

**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# DRONEMALLINNUS TUOTANNON- OHJAUKSEN TYÖKALUNA

TEKIJÄ    Valteri Nykänen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Valtteri Nykänen	
Työn nimi Dronemallinnus tuotannonohjauksen työkaluna	
Päiväys 27.4.2022	Sivumäärä/Liitteet 22
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani Oteran Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää työntilaa Oteran Oy:lle dronemallinnuksen mahdollisuuksia työnjohdon työkaluna maanrakennustyömaalla, sekä luoda ohje, dronemallin luomisesta sekä sen hyödyntämisestä ja käsittelystä työmaan johtamisessa. Lisäksi samalla tutkittiin millaisiin tarkkuuksiin kartoitusdronen malleilla on mahdollista päästä ja olisiko tarkkuus riittävä siihen, että työmaamallista voitaisiin mitata suoraan tarkepisteitä.</p> <p>Työn pohja-aineistoksi suoritettiin tutkimuksena työmaankartoitus Kuopion savilahdessa sijaitsevalta Hehkun sydän työmaalta käyttäen Savonia-ammattikorkeakoulun kartoitusdronia, jonka lisäksi työmaalta mitattiin GNSS sauvalla erilaisia tarkepisteitä, joihin verrattiin mallimaailmasta mitattuja tarkepisteitä. Teoriaosio käsittelee dronekartoituksen toimintatapoja ja vaatimuksia sekä valmiin mallin tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä.</p> <p>Työn tuloksena syntyi dataa, jonka avulla voitiin todeta dronekeilauksen olevan melko lähellä riittävää tarkkuutta toimiakseen tarkemittausvälineenä ja pienellä kehitystyöllä sen käyttäminen voisi olla jopa mahdollista. Työntuloksena luotiin yritykselle helppokäyttöinen ohjeistus, dronekartoituksen laitteistoon ja niiden asetuksiin ja miten kartoituksen tuloksia voidaan käyttää hyödyksi työmaalla.</p>	
Avainsanat Dronekartoitus, Lidar-keilaus, fotogrammetrinkeilaus	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Civil Engineering	
Author Valtteri Nykänen	
Title of Thesis Drone modelling as production management tool	
Date 27.4.2022	Pages/Appendices 22
Client Organisation /Partners Oteran Oy	
<p>Abstract</p> <p>The aim of this thesis was to clarify the possibilities of drone modelling as a tool for production management of an earthworks site for Oteran Oy and create a guideline of how to easily create and use drone models on site. Also, the objective was to study the accuracy of the drone models and if it was plausible to use the drone models for implementation measurement.</p> <p>To collect data for the thesis, a construction site survey was carried out on Oteran Oy: s site called "Hehkun Sydän" at Savilahti in Kuopio. The survey was made with the Savonia University of Applied Sciences' modelling drone. In addition, several points were measured with the GNSS rover, and the results were compared to the ones received with the drone. The theory of the thesis covered the methods and requirements for surveying by drone and the things affecting the accuracy of the drone surveyed model.</p> <p>As result of the site survey, it was found out that it is plausible to measure out of a drone model and with a little further investigation it might work as one of the future measuring tools. For creating models and maps out of the construction site a simple guideline was created to help select and setup drone surveying equipment as well as set parameters for mapping. The guideline also includes suggestions on how to utilize the results effectively on site.</p>	
<p>Keywords Drone survey, LiDAR mapping, Photogrammetry</p>	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	6
1.1	Opinnäytetyön tavoite ja toteutus .....	6
2	DRONEMALLINNUS.....	7
2.1	Lentämisen vaatimukset .....	7
2.2	LIDAR mittaus .....	7
2.3	Fotogrammetrinen mittaus .....	8
2.4	Kartoitusmenetelmien edut ja heikkoudet .....	9
2.5	Dronemallin sijoittaminen koordinaatistoon.....	9
2.5.1	RTK korjattu paikannus .....	9
2.5.2	PPK korjattu paikannus .....	10
2.6	LiDARmallin tarkkuuteen vaikuttavat tekijät .....	10
2.7	Photogrammetriseen malliin vaikuttavat tekijät. ....	11
2.7.1	Ground Sampling Distance .....	11
2.7.2	Motion Blur .....	12
2.7.3	Valokuvien Overlap .....	12
3	TOTEUMAMITTAUS .....	13
3.1	Rakenteiden tarkkuusvaatimukset .....	13
3.2	Tarkeaineiston vaatimukset .....	13
4	DRONEMALLIN TARKKUUS JA SEN TARKASTELEMINEEN .....	14
4.1	Tutkimukset .....	14
4.2	Lidar malli ja sen tarkkuus.....	16
4.3	Photogrammetrinen malli ja sen tarkkuus .....	17
4.4	Yhteenveto.....	18
5	OHJE TYÖMAAN KARTOITUKSEEN JA SEN KÄYTTÖÖN (LIITE) .....	19
6	POHDINTA.....	20
	LÄHTEET .....	21

## KUVALUETTELO

Kuva 2.1	LiDAR:n toimintaperiaate (Nykänen 2022) .....	7
Kuva 2.2	DJI Terra ohjelmistolla luotu LiDAR -malli Savilahden työmaalta (Nykänen 2022) .....	8
Kuva 2.3	Photogrammetrian peruseriaate (Sendo Wang 2004).....	8

Kuva 2.4 Kuva savilahdentyömaasta tehdystä fotogrammetrisesta mallista (Nykänen 2022).....	9
Kuva 2.5 GCP Photogrammetrisessä mittauksessa (Nykänen 2021) .....	10
Kuva 2.6 GSD dronekuvassa (Nykänen 2022) .....	11
Kuva 2.7 Kameran kääntymisestä johtuva motion blur (Nykänen 2021) .....	12
Kuva 2.8 Valokuvien limitys (Nykänen 2022) .....	12
Kuva 4.1 Savonian DJI Matrice 300 RTK -drone (Nykänen 2021).....	14
Kuva 4.2 Tarkemittaukset GNSS-sauvalla (Nykänen 2021) .....	15
Kuva 4.3 Kaivo TERRA mallissa (Nykänen 2022) .....	17
Kuva 4.4 Kaivon tarkkuus Civil 3D:ssä (Nykänen 2022).....	18
Kuva 4.5 Recap Pron mallintarkkuustuloste (Nykänen 2022) .....	18

## 1 JOHDANTO

Infrarakentamisen tuotannonohjauksen työkalut ovat kehittyneet viimevuosikymmeneen paljon mallinnuksen ja koneohjauksen myötä, mutta samalla niiden kehittyessä on infrarakentamisen työnjohtajan työkuorma kasvanut työmaiden laajentuessa ja henkilöstön vähentyessä.

Opinnäytetyön aiheen sain kesällä 2021 työskennellessäni Oteran Oy:n itäsuomen työmailla ja tehdessäni kun huomasin keksiväni asioita, joissa dronen käyttäminen helpottaisi työtaakkaani ja selkeyttäisi tilaajalle asioita. Esimerkiksi tällainen asia oli urakassa, jossa kaikilla tilaajilla ei ollut aikaa vierailla työmaalla, oli tilaajille helppoa esitellä työmaan edistymistä työmaakokouksessa käyttämällä 360° valokuvia. Tämä oli hyvä alku mutta halusin kehittää näitä ajatuksia pidemmälle.

### 1.1 Opinnäytetyön tavoite ja toteutus

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää dronekartoituksen mahdollisuuksia työnjohton työkaluna tuotannonohjauksessa. Ja luoda ohjenuora mallien luomiseen ja käyttöön työmaalla. Toisena tavoitteena oli tutkia dronemallien tarkkuutta ja mahdollisesti niiden käyttökelpoisuutta tarkemittauksessa.

Opinnäytetyön tilaajana toimi Oteran Oy, jonka työmaa Hehkun sydän Kuopion Savilahdessa toimi opinnäytetyön materiaalin lähteenä. Työmaan osio kartoitettiin marraskuussa 2021 Savonia ammattikorkeakoulun kartoitus dronella yrittäen hyödyntää kopterin täysi potentiaali mahdollisimman tarkkan mallin luomiseksi. Mallin vertailuun mitattiin työmaalta kartoituspisteitä GNSS-sauvalla, jotta tarkkuutta voitiin vertailla johonkin.

## 2 DRONEMALLINNUS

Tässä kappaleessa käsitellään dronen pilottia koskeva lainsäädäntö ja sen viimeaikaiset muutokset lentämiseen. Kappaleessa käydään läpi myös dronemallinnuksen vaatimukset, menetelmät sekä erityyppisten mallinnusten suorittamisen vaikuttavat tekijät.

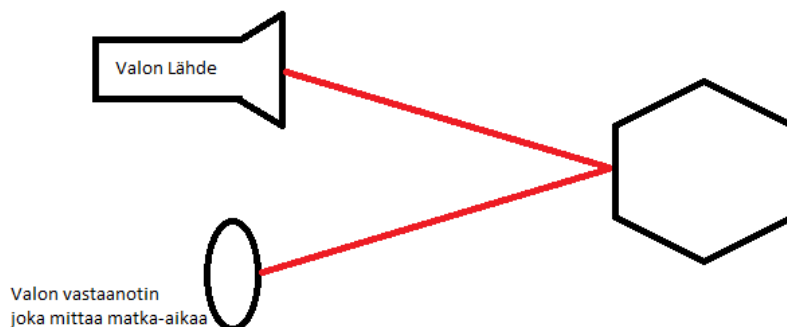
### 2.1 Lentämisen vaatimukset

Drone luokituksesta riippuen tulee lennättäjän suorittaa vähintään rekisteröityä droneoperaattoriksi sekä suorittaa **verkkoteoriakoe** Droneinfo.fi sivuilla. Verkkoteoriakokeen suorittanut lennättäjä saa lennättää alle 900 g painoista dronea yksittäisten ihmisten ei ihmisjoukkojen yläpuolella, tai korkeintaan 25 kg painoista dronea harvaan asutulla alueella kaukana asutuksesta ja ihmisistä, (Droneinfo 2022) joka tarkoittaa, ettei esimerkiksi DJI:n kartoitus kohtereista kevyin Mavic Enterprise advanced painaa 909 g (DJI 2022) joten sitä ei saa lennättää lähellä ihmisiä tai asutusta ilman, että suorittaa verkkokokeen lisäksi **valvotun lisäteoriakokeen**. (Droneinfo 2022) Lisäteoriakokeen suorittanut saa lennättää C2-luokan enintään 4 kg painoista dronea turvallisella etäisyydellä ihmisistä, eli vähintään 30 m vaakasuoralla etäisyydellä asiansattomista ihmisistä tai vähintään 5 m vaakasuoralla etäisyydellä asiansattomista ihmisistä, mikäli drone on kytketty hidaslento tilaan ja maksiminopeus täten on 3 m/s. (EASA 2022).

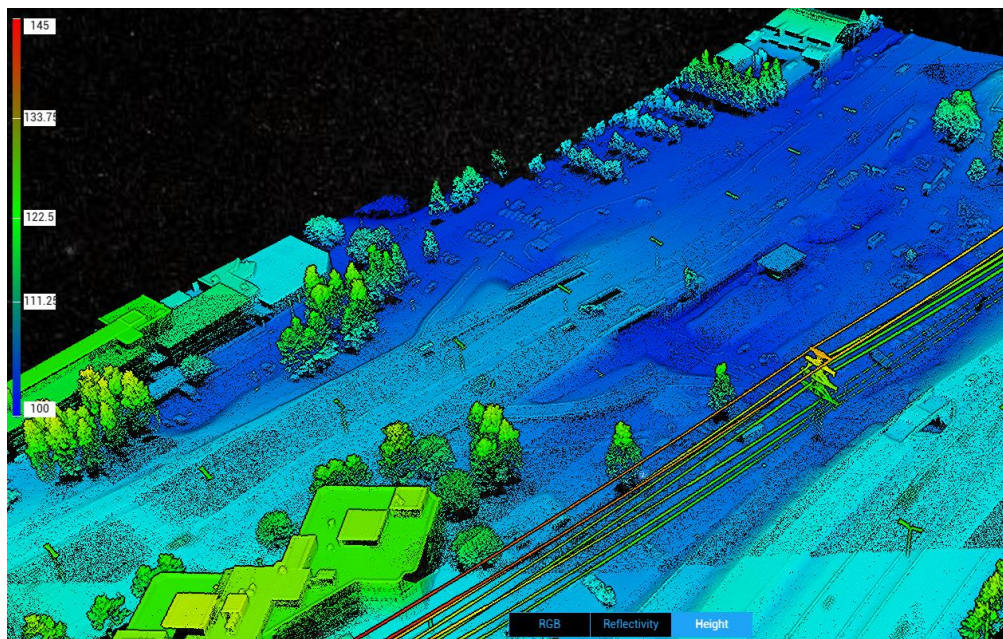
Tämän lisäksi eri alueilla on lentämistä rajoittavia tekijöitä, esimerkiksi Kuopiossa lentokorkeutta rajoittaa Rissalan lentoasema, jonka tutkan vaikutuspiirissä lentokorkeus on rajoitettu ilman lennonjohdon lupaa 50 metriin. Rajoitusalueista selvää ottaminen on helpointa aviamaps.com sivuston kautta, josta löytyvältä kartalta näkee suoraan, onko lentorajoitusalueella. (Aviamaps 2022)

### 2.2 LIDAR mittaus

LIght Detection And Ranging (laseraaltoja käyttävä etäisyysmittausjärjestelmä) eli Lidar on lentoaikaan perustuva etäisyysmittausjärjestelmä. Lidar lähettää valosignaalin ja mittaa sen takaisin sinkoutuneen osan matka-ajan, tästä ajasta voidaan laskea valon kulkema matka eli etäisyys laitteen ja kohteen välillä. Lidarilla on mahdollista skannata maata esimerkiksi tässä yhteydessä käyttäen dronea, joka lentäessään tutkittavan alueen yli mittaa eripisteiden korkeuksia ja prosessointi ohjelmi muodostaa pisteistä korkeusmallin. (Niklas Sorri 2020)



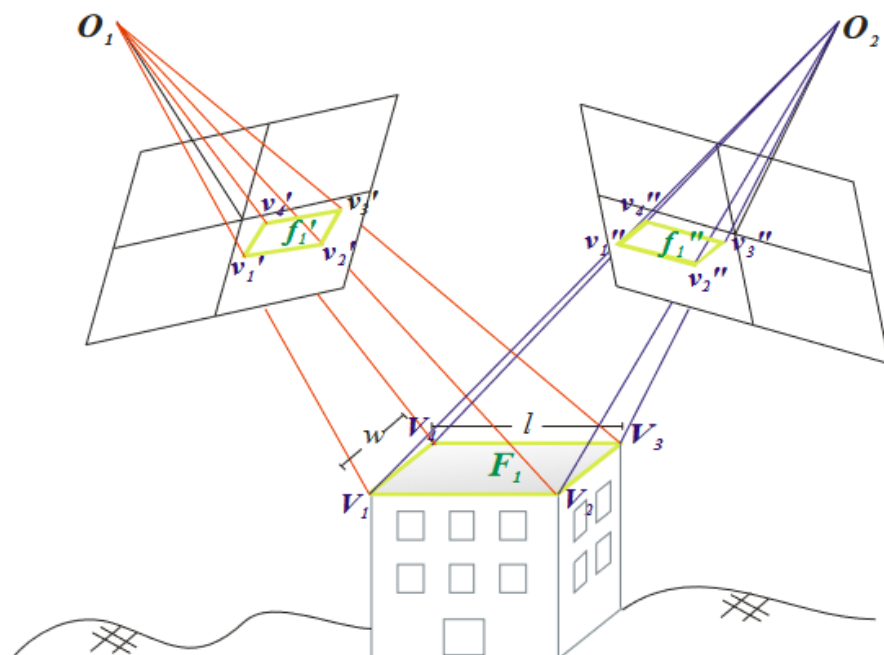
Kuva 2.1 LiDAR:n toimintaperiaate (Nykänen 2022)



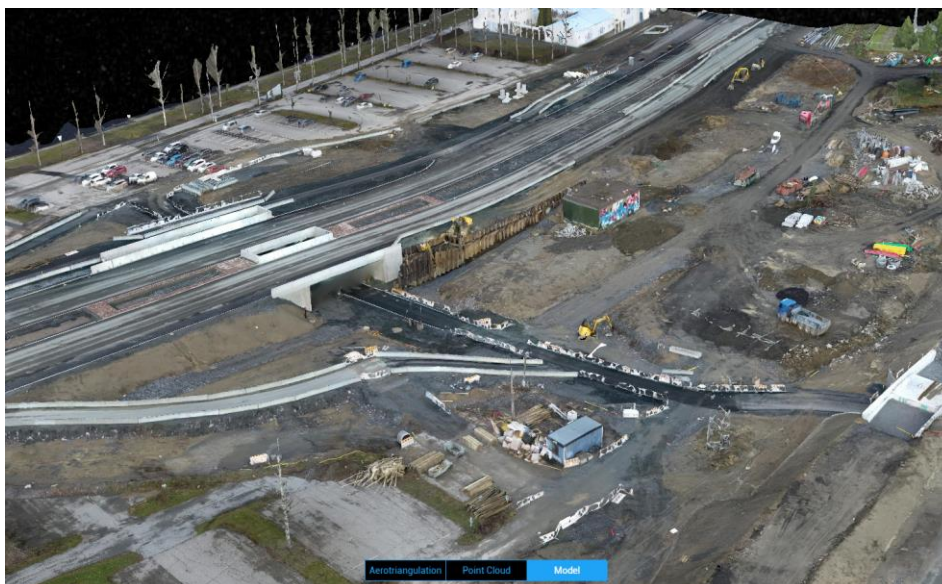
Kuva 2.2 DJI Terra ohjelmistolla luotu LiDAR -malli Savilahden työmaalta (Nykänen 2022)

### 2.3 Fotogrammetrinen mittaus

Fotogrammetrinen mittaus on kolmiulotteinen mittaus tekniikka, jossa objektin muoto ja asema määritellään koostamalla useassa valokuvissa näkyvien objektin pisteiden asema. Kuvien objektin pisteistä  $P$  lähteviä valonsäteitä seurataan kuvien läpi niiden risteämiskohtaan  $O$ , jolloin voidaan määrittää kuvan ottamisen asema ja kun tiedetään kuvan ottohetkellä kameran sijainti, voidaan jokaisen objektipisteen tarkkasijainti määrittää 3D maailmassa. (Luhmann, Robson, Kyle & Boehm 2014) 3D mallin luominen vaatii paljon pisteiden yhdistelyä ja tämä tehdään siihen suunnitellulla mallin luonti ohjelmalla. Esimerkiksi tässä työssä kuvatun mallin yhdistely vei tehokkaalta tietokoneelta aikaa useamman tunnin.



Kuva 2.3 Fotogrammetrian peruseriaate (Sendo Wang 2004)



Kuva 2.4 Kuva savilahdentyömaasta tehdystä fotogrammetrisestä mallista (Nykänen 2022)

## 2.4 Kartoitusmenetelmien edut ja heikkoudet

Jos kartoitetaan maata, jossa on paljon kasvillisuutta ja puustoa, on lidar vahvempi valinta, sillä lidar pystyy läpäisemään jopa 90 % kasvillisuudesta tavoittaen maanpinnan ja sen muodot tarkemmin, fotogrammetrialla päästään alle 60 % läpäisyyn. (Propelleraero 2021). Toinen Lidarin vahvuus huomattiin Työmaakartoituksella. Lidar keilaamalla alueen kartoitus kesti 9 minuuttia kun taas fotogrammetrinen kuvaus kesti 38 minuuttia. Tämä ei ole ongelma, mikäli akuissa riittää virtaa, mutta kartoitus fotogrammetrisesti syö enemmän tehokasta työaikaa kuin lidarkeilaus.

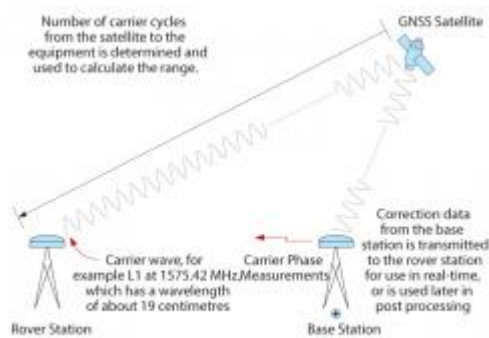
Lidarkeilauksen yksi suuri kompastuskivi on kaluston hinta. DJI:n lidar keilain maksaa miltei 13 000 € ja sille kantava drone Matrice 300 RTK maksaa 11 000 € + lisäosat, jolloin hankinta kustannus lähentelee 30 000 € rajaa. Fotogrammetriseen keilaukseen soveltuvan DJI kartoitus dronen voi lisäosineen hankkia alle 10 000 € hintaan.

## 2.5 Dronemallin sijoittaminen koordinaatistoon

Dronemallin sijoittaminen oikeaan paikkaan koordinaatistossa tapahtuu yleisimmin joko käyttäen RTK- tai PPK-korjausta. Vaihtoehtoina helpommin käytettävä RTK mittaus on nopeampi ja yksinkertaisempi, mutta PPK korjattu malli saadaan sijoiteltua huomattavasti tarkemmin ja varmemmin oikeaan asemaansa myös jälkikäteen.

### 2.5.1 RTK korjattu paikannus

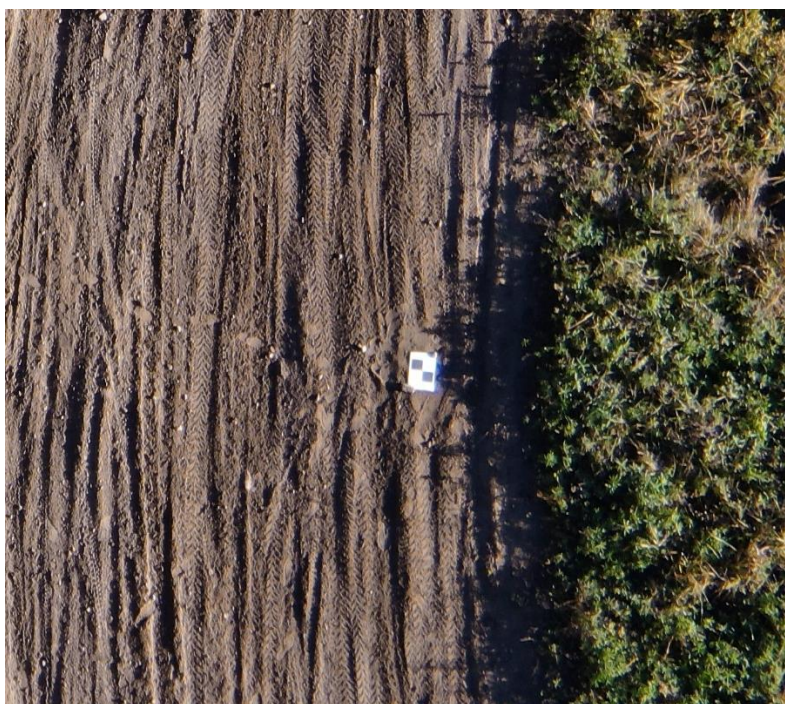
RTK korjattu paikannus tarkoittaa GPS mittauksia, jossa drone on yhteydessä sekä tukiasemaan, että satelliittiin. Tukiasema mittaa etäisyyttä droneen ja satelliittiin sekä ottaa vastaan tiedon paljonko dronella on etäisyyttä satelliittiin. Tällöin tukiasema pystyy laskemaan useamman satelliitin korjaussignaalin perusteella dronen absoluuttisen sijainnin. (Novatel 2022) Tällöin dronen tarkka sijainti on taivaalla tiedossa, jolloin dronen ottaessa kuvia tai lidar keilausdataa taivaalta on dronen sijainti tiedossa senttimetrin tarkkuudella ja se tallennetaan valokuvien metatietoon, josta mallin käsittelyohjelma osaa lukea valokuvien sijainnin.



Kuva 2.4 RTK mittauksen periaate (Researchgate 2021)

### 2.5.2 PPK korjattu paikannus

PPK eli Post Processing Kinematic, joka tarkoittaa mallin sijoittaminen maastoon tapahtuu vasta varsinaisen mallin luomisen jälkeen. Tyypillisesti tämä tapahtuu käyttäen GCP:tä eli Ground Control Point:ja. Tällöin maastoon sijoitetaan tähyksiä, joiden koordinaatti mitataan takymetrillä tai GNSS sauvalla. Tähykset näkyvät dronemallissa, johon syötetyt koordinaatit yhdistetään siten että mallin-  
 nusohjelma tietää muutaman kohdistuspisteen sekä tarkastuspisteen sijainnin ja osaa siten orientoida mallin oikeaan asentoon. (MDPI 2020)



Kuva 2.5 GCP Photogrammetrisessä mittauksessa (Nykänen 2021)

### 2.6 LiDARmallin tarkkuuteen vaikuttavat tekijät

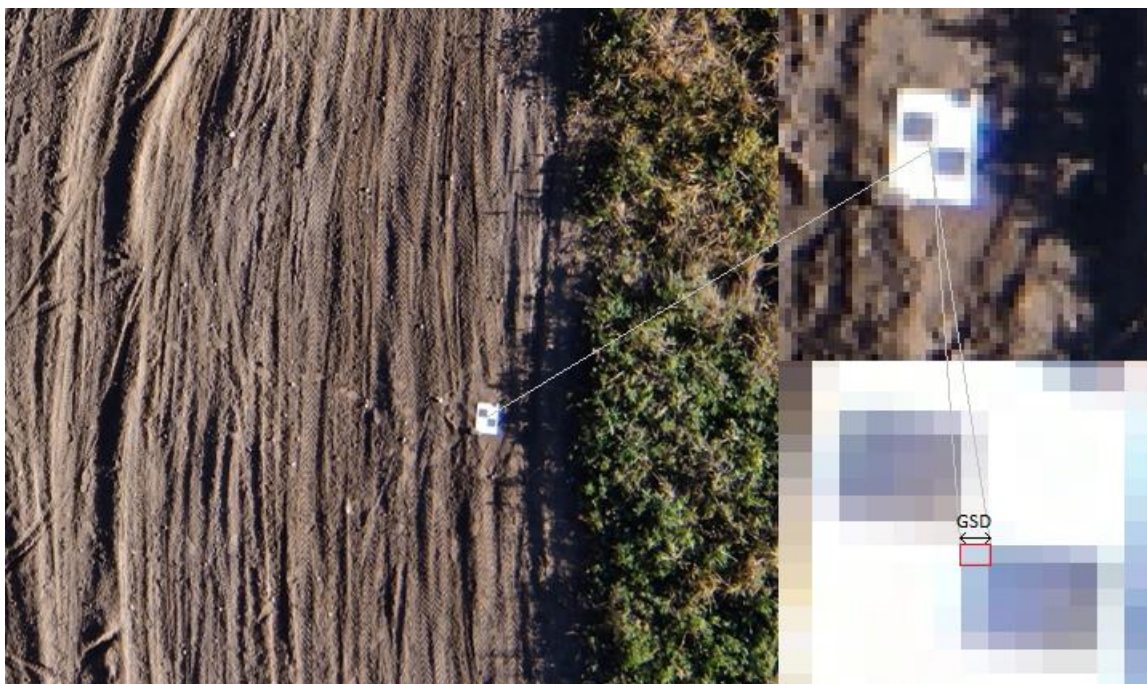
Lidar mallin tarkkuuteen suoraan vaikuttaa otettujen pisteiden lukumäärä. Lidar keilain tallentaa satojatuhansia pisteitä sekunnissa, mutta dronen lentäessä 50 m korkeudella jäädyään helposti alle 500 pistettä/m<sup>2</sup> eli piste/20cm<sup>2</sup> (Wingtra 2021)

## 2.7 Photogrammetriseen malliin vaikuttavat tekijät.

Photogrammetriseen malliin vaikuttaa kolme teknistä tekijää, Ground Sampling distance, Motion Blur ja valokuvien limitys eli overlap. Kaikkien näiden tekijöiden korjaaminen on mahdollista muuttamalla lentoparametrejä, kuten lentokorkeutta ja lentonopeutta.

### 2.7.1 Ground Sampling Distance

Photogrammetrisessa mittauksessa malli muodostetaan valokuvista, jolloin mallin tarkkuus riippuu suoraan valokuvien tarkkuudesta. Valokuvien tarkkuuden määrittämisessä käytetään GSD:tä eli Ground Sample Distance:a. GSD tarkoittaa maassa olevien näytteiden eli tässä tapauksessa pikselien etäisyyttä toisistaan. Tätä etäisyyttä pienemmät asiat eivät välity malliin. (Propelleraero 2021)

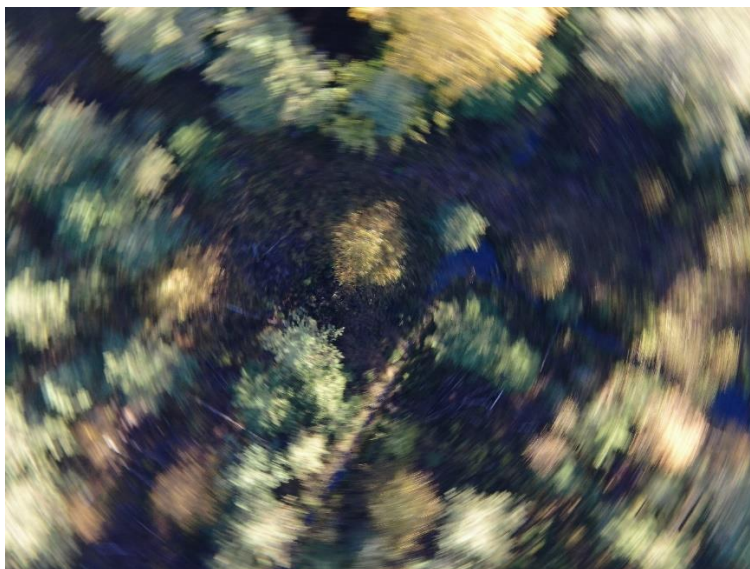


Kuva 2.6 GSD dronekuvassa (Nykänen 2022)

### 2.7.2 Motion Blur

Toinen valokuvien kuvanlaatuun vaikuttava asia on motion blur. Mikäli kamera liikkuu liian nopeasti suhteessa valokuvan ottamiseen menevään aikaan, tulee kuvasta kansankielellä tärähtänyt. Tavoitteena olisi, ettei motion blur olisi enempää kuin GSD. (Hammer Missions 2020)

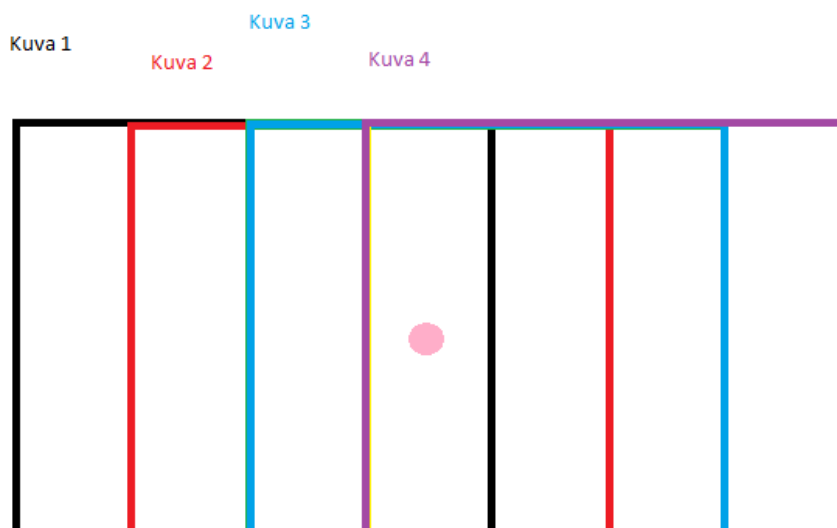
$$\text{Motion Blur} = \text{Kameran valotusaika (s)} * \text{Dronen nopeus (m/s)}$$



Kuva 2.7 Kameran kääntymisestä johtuva motion blur (Nykänen 2021)

### 2.7.3 Valokuvien Overlap

Valokuvien overlap eli limitys vaikuttaa saatavan datan määrään, monen lähteen suosittama limitys on 60–80 %. 75 % limitys tarkoittaa siis sitä, että kuvassa näkyy 75 % samaa kuin viereisessä kuvassa eli sama piste voidaan nähdä neljässä perättäisessä kuvassa, neljästä eri kulmasta, lisäksi sivu limityksen ollessa 75 % voidaan yksi piste nähdä yhteensä 16 eri kuvasta ja kuvakulmasta, tämä helpottaa kuvan sijoittamista kolmiulotteiseen maailmaan.



Kuva 2.8 Valokuvien limitys (Nykänen 2022)

### 3 TOTEUMAMITTAUS

Muun muassa väyläviraston rakennusurakoissa urakoitsija on veloitettu mittaamaan ja dokumentoimaan toteumanpisteitä jokaisesta rakenneosasta. Dokumentointitapa ja -tyyppi määräytyy urakko-kohtaisesti, tyypillisinä vaihtoehtoina ovat piirustukset sekä toteumamalli. (VÄYLÄ, 2020)

#### 3.1 Rakenteiden tarkkuusvaatimukset

Rakenteiden sijaintivaatimuksetvaatimukset on esitetty rakennusprojektin työselostuksessa tai viittauksena Infrarylliin. Rakenteille annetaan erilaisia vaatimuksia, alla taulukossa on esimerkki muutamasta tyypillisestä rakenteesta (Infraryl 2021/2)

Hankenimike	Rakennusosa	Sijaintivaatimus vaakatasossa	Korkeusaseman vaatimus
33114	Televerkon maakaapelit	± 500 mm haja-asutusalueella ± 100 mm taajama-alueella	Jos syvyys poikkeaa suunnitellusta ± 100 mm
33115	Sähköverkon maakaapelit	± 500 mm haja-asutusalueella ± 100 mm taajama-alueella	Jos syvyys poikkeaa suunnitellusta ± 100 mm
31200.4.2	Hulevesikaivo	Reunatuen vieressä ± 100 mm, muualla ± 200 mm	Vaatimus riippuu ympäröivistä rakenteista
33630	Valaisinpylväät	Sijainti vaatimus on esitetty pylvään jalustalle, Poikittais-suunnassa liikenneväylään nähden ± 100 mm, pitkittäis-suunnassa ± 1000 mm	Jalusta tulee olla valmistajan ohjeiden mukaisesti maan pinnassa.
22110	Reunatuet	± 50 mm	± 20 mm

Taulukko 3.1 Tarkemittavien kohteiden vaatimuksia

Ainoa tapa todistaa rakenteiden sijaintivaatimuksen täyttyminen on toteuma mitata rakenteet. Tyypillisesti tarkemittaus suoritetaan käyttäen takymetriä, jolla päästään 1 mm+1,5ppm tarkkuuteen (Geotrim 2022), tai vaihtoehtoisesti GNSS sauvaa, jolla päästään teoriassa RTK-mittauksella 8 mm+1ppm horisontaaliseen- ja 15 mm+1ppm vertikaaliseen tarkkuuteen (Novatron 2022) mikäli tarkkuusvaatimus ei edellytä takymetrin käyttämistä.

#### 3.2 Tarkeaineiston vaatimukset

Tarkeaineistossa käytetään ja jatkossa tullaan käyttämään yhä enemmän YIV:n (Yleiset Inframalli Vaatimukset) mukaista toteuman luovutusaineiston muotoa. Eri rakenneosille on erilaiset vaatimukset luovutusaineiston tyypistä ja tiedostomuodosta. Esimerkiksi valmiit rakennekerrokset (pois lukien suodatinkerros) luovutetaan 3D pintana Inframodel tiedostomuodossa eli LandXML muotoisena pintatiedostona. (Building Smart Finland 2021)

## 4 DRONEMALLIN TARKKUUS JA SEN TARKASTELEMINEN

Tässä kappaleessa käsitellään tarkkuudentutkimiseksi tehtyjä tutkimuksia sekä niiden tuloksia. Tuloksien lopuksi on yhteenveto, jossa on koonti tarkkuuksista.

### 4.1 Tutkimukset

Tarkkuuden tutkimiseksi Savonian Matrice 300 RTK dronella kartoitettiin osio Savilahden hehkunsydän työmaasta käyttäen sekä lidar-keilausta, että photogrammetrista keilausta. Kartoituspäivänä sää oli pilvinen ja hieman tuulinen. Keilaus suoritettiin DJI:n Zenmuse L1 keilaimella sekä sen kameralla. Dronea lennettiin 50 m korkeudella, jolla saavutettiin photogrammetrisessa mittauksessa GSD:n kooksi 1,37 cm/pikseli. Photogrammetrisen mittauksen lentonopeus oli 3 m/s, suljinaika 1/1000 jolloin motion blur 0,3 cm eli huomattavasti GSD:tä pienempi ja kuvien etu- ja sivu-overlap 75 %. Lidar keilaus suoritettiin 9 m/s nopeudella ja Lidar keilauksessa saavutettiin 228 pistettä/m<sup>2</sup> eli pisteen koko n. 6,5 cm \* 6,5 cm.

DJI lupaa fotogrammetrisenkartoituksen täyttävän ASPRS:n (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) ortokuva luokan 3 vaatimukset eli mallin horisontaali RMSE on  $GSD \cdot 3.0$  ja Vertikaali RMSE 95 % tapauksista on 14,7 cm (ASPRS 2013)



Kuva 4.1 Savonian DJI Matrice 300 RTK -drone (Nykänen 2021)

Kartoitusta varten maastoon mitattiin takymetrillä 3 tähystä mallin orientointiin, sekä GNSS sauvalla 20 erilaista tyypillistä tarkemitattavaa kohdetta, joihin voidaan verrata mallien tarkkuutta. Tarkemittaukset suoritettiin ETRS89/GK27FIN koordinaatistoon ja N2000 korkeusjärjestelmään.



Kuva 4.2 Tarkemittaukset GNSS-sauvalla (Nykänen 2021)

Kartoituksesta saatu aineisto käsiteltiin DJI:n omalla TERRA ohjelmistolla, sillä se on ainoa, jolla DJI:n lidarkeilaimen aineistoa voidaan käsitellä. Vertailunvuoksi fotogrammetrinen malli tehtiin myös Autodesk Recap Prolla ja analysoitiin Civil 3D ohjelmalla, jonka mittaukset olivat huomattavasti tarkempia kuin TERRA:lla tehdyt. Civil 3D ohjelmistolla luotu mittausaineisto on myös helpompi saattaa luovutusaineistomuotoon, jollaisena mittausten tulokset yleisesti on esitettävä.

## 4.2 Lidar malli ja sen tarkkuus

Lidar mallin sijoittaminen DJI:n välineillä ja ohjelmistolla rajoittuu RTK paikannukseen, sillä TERRA ohjelmistossa ei ole liDARmallin käsittelyyn vaihtoehtoa tarkepisteiden käsittelyyn eli PPK paikannukseen.

Name	X	Y	Z	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
1	27532547,812	6976560,280	122,084	-1,548	-0,172	-36,656
2	27532527,818	6976566,079	122,335	-1,549	-0,373	-36,691
4	27532527,578	6976571,067	122,205	-1,524	-0,286	-36,657
6	27532514,728	6976551,718	121,057	-1,627	-0,395	-36,683
7	27532512,443	6976549,418	120,700	-1,56	-0,41	-36,663
8	27532510,314	6976543,459	120,228	-1,600	-0,35	-36,72
9	27532494,987	6976530,995	120,789	-1,558	-0,416	-36,729
10	27532511,119	6976486,600	121,988	-1,597999999	-0,589	-36,836
11	27532401,770	6976450,953	127,519	-1,515	-0,476	-36,606
12	27532450,337	6976496,776	126,055	-1,629	-0,484	-36,714
13	27532463,338	6976508,448	125,934	-1,490999999	-0,392	-36,718
14	27532459,722	6976520,789	125,922	-1,670	-0,582	-36,693
15	27532435,204	6976505,242	126,459	-1,546999999	-0,508	-36,706
16	27532439,234	6976500,813	126,428	-1,560000001	-0,463	-36,695
17	27532441,229	6976502,743	126,367	-1,533	-0,434	-36,684
18	27532437,350	6976507,203	126,447	-1,575	-0,559	-36,72
22	27532507,924	6976607,998	121,902	-1,582	-0,379	-36,638
23	27532509,915	6976606,721	121,947	-1,590	-0,572	-36,631
			Pienin	-1,67	-0,589	-36,836
			Virheen keskiarvo	-1,569777778	-0,435556	-36,6911
			Suurin	-1,490999999	-0,172	-36,606
			Keskihajonta	0,043160625	0,1053224	0,048629

Taulukko 4.1 Lidarmitatut pisteet ja niiden virhe GNSS mitattuihin nähden

LiDARmalli on hieman erilainen kuin fotogrammetrinen eikä siitä voi luotettavalla tasolla mitata kaikista pienimpiä kohteita, jonka vuoksi osa kohteista jäi mittaamatta. Tarkepisteet mittaamalla huomattiin mallinpaikan heittävän 2 metrillä ja olevan 36 metriä liian syvällä. Tämä johtunee siitä, ettei Terrassa ole mahdollista valita korkeusjärjestelmää vaan ohjelma luo mallin normaalitasolle. Virheiden symmetrisyys viittaa siihen, että malli on väärässä kohdassa ja RTK-paikannus ei toiminut mallin sijoittelussa. Mallin virheet vaihtelevat keskiarvosta  $\pm 25$  cm, joka olisi mallin tarkkuus, mikäli se manuaalisesti sijoitettaisiin oikeisiin koordinaatteihin.

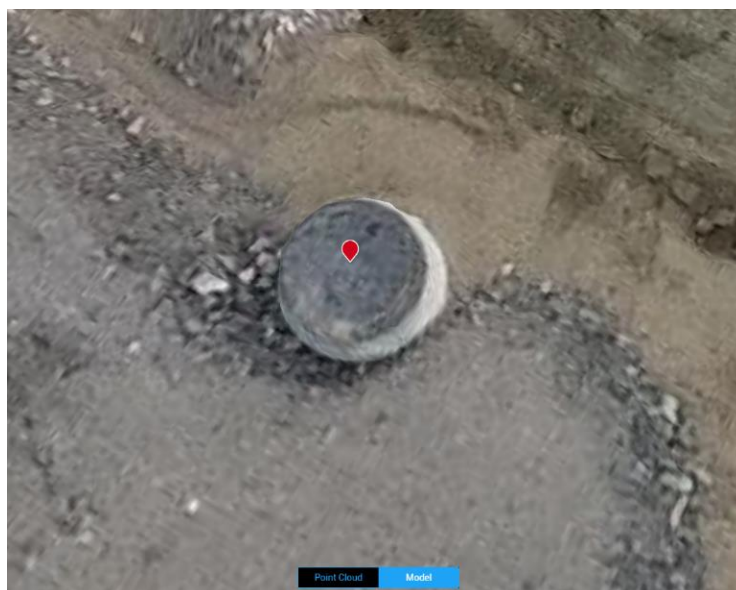
### 4.3 Fotogrammetrinen malli ja sen tarkkuus

Mallin sijoittelussa koordinaatistoon käytettiin PPK paikannusta eli mallin kuvista valittiin takymetri-mitatut paikkapisteet sekä toisessa mallinnuksessa käytettiin lisäksi neljättä GNSS sauvalla mitattua pistettä rauhoittamaan mallien vertikaalista tarkkuutta, jolloin GCP:tä saatiin 4. Yhden venttiilikaivon-kannen sijainti oli jätettävä mittaamatta, sillä sen paikka kerkesi muuttua mittausten välillä.

Piste	Terra mallinnus 1			Terra mallinnus 2			Recap Pro mallinnus		
1	-0,05	-0,014	0,416	-0,066	-0,055	0,177	0,018	0,026	-0,028
2	-0,123	-0,003	0,321	-0,139	0,016	0,005	-0,006	0,050	-0,121
3	-0,106	-0,012	0,291	0	0	0	0,014	-0,011	-0,028
4	-0,102	-0,016	0,305	-0,141	0,004	0,008	0,013	0,015	-0,076
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	-0,075	0,117	0,5	-0,06	0,12	0,039	0,055	0,040	-0,113
7	-0,074	0,058	0,532	-0,089	0,084	0,053	-0,003	-0,023	-0,088
8	-0,085	0,089	0,644	-0,061	0,1	0,136	-0,005	-0,017	-0,133
9	-0,009	0,139	0,407	-0,025	0,147	-0,256	0,032	0,018	-0,080
10	0,259	0,128	0,179	0,318	0,102	-0,63	0,019	-0,061	-0,097
11	-0,054	0,357	-3,805	0,028	0,349	-5,041	0,067	0,000	0,409
12	-0,044	0,235	-1,264	-0,021	0,224	-2,188	0,019	0,023	0,052
13	-0,04	0,202	-0,829	0,022	0,235	-1,634	0,073	0,044	-0,164
14	-0,125	0,174	-0,796	-0,073	0,209	-1,633	0,018	-0,012	0,002
15	-0,116	0,188	-1,654	-0,105	0,226	-2,605	0,018	-0,008	0,056
16	-0,091	0,258	-1,529	-0,054	0,285	-2,48	0,044	0,007	0,105
17	-0,091	0,237	-1,467	-0,035	0,25	-2,389	0,081	0,024	0,098
18	-0,12	0,24	-1,529	-0,111	0,254	-2,472	0,026	0,058	0,089
19	-0,306	0,166	-0,321	-0,31	0,162	-0,549	-0,017	0,147	-0,094
20	-0,286	-0,022	-0,269	-0,289	-0,004	-0,5	-0,008	0,004	-0,083
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pienin	-0,306	-0,022	-3,805	-0,31	-0,055	-5,041	-0,017	-0,061	-0,164
KA.	-0,086	0,133	-0,519	-0,067	0,150	-1,220	0,024	0,017	-0,015
Suurin	0,259	0,357	0,644	0,318	0,349	0,177	0,081	0,147	0,409
Keskihajonta	0,109	0,109	1,115	0,128	0,109	1,386	0,028	0,042	0,129
RMSE	0,139	0,171	1,230	0,144	0,186	1,846	0,037	0,045	0,130

Taulukko 4.2 Fotogrammetriset mallinnukset ja mittaustulokset (Nykänen 2022)

Mittaustuloksissa huomattiin, että Terralla luotujen mallien horisontaalinen vaihtelu oli jopa  $\pm 60$  cm ja parhaimmillaan  $\pm 30$  cm. Vertikaalinen vaihtelu tuntui olevan ihan mitä sattuu neljästä GCP:stä huolimatta vaihteluväli oli jopa 6 metriä. Pisteiden mittaaminen Terran mallista ei ole myöskään kovin helppoa, kuten alla olevasta kuvasta voi huomata on malli melko epätarkka.



Kuva 4.3 Kaivo TERRA mallissa (Nykänen 2022)

Recap prolla tehdystä mallista sen sijaan tuli melko tarkka ja Civil 3D:llä tehdyissä mittauksissa malli ja ilmakehä saavuttivat  $\pm 15$  cm horisontaalisen tarkkuuden ja  $\pm 40$  cm vertikaalisen tarkkuuden, ja suurin osa mittauksista oli muutaman sentin päässä GNSS-sauvalla mitatusta paikasta, joka avaa kysymyksen siitä onko GNSS-mittauksessa sattunut joku inhimillinen tarkkuusvirhe. Recap Pron oma raportti ilmoitti mallin tarkkuudeksi Checkpointissa XY suunnassa 3 cm ja Z suunnassa 7,6 cm, joka vastaa suurintaosaa mitattuja tuloksia.



Kuva 4.4 Kaivon tarkkuus Civil 3D:ssä (Nykänen 2022)

<b>Ground Control Points</b>						
Coordinate System: LL84						
User Input Control Points						
Name	Valid	X	Y	Z	Calculated XY Error	Calculated Z Error
GCP3	Yes	27.640531025300	62.891620991900	92.394000000000	< 0.029 m	< 0.029 m
GCP1	Yes	27.638629836400	62.891829817400	86.939000000000	< 0.029 m	< 0.029 m
GCP2	Yes	27.640250888100	62.892665986300	84.576000000000	< 0.029 m	< 0.029 m
User Input Check Points						
Name	Valid	X	Y	Z	Calculated XY Error	Calculated Z Error
GCP4	Yes	27.639220254400	62.892869375900	85.316000000000	0.030 m	0.076 m

\*XY Error and Z Error are the differences between user's inputs and system calculated coordinate points and is related to the GSD.

Kuva 4.5 Recap Pron mallintarkkuustuloste (Nykänen 2022)

#### 4.4 Yhteenveto

LiDAR-malli saavutti tarkkuuden  $\pm 25$  cm horisontaalisen keskihajonnan ollessa 10,5 cm ja vertikaalisen keskihajonnan ollessa vain 4 cm. LiDAR-malli on hyvin tarkka vertikaalisuunnassa, mutta laitteistolla tulisi pystyä yhtä aikaa kuvaamaan ortokuvaa ja malli pitäisi voida yhdessä kuvien kanssa sijoittaa asemaansa PPK paikannuksella, jolloin sekä XY että Z tarkkuudessa päästäisiin mahdollisesti vain muutamaan senttiin, tätä mahdollisuutta DJI:n keilaimella ja ohjelmilla ei ainakaan vielä ole.

Photogrammetrisessä mittauksessa Recap Photolla luotu malli saavutti  $\pm 15$  cm horisontaalisen ja  $\pm 40$  cm vertikaalisen tarkkuuden, keskihajonnan ollessa 4 cm XY suunnassa ja 13 cm Z suunnassa. Malli täyttää täysin melkein asetetut oletukset eli RMSE virhe XY suunnassa oli 4,5 cm, joka on hiekan suurempi kuin tavoite  $3 \times \text{GSD} = 4,11$  cm. Z suunnassa mallin RMSE oli 13 cm, joka täyttää tavoitteen, jossa RMSE saisi olla 95 % tapauksista 14,7 cm.

## 5 OHJE TYÖMAAN KARTOITUKSEEN JA SEN KÄYTTÖÖN (LIITE)

Ohje on Oteran Oy:n sisäiseen käyttöön, eikä sitä julkaista tässä raportissa.

## 6 POHDINTA

Drone lainsäädännön muuttuessa tiukemmaksi on lennättäminen myös haasteellista urbaanissa olosuhteessa, siten ettei lakia rikota tai kenenkään turvallisuutta vaaranneta. Lentämisen luvallisuuden oman haasteen luo myös asia, johon törmäsimme, että joillekin alueille voidaan perustaa puolustusvoimien väliaikainen lentokieltoalue, jolloin lentämistä voi olla rajoitettu ja mallinnusta ei voida suorittaa vaikkapa viikkoon.

Paikkatiedon mittaaminen käyttämällä photogrammetrista keilausta ei tällä hetkellä ole vielä työmaateknisesti kovin hyvä vaihtoehto, vaikka tarkkuutta saataisiinkin parannettua paremmilla olosuhteilla ja parametreilla, varsinkaan jos keilaaminen ja mallien käsittely tehdään ”omana työnä”. Photogrammetrinen keilaus laitteisto maksaa vähintään saman verran kuin tavallinen GNSS sauva, joka on yleisesti hyväksytty menetelmä tarkemittaukseen, eikä keilaukseen perustuva mittaus ole työtehokas GNSS-sauvalla mittaamiseen verrattuna mallin rakenteluun ja kuvauksen suorittamiseen kuluvan ajan takia.

Keilauksista saamamme data voisi olla laadukkaampaa, jos sen tekisi uudelleen erilaisella säällä tai erilaisilla parametreilla, mutta voittaakseen GNSS-sauva mittaus tulisi mallinluomisen nopeutua ja helpottua. Tämän lisäksi tulisi mallista suoraan mittaamisen muuttua yleisesti hyväksytyksi mittausmenetelmäksi, joka voi tulevaisuudessa olla jopa mahdollista, sillä pienellä tarkentamisella on senttimetrin tarkkuuden saavuttamisen täysin mahdollista käytettäessä Takymetrimitattuja laadukkaita tähyksiä.

## LÄHTEET

- Droneinfo 2022. Luvasta vapaa toiminta avoimessa kategoriassa. <https://droneinfo.fi/fi/luvasta-vapaa-toiminta-avoin-kategoriassa?toggle=A1%20ja%20A3%20alakategoria&toggle=A2%20alakategoria> viitattu 19.1.2022
- DJI 2022. Mavic Enterprise Advanced. Verkkajulkaisu. <https://www.dji.com/fi/mavic-2-enterprise-advanced/specsviitattu> 19.1.2022
- Droneinfo 2022. Valvottu lisäteoriakoe toiminnan alakategoriaan a2. Verkkajulkaisu. <https://droneinfo.fi/fi/valvottu-lisateoriakoe-toiminnan-alakategoriaan-a2> viitattu 19.1.2022.
- European Union Aviation Safety Agency 2022. Open Gategory – Civil Drones. Verkkajulkaisu. <https://www.easa.europa.eu/domains/civil-drones/drones-regulatory-framework-background/open-category-civil-drones>. Viitattu 1.3.2022.
- Aviamaps 2022. Dronekartta. <https://aviamaps.com/map#p=12.63/63.00457/27.7988>. Viitattu 23.2.2022
- Niklas Sarri 2020. LIDAR-järjestelmän toimintaperiaate ja sovellukset. Verkkajulkaisu. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/123380/SorriNiklas.pdf?sequence=2&isAllowed=y> viitattu 19.1.2022
- ToF-Insights 2018. LiDAR and ToF Cameras – Technologies explained. Verkkajulkaisu. <https://tof-insights.com/time-of-flight-lidar-and-scanners-technologies-explained/> Viitattu 19.1.2022
- Thomas Luhmann, Stuart Robson, Stephen Kyle & Jan Boehm. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. Selkokirja. Ebookcentral -verkkopalvelu. <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.savonia.fi/lib/savoniafi/reader.action?docID=1563368>. Viitattu 26.1.2022.
- Semi-automated CSG model-based building extraction from photogrammetric images - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/The-concept-of-floating-model-Line-photogrammetry-takes-the-nature-of-3D-linear-feature\\_fig3\\_228529371](https://www.researchgate.net/figure/The-concept-of-floating-model-Line-photogrammetry-takes-the-nature-of-3D-linear-feature_fig3_228529371). Viitattu 15.4.2022.
- Wingtra 2021. Drone photogrammetry vs Lidar. <https://wingtra.com/drone-photogrammetry-vs-lidar/>. Viitattu 9.3.2022.
- Propellerareo 2021. Dronesurveying misconceptions lidar vs photogrammetry. <https://www.propelleraero.com/blog/drone-surveying-misconceptions-lidar-vs-photogrammetry/>. Viitattu 26.1.2022
- Novatel 2022. Real Time Kinematic. <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-5-resolving-errors/real-time-kinematic-rtk>. Viitattu 26.1.2022
- APPLICATION OF GPS NAVIGATION IN AGRICULTURAL AGGREGATES - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-operation-of-RTK\\_fig1\\_329856070](https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-operation-of-RTK_fig1_329856070) Viitattu 15.4.2022
- MDPI 2020. Coastal mapping using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic mode. <https://www.mdpi.com/2504-446X/4/2/9/htm>. Viitattu 23.2.2022.
- Propelleraero 2021. What is Ground Sample Distance (GSD) and how does it affect your drone data. Verkkajulkaisu. <https://www.propelleraero.com/blog/ground-sample-distance-gsd-calculate-drone-data/>. Viitattu 8.3.2021.
- Hammer Missions 2020. Preventing motion blur in drone photogrammetry flights. Verkkajulkaisu. <https://www.hammermissions.com/post/preventing-motion-blur-in-drone-photogrammetry-flights>. Viitattu 8.3.2021.

Aerotas 2021. Overlap & flight pattern. <https://www.aerotas.com/overlap-flight-pattern>. Viitattu 9.3.2022.

Väylävirasto 2020. Väylähankkeen laadunosoitus – Laatu prosessin kuvaus. Verkkojulkaisu. [https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo\\_2020-44\\_vaylahankkeen\\_laadunosoitus\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo_2020-44_vaylahankkeen_laadunosoitus_web.pdf) viitattu 10.1.2022

Infraryl 2021. infra Rakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Verkkojulkaisu. [https://ryl-rakennustieto-fi.ezproxy.savonia.fi/ryl/InfraRYL/2021\\_2/31000.html#TL31200id1791438](https://ryl-rakennustieto-fi.ezproxy.savonia.fi/ryl/InfraRYL/2021_2/31000.html#TL31200id1791438) Viitattu 10.1.2022

Geotrim 2022. Robotti takymetrit. Verkkojulkaisu. <https://geotrim.fi/tuotteet/takymetrit/robottitakymetri-trimble-s9-s9hp/> Viitattu 11.1.2022

Novatron 2022. Xsite Rover Gnss vastaanotin. Verkkojulkaisu. <https://novatron.fi/wp-content/uploads/2019/05/Xsite-ROVER-brochure-2019-web-1.pdf> Viitattu 11.1.2022

Building Smart Finland 2021. Yleiset Inframallivaatimukset YIV. Verkkojulkaisu. <https://buildingsmart.fi/infrabim/yiv/>. Viitattu 17.3.2022.

American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. ASPRS Accuracy standards for digital geospatial data. Verkkojulkaisu. [http://www.asprs.org/a/society/divisions/pad/Accuracy/Draft\\_ASPRS\\_Accuracy\\_Standards\\_for\\_Digital\\_Geospatial\\_Data\\_PE&RS.pdf](http://www.asprs.org/a/society/divisions/pad/Accuracy/Draft_ASPRS_Accuracy_Standards_for_Digital_Geospatial_Data_PE&RS.pdf) Viitattu 6.4.2022.