



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Ossi Valta

Fotogrammetrisen pistepilven korkeus- tarkkuus asemakaavan pohjakartan päivityksessä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Maanmittaustekniikka

Opinnäytetyö

3.4.2020

<p>Tekijä Otsikko</p> <p>Sivumäärä Aika</p>	<p>Ossi Valta Fotogrammetrisen pistepilven korkeustarkkuus asemakaavan pohjakartan päivityksessä</p> <p>30 sivua + 2 liitettä 3.4.2020</p>
<p>Tutkinto</p>	<p>insinööri (YAMK)</p>
<p>Tutkinto-ohjelma</p>	<p>maanmittaustekniikka</p>
<p>Ohjaajat</p>	<p>kiinteistöinsinööri Juho Toijanaho lehtori Ilkka Partonen</p>
<p>Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää RPAS-laitteistolla tuotetun fotogrammetrisen pistepilven korkeustarkkuutta ja samalla sen käytettävyyttä asemakaavan pohjakartan kartoitus-työssä. Fotogrammetrisen pistepilven tarkkuus on havaittu hyväksi tasaisilla pinnoilla ja työn ohessa keskitytään tutkimaan pistepilviaineiston tarkkuutta teräväpiirteisten asemakaavan pohjakarttaan kuuluvien kohteiden reunoilla.</p> <p>Työtä varten tuotettua pistepilviaineistoa verrattiin perinteisellä takymetrimittauksella tuotettuun aineistoon. Testialueelta valittiin vertailuun tien reunakiviä, tukimuureja, aita, meluaita ja rakennusten reunoja. RPAS -data prosessoitiin Agisoft Metashape Pro -sovelluksella pistepilveksi ja ortomosaiikiksi. Aineistojen vertailu suoritettiin 3D-win-maastomittausohjelmistolla. Ilmakuvaus suoritettiin 100 m:n korkeudesta kuvien 80 %:n pituus- ja 80 %:n sivuttaispeitolla. Kuva-aineiston maastopikselikoko oli käytetyllä laitteistolla 1,3 cm.</p> <p>Vertailun tuloksista nähdään, että RPAS-laitteistolla tuotetun pistepilven korkeustarkkuus on riittävä asemakaavan pohjakartan kartoittamiseen, kun kartoitettava kohde ei ole liian korkea. Digitointimenetelmällä pohjakarttaa voidaan tuottaa hyvällä tarkkuudella kunhan kartoittaja huomioi pohja-aineiston rajoittuvuuden. Tien reunakivet ja matalammat tukimuurit pystytään kartoittamaan hyvällä korkeustarkkuudella. Korkeammat ja kapeammat kohteet, kuten aidat ja melumuuri, voivat tuottaa kartoittajalle ongelmia tarkan korkeuden määrittämisessä.</p>	
<p>Avainsanat</p>	<p>RPAS, pistepilvi, kartoitus, korkeusmalli</p>

Author Title	Ossi Valta Height Accuracy of Photogrammetric Point Clouds in Mapping
Number of Pages Date	30 pages + 2 appendices 3 april 2020
Degree	Master of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Land Surveying
Instructors	Juho Toijanaho, Municipal survey authority Ilkka Partonen, Senior Lecturer
<p>The aim of this master's thesis was to establish if and how photogrammetric point clouds created with RPAS can be used for mapping accurate height coordinates, as they can be used to create accurate ground elevation models for smooth surfaces. The thesis studied road curbstones, retaining walls, noise barrier, fence and building edges, objects without smooth geometries.</p> <p>Data derived from a photogrammetric point cloud and data mapped with a total station were compared. The RPAS data were processed with Agisoft Metashape Pro software for photogrammetric processing, and the comparison was done with 3D win mapping software. Aerial photographs were taken from an altitude of 100 meters, with forward and side redundancy of 80 % and 80 % respectively. The GSD of the photographs was 1,3 cm.</p> <p>The results indicate that photogrammetric point clouds generated from RPAS aerial photos can be used in mapping with a few reservations. Height coordinates with high reliability can be created if the mapped object is not too high or narrow, as a fence, for a good photogrammetric point cloud to be produced. Most notably high and narrow objects, as fences and noise barriers can produce variable results when processed. Shallower objects, such as curbstones can be measured quite reliably. However, the person carrying out the mapping must be aware of these attributes of photogrammetric point clouds.</p>	
Keywords	UA, RPAS, point clouds, digital terrain model, mapping

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Miehittämätön ilmailu	2
2.1	Yleisesti	2
2.2	Lainsäädäntö: Ilmailumääräys OPS M1-32	2
2.3	Laitteisto	4
2.3.1	GeoDrone X4L v5	4
2.3.2	Videodrone Ground station	6
3	Työn suoritus	7
3.1	Alueen rajaus	7
3.2	Pisterungon rakentaminen	8
3.3	Vertailuaineiston mittaus	8
3.4	Lentotyö	9
3.4.1	Lentosuunnitelma	9
3.4.2	Lennätys	10
4	Jälkiprosessointi	11
4.1	Valokuvien jälkikäsittely	11
4.2	Agisoft Metashape Pro	12
4.2.1	Fotogrammetrisen pistepilven laskenta	12
4.2.2	Ortokuvamosaiikin prosessointi	16
5	Aineistojen vertailu	19
5.1	Referenssiaineisto	19
5.2	Vertailun tulokset	20
5.2.1	Tasomaiset kohteet	21
5.2.2	Tien reunakivet	22
5.2.3	Tukimuurit	23
5.2.4	Katosrakennukset ja meluaita	25

6	Pohdinta	28
	Lähteet	29
	Liitteet	
	Liite 1. Agisoft Metashape -raportti	
	Liite 2. Tulosten yhteenveto	

Lyhenteet

UA	Unmanned Aircraft, miehittämätön ilma-alus.
UAV	Unmanned Aerial Vehicle, käytöstä poistuva lyhenne, tilalle tulee UA (ks. edellä)
RPA	Kauko-ohjattu ilma-alus, miehittämätön ilma-alus jota ohjataan etänä.
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System, miehittämätön ilma-alus, sekä sen etä-ohjauksen edellyttämät järjestelmät.
Drooni	Drooni, käytössä oleva ilmaisu etäohjatulle miehittämättömälle laitteelle.
lennokki	Lentämään tarkoitettu laite, jonka mukana ei ole ohjaajaa ja jota käytetään harraste- tai urheilutarkoitukseen.
GSD	Ground Sampling Distance. Termillä tarkoitetaan digitaalisen valokuvan pikselien keskipisteiden väliä kuvatussa kohteessa.

1 Johdanto

Miehittämätön ilmailu on kasvattanut suosiotaan huomattavasti viime vuosina. Kehitystä on tapahtunut niin kuluttajapuolella kuin ammattikäyttöön suunnatuiden laitteiden kohdalla. Drooneilla kuvataan urheilu- ja muita yleisötapahtumia, kuljetetaan paketteja asiakkaille ja käytetään rajavalvonnassa. Käyttötarkoituksia on laidasta laitaan, ja kehityvälle tekniikalle käyttötarkoituksia löydetään jatkuvasti lisää.

Tämän työn tavoitteena on tutkia valokuvauskameralla tuotetun fotogrammetrisen pistepilven korkeustarkkuutta. Valokuvista fotogrammetrisellä prosessoinnilla tuotetun pistepilven ja ortokuvien tarkkuutta on aiemminkin tutkittu, mutta tutkimukset ovat keskittyneet aineiston tarkkuuteen tasaisilla pinnoilla. Tasaisilla kohteilla menetelmä on myös todettu riittävän tarkaksi yleisimpiin kartoitustehtäviin, kunhan ilmakuvauksia ja siihen liittyvät alustavat työt suoritetaan huolellisesti.

Asemakaavan pohjakartan kartoituksessa on otettava huomioon, että maastossa on paljon kohteita, jotka eivät ole muodoltaan tasaisia pintoja. Maastomittausyksikön aiemmin toteuttamien ilmakuvauksiprojektien perusteella on havaittu, että luotettavan korkeuskoodinaatin määrittäminen korkeampia kohteita kartoittaessa, kuten aidat ja rakennukset ja varsinkin niiden reunat voi olla haastavaa. Tässä työssä keskitytään tutkimaan fotogrammetrisesti tuotetun pistepilven korkeuden tarkkuutta ja luotettavuutta tasaiselta pinnalta poikkeavia kohteita mitattaessa. Työssä selvitetään kuinka pistepilvi käyttäytyy korkeiden kohteiden reunoilla ja kuinka prosessoinnin eri vaiheet voivat mahdollisesti vaikuttaa aineistolla suoritettavan mittauksen tarkkuuteen.

2 Miehitämätön ilmailu

2.1 Yleisesti

Miehitämättömän ilmailun sanasto ja termit ovat olleet jatkuvassa muutoksessa viimeisten vuosien ajan. Yksinkertaisimmillaan miehitämätön ilmailu on pienikokoinen ilman lisättyä voimanlähdettä toimiva lennokki. Toisaalta miehitämättömään ilmailuun kuuluvat myös sotilaskäytössä olevat suuret miehitämättömät alukset. Käytössä olevien laitteistojen laaja kirjo on aiheuttanut suuren määrän termistöä, joka päivittyy samalla alan kehittymisen kanssa. Uudelle alalle muodostuva lainsäädäntö tuo myös mukanaan uusia termejä ja tuleva EU-lainsäädäntö tekee tähän myös osansa. Jatkossa tullaan käyttämään UA-laitteita UAV-laitteiden sijaan, ja nykyisesti käytössä oleva erottelu RPA:n (kauko-ohjattu ilma-alus) ja lennokin välillä tulee poistumaan. (5) Termeistä RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) kuitenkin pitää paikkansa jatkossakin. RPAS-laitteisto on miehitämättömän ilma-aluksen lennättämiseen rakennettu kokonaisjärjestelmä, joka koostuu miehitämättömästä ilma-aluksesta, sen ohjaimesta, ohjaus- ja seurantayhteyksistä sekä kauko-ohjauspaikasta. (1)

RPAS-toimijoita oli vuoden 2019 syyskuussa Traficomien keräämien tilastojen mukaan Suomessa vähän alle 2 800 kappaletta. Käyttötarkoituksia samoissa tilastossa oli kerätty yli 20, laivojen päästömittauksista valokuvaukseen ja kartoittamiseen. (6)

2.2 Lainsäädäntö: Ilmailumääräys OPS M1-32

Lainsäädäntö miehitämättömän ilmailun saralla on jatkuvassa muutoksessa. Pitkään valmisteltu EU:n drooniasetus tulee Suomessa sovellettavaksi vaiheittain siirtymäaikojen puitteissa. Ensimmäinen siirtymäaika päättyy 1.7.2020, jolloin astuvat voimaan uudet säännöt lentotoiminnalle, laajemmat rekisteröintivelvoitteet, koulutusvaatimukset piloteille, uusi maksimilentokorkeus 120 m sekä uusi riskinarvointimenettely vaativammalle toiminnalle. (1)

Lentotyö suoritettiin syksyllä 2019, jolloin voimassa oleva lainsäädäntö perustui Liikenteen turvallisuusvirasto Trafín 7.12.2018 voimaan tulleeseen ilmailumääräykseen Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lennättäminen (OPS M1-32).

Ilmailusäännös OPS M1-32 määrää miehittämättömän ilma-aluksen massan, riippuen lennätysalueesta. Tässä tapauksessa lennätettiin asutuskeskuksen tiheästi asutun osan ulkopuolella, eikä alue sijainnut valvotun ilmatilan sisällä. Tällöin noudatimme ilmailumääräyksen seuraavia kohtia:

3.1.11 Käytettäessä kauko-ohjattua ilma-alusta alueella, jota ei ole kielletty muulta ilmailulta tai kauko-ohjatun ilma-aluksen lentämistä varten erotettu, on noudatettava seuraavia ehtoja, ellei Liikenteen turvallisuusvirasto ole myöntänyt poikkeusta tämän määräyksen 5 kohdan mukaisesti:

a) Kauko-ohjatun ilma-aluksen lentoonlähtömassa saa olla enintään 25 kg. Lentoonlähtömassaan ei lasketa ilma-alukseen kiinnitettävää pelastuslaitetta.

b) Käytön on oltava näköyhteyteen tai avustettuun ilmatilan tarkkailuun perustuvaa toimintaa. Kauko-ohjatun ilma-aluksen on oltava koko ajan ohjattavissa ja sitä on lennättävä vallitsevan sään ja valoisuuden huomioon ottaen riittävän lähellä kauko-ohjaajaa tai kauko-ohjaustähystäjää niin, että muu ilmaliikenne ja toimintaan liittymättömät henkilöt voidaan havaita ja kyetään arvioimaan väistämistarve luotettavasti.

c) Käytettäessä kauko-ohjaustähystäjää on kauko-ohjaajalla ja kauko-ohjaustähystäjällä oltava yhteydenpitoaan varten luotettava viestintäväline, mikäli suora puhe-yhteys ei ole mahdollinen.

d) Lentokorkeuden on oltava alle 150 metriä maan tai veden pinnasta. Korkeusrajoitus ei koske kiinteän esteen läheisyydessä tapahtuvaa lentämistä kohteen omistajan luvalla. Korkeusrajoitus ei koske myöskään lentämistä ilmailutiedotusjärjestelmässä julkaistuilla lennokkien lennätyspaikoilla tai kohdan 3.1.12. e) mukaista sovittua lentotoimintaa. (2)

2.3 Laitteisto

2.3.1 GeoDrone X4L v5

Käytössämme oleva RPAS-laitteisto on suomalaisen VideoDrone Finland Oy:n valmistama GeoDrone X4L v5 (kuva 1). GeoDrone X4L v5 on tuotesarjan viides ja toistaiseksi tuorein versio. Uuden version huomattavia ominaisuuksia on parannettu tuulenkestävyys sekä mahdollisuus täysin itsenäisesti suoritettavaan maasta maahan -lentotehtävään.

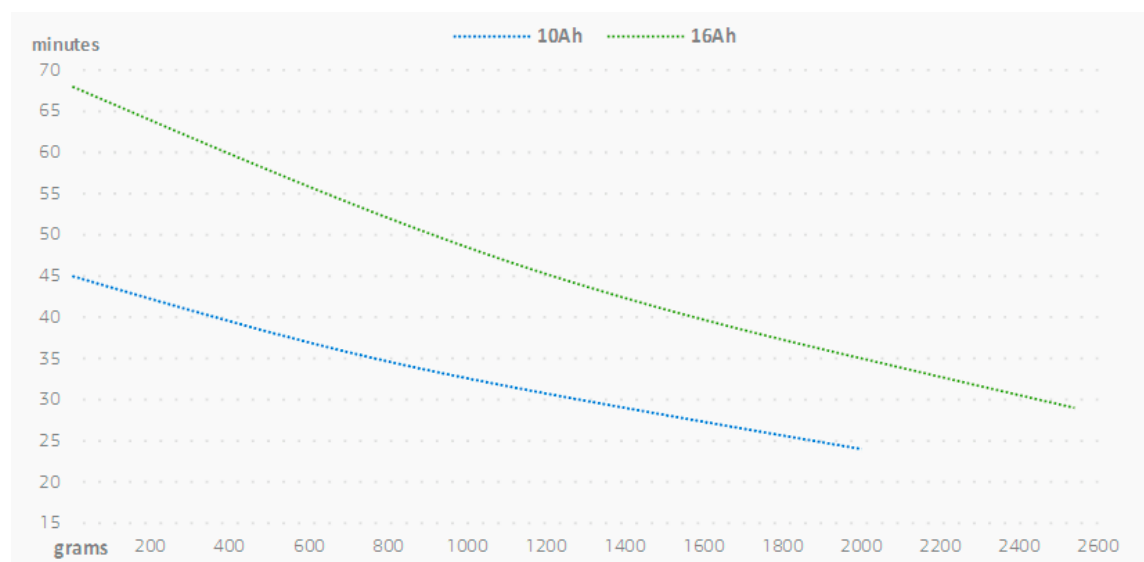


Kuva 1. GeoDrone X4L v5.

Laitteiston runko on rakennettu hiilikuidusta. Runko itsessään on kooltaan 58 cm x 58 cm ja painaa 0,5 kg. Laitteiston tyhjäpaino on 2 kg, ja normaali lentoonlähtömassa on n. 5 kg. Kopteri on suunniteltu toimimaan -10...+40 °C:n lämpötiloissa ja maksimi tuuliraja lennätysten aikana on 15 m/s. Virtalähteenä kopterille sekä hyötykuormalle toimii litiumpolymeeriakku. (3)

Käytössä oleva hyötykuorma on Sony RX1 RII -järjestelmäkamera. Kamera on asetettu 2-akseliseen gyrostabiloituun kameratelineeseen. Virransyöttö kameraan ja kameratelineeseen tulee kopterin akusta. Kokonaisuudessaan hyötykuormaksi laskettava kamera sekä kamerateline painavat 1160 g. Kamera sisältää 42,4 megapikselin täyden koon Exmor® CMOS -kennon. Objektiivi on Zeiss® Sonnar T 35 mm F2 -laajakulmaobjektiivi. Kameralla saavutettava maastopikselin koko (GSD) tyypillisissä lentokorkeuksissa on 1.3 cm 100 m ja 2 cm 150 m korkeudessa. (4)

Valmistaja lupaa laitteiston lentoajaksi jopa 68 minuuttia ilman hyötykuormaa ja hyvissä sääolosuhteissa. Riippuen käytössä olevan ajoakun kapasiteetista ja käytössä olevasta hyötykuormasta saadaan laitteiston ennakoitu lentoaika kuvan 2 kuvaajasta. Käytössä olevalla ajoakulla (16 Ah) ja hyötykuormalla (1 160 g) saadaan maksimilentoajaksi noin 45 minuuttia. (Kuva 2.)

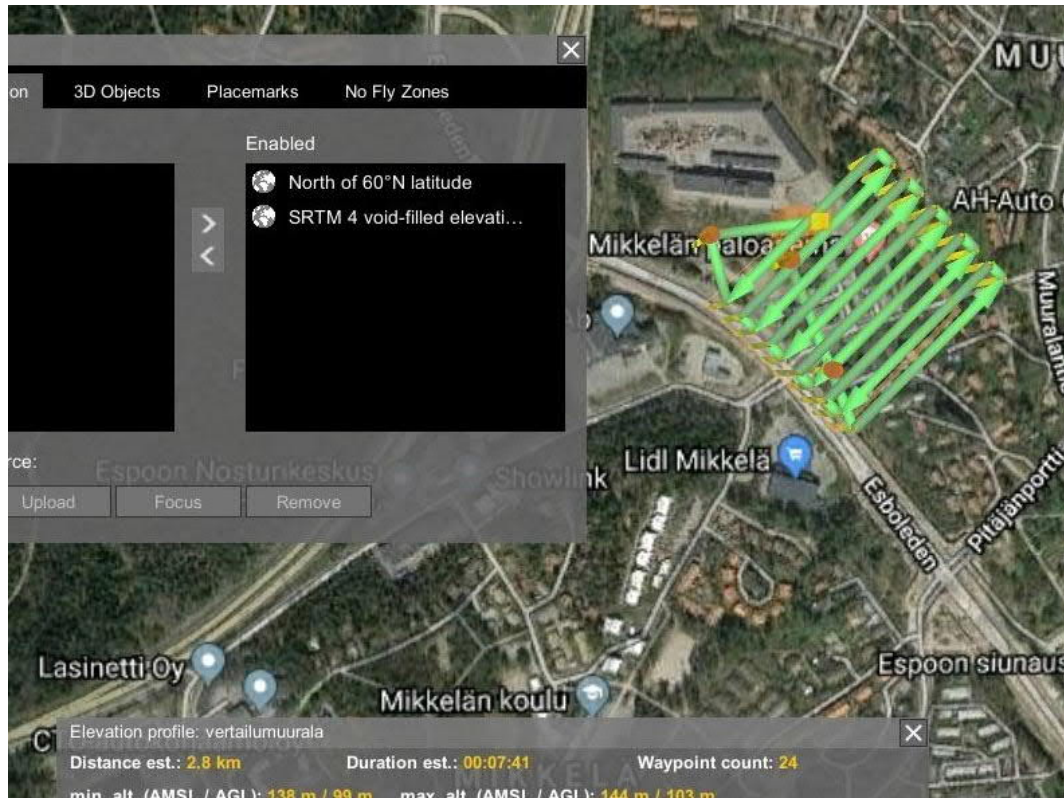


Kuva 2. GeoDrone X4L v5:n lentoajat eri hyötykuormilla (3).

Yhdellä lennolla kuvattavan alueen pinta-ala riippuu lentokorkeudesta ja -nopeudesta sekä kuvien sivuttaispeitosta. Haluttu GSD määrittää lentokorkeuden, esimerkiksi 100 m:n korkeudella maanpinnasta suoritettu kuvauslento tuottaa 1,3 cm:n GSD:n.

2.3.2 Videodrone Ground Station

GeoDronen lentojen suunnitteluun käytetään VideoDrone Ground Station -sovellusta. Ground Stationia voidaan käyttää myös lennon reaaliaikaiseen seurantaan ja halutessa myös lennon aikaisten komentojen lähettämiseen.



Kuva 3. Ground Station -lennonsuunniteluohjelmisto.

Ground Stationissa lennot suunnitellaan karttapohjalle asettamalla kuvausalueen geometria haluttuun kohteeseen. Tämän lisäksi voidaan asettaa haluttuja reittipisteitä, joiden kautta kopterin halutaan lentävän ennen ja jälkeen kuvaustehtävän. Ohjelmistolle määritetään haluttu kuvausalueen geometria, kuvien pituus- ja sivuttaispeitto, kopterin lentonopeus sekä haluttu GSD. Tietojen avulla ohjelmisto laskee kuvaustehtävän reittipisteiden koordinaatit, reitin lentokorkeuden sekä arvioidun lentoajan ensimmäisestä reittipisteestä viimeiseen. Lentokorkeuden laskemiseen ohjelmisto käyttää taustalla olevaa maanpintamallia. (Kuva 3.)

Kohdealue täytti kaikki kriteerit kohtuullisen hyvin. Kasvustoa on, mutta tärkeät kohteet ovat hyvin näkyvissä ilmakuvista. Alue sijaitsee asuinalueen reunalla, mutta riski sivullisille jäi vähäiseksi lennätyksen aikana. Alue sisältää useita erilaisia vertailuun kelpaavia kohteita, kuten tien reunakiviä, tukimuureja, rakennuksia sekä korkean meluaidan.

3.2 Pisterungon rakentaminen

Alueelle rakennettavan pisterungon tarkoituksena on sitoa valokuvista tuotettu ortokuva-mosaiikki sekä fotogrammetrinen pistepilvi paikalliseen koordinaatistoon. Käytetty koordinaattijärjestelmä on EUREF-FIN, tasokoordinaatisto ETRS-GK25 sekä korkeusjärjestelmä N2000.

Pisterungon tulisi toimia lähtöpisteinä niin fotogrammiselle pistepilvelle, mutta myös vertailuaineiston mittausta varten. Runkoa suunniteltaessa harkittiin olemassa olevien runkopisteiden käyttämistä lähtöpisteinä. Lähialueen runkoverkko oli kuitenkin melko vanha ja useimmilla pisteillä ei ollut mitattua N2000-korkeutta. Runkoverkko toteutettiin VRS-RTK-mittauksella, käyttäen jokaisella pisteellä kahta 45 sekunnin havaintojakson keskiarvoa. Runkoon rakennettiin viisi runkopistettä, joista neljä sijaitsi kuvattavan alueen nurkissa ja yksi sen keskellä. Nämä runkopisteet toimivat lähtöpisteinä ilmakuvien jälki-prosessoinnissa sekä vertailuaineiston mittauksessa käytettyjen takymetrimittauksen vapaiden asemapisteen lähtöpisteinä. Runkopisteet merkittiin maastoon asfalttinauloilla, joiden sijainti näkyvöitettiin maaliristillä.

3.3 Vertailuaineiston mittaus

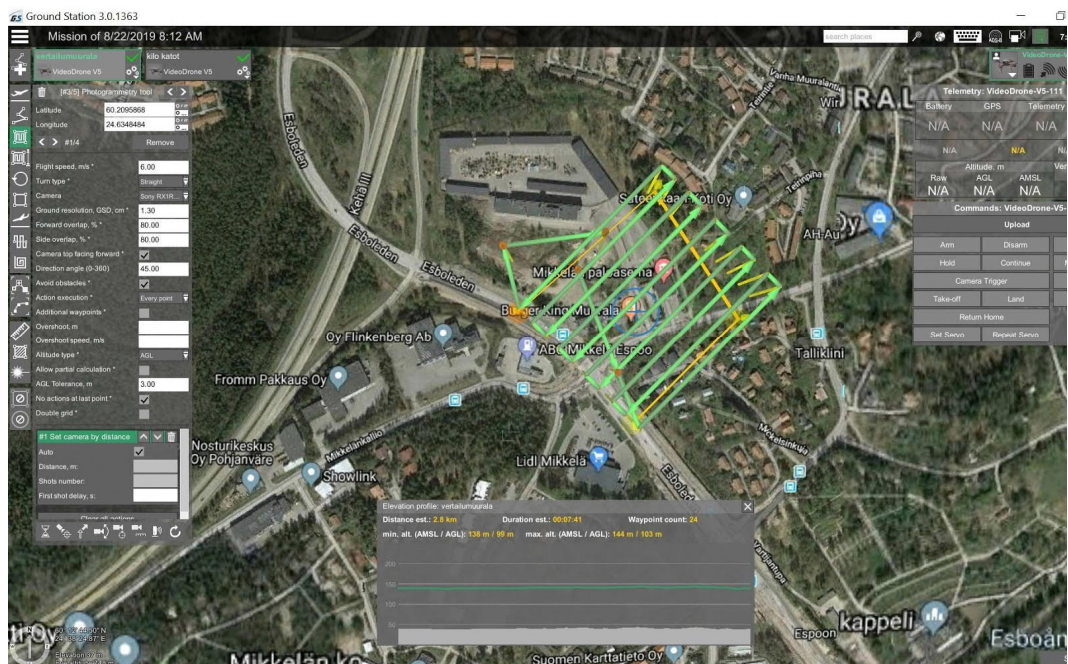
Työn vertailuaineisto mitattiin takymetrimittauksella käyttäen asemapisteen lähtöpisteinä aiemmin mitattuja VRS-RTK-runkopisteitä. Kaikkia alueen kohteita ei ollut mahdollista havaita yhdeltä vapaalta asemapisteeltä. Asemapisteen määrä pyrittiin kuitenkin pitämään mahdollisimman vähäisenä, jotta takymetrin asemoinnissa tapahtuvien virheiden vaikutus vertailuaineistoon saatiin minimoitua. Jokaisen asemapisteen asemoinnissa käytettiin kolmea runkopistettä.

Koska työn tarkoituksena on korkeustarkkuuden tutkimisen lisäksi havainnoida, voidaan menetelmää käyttää kaavan pohjakartan laatimiseen. Kartoitustyö tehtiin Espoon maastomittausyksikön kaavapohjan kartoitusohjeiden mukaisesti. Ohjeistus perustuu JHS185 Asemakaavan pohjakartan laatiminen -ohjeistukseen.

3.4 Lentotyö

3.4.1 Lentosuunnitelma

Lentosuunnitelman tekemiseen käytettiin VideoDrone Ground Station -ohjelmistoa. Suunnitelma tehtiin kattamaan työalue kokonaisuudessaan yhdellä lennolla. Alue oli kooltaan n. 5 hehtaaria, mikä mahdollistaa alueen kattamisen yhdellä lennolla ilman kopoterin maksimaalisen lentoajan käyttämistä. Tämä antaa paljon liikkumavaraa lentosuunnitelmaa tehdessä.



Kuva 5. Lentosuunnitelma Ground Stationissa.

Kuvattavaa aluetta venytettiin kattamaan rakennettuja signaaleja suurempi alue. Aluetta venyttämällä tavoitellaan parempaa kuvien peittävyttä kohdealueen reuna-alueella.

Kuvattavan alueen lisäksi suunnitteluohjelmistolle annettiin reittipisteet ennen ja jälkeen kuvaustehtävän. Näiden reittipisteiden avulla vaikutetaan missä järjestyksessä kopteri lähtee suorittamaan kuvaus tehtävän reittipisteitä. Toisin sanoen lisätyillä reittipisteillä määritetään mistä nurkasta kuvaustehtävä aloitetaan. Lisäksi asettamalla reittipisteet mahdollisimman lähelle suunniteltua lentoa lähtöpaikkaa saadaan paras mahdollinen arvio lentoajasta.

Kopteri asetettiin lentämään 100 metrin korkeudella maan pinnasta. Lopputulokseksi saadaan GSD-arvo 1,3 cm. Kuvien pituus- ja sivupeitoksi asetettiin 80 %. Näiden parametrien kanssa ohjelmisto laski kuvausalueella otettavien kuvien määräksi 165 kpl, ja reittipisteitä lennolle muodostui 24 kpl. Suunnitellun reitin lentoajaksi ohjelmisto arvioi 7 minuuttia ja 41 sekuntia. (Kuva 5.)

3.4.2 Lennätys

Lennätys suoritettiin vuoden 2019 elokuussa, hyvissä olosuhteissa. Lentoa lähtö- ja laskeutumisaikaksi valittiin lennätysalueella oleva tasainen hiekkapohjainen läjitysalue. Kyseinen kohta on rauhallinen, poissa alueella olevan liikenteen tieltä ja ilman välitöntä riskiä sivullisten paikalle tulosta. Lennätyspaikan näkyvyys koko lentoalueelle oli hyvä, eikä 100 m:n korkeudessa lentävän kopterin ja lennättäjän välissä ollut näköesteitä. Suurin alueella oleva riskitekijä lennättämiselle on noin 3 kilometrin päässä sijaitseva Jorvin sairaala sekä sinne liikkuvat sairaalahelikopterit. Näkyvyys lähi-ilmatilaan oli kuitenkin tarpeeksi hyvä, että lähestyvät ilma-alukset pystyttiin havaitsemaan ajoissa tarvittavien toimenpiteiden arviointia varten.

Lentotehtävä suoritettiin ilman poikkeamia normaalista. Kokonaislentoaika oli odotetusti lennonsuunnitteluohjelmiston laskemaa kokonaisaikaan muutaman minuutin pidempi, sillä ohjelmisto ei ota huomioon kopterin nousuun ja laskeutumiseen tarvittavaa aikaa. Lopputuloksena lennosta saatiin 165 valokuvaa sekä laitteiston tallentamat sijaintitiedot kuville.

4 Jälkiprosessointi

4.1 Valokuvien jälkikäsitely

Lentotehtävän jälkeen prosessoitavat valokuvat ladataan tietokoneelle. Valokuvatiedostojen lisäksi GeoDrone X4L tallentaa laitteen sisäiseen muistiin kopterin inertialaitteiston omega-, phi- ja kappakallistustiedot, kopterin karkean sijainnin WGS84-koordinaatissa, kopterin korkeuden maan- ja merenpinnasta sekä kopterin suuntakulmat jokaiselle otetulle valokuvalla tekstitiedostona. (Kuva 6.)

VDLG12.DAT - Muistio

Tiedosto: Muokkaa Muotoile Näytä Ohje

IMAGE LOG FILE VDLG12.DAT (V3AB_PH, 30)

=====

Coordinate system WGS84.

M=Manual photo, A=In Flight Photo, C=Camera Photo, T=Timer Photo, P=Timer POI

GPS sync at : date:22.08.2019 time:07:52:09

Image	Time	Type	Sat	Latitude	Longitude	Alt_B	Alt_G	Pitch	Roll	Yaw	Tilt
1	07:53:51	A	16	60.21034650	24.63660940	+0.0	+39.9	+0.9	+0.0	+58.4	-89.9
2	07:57:35	A	20	60.20848370	24.63759000	+99.4	+139.5	-1.8	+0.0	+46.1	-90.0
3	07:57:37	A	20	60.20856400	24.63776540	+99.4	+139.4	-0.9	+0.0	+43.1	-89.9
4	07:57:40	A	20	60.20864610	24.63793560	+99.3	+139.4	-2.0	+0.0	+41.7	-89.9
5	07:57:43	A	20	60.20875450	24.63815270	+99.2	+139.2	-2.5	+0.0	+41.8	-89.9
6	07:57:44	A	20	60.20881990	24.63828240	+99.1	+139.1	-2.4	+0.0	+41.8	-89.9
7	07:57:47	A	20	60.20890870	24.63845550	+98.9	+139.0	-0.6	+0.0	+43.1	-89.9
8	07:57:49	A	20	60.20900080	24.63863800	+98.8	+138.9	-2.0	+0.0	+43.7	-89.9
9	07:57:52	A	20	60.20908900	24.63881260	+98.7	+138.8	-1.5	+0.0	+43.7	-89.9
10	07:57:54	A	20	60.20917540	24.63898340	+98.6	+138.7	-2.0	+0.0	+44.2	-89.9

Kuva 6. Inertialaitteiston tallentamat kuvien koordinaatti- ja kallistustiedot.

Ennen prosessoinnin aloittamista valokuville tulee määrittää karkeat sijainti- ja kallistustiedot. Tämä voidaan toteuttaa kahdella tavalla. GeoDronen paketissa tulee kuvien jälkiprosessointiohjelma, jonka avulla kopterin muistista ladattavan inertialaitteiston -.log-tiedoston tiedot voidaan siirtää valokuvien -EXIF-dataan. Näin siirtäessä valokuvia fotogrammetriseen jälkiprosessointiohjelmaan kuvien sijaintitiedot ovat valmiina valokuvien metatiedoissa eikä tietoa tarvitse jälkikäteen esittää jälkiprosessoinnin aikana. Toinen tapa on esitellä kuvien sijaintitiedot fotogrammetriselle prosessointiohjelmalle ja yhdistää tiedot valokuville ennen pistepilven prosessointia. Tämä vaatii kopterista tallennetun tekstitiedoston muokkaamista käytössä olevan prosessointiohjelman ymmärtämään muotoon. Molemmat tavat ovat käytännössä toimivia.

4.2 Agisoft Metashape Pro

4.2.1 Fotogrammetrisen pistepilven laskenta

Agisoft Metashape on Agisoft LLC:n kehittämä fotogrammetrisen prosessoinnin ohjelmistopaketti. Agisoft sisältää työkaluja valokuvilta tuotettavaan 3D-mallintamiseen, visualisointiin sekä mittaamiseen ja kartoittamiseen. (8)

Aineiston prosessointi jakaantuu kuuteen vaiheeseen. Kuva-aineiston esittely ohjelmistolle, aineiston prosessointi kuvausbloiksi, runkopisteiden tunnistaminen, tiheään pistepilven laskeminen, 3D-pintamallin laskenta ja lopuksi ortokuvamosaiikin luonti.

Pistepilven laskenta aloitetaan tuomalla projektissa käytettävät valokuvat Agisoft Metashapeen. Jos valokuvat sisältävät kuvauksen yhteydessä mitatut karkeat sijaintitiedot, ei niitä tarvitse tässä vaiheessa erikseen tuoda. Tässä tapauksessa kuvien karkeat sijaintitiedot olivat valokuvien -EXIF-tiedoissa. (9, s. 2.)

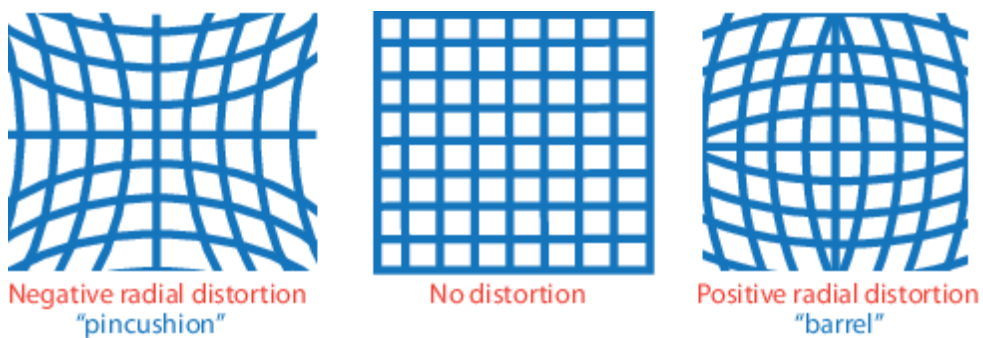
Seuraavaksi muodostetaan harva pistepilvi, joka muodostetaan ohjelmiston löytämistä vastinpisteistä vertaamalla valokuvia keskenään. Tässä vaiheessa voidaan käyttää lennätysvaiheessa kerättyjä kuvien karkeita sijaintitietoja vastinpisteiden etsinnän nopeuttamiseksi, jolloin ohjelmisto keskittyy vertailemaan vierekkäisten kuvia keskenään. Ilman sijaintitietoja ohjelmisto vertaa kaikkia projektiin tuotuja kuvia keskenään ja prosessointiaika kasvaa huomattavasti. Prosessoinnin aikana lasketaan myös kuville karkea ulkoinen orientointi eli kuvien sijainti- ja asentotiedot. (9, s. 4.)

Kuvausblokki sidotaan käytössä olevaan koordinaatistoon maastossa mitattujen runkopisteiden avulla. Runkopisteen "signaalit" tunnistetaan niiltä valokuvilta, joissa ne ovat näkyvissä. Runkopisteiden koordinaatit esitellään ohjelmistolle tekstitiedostona. Kuville lasketun orientoinnin avulla ohjelmisto määrittää, miltä kuvilta tuodut runkopisteiden koordinaatit löytyvät. Ohjelmisto tarjoaa runkopisteitä sisältävät kuvat operaattorille, ja operaattorin tehtäväksi jää siirtää ohjelmiston arvioimat liput mahdollisimman keskelle kovalta havaittavaa runkopistettä. (Kuva 7.)



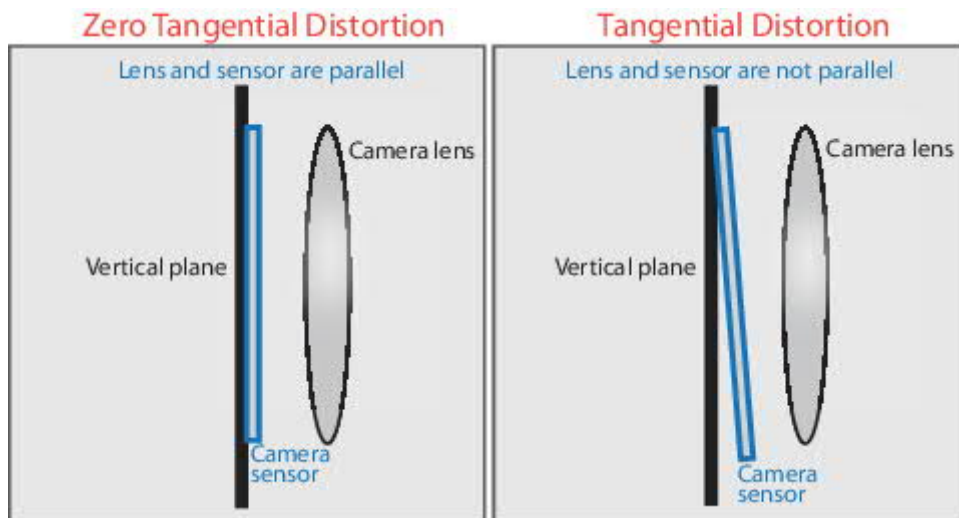
Kuva 7. Runkopisteen asemointi Agisoft Metashapessa.

Ohjelmisto käsittelee annettuja runkopisteiden sijainteja oikeina annetun mittaustarkkuuden rajoissa. Valokuvien sijainti ja asento lasketaan runkopisteiden esittelyn jälkeen uudestaan optimoimalla kuvien orientointi. Orientoinnin optimoinnissa Agisoft määrittää kameralle ja käytetylle linssille polttovälin, pääpisteen sijainnin, radiaalivääristymän kertoimet $K1$, $K2$, $K3$ sekä tangentialivääristymän kertoimet $P1$ ja $P2$.



Kuva 8. Kameran linssin radiaalivääristymät (11).

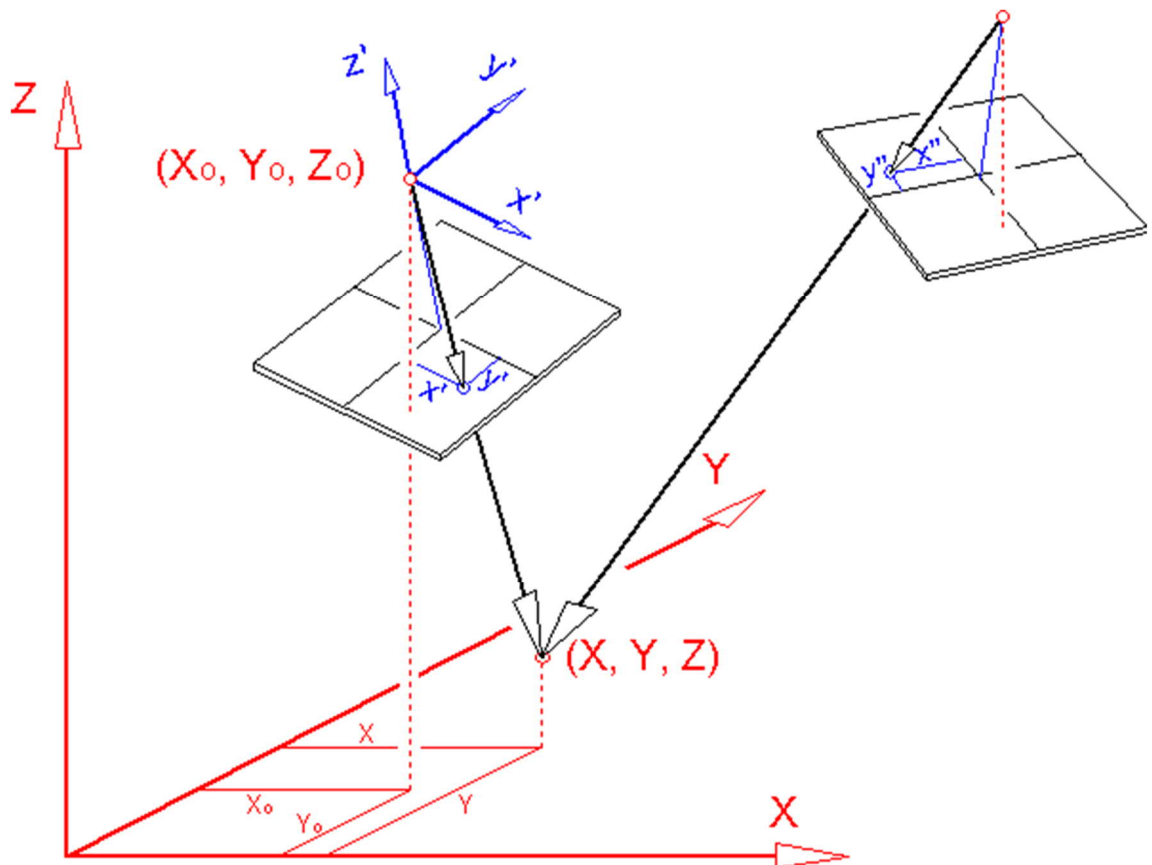
Radiaalivääristymät syntyvät valonsäteiden taittuessa enemmän linssin reunoilla verrattuna linssin optiseen keskusta. Tangentiaalivääristymät muodostuvat kameran linssin ja sensorin ollessa vinossa suhteessa toisiinsa. (Kuva 8.) (9, s. 6; 10, s. 26; 11.)



Kuva 9. Kameran linssin tangentiaalivääristymä (11).

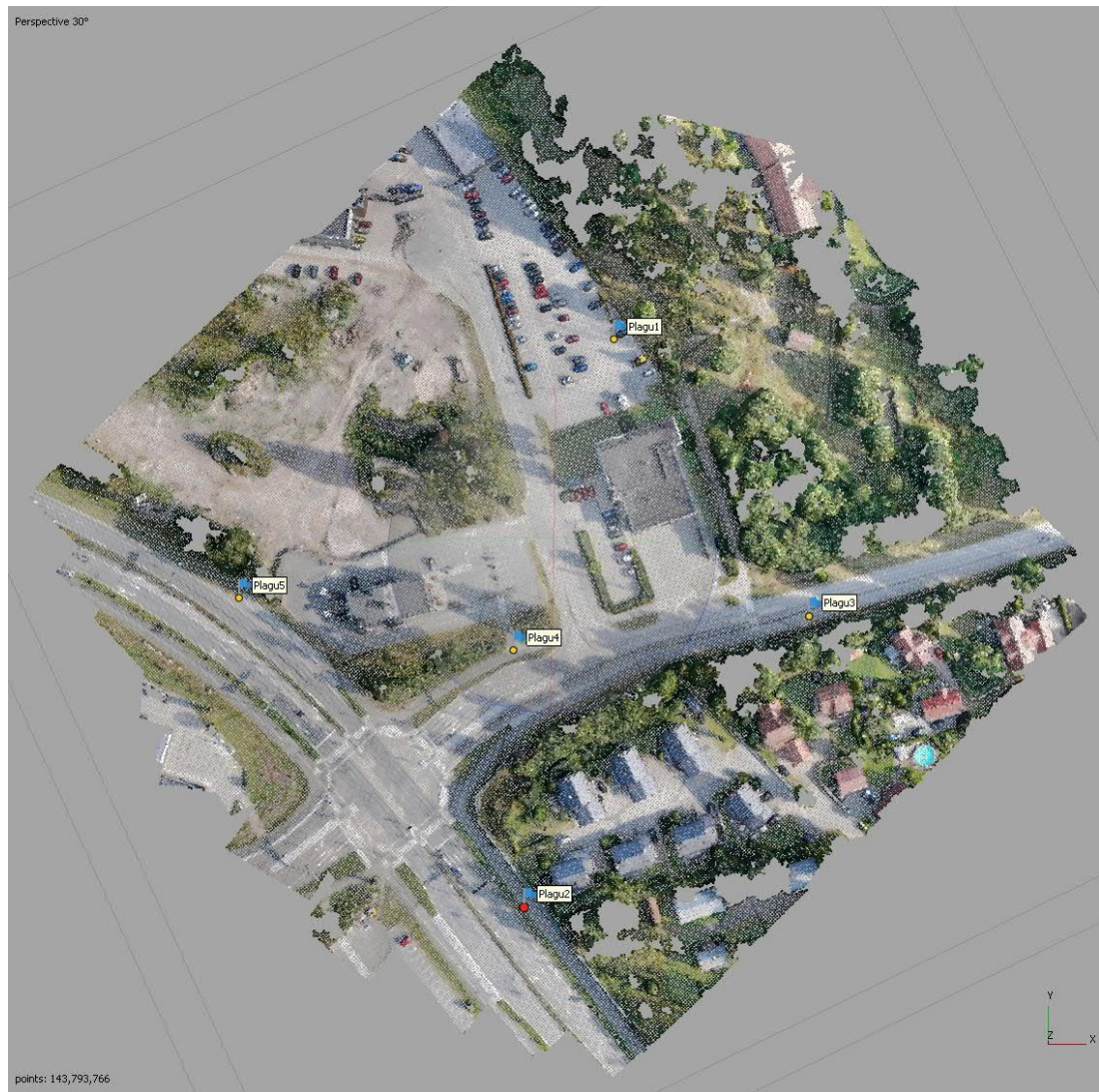
Optimoinnissa määritettyjen kameran linssikorjausten (liite 1, s. 3) avulla ohjelmisto laskee uudelleen kuvien ulkoisen orientoinnin.

Seuraavaksi lasketaan tiheä pistepilvi. Tiheän pistepilven laskennassa käytetään edellisissä vaiheissa laskettua ulkoista orientointia. Ohjelmisto laskee kuvilta automaattisesti havaittuja vastinpisteitä ja määrittää niille koordinaatit käyttämällä eteenpäinleikkausta kahdelta tai useammalta valokuvasta. (Kuva 10.)



Kuva 10. Eteenpäinleikkaus avaruudessa (12).

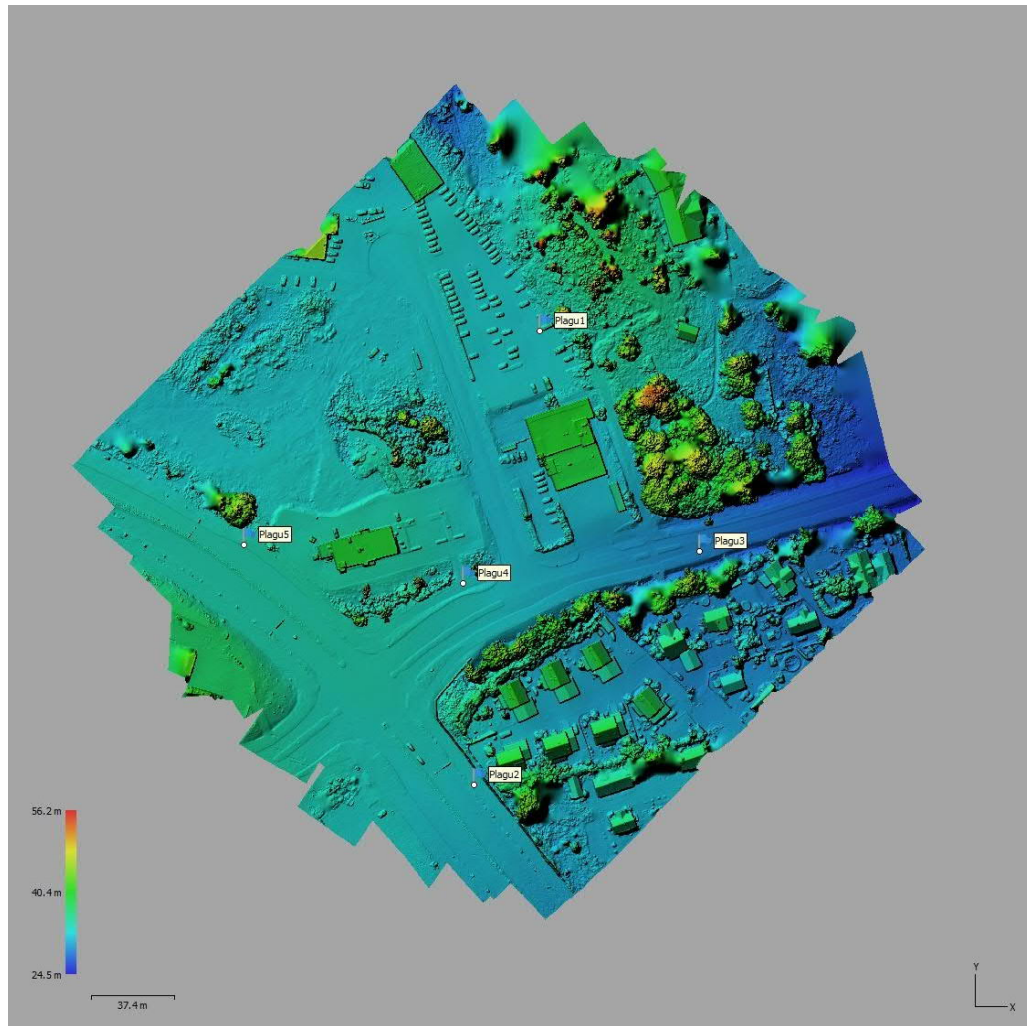
Lopputuotteena saatavan pistepilven tarkkuuteen vaikuttavat ulkoisen orientoinnin tarkkuuden lisäksi kuvien tarkkuus. Pistepilven prosessointia aloittaessa operaattori määrittää millä tarkkuudella alkuperäisiä valokuvia käytetään. Ultra high -tarkkuutta käytettäessä Agisoft käyttää prosessoinnissa alkuperäistä kuvien tarkkuutta. Jokainen askel heikompaa tarkkuutta kohti pienentää käytettyjä kuvia kertoimella 4 heikentämällä kuvan kumpaakin akselia kertoimella 2. Korkeampi tarkkuus vaikuttaa huomattavasti prosessointiin tarvittavaan aikaan, sillä mitä suurempi käytetty valokuvan resoluutio on, sitä tiheämpi pistepilvi laskennasta saadaan. Projektissa käytettiin high-tarkkuutta, joka on ohjelmiston toiseksi korkein tarkkuustaso. Prosessoinnin lopputuloksena tiheän pistepilven laskennassa muodostui 143 miljoonaa pistettä. (Kuva 11.)



Kuva 11. Tiheä pistepilvi Agisoft Metashapessa.

4.2.2 Ortokuvamosaiikin prosessointi

Ortokuvamosaiikin oikaisu tapahtuu Agisoftissa käyttämällä tiheästä pistepilvestä lasketua digitaalista korkeusmallia (DEM) tai Mesh-mallia. Molemmat menetelmät toimivat ortokuvamosaiikin oikaisussa. Digitaalinen korkeusmalli on kokemusperäisesti tuottanut ortomosaiikissa hieman paremman erotuskyvyn kohteissa, jossa kohde nousee jyrkästi maanpinnan tasosta. Tutkittavana olevat kohteet ovat pääasiassa maanpinnasta poikkeavia rakenteita, joten mosaiikin oikaisussa päädyttiin käyttämään digitaalista korkeusmallia. (Kuva 12.)



Kuva 12. Kuvasaineistosta muodostettu digitaalinen korkeusmalli.

Käyttämällä yllä olevaa digitaalista korkeusmallia ortokuvien oikaisuun saatiin lopputuloksena seuraavalla sivulla oleva ortokuvamosaiikki (Kuva 13).



Kuva 13. Ortokuvamosaiikki.

5 Aineistojen vertailu

Vertailtavat aineistot muodostettiin kartoittamalla testialueella olevia kohteita kahdella eri tavalla. Referenssiaineisto kartoitettiin perinteisenä takymetrimittauksena ja testiaineisto kartoitettiin 3D-Win-maastomittaus ohjelmistolla. Testiaineiston pohjana käytettiin Agisoftilla tuotettua ortokuvamosaiikkia sekä tiheää pistepilveä, josta laskettiin 3D-Winillä kolmioitu pintamalli. Pintamallin muodostamista varten tiheää pistepilveä jouduttiin prosessoimaan 3D-Winin pistepilven harvennustoiminnolla. Fotogrammetrisen pistepilven koko nousee korkealla tarkkuudella niin suureksi, ettei ohjelmisto pysty käsittelemään pistemäärää sujuvasti. Pistepilveä harvennettiin laskemalla pisteiden keskipisteiden keskimääräinen korkeus 0.1 m:n ruudun alueelta. Jos vierekkäisten ruutujen keskipisteiden korkeusero oli yli 0.05 m:n ruudun koko puolitettiin. Ruutujen puolittamista jatkettiin, kunnes vierekkäisten ruutujen korkeusero jäi alle määritetyn arvon. Jäljelle jääneet ruutujen keskipisteet muodostavat harvennetun pistepilven. Harvennettu pistepilvi kolmioitiin ja kolmioverkkoa käytettiin pintamallina, josta takymetrillä mitatuille pisteille määritettiin uusi korkeusarvo. Vertailua tehtiin pisteiden pintamallilta projisoitujen sekä alkuperäisten korkeusarvojen välillä.

Aineistojen vertailun yhteydessä testattiin ortokuvamosaiikilta suoritettavan digitoinnin toimivuutta kohteiden kartoittamiseen. Digitoitujen pisteiden korkeus määritetään vastaavasti pintamallilta.

5.1 Referenssiaineisto

Takymetrimittauksella tuotettu referenssiaineisto koostuu 1 136 pisteestä. Vertailussa aineisto on jaettu neljään ryhmään. Tasomaisia pisteitä vertailussa oli 398 kappaletta. Toinen ryhmä sisältää tien reunakiviä kuvaavia pisteitä. Näitä mitattiin aineistoon 522 kappaletta. Alueen keskellä olevalta parkkipaikalta mitatut tukimuurit muodostavat kolmannen ryhmän. Korkeat kohteet sisältävät mitattuja pisteitä paloaseman katoksen reunalta sekä alueen eteläreunalla kulkevan meluidan yläreunasta. Yhteensä korkeiden kohteiden pisteitä oli 23 kappaletta. (Taulukko 1.)

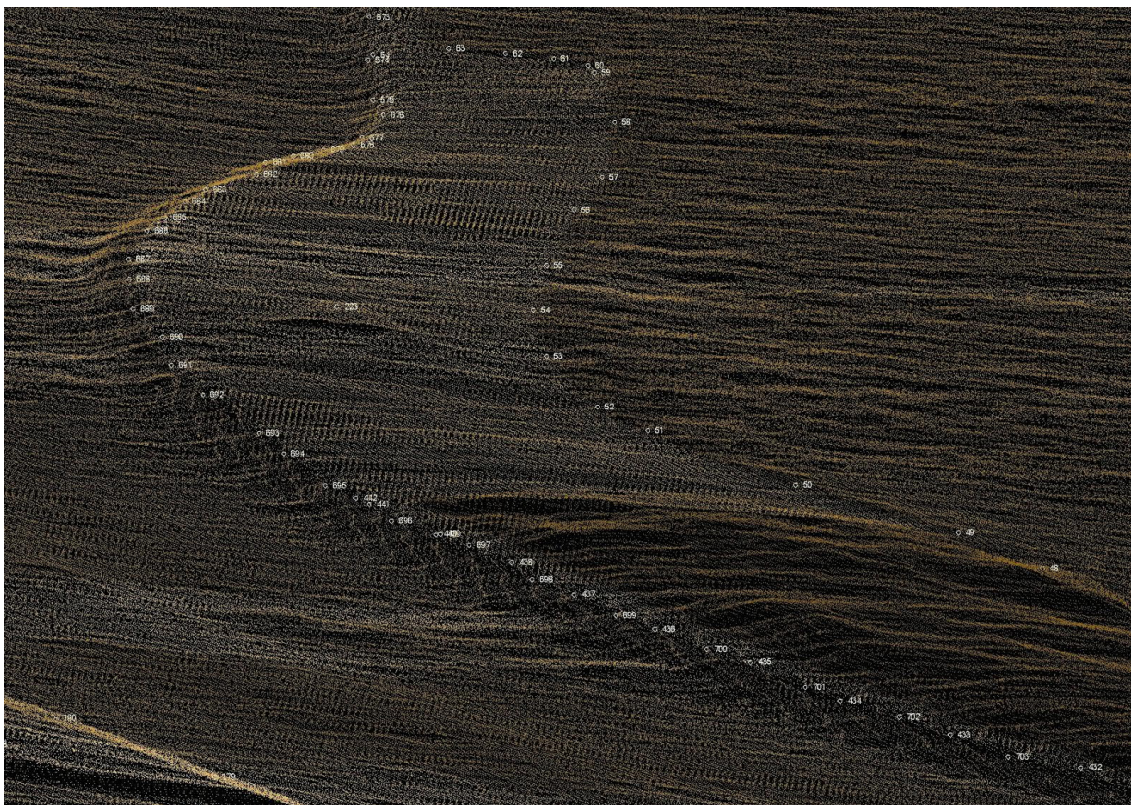
Taulukko 1. Vertailuaineistoon maastossa mitatut pisteet.

Luokka	Selite	Pistemäärä
Tasopisteet	Asfaltin pinta, kaivon kansi	398
Tien reunakivet	Tien reunakivet	522
Tukimuurit	Tukimuurit , < 0,5 m	31
Korkeat kohteet	Katoksen reuna, meluaita	23

5.2 Vertailun tulokset

Aiemmin suoritetuissa projekteissa on havaittu fotogrammetrisen pistepilven tarkkuuden vaihtelevan korkeudessa huomattavasti, riippuen kohteen geometriasta. Jos tutkitaan teräväreunaisesta ja korkeaa kohdetta kuvaavaa pistepilveä huomataan pistepilven usein pyöristävän kuvattavan kohteen reunaa. (Kuva 14.)

Tämän takia kaikille ei-tasomaisille kohteille valmistauduttiin tekemään vertailua kahdella tavalla. Vertailuun tehtäisiin alkuperäisestä maastomittauksesta saaduille pisteille kaksi projisointia pistepilvestä tuotetulle pintamallille. Ensimmäisessä tapauksessa mitatut pisteet projisoidaan suoraan pintamalliin, ilman muuta editointia. Toisessa tapauksessa mitattuja pisteitä siirrettäisiin 10 cm:n verran geometriassa sisäänpäin, ja projisoi- tiin pisteet pintamallille. Siirtämällä pisteitä kohteen reunalta sisäänpäin pienennetään mahdollisuutta projisoidun korkeuden osumista kohtaan, missä pistepilvi on muodostu- nut heikosti. Molemmissa tapauksissa tuotettua aineistoa verrattaisiin alkuperäisiin maastossa mitattuihin pisteisiin.



Kuva 14. Reunakiven kohdalle muodostunut pistepilvi.

5.2.1 Tasomaiset kohteet

Tasomaisten kohteiden vertailussa maastossa mitattujen pisteiden korkeus projisoitiin ilmakuvauksesta tuotetun pistepilven muodostamalle pintamallille. Näin saatuja pisteiden korkeuksia verrattiin maastomittauksen tuloksiin. Korkeuseron raja-arvona pidettiin 0,1 m:n eroa.

Taulukko 2. Tasomaisten kohteiden vertailu.

Pisteitä	398	%
Korkeusero > 0,1 m	2	0,005 %
Korkeusero < 0,1 m	385	99,995 %
Ei mitattavissa	11	0 %
Keskiarvo	0,026 m	-

Tasomaisia kohteita vertailussa oli 398 kpl. Raja-arvon ylittäneitä pisteitä oli yhteensä 13 kpl eli 3 % tasomaisten pisteiden määrästä. Näitä raja-arvon ylittäneitä pisteitä tarkastellessa huomataan pisteiden sijaitsevan kohdissa, missä niitä ei kuvaushetkellä nähdä esteettömästi valokuvilta. Visuaalisesti esteellisiä pisteitä raja-arvon ylittäneistä pisteistä löytyy 11 kpl. Nämä poistettuna laskennasta, yli 10 cm: korkeusvirheellä olevia pisteitä on tasomaisia kohteita kuvaavien pisteiden joukossa 2 kpl, eli 0,005 % aineistosta. Keskimäärin pistepilvestä muodostetusta pintamallista mitatut pisteet olivat 0,026 m maastomittauksen pisteiden yllä. Aineiston korkeuden tarkkuutta voidaan siis pitää hyvänä, kun kohteiden geometria on tasainen.

5.2.2 Tien reunakivet

Tien reunakivien vertailu suoritettiin kahdessa osassa. Ensin vertailu tehtiin kuten tasomaisten kohteiden vertailu. Pisteitä vertailussa oli yhteensä 522 kappaletta. Raja-arvon ylittäneitä pisteitä löytyi 93 kpl eli 17,8 % tien reunakiveä kuvaavista pisteistä. (Taulukko 3.)

Taulukko 3. Tien reunakivien vertailu.

Pisteitä	522	%
Korkeusero > 0,1 m	93	17,8 %
Korkeusero < 0,1 m	412	81 %
Ei mitattavissa	17	0 %
Keskiarvo	0.073 m	-

Tasossa siirrettyjen pisteiden korkeuksia vertaillessa nähdään eroja korkeuksissa verrattuna suoraan mittauskohdasta projisoituun korkeuteen. Siirrettyjen pisteiden joukossa oli korkeudessa raja-arvon alle jääviä pisteitä 501 kpl. Rajan yli menneistä 21 pisteestä 17 olivat visuaalisessa tarkastelussa huonosti valokuvilta näkyviä kohteita. Jäljelle jääneistä 505 mitatusta pisteestä 501, eli 99,21% alitti halutun 10 cm:n raja-arvon.

Taulukko 4. Tien reunakivien vertailu siirretyillä pisteillä.

Pisteitä	505	%
Korkeusero > 0,1 m	4	0,079 %
Korkeusero < 0,1 m	501	99,21 %
Ei mitattavissa	-	-
Keskiarvo	0,046 m	-

5.2.3 Tukimuurit

Tukimuurien vertailu suoritettiin myös kahdessa osassa, kuten reunakivien vertailu. Ensimmäinen vertailu maastossa mitattujen sekä näiden pintamallille projisoitujen pisteiden välillä. Lopputuloksena saatiin 37 pisteen aineistosta 8 kpl 0,1 m:n raja-arvon ylittävää tulosta. Visuaalisesti peitossa olevia kohteita ei ollut. (Taulukko 5.)

Taulukko 5. Tukimuuripisteiden vertailu.

Pisteitä	37	%
Korkeusero > 0,1 m	8	21,6 %
Korkeusero < 0,1 m	29	78,4 %
Ei mitattavissa	0	0 %
Keskiarvo	+0,069 m	-

Seuraavaa vertailua varten tukimuurista kartoitetuille pisteille haettiin pintamallin korkeus siirtämällä pisteitä 10 cm sisään tukimuurin reunalta. Näin vältetään kartoitettavan pisteen osuminen huonosti muodostuneen pintamallin kohdalle, jossa korkeustarkkuus on heikompi. Siirretyistä 37 pisteestä 0 pistettä ylitti tavoitteena olleen 0,1 m:n rajan. Keskiarvoltaan pisteiden korkeus erosi 1,9 cm maastomittauksella saaduista korkeusarvoista. (Taulukko 6.)

Taulukko 6. Tukimuurien vertailu siirretyillä pisteillä.

Pisteitä	37	%
Korkeusero > 0,1 m	0	0 %
Korkeusero < 0,1 m	37	100 %
Ei mitattavissa	-	0 %
Keskiarvo	0,019 m	-

Kuvasta 15 nähdään erot tukimuurin mitatuissa korkeuksissa. Kuvan vasemmassa osassa tarkemittauksen erot maastomittauksen ja pintamallin korkeuksissa, kun pintamallin korkeus mitattiin suoraan tukimuurin reunasta. Oikealla tarkemittauksen erot maastomittauksen ja pintamallin korkeuksissa, kun pintamallin korkeus mitattiin tukimuurin päältä 10 cm reunasta. (Kuva 15.)



Kuva 15. Tukimuurin tarkemittaukset.

Kuvasta nähdään tukimuurin reunasta mitatun pintamallin korkeuden eroavan maastomittauksen tulokseen tukimuurin eteläreunassa. Pohjoisreunalla korkeudet ovat kuitenkin hyvinkin lähellä toisiaan. Pistepilven tarkkuus tässä kohteessa siis parantui huomattavasti siirryessä kohteen reunalta sisäänpäin.

5.2.4 Katosrakennukset ja meluaita

Korkeampien kohteiden vertailussa toimittiin kuten aiemmissa vaiheissa. Seuraavalla sivulla oleva taulukko sisältää vertailun tuloksia. Tuloksista nähdään, että projisoitujen pisteiden tarkkuus ei yltänyt tavoitetulle tasolle. Pisteitä mitattiin 23 kpl, joista ainoastaan 2 kpl jäi alle 10 cm raja-arvon. Pisteistä 10 kpl jäi XY-tasossa meluidan ja katosten yläpinnoista luodun korkeusmallin ulkopuolelle, joten näille pisteille ei korkeutta pystytty mittaamaan. (Taulukko 7.)

Taulukko 7. Katosrakennusten ja meluidan vertailu.

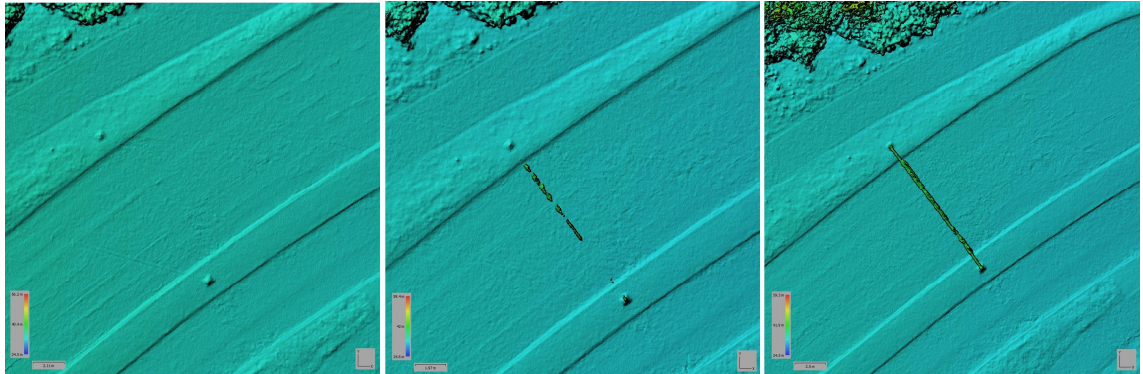
Pisteitä	23	%
Korkeusero > 0,1 m	11	47,8 %
Korkeusero < 0,1 m	2	8,7 %
Ei mitattavissa	10	43,5 %
Keskiarvo	-	-

Seuraavaksi pisteiden korkeus määritettiin keskemältä kohdetta. Tässä vertailussa kaikille pisteille saatiin määritettyä pintamallilta korkeusarvo. Pisteistä ainoastaan 3 kpl jäi raja-arvon alle. Pintamallilta määritetyt korkeudet olivat keskimäärin 0,154 m maastomittauksella tuotettua aineistoa ylempänä. (Taulukko 8.)

Taulukko 8. Katosrakennusten ja meluidan vertailu siirretyillä pisteillä.

Pisteitä	23	%
Korkeusero > 0,1 m	20	87,0 %
Korkeusero < 0,1 m	3	13,0 %
Ei mitattavissa	-	-
Keskiarvo	+0,154 m	-

Korkeampia kohteita tutkiessa huomataan, että prosessointivaiheessa tehdyt valinnat Agisoftin asetuksissa voivat vaikuttaa huomattavasti pistepilven muodostumiseen. Eniten korkeiden kohteiden muodostumiseen vaikuttaa ”depth maps” -asetus, joka määrittää, kuinka aggressiivisesti ohjelmisto karsii pistepilveen muodostuvia korkeusvaihteluita. Kuvassa 16 esimerkkinä työalueella oleva liikenteen opasterakenteen muodostuminen digitaaliseen korkeusmalliin depth maps -asetuksen ollessa aggressive, moderate tai mild. (Kuva 16)



Kuva 16. Depth maps aggressive/moderate/mild -asetuksen vaikutus digitaaliseen korkeusmalliin.

Kuvasta 16 nähdään asetusten vaikutus korkeiden kohteiden muodostumiseen, ja samalla niiden mittaustarkkuuteen. Tässä tapauksessa korkea ja kapea kohde ei muodostunut aggressive-asetuksella ollenkaan pistepilvestä muodostettuun korkeusmalliin. Keskellä olevassa kuvassa moderate-asetuksella nähdään pistepilven muodostavan rakenteen yläreunaan osittain, mutta hyvin epävarmasti. Mild-asetuksella lopputulos näyttää korkeusmallissa parhaalta.

Tilanne on vastaava vertailussa mukana olleen meluidan kohdalla. Pistepilvi muodostuu korkean ja kapean kohteen yläreunaan paremmin depth maps -asetuksen ollessa moderate tai mild. Vertailussa ei huomattu nähtävää eroa hyvin muodostuneiden osuuk-sien kesken, riippumatta depth maps-asetuksesta. Kaikissa tapauksissa meluidan yläreunan korkeus muodostui keskimäärin noin 15 cm maastomittauksella tuotettua aineis-toa korkeammalle.

Vertailun perusteella todettiin, että korkeiden kohteiden mittaaminen menetelmällä ei onnistu luotettavasti. Tarvitaan lisää testejä, jotta nähdään, voidaanko korkeustarkkuutta parantaa joko prosessoinnissa käytettävillä asetuksilla, tai voidaanko lopputulosta parantaa esimerkiksi suorittamalla kuvauslento matalammalla lentokorkeudella.

6 Pohdinta

Työssä tutkittiin GeoDrone X4L -laitteistolla otetusta kuva-aineistosta tuotetun fotogrammetrisen pistepilven korkeustarkkuutta erityyppisillä asemakaavan pohjakartan kohteilla. Testialueella olevat kohteet olivat geometrialtaan erityyppisiä, vaikka ne eivät sisältäneet kaikkia asemakaavan pohjakartalla olevia kohteita. Voidaan kuitenkin ajatella, että tuloksien perusteella pystytään näkemään, mitä kohteita menetelmällä pystytään luotettavasti kartoittamaan tasossa ja korkeudessa.

Vertailussa huomattiin digitointimenetelmällä tehtyjen mittausten korkeustarkkuuden pysyvän hyvänä tasaisilla kohteilla, joiden vertailussa 398 pisteen aineistosta ainoastaan 0,005 % pisteistä ylittivät 10 cm:n raja-arvon. Kun vertailussa siirryttiin muihin kohteisiin, huomattiin fotogrammetrisen pistepilven heikkous korkeudeltaan vaihtelevien kohteiden kartoituksessa. Pistepilvi pyöristää teräväpiirteisiä kohteita, kuten aidat ja rakennuksen reunat. Matalat kohteet, kuten tien reunakivet, muodostuvat vielä kohtuullisen tarkasti. Kohteita kuvaava pistepilvi pyöristyy, mutta reunakiven korkeuden määrittäminen kuitenkin onnistuu riittävällä varmuudella, kunhan pistepilven pyöristymisen ottaa mittauksessa huomioon. Tukimuurien mittauksessa korkeuserot olivat huomattavampia, ja korkeisiin kohteisiin siirryessä kohteille ei pystytty määrittämään korkeutta hyvällä varmuudella. Tukimuurin yläpinnan korkeus pystyttiin kuitenkin määrittämään, kunhan korkeutta ei mitattu suoraan reunasta. Tämän vertailun perusteella voidaan todeta fotogrammetrisen pistepilven muodostuvan tarpeeksi hyvin asemakaavan pohjakartan päivittämistä varten kohteissa, jotka ovat korkeudeltaan alle 0,5 m. Tätä korkeammissa kohteissa pistepilven korkeus muodostui vertailussa pääosin vertailuaineistoa ylemmälle tasolle. Tarkkaa rajaa luotettavasti muodostuvan pistepilven korkeudeksi ei pystytty määrittämään. Tämän työn perusteella raja kulkee 0,5 m tukimuurin ja 3 m katosrakennuksen välissä. (Liite 2.)

Tarkkaa rajaa luotettavasti muodostuvan kohteen korkeudelle tai muodolle ei siis pystytä määrittämään. Työn tuloksien valossa menetelmää pystytään kuitenkin käyttämään ainakin katujen reunakivien ja geometrialtaan vastaavien kohteiden kartoittamisessa luotettavasti. Muissa kohteissa pistepilven oikein muodostuminen täytyy varmistaa kartoitusta suorittavan henkilön toimesta.

Lähteet

1. EU dronesäännöt. 2019. Verkkoaineisto. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. <https://www.droneinfo.fi/fi/eu_dronesaannot> Luettu 27.1.2020.
2. OPS M1-32 Ilmailusäädös. 2018. Verkkoaineisto. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. <https://arkisto.trafi.fi/file-bank/a/1544017881/36449b3e46367e0de0a247f2f68fefa1/32674-OPS_M1-32_2018_fi_korjattu.pdf> Luettu 27.1.2020.
3. GeoDrone X4L v5. 2019. Verkkoaineisto. VideoDrone Finland Oy <<https://videodrone.fi/geodrone-x4l/>> Luettu 27.1.2020.
4. GeoDrone X4L v5 hyötykuormat. Verkkoaineisto. VideoDrone Finland Oy. <<https://videodrone.fi/hyotykuormat/bg-rx1/>>. Luettu 27.1.2020.
5. EU dronesäännöt. 2019. Verkkoaineisto. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. <https://www.droneinfo.fi/fi/eu_dronesaannot> Luettu 27.1.2020.
6. RPAS tilastoja. 2019. Verkkoaineisto. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. <https://www.droneinfo.fi/fi/lentotyto/rpas_tilastot> Luettu 27.1.2020.
7. RPAS-laitteet tuovat taivaalle uuden joukon ilmailijoita. 2015. Verkkoaineisto. Lentoposti.fi. <https://www.lentoposti.fi/uutiset/rpas_laitteet_tuovat_taivaalle_uuden_joukon_ilmailijoita> Luettu 27.1.2020.
8. Agisoft Metashape. 2019 Verkkoaineisto. Agisoft LLC. <<https://www.agisoft.com/about/>> Luettu 28.1.2020
9. Orthomosaic and DEM Generation with Agisoft Photoscan Pro 1.3. 2017. Verkkoaineisto. Agisoft LLC. <[https://www.agisoft.com/pdf/PS_1.3%20-Tutorial%20\(BL\)%20-%20Orthophoto,%20DEM%20\(GCPs\).pdf](https://www.agisoft.com/pdf/PS_1.3%20-Tutorial%20(BL)%20-%20Orthophoto,%20DEM%20(GCPs).pdf)> Luettu 29.1.2020
10. Agisoft Metashape User Manual. 2019. Verkkoaineisto. Agisoft LLC. <https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_6_en.pdf> Luettu 29.1.2020

11. What Is Camera Calibration? Verkkoaineisto. Mathworks.
<<https://de.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>> Luettu 29.1.2020.
12. Rönholm, P. & Haggrén, H . 2005. Kuvakoordinaattien laskeminen ja eteenpäinleikkaus. Fotogrammetrian yleiskurssi. Luento 5. Verkkoaineisto. Aalto-yliopisto.
<https://foto.aalto.fi/opetus/301/luennot/5/5_pr2005.html#Eteenp%E4inleikkaus_yleisesti> Luettu 29.1.2020.

Agisoft Metashape -raportti

Agisoft Metashape -sovelluksen tuottama prosessointiraportti.

Agisoft Raportti_14022020

Processing Report
17 February 2020



Survey Data

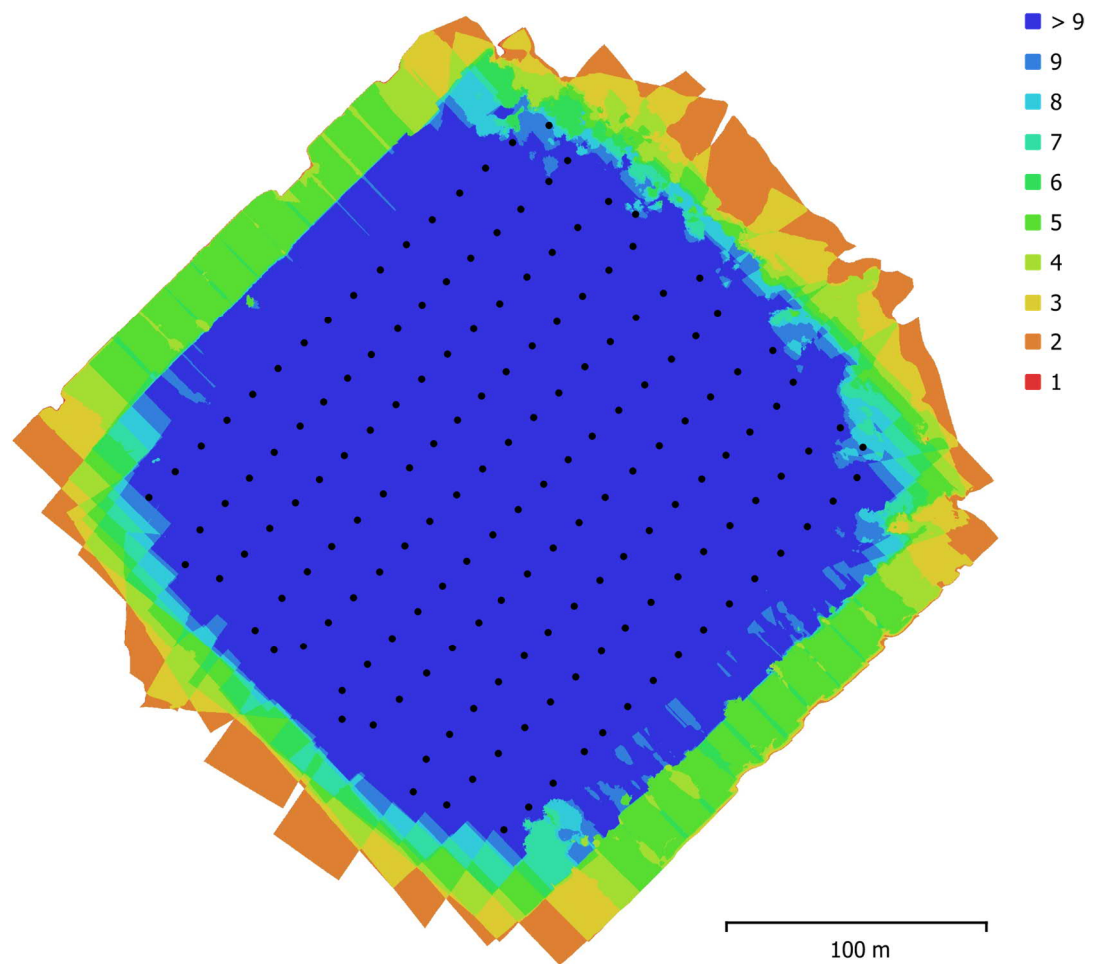


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	165	Camera stations:	165
Flying altitude:	107 m	Tie points:	118,309
Ground resolution:	1.3 cm/pix	Projections:	559,016
Coverage area:	0.0835 km ²	Reprojection error:	0.64 pix

Camera Model	Resolu- tion	Focal Length	Pixel Size	Precalibra- ted
DSC-RX1RM2 (35 mm)	7952 x 5304	35 mm	4.53 x 4.53 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

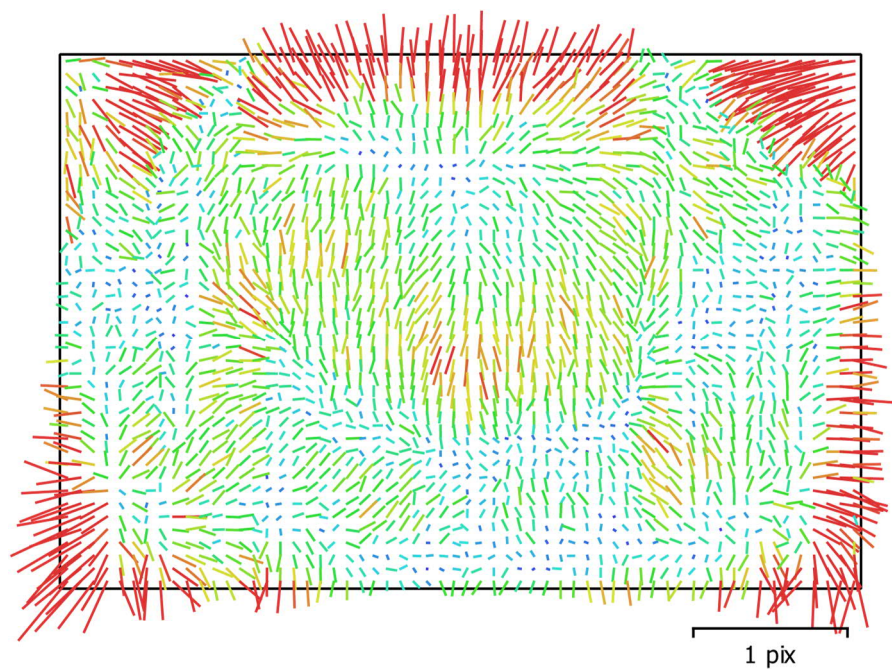


Fig. 2. Image residuals for DSC-RX1RM2 (35 mm).

DSC-RX1RM2 (35 mm)

165 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	7952 x 5304	35 mm	4.53 x 4.53 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
B1	0.631283									
B2	-0.167185									
K4	0.510222									
F	7772.58	3.4	1.00	0.42	- 0.85	0.22	- 0.30	0.17	- 0.2 6	0.42
Cx	-35.602	0.055		1.00	- 0.36	0.10	- 0.14	0.08	0.3 4	0.16
Cy	16.2093	0.076			1.00	- 0.18	0.25	- 0.15	0.2 1	- 0.15
K1	-0.0201696	3.9e- 005				1.00	- 0.73	0.68	0.0 1	- 0.04
K2	0.141807	0.00019					1.00	- 0.98	0.0 5	- 0.13
K3	-0.465226	0.00034						1.00	- 0.0 3	0.08
P1	-0.00082467	1.4e- 006							1.0 0	- 0.13
P2	0.000956757	1.1e- 006								1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations

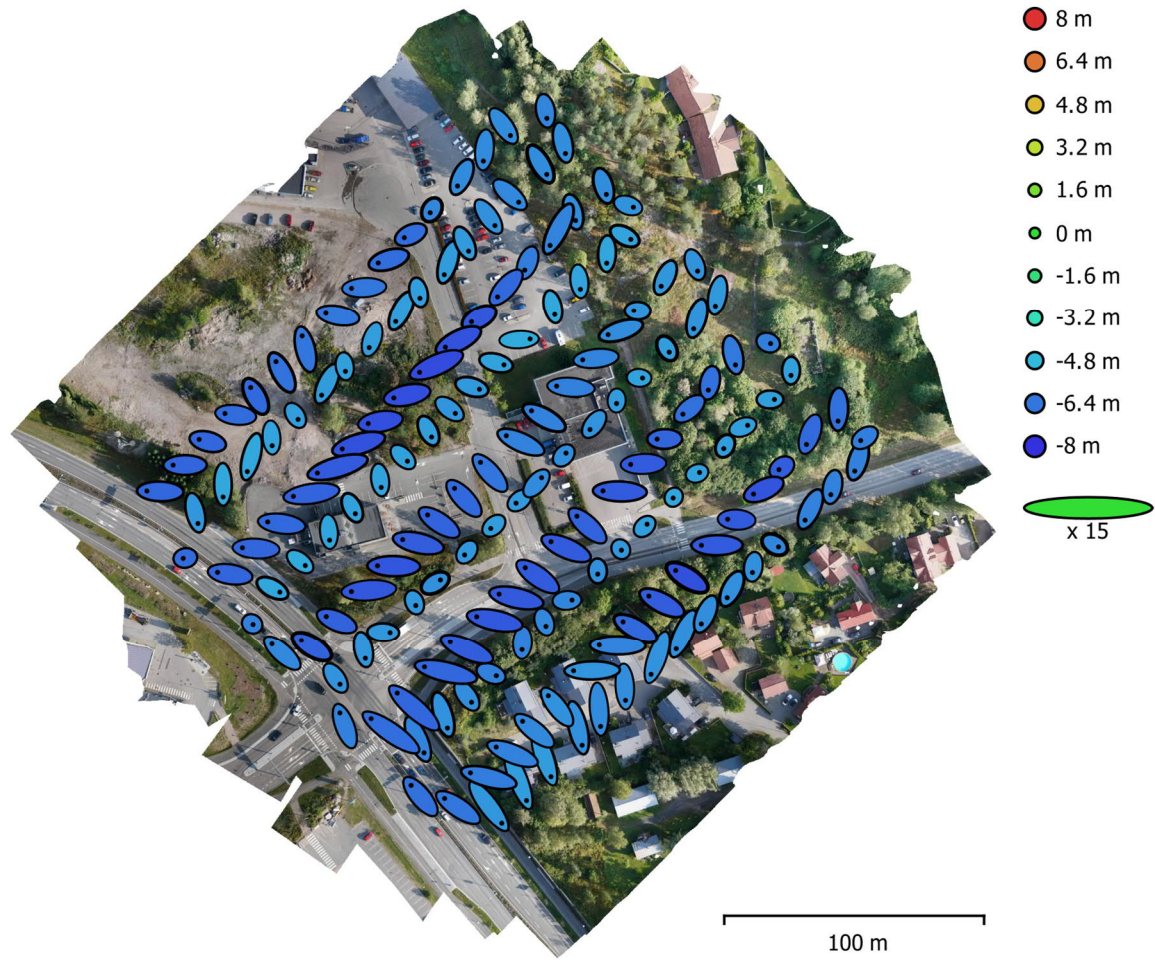


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
0.464246	0.402546	6.14432	0.614465	6.17497

Table 3. Average camera location error.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Ground Control Points

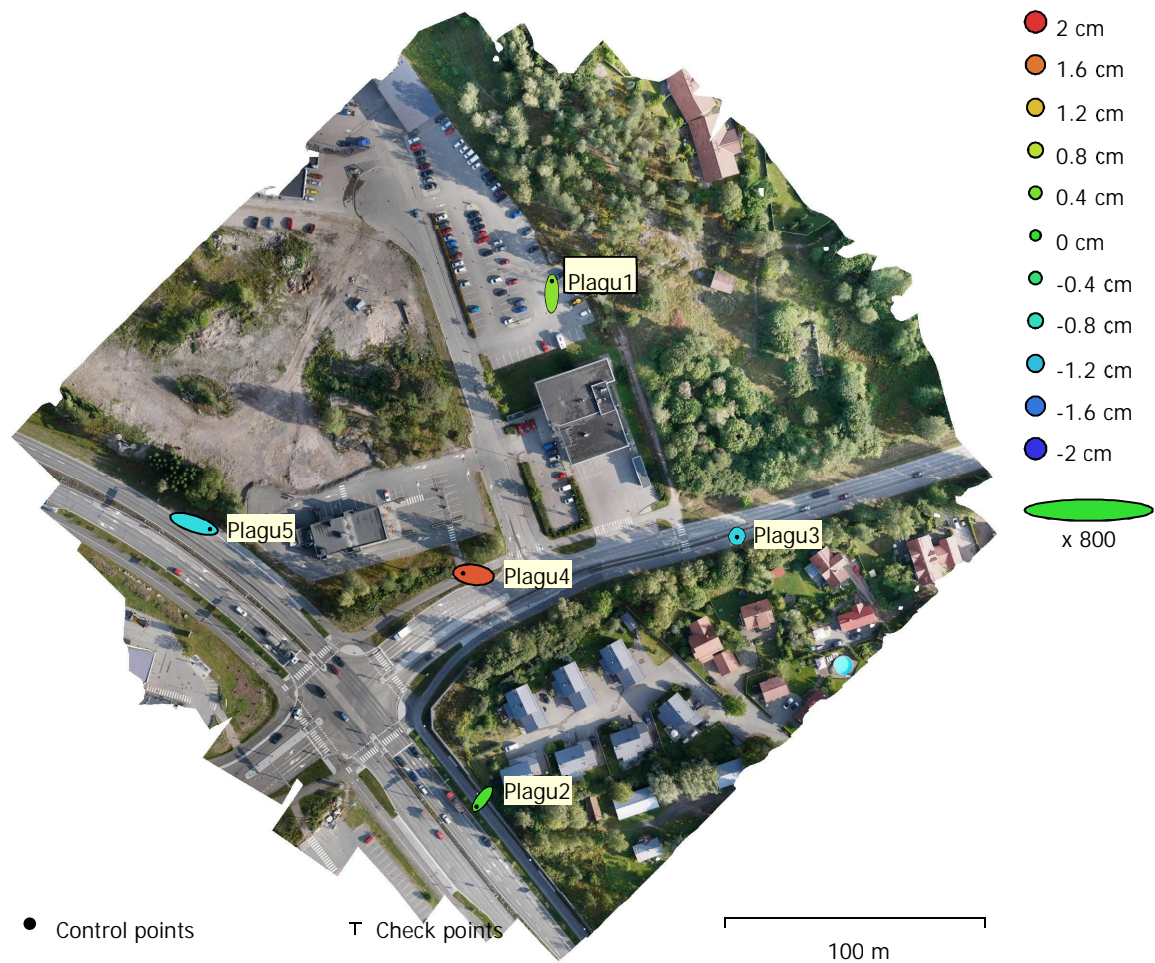


Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
5	0.859376	0.678693	1.05647	1.09506	1.5216

Table 4. Control points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
-------	--------------	--------------	--------------	------------	-------------

Plagu1	0.0244471	1.21585	0.530943	1.32695	0.249 (27)
Plagu2	-0.550329	-0.734503	0.163287	0.932212	0.285 (11)
Plagu3	-0.00583935	-0.0847027	-1.04878	1.05221	0.194 (19)
Plagu4	-0.999694	0.125278	1.77275	2.03905	0.280 (25)
Plagu5	1.54588	-0.512308	-1.01462	1.91877	0.269 (13)
Total	0.859376	0.678693	1.05647	1.5216	0.255

Table 5. Control points. X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

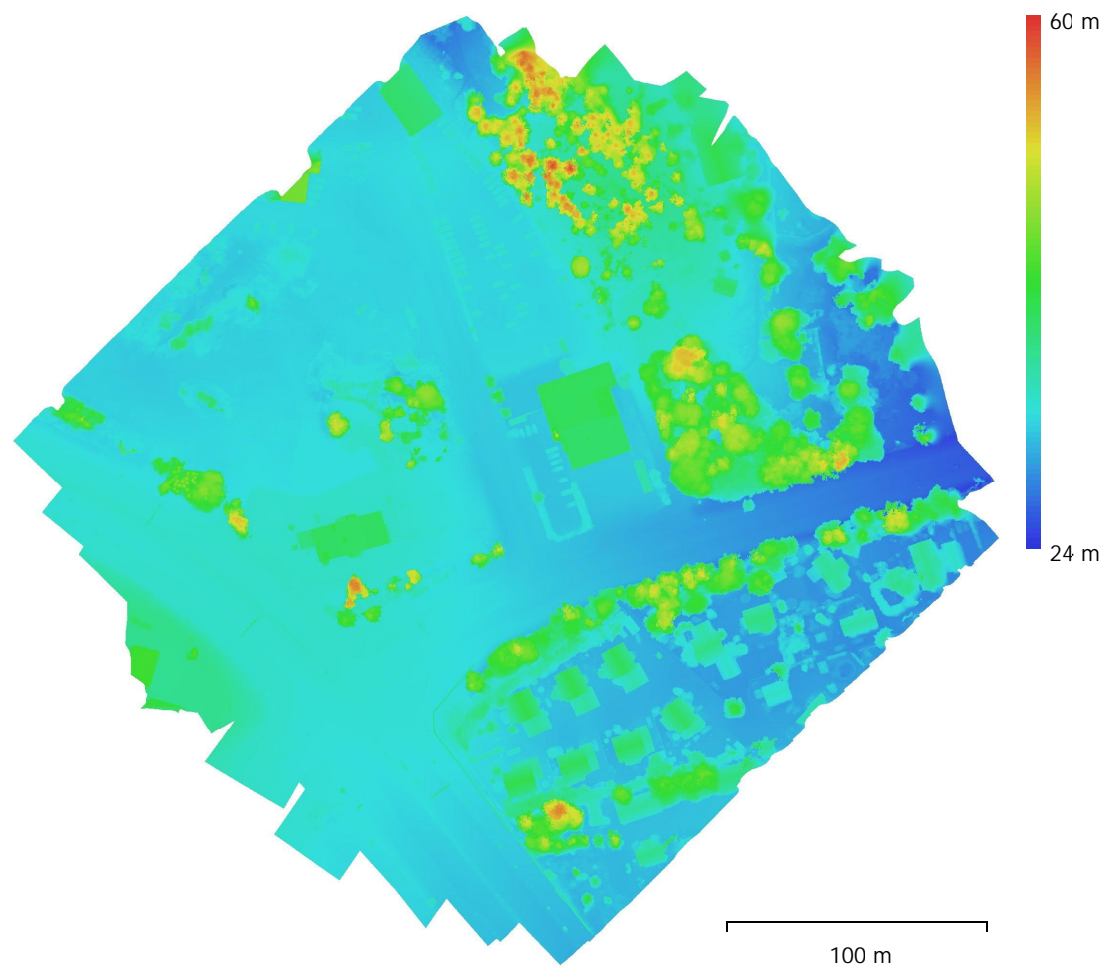


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 2.59 cm/pix
Point density: 0.149 points/cm²

Processing Parameters

General	
Cameras	165
Aligned cameras	165

Markers	5
Coordinate system	ETRS89 / GK25FIN (EPSG::3879)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	118,309 of 132,309
RMS reprojection error	0.131912 (0.639977 pix)
Max reprojection error	0.718689 (24.5491 pix)
Mean key point size	3.87953 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	5.21423
Alignment parameters	
Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Yes
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	13 minutes 46 seconds
Alignment time	52 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No
Optimization time	4 seconds
Software version	1.5.5.9097
Depth Maps	
Count	165
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Moderate
Processing time	15 hours 19 minutes
Software version Dense	1.5.5.9097
Point Cloud	
Points	197,992,085
Point colors	3 bands, uint8
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Moderate

Processing time	15 hours 19 minutes
Dense cloud generation parameters	
Processing time	1 hours 14 minutes
Software version	1.5.5.9097
DEM	
Size	18,673 x 18,317
Coordinate system	ETRS89 / GK25FIN (EPSG::3879)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
General	
Interpolation	Enabled
Processing time	4 minutes 29 seconds
Software version	1.5.5.9097
Orthomosaic	
Size	29,232 x 28,600
Coordinate system	ETRS89 / GK25FIN (EPSG::3879)
Colors	3 bands, uint8
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	DEM
Enable color correction	No
Enable hole filling	Yes
Processing time	11 minutes 10 seconds
Software	
Version	1.5.5 build 9097
Platform	Windows 64

Tulosten yhteenveto

Vertailun tulokset: Maastomitattujen pisteiden suora vertailu pintamallin korkeuteen.				
	Pisteitä	Alle 0,1 m	Yli 0,1 m	% yli 0,1 m
Tasopisteet	387	385	2	99,95 %
Reunakivet	505	412	93	81,58 %
Tukimuurit	37	29	8	78,38 %
Katosrakennukset & meluaita	23	2	21	8,7 %

Vertailun tulokset: Maastomitattujen pisteiden vertailu siirrettyjen pisteiden kanssa.				
	Pisteitä	Alle 0,1 m	Yli 0,1 m	% yli 0,1 m
Tasopisteet	387	385	2	99,95 %
Reunakivet	505	501	4	99,21 %
Tukimuurit	37	37	0	100 %
Katosrakennukset & meluaita	23	3	20	13,0 %