

Laserkeilaavan dronen hyödyntäminen suunnittelussa



Ylemmän ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Riihimäki, Tulevaisuuden liikennejärjestelmät

Kevät 2022

Niko Forsell

Laserkeilaavat dronet ovat olleet markkinoilla jo reilun vuosikymmenen, mutta niiden laajalaisempi käyttö on yleistynyt vasta viime vuosina markkinahintojen laskettua kohtuulliselle tasolle. Tässä opinnäytetyössä tutkin, miten laserkeilaavaa dronea käytetään ja kuinka sillä tuotettua aineistoa voidaan hyödyntää mahdollisimman monipuolisesti. Vertailen työssä laserkeilaavalla dronella tuotettuja pistepilviaineistoja maanmittauslaitoksen pistepilviaineistoihin. Tavoitteena on selvittää, mitä eroja eri menetelmin tuotettujen aineistojen välillä on, pääpainona maanpinnan pistetiheyksien ja aineiston laadun arviointi. Osana työtä luotiin prosessi dronella tehtäviin kartoitustehtäviin. Työ tehtiin Ramboll Finland Oy:n kehitystyönä.

Työssä käytettiin DJI Matrice 300 RTK -dronea, DJI Zenmuse L1 -laserkeilainta sekä DJI Zenmuse P1 -kameraa. Tutkimus toteutettiin Espoossa ja Kirkkonummella syksyllä 2021. Tulokset osoittivat, että laserkeilaimella saadaan luotua maanmittauslaitoksen aineistoihin verrattuna moninkertaisesti laadukkaampia pistepilviaineistoja. Laserkeilaimella tuotettuun aineistoon taltioitui suuri määrä maanmittauslaitoksen aineistoissa ulkopuolelle jäänyttä dataa, kuten sijainnit kaivonkansista, puista, valaisinpylväistä tai rakennuksista. Merkittävin hyöty laserkeilaavan dronen tuotoksessa on aineiston ajantasaisuus ja laatu. Maanmittauslaitos kerää aineistoja kirjoitushetkellä 6 vuoden sykleissä ja ne ovat pistetiheyksiltään 5 pistettä neliometrillä. Siitä harvennetaan avoimeen käyttöön aineisto, joka on pistetiheydeltään 0.5 pistettä neliometrillä. Laserkeilaavan dronen pistetiheys taas on 100 – 300 pistettä neliometrillä. Kameralla tuotettuja pistepilviä voi hyödyntää avoimilla alueilla, mutta niiden tarkkuus kärsii metsäisillä tai katveisilla alueilla. Laserkeilaus vähentää merkittävästi tarvetta perinteistä jalkaisin tehtävää mittausta, mutta ei kuitenkaan poista sitä täysin.

Tutkimuksessa kävi myös ilmi, että suuri pistemäärä ei korreloi suoraan aineiston laadun kanssa. Merkittävään osaan nouseekin tekniikka, millä pistepilviaineisto on tuotettu. Lisäksi työssä havaittiin, että suuret ja raskaat pistepilviaineistot eivät välttämättä toimi sulavasti suunnitteluohjelmistoissa.

Avainsanat Drone, laserkeilaus, RTK, pistepilvi

Sivut 56 sivua

Laser scanning drones have been in the market for a decade, but their comprehensive use has become more common in the last few years after their market prices have lowered to a more reasonable range. In this thesis I am researching how a laser scanning drone can be utilized in planning, and also how material produced with it can be benefitted as diverse as possible in practical work. I am comparing point cloud material made with laser scanning drone to previously used point cloud material of National Land Survey of Finland. Objective of this thesis is to find out what differences there are between materials made with different methods, mainly focusing on surface point density and quality of produced and previously used materials. One part of this thesis was to create a process for mapping with a drone. Thesis was made as development project of Ramboll Finland Oy.

DJI Matrice 300 RTK -drone, DJI Zenmuse L1 -laserscanner and DJI Zenmuse P1-camera was used as equipment of this thesis. Research was conducted in Espoo and Kirkkonummi in autumn 2021. Research indicated that laser scanning drone can produce multiple times more better quality point cloud material when comparing it to the previously used material of National Land Survey of Finland. Material produced with laser scanning drone could capture large amount of data that was previously unused in National Land Survey of Finland materials, such as rainwater wells, trees, light poles and locations of buildings. Most crucial benefits for using material produced with laser scanning drone is that it is up to date and more better quality. At this time National Land Survey of Finland is collecting material in 6 year cycles, and their point density are 0,5 points per square meter. Laser scanning drones point density is between 100 to 300 points per square meter. Point cloud material made with drone camera can utilized in open areas, but their accuracy is decreased when used in woodland or other blind spots. Laser scanning will significantly decrease traditional manual metering work, but doesn't remove it completely.

Research also indicated that large point cloud density doesn't strictly correlate as better quality. Quality is also heavily determined by the technic used to produce it. It is also worth noting that large and heavy point cloud materials do not necessarily work fluently with design softwares.

Keywords Drone, laser scanning, point cloud, RTK

Pages 56 pages

Sisällysluettelo

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Työn tausta, rajaukset ja tavoitteet | 2 |
| 2.1 | Työn tausta..... | 2 |
| 2.2 | Työn rajaus..... | 4 |
| 2.3 | Työn tavoitteet..... | 4 |
| 3 | Miehittämätön ilmailu..... | 4 |
| 3.1 | Miehittämättömän ilmailun historia ja kehitys | 4 |
| 3.2 | Nykytila..... | 6 |
| 3.3 | Dronen käytön edut ja haasteet | 7 |
| 3.4 | Alan tutkimus | 9 |
| 3.5 | Miehittämättömän ilmailun lainsäädäntö ja säädökset EU:ssa | 10 |
| 3.5.1 | Siirtymäajat avoimessa kategoriassa EU-droneasetuksessa..... | 11 |
| 3.5.2 | Avoin-kategoria | 12 |
| 3.5.3 | Eriytynen-kategoria..... | 15 |
| 3.5.4 | Sertifioitu-kategoria | 16 |
| 4 | Dronella tehtävä kartoitustyö | 17 |
| 4.1 | Selvitys kartoituksen toteuttavuudesta..... | 17 |
| 4.2 | Kartoitustyön aluerajaus..... | 17 |
| 4.3 | Lennon suunnittelu | 18 |
| 4.4 | Kaluston valmistelu | 19 |
| 4.5 | Kartoituksen toteutus | 20 |
| 4.6 | Aineistojen purku ja käsittely..... | 21 |
| 4.7 | Aineistojen toimitus | 23 |
| 5 | Pistepilviaineistojen tutkimus | 23 |
| 5.1 | Tutkimuksessa käytetty laitteisto ja tekniikka | 23 |
| 5.1.1 | DJI Matrice 300 RTK -drone..... | 23 |
| 5.1.2 | DJI Zenmuse L1..... | 25 |
| 5.1.3 | LiDar-tekniikka..... | 27 |
| 5.1.4 | DJI Zenmuse P1 | 28 |
| 5.1.5 | Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus (RTK)..... | 31 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.1.6 | GCP, Ground Control Point, Maatukipiste | 35 |
| 5.2 | Tutkimus..... | 38 |
| 5.3 | Kohdealue | 39 |
| 5.4 | Aineistojen vertailu | 43 |
| 6 | Johtopäätökset | 49 |
| | Lähteet..... | 52 |

Sanasto

| | |
|----------------|---|
| BVLOS | Beyond Visual Line of Sight, suoran näköyhteyden ulkopuolella tapahtuva toiminta |
| DJI Zenmuse L1 | DJI:n valmistama laserkeilain |
| DJI Zenmuse P1 | DJI:n valmistama kamera |
| EASA | European aviation safety agency, Euroopan unionin lentoturvallisuusvirasto |
| FOV | Field of view, näkökenttä |
| GCP | Ground control point, Maatukipiste |
| Geo-fence | Geo-aita on kuin ilmatilan virtuaalinen aita, jota ei voi läpäistä dronella |
| GNSS | Global Navigation Satellite System, maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä |
| GPS | Global Positioning System, yleisin satelliittipaikannusjärjestelmä |
| IMU | Inertial measure unit, Inertiamittausyksikkö |
| LiDar | Light Detection and Ranging, laserkeilaus |
| PDRA | Predefined Risk Assessment, ennakkoriskiarvio |
| RPA | Remotely piloted airbourne |
| RPAS | Remotely Piloted Aircraft System |
| RTK | Real-Time Kinematic, reaaliaikainen kinemaattinen mittaus |
| SAIL | Specific Assurance and Integrity Level |
| SORA | Specific Operations Risk Assessment, riskinarviointimenetelmä |
| UAS | Unmanned Aerial System, miehittämätön ilma-alusjärjestelmä |
| UAV | Unmanned Aerial Vehicle, miehittämätön ilma-alus |
| VLOS | Visual Line of Sight, suora näköyhteys |

1 Johdanto

Miehittämättömien ilma-alusten eli dronejen hyödyntäminen ammattikäytössä alasta riippumatta on lisääntynyt räjähdysmäisesti 2010-luvulta lähtien. Kuluttajapuolen dronetekniikka on kehittynyt merkittävästi lyhyessä ajassa. Markkinoille on saapunut useita valmistajia ja kehittäjiä, mahdollistaen hintojen madaltumisen ja laaja-alaisen levikin kuluttajakäyttöön. Dronen hyötykuormaksi on saatavilla hyvin monipuolisesti erilaisia antureita ja kameroita. Yleisimpiä näistä ovat valokuvaus- ja videokamerat, joiden lisäksi saatavilla on myös mm. laserkeilaimia (LiDar), multi – ja hyperspektrikameroita sekä lämpökameroita. Infrasuunnittelualalla dronejen hyödyntäminen on kasvanut monipuolisten käyttömahdollisuuksiensa vuoksi arjen työkaluksi, ja erilaisissa kartoituksissa voidaan hyödyntää mm. laserkeilausta tai ortokuvausta, eli yksittäisistä ilmakuvista tehtyä yhdistelmäkuva. Kuvauksilla voidaan päivittää perinteisiin menetelmiin verrattuna vaivattomasti jo vanhentunutta tietoa, silloinkin kun ympäristö on muuttunut lyhyessäkin ajassa paljon.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää laserkeilaavan dronen käyttömahdollisuuksia sekä tutkia sillä tuotettavan materiaalin hyödyntämistä laaja-alaisesti eri käyttökohteissa. Tämän työn edetessä luodaan suoraviivainen prosessi laserkeilausaineiston tuottamiseen ja sen hyödyntämiseen suunnittelussa suunnittelualasta riippumatta. Tarkastelen työskentelyprosessia vaihe vaiheelta kohteen katselmoinnista aina siihen pisteeseen saakka, kun valmis aineisto on luovutuskunnossa.

Tutkimuksessani kartoitan ennalta suunnitellun alueen sekä laserkeilaimella että kartoituskameralla. Tämän jälkeen kartoituskameran kuva-aineistosta muodostetaan pistepilviaineisto. Laserkeilaimella tuotetaan tarkkaa kolmiulotteista tietoa maanpinnasta ja sen muodoista sekä maanpinnalla olevista kohteista. Laserkeilaimella tuotettua aineistoa kutsutaan pistepilveksi, jossa jokaisen pisteen kolmiulotteiset suorakulmaiset koordinaatit tunnetaan (X, Y, Z). Pistepilvi voidaan tarvittaessa myös luokitella. Aineiston luokittelulla saadaan eroteltua esimerkiksi maanpintaa kuvaavat pisteet omaksi tasokseen, ja näin voidaan tehdä myös mm. puustolle, kasvillisuudelle sekä rakennuksille. Vertailen laserkeilaimella sekä kameralla tuotettuja pistepilviaineistoja maanmittauslaitoksen

pistepilviaineistoihin. Kyseinen maanmittauslaitoksen vertailuaineisto on laajemmalta alueelta, mutta aineisto rajataan testialueen muotoiseksi palaseksi. Lopulta näitä eri menetelmillä tuotettuja pistepilviaineistoja vertaillaan keskenään ja aineistojen laatua analysoidaan.

Pohdin lisäksi, mitä tekijöitä dronella tehtävässä laserkeilaustyössä tulee ottaa huomioon, ja miten saadaan tuotettua lopputulos, joka täyttää nykyhetken suunnittelun laatuvaatimukset ja viranomaisvaatimukset. Työn ohjaajina toimivat Antti Mustaniemi Ramboll Finland Oy:stä ja Oskar Eklöf Hämeen ammattikorkeakoulusta. Pistepilvien käsittelystä vastasi Hannu-Pekka Kämäräinen Ramboll Finland Oy:stä.

2 Työn tausta, rajaukset ja tavoitteet

2.1 Työn tausta

”Drone” on vakiintunut sekä suomalaisessa että kansainvälisessä kirjallisuudessa yhdeksi käytetyimmistä termeistä puhuttaessa miehittämättömästä ilma-aluksesta (UAV, Unmanned Aerial Vehicle) tai miehittämättömästä ilma-alusjärjestelmästä (UAS, Unmanned Aircraft System). ”UAV”-termistä on pyritty pois, ja sen on sittemmin korvannut termi ”UA, Unmanned Aircraft”. Käytän tässä opinnäytetyössä sanaa ”drone” kuvastamaan miehittämätöntä ilma-alusta.

Selvitys laserkeilaavasta dronesta on ajankohtainen laitteistojen yleistyessä markkinoilla. Laserkeilaavan dronen käyttö on Suomessa ollut vielä verrattain vähäistä, sillä laitteistoa on tullut saataville 2010-luvulla sekä aikaisemmin kalusto on maksanut satoja tuhansia euroja. Viime vuosina laitteiden hinnat ovat laskeneet ja siten toiminta on tullut kilpailukykyiseksi perinteisiin ilmakeilaustapoihin verrattuna. Perinteisesti ilmakeilausta on tehty lentokoneesta tai helikopterista.

Pistepilviaineistoja on muodostettu fotogrammetrisista aineistosta jo vuosia, mutta droneen kiinnitettävä laserkeilauskalusto tuo omat selkeät etunsa fotogrammetriikkaan nähden. Droneen kiinnitettäviä keilaimia valmistetaan useiden laserkeilainvalmistajien toimesta. Näitä valmistajia ovat mm. Riegl, Yellowscan, Dragan, Pheonix, OnyxScan ja Routscape.

Heidän kalustojensa hinnat varioivat kymmenistä tuhansista aina satoihin tuhansiin euroihin saakka. Laserkeilaimen lisäksi tarvitaan yhteensopiva drone, jolla hyötykuormaa kuljetetaan. Drone ja siihen kiinnitettävä laserkeilain tulee valita siten, että ne ovat yhteensopivia keskenään ja soveltuvat suunnitteluaineiston tuottamiseen.

Maanmittauslaitos on teettänyt valtakunnallisen laserkeilausaineiston vuosina 2008-2019. Maanmittauslaitos käyttää laserkeilaimella varustettua lentokonetta kartoituksissaan. Laserkeilausaineisto koostuu maanpintaa ja maanpinnalla olevia kohteita kuvaavasta kolmiulotteisesta pistemäisestä aineistosta. Jokaisella pisteellä on x-, y- ja z-koordinaattitieto. Aineiston alkuperäinen pistetiheys on 0,5 pistettä/m². Laserkeilausaineistoa on saatavilla koko Suomesta, ja tuotettu pistepilvi on avointa aineistoa (Maanmittauslaitos, 2022a).

Vuodesta 2020 eteenpäin Maanmittauslaitos tuottaa kansallisen laserkeilausohjelman mukaista laserkeilausaineistoa nimeltään "Laserkeilausaineisto 5p". Kansallisessa laserkeilausohjelmassa Suomi jaetaan alueisiin, jotka pohjoisinta Lappia lukuun ottamatta keilataan kuuden vuoden sykleissä. Vuosittain laserkeilattavaa pinta-alaa on noin 55 000 neliökilometriä (n. 20 erillistä tuotantoaluetta/vuosi). Aineiston pistetiheys on 5 pistettä/m². Laserkeilausaineisto 5p:n käyttö vaatii käyttöluvan. Uudesta Laserkeilausaineisto 5 p:stä luodaan lisäksi harvennettu avoin aineisto kaikkien avoimeen käyttöön. Se on harvennettu alkuperäisestä 5 pistettä/m² tiheyksisestä laserkeilausaineistosta 0,5 pistettä/m² tiheyteen (Maanmittauslaitos, 2022b).

Droneen kiinnitettävällä laserkeilaimella saadaan tuotettua tarkkuustasoltaan 100-300 pistettä/m² olevia pistepilviaineistoja. Tämä on moninkertaisesti enemmän kuin maanmittauslaitoksen pistepilviaineisto.

2.2 Työn rajaus

Opinnäytetyö on rajattu käsittelemään dronella tehtävää laserkeilausta ja sen hyödyntämistä erityisesti infrasuunnittelun näkökulmasta. Muita suunnittelualoja käsitellään tarpeen ilmetessä tarkemmin. Työssä ei perehdytä tarkemmin perinteiseen keilaukseen tai muihin mittaustapoihin, vaan keskitytään vertailemaan eri tekniikoilla tuotettujen pistepilviaineistojen eroja. Tässä opinnäytetyössä ei käsitellä laajasti miehittämätöntä ilmailua, koska aiheesta löytyy jo useita opinnäytetöitä.

2.3 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on tutkia pistepilviaineistoa, jotka on tuotettu Matrice 300 RTK -dronen kiinnitettyllä Zenmuse L1 -laserkeilaimella sekä Zenmuse P1 -kartoituskameralla, ja vertailla niitä keskenään samalta testialueelta. Vertailuun otetaan mukaan maanmittauslaitoksen teettämä pistepilviaineisto testialueilta. Kun pistepilviaineistot on kerätty, vertaillaan eri menetelmillä toteutettuja pistepilviä keskenään ja nämä tulokset analysoidaan.

Lopputuloksena syntyy myös prosessi laserkeilaus kartoitustyön tekemiseen, jota voidaan toistaa kaikissa kartoitustehtävissä. Tavoitteena on, että kartoitustöiden lopputulos olisi aina tasalaatuista ja mahdolliset virheet saadaan karsittua pois. Käytettävässä kalustossa on satoja eri asetusvaihtoehtoja ja niiden variaatiot on testien kautta saatu hiottua käymään jokaiselle erityyppiselle kartoitustyölle parhaimmalla mahdollisella tavalla sopivaksi.

3 Miehittämätön ilmailu

3.1 Miehittämättömän ilmailun historia ja kehitys

Miehittämättömän ilmailun ensiaskeleet otettiin jo yli vuosisata sitten Yhdysvalloissa ja Isossa-Britanniassa. Vuonna 1917 Yhdysvalloissa kehitettiin maailman ensimmäinen radio-ohjausta hyödyntävä, räjähteitä kuljettava miehittämätön lentokone. Tätä seurasi vuosina 1935 ja 1937 kehitetyt Ison-Britannian ”Queen Bee” sekä Yhdysvaltojen ”Target drone” -nimiset miehittämättömät sotailma-alukset. Sanan ”drone” kerrotaankin saaneen alkunsa alun perin tästä kahden maan välisestä sanaleikistä (Nonami, 2018). 1900-luvulla miehittämättömien ilma-alusten kehitys painoittuikin vahvasti sotateollisuuteen, ja droneja

kehitettiin räjähteiden kuljetusten lisäksi niin tiedusteluun, kohteiden houkutteluun, reaaliaikaiseen valvontaan, varusteiden kuljetukseen kuin ohjusiskuihinkin (Giones & Brem, 2017).

Kuluttajakäytössä olevien ilma-alusten kehityskulku on tapahtunut huomattavasti lyhyemmässä ajassa. Ensimmäinen harrastekäyttöinen radio-ohjauksessa toimiva helikopteri kehitettiin Länsi-Saksassa 1968 ja vastaavasti Japanissa 1970-luvun lopulla. Ensimmäisten radio-ohjattavien helikoptereiden massatuotanto ympäri maailmaa alkoi Japanista 1980-luvulla (Nonami, 2018). Nykyaikaisempien miehittämättömien ilma-alusten kehitys ja tutkimus sai alkunsa 1990-luvulla, aluksi yliopistomaailmassa. Vuonna 1991 Georgia Institute of Technology järjesti maailman ensimmäisen lentävien robottien kilpailun. Kilpailua seurasi kansainvälinen kiinnostus miehittämättömien ilma-alusten kehittämiseen akateemisen kentän lisäksi myös teollisuudessa sekä valtiotasolla. 1900–2000-luvuilla ympäri maailmaa perustettiin tutkimusryhmiä ilma-alusten tutkimukseen ja kehittämiseen. Tutkimukset keskittyivät niin alusten suorituskyvyn, aerodynamiikan, tietokoneohjelmien kuin autonomisen lentokontrollin kehittämiseen. Useat nykypäivän maailman johtavat drone-valmistajat ovat saaneetkin alkunsa näistä 1990-luvulla aloittaneista autonomista lentoa tutkineista opiskelijaryhmistä.

Vaikka alun perin nelikoptereita kehitettiin yksinomaan puolustusvoimien käyttöön, niiden kehitys johti kaupallisten tuotteiden myyntiin. 1990-luvun alussa kehitettyä japanilaista ”GyroSaucer”-nelikopteria pidetään alkuperäisenä harrastekäyttöisenä miehittämättömänä lentoaluksena. Se oli tarkoitettu sisäkäyttöön, ja lensi maksimissaan 3 minuuttia. Siviilikäyttöön tarkoitettujen ilma-alusten kehitystä on vauhdittanut samanaikainen teknologian kehittyminen, elektronisten komponenttien koon ja painon pieneneminen, yksiköiden suorituskyvyn kasvaminen ja videokameroiden sekä älylaitteiden kehittyminen. 2000-luvulla perustettiin useita kaupallisiin tuotteisiin erikoistuneita droneyrityksiä, kuten Microdrones GmbH, Ascending Technologies GmbH, Draganflyer sekä 2010-luvulla kuluttajamarkkinoiden johtavaksi yritykseksi noussut Parrot Company. Vuonna 2006 ensimmäinen open-source autopilotti eli avoimen lähteen automaattiohjausta tukeva ”MikroKopter” -malli julkaistiin, ja 2010-luvulla open-source autopilotteja julkaistiin yhä enemmän, mahdollistaen multikoptereiden laajemman tuotannon. Parrot Company julkaisi vuonna 2010 laajaan käyttöön levinneen ”AR drone” -mallin, joka hyödynsi alaspäin

suuntautuvaa kameraa ja ultraääntä korkeuden ja lentonopeuden laskemiseen, ja oli käytettävissä myös älypuhelimella tai -tabletilla. Kiinalainen dronetuottaja DJI ohitti pian Parrot Companyn myynnissä nelikopteri ”Phantom” -mallillaan, jonka voittokulku perustui muun muassa parempaan suorituskykyyn, tehokkaaseen tuuliresistanssiin, kehittyneeseen kameraan ja videoiden parempiin jakamismahdollisuuksiin, mahdollistaen dronejen yhä vahvemman kaupallistumisen ja ennennäkemättömän kuluttajalevikin (Nonami, 2018).

Vaikka laserkeilauksen hyödyntämistä droneissa on alun perin suunniteltu jo 2000-luvun alussa (Fantoni, ym., 2004), käytännön rajoitteet liittyen dronen ja LiDar-komponenttien kokonaispainoon ja riittävään virransaantiin ovat hidastaneet LiDar-skannerin ja dronen yhdistämisen onnistumista (Charlton;Coveney;& McCarthy, 2009). LiDar-tekniikan yhdistäminen dronetoimintaan onkin mahdollistunut vasta 2010-luvulta lähtien (Wallace;Lucieer;Watson;& Turner, 2012).

3.2 Nykytila

Droneja on tällä hetkellä saatavilla monipuolisesti erilaisiin käyttötarkoituksiin. Yleisimpiä ovat neliroottoriset, kiinteällä kameralla varustetut dronet, joita käytetään niin valokuvauksessa, videomateriaalin tuotannossa kuin erilaisissa kartoituksissakin. Tällainen on mm. kuvassa 1 nähtävä DJI Phantom 4 -drone. Näiden lisäksi on myös multiroottorisia sekä kiinteäsiipisiä dronemalleja, joita en käy tässä tutkimuksessa tarkemmin läpi.

Kuva 1. DJI Phantom 4 on ollut yksi suosituimmista drone malleista Suomessa (Ramboll, 2017)



Siviilikäyttöisten dronejen nopea yleistyminen lyhyessä ajassa on luonut tarpeen uudistaa miehittämättömän ilmailun lainsäädäntöjä, ja ajoittain lainsäädäntö onkin jäänyt kehityksen jalkoihin. Kirjoitushetkellä siviilipuolen dronemarkkinat ovat murrosvaiheessa, sillä EU-lainsäädännön uudet vaatimukset koskettavat laajasti laitevalmistajia, eikä CE-hyväksytyjä uudet määräykset täyttäviä laitteita ole tällä hetkellä vielä markkinoilla. Käsittelen tässä opinnäytetyössä myös uudistunutta lainsäädäntöä läpi pintapuolisesti kappaleessa 3.5.

3.3 Dronen käytön edut ja haasteet

Nykyisin dronet ovat insinööreille, rakennusyrityksille ja heidän asiakkailleen tärkeä työkalu tiedon keräämiseen ja tallentamiseen. Dronet ovat muuttaneet tapaa kerätä tietoa. Dronen avulla saadaan kerättyä suuria määriä tietoa hyvin nopeasti. Ennen droneja mittaus-, valokuva- sekä sensoridataa kerättiin kameroilla ja erilaisilla antureilla esimerkiksi nostureista tai matalalla lentävistä lentokoneista ja helikoptereista. Helikopterin tai lentokoneen käyttö on kuitenkin kallista ja epäkäytännöllistä varsinkin pienissä kohteissa.

Yksi tärkeimmistä eduista dronea käyttäessä on turvallisuuden parantuminen. Ihmisen ei tarvitse mennä vaarallisiin ympäristöihin keräämään dataa, kuten esimerkiksi kuvaamaan kameralla kallion reunalle tai talojen katoille. Dronella saavutetaan lisäksi sellaisia paikkoja, joihin lentokoneilla tai helikoptereilla ei päästä. Näitä ovat mm. voimalinjat, siltarakenteet sekä rakennusten väliset alueet. Esimerkiksi työmaan seuranta voidaan tehdä edullisesti viikottain tehtävillä dronelennoilla, joiden avulla voidaan vaivattomasti ja aikaa säästävasti seurata työn etenemistä.

Dronella työskentelyyn liittyy myös haasteita. Näistä olennaisimpia ovat voimassa olevat määräykset, ympäristö ja sää. Sateinen, tuulinen tai sumuinen sää voi johtaa etukäteen suunniteltujen lennätyspäivät peruuntumiseen, huomattavasti herkemmin kuin perinteisillä kuvausmenetelmillä. Suomen olosuhteissa kartoitukset halutaan yleensä ajoittaa lumettomaan ajankohtaan, koska esimerkiksi maanpinnan muotoja ei dronella pystytä lumisina talvina kartoittamaan. Päivän pituus vaihtelee kuukausien välillä, joten valoisan aika vaihtelee vuodenajasta riipuen. Tämä vaikuttaa kartoitusten aloitus- ja lopetusajankohtiin, koska pimeällä tiettyjen aineistojen keräys tietyillä menetelmillä on mahdotonta.

Taulukko 1. Vertailu ilmakuvaukseen käytettävän kaluston kustannuksista (Saura;Reyes-Menendez;& Palos-Sanchez, 2019)

| | Tarkkuus (Resoluutio) | FOV (Näkökenttä) | Käytettävyys | Datan hankinnan hinta | Hyötykuorman paino |
|-------------|--------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Drone | 0,5 – 10 cm | 50 – 500 m | Erittäin helppo | n. 500 e -> | Rajoitettu |
| Helikopteri | 5 – 50 cm | 0,2 – 2 km | Pilotti pakollinen | n. 5000e -> | Melkein rajoittamaton |
| Lentokone | 0,5 – 2 m | 0,5 – 5 km | Pilotti pakollinen | n. 10000 e -> | Rajaton |
| Satelliitti | 1 – 25 m | 10 – 50 km | - | Ei kustannus tehokas | - |

3.4 Alan tutkimus

Tutkimukset liittyen laserkeilaavien dronejen käyttöön ovat painottuneet viime vuosina erityisesti arkeologisiin tutkimuksiin (Casana, ym., 2021; VanValkenburgh, ym., 2020; Risbøl & Gustavsen, 2019) ja kasvillisuuden mallintamiseen (Almeidaa, ym., 2019; Collin, ym., 2018; Resop;Lehmann;& Hession, 2019). Tutkimusten ympärillä on tehty myös jonkin verran vertailua laserkeilaavan dronen hyödyistä verrattuna muihin aineistonkeruumetodeihin. Eero ja Lauri Koskinen tutkivat työssään fotogrammetrisia aineistoja ja vertailivat, onko laserkeilaavan dronen tuottamalla maanpintamallilla mahdollista parantaa fotogrammetrisen aineiston osuvuutta (Koskinen & Koskinen, 2021) He havaitsivat, että laserkeilaus parantaa tuloksia, mutta kuitenkin melko vähäisesti. Varsinkin z-akselilla siirretyillä maanpinnoilla parannus oli säännöllisempää.

Tutkimuksissa liittyen lentokoneella ja dronella tehtyihin laserkeilauksiin dronen tuomaksi lisähyödyksi on noussut tarkempi kuvaustarkkuus, kustannustehokkuus sekä matala lentokorkeus ja sen myötä käytön joustavuus monenlaisissa ympäristöissä (Resop;Lehmann;& Hession, 2019; Risbøl & Gustavsen, 2019). Esimerkiksi jokiympäristöön liittyvässä tutkimuksessa lentokoneen avulla tuotetussa pistepilviaineistossa betonisiltaan liittyvä relatiivinen virhe oli 6,37%, kun taas laserkeilaavan dronen tuottamassa pistepilviaineistossa virhe oli ainoastaan 0.93% (Resop;Lehmann;& Hession, 2019). Verratessa laserkeilaavan dronen pistepilviaineistoa takymetrillä ja GNSS-paikannuksella suoritettuihin mittauksiin maa- ja betonipadoilla, piste-erot olivat suurimmillaan 30 senttimetriä (Kumpula, 2021). Vaikka laserkeilaimen etuna usein on suuri pistetiheys ja tarkkuus maanpintamallinnuksessa tiheässäkin kasvillisuudessa, tässä tutkimuksessa laserkeilauksen tarkkuutta takymetriin ja GNSS-paikannukseen verrattuna näytti rajoittavan tiheän kasvillisuuden määrä.

Suomessa dronen käyttö mallinnus- ja suunnittelutehtävissä on selkeässä kasvussa, kun taas laserkeilaava drone on vasta vähitellen vakiinnuttamassa asemaansa suunnittelukäytössä. Kunnissa laserkeilaavia tai kamerallisia droneja hyödynnetään erityisesti 3D-kaupunkimallinnuksissa sekä karttojen valmistuksessa ja ylläpidossa (Matilainen, 2018; Träff, 2020). Laserkeilaavan dronen hyödyntäminen nimenomaisesti suunnittelutyön työkaluna on hieman vähäisempää, ja lisää tutkimuksia aiheesta tarvitaan. Drone näyttää potentiaaliselta

tulevaisuuden työkalulta myös esimerkiksi työmaa-alueilla, helpottaen selkeästi työmaahan liittyvää viestintää. Laitteiston käyttö vaatii kuitenkin osaamista operoinnin lisäksi myös pistepilvien hyödyntämisen tasolla (Tseloev, 2019).

3.5 Miehittämättömän ilmailun lainsäädäntö ja säädökset EU:ssa

Ajankohtaisista miehittämättömän ilmailun asetuksista vastaa Euroopan alueella Euroopan unionin lentoturvallisuusvirasto (EASA, European Union Aviation Safety Agency). Viimeisin lentoturvallisuusviraston dronejen lennättämistä yhtenäistävä asetus astui voimaan 1.1.2021, ja se on voimassa kaikkialla Euroopan unionin alueella (EU Regulations 2019/94, 2019/945). Ennen EU:n laajuista asetusta Suomessa noudatettiin 7.12.2018 voimaan astunutta Traficomien määräystä ”OPS M1-32 Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin käyttäminen ilmailuun” (Traficom, 2022a), joka pohjautui ilmalakiin (865/2014, 5, 9 ja 57 §). Uuden EU-asetuksen johdosta droneja lennättävien ammattilaisten ja harrastajien täytyy rekisteröityä, perehtyä lennättämistä koskeviin säädöksiin sekä pääsääntöisesti suorittaa paikallisen toimivaltaisen viranomaisen järjestämä verkkokoe. Suomessa toimivaltaisena viranomaisena toimii Traficom (Traficom, 2022a).

Euroopan unionin lentoturvallisuusviraston asetukset perustuvat riskitason arviointiin, jossa dronen paino, tekniset tiedot ja käyttötarkoitus on otettu huomioon. Riskitason mukaisesti dronetoiminta jaetaan kolmeen pääkategoriaan ”avoin”, ”erityinen” ja ”sertifioitu” (EASA, 2022a).

Pääkategoriat UAS-toiminnassa eli miehittämättömässä ilma-alusjärjestelmässä:

- ”Avoin” (open) -luokka on UAS-toiminnan luokka, joka riskit huomioon ottaen ei vaadi toimivaltaisen viranomaisen ennakkolupaa eikä UAS-operaattorin ilmoitusta ennen toiminnan toteutusta.
- ”Erityinen” (specific) -luokka on UAS-toiminnan luokka, joka riskit huomioon ottaen edellyttää toimivaltaisen viranomaisen luvan ja ennen toiminnan toteuttamista operatiiviset riskienarvioinnissa yksilöidyt lievennystoimenpiteet. Vakioskenaarioissa

riittää lentotoiminnan harjoittajan ilmoitus tai kevyt UAS-operaattoritodistus (LUC-hyväksyntätodistus).

- ”Sertifioitu” (certified) -luokka on UAS-toiminnan luokka, joka riskit huomioon ottaen edellyttää sertifioidun ilma-aluksen (tyyppitodistus/lentokelpoisuustodistus), luvan saaneen kaukolentäjän ja toimivaltaisen viranomaisen hyväksymän lento-operaattorin. ”Sertifioitu”-luokka kattaa toiminnot, joilla on korkein riskitaso.

3.5.1 Siirtymäajat avoimessa kategoriassa EU-droneasetuksessa

Miehittämätön ilmailu on tämän opinnäytetyön kirjoituksen aikaan siirtymäajalla (1.1.2021-31.12.2023), jolloin dronen lennättäjältä muun muassa vaaditaan rekisteröitymistä Traficomien järjestelmiin drone-operaattoriksi. Rekisteröitymisen ulkopuolelle jäävät kuitenkin alle 250 grammaa painavat dronet, joissa ei ole kameraa tai muuta henkilötietoja tallentavaa sensoria. Dronet, jotka luokitellaan leluiksi, jäävät myös rekisteröitymisen ulkopuolelle. Traficomien tietojen mukaan noin 14 000 lennättäjää on suorittanut verkkoteoriakokeen, joka sallii A1/A3 -kategoriassa lennättämisen (31.1.2021). Lisäksi, jos halutaan lennättää tiheästi asutulla alueella ja satunnaisten ihmisten päällä maksimissaan 2 kilogrammaa painavaa dronea, tulee A2-lisäteoriakoe suorittaa valvotussa tilassa. Teoriakokeita järjestää Suomessa useampi taho (Traficom, 2022b).

EU:n yhtenäistävässä droneasetuksessa on toimintaa ja laitteistoa koskevia siirtymäaikoja. Uusien markkinoille tulevien dronejen tulee olla CE-merkittyjä asetuksen (EU) 2019/947 mukaisesti 1.1.2024 alkaen. Kuvassa 2 on esitetty CE-merkintä, joka tulee laitteistosta löytyä, sekä taulukosta 2 vaatimukset niille. Tämän työn kirjoittamisen aikana markkinoilla ei ole vielä yhtään CE -luokituksia täyttävää dronea. Vanhoilla droneilla voi lentää 31.12.2023 jälkeen A3-kategorian mukaan vaikka niissä ei ole C2-C6 -luokitusta. Alle 250 g painoista ja maksimissaan 19 m/s nopeudella lentävää dronea voi käyttää A1-kategorian mukaisesti vaikka siinä ei ole C0-luokitusta (Traficom, 2022a).

Kuva 2. CE-merkintä, joka kertoo dronen C-luokituksen (EASA, 2022b)



Taulukko 2. Vaatimukset CE-luokitelluille droneille (EASA, 2022b)

| | C0 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 |
|--|----|----|----|----|----|----|----|
| Enimmäispaino alle 250 g | X | | | | | | |
| Enimmäispaino alle 900 g | | X | | | | | |
| Enimmäispaino alle 4 kg | | | X | | | | |
| Enimmäispaino alle 25 kg | | | | X | X | X | X |
| Hidas nopeustila (< 3 m/s), paitsi kiinteäsiipinen | | | X | | | | |
| Hidas nopeustila (< 5 m/s), ellei ole kytkettynä | | | | | | X | |
| Osoitus melupäästöstä (merkintä) | | X | X | X | | X | X |
| Dronen etätunnistus | | X | X | X | | X | X |
| Paikkatietoisuusjärjestelmä (Geo-awareness) | | X | X | X | | | |
| Alhaisen akkuvirran varoitin | | X | X | X | | X | X |
| Lennon keskeytysjärjestelmä, ellei ole kytkettynä | | | | | | X | X |
| Geo-häkkitoiminto (Geo-fence) | | | | | | | X |
| Tiedot dronen sijainnista, nopeudesta ja korkeudesta | | | | | | X | X |

3.5.2 Avoin-kategoria

Avoin -kategoria on lupavapaa kategoria ja se jakautuu kolmeen eri alaluokkaan A1, A2 ja A3. Kaikissa alaluokissa operaattorin tulee Suomessa olla täysi-ikäinen, kun taas kauko-ohjaajan ikäraja on 12 vuotta. Kauko-ohjaajalla tulee avoimessa kategoriassa olla pääsääntöisesti Traficomien A1/A3 verkkokoe suoritettuna sekä A2-luokassa toimiessa myös lisäteoriakoe.

Avoimessa kategoriassa on myös tiettyjä yleisiä vaatimuksia, jotka lennätysten tulee täyttää. Lennon on perustuttava suoraan näköyhteyteen (VLOS), vaarallisten aineiden kuljetus ja esineiden pudottaminen on kielletty, suurin sallittu lennätyskorkeus on 120 m (maan tai veden pinnasta), maksimi lentoonlähtömassa on 25 kg, ja drone on pidettävä turvallisen välimatkan päässä ihmisistä eikä sitä saa lennättää ihmisjoukkojen päällä. Lisäksi on myös otettava huomioon ilmailun kielto-, rajoitus- ja vaara-alueet ja UAS-ilmatilavyöhykkeet (Traficom, 2022a).

Taulukossa 3 on käsitelty 1.1.2021-31.12.2023 siirtymäajan rajoitukset sekä taulukossa 4 1.1.2024 jälkeisen ajan rajoitukset.

Taulukko 3. Drone-luokitukset avoimessa kategoriassa välillä 1.1.2021 – 31.12.2023 (Traficom, 2022d)

| A1 | A2 | A3 |
|--|---|---|
| Dronen max. Paino (500g) | Dronen max. Paino (500g-2 kg) | Dronen max. Paino (500g-25 kg) |
| Lennot sallittu satunnaisten ihmisten, mutta ei ihmisjoukkojen päällä. | Lennot sallittu turvallisella etäisyydellä (50 m) toimintaan kuulumattomista ihmisistä. | Lennot turvallisella etäisyydellä ihmisistä ja asutuksesta: <ul style="list-style-type: none"> Vähintään 150 metrin päässä lähimmästä asuin-, liike-, teollisuus- tai virkistysalueilta Alueella, jossa kauko-ohjaaja kohtuudella olettaa, ettei toimintaan osallistumattomille aiheudu vaaraa (etäisyyden oltava vähintään 30 m, mutta ei lähempänä kuin laitteen lentokorkeus). |
| Ei koulutusvaatimusta | Verkkoteoriakoe + lisäteoriakoe | Verkkoteoriakoe |
| UAS-ilmatilavyöhykkeet ja muut ilmailun kielto-, rajoitus- ja vaara-alueet tulee huomioida | | |

Taulukko 4. Drone-luokitukset avoimessa kategoriassa alkaen 1.1.2024 (Traficom, 2022d)

| A1 | A2 | A3 |
|--|---|--|
| Dronen max. Paino (500g) | Dronen max. Paino (500g-2 kg) | Dronen max. Paino (500g-25 kg) |
| CE-Merkinnät: C0 ja C1 | CE-Merkinnät: C2 | CE-Merkinnät: C2-C6 |
| <p>C0: Lennätys sallittu satunaisten ihmisten päällä, mutta ei ihmisjoukkojen</p> <p>C1: Lennoilla tulee välttää satunaisten ihmisten yli lentämistä, mutta lentäminen satunaisten ihmisten lähellä on sallittua</p> | <p>Lennot sallittu turvallisella etäisyydellä (30 m tai 5 m hidaslentomoodi päällä) toimintaan kuulumattomista ihmisistä.</p> | <p>Lennot turvallisella etäisyydellä ihmisistä ja asutuksesta:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vähintään 150 metrin päässä lähimmästä asuin-, liike-, teollisuus- tai virkistysalueilta • Alueella, jossa kauko-ohjaaja kohtuudella olettaa, ettei toimintaan osallistumattomille aiheudu vaaraa (etäisyyden oltava vähintään 30 m, mutta ei lähempänä kuin laitteen lentokorkeus). |
| <p>Dronen paino alle 250 g: Ei koulutusvaatimusta</p> <p>Dronen paino 250 – 900g: Verkkoteoriakoe</p> | Verkkoteoriakoe + lisäteoriakoe | Verkkoteoriakoe |
| UAS-ilmatilavyöhykkeet ja muut ilmailun kielto-, rajoitus- ja vaara-alueet tulee huomioida | | |

3.5.3 Erityinen-kategoria

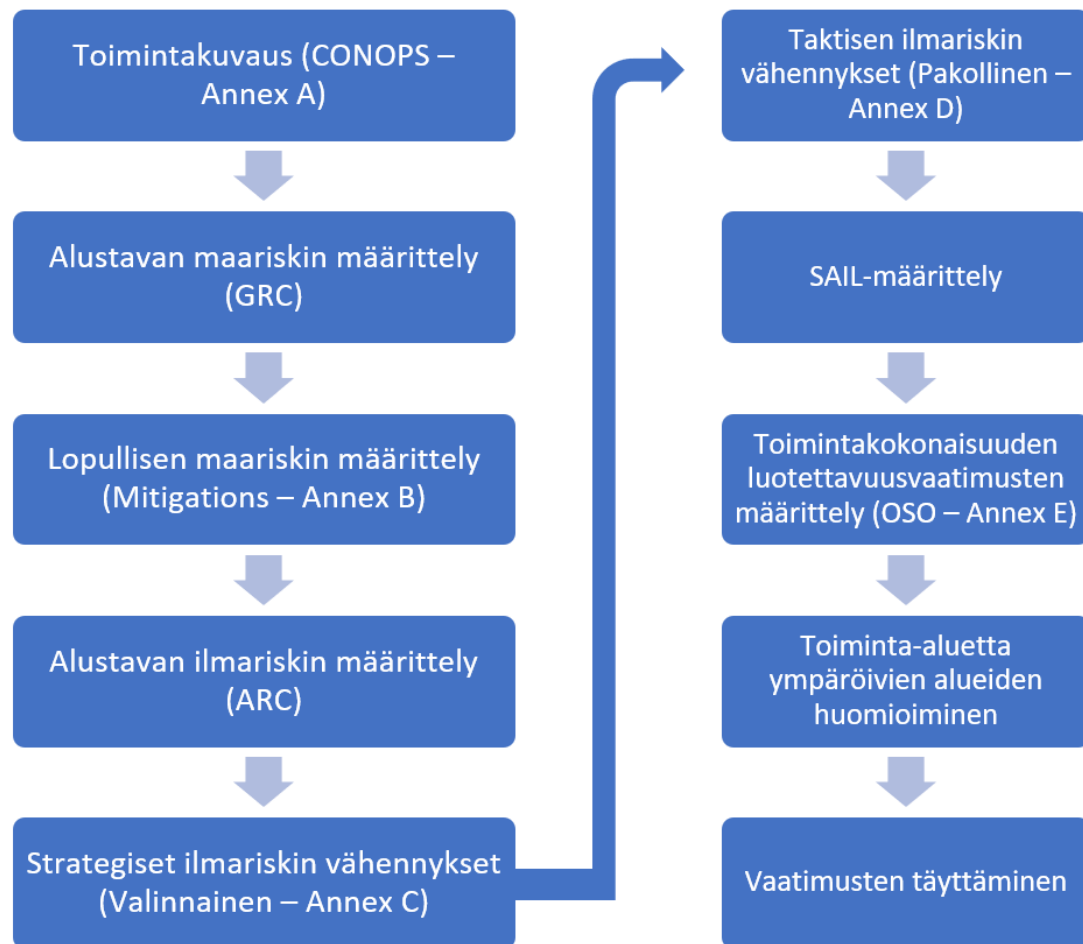
Jos operaatiota ei pystytä toteuttamaan avoimen kategorian sääntöjen mukaisesti, tulee hakea toimilupaa erityinen-kategoriaan. Operaattorin tulee aina olla rekisteröitynyt Traficom-järjestelmään, sekä toimintaa harjoittaessa rekisteröintijakso erityinen-kategoriaan tulee olla voimassa. Erityisen kategorian operaattorin tulee varustaa drone aktivoidulla ja päivitetyllä etutunnistusjärjestelmällä 1.1.2024 alkaen (Traficom, 2022g).

Toimilupia on kahdenlaisia. Ensimmäinen on ennakkoriskiarvion (PDRA) perustuva EASA:n julkaisema toimilupa. Siinä on määritelty viranomaisen taholta vakioskenaarioita luvanvaraiseen toimintaan. Jos toimintaa ei voida tehdä ennakkoriskiarvion perustuen, tulee hakea toimilupaa SORA-riskiarvion pohjalta (Traficom, 2022f).

Toimiluvan saamisen edellytys erityinen-kategoriassa on toiminnan määrittely ja sen kuvaaminen UAS-operaattorin toimintakäsikirjassa, joka tulee aina toimittaa hakemuksen liitteenä. Lisäksi on toimitettava mm. SORA-riskiarviointi sekä mahdolliset riskiarvioinnin lopputuloksesta aiheutuvia vaatimuksia tukevat dokumentit tai PDRA:n ehdot ja kuvaus - taulukko. SORA:n sisältö ja laajuus voi vaihdella toiminnan tyypistä, toimintaympäristöstä ja kokonaisriskitasosta (SAIL) riippuen (Traficom, 2022e).

SORA-menettely rakentuu kymmenestä eri osa-alueesta (kuva 3), jotka operaattorin tulee määritellä omalle toiminnalleen. SORA -menettelyllä taataan operaattorille sama turvallisuustaso kuin miehitetystä ilmailusta.

Kuva 3. SORA-prosessi (Traficom, n.d)



En käsittele tässä opinnäytetyössä syvemmin erityinen-kategorian säädöksiä tai lupaprosessia.

3.5.4 Sertifioitu-kategoria

Sertifioitu-kategorian toiminnaksi luokitellaan ihmisten tai vaarallisten aineiden kuljettaminen, ihmismassojen päällä tapahtuvat lennot isoilla droneilla (yli 3 metrin halkaisija) ja toiminta, jolloin SORA-riskiarvion perusteella riskejä ei voida tarpeeksi lieventää. Sertifioitu-kategoria on vielä kehityksen alla, joten siihen liittyviä standardeja ei ole julkaistu. Tästä syystä luvan saaminen sertifioitu-kategoriaan ei ole mahdollista tällä hetkellä (Traficom, 2022f).

4 Dronella tehtävä kartoitustyö

Tämä työn yhtenä tavoitteena oli luoda suoraviivainen prosessi dronella toteutettavan kartoituksen tekemisestä. Prosessi alkaa selvityksellä, jossa tutkitaan onko kartoitusta mahdollista toteuttaa ja jatkuu aina siihen asti, että lopputuote on valmis ja luovutettavissa eteenpäin asiakkaalle.

4.1 Selvitys kartoituksen toteuttavuudesta

Kun kysely mahdollisesta kartoitustehtävästä tulee, on ensin selvitettävä, onko kartoitusta järkevää tehdä droneilla ja onko se mahdollista. Jos kartoitettava alue on suuri (kymmeniä neliökilometrejä) tulee miettiä, onko se tehokkaampaa tehdä helikopterilla tai lentokoneella.

Joillakin alueilla voi olla lentokieltoalue, joten kaikkia paikkoja ei välttämättä ole mahdollista kartoittaa dronella. Lentokentän läheisyydessä tapahtuva lennätys tai kartoitus tulee lähes aina sopia alueen lennonjohdon kanssa. Myös suurten sairaaloiden läheisyydessä tapahtuva lennätys tai kartoitus tulee sopia sairaalan kiinteistöstä vastaavan henkilön kanssa, jos sairaala-alueelta löytyy helikopterialusta.

4.2 Kartoitustyön aluerajaus

Ennen kuin lentotyö voidaan aloittaa, tulee asiakkaalta selvittää mahdollisimman tarkasti kartoitettavan aineiston käyttökohde ja tarkoitus. Tällä varmistetaan se, että kuvausmaastossa toteutetaan mahdollisimman tarkasti halutut asiat. Kartoitusalueen rajaus onnistuu yksinkertaisimmillaan esimerkiksi kuvakaappauksella ja alueen ympyröinnillä Google Mapsista tai Earthista, josta esimerkki kuvassa 4. Optimaalisin tulos saadaan, jos alueen rajaukset ovat esimerkiksi paikkatietopohjaisina viivoina. Joidenkin dronemallien ohjain tukee paikkatietopohjaista aluerajausa, joka pystytään siirtämään ohjaimen suoraan tietokoneelta. Tämä helpottaa maastossa tehtävää työtä, koska aluerajausa ei tarvitse suunnitella enää ohjaimella paikan päällä. Jos kartoitettava alue on hyvin laaja, voidaan se pilkkoa pienemmiksi paloiksi suunnitteluohjelmissa. Tällöin voidaan varmistaa, että drone pysyy näköyhteydessä koko lennätysten ajan. Varsinkin tiheästi rakennetut alueet on hyvä pilkkoa pienemmiksi, jotta lennätys onnistuu näköyhteyden varassa.

Kuva 4. Aluerajausesimerkki kartoitettavasta alueesta Google Earth -pohjalla (Google Earth, 2021)

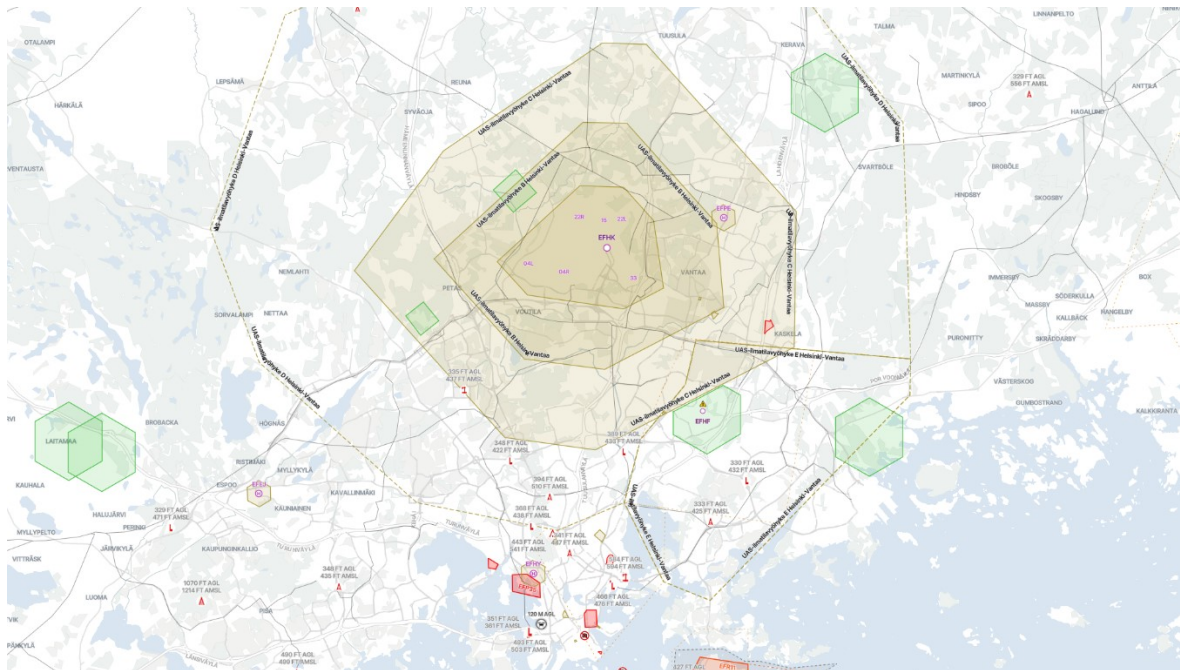


4.3 Lennonsuunnittelu

Kun aluerajaus on tiedossa, alkaa itse lennonsuunnittelu. Lennonsuunnittelussa tulee perehtyä kartoitettavan alueen ympäristöön. Ensimmäiseksi tarkistetaan mahdolliset lentoaluerajoitukset ja selvitetään, tarvitseeko lentämiseen alueella hakea erillistä lupaa. Esimerkiksi lentokentän läheisyydessä olevat alueet vaativat lähes aina lupahakemuksen lähettämistä kyseiselle lentokentälle lennätyskorkeuden ylittäessä 50 metriä.

Lentoaluerajoitukset voi tarkistaa esimerkiksi Aviamaps-verkkosivustolta (Aviamaps, 2022). Kuvassa 5 on nähtävissä Helsinki-Vantaan ympäristössä valitsevat rajoitusalueet Aviamaps-verkkosivulta. Tyypillisesti lentorajoitusalueita on mm. lentokenttien ympärillä, puolustusvoimien kiinteistöllä sekä harjoitusalueilla, ei-ETA maiden rajoilla, vankiloiden ympärillä ja valtiohallinnon tärkeiden kohteiden ympärillä. Suomessa Traficom in ylläpitämältä Droneinfo-sivustolta löytyy viimeisimmät tilapäiset lentorajoitukset. Niitä voidaan perustaa myös tarpeen mukaan, esimerkiksi valtion vierailut voi sulkea lennätysmahdollisuuden tietyltä alueelta määräajaksi.

Kuva 5. Kuvakaappaus Aviamaps-verkkosivulta (Aviamaps, 2022)



Lupahakemuksen lähettämisen yhteydessä tulee hakemukseen liittää lennätysalueen raja-alue. Esimerkiksi karttapohjaan merkitään näkyvällä värillä alue, jolla lennätystä tehdään. Lisäksi hakemukseen tulee ilmoittaa dronen lentäjän yhteystiedot, lennätyskorkeus sekä lennätysajan ajankohta (päivä ja kellonaika). Joissakin tapauksissa lennonjohto voi hylätä lennon suorittamisen pyydetyillä tiedoilla ja laittaa vastineeksi kriteerit, joilla lennon voi suorittaa kyseisessä kohteessa.

Tärkeää on ennakkoon selvittää dronen mahdolliset lennätyspaikat. Mahdollisuuksien mukaan paras paikka lennätyselle olisi aukea ja vähän liikennöity alue. Optimaalisesti alueen tulisi antaa lennättäjälle mahdollisuuden sijoittua maantieteellisesti korkeaan paikkaan kartoitettavassa kohteessa. Avoimessa kategoriassa toimiessa droneen täytyy olla koko lennätysajan näköyhteys (VLOS).

4.4 Kaluston valmistelu

Kalusto tulee valmistella huolellisesti ennen kartoitusalueelle siirtymistä. Koneen kunto tulee käydä huolellisesti läpi, ja mahdolliset ohjelmistopäivitykset tulee tarkastaa kaikista laitteista. Päivityksiä ei kannata asentaa kuitenkaan juuri ennen kartoituksia, koska asennuksissa voi tapahtua virheitä, jotka voivat vaikuttaa epäsuotuisasti koneen

toimintaan. Akut tulee käydä läpi ja tarkastella, ettei yksikään akuista ole mahdollisesti turvonnut tai muutoin vaurioitunut.

4.5 Kartoituksen toteutus

Huolellinen kartoituksen valmistelu varmistaa, että työskentely paikan päällä tapahtuu sujuvasti ja saumattomasti. Lennätyspaikka tulee valita siten, että se ei aiheuta häiriötä muulle liikenteelle. Lennätysalustaa on hyvä käyttää aina kun se on mahdollista.

Lennätysalusta on nähtävissä kuvassa 6. Se antaa myös ulkopuolisille signaalin käynnissä olevasta lennätyksestä. Joskus lennätyspaikkaa voi joutua vaihtamaan ennakkoon suunnitellusta yllättävien esteiden vuoksi. Onkin hyvä varata reilusti aikaa kartoituksen toteutukselle, jotta se voidaan toteuttaa turvallisesti ilman kiirettä. Lennätys tulee suorittaa näköyhteyteen perustuen, jos erillistä lupaa BVLOS-lennätykselle ei ole myönnetty.

Kuva 6. Drone lennätysalustalla (Forsell, 2021)



4.6 Aineistojen purku ja käsittely
























Kartoituksen jälkeen aineistot tyhjennetään kamerasta ja laserkeilaimesta tietokoneelle. Aineistot tyypistä riippuen käsitellään aluksi sopivassa ohjelmistossa, jossa määritellään aineistolle koordinaatisto sekä tehdään tarvittavat korjaukset, merkitään maatukipisteet ja valitaan haluttu lopputuote aineistosta. Kuvassa 7 on näkyvillä luokittelematon pistepilvi.

Kuva 7. Pistepilviaineisto, jota ei ole luokiteltu (Forsell, 2022)

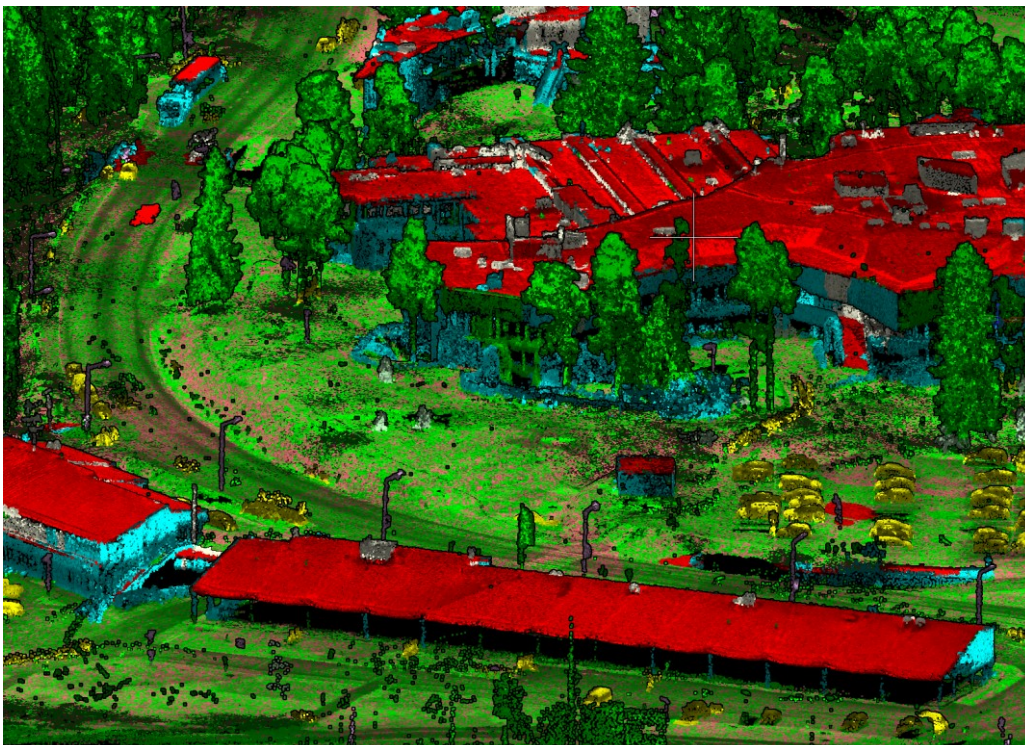


Pistepilviaineistot voidaan luokitella tarkoitukseen sopivalla ohjelmistolla. Yleisesti ohjelmistosta löytyy algoritmi, joka sijoittaa automaattisesti pisteitä tietyille tasoille sekä harventaa aineistoa. Automaattisen käsittelyn jälkeen tulee aineisto vielä tarkastaa manuaalisesti, jotta pisteitä ei olisi väärillä tasoilla. Pistepilven luokittelu mahdollistaa sen, että aineistosta saadaan esimerkiksi poimittua pelkkä maanpinta, joka voidaan viedä suunnitteluohjelmaan lähtötiedoksi. Kuvassa 8 on näytetty tyypillisimmät tasot, joille pisteet kategorisoidaan. Tasojen nimiä ja määriä voi muokata haluamallaan tavalla ohjelmistossa. Kun pistepilvi on luokiteltu, jokaisella tasolla on omaa värinsä kullekin pistetasolle, jotta ne on helpompi erottaa toisistaan. Luokitellun pistepilviaineiston lopputulos on nähtävissä kuvassa 9.

Kuva 8. Esimerkki pistepilvitasoista (Ramboll, 2022)

| | | | | |
|----|-------------------|---------|---|---|
| 0 | Not classified | Not set | 0 |  |
| 1 | Default | Not set | 0 |  |
| 2 | Ground | Not set | 0 |  |
| 3 | Low vegetation | Not set | 0 |  |
| 4 | Medium vegetation | Not set | 0 |  |
| 5 | High vegetation | Not set | 0 |  |
| 6 | Building roof | Not set | 0 |  |
| 7 | Low point | Not set | 0 |  |
| 8 | Model keypoint | Not set | 0 |  |
| 9 | Wall | Not set | 0 |  |
| 10 | Vegetation | Not set | 0 |  |
| 11 | Bridge | Not set | 0 |  |
| 12 | Overlap | Not set | 0 |  |
| 13 | Roof structure | Not set | 0 |  |
| 14 | Wall structure | Not set | 0 |  |
| 15 | Tree | Not set | 0 |  |
| 16 | Water | Not set | 0 |  |
| 17 | Car | Not set | 0 |  |
| 18 | Pole | Not set | 0 |  |
| 19 | Inactive | Not set | 0 |  |
| 20 | Temporary 1 | Not set | 0 |  |
| 21 | Temporary 2 | Not set | 0 |  |
| 22 | Noise | Not set | 0 |  |

Kuva 9. Luokiteltu pistepilvi -malli (Forsell, 2022)



4.7 Aineistojen toimitus

Kun pistepilviaineisto on luokiteltu ja se on muunnettu oikeaan koordinaatistoon, voidaan aineisto toimittaa asiakkaalle. Laserkeilausaineistot toimitetaan tyypillisesti .las-muotoisina ja ortokuva-aineistot .geotiff-, tiff- tai .JPG-muotoisina.

Projektin luonteesta riippuen aineistot voidaan tarvittaessa muuntaa eri koordinaatistoihin. Esimerkiksi joillakin projekteilla on oma koordinaatistonsa käytössä, joka ei ole liitoksissa perinteisesti käytettyihin koordinaattijärjestelmiin.

5 Pistepilviaineistojen tutkimus

5.1 Tutkimuksessa käytetty laitteisto ja tekniikka

5.1.1 DJI Matrice 300 RTK -drone

Työssä käytetään Ramboll Finland Oy:n omistamaa DJI Matrice 300 RTK -dronea (kuva 10). Tähän droneen on saatavilla monipuolisesti hyötykuormia, mm. lämpökamera, kamera vaihdettavilla objektiiveilla, laserkeilain, zoom-kamera tai lisälaitteet kolmansilta osapuolilta. Dronessa on kaksi litumpolymeeriakkua (5935mAh/akku). Näillä lentoaika ylittää noin 40 minuuttiin. Lentoaikaan vaikuttaa merkittävästi sää, tuuli sekä käytössä oleva hyötykuorma. Matrice 300 RTK tukee niin sanottua akkujen hotswappia, jonka ansiosta akut voi vaihtaa vuoron perään ilman dronen sammuttamista. Tällöin dronen ei tarvitse etsiä satelliittejä uudestaan, ja työn jatkaminen käy saumattomasti heti akkujen vaihdon jälkeen. Koneen runko on pääosin hiilikuitua ja muovia. Matrice 300 RTK on IP45-luokiteltu ja sillä voidaan operoida -20 °C asteesta aina +50 °C asteen lämpötiloihin (DJI, 2022a).

Kuva 10. DJI Matrice 300 RTK -drone (Forsell, 2021)



Kartoituksessa käytettiin keskimääräisesti lentonopeutena 10 m/s ja lentokorkeutena 100 metriä, riippuen kohteen luonteesta. Dronen ohjaimen (kuva 11) kantama riittää jopa 8 kilometrin etäisyydelle. Tiheästi rakennetut ympäristöt luonnollisesti heikentävät signaalia dronen ja ohjaimen välillä sekä vaikeuttavat laajemmilla kartoitustehtävillä näköyhteyden pitämistä dronessa. Lentopaikka tuleeikin mahdollisuuksien mukaan valita aukealle alueelle, jotta näköyhteys droneen pysyy koko lennätysten ajan.

Kuva 11. Kartoitustehtävä käynnissä Otaniemessä (Ramboll, 2021)



5.1.2 DJI Zenmuse L1

DJI Zenmuse L1 on DJI:n ensimmäinen laserkeilain. L1-laserkeilain pystyy tuottamaan 240 000 pistettä sekunnissa ja tukee kolmea kaikua. L1 on IP54-luokiteltu, joten se kestää pientä kosteutta. Zenmuse L1 -laserkeilaimella voidaan operoida myös $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteesta $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteeseen. On kuitenkin suotavaa laserkeilata selkeällä säällä ja ajoittaa kartoitusajankohta lumettomalle kaudelle. Maassa oleva lumi peittää todellisen maanpinnan, eikä silloin ole mahdollista saada tarkkaa tietoa maanpinnan oikeista koroista. Satava lumi aiheuttaa laserkeilatessa pistepilviin lisäksi ylimääräisiä heijastuksia, jotka eivät ole toivottuja aineistoissa. Jos kartoituksen aikana alkaa vesisade, voi vesipisarot linssissä vääristää tuloksia. Tällöin on hyvä keskeyttää kuvaukset ja odottaa sään parantumista sekä puhdistaa linssi.

Aikaisempiin DJI:n konemalleihin on saanut jo pitkään usean eri valmistajan laserkeilaimia, mutta ne ovat toimineet omana järjestelmänä dronen toimiessa vain kuljettimena. Zenmuse L1:n data välittyy reaaliajassa dronen ohjaimen, josta pilotti näkee pistepilven muodostumisen lennon edetessä, kuten kuvasta 12 voi nähdä.

Kuva 12. Pistepilvi muodostuu reaaliajassa kauko-ohjaajalle (Ramboll, 2021)



Reaaliaikaisen pistepilven muodostumisen ansiosta etenkin manuaalisesti tehtävät laserkeilaukset ja automaattiohjauksella lennetyt alueet on helppo tarkastaa reaaliajassa. Aineistoa ei tarvitse ensin käsitellä tietokoneella, vaan kohteen voi tarkastaa jo laserkeilattavalla kohteella ollessa. Laserkeilaimen asetukset on helppo asettaa ohjaimesta jokaiselle erilaiselle laserkeilaustehtävälle. Zenmuse L1 sisältää myös kameras, joka valokuvaa laserkeilattavat alueet laserkeilauksen yhteydessä mahdollistaen värillisen pistepilven muodostumisen. Tämä helpottaa eri objektien tunnistamista pistepilviaineistosta. Kameraa pystyy myös käyttämään erikseen ilmakehu- sekä kartoitustehtävissä, mutta laserkeilauksessa käytettävä peittoalue on paljon pienempi kuin mitä laadukkaan ortokuvan tuottaminen vaatisi. Tällöin se pitää tehdä tarpeen mukaan erillisellä tehtävällä. Alla olevassa kuvassa 13 on Zenmuse L1 kiinnitettynä M300 RTK -

droneen. DJI Zenmuse L1 -laserkeilain vaatii lämpemiseen jokaisen käynnistyksen yhteydessä viisi minuuttia ennen tehtävän aloitusta. Zenmuse L1 vaatii joko DJI D-RTK 2 -tukipisteen tai verkko-RTK -palvelun toimiakseen. RTK-tukiasemasta sekä verkko-RTK -järjestelmistä on kerrottu tarkemmin kappaleessa 5.2.

Kuva 13. DJI Zenmuse L1 laserkeilain kiinnitettynä Matrice 300 RTK -droneen (Forsell, 2021)



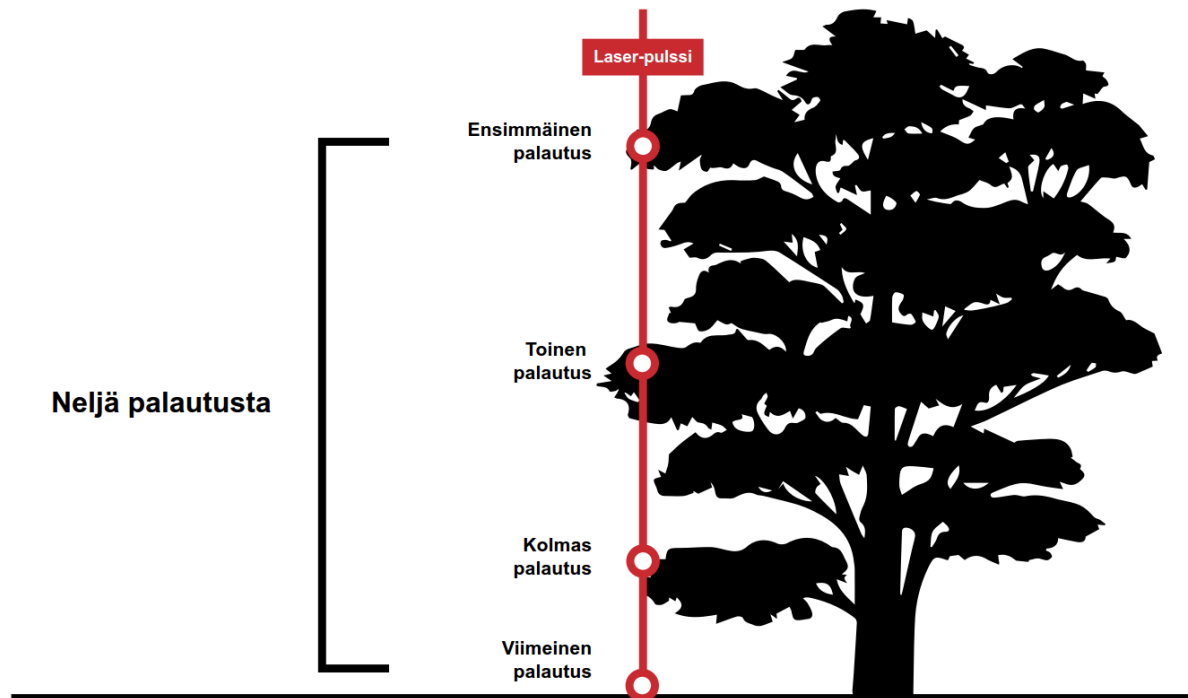
5.1.3 LiDar-tekniikka

LiDar (Light detection and ranging) on tekniikka, jolla määritetään etäisyys lähettämällä lasersäde kohteeseen ja mittaamalla aika, jonka valo ottaa palatakseen lähettimeen. Ensimmäiset yritykset mitata etäisyyttä valon avulla tehtiin 1930-luvulla valonheittimillä, joilla tutkittiin ilmakehän rakennetta. Laserin keksimisen jälkeen vuonna 1960 LiDar:ia käytettiin hyödyntämällä lentokoneita lasersäteiden alustana. Kuitenki vasta 1980-luvun lopulla, kaupallisesti saatavilla olevien GPS-laitteiden ja inertiamittausyksiköiden saavuttua markkinoille, voitiin saada tarkkoja LiDar-tietoja.

Tyypillisessä LiDar-järjestelmässä laserkeilain osoittaa 90 asteen kulmassa alaspäin lentokoneen pohjasta ja lähettää jopa 400 000 valopulssia sekunnissa kohti maata. Tyypillisesti käytetään lähi-infrapunasäteilyä lähettävää laseria. Pulssit heijastuvat lentokoneen pohjassa olevaan vastaanottimeen. Pulssit vastaanotetaan joko yksittäisinä paluupulsseina, joissa lähetetty valo heijastuu tasaiselta pinnalta, tai useina paluupulsseina,

joissa esimerkiksi pulssi osuu metsään ja palauttaa useita heijastuksia puiden latvoista, oksista sekä maasta. Esimerkki kuvassa 14 on visuaalisesti tämä esitettyä.

Kuva 14. Esimerkkikuva lasersäteen palautuskerroista (Forsell, 2022)



Etäisyys lentokoneesta alla olevaan kohteeseen on yhtä suuri kuin puolet pulssin lähetyksen ja vastaanottamisen välisestä ajasta kerrottuna valonnopeudella ($d=1/2tc$). Pintojen kartoitustarkkuutensa vuoksi LiDar on hyödyllinen topografisten karttojen luomiseen. Sen kyky kartoittaa maata puiden peittämiltä alueilta on todettu erittäin tehokkaaksi (Gregersen, n.a).

5.1.4 DJI Zenmuse P1

DJI Zenmuse P1 (kuva 15) on Matrice 300 RTK -dronen tarkoitettu kartoituskamera. Yhdellä akkuparilla on mahdollista kartoittaa noin 2,5 neliökilometrin alue sääolosuhteista riippuen. Zenmuse P1 on 45 megapikselin täysikokoinen kenno ja se kykenee ottamaan 8192 x 5460 pikselin tasoisia valokuvia. Zenmuse P1 on IP4X-luokiteltu ja sillä voidaan operoida -20 °C asteesta +50 °C asteeseen.

Zenmuse P1:een on saatavilla lisävarusteena 24 ja 50 millimetrin polttovälin objektiivi. P1:n mukana toimitetaan 35 millimetrin objektiivi, joka toimii noin 100 metrin korkeudelta hyvällä pikselitarkkuudella. Lentorajoitusalueilla, missä on maksimissaan 50 metrin lentokorkeus, antaa 24 millimetrin objektiivi noin 0,5cm/pikseli tarkkuuden. Kuvassa 16 näkyvä ortokuva on kuvattu 60 m korkeudelta, ja siinä on käytetty 24 millimetrin objektiivia. Tällä saadaan tarkkuudeksi 1.1cm/pikseli.

Kuva 15. DJI Zenmuse P1 kiinnitettynä Matrice 300 RTK -droneen (Ramboll, 2021)



Kuva 16. Ortokuvaus Zenmuse P1 -kameralla Aalto-yliopiston Dipoli-rakennuksesta (Forsell, 2021)



Matrice 300RTK -droneen kytketty Zenmuse P1 -kamera tukee Smart Oblique -toimintoa, jolla saadaan tuotettua laadukasta 3D-kuva-aineistoa, josta esimerkki kuvassa 17. Lennon aikana kamera kääntyy automaattisesti eri kulmiin, ja siten kartoitettavasta alueesta saadaan kuvia monista eri kuvakulmista. Tämä auttaa ohjelmistoa tekemään aineistosta laadukkaan 3D-mallin. Tällä tekniikalla saadaan tehtyä muun muassa kaupunkimalleja, malleja yksittäisistä rakennuksista tai maastomalleja.

Kuva 17. Smart Oblique -toiminnolla toteutettu kuvaus P1-kameralla Aalto-yliopiston Dipoli-rakennuksesta (Forsell, 2021)



5.1.5 Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus (RTK)

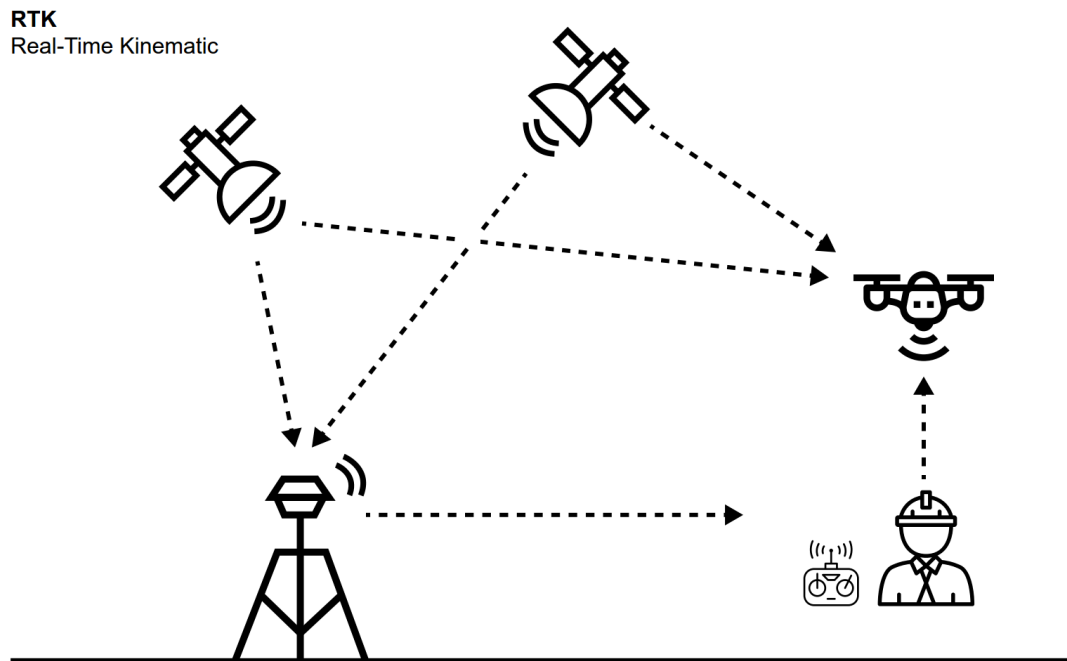
Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus (RTK, Real Time Kinematic) on menetelmä, jota hyödynnetään monipuolisesti niin kartoitus- ja maastomallimittauksissa, merkintämittauksissa kuin koneohjauksessakin. Nykyisin menetelmä on vaivattomasti hyödynnettävissä myös dronella tehtävissä kartoituksissa (Laurila, 2012). DJI D-RTK2 on siirrettävä RTK-tukiasema (kuvassa 18), joka toimii DJI-merkkisten RTK-dronejen kanssa, mutta niitä on mahdollista käyttää myös virtuaalisen tukiaseman kanssa (DJI, 2022b).

Kuva 18. DJI D-RTK2 -tukiasema (DJI, 2022b)



RTK-mittaus perustuu tukiaseman ja dronen väliseen yhteyteen. Yhteys voidaan luoda esimerkiksi radiomodeemilla tai GSM-verkolla. Valitusta tiedonsiirtoyhteydestä riippuen toimintasäteen pituus vaihtelee. Radiomodeemin kautta toimintasäde on enintään 10 kilometriä, kun taas GSM-verkossa ainoastaan mittaustavan rajoitteet määrittävät käyttösäteen alle 20 kilometriin. Vastaanotin lähettää mitatut vaihevainnot dronelle, joka taas laskee reaaliajassa alkutuntemattomat sekä muut tarvittavat mittaussuureet. Kuvassa 19 on havainnollistettu tätä periaatetta. Kun välimatka kasvaa tukiasemien välillä, pitenee myös alkutuntemattomien laskenta-aika. Maasto vaikuttaa myös yhteyksiin. Jotta paikannustulokset olisivat riittävän tarkkoja, tulee tukiasemalla ja dronella olla vähintään 6-7 yhteistä satelliittia (Laurila, 2012).

Kuva 19. RTK-mittauksen periaate dronea käyttäessä (Forsell, 2022)



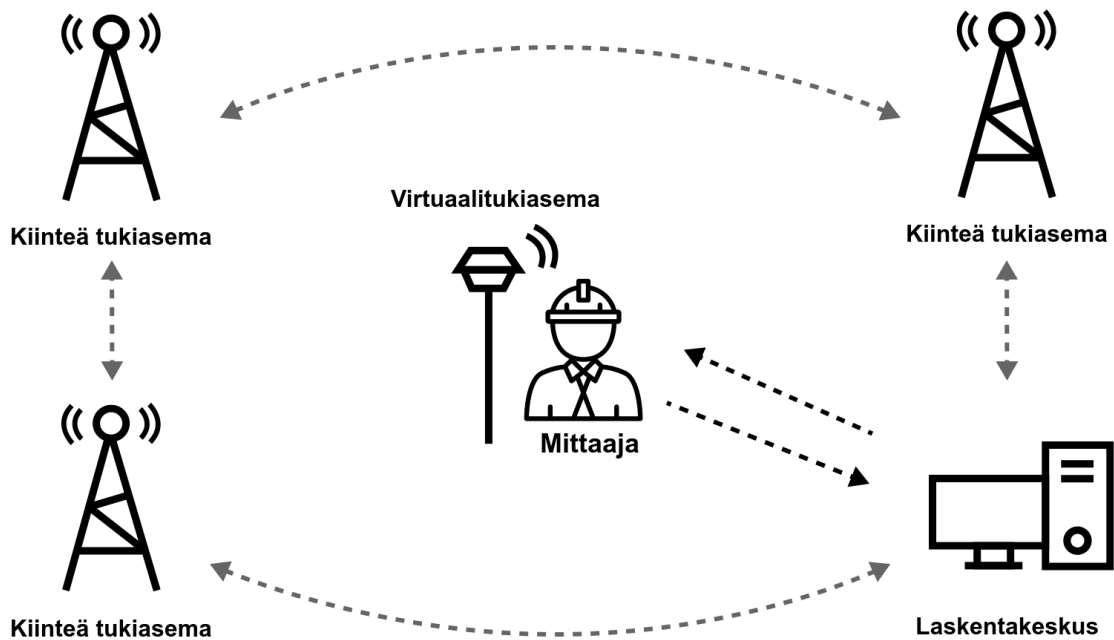
RTK-mittaus perustuu tukiaseman ja dronen väliseen yhteyteen. Yhteys voidaan luoda esimerkiksi radiomodeemilla tai GSM-verkolla. Valitusta tiedonsiirtoyhteydestä riippuen toimintasäteen pituus vaihtelee. Radiomodeemin kautta toimintasäde on enintään 10 kilometriä, kun taas GSM-verkossa ainoastaan mittaustavan rajoitteet määrittävät käyttösäteen alle 20 kilometriin. Vastaanotin lähettää mitatut vaihehavainnot dronelle, joka laskee reaaliajassa alkutuntemattomat sekä muut tarvittavat mittaussuureet. Kun välimatka kasvaa tukiasemien välillä, pidentyy alkutuntemattomien laskenta-aika. Maastonmuodot voivat heikentää yhteyksiä. Jotta paikannustulokset olisivat riittävän tarkkoja, tulee tukiasemalla ja dronella olla vähintään 6-7 yhteistä satelliittia (Laurila, 2012).

Perinteinen RTK-mittaus on luotettava tukiaseman ollessa alle 10 kilometrin säteellä. Säteen edelleen kasvaessa ionosfäärin ja troposfäärin vaikutus laskentavirheisiin kasvaa. Näitä ilmakehään liittyviä virheitä kuitenkin pystytään välttämään, kun RTK-mittausta tehdään tukiasemaverkossa. Tukiasemaverkossa tehtyä mittausta kutsutaan verkko-RTK:si. Toimitanperiaatetta on havainnointu kuvassa 20. Tämän avulla välimatkat eivät muodostu ongelmaksi tukiasemien välillä (Laurila, 2012).

Verkko-RTK -menetelmä vaatii jatkuvan verkkoyhteyden korjausdatan lähettämiseksi. Kaupunkialueet korkeine rakennuksineen voivat luoda yhteyteen vaikuttavia katvealueita.

Näistä syistä johtuen on tärkeää valita dronen lennätyspaikka siten, että verkkoyhteydet ovat hyvät. Suomessa VRS-palveluita ylläpitää ainakin Geotrim Oy (Trimnet VRS) sekä Hexagon Leica Geosystems Oy (SmartNet).

Kuva 20. Tukiasemaverkon toimintaperiaate (Forsell, 2022)



Tätä opinnäytetyötä varten saatiin Geotrim Oy:ltä testilisenssi Trimblen Trimnet -palveluun. Trimnet-palvelun käyttäjän ei tarvitse erikseen hankkia siirrettävää tukiasemaa, vaan palvelu luo käyttäjälle virtuaalisen tukiaseman. Tämä helpottaa maastossa tehtävää työtä, koska erillistä tukiasemaa ei tarvitse perustaa. Trimnetin tukiasemaverkko koostuu yli sadasta ympäri Suomea olevasta GNSS-tukiasemasta sekä Vantaalla sijaitsevasta laskentakeskuksesta (kuva 21). Palvelun käyttö vaatii lisenssin, jonka voi hankkia Geotrim Oy:ltä. Lisenssejä voidaan räätälöidä tarpeiden mukaan mm. käyttöajan sekä tarkkuuden osalta. Palvelun ytimenä on VRS-tukiasemaverkko, joka perustuu Virtual Reference Station -menetelmään (VRS) (Geotrim, 2022).

Kuva 21. Geotrimin havainnekuva maanpäällisistä tukiasemista (Geotrim, 2022)



5.1.6 GCP, Ground Control Point, Maatukipiste

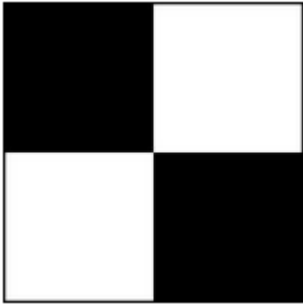
Maatukipisteet ovat maan päällä olevia pisteitä, joilla on tunnetut koordinaatit.

Maatukipisteet voidaan joko maalata merkkusmaalilla maastoon, tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää kontrastivärein maalattuja, teipattuja pahvin tai metallin paloja.

Ilmakartoituksessa maatukipisteet ovat pisteitä, jotka mittaja voi paikantaa tarkasti. Jo muutamalla pisteellä saadaan kartoitettavien alueiden koordinaatitarkkuutta parannettua.

Maatukipisteet voivat olla minkälaisia tahansa, kunhan ne ovat helposti tunnistettavissa kuvista. Tyypillisesti ne näyttävät pieneltä shakkilaudan palalta, kuten kuvasta 22 voi nähdä. Maatukipisteet ovat yleensä mustavalkoisia, koska ne on helpompi tunnistaa kuvista ison kontrastinsa vuoksi. Maatukipisteestä mitataan pisteen keskikohta perinteisillä mittausmenetelmillä, jolloin saadaan tarkka koordinaatti maatukipisteestä aineiston koordinaatin korjausta varten. Kuvassa 23 mittaja mittaa tarkasti maatukipisteen keskeltä sen sijaintia.

Kuva 22. Maatukipiste 2D-näkymästä (Forsell, 2022)



Kuva 23. Mittaaja mittaamassa maatukipistettä Espoossa (Ramboll, 2021)



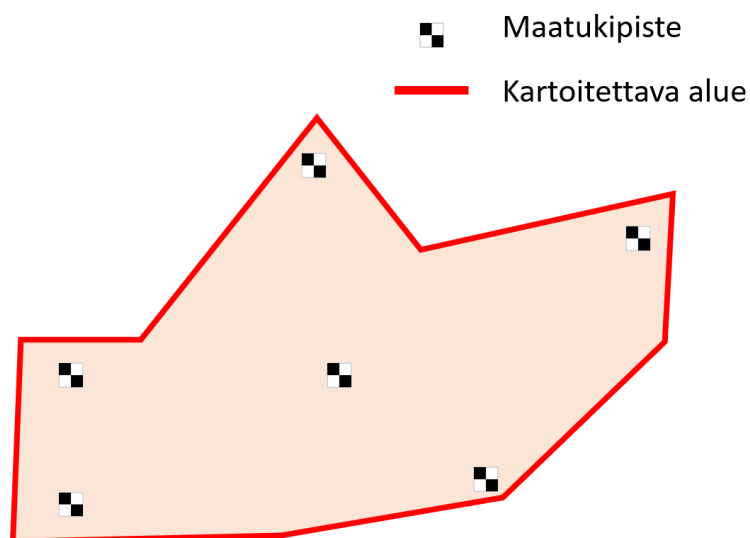
Suosittelavaa on käyttää tiheästi asutuilla alueilla maalattuja (kuva 24) maatukipisteitä, koska siirrettävissä olevat maatukipisteet kiinnostavat ihmisiä, ja niitä saatetaan näin liikutella työn suorituksen aikana.

Kuva 24. Maatukipiste maalattuna Espoossa jalankulun ja pyöräilyn väylälle (Forsell, 2021)



Maatukipisteiden määrä kartoitettavalla alueella riippuu alueen muodosta sekä pinta-alasta. Tyypillisesti yhdellä kartoitettavalla alueella tulisi käyttää vähintään viittä maatukipistettä. Maatukipisteitä tulee laittaa kartoitettavan alueen kulmiin sekä hajauttaa muulle alueelle ilmasta näkyville paikoille. Alla on esimerkkikuvassa 25 kartoitettavan alueen merkitsemisperiaatteesta.

Kuva 25. Maatukipisteiden asettelun esimerkkikuva (Forsell, 2022)



Maatukipisteet tulisi hajauttaa mahdollisimman laajalle alueelle. Jonomaista asettelua tulee välttää. Nevada Department of Transportation on tehnyt tutkimuksen, jossa on todettu, että yli 10 maatukipisteen käyttö ei lisää tarkkuutta merkittävästi ortokuvauksissa (Pix4D, 2018).

Kun käytössä on RTK-Drone, maatukipisteet eivät ole välttämättömiä. Kuitenkin useat toimijat ja tahot vaativat tarkkeiden käyttöä. Niiden avulla voidaan varmistua, että koordinaatit ovat oikein, sekä saadaan laskettua aineiston koordinaattitarkkuus suhteessa pisteiden mittauksiin. Pisteitä käytetään jo lopputuotteen laskennassa tarkentamaan lopputuotetta. GNSS-järjestelmiä hyödyntävien dronejen kanssa on erittäin suositeltavaa käyttää maatukipisteitä, jotta varmistutaan aineiston laadusta.

5.2 Tutkimus

Tässä opinnäytetyön tutkimuksessa tutkin erilaisilla metodeilla tuotettuja pistepilviaineistoja ja niiden välisiä eroja. Tutkimukseen olen valinnut tutkittavalta alueelta neljä erilaista pienempää aluetta, joilta analysoin pistepilven tiheyksiä maanpinnan osalta. Käsittelen tutkimuksessa maanmittauslaitoksen pistepilviaineistoa, DJI Zenmuse P1 -kameralla tuotetusta fotogrammetria-aineistosta tehtyä pistepilviaineistoa sekä DJI Zenmuse L1 -laserkeilaimella muodostettua pistepilviaineistoa.

Dronella tuotettujen pistepilviaineistojen suodattimena käsittelyssä on käytetty suodatinta, joka poistaa tuloksista pisteet jotka ovat alle 10 cm säteellä toisesta pisteestä. Jos piste ei täytä määritystä, se on poistettu tuloksesta. Tässä käsittelyssä siivotaan häiriöt ja aineistoon kuulumattomat pisteet. Tutkin tässä työssä myös alueelta otettua poikkileikkausta, joka on rajattu jokaisesta aineistosta samasta sijainnista.

5.3 Kohdealue

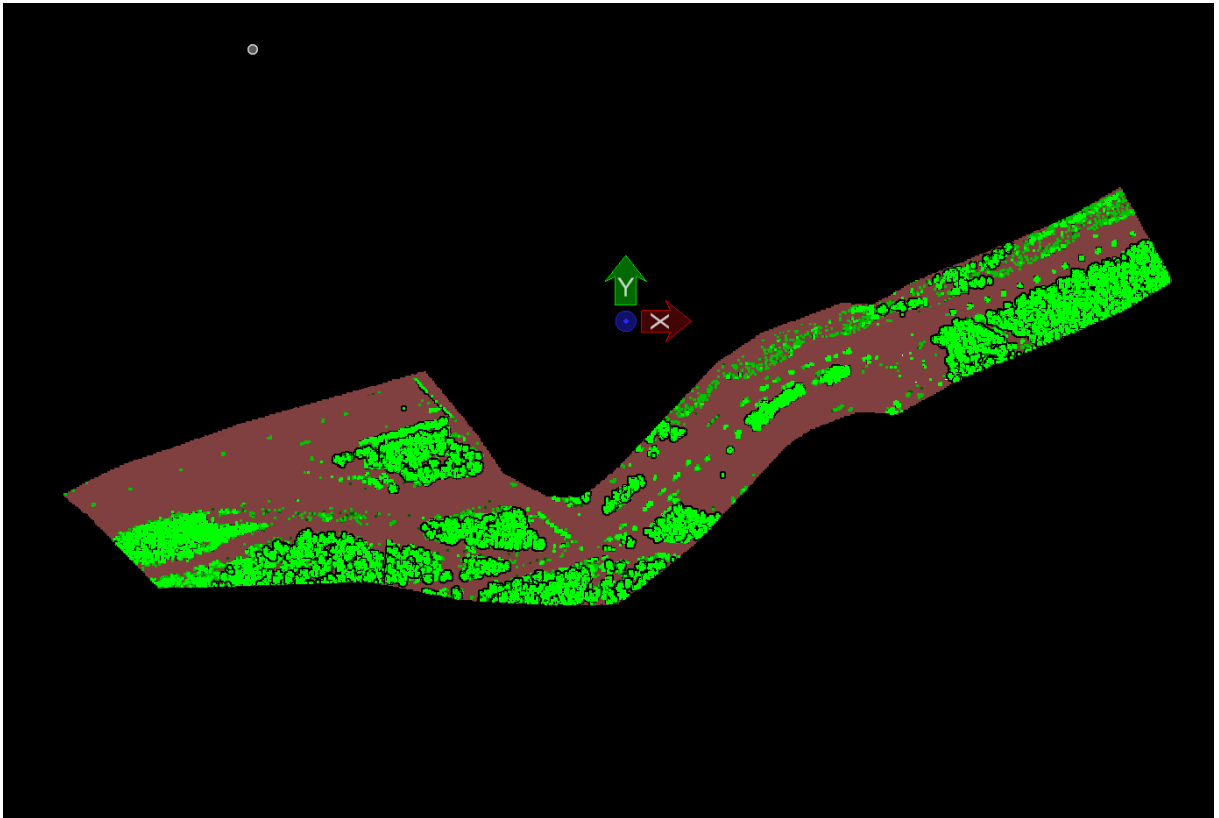
Aineistot kerättiin Kirkkonummelta kuvassa 26 näkyvältä alueelta. Kohteen valintakriteereinä oli löytää alue, jossa on metsää, rakennuksia sekä tiestöä. Aineistojen keräyksessä dronessa on hyödynnetty RTK-mittausta, jotta aineistot olisivat tarkasti koordinaatistossa. Alueelle on myös maalattu ennen kuvauksia maatukipisteitä, jotka on käyty mittaamassa GNSS-mittalaitteella aineistojen koordinaattikorjauksia varten. Maanmittauslaitoksen isommasta aineistosta, joka on jo luokiteltu, rajattiin testialueen mukainen pala tähän tutkimukseen (kuva 27). Luokittelematon laserkeilausaineisto, joka on tuotettu L1-laserkeilaimella, näkyy kuvassa 28.

Kuvaus Zenmuse P1 -kameralla suoritettiin 100 m korkeudesta. Sää oli kuvauksen suorituspäivänä pilvinen. Kirkkaina päivinä varjot voivat tuoda vääristymiä sekä epätarkkuutta kameralla kuvattuun lopputulokseen. Laserkeilainta käyttäessä valoisuudella ei ole merkitystä, koska laserkeilain hyödyntää näkyvän valon sijasta infrapunalaserasädettä. Täten laserkeilainta voi käyttää niin päivä- kuin yöaikaankin. L1-laserkeilaimella aineiston keruu suoritettiin myös 100 m korkeudesta ja siinä käytettiin kahta kaikua. P1-kameralla tuotettu kuva-aineisto on nähtävissä kuvassa 29. Laserkeilaimella tuotettu aineisto käsiteltiin sekä luokiteltiin, ja sen lopputulos on nähtävissä kuvassa 30.

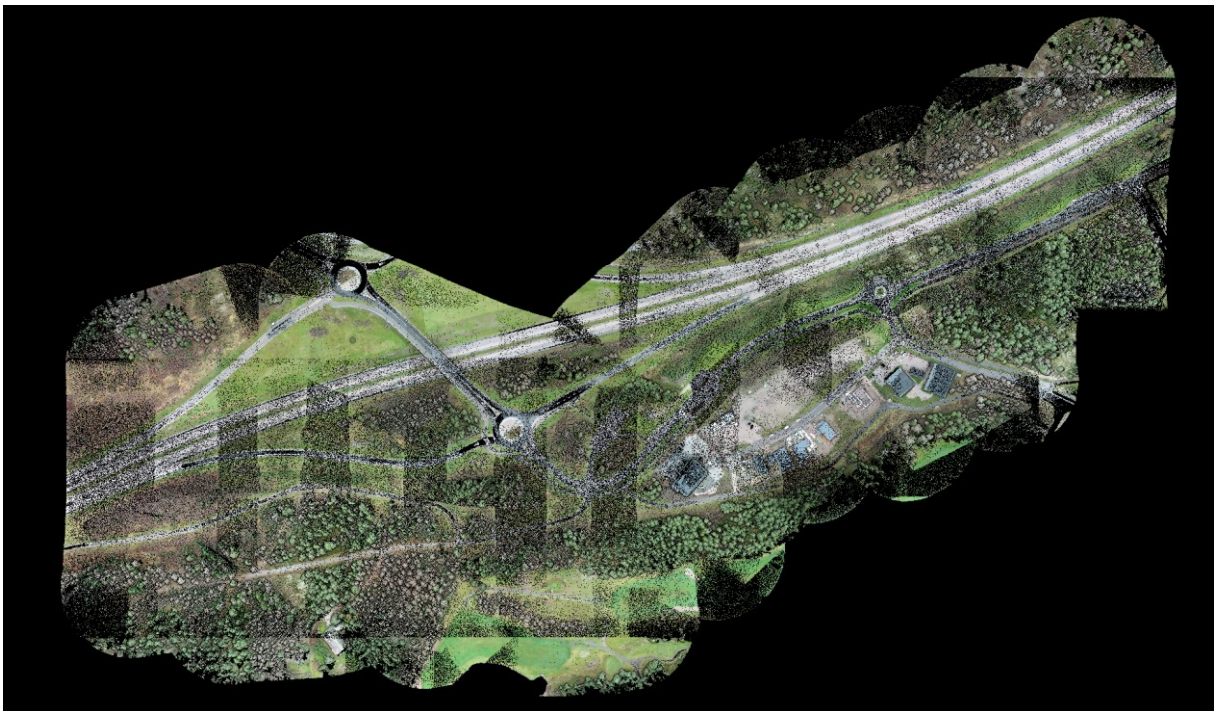
Kuva 26. Testikohteen aluerajaus (Google Earth, 2022)



Kuva 27. Maanmittauslaitoksen aineistosta rajattu testialue (Forsell, 2022)



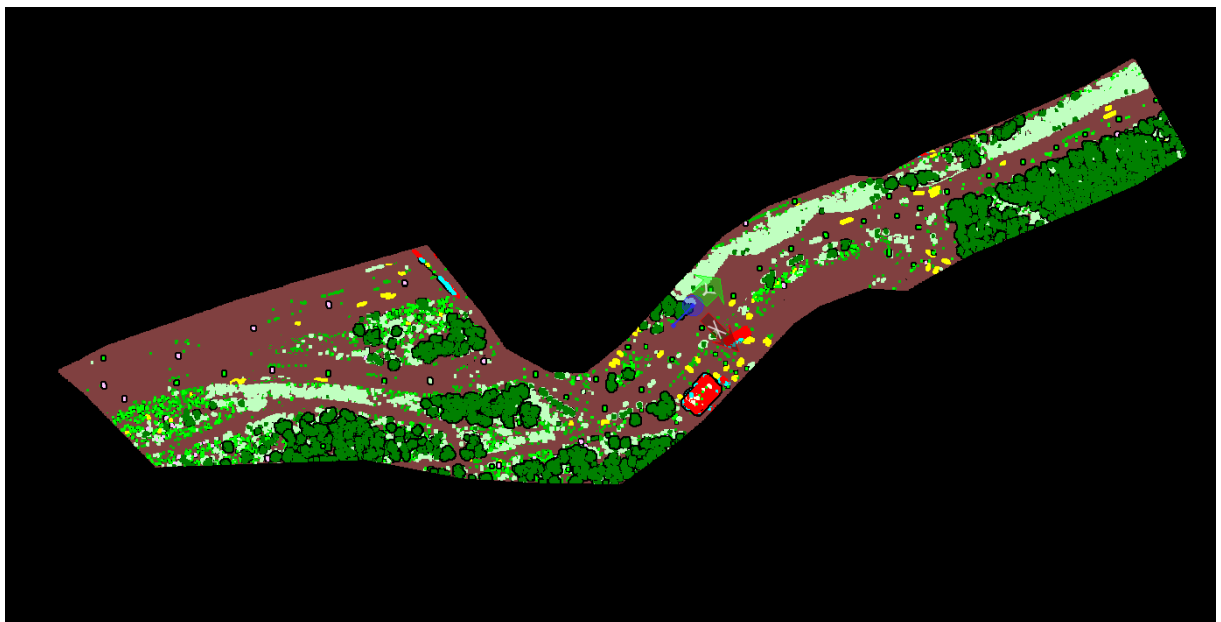
Kuva 28. Zenmuse L1 -laserkeilaimella tuotettu, luokittelematon aineisto testialueesta (Forsell, 2022)



Kuva 29. Testialue Zenmuse P1:lla kartoitettuna (Forsell, 2022)

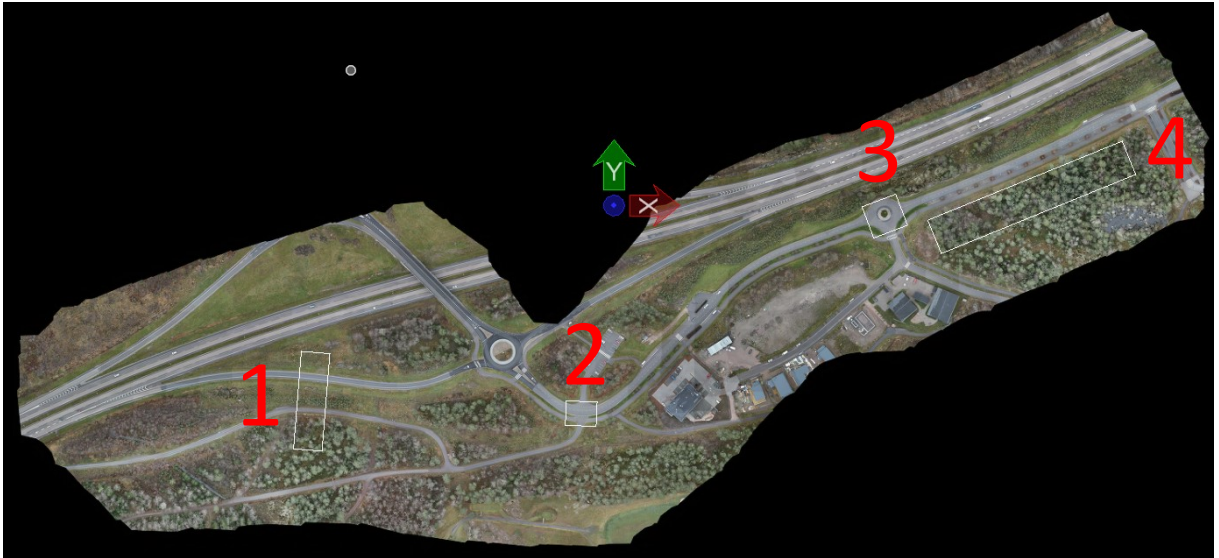


Kuva 30. L1 tuotettu, luokiteltu aineisto (Forsell, 2022)



Testialueelta on valittu neljä erityyppistä aluetta, joista maanpinnan pistetiheyksiä tutkitaan. Kaikissa vertailtavissa pistepilviaineistoissa on käytetty täsmälleen samoja alueita. Kaikki vertailualueet näkyvät kuvassa 31 sekä alueet 1 ja 2 tarkemmin kuvassa 32, ja 3 ja 4 kuvassa 33.

Kuva 31. Vertailtavat kohdealueet numeroituna (Forsell, 2022)



Kuva 32. Vertailualueet 1 ja 2 tarkemmin esitettynä (Forsell, 2022)



Kuva 33. Vertailualueet 3 ja 4 tarkemmin esitettynä (Forsell, 2022)



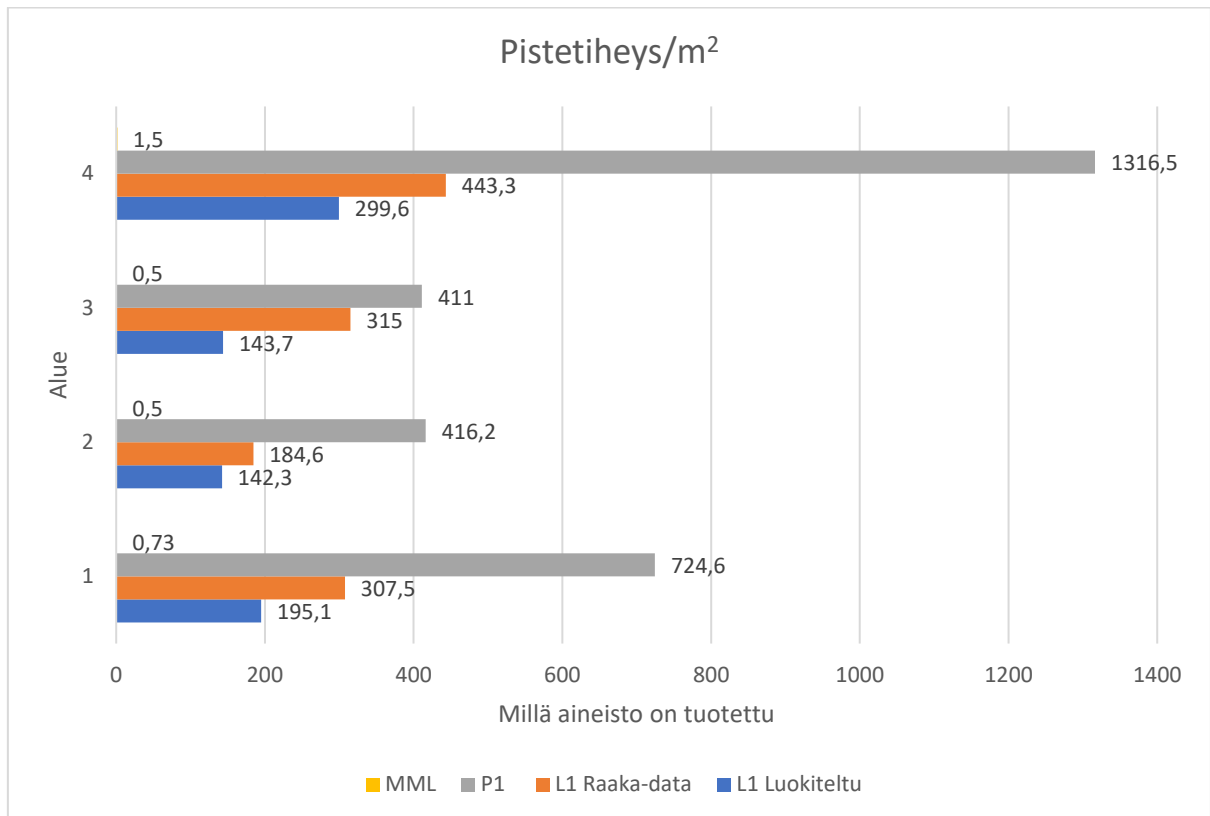
5.4 Aineistojen vertailu

Taulukossa 5 on käsitelty aluekohtaisesti pistetiheydet eri tuotantometodeilla. Kuten tuloksista voi huomata, on maanmittauslaitoksen pistetiheydet vain murto-osan verrattuna fotogrammetrisesti ja laserkeilaimella tuotettuihin pistetiheyksiin. Tilastosta erottuu fotogrammetrisesti tuotetun aineiston pistemäärät, jotka on moninkertaiset muihin tapoihin verrattuna alueella 1 ja 4. Kohteissa 2 ja 3 fotogrammetrinen sekä laserkeilaimella tuotettu aineisto on varsin lähellä toisiaan.

Kuten edellä esitetyistä eri pistepilviaineistojen tuottamista kuvista ilmenee, on kuvantarkkuudessa ja -laadussa suuria eroja keräystavasta riippuen. Keskiöön kuvantarkkuuden osalta datankeruussa nousevat käytetyt pistetiheydet. Yksinkertaistettuna, mitä suurempaa pistetiheyttä hyödynnetään, sitä yksityiskohtaisempaan lopputulokseen on mahdollista päästä. Optimaalisin luokiteltu pistepilviaineisto on 150-300 pistettä neliömetrille. Aineistoissa olevat pistetiheydet ovat koottuna taulukossa 5. Verratessa maanmittauslaitoksen pistepilviaineisto kuvassa 35 laserkeilaimella tuotettuun aineistoon kuvassa 36, eri pistetiheyksillä tuotetun datan erot ovat huomattavia. Suuri pistetiheys ei

ole kuitenkin suoraan merkki laadukkaasta pistepilviaineistosta. P1-kameralla kerätyssä aineistossa pistetiheys on muihin metodeihin verrattuna suurempi, mutta siitä tuotettu pistepilvi on laserkeilaimeen verrattuna huonompi erityisesti katveissa sekä metsäisessä ympäristössä. Tämä johtuu siitä, että kamera ei näe esimerkiksi puuston alle, joten maanpinta jää sieltä osin tavoittamatta, jolloin virheiden määrä kasvaa.

Taulukko 5. Pistetiheydet vertailualueilla eri metodeilla (Forsell, 2022)



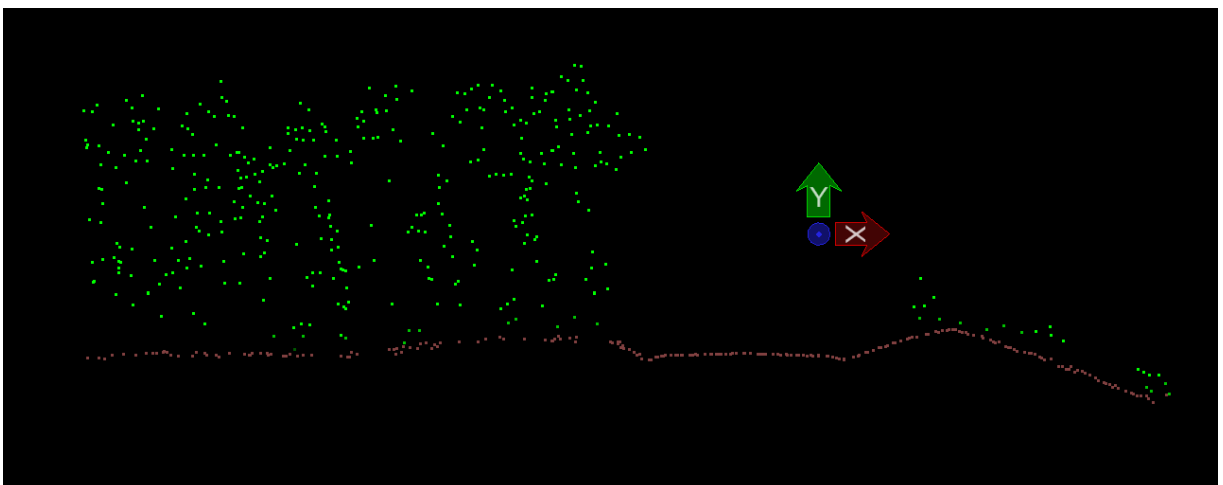
Tutkimusalueelta valittiin alue, josta rajattiin poikkileikkaus kuvassa 34 näkyvästä kohdata. Aineistosta otettuja poikkileikkauksia tutkiessa on eri metodeilla tuotettujen pistepilvien ero helpoiten havaittavissa.

Kuva 34. Poikkileikkauksen aluerajaus tutkimusalueelta (Forsell, 2022)



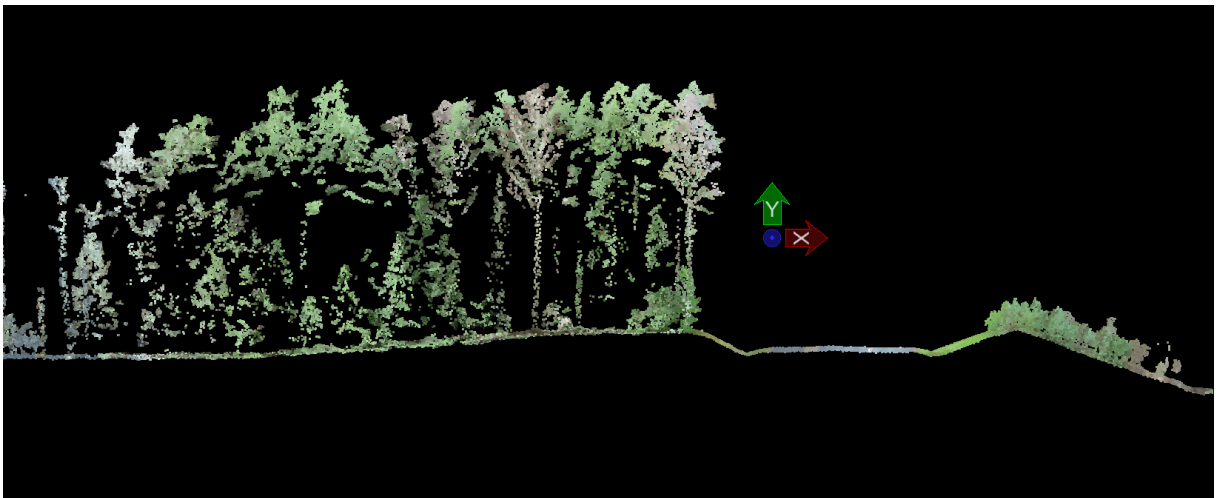
Maanmittauslaitoksen pistepilviaineistosta otetusta poikkileikkauksesta kuvassa 35 voidaan erottaa selvästi maanpinta (ruskea) sekä kasvillisuus (vihreä). Aineistosta on huomattavissa pieniä katvealueita erityisesti metsäisellä kohdalla, mutta sen tarkkuus riittää karkean maastomallin luomiseen. Tällainen malli on riittävä esimerkiksi tiesuunnitelmien pohjaksi. Aineiston pisteet on helposti erotettavissa toisistaan.

Kuva 35. Maanmittauslaitoksen aineistosta otettu poikkileikkaus (Forsell, 2022)



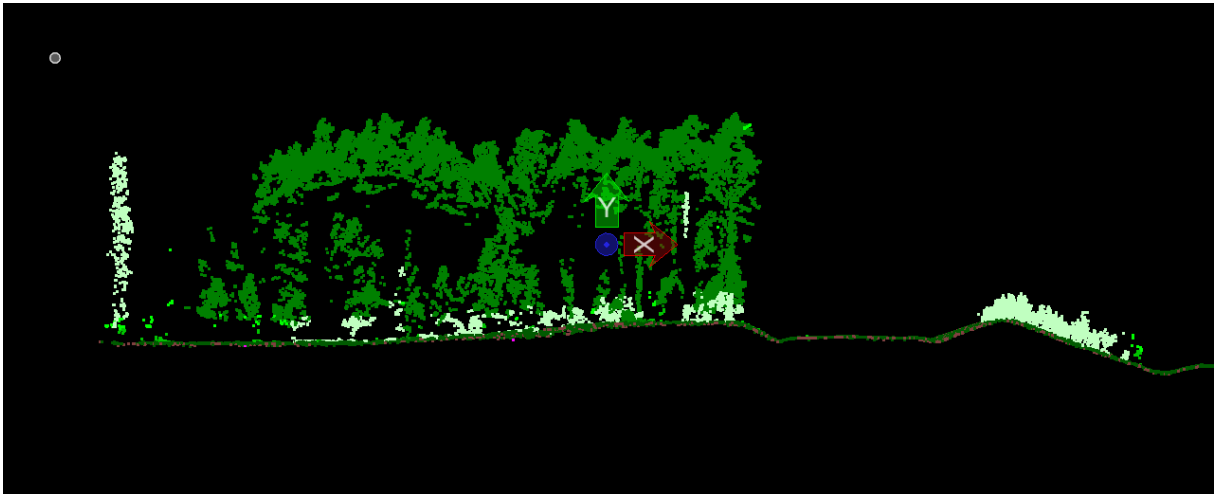
Zenmuse L1 -laserkeilameilla tuotettu pistepilviaineisto kuvassa 36 sisältää myös realistiset värit. Tämä helpottaa merkittävästi tunnistamaan aineistosta esimerkiksi puuston matalammasta kasvustosta. Tätä aineistoa ei ole luokiteltu, joten eri tasojen erottaminen toisistaan ei onnistu suoraan tästä aineistosta. Pistetiheys on tässä aineistossa jo niin tiheää, että pisteitä ei pystytä erottamaan toisistaan silmämääräisesti. Tässä aineistossa katveita ei esiinny.

Kuva 36. L1-laserkeilaimella tuotettu luokittelematon aineisto (Forsell, 2022)



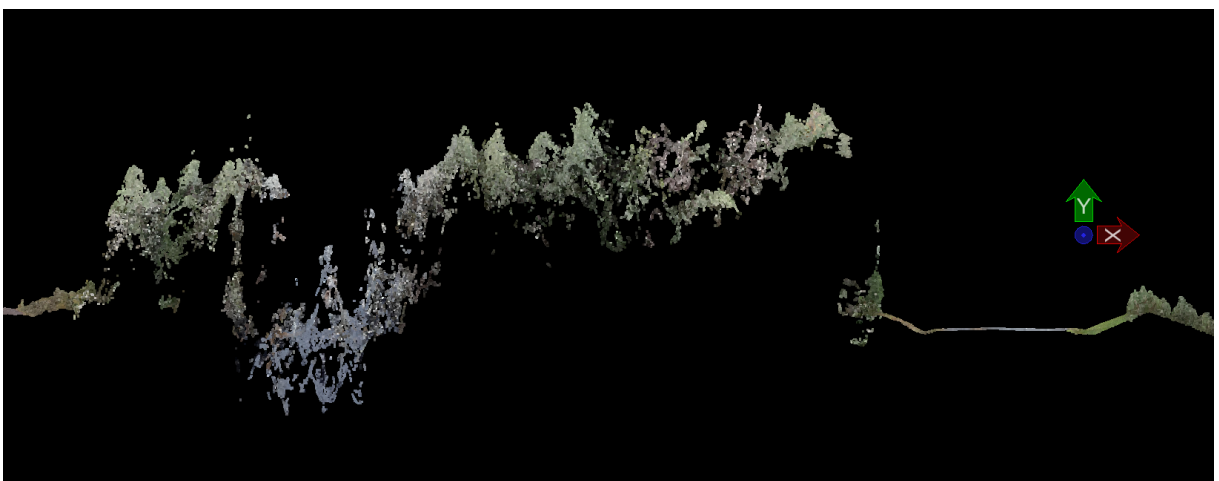
Kuvassa 37 nähtävä aineisto on sama kuin kuvassa 36, mutta se on luokiteltu. Tästä aineistosta pystytään jo erottelemaan mm. maanpinta, matala kasvusto, puut, rakennukset sekä rakennusten katot omille tasoilleen. Tämä aineisto on käyttövalmis vietäväksi suunnitteluohjelmistoihin. Aineisto on harvempi kuin luokittelematon aineisto, mutta se ei vaikuta aineiston laatuun negatiivisesti. Luokittelun yhteydessä aineistosta on siivottu ylimääräiset pisteet sekä virheet, joita luokittelemattomassa aineistossa on.

kuva 37. L1-laserkeilaimella tuotettu luokiteltu aineisto (Forsell, 2022)



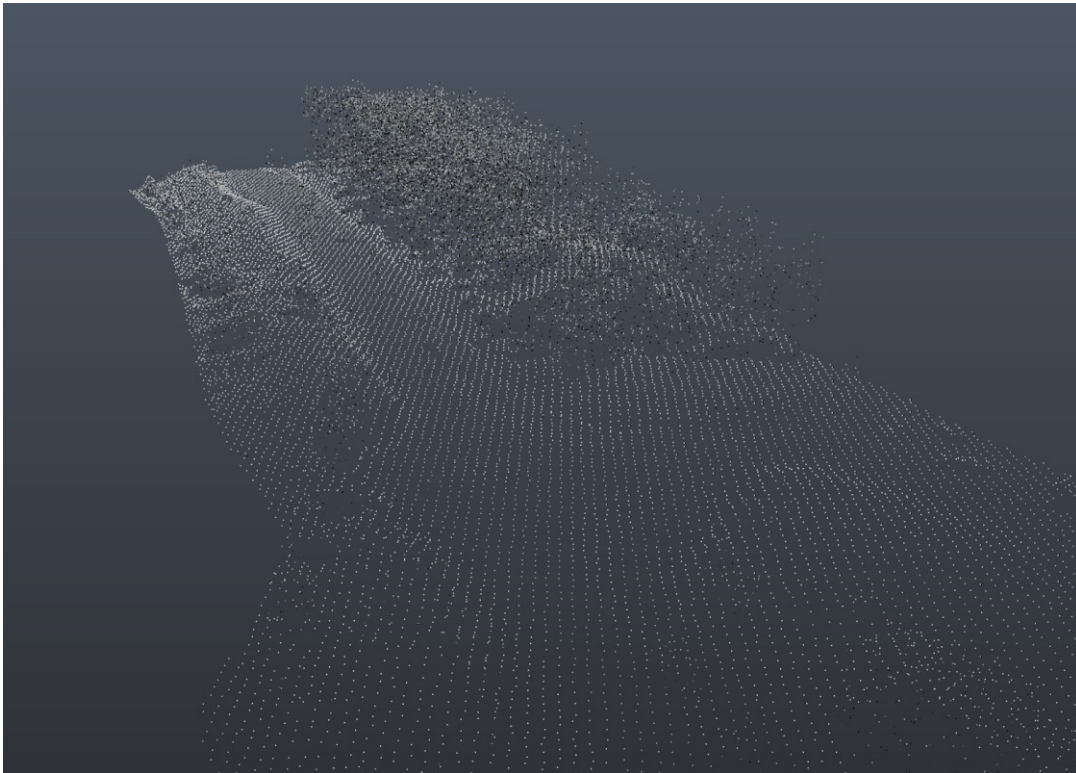
Viimeisenä aineistona on Zenmuse P1 -kameralla tuotettu valokuva-aineisto, joka on jatkoprosessoitu pistepilviaineistoksi. Kuten kuvasta 38 on huomattavissa, häviää maanpinta metsäisillä alueella kokonaan ja osa pisteistä on tunnetun maanpinnan alapuolella. Tämä johtuu siitä, että kamera ei näe tiheän puuston alapuolelle. Aineistossa näkyvä tieosuus piiryy selvästi, mutta muilta osin aineistoa ei pystytä järkevästi hyödyntämään. Kameralla voidaan tuottaa käyttökelpoista pistepilviaineistoa avoimilta alueilta, mutta metsäisille ja katveisille alueille se ei siis sovi.

Kuva 38. P1-kameralla tuotettu pistepilviaineisto (Forsell, 2022)

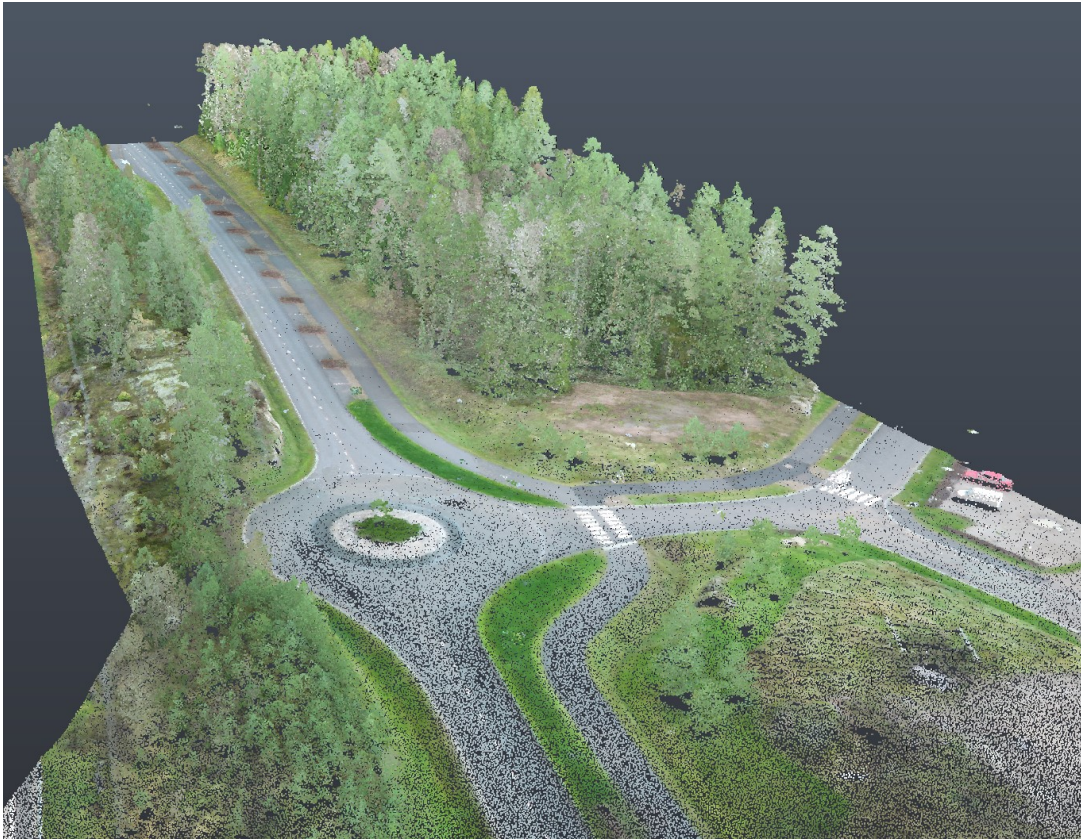


Vertailtaessa maanmittauslaitoksen pistepilveä 3D-näkymässä (kuva 39) L1-laserkeilaimella tuotettuun aineistoon (kuva 40), huomataan aineistojen pistetiheyksien suuret erot. Suuremmalla pistetiheydellä olevasta aineistosta on helpommin hahmotettavissa sekä erotettavissa esim. kaivonkansien, valaisinpylväiden sekä liikennemerkkijalustoiden sijainteja. Tätä ei voida tehdä maanmittauslaitoksen aineistoilla. Myös realistiset värit auttavat erottamaan mm. ajoradan sekä suojatien ja muut tiemaalaukset aineistoista.

Kuva 39. Maanmittauslaitoksen pistepilviaineisto (Forsell, 2022)



Kuva 40. L1-laserkeilaimella tuotettu aineisto (Forsell, 2022)



6 Johtopäätökset

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin droneen kiinnitetyn laserkeilaimen ja kameran avulla tuotettujen pistepilviaineistojen ja Maanmittauslaitoksen pistepilviaineistojen eroavaisuuksia, sekä käytiin läpi dronella tehtävän kartoitustyön prosessi. Työssä perehdyttiin sekä koordinaattijärjestelmiin että erilaisiin mittaustekniikoihin. Kameralla varustettuja droneja on hyödynnetty jo vuosia erilaisissa kartoituksissa, ja niitä saa nykyisin todella edullisesti. Laserkeilaimella varustetut dronet eivät ole vielä yleistyneet, koska ne ovat tällä hetkellä vielä verrattain kalliita hankkia.

Droneihin liittyviä tutkimuksia on tehty maailmanlaajuisesti kattavasti eri tutkimusaloille, mm. maatalouteen, vesivaroihin, arkeologiaan sekä infrarakentamiseen. Dronen käyttäminen työkaluna on Suomessa selkeässä kasvussa. Laserkeilaavien dronejen hyödyntäminen on vähäisempää verrattuna kameralla varustettuihin droneihin, mutta ne

ovat kuitenkin yleistymässä tekniikan kehittyessä ja hintojen laskiessa. Droneilla tuotettujen aineistojen hyödyntämiseen tarvitaan kuitenkin lisää osaamista, jotta alan monipuolinen kehitys on mahdollista. Tulevaisuudessa tekniikan kehittyessä lentoajat pidentyvät, kaluston hinnat laskevat sekä aineiston tarkkuus kasvaa.

Väyläviraston ”Tie- ja ratahankkeiden maastotiedot” -mittausohje 18/2017 (Väylä, 2017) sallii dronen käytön tiettyjen asioiden, kuten mm. puiden, tienreunojen, päällysteenreunojen, valaisinpylväiden sekä kaapelikaivojen kartoituksessa. Tiettyjen asioiden kartoituksissa on vaatimuksena, että laitteisto käyttää RTK-mittausta. Kameralla tuotetut aineistot eivät sovellu maanpinnan kartoitukseen metsäisillä sekä katveisilla alueilla. Molemmilla metodeilla, fotogrammetriikalla sekä laserkeilaimella kartoittaessa sääolosuhteilla on vaikutus siihen, voidaanko kartoituksia toteuttaa. Kartoituksissa tulee myös välttää lumisia aikoja, koska lumipeitteen alta ei saada mitattua todellista maanpintaa. Laserkeilainta ja kameraa ei tule vertailla toistensa kilpailijoina. Molemmilla laitteilla on omat vahvuutensa ja ne soveltuvat erityyppisille kartoituksille.

Kerättyjen aineistojen välisiä eroja tutkiessa huomattiin, että Maanmittauslaitoksen pistepilviaineisto on käyttökelpoista usealla suunnittelualalla, mutta se ei ole välttämättä aina riittävän ajantasaista. Maanmittauslaitoksen pistepilviaineistoista pystytään tekemään karkeita maastomalleja, jotka sopivat esimerkiksi karkean tiesuunnitelman pohjaksi. Maanmittauslaitoksen aineistot ovat myös ilmaisia ja kaikkien saatavilla. Laserkeilaimella tuotettuja aineistoja voidaan käyttää monipuolisemmin kuin Maanmittauslaitoksen aineistoa. Laserkeilaimella varustetun dronen aineistoja voidaan käyttää suunnittelussa mm. rakennusten mallintamiseen, maastomallien luomiseen, massalaskentoihin sekä lähtötietojen kartoitukseen. Laserkeilaimella tuotettujen aineistojen laatu on niin korkealla tasolla, että aineistosta voidaan erottaa hyvinkin yksityiskohtaista dataa, mm. kaivonkansia, rakennuksia, valaisinpylväitä, liikennemerkkejä ja puiden sijainteja. Dronella tehtävä laserkeilaus vähentää perinteisen mittauksen tarvetta, mutta ei poista sitä kokonaan. Esimerkiksi syvät ojat, joissa on vettä pohjalla, täytyy mitata perinteisellä menetelmällä. Laserkeilaimen säteet eivät näe veden alle ja täten ojanpohjan korkoa ei saada näin otettua. Laserkeilaavaa dronea voi tämän tutkimuksen pohjalta suositella erityisesti maastomallien tekoon sekä rakennusten mallintamiseen.

Pistetihetyksien osalta suuri pistemäärä ei ole tae laadukkaasta aineistosta. Tämä todettiin tutkimuksessa kameralla tehdystä aineistosta, jossa oli parhaimmillaan 1300 pistettä neliömetrillä, mutta maanpintaa ei silti saatu mitattua metsäiseltä osuudelta katveiden aiheuttaessa artefaktaa pistepilveen. Sen sijaan laserkeilain läpäisi huomattavasti tarkemmin tiheämpääkin kasvillisuutta maanpintaan saakka, vaikkakin sen pistetiheys oli P1-kameraa pienempi. Optimaalisin pistemäärä aineistoille todettiin olevan noin 150–300 pistettä neliömetrillä, kun aineisto on luokiteltu. Tämä pistemäärä takaa sen, että pistepilvi toimii sulavasti eri suunnitteluohjelmistoissa riittävällä tarkkuudella. Isommalla pistemäärällä aineistoa saadaan tarkemmaksi, mutta suuret ja raskaat pistepilvet eivät välttämättä toimi sulavasti suunnitteluohjelmissa.

Tämän tutkimuksen pohjalta olisi mielenkiintoista tutkia, miten Maanmittauslaitoksen aineisto ja laserkeilaimella tehty aineisto eroavat toisistaan massalaskennassa. Esimerkiksi uutta kahden kilometrin tieosuutta suunniteltaessa Maanmittauslaitoksen ja laserkeilaimella varustetun dronen keräämiä lähtötietoaineistoja ja niiden perusteella tehtyjä massalaskentoja voisi vertailla keskenään. Olisi mielenkiintoista tehdä laskelmia massojen poistojen tai lisätäyttöjen suhteen, ja vertailla eroaako näiden kahden eri aineistonkeruumetodin tulokset toisistaan merkittävästi.

Lähteet

Almeidaa,

D.;E.N.Broadbentb;A.M.A.Zambranob;B.E.Wilkinsonb;M.E.Ferreirac;R.Chazdond;. . . P.H.S.Brancaliona. (7 2019). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.014>

Aviamaps. (2022). Noudettu osoitteesta <https://aviamaps.com/>

Casana, J.;J. Laugier, E.;Chad Hill, A.;M. Reese, K.;Ferwerda, C.;D. McCoy, M.;& Ladefoged, T. (2021). *Journal of Archaeological Science: Reports*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103133>

Charlton, M.;Coveney, S.;& McCarthy, T. (2009). Issues in laser scanning. Teoksessa G. Heritage;& A. Large, *Laser scanning for the environmental sciences*. John Wiley & Sons.

Collin, A.;Ramambason, C.;Pastol, Y.;Casella, E.;Rovere, A.;Thiault, L.;. . . Davies, N. (2018). *International Journal of Remote Sensing*. doi:<https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1500072>

DJI. (2022a). *Matrice 300 RTK*. Noudettu osoitteesta <https://www.dji.com/fi/matrice-300/specs>

DJI. (2022b). *D-RTK2*. Noudettu osoitteesta <https://www.dji.com/fi/d-rtk-2>

EASA. (2022a). *Drones - regulatory framework background*. Haettu 14. 3 2022 osoitteesta <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones>

EASA. (2022b). *Drones with class identification label C0-C6*. Haettu 14. 3 2022 osoitteesta <https://www.easa.europa.eu/the-agency/faqs/drones-uas#category-drones-with-class-identification-label-c0-c6>

Fantoni, R.;Barbini, R.;Colao, F.;Ferrante, D.;Fiorani, L.;& Palucci, A. (2004).

Integration of two lidar fluorosensor payloads in submarine ROV and flying UAV platforms. *EARSeL eProceedings*, 3(1), 43.

Geotrim. (2022). *Trimnet VRS-palvelu*. Haettu 6. 4 2022 osoitteesta

<https://geotrim.fi/palvelut/trimnet-vrs/>

Giones, F.;& Brem, A. (2017). From toys to tools: The co-evolution of technological and entrepreneurial developments in the drone industry. *Business horizons*, 60(6), 875-884. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.08.001>

Gregersen, E. (n.a). *lidar*. *Encyclopedia Britannica*. Haettu 17. 3 2022 osoitteesta

<https://www.britannica.com/technology/lidar>

Koskinen, E.;& Koskinen, L. (2021). *Dronella tuotettavan pituusmallin luotettavuus*.

Hämeen ammattikorkeakoulu. Noudettu osoitteesta

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/504023/koskinen_eero_koskinen_lauri.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Kumpula, S. (2021). *Dronella tuotetun ilmalaserkeilausaineiston*

patoturvallisuusvertailu. Lapin ammattikorkeakoulu. Noudettu osoitteesta

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/497858/Kumpula_Santeri.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Laurila, P. (2012). *Mittaus ja kartoitustekniikan perusteet* (Neljäs painos p.).

Rovaniemi: Rovaniemen ammattikorkeakoulu.

Maanmittauslaitos. (2022a). *Laserkeilausaineisto 2008 – 2019*. Haettu 14. 3 2022

osoitteesta <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/asiantuntevalle-kayttajalle/tuotekuvaukset/laserkeilausaineisto>

Maanmittauslaitos. (2022b). *Laserkeilaus ja ilmakuvaus*. Haettu 14. 3 2022

osoitteesta <https://www.maanmittauslaitos.fi/laserkeilaus-ja-ilmakuvaus>

Matilainen, J. W. (2018). *Kauko-ohjattujen ilma-alusten lentotyökäyttö kunnallisessa mittaustoimessa*. Lapin ammattikorkeakoulu. Noudettu osoitteesta https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/152282/JWM_valmis.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Nonami, K. (2018). Research and Development of Drone and Roadmap to Evolution. *Journal of robotics and mechatronics*, 30(3), 322-336.
doi:<https://doi.org/10.20965/jrm.2018.p0322>

Pix4D. (5. 11 2018). *Do more GCPs equal more accurate drone maps?* Haettu 14. 3 2022 osoitteesta <https://www.pix4d.com/blog/GCP-accuracy-drone-maps>

Resop, J. P.;Lehmann, L.;& Hession, W. C. (2019). *MDPI*. doi:
<https://doi.org/10.3390/drones3020035>

Risbøl, O.;& Gustavsen, L. (2019). *Wiley Online Library*.
doi:<https://doi.org/10.1002/arp.1712>

Saura, J.;Reyes-Menendez, A.;& Palos-Sanchez, P. (28. 2 2019). *Cell*.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01277>

Traficom. (2020). *OPS M1-32*. Haettu 17. 3 2022 osoitteesta
https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/regulation/OPS%20M1-32_2020_final.pdf

Traficom. (2022a). *Droneinfo*. Haettu 14. 3 2022 osoitteesta
<https://www.droneinfo.fi/fi/luvasta-vapaa-toiminta-avoin-kategoriassa>

Traficom. (2022b). *Droneinfo*. Haettu 14. 3 2022 osoitteesta
<https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/jo-14-000-drone-lennattajaa-suorittanut-verkkokokeen-rekisterin-ja-kokeen-tavoitteena>

Traficom. (2022c). *Droneinfo*. Haettu 14. 3 2022 osoitteesta
<https://www.droneinfo.fi/fi/koulutusmateriaali/drone-ja-sen-toiminnot>

miehittamattomien-ilma-alusjärjestelmien-
yleistuntemus?toggle=Mik%C3%A4%20on%20drone%3F

Traficom. (2022d). *Droneinfo*. Haettu 14. 3 2022 osoitteesta
<https://www.droneinfo.fi/fi/luvasta-vapaa-toiminta-avoin-kategoriassa>

Traficom. (2022e). *Droneinfo, Erityinen-kategoria*. Haettu 2. 4 2022 osoitteesta
<https://droneinfo.fi/fi/asioi-kanssamme/erityinen-kategorian-toimintaluvan-hakeminen>

Traficom. (2022f). *Droneinfo, Erityinen -kategoria*. Haettu 1. 4 2022 osoitteesta
<https://droneinfo.fi/fi/asioi-kanssamme/erityinen-kategorian-toimintaluvan-hakeminen>

Traficom. (2022g). *Droneinfo*. Haettu 4. 4 2022 osoitteesta
<https://www.droneinfo.fi/fi/ajankohtaista/uusissa-droneissa-tulee-olla-c-luokan-merkinta-eun-droneasetuksen-mukaisesti-vasta>

Traficom. (n.d). *SORA-riskianalyysi*. Haettu 31. 3 2022 osoitteesta
<https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/SORA-riskiarviointi%20erityinen-kategoriassa.pdf>

Träff, E. (2020). *3D-kaupunkimallin tuotanto tonttimarkkinointia varten*. Metropolia ammattikorkeakoulu. Noudettu osoitteesta
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/336896/Traff_Ester.pdf?sequence=2

Tseloev, I. (2019). *UA-ilmakuvauksen hyödyntäminen infra-työmaan kommunikoinnissa ja viestinnässä*. Tampereen ammattikorkeakoulu. Noudettu osoitteesta
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/168691/Tseloev_Islam.pdf?sequence=2

VanValkenburgh, P.;Cushman, K.;Castillo Butters, L.;Rojas Vega, C.;B. Roberts, C.;Kepler, C.;& Kellner, J. (12. 2 2020). *Journal of Field Archaeology*.
doi:<https://doi.org/10.1080/00934690.2020.1713287>

Väylä. (2017). *Tie- ja ratahankkeiden maastotiedot*. Noudettu osoitteesta
https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-18_maastotiedot_mittausohje_web.pdf

Wallace, L.;Lucieer, A.;Watson, C.;& Turner, D. (2012). Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. *Remote sensing*, 4(6), 1519-1543.

