-mitauks		155 m <sup>3</sup> /s
Vesivoimala	Virtausmittaus		143 m <sup>3</sup> /s

### 5.3 KOLARIN VALKEAJOEN MITTAUSTULOKSET

Suomen ympäristökeskus (SYKE) teki kesällä 2024 virtausmittauksia Valkeajoella käyttäen DJI Mavic 3-T droonia. Vertailumittaukset tehtiin samaan aikaan manuaalisella FlowTrackerilla ja ADCP-virtausmittauslautalla. Valkeajoen video-kuvausaineistoilla laskettiin virtausmäärät ohjelmistoja hyödyntäen. Kaikki videot oli kuvattu samalta alueelta Valkeajoelta, jossa vertailumittaukset antoivat virtausmääräksi 1,24 m<sup>3</sup>/s. Virtauslaskelmat suoritettiin myös SYKEN syvyysmittausten avulla. Videoista lasketut virtausmäärät olivat noin 1,19–1,26 m<sup>3</sup>/s. Tulosten ero oli maksimissaan noin 4 %. Muista videoista poiketen kuvataajuus vaikutti lopputuloksiin merkittävästi, ja sen laskeminen alle alkuperäisen 30 Hz arvoin pudotti laskennalliset virtausmäärät 0,8 m<sup>3</sup>/s kokoluokkaan.

## 6. TULOSTEN ARVIOINTI

Drooniin asennetun maatumukan avulla uoman pohjaprofiili voidaan määrittää tehokkaasti, ja sen perusteella on mahdollista arvioida myös uoman tilavuutta tietyllä alueella. Mittausten toteutettavuuteen vaikuttavat kuitenkin rantojen kasvillisuus, joka voi rajoittaa lentoreittien suunnittelua ja toteutusta. Mikäli tavoitteena on mahdollisimman

tarkka aineisto, mittausalue on suositeltavaa kartoittaa manuaalisesti ohjatulla lennoilla. Tällöin lentoreittien suunnitteluohjelmassa voidaan havainnoida uoman todellinen sijainti suhteessa rantaan, sillä käytettävät karttapohjat ovat usein vain suuntaa antavia ja voivat poiketa todellisesta sijainnista useiden metrien verran.

Yhtenä kartoituksen haasteena voidaan pitää uoman profiilia, sillä jyrkästi syvenevissä kohdissa maatumka ei välttämättä kykene havaitsemaan pohjanmuotoja luotettavasti, minkä vuoksi uoman seinämät joudutaan osittain arvioimaan. On mahdollista, että lentonopeuden pienentäminen parantaisi havaitsemiskykyä, mutta tätä ei ole hankkeessa testattu. Mittauslennot toteutettiin tyypillisesti noin 1 metrin lentokorkeudella ja 1 m/s lentonopeudella.

Emäjoen vertailumittauksissa käytetty autonominen ADCP-lautta todettiin varsin käyttökelpoiseksi tutkimuslaitteeksi jokiuoman virtausmittauksessa. Laitteisto on kevyt ja helposti siirrettävä sekä perinteiseen ns. manuaaliseen lauttaan verrattuna mittaukset ovat sen avulla mahdollista toteuttaa nopeammin ja vaivattomammin. Mittaustapana kokeiltiin Emäjoella stationary-menetelmän lisäksi myös jatkuvaa luotausta (moving boat), mutta uoman pohjan määrittäminen sillä todettiin paikoin epätarkaksi, mahdollisesti joen pohjavirtauksen mukana kulkevan sedimentin aiheuttaman häiriövaikutuksen vuoksi. Stationary-menetelmää voidaan kuitenkin pitää jatkuvaa mittauksia tarkempaan sillä ehdolla, että mittauksen pisteväli on tutkimusympäristö huomioon otettuna riittävän tiheä. Käytetyllä kahden metrin mittausvälikä kolmen luotauksen tulosten vaihteluväli jäi noin 1,4 %:iin. Tuloksia voidaankin johdonmukaisuuden ansiosta pitää lähtökohtaisesti hyvinä, vaikkakin ne olivat jonkin verran droonituloksia sekä voimalan ilmoittamia virtausmääriä suurempia. Mikäli lautalla saadut tulokset ovat lähellä todellisuutta, tässä havaittu noin 10 m<sup>3</sup>/s ero voimalan ilmoittamaan virtaamaan voi selittyä padon ohivirtauksella ja/tai pohjaveden purkautumisella jokeen mittauspaikan ja padon välisellä vyöhykkeellä.

Testatut virtauslaskentaohjelmistot antoivat hyvin samankaltaisia tuloksia. Aiemmissä kappaleissa mainitut tulokset ovat PIVLab:in avulla laskettuja. RIVeR:in avulla lasketut virtausarvot olivat pääosin hieman suurempia viikon 40 videoista ja pienempiä viikon 41 videoista. SSIMS-Flow:n

avulla suoritettiin vähemmän laskuja, mutta kaikki virtausarvot olivat hyvin lähellä vertailutuloksia.

RIVeR on testatuista ohjelmistoista käytännöllisin virtausmittauksiin, kun se toimii. Ohjelmisto ei kyennyt käsittelemään joidenkin videoiden metadataa oikein, joka esti videoiden prosessoinnin suoraan ohjelman avulla. Ohjelma myös jäätyi ilman näkyvää syytä tietyillä videoilla ja parametreilla. Molemmat ongelmat saatiin kuitenkin kierrettyä, ja ohjelmistoa päivitetään vielä aktiivisesti kirjoitushetkellä, joten mainitut bugit saatetaan myös korjata tulevissa versioissa.

SSIMS-Flow on selkeästi kykenevin testatuista ohjelmistoista, mutta vaatii muita ohjelmistoja enemmän aiheeseen perehtymistä. Ohjelman sisältämät eri työkalut videon laadun parantamista varten mahdollistavat huonolaatuisten videoiden käsittelyn merkittävästi muita ohjelmistoja paremmin. Huonosti valitut asetukset voivat kuitenkin heikentää kuvanlaatua tai jopa kaataa ohjelman. Prosessointialgoritmien tarkoituksen ja toimintaperiaatteen ymmärtävä käyttäjä voi kuitenkin välttää nämä ongelmat.

Virtauslaskelmista saadut tulokset olivat yleisesti melko tarkkoja. Suurimmassa osassa videoita ei havaittu merkittävää epävakautta, joten poikkeamat odotetuista arvoista johtuvat luultavasti muista tekijöistä. Eräs todennäköinen syy on viikon 40 kuvausten ai-kana vallinnut säätila, joka aiheutti joen pintaan merkittäviä heijastuksia. Viikon 41 kuvauksien ai-kana oli pilvisempää, ja myös tulokset olivat lähempänä vertausmittauksia. Lämpökameralla suoritettavat kuvaukset olisivat mahdollisesti voineet tuottaa hyviä tuloksia myös näissä olosuhteissa. Silmämääräisesti nämä videot sisälsivät enemmän seurattavia kohteita virtauksessa, ja virtaus oli näkyvää myös alueilla, joissa ei näkynyt vaahtoa. Videot olivat kuitenkin liian epävakaita, ja liian pienellä kuvakulmalla kuvattuja hyvää vakautusta varten, joten tulokset jäivät heikoiksi.

Valkeajoen mittauksen tulokset olivat varsin tarkkoja. Vaikka virtaamassa liikkui vain vähän helposti seurattavaa materiaalia, matala kuvauskorkeus teki pintaväreilystä hyvin näkyvää videoissa. Pintaväreilyyn perustuva seuranta edellytti kuitenkin normaalia korkeampaa kuvataajuutta, koska väreilykuvio muuttuu nopeasti ja menettää muuten tunnistettavuutensa.

## 7. YHTEENVETO

Virtausmittaukset ovat keskeinen osa jokiuomien toiminnan arviointia, sillä niiden avulla voidaan määrittää veden virtausnopeus ja virtaama. Lisäksi tietoja voidaan hyödyntää muun muassa hydrologisessa seurannassa, vesirakentamisessa, vesivoiman tuotannon suunnittelussa sekä jokiekosysteemien tilan arvioinnissa. Perinteisesti virtaamia on mitattu ADCP-laitteilla joko köyteen kiinnitetyllä manuaalisella lauttaversiolla tai autonomisilla mittauslauttoilla. Manuaalinen mittaus vaatii köyden viemistä vastarannalle, mikä voi olla työlästä ja riskialtista. Uudemmat autonomiset mittauslautat helpottavat työtä mahdollistamalla mittaukset rannalta käsin.

UOMARI-hankkeen tavoitteena oli selvittää, voidaanko dronilla tehtävä videokuvaukset ja drooniin liitetty maatumka (GPR) yhdistää toimivaksi virtausmäärittämismenetelmäksi, joka ei vaadi fyysisistä työskentelyä virtaavassa uomassa. GPR-Drooni -järjestelmällä määritettiin joenuoman pohjanmuodot, ja droonin videokuvasta analysoitiin pintavirtausprofiili PIV-menetelmiä hyödyntäen. Saatua GPR-mittauksia verrattiin perinteisen kulkulohkon tuloksiin, ja videokuvan perusteella laskettuja virtausprofiileja verrattiin ADCP-mittauksiin sekä voimalaitosten virtaamatietoihin.

Tutkimusten perusteella dronilla tehty pintavirtauskuvaus ja maatumkan tuottama pohjaprofiili tuottivat pääosin johdonmukaisia tuloksia verrattuna perinteisiin menetelmiin, varsinkin kun huomioitiin laskennassa käytetyn uomanprofiilin pinta-ala. Droonivideoista laskettuihin virtausmääriin vaikuttivat erityisesti kuvauskorkeus, kuvan vakaus ja videon laatu. GPR-mittaukset onnistuivat hyvin lukuun ottamatta tilanteita, joissa puusto esti rannan läheltä lentämisen matalan lentokorkeuden vuoksi. Vaikka videopohjainen virtausmäärittäminen antoi joissain tapauksissa hieman pienempiä arvoja kuin ADCP-mittaukset, tulokset olivat useimmiten lähellä voimalaitosten raportointia. Ero ADCP-mittauksiin selittyi sillä, että virtausmittauslautan käyttämä uomaprofiilin poikkipinta-ala oli noin 20 m<sup>2</sup> suurempi kuin GPR-mittauksella saatu.

Hankkeen tulosten perusteella droonien käyttö virtausmäärittämisessä on lupaava menetelmä, joka mahdollistaa turvallisen, nopean ja koskemattoman mittauksen erityisesti tilanteissa, joissa perinteisiä mittalaitteita on vaikea käyttää. Dronilla voidaan hankkia samanaikaisesti sekä uoman pohjaprofiili

että pintavirtauksen liiketieto, jolloin virtausmäärä voidaan laskea ohjelmistopohjaisesti ilman uomaan menemistä. Tosin tämä vaatisi vielä jatkotutkimusta, jossa kehitettäisiin helposti käytettäviä laskentaohjelmistoja sekä tutkittaisiin menetelmän tarkkuutta ja toistettavuutta erityyppisissä uomissa.

## 8. KIITOKSET

Tutkimus kuuluu Uudet teknologiat uomien ja kaisalaiden kartoitukseen (UOMARI) -tutkimushankkeeseen, joka on saanut rahoitusta Euroopan unionin aluekehitysrahastosta (EAKR), rahoittajana Pohjois-Suomen elinvoimakeskus (Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus).

## VIITTEET

- [1] João P. Leitão, et al. "Urban overland runoff velocity measurement with consumer-grade surveillance cameras and surface structure image velocimetry," in *Journal of Hydrology*, vol. 565, pp. 791-804, 2018, doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.09.001
- [2] Al-mamari, M., et al. "Real-Time Measurement of Flash-Flood in a Wadi Area by LSPIV and STIV," in *Hydrology*, vol. 6, no. 1, 2019, doi: 10.3390/hydrology6010027
- [3] Zielinski, Oliver, and Nick Ruessmeier. "Ocean current observations by infrared and visual Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV).", doi: 10.23919/OCEANS44145.2021.9705808
- [4] Schlobies, K., Välimäki, J.-M., Takala, T. E., Kärkäinen, M., Kuzmin, A., & Lotsari, E. S. (2025). Combining hydroacoustics and large-scale particle image velocimetry: Flow dynamics at Hiitolanjoki River restoration site in Southeast Finland. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 58, 102291. doi:10.1016/j.ejrh.2025.102291
- [5] Tauro, F., Petroselli, A., and Arcangeletti, E. (2016) Assessment of drone-based surface flow observations. *Hydrol. Process.*, 30: 1114–1130. doi: 10.1002/hyp.10698.
- [6] W. Liu, C. Lu, W. Huang. "Large-Scale Particle Image Velocimetry to Measure Streamflow from Videos Recorded from Unmanned Aerial Vehicle and Fixed Imaging System," in *Remote Sensing*, vol. 13, no. 14, 2021, doi: 10.3390/rs13142661.
- [7] Quinn W. Lewis, et al. "Integrating unmanned aerial systems and LSPIV for rapid, cost-effective stream gauging," in *Journal of Hydrology*, vol. 560, pp. 230-246, 2018. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.03.008
- [8] Zhang, Zhen, et al. "River surface target enhancement and background suppression for unseeded LSPIV." *Flow Measurement and Instrumentation* 30 (2013): 99-111.
- [9] Orus, "Introductory practical guide to flow measurement using images", 2025, <https://orus.cam/>.
- [10] WaMSTeC, "Application of surface velocity methods for velocity and open channel discharge measurements.", 2021, <https://www.aha.net.au/resources/national-industry-guidelines/ni-gl-100-11-2019>.
- [11] I. Fujita, S. Komura, "Application of Video Image Analysis for Measurements of River-Surface Flows," PROCEEDINGS OF HYDRAULIC ENGINEERING, vol. 38, no., pp. 733–738, 1994, doi: 10.2208/prohe.38.733.
- [12] I. Fujita, H. Watanabe, R. Tsubaki, "Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The Space-Time Image Velocimetry (STIV)," *International Journal of River Basin Management*, vol. 5, pp. 105–114, Jun. 2007, doi: 10.1080/15715124.2007.9635310.
- [13] W. Thielicke, E. J. Stamhuis, "PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB," *Journal of Open Research Software*, Oct. 2014, doi: 10.5334/jors.bl.
- [14] A. Patalano, C. M. García, A. Rodríguez, "Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV)," *Computers & Geosciences*, vol. 105, pp. 103–114, 2017.
- [15] R. Ljubičić, S. F. Dal Sasso, B. Zindović, "SSIMS-Flow: Image velocimetry workbench for open-channel flow rate estimation," *Environmental Modelling & Software*, vol. 173, p. 105938, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105938>.
- [16] P. Koutalakis, O. Tzoraki, and G. N. Zaimis, "Software utilized for image-based velocimetry methods focused on water

resources”, *Desalination and Water Treatment*, vol. 218, pp. 1–17, 2021.

- [17] Wijaya, F., et al. "Comparative Assessment of Different Image Velocimetry Techniques for Measuring River Velocities Using Unmanned Aerial Vehicle Imagery," in *Water*, vol. 15, no. 22, 2023.
- [18] D. Liška, M. Rybanský, J. Veselý, J. Olivová, M. Popela and S. Vaněk, "Riverbed Analysis using GPR," *2025 International Conference on Military Technologies (ICMT)*, Brno, Czech Republic, 2025, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICMT65201.2025.11061336.
- [19] Filippo Bandini, et al. "Mapping inland water bathymetry with Ground Penetrating Radar (GPR) on board Unmanned Aerial Systems (UASs)," in *Journal of Hydrology*, vol. 616, pp. 128789, 2023.
- [20] S. E. Rantz, "Measurement and computation of streamflow," Jan. 1982. doi: 10.3133/wsp2175.
- [21] Lhermitte, R. & Serafin, R. 1984. Pulse-to-Pulse Coherent Doppler Sonar Signal Processing Techniques. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, Vol. 1, NO. 4.

# Droonilla tuotetut paikkatietoaineistot habitaattimallinnuksen tukena

Jarno Turunen, Kimmo Tolonen, Joonas Kahiluoto, Tuomas Hirvonen  
Suomen ympäristökeskus

## Tiivistelmä

Hankkeessa tutkittiin miten droonilla kuvattuja aineistoja voidaan käyttää tukena uomien habitaattimallinnuksessa ja ympäristövirtaaman määrittelyssä. Tutkimuskohteena oli Kemijoen Pirttikosken ohijuoksu-uoma, jossa virtaama vaihtelee voimakkaasti ja uoma on suuren osan vuodesta lähes kuiva. Aineisto kerättiin kahdella droonikuvauskerralla keväällä ja syksyllä 2024, ja kuvista tuotettiin fotogrammetrisesti ortomosaiikki, pinta-malli, pistepilvi ja 3D-malli. Näitä aineistoja käytettiin hydraulisen 2D-mallin laatimiseen HEC-RAS-ohjelmistolla. Mallinnuksessa tarkasteltiin useita virtaamavaihtoehtoja välillä 5–400 m<sup>3</sup>/s ja arvioitiin niiden vaikutuksia vesitettyyn koskipinta-alaan, veden syvyyteen, virranopeuteen ja lohikalojen poikasille soveltuvan elinympäristön määrään. Habitaattimallinnus perustui kirjallisuudesta koottuihin taimenen, lohen ja harjuksen poikasten syvyys- ja virtauspreferensseihin. Tulosten mukaan vesitetty pinta-ala kasvoi virtaaman lisääntyessä, mutta kalojen poikasille soveltuvan elinympäristön pinta-ala oli suurimmillaan jo melko pienillä virtaamilla, pääosin 5–10 m<sup>3</sup>/s tasolla. Tämä johtui siitä, että suuremmilla virtaamilla uoman syvyys ja virtausnopeus kasvoivat laajoilla alueilla poikasille epäsuotuisiksi. Arvioon liittyi huomattavaa epävarmuutta, mallinnuksen kärkeän solukoon ja kalibrointiaineiston puutteen vuoksi. Tutkimus osoitti, että droonipohjainen uomatopografian kartoitus on tarkka ja kustannustehokas menetelmä hydraulisen mallinnuksen lähtöaineistoksi erityisesti silloin, kun uoma on lähes kuiva.

## 1. JOHDANTO

Vesistöjen patoaminen ja säännöstely vesivoiman ja tulvasuojelun vuoksi on merkittävästi muuttanut monien jokien virtaamaa niiden luontaiseen virtaamarytmiin nähden. Padot muodostavat merkittävän esteen vesieliöstön, erityisesti kalojen, vapaalle liikkumiselle. Lisäksi padotuksella on voimakkaasti muutettu laajoja alueita jokien alkuperäisistä koskielinympäristöistä. Padot ja virtaaman säännöstely heikentävät laajasti jokivesiemme ekologista tilaa. Suurelta osin näiden muutosten vuoksi käytännössä kaikki vaelluskalalajimme ovat kansallisesti määritelty uhanalaisiksi.

EU:n vesipuitedirektiivin (2000/60/EY) tavoitteena on saavuttaa pinta- ja pohjavesien hyvä ekologinen ja kemiallinen tila, sekä estää vesien tilan heikkeneminen. Euroopan komissio on direktiivin toimeenpanoa koskevassa kansallisessa palautteessaan kehottanut Suomea säännöllisesti tarkistamaan vesien käyttöön liittyviä vesitalouslupia direktiivin ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi ja määrittämään sekä toimeenpanemaan ekologisen virtaaman vesienhoitoalueilla. Toisaalta kansalliset tavoitteet, kuten kansallinen kalatiestrategia, ohjaavat rakennettujen jokien kalojen istutuksiin painottuneita hoitotoimenpiteitä kohti toimenpiteitä, jotka edistävät vaelluskalakantojen luontaista lisääntymistä.

Ympäristövirtaamalla tarkoitetaan yleensä selkeästä jokien veden käyttöä ja säännöstelyä, missä huomioidaan yhteiskunnallisten tarpeiden ohella myös jokiekosysteemin toiminnan vaatimaa virtaamaa. Ympäristövirtaaman määrittely ja toimeenpano onkin viime vuosina jossain määrin yleistynyt voimakkaasti rakennettujen jokien vesien- ja kalastonhoidon toimenpiteenä. Yksi potentiaalinen kohde tyyppi ympäristövirtaaman soveltamiselle ovat vesivoimalaitosten niin sanotut ohijuoksutusuomat tai kuivauomat. Hyvin monet vesivoimalaitokset ovat rakennettu siten, että alkuperäinen jokiuoma on padottu säännöstelypadolla, joka ohjaa veden rakennettuun kanavaan, jossa itse voimalaitos sijaistaa. Tämän vuoksi padolla ja kanavalla ohitettu jokialue on usein hyvin vähävetinen tai täysin kuiva riippuen voimalaitoksen lupamääräyksistä koskien jatkuvaa veden juoksumista uomaan tai valitsevasta virtaamatilanteesta ja ohijuoksutusten tarpeesta. Joissakin tapauksissa vesirakenteilla ohitettujen uomien pituus voi olla useita kilometrejä.

Ohijuoksutuskäytössä olevien kuivauomien pysyvää virtausta tai virtaaman kasvattamista on viime vuosina pohdittu entistä enemmän ympäristövirtaaman sovelluskohteena. Merkittävimpiä tällaisia toimenpiteitä ovat maassamme olleet Ala-Koitajoen vanhan uoman virtaaman kasvattaminen vuonna 2013 ja Pielisjoen Kuurnan Laurinvirran vuonna 2019 valmistunut hanke, joissa molemmissa on ohijuoksutusuoman lisävesityksellä ja kunnostuksilla pyritty luomaan lisää kutu- ja poikasaluita erityisesti Saimaan järvilohelle. Varkauden Ämmäkoski on viimeisimpiä kohteita, jossa Huruskosken voimalaitokselta johdettiin Ämmäkosken ohitusuoman kautta pysyvä 10 m<sup>3</sup> /s virtaama vuonna 2022. Muita kohteita, joissa on tehty suunnitelmia vastaavista toimenpiteistä ovat muun muassa Oulujoen Merikoski ja Iijoen Raasakankoski.

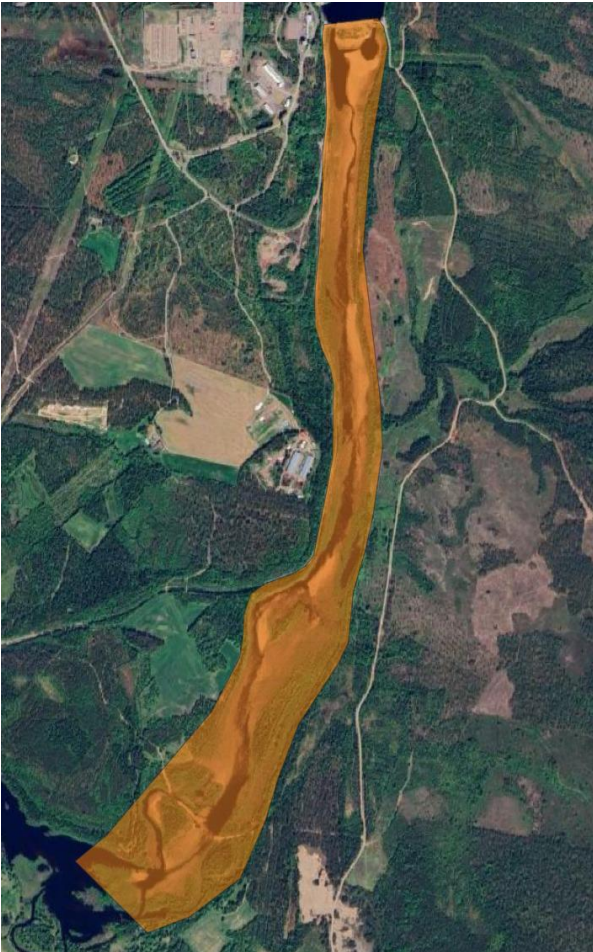
Uomari-hankkeen yhteydessä tutkittiin kuinka Drooneilla tehtävä ilmakuvauus ja uomatopografian kartoitus soveltuu aineistoksi hydraulisiin elinympäristömallinnuksiin.

## 2. TUTKIMUSKOHDDE

Tutkimuskohde sijaitsee Pirttikoskella, noin 65 kilometriä Rovaniemeltä. Pirttikosken voimalaitos on 1950-luvulla Kemijokeen rakennettu tunnelityyppinen voimalaitos. Kemijoki Oy:n omistama voimalaitos koostuu padosta, maapadosta ja noin 2,5 km pitkästä tunnelista. Voimalan kapasiteetti on noin 152 megawattia. Kemijoen keskivirtaama Pirttikosken korkeudelle on noin 330 m<sup>3</sup>/s. Pirttikosken vanha luonnonuoma toimii padon ohijuoksutusuomana, jossa virtaama vaihtelee suuresti voimalan ohijuoksutustarpeen mukaan. Suurimman osan vuodesta uoma on kuitenkin lähes kuiva. Pirttikosken ohijuoksutusuoma on pituudeltaan noin 3,5 km. Mereisillä vaelluskaloilla ei ole pääsyä Pirttikosken alueelle, sillä Pirttikosken ja meren välillä on kuusi voimalaitosta, joista ainoastaan alimmassa, Isohaaran voimalaitoksessa, on kalatiet. Pirttikosken tutkimuskohteella käytiin kaksi kertaa, 27.5.2024 lähellä kevään huippuvirtaamia ja 4.10.2024 matalan virtaaman aikaan. Tutkimusalue on esitetty alla kuvissa 1-3.



**Kuva 1.** Pirttikosken voimalaitos korkean virtaaman aikaan.



**Kuva 2.** Pirttikosken tutkimusalue kartalla.



**Kuva 3.** Pirttikosken uomaa matalan virtaaman aikaan.

### 3. TUTKIMUSMENETELMÄ

Tutkimuksessa tutkittiin, Pirttikosken pohjanmuotoa käyttämällä dronilla otettuja ilmakuvia ja niistä fotogrammetrisen prosessoinnin avulla muodostettuja paikkatietoaineistoja. Lisäksi määritettiin raekokoja muutamista kohdista perinteisin menetelmin visuaalisella asiantuntija-arviolla samalla tallentaen pisteet RTK-GNSS-laitteella (Real Time Kinematic Global Navigation Satellite System).

#### 3.1. DROONILLA TEHTÄVÄ ILMAKUVAVAUUS

Ilmakuvauksiin käytettiin DJI Mavic 3-T droonia, joka on kevyen kokoluokan ammattikäyttöön tarkoitettu laite. Drooni painaa 920 grammaa ja on varustettu RTK-moduulilla, 48 megapikselin RGB-kameralla ja lämpökameralla. Käytetty Drooni on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4.** Ilmakuvauksissa käytetty DJI Mavic 3-T drooni Pirttikosken padon lähistöllä korkean virtaaman aikaan.

Tutkimusalue kuvattiin droonilla molemmilla kerroilla määritetyn lentosuunnitelman pohjalta automaattisesti lentäen. Suunnitelmassa lentokorkeus oli 120 m tuottaen maastoresoluutioltaan (GSD) noin 4 cm/pikseli aineiston. Ilmakuvat käsiteltiin Pix4DMapper-fotogrammetriaohjelmalla ja niistä muodostettiin ortokorjattu mosaiikki, digitaalinen pintamalli, pistepilvi ja 3D-malli.

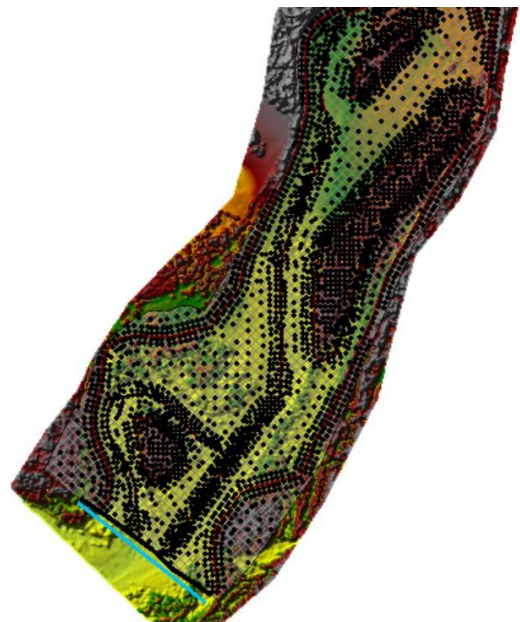
Tuloksia jatkojalostettiin ja niistä tehtiin laskentaa Qgis-ohjelmalla. Jatkokäsittelyssä muun muassa muutettiin maastoresoluutiota eri käyttötarkoituksiin sopivaksi, luokiteltiin kuva-aineistoa ja pyrittiin määrittämään pinnan karkeutta & raekokoa.

### 3.2. HYDRAULINEN MALLINNUS

Dronen ilmakuvauksella tuotettua uoman korkeusmallia käytettiin uoman hydrauliseen mallinnukseen. Mallinnukseen tehtiin avoimella HEC-RAS-ohjelmistolla (HEC-RAS 6.6). Mallinnuksella simuloitiin kuinka uoman vesipinta-ala, syvyys ja virrannopeus muuttuvat erilaisilla ohjauksutusvirtaamilla, jotta voitiin arvioida erilaisten ympäristövirtaamien vaikutusta elinympäristöjen määrään. Simuloitavina virtaamina käytettiin 5, 10,

20, 40, 80, 100, 200 ja 400 m<sup>3</sup>/s tasaista ja pysyvää ohjauksutusta.

Mallinnus tehtiin 2D-mallinnuksena, jossa uomaan rajattiin hydraulisten muuttujien laskenta-alue, sekä virtauksen laskenta-alueelle veden tulo- ja purkautumislinja. Laskenta-alueelle muodostettiin laskentasolurasteri, jonka solujen peruskoko oli 20\*20 m. Melko suurta solukokoa käytettiin tutkittavan alueen laajuuden ja käytettävissä olleen tietokoneen rajallisen laskentatehon vuoksi. Laskennan ja simulaatioiden tarkentamiseksi uoma-geometriaan lisättiin maaston taiteviivoja kohtiin, joissa maaston korkeus muuttuu nopeasti, kuten uoman molempiin rantapenkkeihin, saarekkeiden reunoille, sekä pituussuuntaiselle linjalle, missä uoman syvin kohta sijaitsee. Mallinnuksen tarkentamiseksi solujen kokoa pienennettiin taiteviivojen ympärillä siten, että rantapenkan viivojen ympärillä solukoko oli 10\*10 m ja uoman syvintä kohtaa kulkevan viivan kohdalla 5\*5 m. Laskenta-alueen solujen Manningin karkeuskertoimena (n) käytettiin arvoa 0,04, mikä vastaa karkeasta kivi-materiaalista koostuvaa luonnonjoen pohjaa. Uoman alueille, joissa kasvoi matalakorkuista puustoa, valittiin kertoimeksi 0,06 ja alueille, missä esiintyi karkeaa ja epäsäännöllistä peruskalliota valittiin kertoimeksi 0,08. Manningin kerroin kuvaa maaston pinnan karheuden aiheuttamaa virtauksen vastustusta, millä on vaikutusta veden korkeuteen ja virrannopeuteen.



**Kuva 5.** Pirttikosken uoman alaosan HEC-RAS korkeusmalli, laskenta-alue ja -solurasteri. Solujen keskellä olevat pisteet ovat laskentapisteitä Punaiset viivat

kuvaavat maaston taiteviivoja. Laskenta-alueelle soluja on muodostettu tiheämmin taiteviivojen ja erilaisten uomarakenteiden, kuten saarekkeiden alueelle.

Hydraulinen 2D-malli ajettiin erilaisilla virtaamilla käyttäen epävakaa virtaaman mallinnusta ("Unsteady flow"). Vaikka mallinnuksen tavoitteena oli tutkia elinympäristöjen pinta-alaa staattisella ympäristövirtaamalla, vaatii HEC-RAS -ohjelman 2D-mallinnus, vaihtelevan virtaamadatan käyttöä. Mallissa virtaama simuloitiin viiden vuorokauden ajan siten, että virtaama kasvatettiin tasaisesti ensimmäisen vuorokauden aikana simuloitavaan tavoitevirtaamaan ja sen jälkeen simuloitiin neljän vuorokauden ajan veden syvyyden ja virrannopeuden vaihtelua kyseisellä vakiovirtaamalla, jotta mallin lopputulos stabiloituu. Mallin tulovirtaaman reunaehtona (boundary conditions) käytettiin virtaaman hydrografia ja laskenta-alueen alaosan reunaehtona normaalisyyvyttä, joka määritettiin uoman kaltevuuden perusteella (n. 0,004). Virtaaman simuloinnissa syvyyden ja virrannopeuden laskenta suoritettiin 30 sekunnin välein.

### 3.3. HABITAATTIPREFERENSSIT

Virtakutuisille ja vaelluskaloille sopivien poikashabitaattien mallinnuksen pohjaksi koottiin kirjallisuudesta tiedot taimenen, lohen ja harjuksen poikas- ja kutuhabitaatteja koskevista vaatimuksista. Tiedot kerättiin koskien veden syvyyteen, virrannopeuteen ja pohjan raekokoon liittyviä laji- ja ikäluokkakohtaisia preferenssejä. Taimenen kohdalla tiedot kerättiin koskien kutuhabitaatteja (Louhi ym. 2008), 0+, 1+ ja  $\geq 2+$  ikäluokkien (Huusko ym. 2003) habitaattipreferenssejä. Lohella habitaattipreferenssitiedot koostettiin koskien kutupaikkoja (Louhi ym. 2008), 0+ ja 1+ ikäluokkia (Heggenes 1996, Huusko ym. 2003). Harjuksella habitaattivaatimuksia selvitettiin koskien kutupaikkoja sekä 0+ ja 1+ ikäluokkia (Nykänen & Huusko 2002, Nykänen & Huusko 2003, Huusko ym. 2003). Kalojen habitaattivaatimukset pyrittiin pääsääntöisesti keräämään pohjautuen pohjoismaisiin tutkimuksiin tai meta-analyysimäisiin koostuksiin.

Elinympäristömallinnukset rajattiin lohen 0+ ja 1+ ikäluokkiin, taimenen 0+, 1+ ja  $\geq 2+$  sekä paikallisen kalaston osalta harjuksen 0+ ja 1+ ikäluokkiin. Elinympäristömallinnusta ei siis tehty kutualueille.

Näille lajeille ja niiden eri ikäluokille määritellyillä preferenssikäyrillä määritettiin soveltuvan elinympäristön pinta-ala (WUA). Pinta-alan laskennassa huomioitiin vain hydraulisen mallin tuottaman 1\*1 m rasterisolujen virrannopeus ja syvyys, mutta ei solun kivimateriaalin raekokoa. WUA laskettiin seuraavasti.

$$WUA = \sum_{i=1}^n (A_i * S_{d,i} * S_{v,i}),$$

missä  $A_i$  on rasterisolun  $i$  pinta-ala,  $S_{d,i}$  solun  $i$  veden syvyyden soveltuvuus (0-1) ja  $S_{v,i}$  solun  $i$  virrannopeuden soveltuvuus tarkasteltavalla lajille ja sen ikäluokalle.

### 3.4. MAASTOMITTAUKSET

Uomasta kartoitettiin tarkalla satelliittipaikannuslaitteella (Emlid Reach RS3) eri raekokoja edustavia pisteitä mahdollista vertailua varten. Raekoko määritettiin silmämääräisesti asiantuntija-arviona. Paikannuslaite käyttää mobiiliverkon kautta saatavaa Maanmittauslaitoksen FINPOS-korjauspalvelua. Menetelmässä määritetään mittauskohteen läheisyyteen virtuaalinen tukiasema (Virtual Reference Station, VRS), jota käytetään RTK-mittauksen tukiasemana (Real-time Kinematic) määrittämään tarkka sijainti paikannussatelliittien perusteella (Global Navigation Satellite System, GNSS).

## 4. MITTAUS- JA MALLINNUSTULOKSET

### 4.1. DROONIAINEISTOT

Drooniaineistojen käsittely on suhteellisen suoraviivaista. Kerätty kuva-aineisto syötetään ohjelmistoon, valitaan prosessointiasetukset ja lisätään mahdolliset maastokontrollipistemittaukset ja ohjelmisto hoitaa laskennan. Tuotettuja paikkatietoaineistoja voi tarkastella prosessointiohjelmassa ja tallentaa muihin paikkatieto-ohjelmiin soveltuvissa muodoissa.

### 4.2. HABITAATTIPREFERENSSIT

Taimenen optimaalisen kutuhabitaatin syvyys on kirjallisuuden perusteella 0,2–0,5 metriä, keväällä kuoriutuneiden taimenen poikasten (0+) optimisyvyys on 0,1–0,4 m, yksivuotiaiden (1+) taimenen poikasten 0,3–0,6 m ja kaksivuotiaiden tai sitä vanhempien ( $\geq 2+$ ) poikasten 0,4–0,8 m (Taulukko

1). Tämän perusteella kesän vanhat poikaset pysyttelevät lähellä kuoriutumisaikoihinsa tai hakeutuvat jopa niitä matalammille alueille. Taimenen poikasten reiviin optimisyvytydet kasvavat poikasten kasvun myötä. Optimivirrannopeus taimenen 0+ ikäluokassa on 0,01–0,5 m s<sup>-1</sup>. Yksivuotiailla tai sitä vanhemmilla taimenilla optimivirrannopeus on 0,2–0,6 m s<sup>-1</sup>. Kesän vanhat poikaset oleskelevat osin kutuhabitaatteja miedommassa virrassa. Habitaattipreferenssien perusteella taimenen poikaset hakeutuvat kuitenkin myöhemmin kesinä nopeammin virtaaville alueille. Optimiraekoko kutuhabitaatilla on 16–64 mm, kesän vanhoilla poikasilla (0+) 16–64 mm ja yksivuotiailla tai sitä vanhemmilla taimenilla 64–512 mm.

**Taulukko 1.** Taimenen habitaattipreferenssit (syvyys, raekoko, virrannopeus) koskien kutupaikkoja sekä ikäluokkia 0+, 1+ ja ≥2+. Kutupaikkojen ja eri taimenikäluokkien habitaattioptimit (habitaattipreferenssi >0,7) on lihavoitu taulukossa. Kirjallisuusviitteet: A = Louhi ym. (2008), B = Huusko ym. (2003).

Syvyys (m)	Habitaattipreferenssi (0-1)			
	Kutu <sup>A</sup>	0+ <sup>B</sup>	1+ <sup>B</sup>	≥2+ <sup>B</sup>
0	0,00	0,00	0,00	0,00
0,01–0,10	0,52	0,20	0,27	0,00
0,11–0,20	0,67	<b>0,80</b>	0,47	0,10
0,21–0,30	<b>0,87</b>	<b>1,00</b>	0,66	0,32
0,31–0,40	<b>1,00</b>	<b>0,90</b>	<b>0,82</b>	0,57
0,41–0,50	<b>0,70</b>	0,60	<b>1,00</b>	<b>0,75</b>
0,51–0,60	0,60	0,35	<b>0,91</b>	<b>0,93</b>
0,61–0,70	0,45	0,15	0,57	<b>1,00</b>
0,71–0,80	0,30	0,05	0,29	<b>0,83</b>
0,81–0,90	0,12	0,00	0,06	0,52
0,91–1,00	0,10	0,00	0,01	0,20
1,01–1,10	0,08	0,00	0,00	0,00
1,11–1,20	0,01	0,00	0,00	0,00
≥1,21	0,00	0,00	0,00	0,00
Virrannopeus (m s <sup>-1</sup> )	Kutu <sup>A</sup>	0+ <sup>B</sup>	1+ <sup>B</sup>	≥2+ <sup>B</sup>
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,01–0,10	0,30	<b>0,90</b>	0,45	0,40
0,11–0,20	0,43	<b>1,00</b>	0,62	0,60
0,21–0,30	<b>0,80</b>	<b>0,95</b>	<b>0,83</b>	<b>0,79</b>
0,31–0,40	<b>0,95</b>	<b>0,85</b>	<b>0,95</b>	<b>0,90</b>
0,41–0,50	<b>1,00</b>	<b>0,75</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
0,51–0,60	<b>0,80</b>	0,65	<b>0,90</b>	<b>0,90</b>
0,61–0,70	0,50	0,57	0,65	0,63
0,71–0,80	0,30	0,30	0,41	0,40
0,81–0,90	0,17	0,15	0,20	0,24
0,91–1,00	0,06	0,05	0,05	0,10
1,01–1,10	0,02	0,00	0,00	0,00
1,11–1,20	0,00	0,00	0,00	0,00
Raekoko (mm)	Kutu <sup>A</sup>	0+ <sup>B</sup>	1+ <sup>B</sup>	≥2+ <sup>B</sup>
<0,25	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25–2	0,17	0,00	0,00	0,00

2–8	0,42	0,00	0,00	0,00
8–16	0,60	0,00	0,00	0,00
P16–32	<b>0,91</b>	0,15	0,10	0,10
32–64	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	0,57	0,56
64–128	0,40	<b>1,00</b>	<b>0,95</b>	<b>0,86</b>
128–256	0,08	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
256–512	0,00	0,55	<b>0,75</b>	<b>1,00</b>
>512	0,00	0,35	0,20	0,45
Kallio	0,00	0,00	0,00	0,00

Lohen optimaalisten kutuhabitaattien syvyys ja kesän vanhojen poikasten (0+) suosima syvyysalue ovat samat (0,2–0,5 m) (Taulukko 2). Vanhemmat lohen poikaset (≥1+) suosivat jonkin verran syvempiä alueita 0+ ikäsiin poikasiin nähden. Virrannopeuspreferenssien perusteella kesän vanhat lohen poikaset (0+) hakeutuvat kutuhabitaateilta (0,4–0,7 m s<sup>-1</sup>) pääosin hitaamman virran alueille (0,1–0,6 m s<sup>-1</sup>), mutta seuraavana kesänä poikasten optimaalinen virrannopeus kattaa laajemmin myös nopeamman virran alueita (0,1–0,8 m s<sup>-1</sup>). Lohen optimaalisen kutuhabitaatin raekoko on 16–128 mm. Kesän vanhat poikaset (0+) hakeutuvat kutuhabitaateilta karkeamman materiaalin pohjille (32–256 mm). Toisena kesänä lohen poikasten optimaalinen pohjan raekoko on edellistä kesää karkeampi (64–512 mm).

**Taulukko 2.** Lohen habitaattipreferenssit (syvyys, raekoko, virrannopeus) koskien kutupaikkoja sekä ikäluokkia 0+ ja 1+. Kutupaikkojen ja eri ikäluokkien habitaattioptimit (habitaattipreferenssi >0,7) on lihavoitu taulukossa. Kirjallisuusviitteet: A = Louhi ym. (2008), B = Huusko ym. (2003) ja C = Heggenes ym. (2002).

Syvyys (m)	Habitaattipreferenssi (0-1)		
	Kutu <sup>A</sup>	0+ <sup>B,C</sup>	1+ <sup>B</sup>
0	0,00	0,00	0,00
0,01–0,10	0,10	0,14	0,03
0,11–0,20	0,45	0,47	0,30
0,21–0,30	<b>0,75</b>	<b>0,85</b>	0,68
0,31–0,40	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,93</b>
0,41–0,50	<b>0,85</b>	<b>0,83</b>	<b>1,00</b>
0,51–0,60	0,62	0,56	<b>0,97</b>
0,61–0,70	0,45	0,33	0,63
0,71–0,80	0,30	0,18	0,43
0,81–0,90	0,25	0,11	0,23
0,91–1,00	0,25	0,06	0,10
1,01–1,10	0,25	0,02	0,00
1,11–1,20	0,25	0,00	0,00
≥1,21	0,00	0,00	0,00
Virrannopeus (m s <sup>-1</sup> )	Kutu <sup>A</sup>	0+ <sup>B,C</sup>	1+ <sup>B</sup>
0,00	0,00	0,00	0,00
0,01–0,10	0,05	0,50	0,60
0,11–0,20	0,20	<b>0,87</b>	<b>0,90</b>
0,21–0,30	0,45	<b>1,00</b>	<b>0,95</b>

0,31–0,40	0,55	<b>0,99</b>	<b>1,00</b>
0,41–0,50	<b>0,80</b>	<b>0,93</b>	<b>1,00</b>
0,51–0,60	<b>1,00</b>	<b>0,73</b>	<b>0,87</b>
0,61–0,70	<b>0,73</b>	0,54	<b>0,79</b>
0,71–0,80	0,55	0,39	<b>0,71</b>
0,81–0,90	0,33	0,28	0,48
0,91–1,00	0,20	0,19	0,25
1,01–1,10	0,05	0,03	0,20
1,11–1,20	0,00	0,00	0,00
Raekoko (mm)	Kutu <sup>A</sup>	0+ <sup>B, C</sup>	1+ <sup>B</sup>
Hieno <0,25	0,00	0,00	0,00
Hiekka 0,25–2	0,03	0,06	0,00
Hieno sora 2–8	0,20	0,20	0,00
Karkea sora 8–16	0,45	0,63	0,00
Pieni pebble 16–32	<b>0,85</b>	0,69	0,10
Iso pebble 32–64	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	0,57
Pieni cobble 64–128	<b>0,70</b>	<b>0,91</b>	<b>0,65</b>
Iso cobble 128–256	0,25	<b>0,70</b>	<b>0,83</b>
Lohkareet 256–512	0,00	0,34	<b>1,00</b>
Isot lohkareet >512	0,00	0,14	0,68
Kallio	0,00	0,00	0,00

Harjuksen optimaalinen kutuhabitaatti sijoittuu kirjallisuuden perusteella 0,2–0,7 metrin syvyyteen (Taulukko 3). Harjuksen poikasten (0+ ja 1+) suosimat syvyydet vaihtelevat kirjallisuuden perusteella suuresti kattaen varsin syviäkin alueita. Harjuksen optimaalisen kutuhabitaatin virrannopeus vaihtelee 0,4–0,7 m s<sup>-1</sup>. Harjuksen poikasten optimaaliset virrannopeudet ovat kutuhabitaatteja pienempiä (0–0,5 m s<sup>-1</sup>). Harjuksen optimaalisten kutuhabitaattien raekoko on 8–32 mm. Poikasten suosimien pohjien raekoko on varsin vaihteleva.

*Taulukko 3. Harjuksen habitaattipreferenssit (syvyys, raekoko, virrannopeus) koskien kutupaikkoja sekä ikäluokkia 0+ ja 1+. Kutupaikkojen ja eri ikäluokkien habitaattioptimit (habitaattipreferenssi >0,7) on lihavoitu taulukossa. Kirjallisuusviitteet: B = Huusko ym. (2003), D = Nykänen & Huusko (2002) ja E = Nykänen & Huusko (2003).*

Syvyys (m)	Habitaattipreferenssi (0-1)		
	Kutu <sup>A</sup>	0+ <sup>B, C</sup>	1+ <sup>B</sup>
0	0,00	0,00	0,00
0,01–0,10	0,00	0,01	<b>0,79</b>
0,11–0,20	0,72	0,60	<b>0,94</b>
0,21–0,30	<b>0,93</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>
0,31–0,40	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,98</b>
0,41–0,50	<b>0,97</b>	<b>1,00</b>	<b>0,77</b>
0,51–0,60	<b>0,85</b>	<b>1,00</b>	0,15
0,61–0,70	<b>0,72</b>	<b>1,00</b>	0,18
0,71–0,80	0,60	<b>1,00</b>	0,36
0,81–0,90	0,50	<b>1,00</b>	0,66
0,91–1,00	0,45	<b>1,00</b>	<b>0,91</b>
1,01–1,10	0,40	<b>0,80</b>	0,64
1,11–1,20	0,20	0,40	0,05

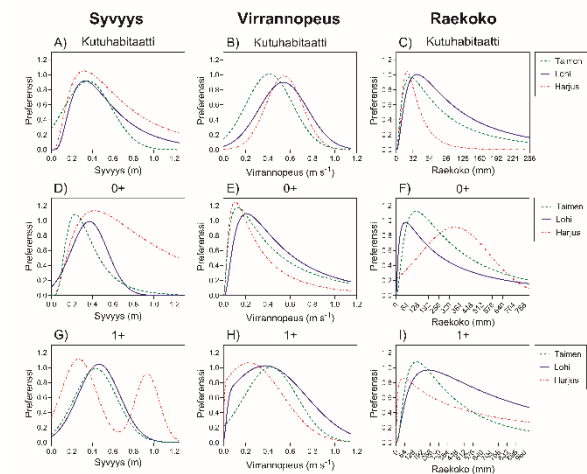
≥1,21	0,00	0,00	0,00
Virrannopeus (m s <sup>-1</sup> )	Kutu <sup>A</sup>	0+ <sup>B, C</sup>	1+ <sup>B</sup>
0,00	0,00	0,00	0,00
0,01–0,10	0,00	<b>1,00</b>	<b>0,96</b>
0,11–0,20	0,05	<b>1,00</b>	<b>0,98</b>
0,21–0,30	0,23	<b>0,80</b>	<b>0,97</b>
0,31–0,40	0,45	<b>0,80</b>	<b>1,00</b>
0,41–0,50	<b>0,84</b>	<b>1,00</b>	<b>0,94</b>
0,51–0,60	<b>1,00</b>	0,00	0,55
0,61–0,70	<b>0,81</b>	0,00	0,36
0,71–0,80	0,41	0,00	0,33
0,81–0,90	0,22	0,00	0,00
0,91–1,00	0,10	0,00	0,00
1,01–1,10	0,00	0,00	0,00
1,11–1,20	0,00	0,00	0,00
Kiven raekoko (mm)	Kutu <sup>A</sup>	0+ <sup>B, C</sup>	1+ <sup>B</sup>
<0,25	0,00	0,00	0,00
0,25–2	0,00	<b>1,00</b>	0,00
2–8	0,10	0,00	0,58
8–16	<b>0,78</b>	0,00	<b>0,83</b>
16–32	<b>1,00</b>	0,00	0,30
32–64	0,50	<b>0,80</b>	<b>1,00</b>
64–128	0,05	0,30	<b>0,83</b>
128–256	0,00	0,50	<b>0,77</b>
256–512	0,00	<b>1,00</b>	<b>0,76</b>
>512	0,00	0,00	0,08
Kallio	0,00	0,00	0,00

Taimenen, lohen ja harjuksen optimaaliset kutuhabitaatit osuvat suunnilleen samaan syvyyteen (Kuva 6 A). Virrannopeuden suhteen taimenen optimaalinen kutuhabitaatti osuu hieman lohta ja harjusta hitaamman virran alueille (Kuva 6 B). Lohi on näistä kolmesta lajista virrannopeuden suhteen vähiten vaateliias ja sen toleranssi on siten virrannopeuden suhteen lajeista suurin. Kutuhabitaatin raekoko-optimi on selvästi suhteessa kalalajien koon (Kuva 6 C). Pienikokoisin harjus on lajeista vaateliain vaatien selvästi pienimmän raekoon kutupaikoilleen. Taimen ja lohi kutevat selvästi harjusta karkeammilla pohjilla ja kutuhabitaatin raekoko vaihtelee niillä enemmän.

Taimenen kesän vanhat poikaset (0+) suosivat hivenen lohta matalampaa veden syvyyttä, kun taas harjuksen poikasilla ei ole yhtä selvää preferenssiä tietyn syvyyden suhteen (Kuva 5 D). Harjuksen kesän vanhat poikaset oleskelevat hitaammassa virrassa kuin vastaavan ikäiset lohen ja taimenen poikaset (Kuva 6 E). Lohen kesän vanhojen poikasten optimiraekoko on lajeista hienojakoisin ja harjuksella lajeista karkein (Kuva 6 F).

Kaksikesäisten (1+) taimenen ja lohen poikasten suosimat syvyydet ovat samankaltaiset (optimi 0,4–0,5 m) (Kuva 6 G). Samanikäisen harjuksen

poikasen suosiman syvyyden jakauma oli kaksihiippuinen, jonka perusteella harjuksen poikaset viihtyisivät parhaiten matalilla noin 20 cm syvillä paikoilla sekä noin 1 metrin syvyydessä. Kaksikesäisen (1+) harjuksen optimivirrannopeus on vastaavan ikäistä lohta ja taimenta hieman pienempi (Kuva 6 H). Vastaavasti kaksikesäisten lohienpoikasten toleranssi virrannopeuden suhteen on harjasta ja taimenta jonkin verran laajempi. Kaksikesäisten (1+) harjuksen poikasten raekoko-optimi on taimenta ja harjasta pienempi (Kuva 6 I). Kaksikesäiset lohienpoikaset ovat pohjan raekoon suhteen lajeista vähiten vaateliaita, ja niitä esiintyy enemmän myös karkeamman raekoon pohjilla.

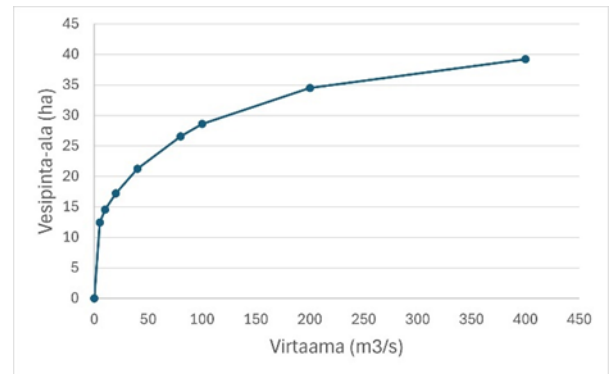


**Kuva 6.** Taimenen, lohien ja harjuksen kutuhabitaattien ja 0+ sekä 1+ poikasten habitaattioptimit syvyyden, virrannopeuden ja pohjan raekoon suhteen. Habitaattioptimeja kuvaamaan on kussakin tapauksessa sovitettu aineistoon parhaiten sopiva käyrä kolmesta vaihtoehdosta (gaussian, lognormal tai sum of two gaussians) Akaike informaatio kriteerin (AIC) perusteella.

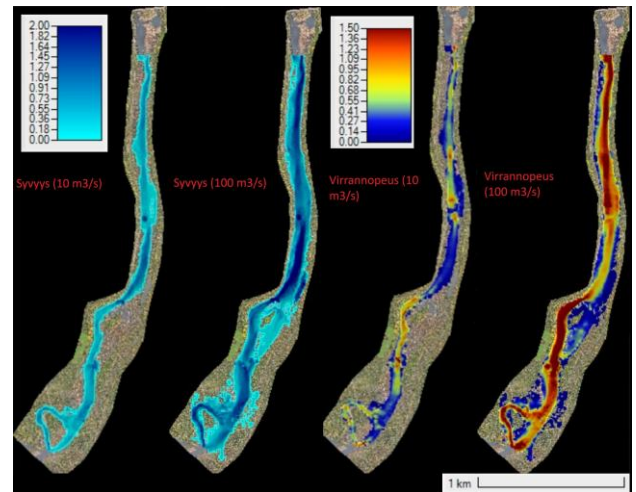
### 4.3. MALLINNUSTULOKSET

Mallinnuksen perusteella Pirttikosken vesitetty pinta-ala 5 m<sup>3</sup>/s virtaamalla oli noin 12,4 ha. Vesitetty pinta-ala kasvoi melko nopeasti noin 100 m<sup>3</sup>/s virtaamaan asti (n. 28,6 ha), minkä jälkeen pinta-alan kasvu per juoksutettava kuutio hidastui (Kuva 7). 400 m<sup>3</sup>/s virtaamalla vesitetty pinta-ala oli noin 39,2 ha. 5 m<sup>3</sup>/s virtaama tuottaisi siis noin 32 % ja 100 m<sup>3</sup>/s noin 73 % mallinnetun maksimivirtaaman pinta-alasta. 10 m<sup>3</sup>/s virtaamalla pinta-ala olisi noin 14,5 ha, mikä vastaa 37 % maksimivirtaaman pinta-alasta. Virrannopeus ja uoman syvyys

kasvoivat melko nopeasti virtaaman kasvaessa (Kuva 8).

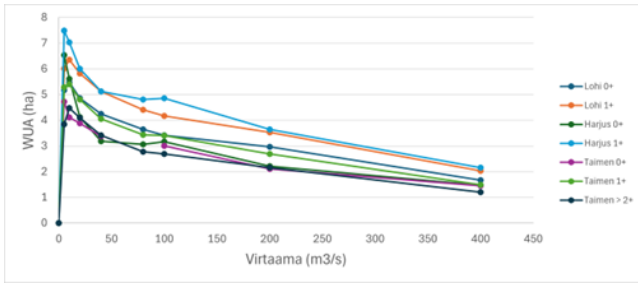


**Kuva 7.** Mallinnettu vesipinta-alan ja virtaaman suhde Kemijoen Pirttikoskella.



**Kuva 8.** Mallinnettu syvyyden ja virrannopeuden vaihtelu Pirttikoskessa 10 ja 100 m<sup>3</sup>/s virtaamalla.

Lohikalojen eri ikäryhmien soveltuvan elinympäristön pinta-ala suhteessa juoksutettavaan virtaamaan oli suurimmillaan lajista riippuen 5-10 m<sup>3</sup>/s virtaamalla (Kuva 9). Ottaen huomioon, että Pirttikosken keskivirtaama on noin 330 m<sup>3</sup>/s, saavutettiin suurin käyttökelpoinen pinta-ala siis suhteellisesti hyvin pienillä virtaamilla, mitä voi pitää jokseenkin yllättävänä. Virrannopeudet ja syvyydet kasvoivat mallin mukaan laajalla alueella lohikalojen poikasille heikosti soveltuvaksi virtaaman kasvaessa ja käyttökelpoista elinympäristö oli eniten uoman kapeilla reuna-alueilla (kuva 8). Eniten käyttökelpoista pinta-alaa syntyi harjuksen 1+ ikäisille poikasille 5 m<sup>3</sup>/s virtaamalla (n. 7,5 ha) ja lohien 1+ poikasille 10 m<sup>3</sup>/s virtaamalla (noin 6,3 ha).



**Kuva 9.** Eri lohikalajien ja niiden ikäryhmien käyttökelpoisen elinympäristön (WUA) pinta-ala suhteessa virtaamaan.

#### 4.4. TULOSTEN VISUALISOINTI

Droonilla tuotettu ortomosaiikki ja pintamalli on esitetty mahdollisimman suurina raportin sivulle mahtuvina kuvina liitteessä 1. Aineiston koko ja tarkkuus ei välity täysin pienistä kuvista, joiden koko on megatavun luokkaa verrattuna alkuperäisen laadun n. 7 gigatavuun.

### 5. TULOSTEN HYÖDYNNETTÄVYYS

Droonilla tehtävä korkeuden mittaus ja oma topografian kartoitus osoittautui erittäin käyttökelpoiseksi ja kustannustehokkaaksi menetelmäksi erittäin tarkan korkeusmallin luomiseksi laajalle alueelle. Menetelmä mahdollistaa kattavan ja yksityiskohtaisen ympäristövirtaamamallinnuksen vastaavissa kohteissa. Tässä työssä käytetty tekniikka kuitenkin osoitti, että uoman täytyy olla lähes kuiva, jotta korkeuden saa tarkasti mitattua. Pirttikosken tapauksessa alueella oli joitakin syvempiä painanteita, joissa veden syvyys esti kameraa näkemästä pohjaan asti ja korkeus malliin syntyi pieniä katvealueita, joissa mittaus ei ollut tarkka.

Hydraulisen mallin tulosten tulkinnassa on lukuisia epävarmuustekijöitä. Vaikka lohikalajien poikaset pääasiassa suosivatkin elinympäristöinä matalia ja kohtalaisen virtausnopeuden omaavia rantakivikoita, johtuu tämä painotus habitaattipreferensseissä osin myös siitä, että poikasista on vaikeampi saada havaintoja syvemmistä vesistä. Nykyään tiedetään, että esimerkiksi lohien ja taimenen kutupesä ja poikasista voi esiintyä runsaasti huomattavasti syvemmälläkin virta-alueilla (esim. Syrjänen ym. 2020) Tämän vuoksi mallinnusten tulokset todennäköisesti aliarvioivat käyttökelpoisen elinympäristön määrää erityisesti suuremmilla virtaamilla. Lisäksi mallinnus huomioi tässä

tapauksessa vain kahden fyysisen elinympäristökijän habitaattipreferenssissä, eikä esimerkiksi kivimateriaalin raekokoa, lajien välisten vuorovaihtusten, kuten predaation vaikutusta tai vaihtelevia virtausolosuhteiden vaikutuksia, kuten suuria ohijuoksutuksia. Lisäksi veden laatu voi olla rajoittava tekijä, vaikkakin tuskin Pirttikosken tapauksessa. Lajit voivat myös suosia eri suuruista virtaamaa. Vaikka erityisesti pohjoisilla Atlantin valtameren alueilla, kuten Norjassa tai Islannissa, lohi nousee melko pieniinkin jokiin kudulle, suosii Itämeren lohi kutujokinaan pääasiassa virtaamaltaan suurempia jokia, jolloin pieni virtaama ei välttämättä luo sille merkittävästi elinympäristöä, vaikka sitä syntyisikin laskennallisesti huomattavia määriä. Toki tilanne, jossa suuremman joen välittömään yhteyteen luodaan ympäristövirtaamalla koskipinta-alaa tarjolle, on erilainen kuin pääuomaan virtaavien pienten jokien tarjoama elinympäristö.

Toiseksi mallinnuksessa käytetty melko karkea hydraulisen laskennan perussolukoko (20\*20 m) aiheuttaa todennäköisesti epätarkkuutta malliin ja ylittää merkittävästi tarkasteltujen kalajen reviirikoon. Tämä mahdollisesti aliarvioi käyttökelpoisen elinympäristön määrää, sillä suuri solukoko keskiarvoistaa hydraulisia olosuhteita laajalle alueelle, mikä mahdollisesti pienentää matalien ranta-alueiden pinta-alaa mallin simulaatiossa (Smit ym. 2024).

Koska Pirttikosken uoma on suurimman osan vuodesta kuivillaan, kasvaa uomassa paikoin huomattavasti matalakorkuista puustoa. Puuston vaikutus huomioitiin mallinnuksessa käyttämällä suurempaa Manningin kerrointa näillä alueilla, mutta puustoa ei mallista poistettu. Tämä luo puustoisille alueille korkeamman maastoprofiilin, mikä mahdollisesti rajoittaa malleissa veden virtausta matalille alueille, erityisesti suuremmilla virtaamilla ja voi pienentää laskennallista käyttökelpoisen elinympäristön pinta-alaa.

Soveltuvan pinta-alan määrää olisi myös mahdollista kasvattaa uoman rakennetta kunnostamalla tai muokkaamalla siten, että soveltuvaa elinympäristöä poikasvaiheille syntyy eri virtaamilla enemmän.

## 6. YHTEENVETO

Tutkimuksen perusteella droonilla tuotettu korkeus- ja kuva-aineisto soveltuu hyvin kuvauomien ja ohjuksutusuomien hydrauliseen elinympäristömallinnukseen. Menetelmä mahdollistaa laajojen alueiden tarkan ja tehokkaan kartoittamisen, mikä tarjoaa hyvän perustan ympäristövirtaamien suunnittelulle. Pirttikosken tapauksessa mallinnus osoitti, että jo pienillä jatkuvilla virtaamilla voidaan saavuttaa huomattava määrä vesitettyä pinta-alaa ja myös poikasille soveltuvaa elinympäristöä.

Tulokset viittaavat siihen, että ympäristövirtaaman lisääminen kuivauomaan voisi parantaa erityisesti lohikalajien poikashabitaattien saatuutta, mutta optimaalinen virtaama ei välttämättä ole suuri. Mallin mukaan parhaat habitaattiolosuhteet syntyivät useille tarkastelluille lajeille ja ikäryhmille noin 5–10 m<sup>3</sup>/s virtaamilla, kun taas suuremmat virtaamat lisäsivät vesialaa mutta eivät enää parantaneet poikasympäristöjen laatua samassa suhteessa. Vesienhoidon kannalta suurempi virtaama voisi tuottaa suuremman ekologisen hyödyn, jos tarkasteluun sisällytetään vaikutukset muuhun kalastoon, pohjaeläimistöön ja vesikasveihin, sekä suhteutetaan hyötyarvio koskipinta-alaan.

Tuloksiin liittyy kuitenkin epävarmuuksia. Mallinnuksessa käytetty solukoko oli karkea suhteessa lohikalajien poikasten reviirien pinta-alaan. Siksi tuloksia tulee pitää suuntaa antavina. Kokonaisuutena hanke osoittaa, että drooniaineistot tarjoavat lupaavan työkalun ympäristövirtaamien ja jokikunnostusten suunnitteluun, mutta jatkossa mallinnusta olisi hyödyllistä tarkentaa sekä hydraulisesti että ekologisesti.

## 7. KIITOKSET

Kiitokset Saija Koljoselle, joka osallistui hankkeen maastomittauksiin ja tutkimuksen suunnitteluun. Tutkimus kuuluu Uudet teknologiat uomien ja kaisvosaltaiden kartoitukseen (UOMARI) -tutkimushankkeeseen, joka on saanut rahoitusta Euroopan unionin aluekehitysrahastosta (EAKR), rahoittajana Pohjois-Suomen elinvoimakeskus (Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus).



Euroopan unionin  
osarahoittama

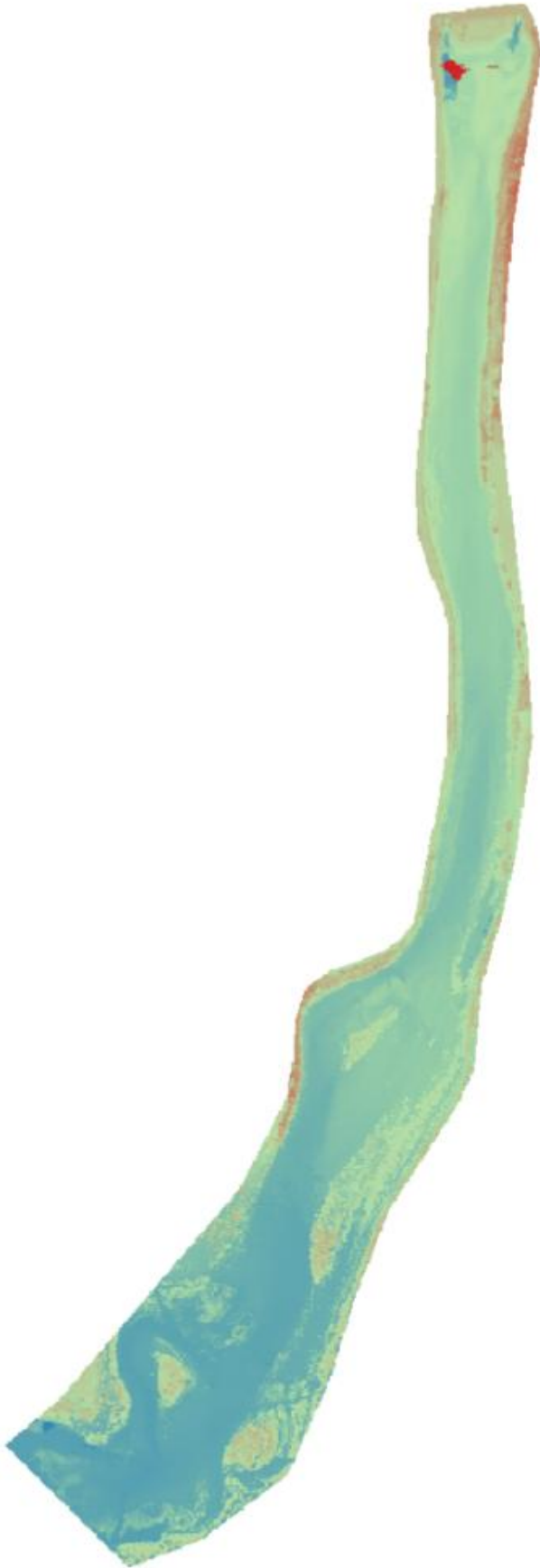
### VIITTEET

- [1] Heggenes, J. 1996. Habitat selection by brown trout (*Salmo trutta*) and young Atlantic salmon (*S. salar*) in streams: static and dynamic hydraulic modelling. *Regulated Rivers: Research & Management* 12, 155-169.
- [2] Huusko, A., Kreivi, P., Mäki-Petäys, A., Nykänen, M., Vehanen, T. 2003. Virtavesikalajien elinympäristövaatimukset. Perustietoa elinympäristömallisovelluksiin. *Kala- ja Riistaraportteja* 284. 42 s.
- [3] Louhi, P., Mäki-Petäys, A., Erkinaro, J. 2008. Spawning habitat of Atlantic salmon and brown trout: general criteria and intragravel factors. *River Research and Applications* 24, 330-339.
- [4] Nykänen, M., Huusko, A. 2002. Suitability criteria for spawning habitat of riverine European grayling. *Journal of Fish Biology* 60, 1351-1354.
- [5] Nykänen, M., Huusko, A. 2003. Size-related changes in habitat selection by larval grayling (*Thymallus thymallus* L.). *Ecology of Freshwater Fish* 2003, 127-133.
- Smit, R.B., Goodman, D.H., Boyce, J., Som N.A. 2024. Effects of 2D hydrodynamic model resolution on habitat estimates for rearing Coho Salmon in contrasting channel forms. *River Research and Applications*, 40, 1912-1924.
- Syrjänen, J., Sivonen, K., Rähkä, V., Kivinen, J., Sivonen, O., Haapsalo, M. 2020. Redds of brown trout in the deep channels of a hydroelectric power station. *River Research and Applications*, 36, 183-186.

LIITE 1.



Ortomosaikkikuva Pirttikosken tutkimusalueesta.



Pirttikosken tutkimusalueen digitaalinen pintamalli

Taulukko 1. Koskipinta-alan ja käyttökelpoisen elinympäristön määrä eri kalalajeille ja niiden eri ikäryhmille erilaisilla virtaamilla.

Vir- taama m <sup>3</sup> /s	WUA ha (lohi 0+)	WUA ha (lohi 1+)	WUA ha (harjus 0+)	WUA ha (harjus 1+)	WUA ha (tai- men 0+)	WUA ha (tai- men 1+)	WUA ha (tai- men 2+)
0	0	0	0	0	0	0	0
5	5.173744	6.011934	6.530755	7.487561	4.720877	5.283174	3.84003
10	5.478373	6.349104	5.610724	7.032882	4.11064	5.399304	4.478341
20	4.859937	5.818765	4.120354	5.998266	3.887155	4.804753	4.093066
40	4.244338	5.118623	3.187232	5.124386	3.374818	4.057114	3.412843
80	3.648749	4.405238	3.058932	4.811904	na	3.43838	2.773398
100	3.41785	4.169276	3.164979	4.855432	3.005628	3.401254	2.689776
200	2.968917	3.527037	2.209528	3.641843	2.107813	2.691173	2.153483
400	1.669044	2.036145	1.465749	2.159374	1.450993	1.484673	1.207005

# Maatutkien soveltuvuuden testaus vedenalaisten rakenteiden ja jään mittaamisessa

Veijo Sutinen<sup>1</sup>, Kyösti Karttunen<sup>1</sup>, Roope Koponen<sup>1</sup>, Hannu Panttila<sup>2</sup>, Petri Valasti<sup>2</sup>, Juha Davidila<sup>2</sup> ja Hannele Hallett<sup>2</sup>  
Oulun yliopisto, Mittaustekniikan yksikkö<sup>1</sup>  
Geologian tutkimuskeskus<sup>2</sup>

## TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa arvioitiin erilaisten maatutkien (maatutkadrooni ja perinteinen maatutka) soveltuvuutta vedenalaisten rakenteiden, jään ja lumen mittaamiseen Kajaanin Karankalahdella. Testilinjalla veden syvyys vaihteli 0,7–16 metriin, ja jään paksuus oli 40–50 cm. Maatutkadroonilla saatiin selkeä pohjakuva ~12–16 m syvyyteen saakka ja tarkka jäänpaksuusmalli korkeataajuisella 1 GHz antennilla. Perinteisiä maatutkayksikköjä vedettiin moottorikelkalla testilinjalla pitkin jäänpintaa, 25 cm korkeudelle nostettuna ja 75 cm:n korkeudelle nostettuna. Perinteinen 100 MHz maatutka kykeni havaitsemaan järven pohjan aina 16 m syvyyteen asti. Korkeammilla taajuuksilla (200 MHz ja 300/800 MHz) signaalin vaimeneminen kasvoi, ja etenkin 200 MHz:n antenni menetti pohjan näkyvyyden jo 50 cm nostolla. Jää-vesirajapinta näkyi kaikilla menetelmillä hyvin, kun taas lumen havaitseminen oli selvästi heikompaa ja onnistui vain tietyissä nostokorkeuksissa. Vedenlaatumittaukset osoittivat sähkönjohtavuuden kasvavan syvyyden myötä, mutta pysyvän silti alhaisella tasolla, mikä suosi tutkasignaalia. Kokonaisuutena sekä droonipohjaiset järjestelmät, että perinteiset maatutkat soveltuivat erinomaisesti jään paksuuden ja pohjanmuotojen kartoittamiseen tutkimusalueen olosuhteissa.

## 1 JOHDANTO

Maatutkalla (eng. Ground Penetrating Radar, GPR), nimensä mukaisesti tutkitaan maata tutkaperiaatteella: maaperään lähetetään valitulla radioaaltoalueella useimmiten pulssimuotoista sähkömagneettista säteilyä, minkä kaikkuvastedatan perustella on mahdollista tarkastella sopivissa olosuhteissa maanalaisia rakenteita, niiden materiaaliominaisuuksia, rajapintoja ja muotoja. Rakenteet voivat olla ihmisen rakentamia kuten betonikerrokset, asfaltti, metalli, putket, tangot, kaapelit, tai geologian/sään/ilmaston muodostamia kuten kivet, eri maaperärakenteet ja kerrokset, jää tai vesi. Luettelot edellä eivät suinkaan ole täydellisiä.

Maatutkamenetelmän perusteet on tunnettu jo vuodesta 1910 asti, mutta varsinainen kehitys alkoi kunnolla vasta 1970-luvulla sotilas- ja avaruussovelluksista (mm. Apollo 17). Ensimmäinen kaupallinen Maatutka tuli markkinoille vuonna 1975 (GSSI).

Elektroniikan, materiaalitekniikan ja digitaali-/ohjelmistotekniikoiden kehitysten myötä maatutkan hyödyntäminen laajeni. Lisäksi viimeisten 20–30 vuoden aikana sovelluskohteisiin on voitu lisätä myös arkeologia, forensic-tutkimus ja etenkin maaperässä sekä sen pinnalla olevan veden/jään/lumen tutkimus itse maarakenteiden ja sen muotojen määrittämisen lisäksi.

Maatutkatekniikka on monivaiheinen ja haastava, mutta nykyään sitä sovelletaan monenlaisissa yhteiskuntarakenteiden mittauksissa. Kaupallisissa maatutkalaitteissa tutkalaitteiston oleelliset komponentit on tyypillisesti kiinnitetty työnnettävään "ruohonleikkuri"-kehikkorakenteeseen, jolla voidaan optimoida tutka-aaltojen eteneminen ja mitaus maaperästä. Epätasaisiin kohteisiin ja maastokäyttöön on kehitetty kannettavia laitteistoja, sekä autojen tukialustoja liikkuviin väylärakenteiden mittauksiin.

Miehittämättömät ilma-alukset (eng. unmanned aerial vehicle, UAV; dronet, dronit) tulevat yleistyään entisestään myös siviilikäytössä moniin uusiin käyttökohteisiin. Yksi mahdollisuus tulevaisuudessa tulee olemaan maatutkadronin hyödyntäminen maaperärakenteiden ja niiden muotojen aiempaa monipuolisemmissa mittauksissa. Kun tähän lisätään vuodenaikakierto ja etenkin talviolosuhteet, lumi, jää ja vesi, joiden vasteet ovat myös

mitattavissa maatutkalla, niin droonimittausten hyödyntämispotentiaali kasvaa edelleen.

Toisin kuin maaperässä olevat lukuisia eri alkuaineita ja molekyyliä sisältävät ainekerrokset erilaisine maatutkavasteineen, veden eri rakennemuodot (tässä yhteydessä neste, lumi, jää ja edellisten sekoitukset) sisältävät vain vesimolekyyliä. Tosin, monet mainitut vesimolekyyli-rakenteet ovat myös vaihtelevasti huokoisia, mikä tekee maatutka-analyyseistä yhä mielenkiintoisemman. Vettä sisältävien rakenteiden maatutkamittaus ja data-analyysi on haastavaa. Jäätikkötutkimuksia on tehty kauan [1], mutta elinympäristömme vesi/lumi/jää-alueiden kerrosrakenteiden ja muotojen tutkimus on melko uutta [2, 3].

Lumi-, jää- ja vesikerrosten erottaminen toisistaan onnistuu hyvin tai melko hyvin [4, 5], mutta erilaisten lumikerrosten erottaminen vain maatutkamittauksella on edelleen haastavaa [4, 6, 7].



Kuva 1. Karankalahden ja muiden UO-MARI-hankkeen tutkimuskohteiden sijainti kartalla

## 2 TUTKIMUSKOHDE

Maatutkien testikohteeksi valittiin hyvän sijainnin ja syvyysominaisuuksien perusteella Kajaanin lähistöllä sijaitseva Karankalahti (kuva 1). Karankalahti on Kajaanin ja Sotkamon välillä sijaitsevan Nuasjärven eteläpuoleinen lahti. Vedensyvyys vaihtelee lahdella paljon ja syvin kohta on yli 20 m.

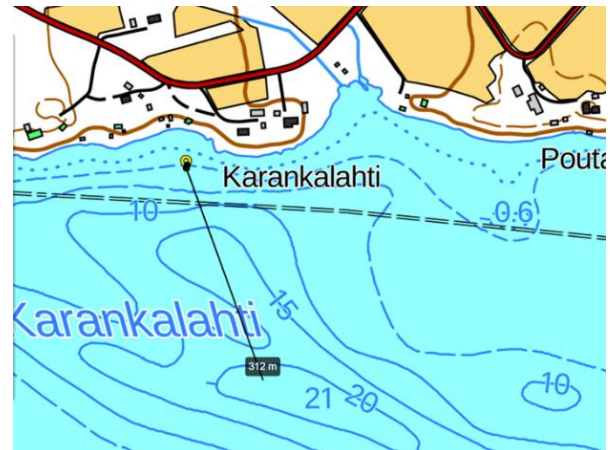


Kuva 2. Testauspaikan sijanti Karankalahdella.

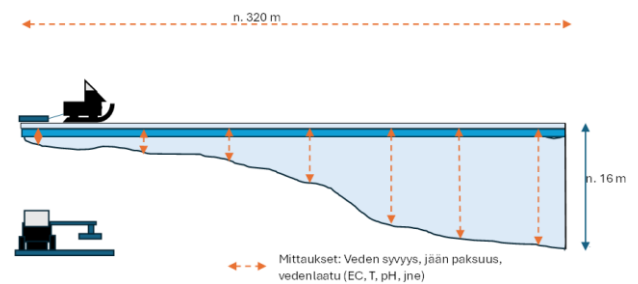
## 3 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää erilaisten maatutkien toiminta vedenalaisten rakenteiden mittaamiseen sekä ilmapälin vaikutusta maatutkan mittaustuloksiin. Lisäksi tavoitteena oli selvittää tutkien kykyä mitata lumen ja jään ominaisuuksia.

Tutkimukseen suunniteltiin testilinja Karankalahden pohjoisrannalle (kuva 3 ja 4). Testilinja lähti rannasta ja sen pituus oli n. 320 m. Vedensyvyys kasvoi 70 cm yli 16 metriin linjan alusta linjan loppuun. Testilinjalla jään paksuus oli noin 50 cm ja lumen määrä vaihteli 10 ja 30 cm välillä. Testilinjalta mitattiin 50 m välein jään paksuus, syvyys ja vedenlaatu (lämpötila, sähköjohtavuus, pH).



Kuva 3. Testauslinja Karankalahdella.



Kuva 4. Maatutkien testauksen periaate.

Maatutkadroonin ja perinteisen maatutkan vertailua varten perinteinen maatutka kytkettiin moottorikelkan sivulle telineen avulla, jonka korkeutta voitiin säätää (kuva 5). Korkeussäädön avulla maatutkan ja jään välistä ilmapälinä voitiin säätää portaattomasti ja tuloksia verrata maatutkadroonin eri lentokorkeuksiin. Testauksen aikana maatutka kulki moottorikelkan sivulla, jolloin mittaukset voitiin tehdä koskematta pintaan.



Kuva 5. Maatutka moottorikelkkaan asennettuna.

Tutkimuksessa testattiin kolmea perinteistä maatutkaa, joiden taajuusalueet vaihtelivat 100 MHz

aina 800 MHz saakka. Jokainen maatulka testattiin 50 ja 75 cm ilmväleillä (ilmaväli mitattuna jäänpinnasta tutkan alapintaan) ja ilman ilmväliä (maatulkaa vedettiin lumen pintaa pitkin). Tutkimuksessa suoritettiin ensin ilmvälimittaukset ajamalla moottorikelkalla testilinjan vieressä, jolloin maatulka kulki koskematonta testilinjaa pitkin. Kun ilmvälimittaukset oli tehty, suoritettiin mittaukset maata pitkin eli vedettiin maatulkaa moottorikelkalla linjaa pitkin. Samat linjat mitattiin myös maatulkaadroonilla (100, 150, 300 MHz) talvella ja syksyllä 2025 sekä talvella 2026 (1000 MHz).

Taulukkoon 1 on koottu käytettyjen maatulkien teoreettiset resoluutiot laskemalla niiden aallonpituuksien neljäsosat ilmassa, jäässä ja vedessä. Huomataan, että dielektrisyiden kasvaessa (ilma 1, jää 3.4 ja vesi 81) vertikaalinen resoluutio paranee. Jäässä 800 MHz:n erottaa teoriassa 5 cm:n kokoiset kerrokset toisistaan, vedessä jopa 1 cm:n.

**Taulukko 1.** Vertikaaliset resoluutiot käytetyille maatulkaajuuksille (100, 200, 300, 800 ja 1000 MHz) ilmassa, jäässä ja vedessä. Yksikkö on cm.

	ILMA	JÄÄ	VESI
<b>100 MHz</b>	75	40,75	8,25
<b>200 MHz</b>	37,5	20,25	4,25
<b>300 MHz</b>	25	13,5	2,75
<b>800 MHz</b>	9,5	5	1
<b>1000 MHz</b>	7,5	4	0,75

## 4 TESTAUKSESSA KÄYTETYT TUTKIMUSLAITTEET

Testauksessa käytettiin maatulkaadroonia, perinteisiä maatulkaa sekä käsimittareita. Seuraavassa esitetään käytetyt tutkimuslaitteistot.

### 4.1 MAATUTKADROONI

Mittaustekniikan yksikön (MITY) maatulkaadrooni koostuu miehittämättömästä ilma-aluksesta, maatulkaajärjestelmästä sekä turvavarusteesta. maatulkaadroonimittausjärjestelmä sisältää DJI Matrice 350 RTK -droonin, jossa on RTK (Real Time Kinetic) -tarkkuuspaikannus sekä laaja käyttölämpötila-alue (-20 ... 50 °C) ja IP55 suojaus. Ominaisuudet mahdollistavat toistettavat

lentoreitit ja tarkat paikkatiedot mittausdatalle erilaisissa sääolosuhteissa.

MITY:n maatulkaajärjestelmä koostuu Radar Systems Zond Aero LF ja Radar Systems Zond Aero 1000 NG -maatulkaista, SkyHub-tiedonkeruuyksiköstä ja Terrain Follow -pinnan seurantajärjestelmästä. Zond Aero LF -maatulkaissa on vaihdettavat antennit, joiden avulla mittausaajuus voidaan valita 100, 150 tai 300 MHz:n väliltä ja Zond Aero 1000 NG -maatulkaissa on kiinteä 1 GHz:n antenni. Tiedonkeruuyksikkö kerää mittausdatan reaaliaikaisella näytteistyksellä sekä hyödyntää hardware stacking -ominaisuutta. Järjestelmään kuuluu lisäksi pinnan seurantajärjestelmä, jonka avulla drooni säilyttää asetetun etäisyyden maanpintaan automaattilennon aikana.

### 4.2 PERINTEISET MAATUTKAT

Mittauksissa käytettiin 100 MHz:n (Kuva 6), 200 MHz:n (Kuva 7) ja 300/800 MHz:n (Kuva 8) GSSI:n maatulkaa.



*Kuva 6. 100 MHz:n maatulka.*



*Kuva 7. 200 MHz:n maatulka.*



**Kuva 8.** 300/800 MHz:n maatutka.

### 4.3 KÄSIMITTAUKSET

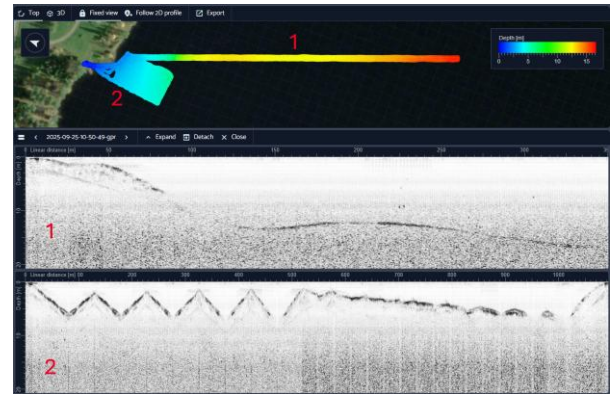
Järven jäältä tehtiin veden syvyyden, vedenlaadun ja jäänpaksuuden mittauksia.

## 5 TULOKSET

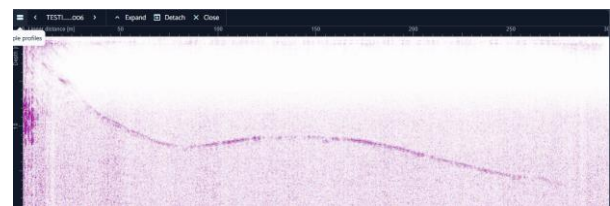
Karankalahdella tehtiin perinteiset maatutkamittaukset ja käsimitaukset talvella 2024 ja talvella 2025. Maatutkadroonimittauksia tehtiin keväällä ja syksyllä 2025 sekä talvella 2026. Seuraavassa esitetään tulokset pohjamuodon sekä jäänpaksuuden mittauksista.

### 5.1 POHJAMUOTOJEN TUNNISTUS

Maatutkadroonilla suoritettiin matalataajuisia mittauksia keväällä ja syksyllä 2025, mutta tässä tarkastellaan ainoastaan syksyllä kerättyä aineistoa, sillä sen laatu ja tulkittavuus osoittautuivat selvästi paremmiksi, kun taas keväällä dronissa esiintyi häiriösignaaleja, eikä pohja näkynyt koko matkalta. Kuvassa 8 on esitetty kahden mittauksen data-aineistot, joista ensimmäinen on tutkimukseen suunniteltu noin 300 metriä pitkä testauslinja ja toinen 50 metriä pitkä ja 25 metriä leveä alue, joka lennettiin 3 metrin linjavälillä, jolla saavutettiin tiheä ja yksityiskohtainen arvio pohjan rakenteesta. Testauslinjan pohjarakenne näkyy selkeästi suurimmalta osalta matkaa, vain pieni katvealue havaitaan 30 - 40 metrin kohdalla. Myös linjan päädyssä syvimmällä kohtaa signaali alkaa vaimenemaan ja pohjan rakenne ei ole enää selvästi näkyvillä. Testauslinjan päässä veden syvyys on noin 16,4 metriä ja linjan puolivälissä noin 12 metriä.

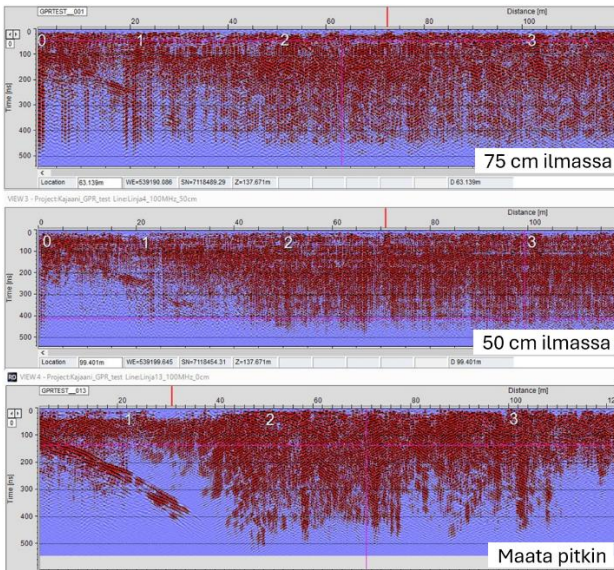


**Kuva 9.** Järven pohjanmuoto. Pohja näkyy selvästi maatutkadroonin 100 MHz:n tuloksissa (2025).

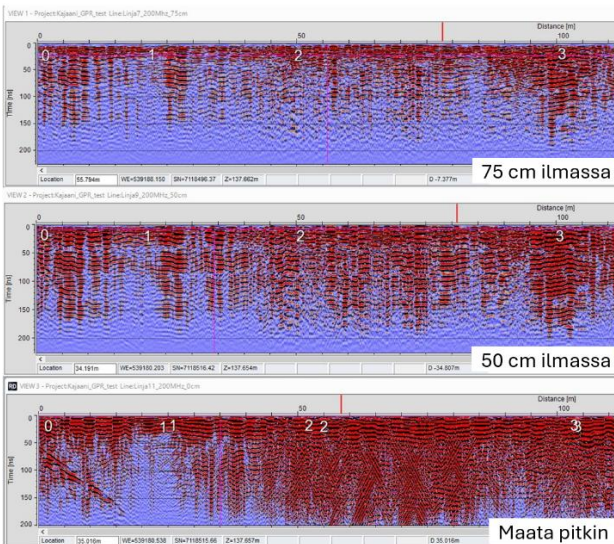


**Kuva 10.** Järven pohjanmuoto. Pohja näkyy selvästi perinteisen maatutkan 100 MHz:n profiilissa (2025).

Perinteistä maatutkaa vedettiin kevättalvella 2024 pitkin jäistä järvenpintaa, 50 cm sen yläpuolelle nostettuna ja 75 cm nostettuna. Nostojen vaikutus nähdään selvästi seuraamalla kuvissa 10 ja 11 vasemmalla näkyvää pohjaa. Huomataan, että 100 MHz:n antennin nostossa pohja voidaan erottaa hyvin vielä 50 cm:n nostolla ja auttavasti 75 cm:n nostollakin. 200 MHz:n antennin tapauksessa jo 50 cm:n nosto hävittää pohjan muodot maatutkakuvasta. Nostojen aiheuttama signaalihäviö näyttäisi olevan siis suurempi antennin taajuuden kasvaessa.



**Kuva 11.** 100 MHz:n perinteinen maatutka pitkin jäistä järvenpintaa (alin), 50 cm nostettuna ja 75 cm nostettuna ilmassa (ylin). Huomataan, että 100 MHz:n antennin antama vaste kestää nostamista.

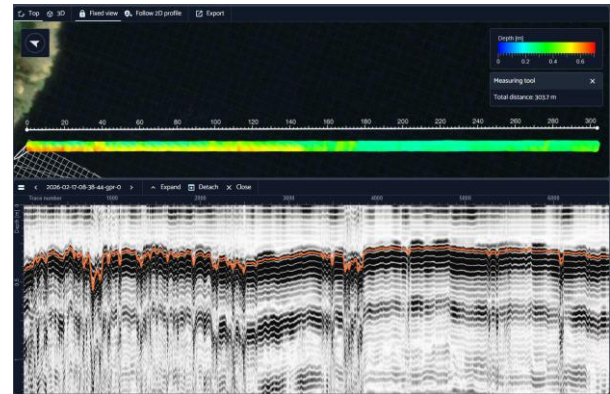


**Kuva 12.** 200 MHz:n perinteinen maatutka pitkin jäistä järvenpintaa (alin), 50 cm nostettuna ja 75 cm nostettuna ilmassa (ylin). Huomataan, että 200 MHz:n antennin antama vaste ei kestä nostamista.

## 5.2 JÄÄN JA LUMEN TUNNISTUS

Maatutkadroonilla lennettiin korkeantaajuuden mittaukset talvella 2026. Lennot toteutettiin autonomisesti. Maatutka asennettiin vastaanottamaan signaalia 37 nanosekunnin ajan ja tallentamaan jakson 1024 näytteen tarkkuudella. Kuvassa 13 on esitetty testauslinjan maatutkadata prosessoituna siten, että jään yläpinta on ensin eroteltu ja sitten sovitettu

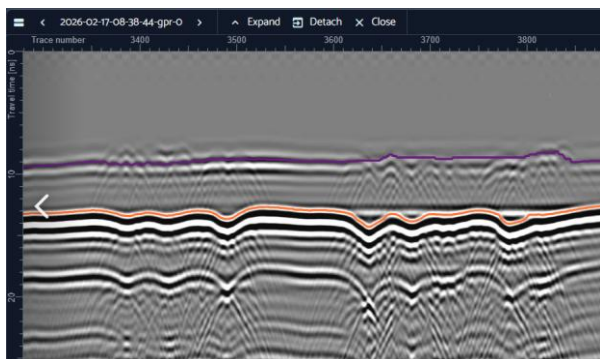
tasaiseksi ylärajaan, jolloin kuvasta näkee vain jään paksuuden ja mahdollisia allaolevia kerroksia, jotka tässä tapauksessa ovat vain signaalin tuplakaikuja. Jään paksuus vaihtelee suurimmalla osalla linjaa noin 26–36 cm:n välillä. Paikoin aineistossa on kuitenkin havaittavissa selvästi paksumpia jääkerroksia, joissa jään paksuus on enimmillään noin 55 cm. Mittaukset yhtenevät mittaushetkellä otettuihin satunnaisiin jään kairauksiin, joissa jään paksuusvaihteli 36–40 cm välillä. Yksi mahdollinen selitys tälle vaihtelulle on jään pinnalla kulkevat moottorikelkkaurat, joiden kohdalla jää ja lumi on saattanut kasvaa painautumisen myötä. Tämä tulkinta on kuitenkin spekulatiivinen, eikä sitä voida varmistaa käytettävissä olevan aineiston perusteella.



**Kuva 13.** Jäänpaksuus. Maatutkadroonin 1 GHz havaitsee selvästi jään alapinnan. Alempi rajapinta ei ole todellinen vaan kaksoisheijastus jään ala- ja yläpinnan välillä. (2026)

Kuvassa 14 esitetään testauslinjan keskivaiheelta otettu suurennos ilman kerrostasoitusta (kuva 13), jossa havaittavissa ilma–lumi-, lumi–jää- (violetti) sekä jää–vesi- (oranssi) rajapinnat. Jään rajapinnan yläpuolella lumi kerros näkyy hyvin ohuena ja haaleana kerroksena. Mittaushetkellä jään päällä oli lunta vaihtelevasti noin 0–20 cm ja lumi oli pääosin ilmavaa pakkaslunta, joka pölysi helposti. Lumen dialektrisyys vaihtelee suuresti siinä esiintyvän veden määrän mukaan ja se näkyy suoraan signaalin vasteessa, sillä veden suuri dialektrisyys arvo saa signaali kerroksen näkymään selvimmin (kts. Kuva 14 oranssi rajapinta). Tämä ominaisuus vahvistaa, miksi lumen kerros näkyy heikosti. Kuvasta havaitaan myös hyperbelimuotoisia kuvioita samoilla rajapinta-alueilla, jotka todennäköisesti

johtuvat moottorikelkka- ja hiihtolatu-urista lumella, jään pinnalla eri kohdissa.



**Kuva 14.** Suurennosmittauslinjan keskivaiheelta, jossa havaittavissa ilma-lumi-, lumi-jää- (violetti) sekä jää-vesirajapinnat (oranssi). Maatutkadrooni 1 GHz (2026).

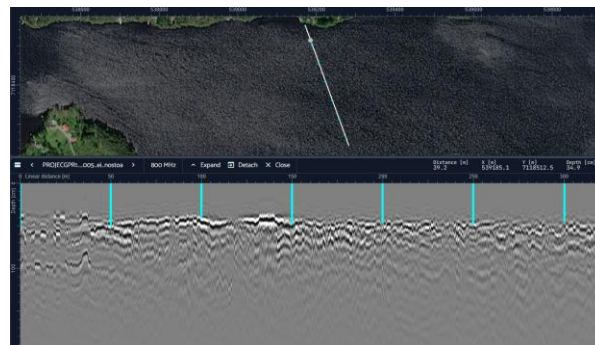
Käsimitauksilla tehtiin talvella 2024 pitkin 300 metrin testauslinjaa seitsemän (7) avantoa, joista mitattiin jäänpaksuudet, kts. Taulukko 2. Paksuudet ovat selvästi suurempia kuin 800 MHz:n maatutkan erottelukyky (~ 5 cm, kts. Taulukko 1) ja jää-vesi rajapinta muodostaa suuren dielektrisyyseron (vesi 81, jää 3,4) voimakkaan heijastajan ( $R = -43.5\%$ , miinusmerkki tarkoittaa heijastuneen pulssin merkin vaihdosta). Kuvassa 14 nähdäänkin selvästi jään alapinnan muodostama horisontti, johon vaaleansinisellä olevat jäänpaksuudet hyvin yhtyvät.

**Taulukko 2.** Mitatut jäänpaksuudet avannoissa. Sijainti ilmoitettu metreinä rannasta.

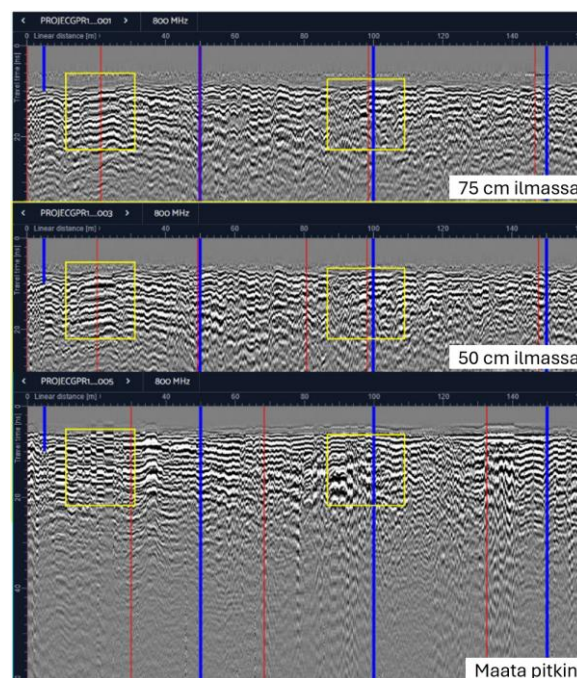
Sijainti	Jään paksuus
0	51 cm
50 m	50 cm
100 m	40 cm
150 m	47 cm
200 m	46 cm
250 m	47 cm
300 m	44 cm

Lunta ei voitu varmuudella perinteisen maatutkan kuvasta tunnistaa. Alueella tehtiin kuitenkin myös testi, jossa lumi poistettiin pois jäältä kahdelta kohdasta, jotka on merkattu keltaisilla suorakulmioilla kuvaan 15. Näyttäisi siltä, että lumenpoistoalueet näkyvät maatutkakuvassa ympäristöstään erottuvasti, kun maatutka oli nostettu (75 ja 50 cm), etenkin lähempänä rantaa ollut alue (kuvassa

vasemmalla). Pitkin järvenpintaa vedettäessä lumenpoisto ei näkynyt tutkakuvassa.



**Kuva 15.** Jäänpaksuudet. Avannoista mitatut jäänpaksuudet (vaaleansinisellä) yhtyvät hyvin 800 MHz:n maatutkakuvan antamaan jään alapintaan.



**Kuva 16.** Lumen harjaus pois. Lumi poistettiin keltaisilla suorakulmioilla merkityistä kohdista. Lumenpoistaminen näkyy erityisen hyvin, kun maatutka (800 MHz) on ollut nostettuna ilmassa (50 ja 75 cm).

### 5.3 VEDENLAADUN JA JÄÄN MITTAUS

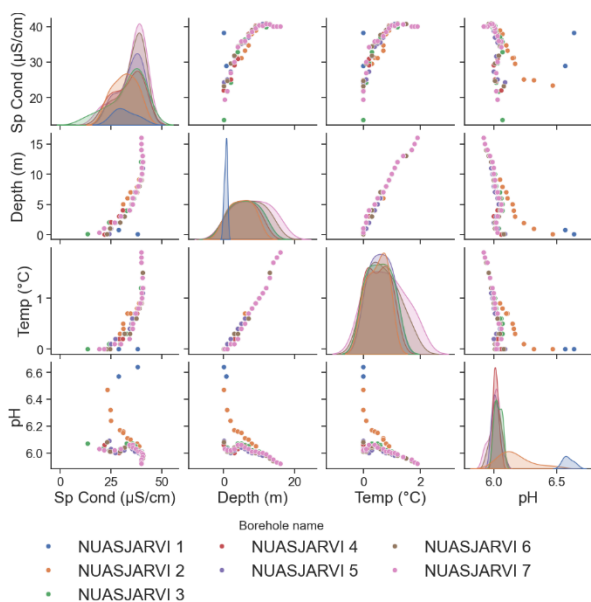
Tutkimuksen aikana tehtiin vedenlaadunmittauksia ja jäänpaksuusmittauksia mittausprofiilille kairatuista reijistä. Jään paksuus mitattiin MITY:n tekemällä jäänpaksuusmittarilla, joka on alapäästään 90 asteen kulmaan taivutettu alumiiniputki, jonka pystysuoraan osuuteen oli merkitty etäisyys putken alapäästä. Paksuudet on kirjattu taulukkoon

(Taulukko 2), josta nähdään vaihteluvälin olleen 44–51 cm vuonna 2025.

Vedenlaadun mittaus tehtiin laskemalla jatkuva-toimisesti mittaava GTK:n EXO-monianurimittari pohjaan saakka jokaisella mittauspisteellä. EXO mittasi samaan aikaan syvyyttä, pH:ta, lämpötilaa ja sähkönjohtavuutta. Vedenlaadun mittaustulokset on koottu taulukkoon 3 ja esitetty kuvaajina kuvassa 17. Siitä huomataan lämpötilan ja sähkönjohtavuuden nousevan syvyyden funktiona, mutta pH:n laskevan. Sama käytös näkyy myös lämpötilakäyttämisessä: sähkönjohtavuus nousee lämpötilan funktiona ja pH laskee.

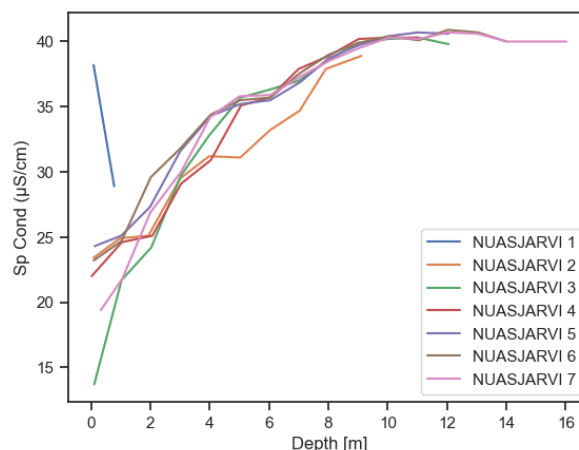
**Taulukko 3.** Nuasjärven mittaustulosten tilastollinen yhteenveto.

	SPCOND [μS/cm]	DEPTH [m]	TEMP [°C]	PH
<b>Count</b>	84	84	84	84
<b>Mean</b>	34.04	6.21	0.6	6.0
<b>Std</b>	6.51	4.22	0.49	0.1
<b>Min</b>	13.7	0.02	0	5.9
<b>25 %</b>	29.58	2.77	0.18	6
<b>50 %</b>	35.75	6.04	0.6	6.0
<b>75 %</b>	39.9	9.11	0.9	6.0
<b>Max</b>	40.9	16.03	1.9	6.6



**Kuva 17.** Nuasjärven vedenlaadun tulokset matriisikuvana. Kuvasta näkyy johtavuus, syvyys, lämpötila ja pH toistensa funktiona ja itsensä histogrammina eri avannoissa (7 kpl). Ensimmäisen avannon (Nuasjärvi 1) poikkeavat tulokset johtuvat siitä, että avanto oli aivan rannassa (matala).

Matriisista on erikseen vielä plotattu sähkönjohtavuus syvyyden funktiona kuvaan 18. Siitä nähdään, että johtavuus ensin kasvaa, kunnes n. 10 metrin kohdalla saturoituu. Poikkeuksena on aivan rannassa ollut avanto NUASJARVI 1, josta oli pohjaan vain 1,2 metriä ja jossa jotavavuus pieni syvyyden kasvaessa.

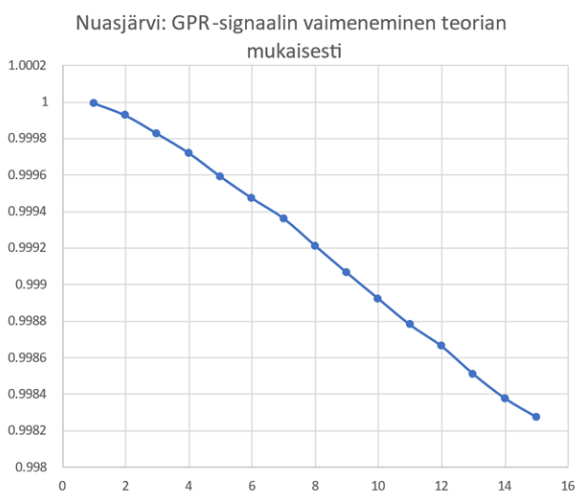


**Kuva 18.** Nuasjärven sähkönjohtavuus syvyyden funktiona. Nähdään, että johtavuus kasvaa syvyyden kasvaessa, kunnes saturoituu. Lukemat ovat alhaisia. Ensimmäisen avannon (Nuasjärvi 1) poikkeavat tulokset johtuvat siitä, että avanto oli aivan rannassa (matala).

## 6 TULOSTEN ARVIOINTI

Perinteinen 800 MHz:n maatutka osoittautui soveltuvan hyvin järven jäänpaksuuden (~45–50 cm) määrittämiseen (talvi 2024). Toisaalta 100 MHz:n taajuudella nähtiin järven pohjanmuodot yli 16 metrin syvyyteen asti. Yksi syy tämän onnistumiseen on Nuasjärven matala sähkönjohtavuus (~34 μS/cm), jolloin siitä aiheutuva teoreettinen vaimeneminen on olematonta (alta 1 %, kts. kuva 18).

Maatutkadroni soveltui niin ikään hyvin jäänpaksuuden (1 GHz) ja pohjanmuotojen mittaamiseen (100 MHz) Nuasjärvellä. Maatutkadronin mitatut (2025) syvyydet matalataajuuden tutkalla (0–16,4 m). Maatutkadronin antamat jäänpaksuudet mitattiin talvella 2026, jolloin saatiin tulosten vaihteluväliksi suurimmassa osassa testauslinjaa 26–36 cm, paikoin paksumpi. Lumi (0–20 cm) antoi heikommän vasteen, johtuen vähäisestä määrästä ja laadusta.



**Kuva 19.** Nuasjärven veden sähkönjohtavuuteen perustuva teoreettinen vaimenemiskäyrä syvyyden funktiona. Signaalin vaimeneminen on hyvin vähäistä (alta 1 % 15 metrin matkalla).

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Sekä perinteinen että maatutkadroni soveltuivat hyvin jääpeitteen paksuuden ja Nuasjärven pohjanmuotojen kartoitukseen. Molemmat menetelmät näkivät selvästi jää-vesi -rajapinnan, maatutkadroni myös lumi-jää -rajapinnan.

## 8 KIITOKSET

Tutkimus kuuluu Uudet teknologiat uomien ja kaisosaltaiden kartoitukseen (UOMARI) -tutkimushankkeeseen, joka on saanut rahoitusta Euroopan unionin aluekehitysrahastosta (EAKR), rahoittajana Pohjois-Suomen elinvoimakeskus (Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus).

## VIITTEET

- [1] Clarke, G.K.C. (1987). A Short History of Scientific Investigations on Glaciers. *Journal of Glaciology*.
- [2] McGrath, D.M., Bonnell, R., Zeller, L., Olsen-Mikutowicz, A., Bump, E., Webb, R., & Marshall, H.-P. (2022). A Time Series of Snow Density and Snow Water Equivalent Observations Derived From the Integration of GPR and UAV SfM. *Frontiers in Remote Sensing*.
- [3] Valence, E., Baraer, M., Rosa, E., Barbecot, F., & Monty, C. (2022). Drone-Based Ground-Penetrating Radar (GPR) Application to Snow Hydrology. *The Cryosphere*.
- [4] Letamendia, U., Navarro, F., & Benjumea, B. (2023). Ground-Penetrating Radar as a Tool for Determining the Interface Between Temperate and Cold Ice, and Snow Depth: A Case Study for Hurd-Johnsons Glaciers, Livingston Island, Antarctica. *Annals of Glaciology*.
- [5] Liu, H., Takahashi, K., & Sato, M. (2013). Measurement of Dielectric Permittivity and Thickness of Snow and Ice on a Brackish Lagoon Using GPR.
- [6] Dupuy, B., Garambois, S., Grøver, A., Dahle, H., Tobiasen, A., & Humstad, T. (2024). Drone GPR for Snow and Ice Measurements: Possibilities and Limitations.
- [7] Siebenbrunner, A., Delleske, R., & Keuschnig, M. (2023). UAV-Borne GPR Snowpack Stratigraphy.