

Markus Hagelberg

# Camflight x8:n RPAS-ilmakuvauksen väylämäisessä kohteessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinöörityö

1.9.2017

Tekijä Otsikko	Markus Hagelberg Camflight x8:n RPAS-ilmakuvauus väylämäisessä kohteessa
Sivumäärä Aika	39 sivua + 4 liitettä 2017
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaaja	lehtori Ilkka Partonen
<p>Tässä opinnäytetyössä on selvitetty Camflight x8 RPAS -järjestelmän tuottaman aineiston tarkkuutta, kun kuvataan kapeaa tiealuetta.</p> <p>Tarkkuutta tutkittiin kuvaamalla Turveradantietä alkaen Turunväylän ja Turveradantien liittymäkohdasta ja päättyen etelään Mankkaanlaaksontien ja Koivu-Mankkaan tien liittymäkohdasta. Näistä havainnoista tehtiin kahteen kertaan tiheäpistepilvi selvittämään korkeutta (Z) ja kaksi ortokuvaa selvittämään sijaintitarkkuutta (X ja Y). Aineiston toisessa laskennassa (laskenta 1) käytettiin Sony r7 -kameran erillistä kalibrointitodistusta ja toisessa laskennassa (laskenta 2) käytettiin AgisoftPhotoScanin laskemia kameran kalibrointiarvoja. Kummassakin laskennassa kuvat orientointiin 30:llä signalointipisteellä. Nämä signalointipisteet mitattiin käyttämällä Trimblen R10 GNSS -vastaanotinjärjestelmää.</p> <p>Saatujen aineistojen sijaintitarkkuutta ja luotettavuutta selvitettiin erillisten havaintopisteiden avulla sekä vertaamalla saatua aineistoa Espoon kaupungin kantakartta-aineistoon. Työssä saadut tulokset tarkkuuksien osalta olivat seuraavat: laskennan 1 osalta keskivirheeksi saatiin tasossa X Y 1,8 cm ja korkeudessa 2 cm. Laskennan 2 keskivirheet olivat tasossa X Y 2,8 cm ja korkeudessa 2 cm.</p> <p>Työssä saatujen havaintojen mukaan Camflight x8 RPAS -järjestelmällä pystyy tuottamaan luotettavaa ja kartoitusvaatimukset täyttävää aineistoa. Ehtoina on, että signalointipisteiden geometria on hyvä ja lentojen kuvausala tarpeeksi kattava, taaten mitattavan kohteen sijoituvan kuvausalueen keskelle ja että kuvausalue on signalointipisteiden muodostaman alueen sisällä.</p>	
Avainsanat	RPA, UA, UAV

Author Title Number of Pages Date	Markus Hagelberg Camflight x8 RPAS aerial photography in a narrow track 39 pages + 4 appendices 4 October 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructor	Ilkka Partonen, Senior Lecturer
<p>The aim of this bachelor's thesis was to establish the accuracy of the data produced with Camflight x8 with RPAS programmes when taking measurements of a narrow road area. The accuracy was studied by measuring points at Turveradantie in Espoo, Finland. The measured track was about 2.7 km long. The road was surveyed twice as tight point cloud recordings to trace the height (Z). Two orthomosaics were taken to trace the location accuracy (X and Y).</p> <p>The data gathered in the first measurement were recorded with a Sony r7 camera with its optimization feature. AgisoftPhotoScan was used for the second measurement to calculate the calibration estimation of the camera. In both instances, the pictures were oriented to the screen with 30 signal points.</p> <p>The data was used to test the location accuracy and liability from different observing points. In addition, the data were compared to earlier data in the base map data of the city of Espoo. The average accuracy of the first calculation in the XY-plane was 1.8 cm and in Z 2 cm, in the second calculation XY 2.8 cm and Z 2 cm, respectively. The data gathered for this thesis implies that Camflight x8 with RPAS program can produce reliable data, and it fulfils mapping requirements.</p>	
Keywords	RPA, UA, UAV

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	UA/RPA	2
2.1	Yleistä tietoa	2
2.1.1	Miehittämättömien ilma-alusten luokat	3
2.1.2	Käyttö	4
2.1.3	Toiminta	4
2.2	Lainsäädäntö	6
3	Ilmakuvaus	7
3.1	Ilmakuvaustyytit	8
3.1.1	Viistokuva	8
3.1.2	Pystykuva	8
3.2	Fotogrammetria	8
3.3	Fotogrammetriset pintamallit	11
3.4	Stereomalli	11
3.5	Signalointi	11
3.6	Ilmakolmiointi	12
3.7	Kameran kalibrointi	13
4	Työ	16
4.1	Työn toteutus	16
4.2	UA-aluksen ilmakuvausten työvaiheet	17
4.3	Käytetty laitteisto	20
4.4	Aineiston työstö	21
4.5	Tulokset	26
5	Pohdinta	38
	Lähteet	40
	Liitteet	
	Liite 1. Havaintopisteiden koordinaattierot	
	Liite 2. Laskenta 2, jossa on käytetty Agisoftin laskemia kalibrointi-arvoja	
	Liite 3. Laskenta 1, jossa on käytetty Agisoftin laskemia kalibrointi-arvoja	
	Liite 4. Pistepilven korkeushavaintojen erot Espoon kaupungin kantakarttaan	

## Lyhenteet

AP	Agisoft Photoscan, venäläistaustainen ohjelmisto, perustettu 2006. Ohjelmisto tuottaa digitaalisista kuvista 3D-malleja.
C/A	Coarse Acquisition, satelliittien lähettämä yksilöllinen raakakoodi, jonka lähetystiheys on 1,023 megabittiä sekunnissa ja L1 signaalin lähetystaajuus on 1575,42 MHz.
DEM	Digital Elevation Model on korkeusmalli, joka on sidottu koordinaatistoon, jossa jokaisella kuvapikselillä on sijaintitieto.
GLONASS	Globalnaja Navigatsionnaua Sputnikovaya Sistema, venäläinen satelliittipaikannusjärjestelmä.
GNSS	Global Navigation Satellite System, yleisnimitys useille eri satelliittijärjestelmille.
GPS	Global Positioning System, amerikkalainen satelliittipaikannusjärjestelmä.
RTK+	Real Time Kinematic, reaaliaikainen liikkuva mittaustapa, joka pohjautuu satelliittien kantoaallon vaiheiden mittaukseen.
RPA	Remotely Piloted Aircraft, kauko-ohjattu miehittämätön ilma-alus, jota ohjataan kauko-ohjauspaikasta ja käytetään lentotyöhön.
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System on kauko-ohjatun ilma-aluksen käytön järjestelmä. Järjestelmään sisältyy ohjattu ilma-alus, ohjauspaikka, tarvittavat ohjaus- ja seurantayhteydet ja muut järjestelmän osat.
UA	Unmanned Aircraft, ilma-alus, joka on tarkoitettu lentämään ilman kiinteää ohjaajaa. Termillä ei tarkoiteta kevyitä lennokkeja tai koptereita.
UAS	Unmanned Aircraft system, UA-ilma-alusten käytön vaatima kokonaisjärjestelmä.

- UAV Unmanned Aerial Vehicle, vanhentunut nimike, jolla on aikaisemmin tarkoitettu miehittämättömiä ilma-aluksia. Lyhenne on jaettu UA- ja RPA-nimikkeiden alle.
- VC Virtual Cockpit, ohjausjärjestelmä, joka on suunniteltu ohjaamaan kevyitä miehittämättömiä ilma-aluksia.
- WGS84 World Geodetic System84, satelliittikoordinaattijärjestelmä, jonka origo on maapallon massakeskipisteessä.

## 1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää Camflight x8 RPA (Remotely Piloted Aircraft) -kopterin tuottaman aineiston tarkkuus.

Työ tehtiin Metropolian ammattikorkeakoululle. Työn lähtökohtana voidaan pitää kiinnostusta, miten hyvin RPAS:llä (Remotely Piloted Aircraft System) tuotetun aineiston tarkkuus riittää yleisellä tasolla ja mikä tässä työssä käytetyn laitteiston tarkkuus on, kun kuvauskohde on linjamainen katualue. Tämän kiinnostuksen pohjana on RPAS-järjestelmien yleistyminen maanmittauksessa, etenkin viranomaisten käytössä (kuten kaupunkien ja kuntien mittausyksiköissä sekä ympäristösuunnittelu- ja rakentamisyksiköissä). Tarkkuuden selvittäminen on tärkeää siksi, että kyseisten tahojen on tuotettava luotettavaa ja sijaintitarkkuuksien osalta määräyksiin perustuvia mittausaineistoja, kuten kantakartta-aineistoja ja rakennusten sijaintitietoja.

Opinnäytetyön toteutus voidaan jakaa kolmeen osaan. Aineiston keruussa käsiteltiin, miten maastossa tehtävät työt suoritettiin. Aineiston käsittelyssä maastossa kerätty aineisto käsiteltiin muotoon, jossa sitä voidaan tarkastella. Aineiston tarkastelussa arvioitiin tuotetun aineiston sijaintitarkkuutta ja luotettavuutta sekä pohdittiin, miten luotettava koko mittausprosessi oli selvittämään Camflight x8 RPAS -järjestelmän tarkkuutta.

## 2 UA/RPA

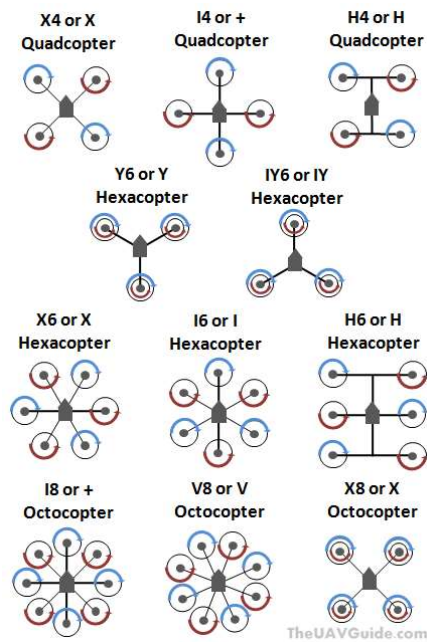
### 2.1 Yleistä tietoa

UAV-lyhenne tulee sanoista "Unmanned Aerial Vehicle" eli miehittämätön ilma-alus. Nykyään käytetään termejä UA (Unmanned Aircraft) tai RPA (Remotely Piloted Aircraft). Navigointiin alus käyttää pääsääntöisesti GPS-koordinaatteja, jotka sille on annettu lentosuunnitelmassa (autopilot). Laitetta voidaan myös ohjata manuaalisesti maasta käsin siihen sopivalla ohjausjärjestelmällä (ground station). Lähettimistä suurin osa toimii radiosignaalilla. Nämä kaksi osaa muodostavat RPAS-nimikkeen (Remotely Piloted Aircraft System), jota käytetään, kun puhutaan koko järjestelmästä. Tästä vanhempi nimitys on UAS (Unmanned Aerial System). [4; 1; 7; 14.]

Nykyään näitä lentäviä aluksia on monenlaisia eri käyttötarkoituksia varten. Tällä hetkellä RPA-alukset voidaan jakaa tyypiltään kahteen: kääntösiipiset ja moniroottorilliset laitteet. Näistä kahdesta tällä hetkellä näyttäisi siltä, että kopterityyppiset laitteet ovat viemässä suurinta markkinaosuutta niin ammatti- kuin myös harrastelijakäytössä.

RPA-lennokit voidaan jakaa kahteen ryhmään: perinteisen lentokoneen pienoismallin näköiset lennokit sekä moniroottorilaitteet. Näiden miehittämättömien ilma-alusten laukaisu tapahtuu jollakin laukaisumekanismilla, ja laskeutuminen vaatii laskeutumisalustan tai -paikan. Laskeutuminen tapahtuu lennokeilla "mahalleen", jolloin ne voivat vahingoittua, jos laskeutumispaikka ei ole sopiva. Pienenenergian kulutuksen ja nopeuden takia tämän tyyppiset lennokit soveltuvat hyvin laajojen alueiden kuvaamiseen.

RPA-kopterit voidaan jakaa ryhmiin niiden propellien määrän perusteella (kuva 1). Pyöriviä propelleja tulee olla vähintään kaksi, mutta useimmiten propelleja on neljästä kahdeksaan. Kopterien toiminta nousun ja laskun suhteen on pystysuoraa, joten ne tarvitsevat vähemmän tilaa kuin lennokit lentoon lähtöön ja laskeutumiseen. Kopterit toimivat lisäksi paremmin tuulessa niiden raskaamman koon ja lento ominaisuuksien takia. Tuulessa ne pystyvät pitämään lentolinian paremmin suorassa voimakkaampien moottoroitujen propellien avulla. [4; 7; 10.]



Kuva 1. Kuvassa ilmenee erilaisten RPA-kopterien mahdolliset propellien toimintaperiaatteet. Työssä käytetty Camflight-kopteri vastaa kuvan X Octocopteria. Tässä mallissa on neljä vartta, joiden jokaisessa päädyssä on allekkain kaksi erikseen pyörivää propellia, jotka pyörivät vastakkaisiin suuntiin. [Lähde <<http://wiki.theuavguide.com/wiki/Multicopter>> luettu 28.1.2016]

### 2.1.1 Miehittämättömien ilma-alusten luokat

Varsinaista maailmanlaajuista standardisoitua luokittelua miehittämättömille ilma-aluksille ei ole, vaikka tarvetta sellaiselle olisi. Lähimmäksi yhdenmukaisia luokittelun periaatteita päästään käyttämällä Yhdysvaltain puolustusministeriön laatimaa jaottelua UAV-aluksille tai NATO:n luokittelupohjaa, jossa sovelletaan RPA-alusten painoa. Kuitenkin Suomessa on tehty 2017 yleinen säädös koskien kauko-ohjattuja ilma-aluksia. Tämä säädös pohjautuu EU-standardeihin koskien miehittämättömien ilma-alusten käyttöä ja eri alusluokkien termistöä.

RPA-alkset (Remotely Piloted Aircraft) ovat miehittämättömiä ilma-aluksia, joita ohjataan kauko-ohjauksella erillisestä ohjaus paikasta. RPA-termin alle voidaan laittaa alukset, joita käytetään työn teossa tai ammattimaiseksi katsotussa toiminnassa.

UA (Unmanned Aircraft) on miehittämätön ilma-alusluokka, johon sisältyvät alukset, jotka on tarkoitettu lentämään ilman ohjaajaa tai erillistä ilma-aluksen ohjaus paikkaa. Termi ei pidä sisällä lennokkeja. UA-alusten voidaan katsoa olevan itsenäisesti toimivia aluksia jotka toteuttavat niille annettua tehtävää.

Drone on yleisnimitys kaikille miehittämättömille aluksille maalla, merellä ja ilmassa.

Lennot on miehittämätön lentävä laite, jota käytetään harraste- tai urheilukäytössä. Tällaisella miehittämättömällä ilma-aluksella on käytössä rajoituksia, esimerkiksi sitä ei saa lennättää väkijoukon päällä. [4; 11; 5.]

### 2.1.2 Käyttö

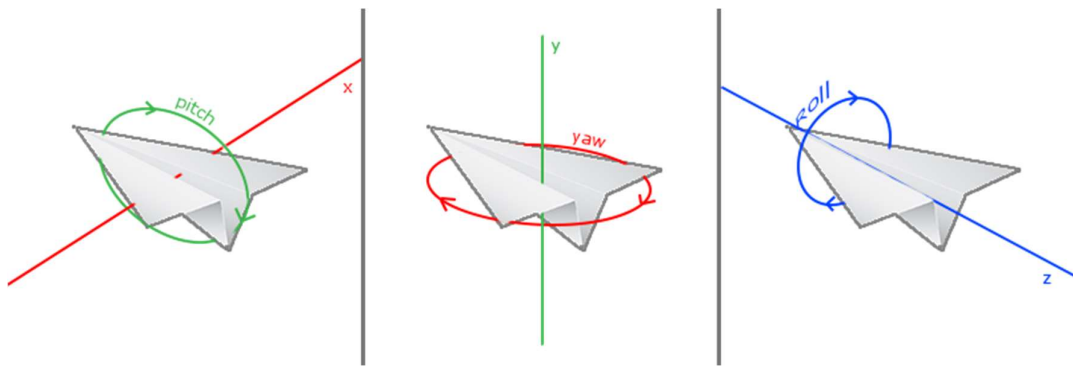
Yleisimmin RPA-aluksia käytetään kuvauksia varten, mutta toisinaan niitä voidaan käyttää myös tavarankuljetukseen. Kuvaukset voidaan jakaa harrastelija- ja ammattikuvauksiin. Harrastekuvauksia on yleensä pienellä kopterilla suoritettavaa maisemien kuvaamista tai laskettelutempujen kuvaamista rinteessä. Tällaiseen käyttötarkoitukseen tarvittavat kopterit eivät yleensä täytä UA-aluksen tai RPA-alusten ominaisuuksia.

Ammattikäytössä kuvaaminen on monimuotoisempaa. RPA-lennokkeja hyödynnetään pelastustoimissa, joissa kopterin kameran välittämä reaaliaikainen kuva mahdollistaa nopean riskien arvioinnin, esimerkiksi suurten rakennusten tulipaloissa ja vuoristoissa lumivyöryn aikana tai jälkeen. Teollisuudessa RPA-aluksia käytetään alueiden maanpohjan, puuston ja rakennusten kartoitukseen sekä tilavuuksien ja massan laskentaan. Aluksia käytetään myös rakenteiden (esimerkiksi voimalinjojen, isojen teollisuusalueiden tai öljynjalostamoiden) kunnon tarkistamiseen. UA-aluksia käytetään keräämään aineistoa, josta saadaan 2D- ja 3D-karttoja sekä tietoa luonnonvarojen (kuten puiden ja kasvillisuuden) määrästä ja laadusta.

### 2.1.3 Toiminta

RPA-alusten toiminta perustuu siihen, että alus kuvaa viisto- tai pystysuoria kuvia ennalta määrätyltä korkeudelta maanpinnasta. Kuvia otetaan siten, että jokainen kuva peittää viereisistä kuvista sivuttain 60–80 % (sivupeitto) ja pituussuunnassa 70–90 % (pituuspeitto). Alukset toimivat yleensä itsenäisesti niille annetun lentosuunnitelman mukaan. Lentosuunnitelmassa annetaan alukselle lentokorkeus GPS-koordinaateilla sekä

kuvanottovälit ja -sijainnit. Lennon aikana lennosta tallennetaan kameran kallistuskulmat, kuvanottohetki, vauhti, kopterin kallistuskulmat ja kopterin (yleensä suurpiirteinen) sijainti. Näissä pystykuvauksissa kameran kallistuskulma on lähes aina 90° gimbal-vakauttimen ansiosta. UA-/RPA-aluksen kallistuskulmista käytetään nimityksiä "yaw" tai "heading" (aluksen kompassisuunta), "pitch" (kallistus pystysuunnassa) sekä "roll" (aluksen kiertymä oman pituusakselistonsa ympäri) (kuva 2). Tiedot tarvitaan aineiston raakakuvien jälkikäsitteilyä varten. [7; 16.]



Kuva 2. Kuvassa havainnollistetaan RPA-alusten kiertokulmia "pitch", "yaw" ja "roll".[Lähde <[http://learnopengl.com/img/getting-started/camera\\_pitch\\_yaw\\_roll.png](http://learnopengl.com/img/getting-started/camera_pitch_yaw_roll.png)> luettu 25.1.2016]

UA-/RPA-alusten kuvien tarkkuus riippuu suurimmaksi osaksi kuvauksessa käytetyn kameran ominaisuuksista (kuten kennon laadusta ja optiikasta) sekä lentokorkeudesta. Lentokorkeus määrittää suurimmaksi osaksi maastopikselin koon: mitä korkeammalla lennetään, sitä suuremman alueen yksi maastopikseli kattaa, jolloin tarkkuus laskee. Kameran ominaisuudet vaikuttavat pikselien laatuun. Kameran ominaisuuksiin kuuluvat esimerkiksi pikselien määrä, valo-ominaisuudet ja kuvasensorin koko. Nämä vaikuttavat kuvien tarkkuuteen ja selkeyteen. [7; 10.]

UAV-aluksilla tehtävien kuvausten lopulliseen laatuun (eli näkyvyyteen ja sijainnin tarkkuuteen) vaikuttaa monta tekijää. Näitä ovat esimerkiksi sääolosuhteet (tuuli, vesi- ja lumisade) sekä valon määrä ja kontrastit varjojen välillä. Lisäksi vaikuttavat itse laitteisto, laitteiston kalibrointi ja optimointi lennolle sekä raaka-aineiston käsittely. [7; 10.]

## 2.2 Lainsäädäntö

Suomessa miehittämättömille ilma-aluksille (RPA, UA, Drone, Lennokki) on 1.1.2017 annettu ilmailulain pohjalta säädökset, jotka säätelevät ammattikäyttöä. Säädökset on antanut Trafi, Suomen ilmailuviranomainen. Säädökset ovat tarkennuksia Euroopan lentoturvallisuusviranomaisen (EASA) kanssa yhteistyöllä tehtyihin ilmailusäädöksiin. Säädökset koskevat RPA-alusten luokkia Micro ja Mini; näitä isommat menevät luvanvaraiseen toimintaan. [5]

Yleisten vaatimusten mukaan kauko-ohjatut ilma-alukset eivät vaadi erillistä lentolupaa. RPA-alusten kaikkia käyttäjiä koskevat kuitenkin Trafin määräämät säädökset miehittämättömien ilma-alusten käytöstä. RPA-aluksen käyttäjän tulee ilmoittaa liikenteen turvallisuusvirastolle tiedot käyttäjästä ja käytettävästä laitteesta sekä suunnitellun toiminnan laadusta ja laajuudesta. Käyttäjän tulee ilmoittaa, tapahtuuko lento asutuskeskuksen tai väkijoukon yllä. Ilmoitus tulee tehdä ennen laitteen ottamista käyttöön. Lento tulee suorittaa siten, että mahdolliset haitat ja vaaratilanteet minimoidaan. Lennosta vastaavan tulee olla vähintään 18-vuotias.

RPA-aluksessa tulee olla kaksi erillistä tapaa hallita laitetta sekä toimintatapa mahdollisten vikatilanteiden varalle. RPA-aluksen kokonaismassa ei saa olla yli 25 kg. Lentojen osalta tulee kirjata päivä, aika, paikka, päällikkö, aluksen malli ja valmistaja sekä toiminnan laatu ja luonne, ja kaikki tiedot tulee säilyttää lentopäivästä vähintään kolme vuotta. RPA-alukseen tulee lennon aikana olla jatkuva näköyhteys lentäjällä tai tähystäjällä, jolloin tähystäjän ja lentäjän välillä on kommunikointiyhteys, kuten radiopuhelimilla toimiva radioyhteys. Lennon enimmäiskorkeus saa olla 150 metriä maan tai veden pinnasta. UA-aluksen tulee aina väistää muuta lentoliikennettä. Joissain paikoissa, kuten lentokentillä ja varuskunta-alueilla, ei UA-aluksia saa lennättää ollenkaan. Lento on myös kielletty yli 7 kg painavilta aluksilta tiheällä asutusalueella ja väkijoukkojen päällä (painorajaan ei lasketa aluksen kiinteitä pelastuslaitteita). Poikkeuksena ovat viranomaistehtävissä käytetyt alukset, jotka saavat painaa yli 7 kg. Liikennevirasto voi hakemuksesta myöntää poikkeuslupia. [15; 16, §9, 57, 70.]

### 3 Ilmakuvaus

Ilmakuvaus on passiivisen kartoituksen muoto, jossa käytetään näkyvän valon sähkömagneettista spektriä. Tämän takia ilmakuvaus vaatii ulkoisen valonlähteen, joka tässä tapauksessa on aurinko. Ilmakuvaus on osa kaukokartoitusta, jossa tutkittavaa kohdetta havainnoidaan ilmasta käsin kohteeseen koskematta.

Ilmakuvaukset tehdään nykyään CCD-kennolla (Charge Coupled Device) ja tästä johdetuilla kennoilla. Nämä digitaaliset kennot ovat mahdollistaneet suuren ja nopean harppauksen ilmakuvausten maailmassa, tehden ilmakuvauksesta nopeampaa ja laadukkaampaa antamalla paljon erilaisia työkaluja kuvien ottamiseen ja käsittelyyn. Vielä vuonna 2008 Suomen Maanmittauslaitos (Suomen suurin ilmakuvienväittäjä) käytti vanhaa analogista kuvausta, kunnes se vuonna 2009 siirtyi kokonaan digitaaliseen kuvaukseen. [10]

Digitaaliseen kuvaukseen siirryttäessä kuvan mittakaava ei enää ollut ainoa kuvien tarkkuuden määrittäjä, niin kuin se oli ollut filmipohjaisissa kameroissa. Pääsääntöisesti kuvan tarkkuuden ratkaiseva tekijä on kuvien maastopikselien koko (eli kuinka paljon maata kameran kuvapikseli kattaa). Tyypillisimmät pikselikoot ovat lentokoneissa 20–40 cm, UA-aluksissa ja matalakuvauksissa 5–20 cm tarpeen mukaan. Nykyään UA-aluksilla tehtävissä kuvauksissa teoreettinen pikselikoko voi olla jopa 1 cm. [11]

Ilmakuvauksessa käyttötarkoitus määrittää, millaista kalustoa käytetään halutun datan saamiseksi. Yleisin käyttötarkoitus on spektrikuvaus, jossa kohteeseen osuvia valonsäteiden heijastumia kuvataan eri aallonpituuksilla. Yleisimmin käytetty kuvaussensori on näkyvän valon Multispektri. Muita käytössä olevia kuvaussensoreja ovat hyperspektri, NIR (Near Infra Red), lämpökamera ja Lidar (laserskanneri).

Kaukokartoitusta on tehty jo jonkin aikaa. Jo vuonna 1858 Ranskassa kuvattiin kuumailmapallostalla kaupunkikuvia, mutta ilmakuvausmittausta on alettu hyödyntämään vasta ensimmäisen maailmansodan aikana ja sen läpimurron ajankohta voidaan sijoittaa toiseen maailmansotaan. Tällöin kuvaustekniikka oli saavuttanut tason, jolla ilmakuvienväittäjien työkalut mahdollistivat kohteiden havaitsemisen ja etäisyyksien mittaamisen ilmakuvienväittäjien avulla. Laajaan tutkimuskäyttöön kaukokartoitus saatiin satelliittimittauksen myötä, kun Landsat-satelliitti laukaistiin vuonna 1972, mikä mahdollisti luonnonvarojen kartoittamisen.

Ilmakuvauksen myötä saatiin teknillinen mahdollisuus tehdä maanlaajuinen yhtenäinen peruskartta. Suomessa tämä tehtiin vuosina 1947–1977. Nykyään suurin osa yleisistä kartoitushankkeista tehdään ilmasta käsin hyödyntämällä kaukokartoitusta. [11]

### 3.1 Ilmakuvaustyypit

#### 3.1.1 Viistokuva

Viistokuva on ilmasta otettu kuva, joka on otettu horisontaalin ja pystysuoran kuvan välimaastosta (kuvauskulma 0–89°). Kuvauskulma on pääsääntöisesti noin 45°, jolloin horisontti ei näy kuvissa. Viistokuvat peittävät laajemman alueen kuin pystykuvat, mutta niiden mittakaava pienenee nopeasti, jolloin kuvien kauimmaisat kohteet muuttuvat epätarkoiksi. Katvealueiden määrä viistokuvissa on myös suurempi, koska rakennukset ja puut peittävät kohteita. Viistokuvien yleisin käyttötarkoitus on mainos- ja myyntikäyttö. Nykyään kehittyneen tekniikan ansiosta pystytään viistokuvia hyödyntämään myös tarkassa kartoitus- ja mittaustyössä, esimerkiksi kun kyseessä ovat syvät ja kapeat vuonot sekä tie- ja sähkölinjat. [10; 11.]

#### 3.1.2 Pystykuva

Pystykuva on kohtisuoraan ilmasta käsin otettu kuva, jonka kuvauskorkeus määrittää mittakaavan ja maastopixelien koon. Kuvauskulma on teoriassa 90° (täydellinen pystykuva), mutta muutaman asteen virhekallistumia pystytään vielä korjaamaan prosessointivaiheessa. Tällaisista kuvista käytetään termiä oikaistu ilmakuva, joita suurin osa ilmakuvista onkin. Tätä kuvaustapaa käytetään moniin käyttötarkoituksiin; yleisemmin mitaus- ja kartoitusaineiston keruuseen, isojen alueiden aluejaotteluun (pellot, metsät, tiet ja vesistöt) ja alueiden seurantaan (talojen määrän lisääntyminen alueella tai metsien kunto ja hakkuu). [10; 11.]

### 3.2 Fotogrammetria

Fotogrammetria on mittaustapa, jossa mitataan kohteen muotoa ja kokoa valokuvien avulla. Kaksiulotteisista valokuvista muodostetaan kolmiulotteisia kuvia yhdistämällä niitä toisiinsa. Kun kuvia on useita, saadaan muodostettua kolmiulotteisia kuvia, joiden

avulla voidaan mitata kohteiden välisiä pituus- ja korkeuseroja. Tämä edellyttää kahta eri koordinaatistoa, kamera- ja kohdekoordinaatistoa.

Kamerakoordinaatisto on aina kamerakohtainen, joten jokaisella kameralla on omat sijainti- ja suuntakoordinaatistot. Koordinaatisto vaihtelee kamerassa sen mukaan, millaisia asetuksia kamerassa käytetään. Origo on kameras projektiokeskuksessa, kun kamera on fokusoitu äärettömyyteen. Xy-taso on kuvan tason kanssa samassa suunnassa, ja Z- akseli on aina kameras kuvaussuunnasta poispäin. Kuvasta mitatut koordinaatit ilmoitetaan lähes aina kaksiulotteisina kuvakoordinaatteina  $[x,y]^T$  tai kamerakoordinaatteina  $[x,y, -c]^T$ , jolloin c ilmaisee z-koordinaattia.

Kohdekoordinaatisto on kamerasta erillään oleva koordinaatisto, jolla mitattuja kohteita määritetään. Yleisin on maastokoordinaatisto, joka kuvaa olemassa olevaa maa- aluetta ja jolla pyritään ilmaisemaan kohteiden absoluuttinen sijainti.

Kollineaarinen ehto täyttyy, kun kuvasta mitatun pisteen ja sitä kohteessa vastaavan pisteen välillä vallitsee yhteys. Ehto muodostuu silloin kun kohdepiste, kuvapiste ja kameras projektiokeskus sijaitsevat samalla suoralla. Näin voidaan muodostaa kollineaarisuusyhtälö.

$$\begin{cases} x - x_0 = -c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y - y_0 = -c \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{cases}$$

$x, y$  on kuvapisteen koordinaatit kamerakoordinaatistossa

$x_0, y_0$  on kameras pääpisteen paikka kamerakoordinaatistossa

$X, Y, Z$  on kohdepisteen maastokoordinaatit

$X_0, Y_0, Z_0$  on kameras projektiokeskuksen sijainti maastokoordinaatistossa

$r$  on kamerakoordinaatiston ja maastokoordinaatiston välinen kierto

$c$  on kameravakio

Yhtälöä voidaan käyttää kohdepisteiden koordinaattien tai itse kuvanottoaikan selvittämiseen. Kun halutaan selvittää kohdepisteiden koordinaatit, on tiedettävä kameran sijainti ja sen sisäinen geometria eli tässä tapauksessa orientointi. Orientointeihin kuuluvat kuvien sisäinen, ulkoinen, keskinäinen ja absoluuttinen orientointi.

Kameran sisäinen geometria määrittää kuvan sisäisen orientoinnin. Tällöin voidaan kameran osalta käyttää termiä kalibrointi. Tällöin selvitetään kameran kameravakio  $c$  ja päätepisteen paikka  $(x, y)$  sekä kameran optiikasta muodostuvat virheet, jotka vääristävät kuvaa.

Ulkoisessa orientoinnissa selvitetään kuvanottoaika ja -suunta ulkoisessa koordinaatistossa. Kuvanottoaika vastaa kuvan projektiokeskuksen sijaintia ja suuntaa kamera-koordinaatiston sekä maastokoordinaatiston väliset kierrot. Tämä on kollineaarisuusyhtälössä ilmoitettu  $X_0, Y_0, Z_0$  ja  $r$ . Ulkoisen orientoinnin selvittämiseksi tarvitaan sijaintitieto kuvasta mitattujen pisteiden vastinpisteille, eli maastossa olevien signalointipisteiden koordinaattitiedot  $X, Y, Z$ . Vastinpisteiden ulkoisilla koordinaattitiedoilla pystytään laskemaan muunnosparametrit kuville, jotta kuva saadaan orientoitua haluttuun koordinaatistoon.

Ilmakuvauksen kierto muodostuu kolmesta kierrosta, joista jokainen tapahtuu pääakselin ympäri, jolloin johdettavaksi muodostuu kolme kiertokulmaa. Tällöin yhtä kuvaa kohden ratkaistaan kuusi parametria, kolme siirtoa ja kolme kiertoa.

Kahden kuvan keskinäinen orientointi ja kiinnitys ulkopuoliseen koordinaatistoon muodostaa absoluuttisen orientoinnin. Näin voidaan suorittaa fotogrammetrinen eteenpäinleikkaus, jolloin saadaan pohja kolmiulotteiselle mittaukselle.

Kahden kuvan orientoinnissa muodostuu aina virheitä. Yleisin tapa tasoittaa virheitä on pienimmän neliösumman menetelmä. [8]

### 3.3 Fotogrammetriset pintamallit

Ilmakuvauksessa fotogrammetrisellä pintamallilla tarkoitetaan kolmiulotteista pinnanmuotoa, joka on muodostettu mitatuilla ilmakuvilla. Tällöin yksittäisille kuvapisteille (pikseleille) etsitään vastin piste toisesta kuvasta. Mitä enemmän vastin pisteitä löytyy, sitä tarkemmaksi pintamalli muodostuu. Tarkimman mallin saamiseksi jokainen kuvapiste tulee käydä läpi. Työ suoritetaan automaattisesti, tehtävään soveltuvalla ohjelmalla.

Pisteiden tunnistamiseen voidaan käyttää erilaisia menetelmiä: piirrepohjaisia, paikallisia, yksinkertaisia tai aluepohjaisia. Paikallisessa menetelmässä etsitään yhtäläisyyksiä kuvien piirteissä (terävät reunat ja kulmat), ja se soveltuu huonosti täydellisen pintamallin tekemiseen. Aluepohjaiset menetelmät toimivat muutaman kuvapisteen ryhminä, joita verrataan toiseen kuvaan ja katsotaan, miten hyvin se vastaa toista kuvaa. Vastin pisteet löytyvät todennäköisesti sieltä, missä samankaltaisuus on suuri. Aluepohjainen menetelmä eroaa piirrepohjaisesta siten, että kuvapisteen alueessa ei tarvitse olla mitään tunnistettavaa piirrettä. Yksinkertainen menetelmä tarkoittaa kirkkausarvojen korrelaation laskemista vastin pisteissä, joita verrataan toiseen kuvaan. Vertailussa käytetään jotakin mittaa, jolla samankaltaisuutta havaitaan. Eniten käytetyt mitat ovat intensiteettierojen erojen neliöiden summa ja absoluuttisten erojen summa. [8]

### 3.4 Stereomalli

Stereomallilla tarkoitetaan kahden kuvan yhtäaikaista tarkastelua siten että toinen silmä näkee toisen kuvan ja toinen silmä toisen. Kuvien tulee olla otettu samasta kohteesta, mutta hiukan eri suunnasta. Kuvatason tulee olla molemmissa sama ja projektiokeskukset yhdellä vaakasuoralla. Kuvien sisältäessä saman kohteen muodostuu kuvassa syvyysvaikutelma. Vääristymä orientoiduissa kuvissa johtuu stereomallissa olevien kuvapisteparien sijaintivirheestä toisiinsa nähden. [8]

### 3.5 Signaointi

Signaalit eli tukipisteet ovat maastossa mitattuja kohteita, joiden sijainti tiedetään tarkasti. Tukipisteiden tarkoitus on sitoa ilmakuvat ulkoiseen koordinaatistoon sekä mahdollistaa kaikkien kuvanottoaikkojen ja liitospisteiden sijaintien selvittäminen.

Pisteiden tulee olla näkyvöitetyjä, jotta ne pystytään erottamaan ilmasta käsin. Niiden muodolla ei periaatteessa ole väliä, kunhan ne pystytään erottamaan kuvista tarpeeksi tarkasti. Yleisessä käytössä on mustalla pohjalla oleva valkoinen risti tai ympyrä, kooltaan 50 cm x 50 cm – 1 m x 1 m. Signaalipisteiden teoreettinen minimimäärä orientoinnissa on kolme tunnettua pistettä. Signaalipisteet tulee rakentaa maastoon ennen kuvausta, mutta signaalipisteiden mittaus voidaan suorittaa joko ennen lentoa tai vasta sen jälkeen. Tällöin mittaus tehdään runkomittauksella, jossa käytetään takymetriä tai GNSS-vastaanotinta (staattinen mittaus). Nykyään yleisempi tapa on käyttää kartoitusmittausta, jossa signaalipisteet mitataan kartoitukseen sopivalla tarkkuudella  $\pm 2$  cm (kuvan erotuskyky signaalien keskustan erottamiseen on pääsääntöisesti noin  $\pm 2$  cm) tai käytetään olemassa olevia tunnettuja pisteitä, jotka signaloidaan. Millimetrin tarkkuus signaalipisteitä rakentaessa ei siis merkittävästi paranna ilmakuvien tarkkuutta. [19]

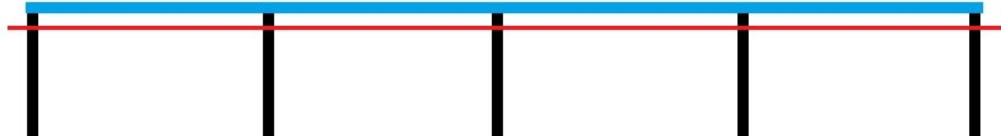
### 3.6 Ilmakolmiointi

Kuvien keskinäiseen orientointiin tarvitaan riittävästi liittospisteitä (kuva 3). Tämä vaatii sitä, että kuvien peittoalueen on oltava tarpeeksi laaja ja että jokainen kuvausalueelta mitattavaksi haluttu kohde esiintyy vähintään kahdessa kuvassa. Kuvien yhdistäminen vaatii myös tarpeeksi liittospisteitä, jotta voidaan muodostaa stereomalli. Kuvien yleisimmät vähimmäispeittoalueet ovat 60 % pituuspeittoa ja 30 % sivupeittoa. UA-järjestelmällä peitealueiden tulee olla suuremmat (70–90 % pituuspeittoa ja 50–70 % sivupeittoa). [8]

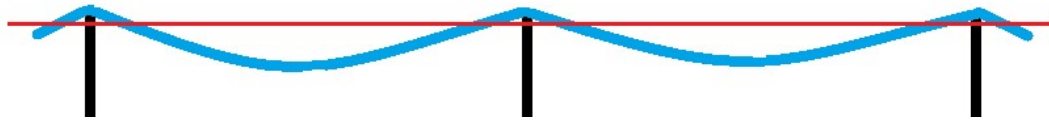
Ilmakolmiointi on yleisin menetelmä kuvien keskinäisten ja absoluuttisten orientointien selvittämiseksi. Tässä menetelmässä laskenta tapahtuu tasoituslaskulla, jossa kaikki kuvat orientoidaan yhtenä joukkona (blokkina). Tällöin on kyseessä yhteistasoitus, jossa liittospisteiden koordinaatit, kuvanottopaikkojen ulkoinen orientointi ja kalibrointiparametrit selvitetään samanaikaisesti. Tällöin tarvitaan joukko liittospisteitä, jotka erottuvat useista kuvista absoluuttisen orientoinnin saamiseksi.

Tarkkuus ilmakolmiointinissa riippuu kaikkien kuvien ja kuvissa esiintyvien kohteiden taso- ja korkeustarkkuuksista (x,y,z). Ilmakolmiointin tarkkuus riippuu siis siitä, miten hyvin kuvissa esiintyvät kohteet asettuvat päällekkäin. Tällöin nähdään, onko kuvissa esiintyvien kohteiden etäisyys sama eri kuvissa. Tämä sijaintitarkkuus, joka saadaan mittattujen liittospisteiden tasoituksen myötä, ei takaa täysin saman tasoista tarkkuutta koko

kuvausalueella; saatu tarkkuus koskee vain liitospisteitä, jolloin tarkkuus muuttuu, mitä kauemmaksi liitospisteistä mennään (kuvat 4). Tätä pystytään korjaamaan GNNS-havainnoilla, jolloin mahdollinen poikkeama tasoittuu. [8; 17.]



Kuva 3. Liitospisteiden ollessa tarpeeksi tiheässä saadaan kuvausalueen virhe tasaiseksi. Punainen kuvastaa todellista maanpintaa, sininen kuvastaa orientoidun kuvan pintaa ja musta liitospisteitä. Mitä kauempana sininen on punaisesta viivasta, sitä suurempi on virhe. [Kuva Markus Hagelberg]



Kuva 4. Liitospisteiden ollessa harvemmassa kuvausalueen virhe suurenee niiltä osin missä liitospisteitä ei ole. Punainen kuvastaa todellista maanpintaa, sininen kuvastaa orientoidun kuvan pintaa ja musta liitospisteitä. Mitä kauempana sininen on punaisesta viivasta, sitä suurempi on virhe. [Kuva Markus Hagelberg]

### 3.7 Kameran kalibrointi

Osa kuvissa näkyvistä virheistä on enemmän systemaattisia kuin satunnaisia. Nämä virheet johtuvat ilmakuvaukseen käytetystä kamerasta, ja ongelma voidaan yleensä korjata kameran kalibroinnilla. Kameralle voidaan tyypillisesti tehdä kolme erilaista kalibrointia: laboriokalloibroiinti, testikenttäkalibrointi ja itsekalibrointi.

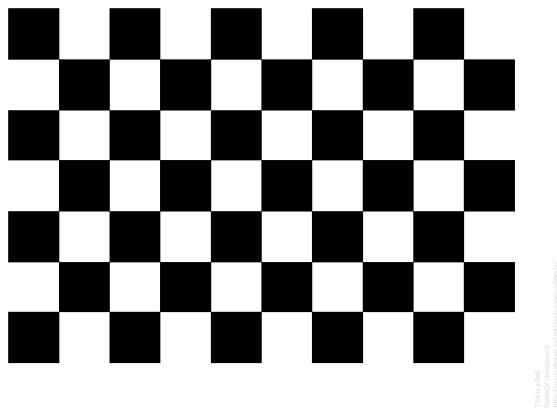
Laboriokalloibroiinti tehdään yleensä valmistajan toimesta, koska työ vaatii huomattavan määrän tekniikkaa. Tästä kalibroinnista kirjataan kalibrointitodistus, jossa ilmenevät

vähintään kuvan keskipisteen, autokolmioidun pääpisteen ja symmetriapisteen koordinaatit sekä kameravakio ja piirtovirheet (kuvat 5, 6). Filmikameroissa ilmoitetaan vielä kuvan kehysmerkit.

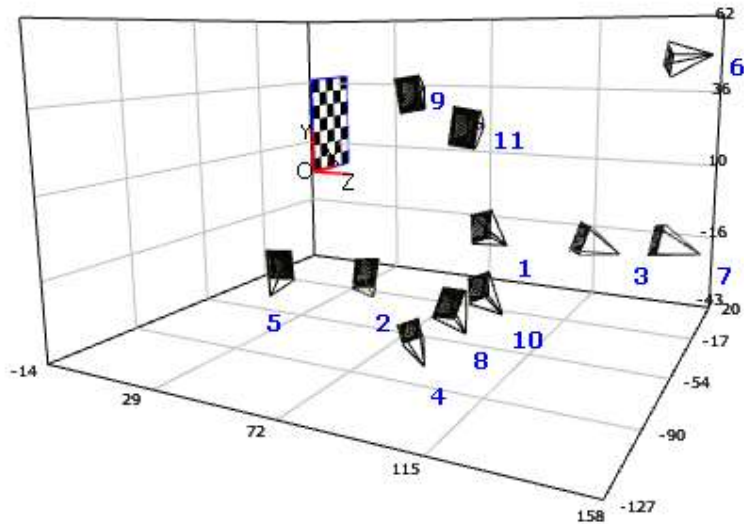
Testikenttäkalibrointi tehdään testikuvausten avulla, jolloin määritellään kameran sisäinen orientointi. Kuvauskohteen tulee olla tunnettu kohde, joka selvitetään kollineaarisuusyhtälöiden avulla. [18]

Itsekalibrointi tehdään osana ennalta tuntemattoman alueen kuvausta. Tällöin kameran sisäiset virheet määritetään tasoituksessa. Menetelmä on sama kuin testikenttäkalibroinnissa, mutta ilman ennalta määrättyjä kohdepisteitä. Tällöin kaikille tasoituslaskussa määritettäville parametreille tulee antaa likiarvot, koska ratkaisu tehdään iteratiivisesti. Tällä tavalla kuvia ei saada vielä sidottua ulkoiseen koordinaatistoon. Operaation tekeminen vaatii tämän jälkeen muutamia kohdekoordinaatteja.

Kaikkia kolmea tapaa käytetään, kun kameralla on tarkoitus suorittaa ilmakuvauks. Tällä on tarkoitus taata mahdollisimman luotettava lopputulos. [18]



Kuva 5. Kuvassa esimerkki kameran kalibroinnissa käytetystä testialustasta, jossa ruudukoiden koko on suhteessa etäisyyteen, jossa kameraa käytetään. Tässä työssä kameran fokus on kohdistettu äärettömyyteen. [Lähde <[http://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/calib3d/camera\\_calibration/camera\\_calibration.html](http://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration/camera_calibration.html)> luettu 12.8.2016]



Kuva 6. Kuvassa esitetään esimerkki siitä, miten kameras kalibroinnin kuvaus tehdään. Kyseisessä mallissa mittatarkka kuvauskohde on kiinteä ja kalibroitava kamera on liikkuva. Tällöin kameralla otetaan kuvia eri etäisyyksiltä ja eri kulmista kiinteästä kohteesta. Tällöin kuvanottopaikojen sijainti tiedetään suhteessa kohteeseen. Tällöin kuvavirheitä voidaan tarkastella suhteessa tiedettyyn sijaintiin ja sitä myöten otettujen kuvien kulmia ja etäisyyttä, jotka muodostavat haamukappaleen kuvatusta kohteesta, jota voidaan verrata virheettömiin vastinkappaleen mittoihin. [Lähde <<http://ubimon.doc.ic.ac.uk/dvs/m581.html>> luettu 12.8.2016]

## 4 Työ

Työn tavoite on selvittää RPA-kopterin tuottaman aineiston tarkkuus ja sen soveltuvuus kartoitus- ja muuhun mittauskäyttöön. Työssä on tarkoitus saada ilmakuvausaineisto, jota pystytään käyttämään kartoitukseen. Tämä aineisto tehdään luomalla mittausaineistosta pistepilvi, jonka avulla muodostetaan korkeusmalli ortokuvan pohjalle. RPA-kopterin tarkkuuden selvittämisen syy on mielenkiinto selvittää tämän kehittyvän alan sovellus- ja käyttömahdollisuuksia. Vaikka RPA-kopterien ilmakuvaukset ovat olleet ammatillisessa käytössä jo kymmenisen vuotta, niiden kyky tuottaa tarkkaa mittausaineistoa järkevällä hyötysuhteella on saavutettu vasta viime vuosina. Tässä työssä on tarkoitus selvittää, pystytäänkö RPA-kopterilla tuottamaan laadukasta kartoitusaineistoa kapealta tiealueelta.

### 4.1 Työn toteutus

Työ toteutetaan kuvaamalla Espoossa sijaitsevaa Turveradantietä ja osaa Mankkaanlaaksontiestä. Työssä tehdään RPA-aluksella ilmakuvaukset ortokuvaa varten. Kuvauksissa käytetään maastossa olevia signalointipisteitä sitomaan kuvat Espoossa käytettävään ETRS-GK25-tasokoordinaatistoon ja N2000-korkeusjärjestelmään. Tarvittavia työvaiheita on viisi: suunnittelu, maastotyöt, lento, aineiston käsittely ja analysointi.

Työn kohde on valittu huomioiden Trafan antamat RPA-aluksia koskevat säädökset. Kuvausalue soveltuu hyvin tutkimustyölle alueen monimuotoisuuden suhteen, koska alueella on korkeuseroja, tiestöä, rakenteita, puustoa ja muita kohteita. Mittaus tehdään Turun moottoritien ja Turveradantien liittymäkohdasta, alkaen Turveradantiestä ja ulottuen Mankkaanlaaksontiehen ja Koivu-Mankkaan tiehen. Tiealueen pituus on noin 2,7 km.

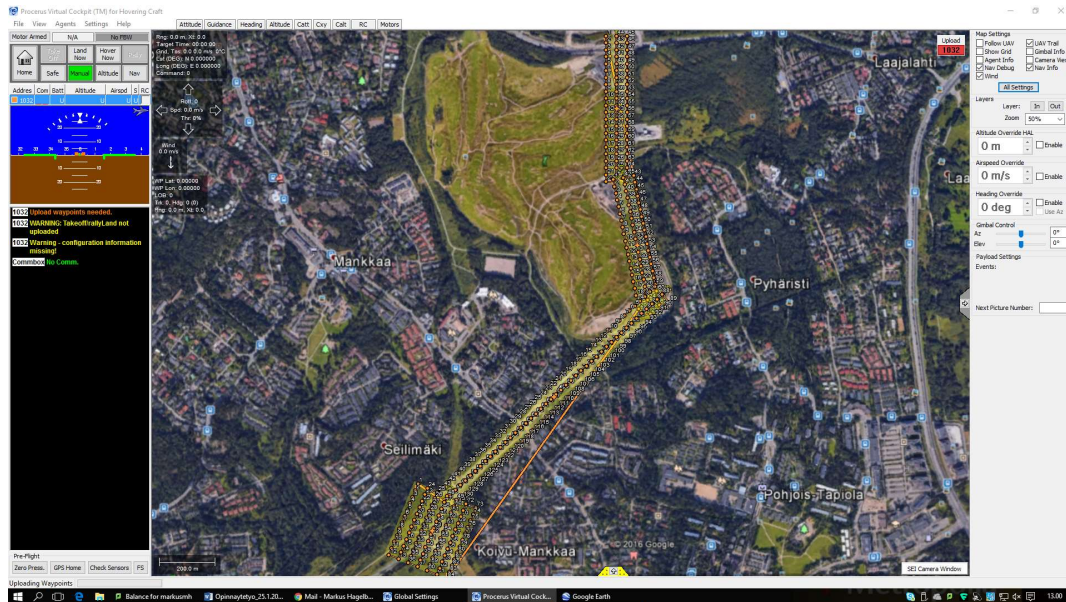
Työssä käytetään Metropolian Camflight x8 -multikopterin RPAS-kokonaisuutta lentämiseen. Kamerana käytössä on Sony Alpha 7r, jolle on rakennettu Camflight x8 -kopterin kanssa yhteen sopiva stabilisaattori eli gimbal. Maastotyöt tehtiin Espoon kaupungin kaulustolla ja alueelle rakennettiin 48 signaalipistettä alueen ollessa kapea ja pitkä.

## 4.2 UA-aluksen ilmakuvauksen työvaiheet

### 1. Lentosuunnitelman teko sopivalla sovelluksella (PC-ohjelma)

Lentosuunnitelma luotiin Virtual Cockpitiä käyttäen. Pohjana lentosuunnitelmalle käytettiin GoogleEarth-ilmakuvaa. Halutusta kuvausalueesta otettiin kuvankaappaus, jonka jälkeen kuvankaappaus tuotiin Virtual Cockpitiin (kuva 7). Tuodut kuvat sopivat hyvin lentosuunnitelman tekoon, koska ne ovat suoraan samassa koordinaatistossa kuin missä RPA-kopterin autopilotti toimii. Tässä tapauksessa koordinaattien sijainnit ilmoitetaan asteina ja minuutteina; esitystapa on 60° astetta 12 minuuttia pohjoista leveyttä ja 24° astetta 47 minuuttia itäistä pituutta. Tämän jälkeen ilmakuvan päälle tehtiin lentoreitti ja asetettiin kuvanottoaikat. Kuvanottoaikat asetettiin automaattista kuvausalueentekotoimintoa käyttäen, jossa Virtual Cockpit rakentaa suorakaiteenmuotoisen lentoalueen ja kuvanottoaikat, kun tiedoiksi syötetään haluttu lentokorkeus ja kuvien peittoalueet (alueen koko ja suorakaiteen kulma säädettiin vielä osumaan paremmin kohteen päälle). Näin kuvanottoaikat sidottiin sijaintiin. On huomioitava, että haluttu kuvausalue saa tarpeeksi suuren peittoalueen, että lento täyttää kokonaisuudessaan halutun kuvausalueen.

Tietojen syöttämisen jälkeen ennen lentoa lähtöä määriteltiin vielä Safe-komennot. Komennot määrittelevät, miten RPA-kopteri toimii virhetilanteiden ilmetessä ja missä hallintapisteet eli Rally ja Home sijaitsevat. Rally on sijainti, johon RPA-alus lentää vaakatasossa samassa korkeudesta, jossa RPA-alus sillä hetkellä on. Rally-piste voidaan määrittää ennen lentoa ja sitä voidaan muokata lennon aikana tarpeen tullen. Home-piste on nollasijainti, jonka kopteri luo, sen laitteiston käynnistyessä, kun se saa ensimmäisen fix-ratkaisun alla olevat koordinaatit. Tämä Home-sijainti on kopterin niin kutsuttu nollakorkeus, josta se laskee annetun lentokorkeuden. Home toimii myös autopilotin laskeutumispisteenä. Laskeutumiseen voidaan myös käyttää erillistä Landing-toimintoa, eli land now, jolloin kopteri laskeutuu maahan pystysuorasti siitä sijainnista, jossa se komennon aikana sijaitsee.



Kuva 7. Procerus Virtual Cockpit -lentosuunnitelma, jossa keltaisilla palloilla näkyy kuvien kuvantottoaikat. [Kuva: Markus Hagelberg]

## 2. Maastotyöt (signaalien rakentaminen ja mittaaminen)

Signaalit rakennettiin Espoon kaupungin kalustolla käyttämällä Trimble R10 GNSS -laitteistoa. Signaalit mitattiin 60 ebookin yhtäjaksoisella RTK-havainnoilla. Ajallisesti yhden mittauksen kestoksi tuli noin 60 sekuntia. Mittaus tehtiin pystyttämällä GSNN-laite stativilla tuettuna rakennettujen signaalien päälle. Signaalit mitattiin ainoastaan yhden keran, ja mittauksia tehtiin kahtena eri päivänä. Signaaleja rakennettiin yhteensä 48 kpl, joista 30 kpl osui kuvausalueelle ja loput sijoittuvat kuvausalueen ulkopuolelle tai olivat liikkuneet ennen kuvauksen suorittamista, vähentäen käyttökelpoisia signaalipisteitä (kuva 8). Rakenteellisesti signaalit olivat asfalttiin maalattuja valkoisia ristejä, joiden keskelle oli upotettu naula, tai irrallisia ristsignaaleja (kuva 9). Nämä liikuteltavat signaalit oli tehty puusta, vanerista, bitumipaperista ja naulasta, ja ne kiinnitettiin puupaaluilla maahan niiden paikoillaan pitämiseksi. Kummatkin signaalit olivat valkoisia ristejä, joiden leveys oli 5–7 cm ja pituus 60 cm.



Kuva 8. Signaalointipisteiden sijainnit mittausalueella. Huomataan, että osa signaalointipisteistä on jäänyt kuvien ulkopuolelle johtuen kuvausjonojen puutteellisesta määrästä, jolloin lentokuville mahtuva alue jäi liian kapeaksi. [Kuva: Markus Hagelberg]



Kuva 9. Kuvassa käytettyjen signaalien muoto, vasemmalla asfalttiin maalattu risti ja oikealla rakennettu siirrettävä signaali. [Kuva: Markus Hagelberg]

### 3. Lennon toteutus

Lentot suoritettiin 30.5.2016 aamupäivällä. Lentosää oli hyvä: taivas oli pilvetön ja tuuli kohtalainen (neljästä kuuteen metriä sekunnissa maanpinnalla). Valon osalta lentopäivä oli suotuisa, ilman pilvien tai kohteiden muodostamia varjoja, mikä antoi kuvattavalle tiealueelle tasaisen kontrastin. Lento toteutettiin kolmena erillisenä lentona yhden lentoajan ollessa noin 20–30 min. Ennen lentoa tarkastettiin hallintalaitteiden toimivuus sekä kopterin lentoonlähtövalmius. Tärkeimmät tarkastuskohdat ovat akut, kamera, Camflightin laskuvarjon avausmekanismin toiminta sekä lähtöpaikan ja laskeutumispaikan sopivuudet. Ennen lentoa tehtiin myös riskien arviointi mahdollisista vaaratilanteista alueella. Lentoa valvottiin kahden miehen voimin. Toinen valvoi PC:n välityksellä Virtual Cockpitillä lentoa seuraamalla automatiikkatoimintaa ja että lento etenee suunniteltua lentoreittiä pitkin ja kameran ottamat kuvat tulee otettua oikeassa kulmassa ja oikealla hetkellä myös akkujen varaustilaa seurattiin. Toinen valvojista hallinnoi radio-ohjainta sekä tähysti kopteria. Lennon aikana ei tapahtunut huomattavia virheitä.

### 4. Lennon jälkeen tehtävät tarkastukset

Lennon jälkeen tehtiin tarkastus, jossa katsottiin, että kamerassa oli oikeita kuvia ja että kuvat olivat oikealta alueelta. Oli mahdollista, että lentoreitti olisi ollut esimerkiksi 25 metriä liian sivussa. Silmämääräisesti tätä ei huomaa lennon aikana, eikä lentosuunnitelmaa tehdessä GoogleEarthin pohjalta, joten alueen rajaaminen olisi voinut mennä viikaan. Tarkastamalla kuvat voitiin todeta, oliko reunoilta tullut tarpeeksi kuvia. Muita huomattavia lennon jälkeisiä tarkastuksia ei tarvitse tehdä, paitsi laittaa kopteri ohjeiden mukaiseen kuljetuskuntoon ja tarkastaa se silmämääräisesti mahdollisilta vioilta.

#### 4.3 Käytetty laitteisto

Ilmakuvaus tehtiin käyttämällä Camflight x8 -multikopteria. Laitetta valmistetaan Norjassa Camflight-konseptin nimissä, jossa vuonna 2012 julkaistiin yrityksen ensimmäinen multiroottorirobotti tuottamaan ortokuvia ja maastomalleja. Itse laitteisto lentää kahdeksalla moottoriyksiköllä, joista jokaisessa on itsenäisesti toimiva propelli. Propellit sijaitsevat pareittain päällekkäin neljän varren päässä. UA-kopteri on halkaisijaltaan 120 cm ja korkeudeltaan 45 cm, ja täyden kopterin massa on 10 kg ja kantokyky 7,5 kg. Kopteri

saa virtansa neljästä 11 000 mAh 8S -akusta, joiden kokoa voidaan verrata pieneen tiiliskiveen. Tällöin ihanteellisessa lentoympäristössä turvallinen luvattu lentoaika on 60 minuuttia vauhdin ollessa 35 km/h, jolloin tyypillinen mittausnopeus on 10 m/s kantomasan ollessa 1,5 kg. Yleisenä turvallisena lentoaikana tuulen ja lämpötilojen ollessa vaihtelevia voidaan pitää 45 minuuttia. Esitteen mukaan Camflight x8 pystyy tuottamaan käyttökelpoista kuvausmateriaalia vielä tuulessa 12 m/s, mutta tuulen voimakkuuden ylitäessä 12 m/s lentoturvallisuus heikkenee, jolloin tarkan mittausaineiston keruu voidaan jättää väliin. Myös muut sääolosuhteet tulee huomioida lentoajassa. Vaikka laitteisto ja kamera toimivat vielä  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n kylmyydessä, ei sen lentoaika ole sama kuin lämpötilan ollessa  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  tai enemmän. Laitteelle suositellut käyttölämpötilat ovat  $-20\dots+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sateeseen laitetta ei ole myöskään tehty, koska laitteen osat on tehty painoa silmällä pitäen ja sähköisten osien eristykset on pidetty pieninä. Laite kestää kevyen sateen, mutta sateella lentäminen ei ole suositeltavaa. Sateen alkaessa kuvauksen ollessa käynnissä suositellaan laite ohjattavaksi alas.

Camflight 8x:n toiminnan pohjana on Lockheed Martin Procerus Kestrel Autopilot v3.1 -laitteisto. Sen ytimenä on 32-bittinen 200 MHz:n prosessori. Itse UA-kopterin ja lennonohjaamon välillä tieto kulkee 2 400 MHz:n radiotaajuudella toimintaetäisyyden ollessa maksimissaan 2–4 kilometriä. Laitteisto pystyy toimimaan samanaikaisesti 132 kanavalla, mahdollistaakseen yhtenäisen seurannan näkyviin satelliitteihin. Itse lennonaikainen sijaintitarkkuus, jolla Camflight 8x-kopteri suorittaa tehtävää, on GPS:n tuottama absoluuttinen tarkkuus noin 3–10 metriin. [2]

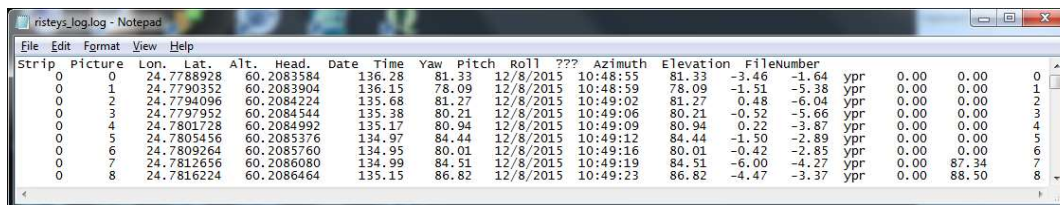
Sony Alpha 7r on lennon aikainen kuvauskamera, jonka yhteydessä toimii kameralle erikseen kustomoitu gimbal-vakautinjärjestelmä. Tämän tarkoituksena on lennon aikaisen kopterin kallistumisten kompensointi, pitämällä pystykulma lähellä nollaa astetta. Kameran kenno on 35 mm Exmor CMOS sensor, jolla on tehollisia pikseleitä 36,4 Mpx ja jonka etsimenä on 0,5 tuuman elektroninen värietsin. Kameralle tehtiin erillinen kameran kalibrointi, jonka kalibroitidistuksessa olevia korjausarvoja työssä käytettiin.

#### 4.4 Aineiston työstö

Kuvauksen jälkeen tehtävä aineiston käsittely alkoi kuvien ja lokitietojen ulosotolla kamerasta ja Virtual Cockpitistä. Kameran ottamia kuvia saatiin lennoista yhteensä 391 kpl,

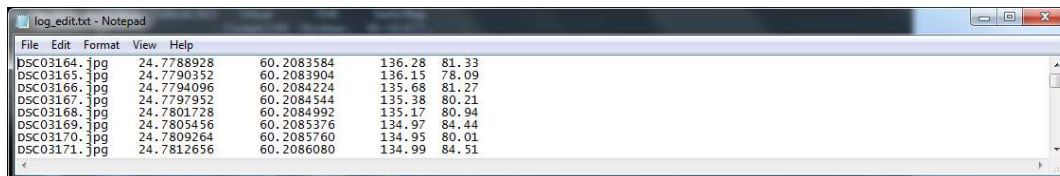
joita aineiston työstössä käytettiin. Työvaiheet aineiston käsittelyssä olivat orientointi, pistepilven, korkeusmallin ja ortokuvan teko sekä havaintopisteiden vertailu.

Aineiston käsittely signaalipisteitä käyttämällä alkoi Agisoftilla, kun lokitiedosto ja kuvat oli saatu oikeaan muotoon. Kuvien formaattina käytettiin tällä kertaa jpg-kuvamuotoa ja lokitiedoston muotona txt-tekstitiedostoa. Tekstitiedoston työstössä käytettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmistoa poistamaan tarpeeton tieto, kuten päivä, aika ja erilliset korkeus- ja kallistustiedot. (Kuva 10.) Tarpeellista tietoa lokitiedostossa ovat kuvien nimet, sekä kuvien X- (longitude) Y- (latitude) ja Z-(altitude) tiedot (kuva 11).



Strip	Picture	Lon.	Lat.	Alt.	Head.	Date	Time	Yaw	Pitch	Roll	Azimuth	Elevation	FileNumber
0	0	24.7788928	60.2083584	136.28	81.33	12/8/2015	10:48:55	81.33	-3.46	-1.64	ypr	0.00	0.00
0	1	24.7790352	60.2083904	136.15	78.09	12/8/2015	10:48:59	78.09	-1.51	-5.38	ypr	0.00	0.00
0	2	24.7794096	60.2084224	135.68	81.27	12/8/2015	10:49:02	81.27	0.48	-6.04	ypr	0.00	0.00
0	3	24.7797952	60.2084544	135.38	80.21	12/8/2015	10:49:06	80.21	-0.52	-5.66	ypr	0.00	0.00
0	4	24.7801728	60.2084992	135.17	80.94	12/8/2015	10:49:09	80.94	0.22	-3.87	ypr	0.00	0.00
0	5	24.7805456	60.2085376	134.97	84.44	12/8/2015	10:49:12	84.44	-1.50	-2.89	ypr	0.00	0.00
0	6	24.7809264	60.2085760	134.95	80.01	12/8/2015	10:49:16	80.01	-0.42	-2.85	ypr	0.00	0.00
0	7	24.7812656	60.2086080	134.99	84.51	12/8/2015	10:49:19	84.51	-6.00	-4.27	ypr	0.00	87.34
0	8	24.7816224	60.2086464	135.15	86.82	12/8/2015	10:49:23	86.82	-4.47	-3.37	ypr	0.00	88.50

Kuva 10. Camflight x8 -lennon ulosotettu raaka lokitiedosto. [Kuva: Markus Hagelberg]



File	Lon.	Lat.	Alt.	Yaw	Pitch
DSC03164.jpg	24.7788928	60.2083584	136.28	81.33	
DSC03165.jpg	24.7790352	60.2083904	136.15	78.09	
DSC03166.jpg	24.7794096	60.2084224	135.68	81.27	
DSC03167.jpg	24.7797952	60.2084544	135.38	80.21	
DSC03168.jpg	24.7801728	60.2084992	135.17	80.94	
DSC03169.jpg	24.7805456	60.2085376	134.97	84.44	
DSC03170.jpg	24.7809264	60.2085760	134.95	80.01	
DSC03171.jpg	24.7812656	60.2086080	134.99	84.51	

Kuva 11. Editoitu lokitiedosto, jossa ilmenevät likimääräiset kuvien sijainnit sekä lentokorkeus ja heading. [Kuva: Markus Hagelberg]

Itse aineiston käsittely Agisoftilla tehtiin noudattamalla Agisoftin käyttäjäopasta pistepilven ja ortomosaikin tekemiseen. Aluksi määritettiin asetukset, joista yksi keskeisimmistä oli CPU-grafiikkakortin käyttäminen laskennassa. Seuraavaksi uuteen työhön tuotiin kaikki lennon aikaiset kuvat ja tämän jälkeen kuville tuotiin niiden lennon aikainen lokitiedosto. Lokitiedoston tuomisen yhteydessä tulee määrittää koordinaattijärjestelmän pohja, jossa työskennellään. Tässä vaiheessa työhön määriteltiin WGS 84 -koordinaattisto.

Seuraavaksi työssä tehtiin ensimmäinen pidempikestoinen prosessi (Align Photos), jossa Agisoft laskee kuvien likimääräiset kuvanottoaikat eli tässä tapauksessa kuvien raakasijainnit suhteessa toisiin kuviin. Vaiheen toiminta perustuu yhtäläisyyksien etsimi-

seen niiltä kohdin, joissa kuvat menevät päällekkäin. Tämän vaiheen kesto riippuu pitkälti siitä, kuinka paljon kahdesta eri kuvasta halutaan etsiä yhtäläisyyksiä (eli tässä tapauksessa pikseleitä). Työskentelyaseman teho puolestaan määrittää, kuinka monta pikseliä kuvista voidaan etsiä ja millaisia arvoja laskennassa voidaan käyttää. Tämä vaihe kesti noin 60 minuuttia. Tämän jälkeen aineistosta saatiin harva värillinen pistepilvi kuvaamaan aluetta.

Kuvien sijainnin määrittelemisen jälkeen päästiin orientoimaan kuvat signaalipisteiden avulla. Tätä työvaihetta voidaan pitää puolimanuaalisena. Aluksi valitaan jokin kuva, jossa nähdään signaalipiste, ja kyseisen signaalin keskikohta osoitetaan ja merkataan. Tämän jälkeen Agisoft pystyy automaattisesti etsimään kaikki loput kuvat, joissa valittu signaalipiste mahdollisesti näkyy, sekä tekemään alustavan merkinnän signaalien keskikohtaan. Tarkkuuden maksimoimiseksi tulee kaikki pisteet käydä läpi ja korjata osoitettavaan signaalin keskikohtaa. Tämän jälkeen päästään tuomaan signaaleille maastossa mitatut sijaintitiedot. Tiedot tuotiin tekstimuotoisina (txt) ja niiden koordinaattijärjestelmä määritettiin (kuva 12). Tässä tapauksessa signaalien koordinaatit olivat ETRS89 / GK25FIN (EPSG:3879) koordinaattijärjestelmässä. Huomioitavaa tässä vaiheessa oli se, että ennen kuin pisteiden tiedot ladattiin Agisoftiin, tuli osoitetut signaalipisteet nimetä vastaamaan tuotavan tiedoston pistenumeroita.

Signal Number	X-coordinate	Y-coordinate	Z-coordinate	Value 1	Value 2
1	6674665.992	25487538.913	2.883	0	0
2	6674718.606	25487493.447	2.572	0	0
3	6674767.152	25487527.991	2.869	0	0
4	6674727.986	25487573.450	3.664	0	0
5	6674735.256	25487545.299	3.559	0	0
6	6674893.223	25487645.218	3.463	0	0
7	6674910.805	25487627.802	3.400	0	0

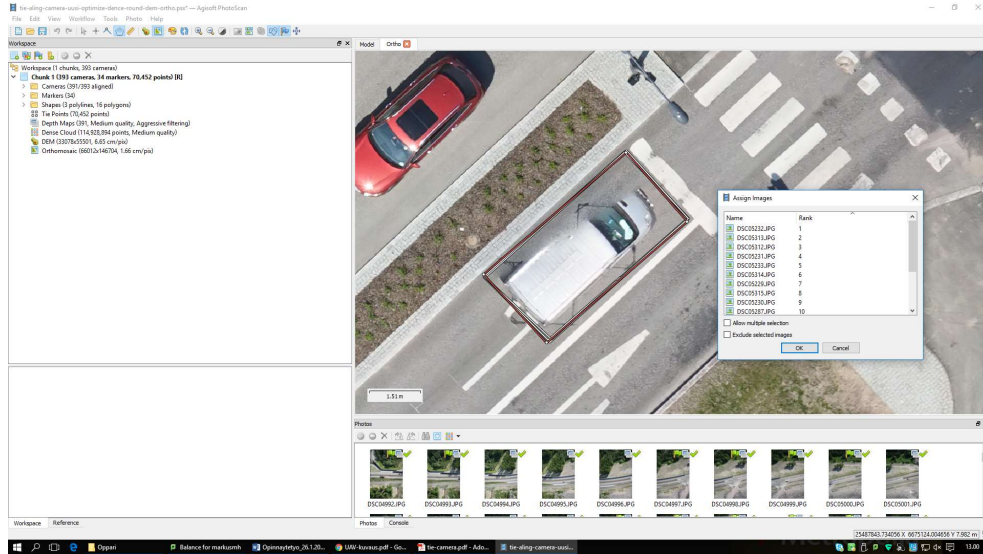
Kuva 12. Signaalointipisteiden helpoin tuontimuoto on tekstimuotoinen, jossa on signaalin numero ja sijaintitiedot. [Kuva: Markus Hagelberg]

Signaalointipisteiden tuonnin jälkeen tehtiin optimointi eli orientointi. Tässä vaiheessa ennen tiheän pistepilven laskemista pystytään tarkistamaan sijainti- ja korkeusvirheet sekä tekemään mahdolliset säädöt sekä tarkistukset ennen pistepilven tekoa. Tässä työvaiheessa lasketaan kuville kuvien sijainti ja niiden suhteet toisiinsa. Tässä työssä kuvien sijainnin määrittämiseen käytettiin signaalointipisteitä. Orientointivaiheessa myös määritellään kameran kalibrointi-arvot, joita Agisoft käyttää kuvien sijaintia laskiessa. Tässä tapauksessa käytettiin kahta eri optimointia. Toisessa optimoinnissa käytettiin kameran

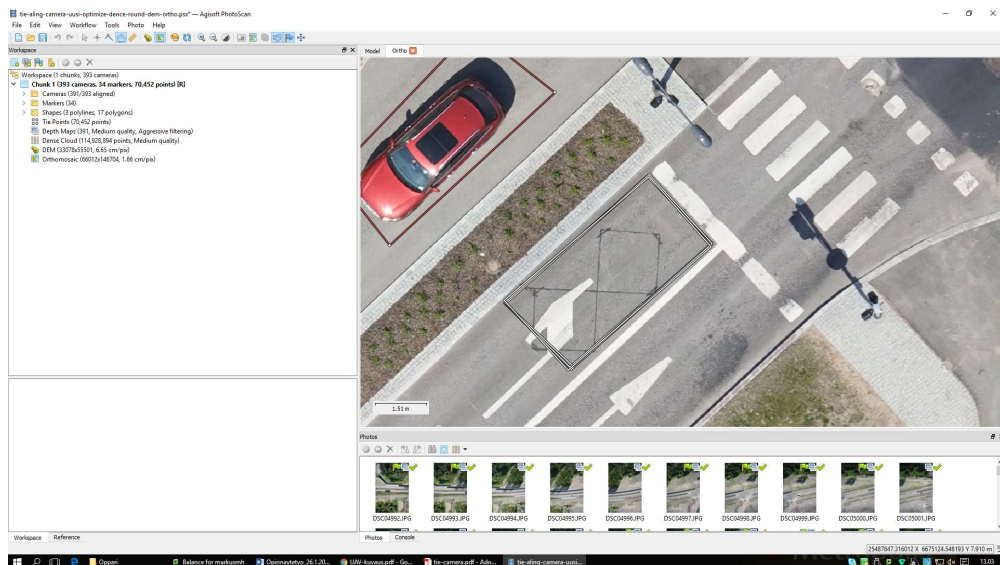
erillisiä kalibrointiarvoja (laskenta 1) ja toisessa Agisoftin laskemia kalibrointiarvoja (laskenta 2). Näiden kahden optimoinnin jälkeiset virheet poikkesivat hieman toisistaan. Erillisen kameran kalibrointitodistuksen antamien arvojen optimoinnin (laskenta 1) jälkeiset virhearvot olivat X:n osalta 1,0 cm, Y:n osalta 1,0 cm ja Z:n osalta 0,7 cm. Agisoftin laskemien kameran kalibrointiarvojen pojalta (laskenta2) saatiin seuraavat virhearvot: X 1,7 cm, Y 2,0 cm ja Z 3,6 cm. Orientointiarvojen katsottiin olevan riittävän hyviä jatkon kannalta.

Kuvien orientoinnin jälkeen suoritettiin tiheään pistepilven laskenta. Pistepilvi tehtiin Agisoftin Build Dense Point Cloud -toiminnolla, jossa pistepilven tiheyden laaduksi annettiin 'medium'. Tämä työvaihe oli prosessissa työläin laskennallisesti ja vaatii koneelta laskentakapasiteettia, varsinkin silloin kun halutaan korkealaatuinen pistepilvi. Ajallisesti tämä prosessi kannattaa suorittaa yötä vasten. Tässä työssä pistepilvi tehtiin kahteen kertaan käyttämällä aikaisemmin mainittuja orientointeja. Kummankin tiheään pistepilven teossa meni noin 3–4 tuntia, ja tiheään pistepilven pisteiden lukumäärät olivat noin 115 000 000 pistettä pistepilveä kohden. Pistepilvet tallennettiin LAS-tiedostomuotoisina.

Tiheään pistepilven jälkeen luotiin korkeusmalli ortokuvan laskentaa varten, tässä tapauksessa DEM eli digitaalinen korkeusmalli. DEM-korkeusmallin luonnissa käytettiin tiheään pistepilven maanpinnan pisteitä. Tämä DEM-korkeusmalli on rasterikuva, jossa jokaisella pikselillä on korkeustieto mukana. Tämä malli sidottiin erikseen ETRS89 / GK25FIN (EPSG:3879) -koordinaattijärjestelmään. DEM-korkeusmalli toimii pohjana ortokuvalle, jonka päälle ortokuva rakentuu. Ortokuvaa editoitiin vielä Agosoftin SeamlineEditing -työkalulla, jossa liikkuvat elementit (esim. autot) poistettiin (kuva 13). Tämä työvaihe toimii siten, että paikallaan olevat kohteet näkyvät samassa sijainnissa useassa kuvassa, kun taas liikkuvat kohteet esiintyvät osassa kuvista. Tällöin ortokuvaa muunnetaan siten, että kohdasta, josta halutaan poistaa liikkuva kohde, käytetään toista vastaavaa kuvaa samasta kohtaa. Näin saadaan poistettua turhat kohteet, jolloin kuvasta tulee "puhtaampi" (kuva 14).



Kuva 13. Kuvassa esitetään Agisoftilla tehtävää kuvan "puhdistusta". Haluttu alue määritetään draw polygon -työkalulla, minkä jälkeen ohjelma automaattisesti etsii kaikki kuvat, joissa valittu alue on kuvattuna. Näistä kuvista valitaan kuva, joka kuvastaa aluetta mahdollisimman hyvin. [Kuva: Markus Hagelberg]



Kuva 14. Kuvassa esitetään Agisoftin ortokuvan editointia, kun liikkuva kohde on poistettu kuvasta. [Kuva: Markus Hagelberg]

Tämä ortokuva tulostettiin bigTiff-muotoisena 80 %:n laatuksena alkuperäisistä kuvista. Tämän jälkeen bigTiff-muotoinen kuva muunnettiin vielä FME Workbench -formaatin-muunnin sovelluksella JPEG2000-kuvaksi. [Liite 1, 2,]

#### 4.5 Tulokset

Mitatun aineiston tarkkuus saatiin selvitettyä käyttämällä 3D-Win-ohjelmaa, johon tuotiin kuvausaineiston pohjalta tehty tiheäpistepilvi sekä ortokuva. Pistepilvi tuotiin 3D-Win-ohjelmaan LAS-tiedostomuotoisena käyttäen joka kymmenettä pistettä alkuperäisestä pistemäärästä, eli n. 11 491 300:aa pistettä. Tämä pistetiheys riitti hyvin selvittämään saadun aineiston korkeustarkkuus h (vastaava Z). Ortokuva tuotiin EWC-taustakuvana pistepilven pohjalle, jolloin siitä saatiin N- (etelä-pohjoinen) ja E- (itä-länsi) koordinaatit (vastaavat X ja Y). Kuvausaineiston tarkkuus saatiin selville vertaamalla aineistosta saattujen havaintopisteiden koordinaatteja maastossa mitattuihin koordinaatteihin, ja aineiston laatu saatiin määritettyä vertaamalla aineistoa Espoon kaupungin kantakartta-aineistoon.

Aineistojen sijaintitarkkuudeksi muodostui havaintopisteiden osalta keskiarvoksi tasossa  $\pm 3$  cm ja korkeudessa  $\pm 2$  cm. Tulosten tarkkuudessa ei ollut merkittäviä eroja eri orientointien välillä. Laskennassa, jossa käytettiin kamaran erillisiä kalibrointitietoja (laskenta 1), saatiin keskivirheeksi tasossa E 1,5 cm ja N 2,1 cm sekä korkeudessa H 2 cm. Agisoftin laskemien kalibrointiarvojen (laskenta 2) pohjalta saadut tulokset olivat tasossa E 2,4 cm ja N 3,3 cm, sekä korkeudessa H 2 cm. Työssä huomattiin karkea virhe havaintopisteessä 40, joka sijoittui kuvausalueen pohjoispään reunaan. Kyseisen havaintopisteen sijaintipoikkeama ortokuvassa oli N 1,76 m ja E 0,18 m ja pistepilven korkeudessa 1,04 m, kun ortokuvan ja pistepilven teossa käytettiin kameran erillisiä kalibrointitietoja. Agisoftin laskemia kalibrointiarvoja käyttäessä havaintopisteen sijainnin poikkeamat olivat tasossa N 0,15 m, E 0,27 m ja korkeudessa -1,06 metriä. Seuraavaksi pohjoisimman havaintopisteen 33 keskivirhe oli tasossa 2,5 cm ja korkeudessa 1,5 cm.

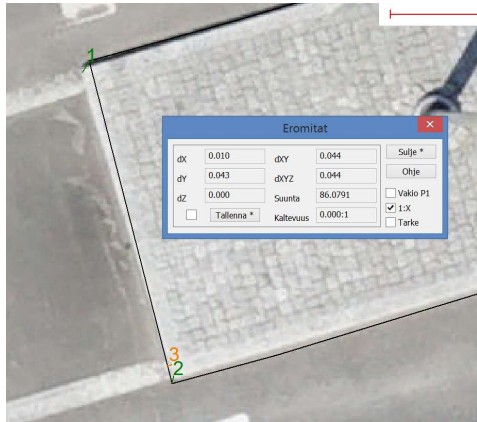
Tuotettu havaintoaineisto taittuu kuvausalueen pohjoispään osalta. Tämä karkea sijaintipoikkeama voi johtua kahdesta tekijästä: signaalin sijoittumisesta kuvausalueen reunaan ja/tai kuvausalueen pohjoispään huonosta signalointigeometriasta. Lähtökohtaisesti ilmakuvauksessa reuna-alueet ovat virheille altista aluetta, johtuen kuvien vähäi-

sestä määrästä, jolloin reuna-alueiden osalta ei saada riittävästi havaintoja. Toinen mahdollinen virheen syy on signalointien huono geometria. Huonon geometrian voidaan katsoa aiheuttaneen virheitä, koska lähettyvillä olleet signalointi pisteet, jotka olisivat vaikuttaneet kuvia orientointivaiheessa. Jäivät kuvausalueen ulkopuolelle, jättäen kuvausalueen pohjoispäädyn keikkuvaksi. Tällöin havaintopiste 40, jota orientoinnissa ei käytetty jäi alueelle, jossa virhettä ilmeni. Tätä virhettä korostaa kuvausalueen pitkä ja kapea muoto. Pisteet muodostivat pitkulaisen muodon, joka pistegeometrialta ei ole optimaalinen vaihtoehto.

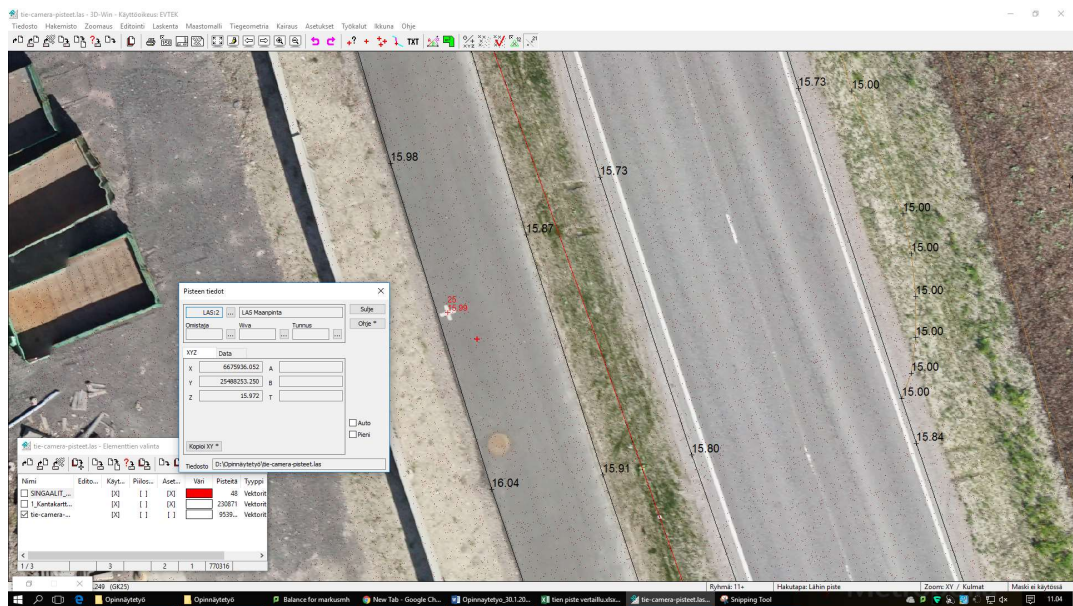
Aineiston vertaamisessa Espoon kantakartta-aineistoon tulee huomioida Espoon Teknillisen keskuksen kantakartan kartoitusohjeet. Kartoitusohjeissa mitatun pisteen pistevirhetarkkuuden on oltava alle 10 cm. Lisäksi epämääräisten kohteiden pistevirhe voi olla 25 cm. Mitattua aineistoa verrattiin korkeuden osalta Espoon kantakartassa oleviin maanpinnan korkeus pisteisiin. Pisteitä verrattiin kummankin laskennan osalta 45 kpl. Korkeuspisteitä verrattiin tuomalla Espoon kantakartta laskettujen pistepilvien päälle. Tällöin saatiin Espoon kantakartan korkeus pisteiden ympärille laskettujen pistepilvien pisteet. Näistä noin 10 pisteen ryhmistä valittiin korkeuden osalta se piste, joka kuvasti ryhmän keskikorkeutta. Tätä saatua korkeutta verrattiin Espoon kantakartan sen kohdan maanpinnankorkeuspisteen korkeuteen.

Laskennan 1 pohjalta saadun pistepilven osalta korkeuspisteiden keskikorkeuseroksi saatiin 6,7 cm. Laskennan 2 pohjalta saadun pistepilven keskikorkeuseroksi saatiin 6,0 cm, kun otettiin mukaan koko mittausalue. Vertailu tehtiin myös jättämällä mittausalueen pohjoispäädyn pisteitä pois. Tällöin havaintoerojen keskiarvoksi muodostui laskennan 1 osalta 2,0 cm, ja laskennan 2 keskiarvo eron osalta oli 1,8 cm. Nämä erot ovat pienemmät kuin Espoon kantakartan kartoitusohjeissa annettu 10 cm:n pistevirhe. Korkeuspisteiden eron osalta huomattiin, että se kasvaa mittausalueen pohjoisessa päädyssä, havaintopisteessä 40 siitä syystä huomattiin karkea virhe. Mitatun aineiston korkeutta tarkasteltiin myös silmämääräisesti pistepilven pohjalta tehtyä DEM-korkeusmallia käyttäen. DEM-korkeusmalli kuvastaa rasterimuotoisena värikuvana korkeuseroja huomattiin, että kuvausalueen keskellä tien taitekohdassa (jossa kaksi kuvausaluetta yhdistyy) on DEM-korkeuskuvassa tasaisen tien kohdalla röpelöä. Tämä tarkoittaa, että tässä tien alueessa pistepilven pisteiden korkeudet eivät ole tasassa, vaan pisteiden välillä pistepilvessä on korkeuseroa jota ei kuuluisi olla.

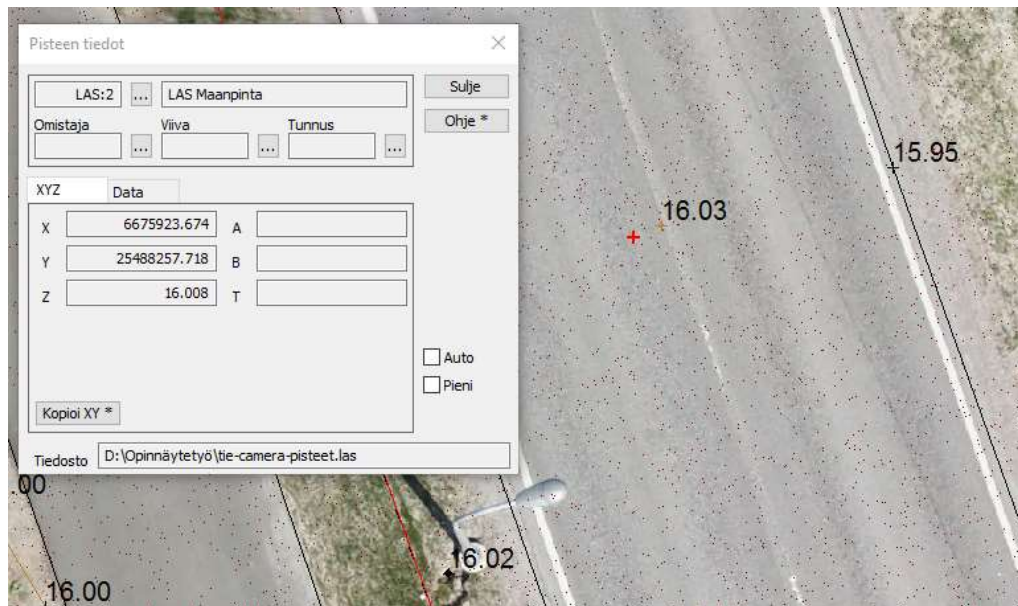
Tason X Y osalta ero selvitetiin Espoon kantakartan avulla vertaamalla, miten hyvin kantakartan kohteet osuvat ortokuvan päälle, kuten tien reunaviivat. Tämä vertailu on vain suuntaa antava, koska kantakarttaa tehdessä voidaan tietyt kohteet kartoittaa tulkinanvaraisesti, ja kohteiden kartoittamisen virhe voi olla 10 cm. Aineistoja vertaamalla huomattiin, että osassa kohtaa tien reunaviivat osuvat hyvin yhteen ja osassa ne eivät osuneet. Tästä syystä maastossa käytiin vielä erikseen mittaamassa muutamia kaistanjakajia RTK-mittauksen avulla kiinni ja kiinnitettiin huomiota kohteen oikean kohdan sijaintiin. Näillä kartoitusmittauksilla saatiin verrokkiaineistoa siihen, ovatko Espoon kantakartan kohteiden mittauspisteiden sijainnit tarkkuuden osalta levinneet sallitun 10 cm:n sisään, vai onko ortokuvien kohteissa vääristymiä, esimerkiksi kaistan jakajien kanttikivien kulmassa. Näitä aineistoja verrattiin päällekkäin, jolloin huomattiin, että erikseen RTK-mittausta käyttäen kaistanjakajat osuivat paremmin yhteen orthokuvien kanssa kuin Espoon kantakartan kaistanjakaja viivat. Sijainti eroa mitattiin myös 3D-Win-ohjelman eromittaus työkalua käyttäen, jolloin Espoon kantakartan ja ortokuvien välillä ero oli mittausalueen etelä ja keskiosissa 1 cm – 5 cm. Tämän eron voidaan katsoa johtuvan siitä, miten itse Espoon kantakartta on mitattu huomioiden 10 cm:n raja arvo. Mittausalueen pohjoispäädyssä kuitenkin voidaan todeta ortokuvan sijainnin alkavan tuottamaan virhettä. Laskennan 1 osalta alueen pohjoisimman päädyn suurimmaksi virheeksi muodostui n. 1,8 m ja laskennan 2 osalta vastaava kohdan virhe oli n. 0,4 m. Näiden virheiden voidaan katsoa johtuvan aikaisemmin mainitusta pohjoispäädyn signalointipisteiden puutteesta, joka todettiin havaintopisteen 40 lähetyvillä. Syytä siihen ei tiedetä, miksi laskennan 1 ja laskennan 2 välillä ero on huomattava ja vielä niin päin, että laskenta 2:n virhe on pienempi. Oletuksena on, että laskenta 1:ssä on käytetty kameran erillisiä kalibrointi-arvoja. Syntyisi tarkempi lopputulos, kun kamerasta johtuvat virheet on korjattu. (kuvat 15–31) [20] [Liitteet 1, 2, 3, 4,]



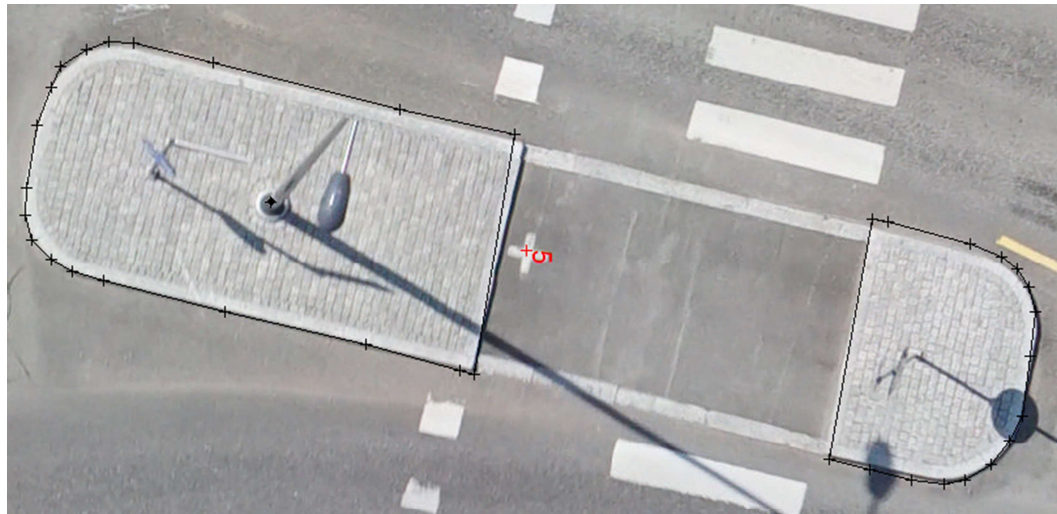
Kuva 15. Kuvassa mitta-alueen eteläpäädyssä otettuja eromittoja Espoon kantakarttaan. Kuvassa ortokuvan ja kaistan jakajan reunaviivan välissä on kohdasta riippuen 1–4 cm:n ero. Tämän voidaan katsoa osuvan Espoon kantakartan teon ohjeistuksen mukaisen tarkkuusvaatimuksen sisään. [Kuva: Markus Hagelberg]



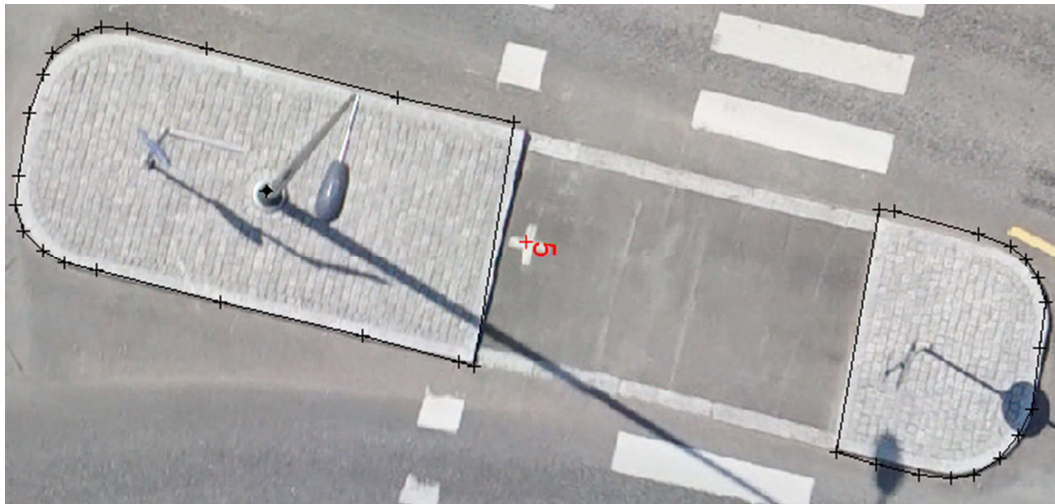
Kuva 16. Kuvakaappaus 3D-Win-ohjelmasta: ortokuva, jonka päällä on Espoon kaupungin kantakartta ja mitattu pistepilvi. Verrataan pistepilven tien pisteiden korkeutta havaintopisteseen. [Kuva: Markus Hagelberg]



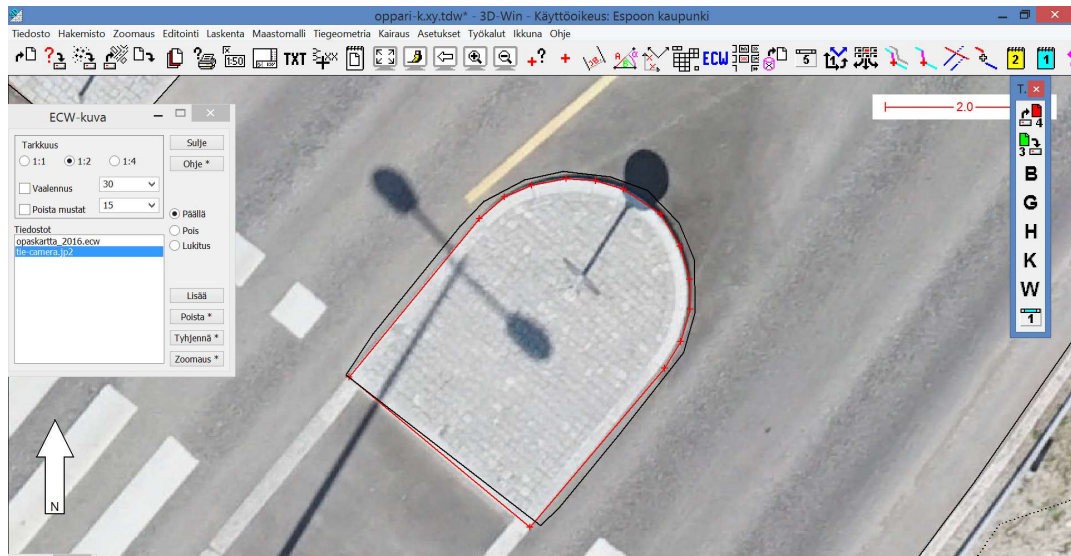
Kuva 17. Kuvakaappaus 3D-Win-ohjelmasta, jossa havainnollistetaan pistepilven korkeutta Espoon kaupungin tuottamalla kantakartta-aineistolla. Punaisella ristillä pistepilven pisteen korkeus on 16.008 m ja vieressä olevan Espoon kantakartta aineiston maanpinnan korkeuspisteen korkeus on 16.030 m. Korkeuseroa on n. 2 cm. [Kuva: Markus Hagelberg]



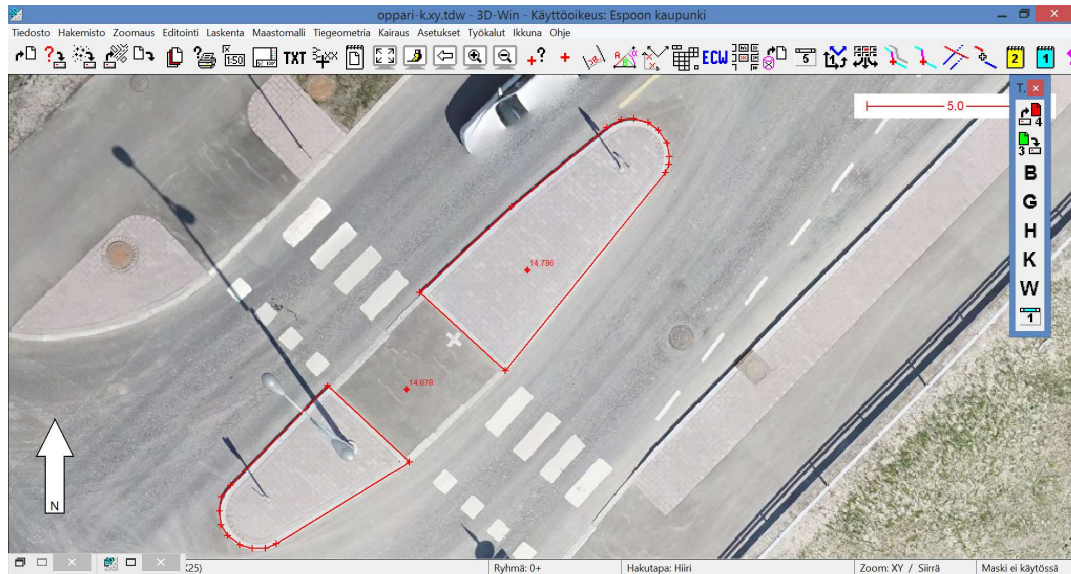
Kuva 18. Kameran erillisillä kalibrintiarvoilla muodostettu ortokuva. Espoon kantakartta mustalla, signaali 5 punaisella. [Kuva: Markus Hagelberg]



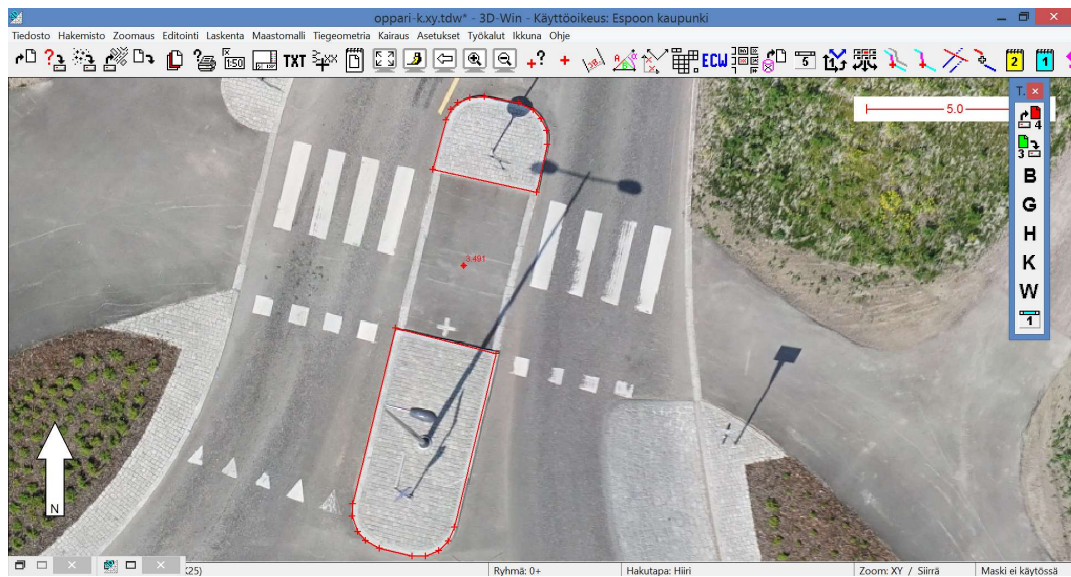
Kuva 19. Agisoftin laskemien kamerakorjausten ortokuva. Espoon kantakartta mustalla, signaali 5 punaisella. [Kuva: Markus Hagelberg]



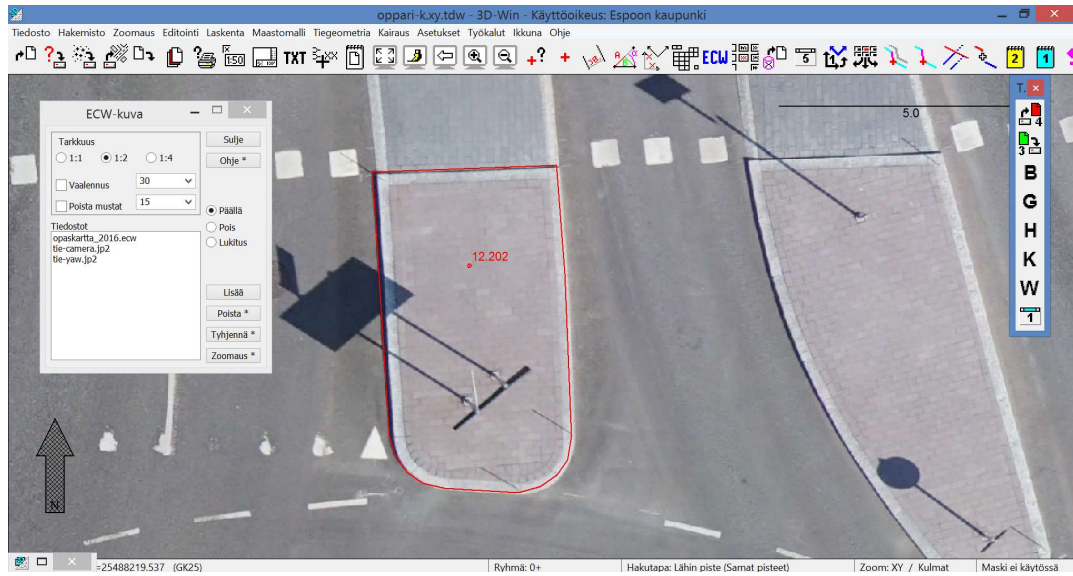
Kuva 20. Punaisella RTK-mittauksella tehty kaistanjakajan kartoitus ja mustalla Espoon kaupungin kanta kartan kaistajakajan viiva. Huomataan, että Espoon kantakartassa oleva reunakiven viiva on suuntaa antavampi kuin myöhemmin RTK-mitattu reunakiven viiva. [Kuva: Markus Hagelberg]



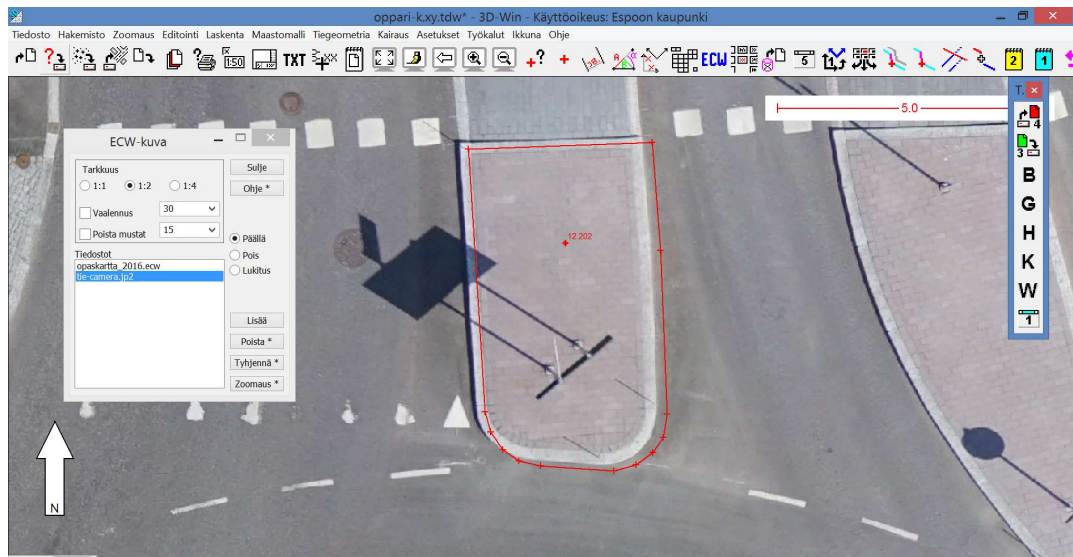
Kuva 21. Kuvassa punaisella on esitetty jälkikäteen tehty tarkempi RTK-kartoitusmittaus. Tässä huomataan ortokuvan kaistanjakajan reunojen osuvan hyvin mitatun reunakiven kanssa. Kaistanjakaja on tiealueen puolivälissä. [Kuva: Markus Hagelberg]



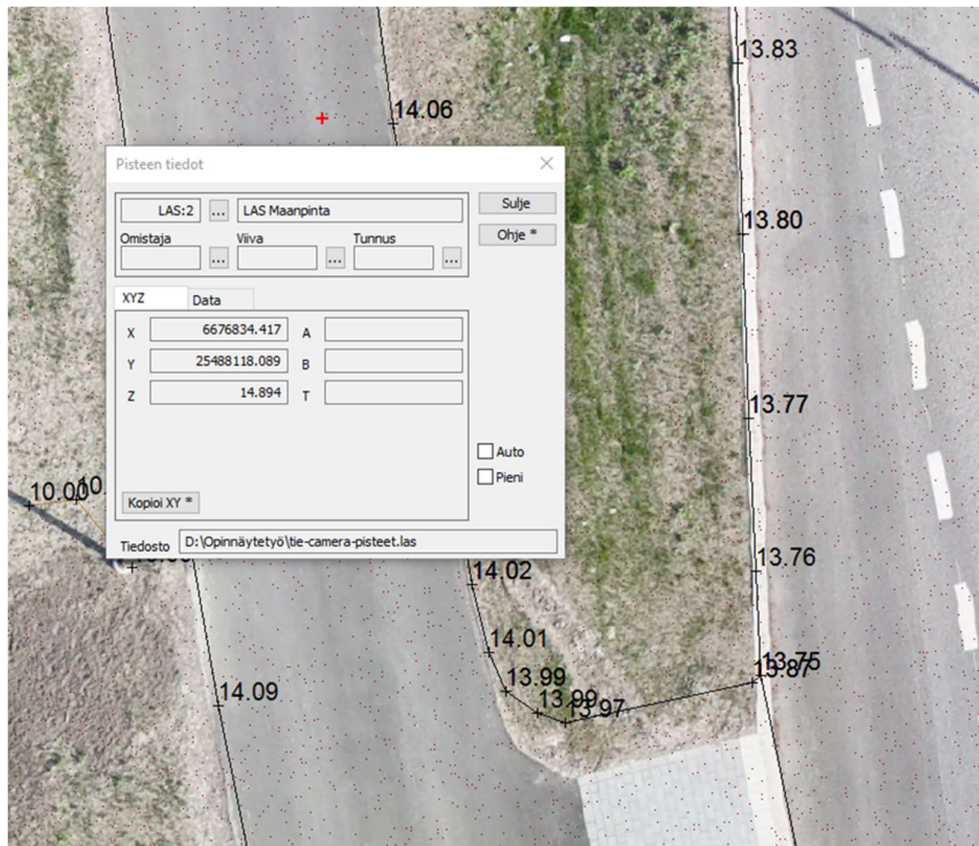
Kuva 22. Punaisella tarkempi RTK-mittaus tien eteläpäädyssä olevasta kaistanjakajasta. Tässä huomataan reunakiven sijainnin osuvan yhteen ortokuvan kanssa. [Kuva: Markus Hagelberg]



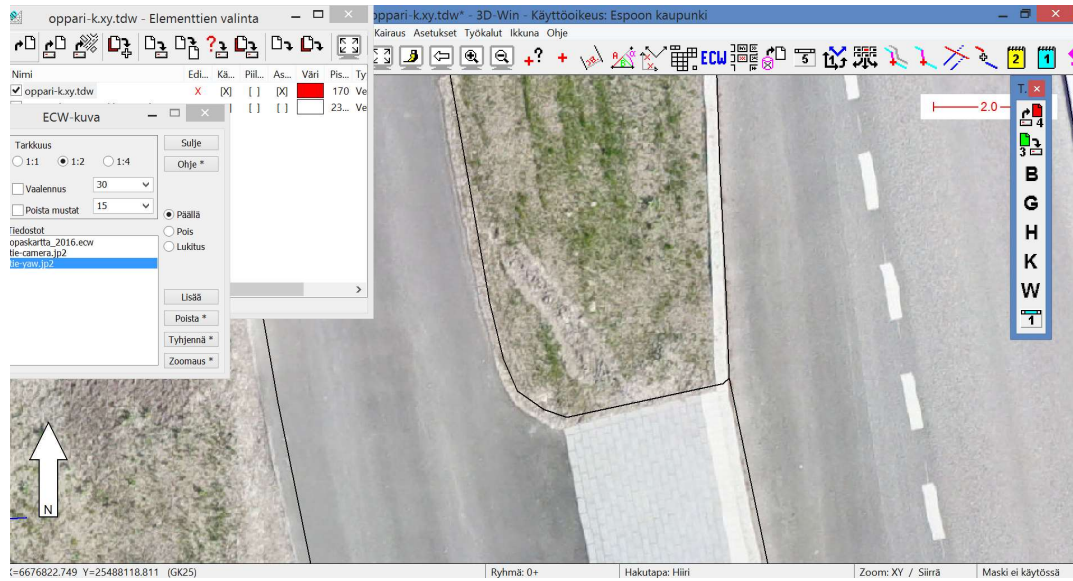
Kuva 23. Punaisella RTK-mittaus kaistanjakajasta ja laskennan 2 ortokuva taustalla. Huomataan, että virhe ei ole niin suuri kuin kuvassa 25 laskennan 1 virhe. [Kuva: Markus Hagelberg]



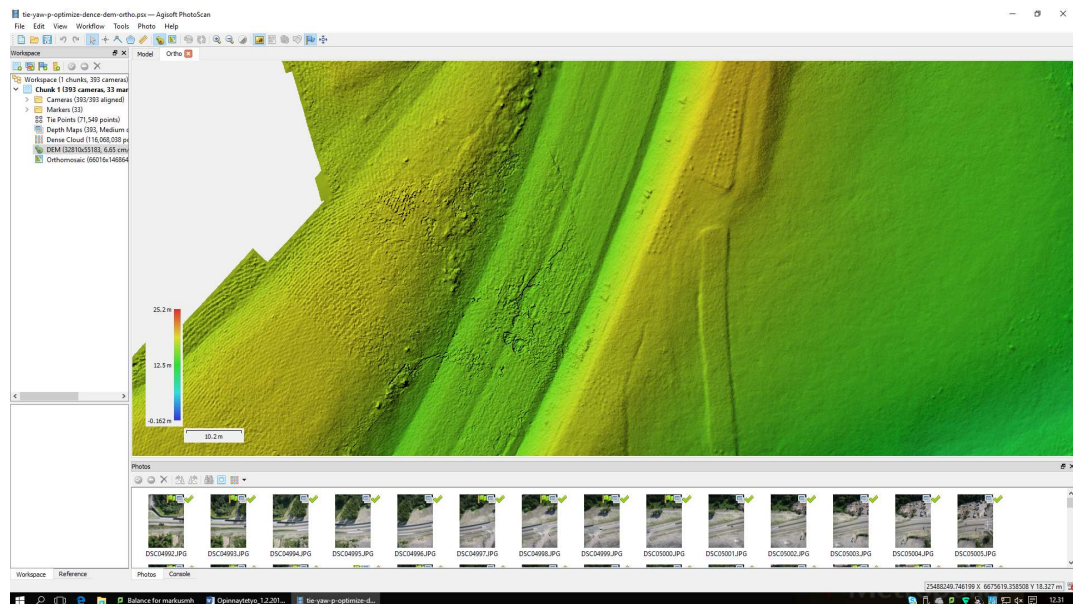
Kuva 24. Punaisella RTK-mittaus tien pohjoinen päädyssä. Tässä huomataan, että ortokuva laskennasta 1 alkaa siirtymään sijainnin osalta pohjoisemmaksi todellisesta sijainnista. [Kuva: Markus Hagelberg]



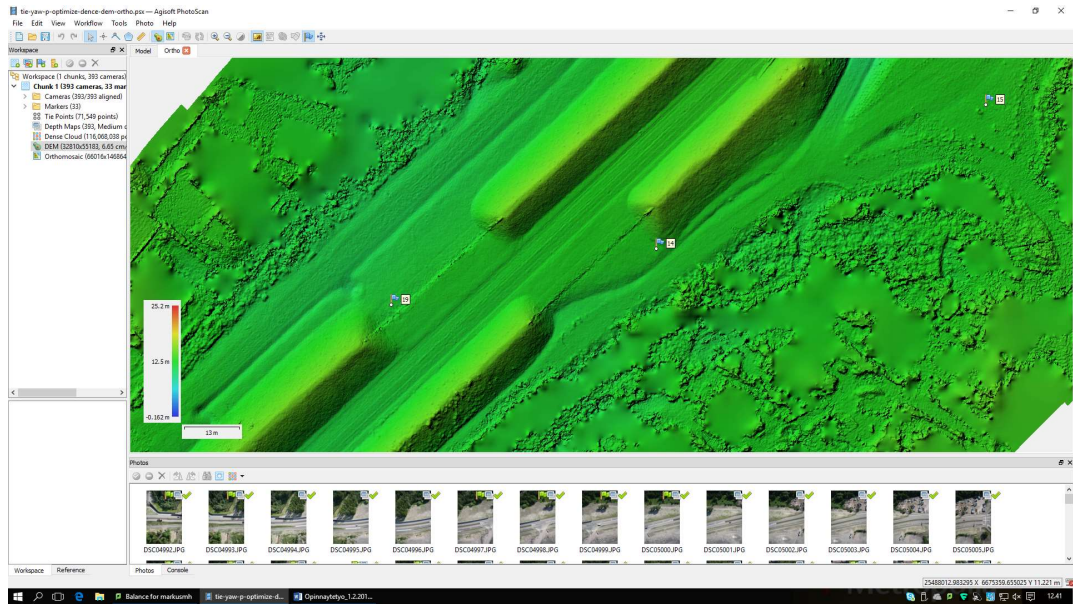
Kuva 25. Kuvakaappaus 3D-Win-ohjelmasta, kun taustalla on laskennan 1 pohjalta saatu ortokuva kuvausalueen pohjoispuolelta, jossa alkaa esiintyä eroavaisuutta Espoon kantakarttaan. Huomataan, että Espoon kantakartta-aineiston tienreunat eivät osu ortokuvan kanssa enää samalle kohdalle pohjois-etelä-suunnassa. [Kuva: Markus Hagelberg]



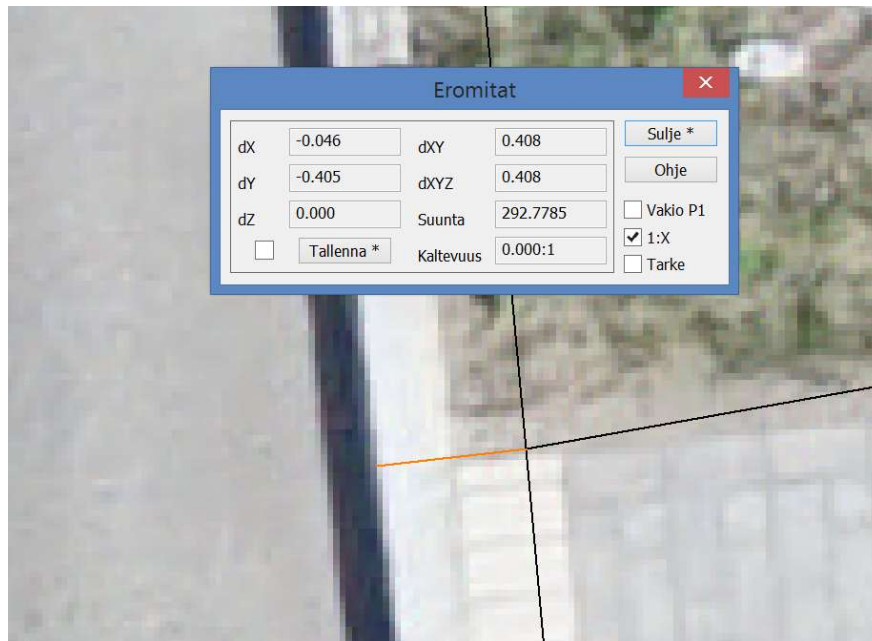
Kuva 26. Kuvassa esiintyy laskennan 2 pohjalta saatu ortokuva vasten Espoon kantakarttaa (mustalla). Huomataan, että taseroavaisuus ei ole tässä niin suuri kuin laskennan 1 pohjalta saadussa ortokuvassa. [Kuva: Markus Hagelberg]



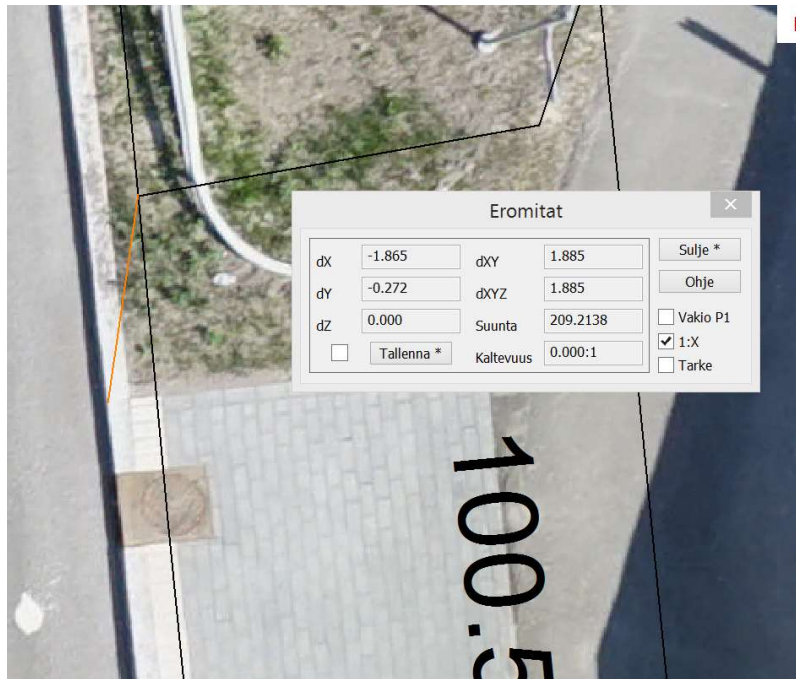
Kuva 27. Kuvakaappaus AgisoftPhotoScanista otetusta DEM-korkeusmallin kohdasta, jossa huomataan korkeudessa karkeaa virhettä. [Kuva: Markus Hagelberg]



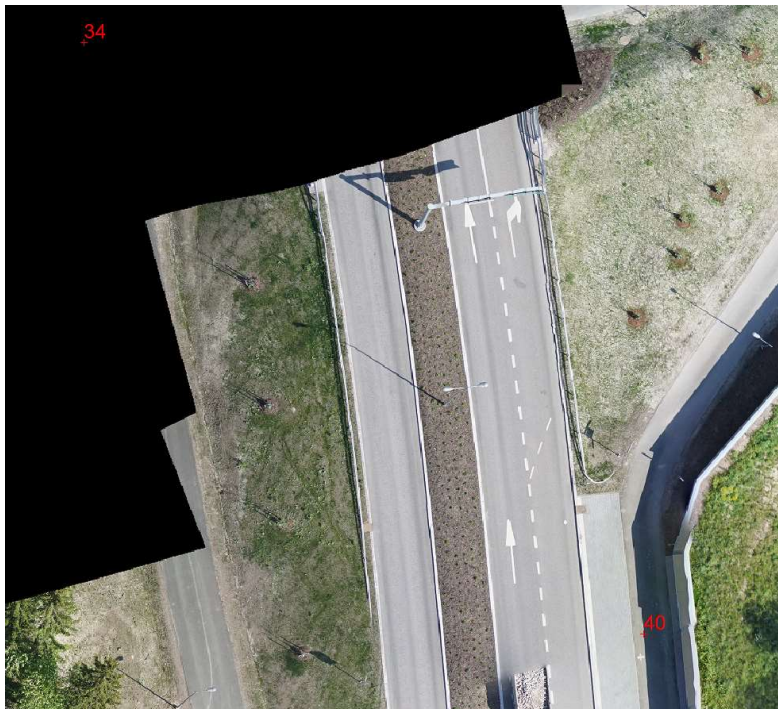
Kuva 28. Kuvakaappaus AgisoftPhotoScanista otetusta DEM-korkeusmallista. Mallissa havainnollistetaan, miltä näyttää, kun korkeusmallissa ei teialueen osalta ole virheitä. [Kuva: Markus Hagelberg]



Kuva 29. Kuvassa mittausalueen pohjoispäädystä sijainnin ero laskennasta 2 saadun ortokuvan ja Espoon kantakartta-aineiston välillä. Eroa kanttikiven kulmassa on n. 41 cm. [Kuva: Markus Hagelberg]



Kuva 30. Kuvassa vastaava kohta kuin kuvassa 29. Taustalla on laskennasta 1 saatu ortokuva. Huomataan, että sijaintivirhe kyseisessä tapauksessa on huomattavasti isompi n. 1,8 m. [Kuva: Markus Hagelberg]



Kuva 31. Kuvakaappaus 3D-Win-ohjelmistosta, jossa havainnollistetaan havaintopisteen sijainti kuvausalueen reunalla laskennasta 1 saadun ortokuvan päällä. [Kuva: Markus Hagelberg]

## 5 Pohdinta

Maastotöiden osalta huomioitavia kohtia oli pysyvyys signaalien osalta, jotka olivat muualla kuin asfaltilla. Nämä paalun varaan rakennetut signaalit kärsivät huomattavasti säävaihteluista, jolloin pahimmassa tapauksessa signaali on voinut irrota paalusta ja lentää muutaman askeleen päähän pystytetystä sijainnista. Tällöin olisi olemassa riski käyttää signaalia, joka kuvista katsottuna näyttäisi olevan oikealla kohdalla mutta joka todellisudessa on siirtynyt.

Signaalien koko olisi voinut olla pienempi etenkin asfalttesignaalien osalta. Työssä käytettiin 60 cm pitkiä ja noin 8 cm leveitä ristejä, kun mahdollisesti parempi vaihtoehto olisi ollut 3–4 cm:n leveys, jolloin ristin keskus olisi erottunut selkeämmin.

Huomioitavaa löytyy myös signaalien sijoittelusta. Sijoittelun olisi voinut tehdä geometrisesti paremmin. Pitkän ja kapean kuvausalueen (kuten tien) signaalit tulisi aina sijoittaa pareittain siten, että ne ovat samalla tasolla mutta tien eri puolilla mahdollisimman etäällä toisistaan. Signalointipisteiden tulisi painottua kuvauslinjan päätyihin, niin että kahden eri kuvauslennon päätykuvissa näkyisi vähintään yksi sama pistepari.

Huomioitavia asioita oli myös lentosuunnitelman teossa. GoogleEarth-ilmakuvan pohjalta VirtualCockpitillä tehty lentosuunnitelma vaatii erityistä huomiota lentolinjoja tehdessä. Usein GoogleEarth-ilmakuva on muutaman vuoden vanha, jolloin ilmakuvassa esiintyvät kohteet ovat voineet muuttua. Tällöin jos lentosuunnitelma tehdään ilmakuvassa näkyvien kohteiden pohjalta, voi kuvaus mennä väärään kohtaan ja aiheuttaa mitattavan kohteen kuvautuvan kuvausalueen reunaan. Tämä koskee erityisesti pitkiä ja kapeita kuvauskohteita. Tätä pystytään ehkäisemään lisäämällä lentosuunnitelman sivuille ylimääräiset kuvauslinjat. Näin tekemällä varmistetaan, että mitattavasta kohteesta tulee riittävästi kuvia ja että kuvausalueen reunimmaisat signalointipisteet saadaan kuviin mukaan.

Työssä saatujen tulosten pohjalta voidaan sanoa, että Camflight x8 RPA -kopteri pystyy tuottamaan tarkkaa aineistoa kartoituskäyttöön kapealla tiealueella. Kapealla ja pitkällä tiealueella tulee kuitenkin kiinnittää erityistä huomiota signalointipisteiden sijainteihin,

jotta ne rajaavat sisäänsä mitattavan alueen kokonaisuudessaan (kuva 32). Tällöin kuvassa pitkiä ja kapeita tiealueita tarvitaan ylimääräisiä lentolinjoja tien reuna-alueilla varmistamaan, että kuvauskohde sijoittuu mahdollisimman keskelle kuvasta rakennettavaa ortokuvaa. Korkeusmallin osalta leveät kuvausalueet antavat pistepilven laskentaan enemmän tietoa, tehden pistepilvestä sisäisesti kohteiden osalta luotettavamman. Pistepilven osalta tulee myös huomioida, että eri lentojen reunat peittävät tarpeeksi toistensa reunoja, jotta lentojen reunat saadaan sidottua toisiinsa paremmin antamalla niille enemmän yhteisiä kohteita. Työssä käytettyjen erillisen kameran kalibrointitodistuksen arvojen ja Agisoftin laskemien kalibrointiarvojen välillä orientointivaiheessa ilmennyt muutaman senttimetrin ero ei tuottanut lopullisissa tuloksissa merkittävää eroa.



Kuva 32. 3D-Win-ohjelman EWC-kuvassa on havainnollistettu, millainen signalointipistegeometria olisi ollut sopiva kyseiselle kuvausalueelle. Kuvassa ilmenee myös, että tien pohjoispuolen lentorata oli liian kaukana idässä, jolloin haluttu mittauskohde jäi kuvausalueen länsireunaan. [Kuva: Markus Hagelberg]

## Lähteet

- 1 Jokinen Ari-Pekka. 2014. UAV-kuvaus kiviainesten kartoituksessa. Insinööriyö. Metropolia AMK
- 2 Camflight x8 specifications. 2015
- 3 Campon-m general specifications. 2015
- 4 Helander Iisak. 2015. UAV:n avulla tuotetun fotogrammetrisen pistepilven vertailu ja Käytettävyys. Opinnäytetyö. Lapin AMK
- 5 Partonen Iikka. 2014. Pienellä UAV-lennokilla (sUAV) kerätyn datan pistepilven korkeustarkkuuksista, -case Nokian Renkaat. Opinnäytetyö. Metropolia YAMK
- 6 Mehtälä Ismo. 2012. Yhden vastaanottimen tarkka paikannus. Insinööriyö. Metropolia AMK
- 7 Hokkanen Jeremia. 2015. UAV-kopterin pistepilven tarkkuus. Insinööriyö. Metropolia AMK
- 8 Rantanen Jesperi. 2014. Ilmakolmioinnin laadunvalvonta fotogrammetristen pintamallien ja laserkeilausaineistojen avulla. Diplomityö. Aalto-yliopisto
- 9 Tolonen Jukka. 2011. Terrestriaalisen laserkeilamen tosiaikainen orientointi virtuaali-RTK (Real Time Kinematic) -menetelmällä. Diplomityö. Aalto-yliopisto
- 10 Kananen Jari. 2007. Miehitettömät ilma-alukset. niiden kehitys sekä käyttö viimeaikaisissa sodissa. Pro gradu -tutkielma. Maanpuolustuskorkeakoulu
- 11 Oesch Jarmo. 2015. Ilmakuvauksen hyödyntäminen peltoviljelyssä. Opinnäytetyö. Hämeen ammattikorkeakoulu
- 12 Ojala Jaska. 2011. Miehitettömien ilma-alusten käyttö ilmakuvauksessa. Opinnäytetyö. Rovaniemen ammattikorkeakoulu
- 13 Raunu Lauri & Halkola Hannu. 2007. VRS-GPS -mittauksen tarkkuus Helsingin kaupungin alueella. Helsingin kaupunki kiinteistövirasto
- 14 GPS-mittaus. 2016. Maanmittauslaitos. Verkkoaineisto. <[www.maanmittauslaitos.fi/kartat/kartoitus/gps-mittaus](http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/kartoitus/gps-mittaus)> Luettu 25.1.2016
- 15 Miehitettömien ilma-alusten ohjeistukset. 2016. Verkkoaineisto Trafi, , <[http://www.trafi.fi/tietopalvelut/usein\\_kysyttya/ilmailu - miehitettomat ilma-alukset ja lennokit](http://www.trafi.fi/tietopalvelut/usein_kysyttya/ilmailu_-_miehitettomat_ilma-alukset_ja_lennokit)> Luettu 21.1.2016

- 16 Ilmailulaki (864/2014). 2015. Säädökset Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lennättäminen. verkkolähde <www.finlex.fi> Luettu 1.6.2016
- 17 Multicopter. 2014. Verkkoaineisto The UAV guide. <<http://wiki.theuavguide.com> > luettu 28.1.2016
- 18 Kallioinen Ville & Laaksonen Lauri. 2016. Metsän UAV-ilmakuvaus Toteutus ja pintamallien laatiminen. Opinnäytetyö. Hämeen ammattikorkeakoulu
- 19 Tawast Jaakko. 2015. UAV-kuvauksen prosessointi ja laatu. Insinööriyö. Metropolia AMK
- 20 Kumpula Mikko. 2013. UAV-lennokin hyödynnettävyys ilmakuvakartan teossa. Opinnäytetyö. Rovaniemen AMK
- 21 Kantakartan kartoitusohjeet. 2009. Espoo Tekninen keskus

## Havaintopisteiden koordinaattierot

camera		E		h	dh		dE		dN		dh	
	N											
1	6674665,98	25487538,93	2,86	6674665,99	25487538,91	2,88	0,01	-0,02	0,01	-0,02	-0,03	
2	6674718,62	25487493,44	2,57	6674718,61	25487493,45	2,57	-0,02	0,01	-0,04	0,02	0,00	
4	6674728,02	25487573,43	3,65	6674727,99	25487573,45	3,66	-0,04	0,02	-0,01	0,02	-0,01	
5	6674735,26	25487545,32	3,53	6674735,26	25487545,30	3,56	-0,01	-0,02	-0,01	-0,02	-0,03	
8	6674916,97	25487587,00	2,84	6674916,96	25487587,00	2,86	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	
7	6674910,80	25487627,80	3,37	6674910,81	25487627,80	3,40	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,03	
12	6675159,45	25487883,34	9,42	6675159,43	25487883,32	9,43	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	
21	6675471,75	25488213,57	14,76	6675471,75	25488213,56	14,75	0,00	0,00	-0,02	-0,02	0,01	
22	6675534,30	25488221,49	18,93	6675534,30	25488221,46	18,95	0,00	-0,03	-0,03	-0,03	-0,02	
42	6676344,34	25488229,63	13,47	6676344,28	25488229,56	13,40	-0,06	-0,07	-0,06	-0,07	0,07	
30	6676512,43	25488302,84	12,44	6676512,43	25488302,83	12,44	0,00	-0,01	0,00	-0,01	0,00	
33	6676740,99	25488142,31	13,43	6676741,00	25488142,29	13,45	0,00	-0,02	0,00	-0,02	-0,02	
40	6676896,68	25488138,27	15,79	6676898,45	25488138,45	14,75	1,76	0,18	1,76	0,18	1,04	

Taulukossa on esitetty havaintopisteiden maastossa mitatut koordinaatit ja ilmakuvasta mitattujen vastinpisteiden koordinaatit, kun Agisoftin ohjelmassa käytettiin erillisistä kameran kalibrointi tietoja.

optimice		E		h	dh		dE		dN		dh	
	N											
1	6674666,00	25487538,93	2,85	6674665,99	25487538,91	2,88	-0,01	-0,02	-0,01	-0,02	0,03	
2	6674718,62	25487493,45	2,55	6674718,61	25487493,45	2,57	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,02	
4	6674728,00	25487573,46	3,67	6674727,99	25487573,45	3,66	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	
5	6674735,25	25487545,34	3,53	6674735,26	25487545,30	3,56	0,01	-0,04	0,01	-0,04	0,03	
8	6674916,99	25487587,04	2,84	6674916,96	25487587,00	2,86	-0,03	-0,05	-0,03	-0,05	0,01	
7	6674910,83	25487627,91	3,37	6674910,81	25487627,80	3,40	-0,02	-0,11	-0,02	-0,11	0,03	
12	6675159,44	25487883,34	9,42	6675159,43	25487883,32	9,43	-0,01	-0,02	-0,01	-0,02	0,00	
21	6675471,77	25488213,54	14,76	6675471,75	25488213,56	14,75	-0,02	0,01	-0,02	0,01	-0,01	
22	6675534,34	25488221,47	18,94	6675534,30	25488221,46	18,95	-0,04	0,00	-0,04	0,00	0,01	
42	6676344,30	25488229,69	13,47	6676344,28	25488229,56	13,40	-0,03	-0,13	-0,03	-0,13	-0,07	
30	6676512,47	25488302,83	12,43	6676512,43	25488302,83	12,44	-0,04	0,00	-0,04	0,00	0,01	
33	6676740,94	25488142,29	13,44	6676741,00	25488142,29	13,45	0,05	0,00	0,05	0,00	0,01	
40	6676898,29	25488138,18	15,81	6676898,45	25488138,45	14,75	0,15	0,27	0,15	0,27	-1,06	

Taulukossa on esitetty havaintopisteiden maastossa mitatut koordinaatit ja ilmakuvasta mitattujen vastinpisteiden koordinaatit, kun ohjelmassa käytettiin Agisoftin laskemia kameran kalibrointi tietoja.

**Laskenta 2, jossa on käytetty Agisoftin laskemia kalibrointiarvoja**

## **Agisoft PhotoScan**

Processing Report

26 January 2017



## Survey Data

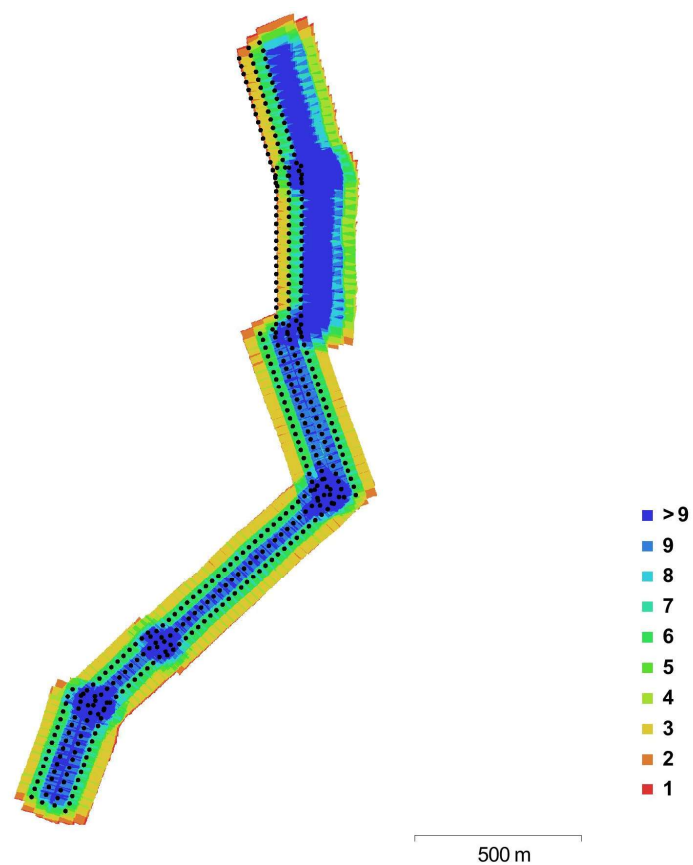


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	393	Camera stations:	393
Flying altitude:	128 m	Tie points:	71,549
Ground resolution:	1.66 cm/pix	Projections:	352,022
Coverage area:	0.616 km <sup>2</sup>	Reprojection error:	0.879 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
ILCE-7R (35 mm)	7360 x 4912	35 mm	4.89 x 4.89 $\mu$ m	No

Table 1. Cameras.

## Camera Calibration

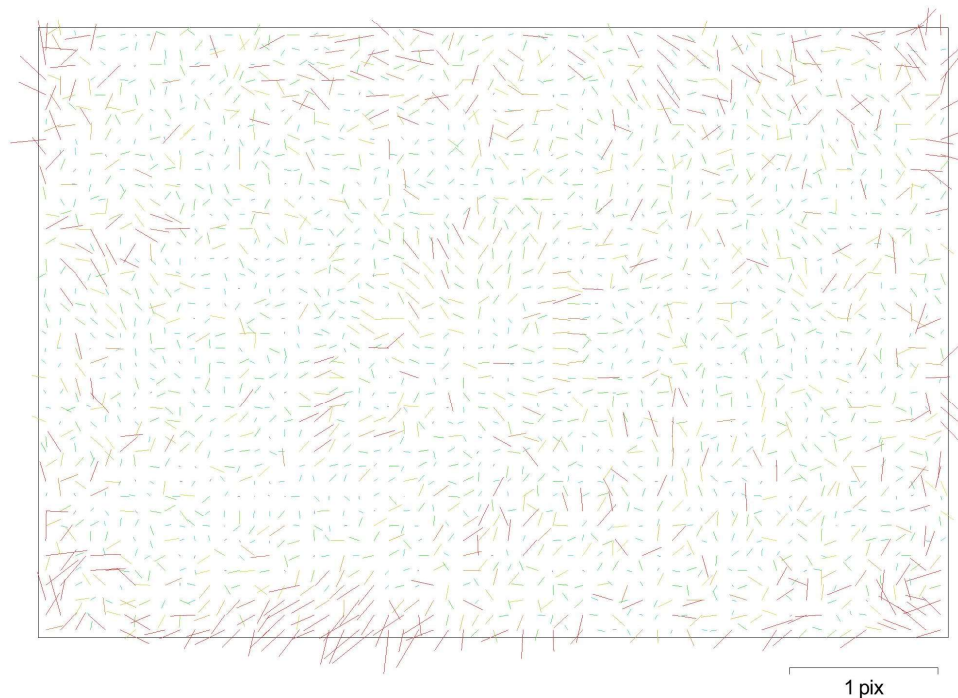


Fig. 2. Image residuals for ILCE-7R (35 mm).

### ILCE-7R (35 mm)

393 images

Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
<b>7360 x 4912</b>	<b>35 mm</b>	<b>4.89 x 4.89 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>No</b>
Type:	Frame	F:	7379.71
Cx:	5.25767	B1:	0.746167
Cy:	0.33424	B2:	-1.01663
K1:	0.05297	P1:	7.15093e-05
K2:	-0.232994	P2:	-0.00167774
K3:	0.0101595	P3:	0
K4:	0	P4:	0

## Ground Control Points



Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
30	1.65028	1.9896	3.60727	2.58495	4.43783	0.979

Table 2. Control points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
33	-1.15126	-4.49083	11.2836	12.1989	0.452 (3)
30	-1.21002	4.23961	-0.236666	4.41525	0.380 (18)
28	0.121763	-1.31793	1.53203	2.02457	1.121 (6)
26	1.07488	-0.046871	-3.58041	3.73857	1.673 (11)
27	1.46043	0.963538	3.25081	3.69175	0.542 (6)
23	2.54028	-1.29884	0.170017	2.85813	0.507 (7)
17	-2.12766	0.112004	-0.844618	2.29191	2.025 (13)
24	-0.344459	-2.81364	-0.164813	2.83943	0.602 (9)
18	1.93199	1.58068	1.42585	2.87475	0.899 (11)
25	-1.75373	-0.738641	3.02549	3.57418	0.917 (10)
20	-1.40105	-0.45353	-1.72175	2.26562	1.223 (8)
16	0.913419	1.71001	4.12949	4.56193	1.307 (10)
15	-0.352766	0.318286	-5.42995	5.4507	1.189 (6)
14	1.52698	-1.60867	-0.0579044	2.21874	0.906 (10)
11	1.07858	-0.112153	3.06901	3.25496	0.851 (7)
12	-0.390769	-0.355704	2.44269	2.4992	0.621 (9)
10	0.771285	0.341939	-0.219152	0.871683	0.796 (16)
9	0.500866	-3.08453	-4.57956	5.54415	0.661 (9)
19	1.87474	-2.51938	-0.740197	3.22642	0.682 (7)
6	-1.93914	-0.739599	-0.00214334	2.0754	0.672 (14)
7	-1.782	-0.337159	-1.31221	2.23855	1.029 (14)
8	1.13679	2.88389	2.56276	4.02205	0.503 (11)
2	-1.42746	0.532055	2.78116	3.17105	1.057 (7)
3	0.951425	1.61675	2.21755	2.90459	0.902 (9)
4	1.25334	-0.114529	-2.65039	2.93403	0.760 (10)
1	0.58391	-0.712555	4.18817	4.28829	0.506 (9)
5	1.25732	-1.05869	-4.57535	4.86163	1.289 (11)
21	-3.68343	0.793705	-2.07523	4.30165	0.742 (9)
22	-3.22095	5.35928	-2.17006	6.61858	0.553 (3)
29	2.85796	-0.69373	-7.96177	8.48758	0.968 (6)
<b>Total</b>	<b>1.65028</b>	<b>1.9896</b>	<b>3.60727</b>	<b>4.43783</b>	<b>0.979</b>

Table 3. Control points.

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
40					0.413 (5)
44					0.512 (8)
42					0.354 (5)
<b>Total</b>					

Table 4. Check points.

## Digital Elevation Model

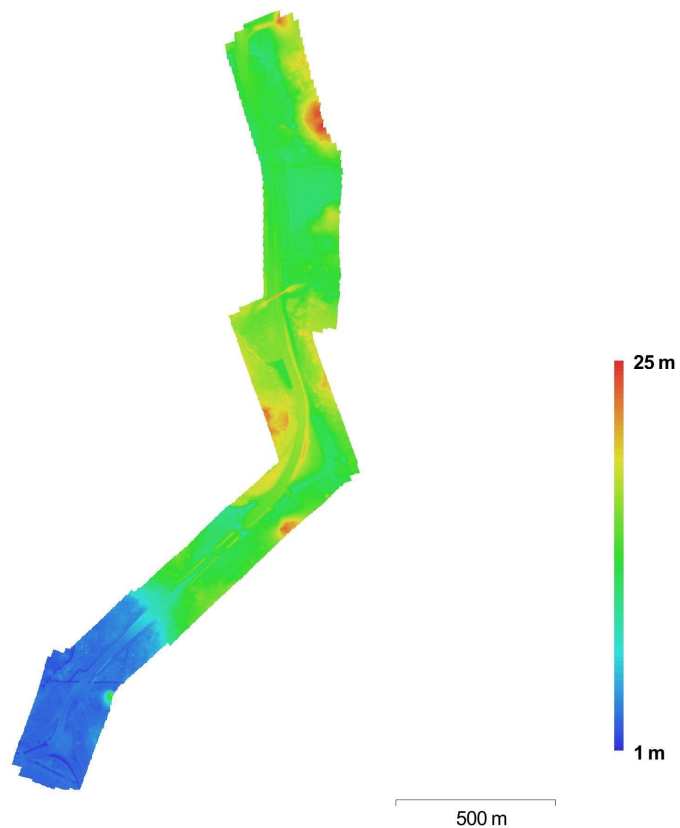


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 6.65 cm/pix  
Point density: 226 points/m<sup>2</sup>

# Processing Parameters

<b>General</b>	
Cameras	393
Aligned cameras	393
Markers	33
Coordinate system	ETRS89 / GK25FIN (EPSG:3879)
<b>Point Cloud</b>	
Points	71,549 of 81,580
RMS reprojection error	0.302311 (0.878903 pix)
Max reprojection error	1.39379 (41.2257 pix)
Mean key point size	2.7541 pix
Effective overlap	5.15886
<b>Alignment parameters</b>	
Accuracy	High
Pair preselection	Reference
Key point limit	40,000
Tie point limit	1,000
Constrain features by mask	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	53 minutes 36 seconds
Alignment time	1 minutes 13 seconds
<b>Optimization parameters</b>	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Optimization time	2 seconds
<b>Depth Maps</b>	
Count	393
<b>Reconstruction parameters</b>	
Quality	Medium
Filtering mode	Aggressive
Processing time	3 hours 15 minutes
<b>Dense Point Cloud</b>	
Points	116,068,038
<b>Reconstruction parameters</b>	
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	3 hours 15 minutes
Dense cloud generation time	18 minutes 28 seconds
<b>DEM</b>	
Size	32,810 x 55,183
Coordinate system	ETRS89 / GK25FIN (EPSG:3879)
<b>Reconstruction parameters</b>	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	23 minutes 0 seconds
<b>Orthomosaic</b>	
Size	66,016 x 146,864
Coordinate system	ETRS89 / GK25FIN (EPSG:3879)
Channels	3, uint8
Blending mode	Mosaic
<b>Reconstruction parameters</b>	
Surface	DEM
Enable color correction	No
Processing time	44 minutes 44 seconds
<b>Software</b>	
Version	1.2.6 build 2834
Platform	Windows 64 bit

**Laskenta 1, jossa käytetty kameran erillisiä kalibrointiarvoja**

## **Agisoft PhotoScan**

**Processing Report  
26 January 2017**



## Survey Data

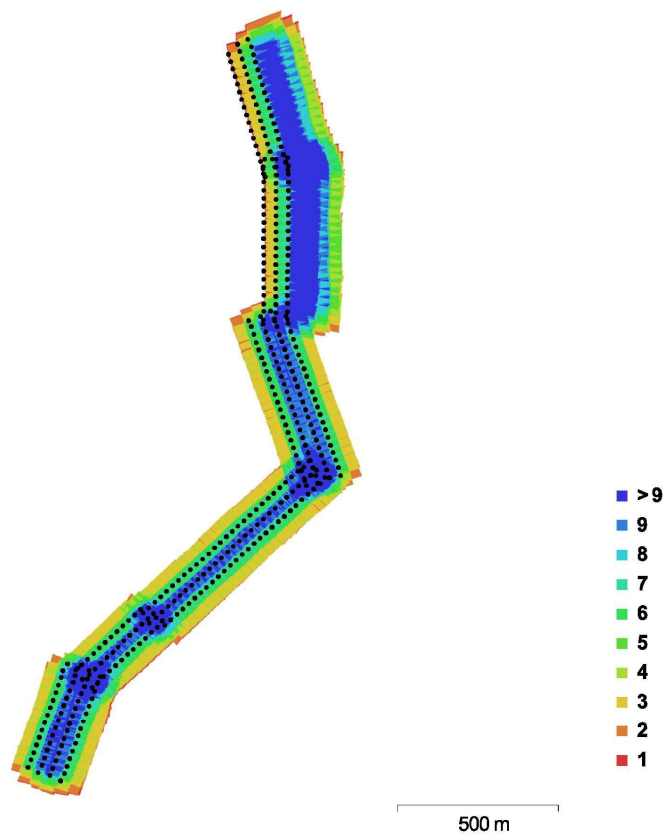


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	393	Camera stations:	391
Flying altitude:	129 m	Tie points:	70,452
Ground resolution:	1.66 cm/pix	Projections:	344,487
Coverage area:	0.616 km <sup>2</sup>	Reprojection error:	1.82 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
ILCE-7R (35 mm)	7360 x 4912	35 mm	4.89 x 4.89 µm	Yes

Table 1. Cameras.

## Camera Calibration

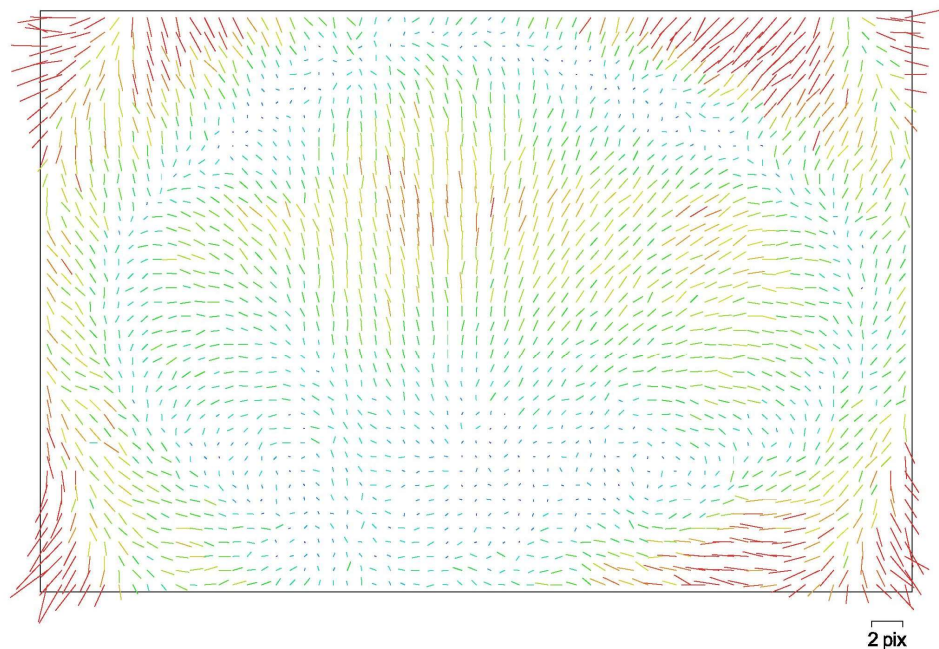


Fig. 2. Image residuals for ILCE-7R (35 mm).

### ILCE-7R (35 mm)

393 images

Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
<b>7360 x 4912</b>	<b>35 mm</b>	<b>4.89 x 4.89 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Yes</b>
Type:	Frame	F:	7432.66
Cx:	-10.3961	B1:	4.12798
Cy:	-6.08394	B2:	0.0013112
K1:	0.0576631	P1:	-0.000846627
K2:	-0.372456	P2:	0.00135825
K3:	0.377247	P3:	0
K4:	-0.0102243	P4:	0

## Ground Control Points



Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
30	0.995881	0.987244	0.679101	1.40229	1.55808	0.086

Table 2. Control points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
33	0.0352475	-0.107348	0.104711	0.154047	0.010 (3)
30	-0.0287116	0.0964893	-0.0543998	0.114428	0.028 (18)
28	0.332907	-0.282958	0.170383	0.468959	0.014 (7)
26	-1.29585	-0.381471	-0.0101822	1.35087	0.040 (9)
27	1.2228	0.37608	-0.0244831	1.27956	0.036 (6)
7	-1.23018	-1.26246	-1.94915	2.62799	0.166 (14)
6	1.62485	-0.0483952	1.08224	1.95287	0.108 (14)
8	0.673412	1.10965	0.78079	1.51474	0.117 (11)
4	-1.98069	3.4272	1.14128	4.11963	0.117 (10)
1	0.76462	-2.24981	0.193337	2.38404	0.032 (9)
23	0.339688	0.872144	-0.000368924	0.935961	0.028 (7)
25	-0.0126316	-0.0533424	0.0100367	0.0557289	0.036 (10)
24	-0.00527084	0.0399258	-0.0482602	0.0628561	0.051 (9)
18	-0.619346	0.462244	0.0552461	0.774798	0.056 (11)
16	-0.339285	-1.38941	0.106066	1.43416	0.079 (10)
15	-0.387312	1.511	-0.0857333	1.5622	0.083 (6)
20	0.46237	0.738772	0.0249009	0.871889	0.040 (8)
19	-0.229651	-0.415565	0.00774423	0.474862	0.025 (7)
14	0.344091	-0.361381	-0.103678	0.50965	0.048 (10)
9	-0.902527	-0.192761	0.170696	0.938535	0.044 (9)
3	2.52873	-0.930084	0.71626	2.78793	0.127 (10)
10	-0.0256144	-0.41856	-0.119521	0.436043	0.043 (15)
12	-0.253225	0.674546	0.095887	0.726863	0.040 (9)
2	-2.6704	0.169122	0.440235	2.71173	0.087 (7)
11	0.350555	0.00372027	0.0482219	0.353876	0.038 (7)
21	-0.199289	-0.493347	0.0540909	0.534821	0.026 (9)
22	0.529947	0.207222	-0.0778386	0.57432	0.012 (3)
17	0.000154482	-1.13735	0.0471852	1.13832	0.116 (13)
5	1.15122	-0.0992091	-2.45998	2.71784	0.208 (11)
29	-0.168599	0.157249	-0.108189	0.254672	0.022 (6)
<b>Total</b>	<b>0.995881</b>	<b>0.987244</b>	<b>0.679101</b>	<b>1.55808</b>	<b>0.086</b>

Table 3. Control points.

<b>Label</b>	<b>X error (cm)</b>	<b>Y error (cm)</b>	<b>Z error (cm)</b>	<b>Total (cm)</b>	<b>Image (pix)</b>
40					0.018 (5)
44					0.015 (8)
42					0.021 (5)
41					0.040 (6)
<b>Total</b>					

Table 4. Check points.

## Digital Elevation Model

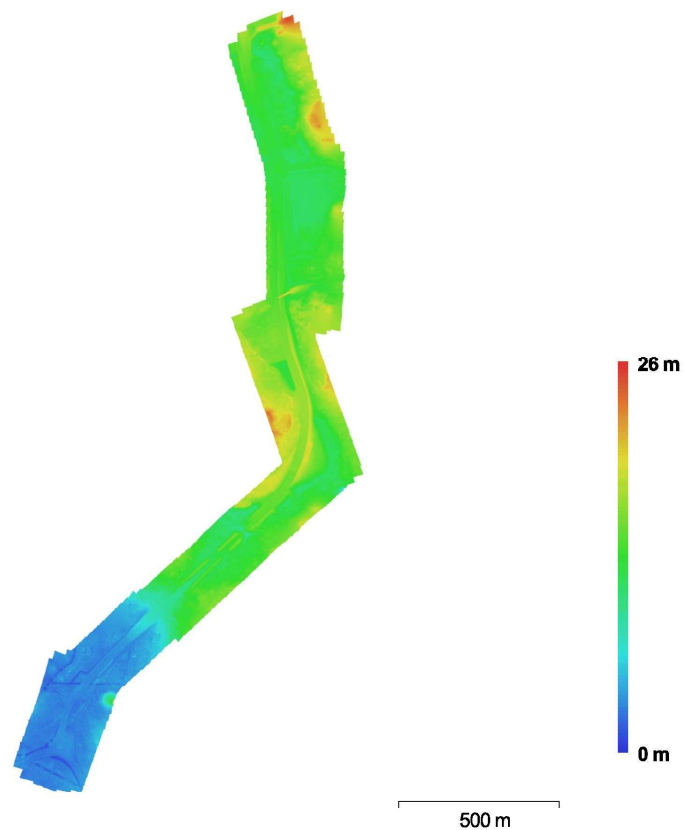


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 6.65 cm/pix  
Point density: 226 points/m<sup>2</sup>

# Processing Parameters

<b>General</b>	
Cameras	393
Aligned cameras	391
Markers	34
Coordinate system	ETRS89 / GK25FIN (EPSG::3879)
<b>Point Cloud</b>	
Points	70,452 of 81,672
RMS reprojection error	0.731038 (1.8215 pix)
Max reprojection error	7.13752 (41.5593 pix)
Mean key point size	2.77382 pix
Effective overlap	5.15221
<b>Alignment parameters</b>	
Accuracy	High
Pair preselection	Reference
Key point limit	40,000
Tie point limit	1,000
Constrain features by mask	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	50 minutes 26 seconds
Alignment time	45 seconds
<b>Optimization parameters</b>	
Optimization time	2 seconds
<b>Depth Maps</b>	
Count	391
<b>Reconstruction parameters</b>	
Quality	Medium
Filtering mode	Aggressive
Processing time	3 hours 13 minutes
<b>Dense Point Cloud</b>	
Points	114,928,894
<b>Reconstruction parameters</b>	
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	3 hours 13 minutes
Dense cloud generation time	18 minutes 21 seconds
<b>DEM</b>	
Size	33,078 x 55,501
Coordinate system	ETRS89 / GK25FIN (EPSG::3879)
<b>Reconstruction parameters</b>	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	24 minutes 18 seconds
<b>Orthomosaic</b>	
Size	66,012 x 146,704
Coordinate system	ETRS89 / GK25FIN (EPSG::3879)
Channels	3, uint8
Blending mode	Mosaic
<b>Reconstruction parameters</b>	
Surface	DEM
Enable color correction	No
Processing time	36 minutes 29 seconds
<b>Software</b>	
Version	1.2.6 build 2834
Platform	Windows 64 bit

## Pistepilven korkeushavaintojen erot Espoon kaupungin kantakarttaan

Laskenta 1					
Pistepilvi			Espoo kantakartta		
N	E	H	H		dH
6674709,940	25487528,565	3,031	3,035		0,004
6674696,200	25487555,409	3,193	3,197		0,004
6674716,393	25487566,700	3,591	3,564		-0,027
6674748,027	25487569,828	3,373	3,377		0,004
6674738,671	25487532,412	3,552	3,605		0,053
6674786,151	25487537,129	2,781	2,662		-0,119
6674814,932	25487565,597	3,281	3,277		-0,004
6674818,709	25487633,306	3,159	2,918		-0,241
6674844,695	25487624,621	2,975	2,926		-0,049
6674853,764	25487584,771	3,070	3,059		-0,011
6674890,587	25487592,993	3,622	3,644		0,022
6674878,312	25487639,136	2,906	2,785		-0,121
6674917,950	25487619,880	3,403	3,478		0,075
6674940,261	25487652,606	3,318	3,222		-0,096
6674978,773	25487690,362	3,536	3,500		-0,036
6675044,052	25487757,699	4,275	4,228		-0,047
6675073,060	25487795,174	5,646	5,490		-0,156
6675089,336	25487833,929	4,994	5,040		0,046
6675106,478	25487806,362	6,910	6,808		-0,102
6675143,200	25487862,212	8,623	8,663		0,040
6675146,234	25487897,840	9,990	9,964		-0,026
6675227,978	25487915,046	12,854	12,804		-0,050
6675248,497	25488007,062	11,978	12,015		0,037
6675291,279	25488054,135	11,598	11,628		0,030
6675397,929	25488094,215	10,299	10,134		-0,165
6675373,486	25488150,696	11,257	11,154		-0,103
6675460,957	25488200,662	14,647	14,555		-0,092
6675466,855	25488267,776	11,612	11,622		0,010
6675505,247	25488320,691	12,757	12,721		-0,036
6675594,722	25488281,020	15,754	15,797		0,043
6675713,073	25488313,903	16,828	16,836		0,008
6675842,358	25488239,428	15,946	16,006		0,060
6675974,893	25488251,519	15,624	15,699		0,075
6676049,649	25488232,424	14,800	14,708		-0,092
6676169,350	25488243,476	13,845	14,070		0,225
6676175,380	25488240,609	13,650	13,600		-0,050
6676329,554	25488223,729	12,903	12,904		0,001
6676480,285	25488243,020	12,166	12,190		0,024
6676568,533	25488225,423	12,148	12,046		-0,102
6676732,406	25488161,573	13,288	13,370		0,082
6676778,628	25488151,272	13,624	13,531		-0,093
6676816,651	25488117,508	14,671	14,810		0,139
6676835,420	25488137,311	14,402	13,887		-0,515
6676854,510	25488148,256	14,090	13,611		-0,479
6676891,416	25488131,710	15,666	14,486		-1,180

Laskenta 2				
N	E	H	Espoo H	dH
6674709,940	25487528,565	3,036	3,035	-0,001
6674696,200	25487555,409	3,195	3,197	0,002
6674716,393	25487566,700	3,594	3,564	-0,030
6674748,027	25487569,828	3,351	3,377	0,026
6674738,671	25487532,412	3,55	3,605	0,055
6674786,151	25487537,129	2,781	2,662	-0,119
6674814,932	25487565,597	3,281	3,277	-0,004
6674818,709	25487633,306	3,159	2,918	-0,241
6674844,695	25487624,621	2,975	2,926	-0,049
6674853,764	25487584,771	3,061	3,059	-0,002
6674890,587	25487592,993	3,622	3,644	0,022
6674878,312	25487639,136	2,906	2,785	-0,121
6674917,950	25487619,880	3,403	3,478	0,075
6674940,261	25487652,606	3,309	3,222	-0,087
6674978,773	25487690,362	3,536	3,500	-0,036
6675044,052	25487757,699	4,275	4,228	-0,047
6675073,060	25487795,174	5,638	5,490	-0,148
6675089,336	25487833,929	4,994	5,040	0,046
6675106,478	25487806,362	6,91	6,808	-0,102
6675143,200	25487862,212	8,623	8,663	0,040
6675146,234	25487897,840	9,986	9,964	-0,022
6675227,978	25487915,046	12,832	12,804	-0,028
6675248,497	25488007,062	11,978	12,015	0,037
6675291,279	25488054,135	11,598	11,628	0,030
6675397,929	25488094,215	10,299	10,134	-0,165
6675373,486	25488150,696	11,257	11,154	-0,103
6675460,957	25488200,662	14,647	14,555	-0,092
6675466,855	25488267,776	11,612	11,622	0,010
6675505,247	25488320,691	12,765	12,721	-0,044
6675594,722	25488281,020	15,754	15,797	0,043
6675713,073	25488313,903	16,828	16,836	0,008
6675842,358	25488239,428	15,949	16,006	0,057
6675974,893	25488251,519	15,624	15,699	0,075
6676049,649	25488232,424	14,8	14,708	-0,092
6676169,350	25488243,476	13,845	14,070	0,225
6676175,380	25488240,609	13,65	13,600	-0,050
6676329,554	25488223,729	12,903	12,904	0,001
6676480,285	25488243,020	12,19	12,190	0,000
6676568,533	25488225,423	12,078	12,046	-0,032
6676732,406	25488161,573	13,303	13,370	0,067
6676778,628	25488151,272	13,603	13,531	-0,072
6676816,651	25488117,508	14,677	14,810	0,133
6676835,420	25488137,311	14,206	13,887	-0,319
6676854,510	25488148,256	14,1	13,611	-0,489
6676891,416	25488131,710	15,623	14,486	-1,137