

**Ympäristön 3D fotogrammetriset hyperspektri- ja RGB-mittaukset keveillä
kauko-ohjattavilla ilma-alusjärjestelmillä**

Diplomityö
Rakennetun ympäristön laitos
Insinöörیتieteiden korkeakoulu
Aalto-yliopisto

Kirkkonummi 6. helmikuuta 2017



Tekniikan kandidaatti Niko Viljanen

Valvoja: Professori Henrik Haggrén
Ohjaaja: TKT Eija Honkavaara

Tekijä Niko Viljanen

Työn nimi Ympäristön 3D fotogrammetriset hyperspektri- ja RGB-mittaukset keveillä kauko-ohjattavilla ilma-alusjärjestelmillä

Koulutusohjelma Geomatiikka

Pääaine Fotogrammetria ja kaukokartoitus**Koodi** M3006

Työn valvoja Professori Henrik Haggrén

Työn ohjaaja(t) TkT Eija Honkavaara

Päivämäärä 6.2.2017**Sivumäärä** 82+23**Kieli** suomi

Tiivistelmä

Kauko-ohjattavien ilma-alusjärjestelmien (RPAS) käyttö kaukokartoituksessa on lisääntynyt räjähdysmäisesti viime vuosina. Niiden etuna on lentokoneisiin ja helikoptereihin verrattuna niiden pieni koko ja edullisuus. RPAS-laitteistoille on kehitelty useita uusia hyperspektrikameroita, jotka sopivat pienen kokonsa ja painonsa puolesta keveille lentoalustoille. Yksi tällainen on Suomessa kehitetty Fabry-Pérot – interferometriin (FPI) perustuva kokonaisia 2D kuvamatriiseja keräävä hyperspektrikamera. Toisin kuin perinteisillä hyperspektriskannereilla tallennetut yksittäiset rivit, nämä kuvamatriisit mahdollistavat fotogrammetristen tekniikoiden käytön 3D-pistepilvien, ortomosaiikkien ja korkeusmallien luomiseen.

Tässä työssä kehitettiin FPI-kameran ja RGB-kameran kuville geometrinen prosessointiketju ja selvitettiin kuinka eri ympäristöt vaikuttavat näiden kuvien geometriseen prosessointiin. Työssä tehtiin FPI- ja RGB-kameran kuville fotogrammetrisesti Structure-from-Motion (SfM) tekniikalla tuotettujen 3D-pistepilvien, ortomosaiikkien ja korkeusmallien virheen mittausta. Lisäksi tutkimuksessa selvitettiin voidaanko FPI- ja RGB-kameroiden kuvista tehtyjä kasvillisuuden korkeusmalleja (CHM) hyödyntää biomassojen estimoinnissa manuaalisen mittauksen sijasta. Tutkimuksessa käytettiin Paikkatietokeskuksen RPAS-laitteistolla kerätyjä FPI- ja RGB-kuvia Vihdissä sijaitsevista pelloista ja Mustila Arboretumin kansallismetsästä.

Kerätyistä aineistoista muodostettiin SfM-tekniikalla 3D-pistepilvet, joista laskettiin digitaalinen korkeusmalli (DSM) ja digitaalinen maanpinnankorkeusmalli (DTM) sekä ortomosaiikit. Viljakasvien CHM laskettiin DSM:n ja DTM:n erotuksella ja tästä irrotettiin referenssien näytteenottoruutuja vastaavat keskiarvokorkeudet, joita verrattiin referensseihin. Peltoaineistosta tuotettujen korkeusmallien ja ortomosaiikkien absoluuttisen virheen mittaus toteutettiin tunnettujen tarkistuspisteiden avulla ja näiden virheitä verrattiin muissa tutkimuksissa saatuihin tuloksiin. Metsäaineistoista eri kuvapeitoilla tuotettuja FPI-korkeusmalleja vertailtiin parhaalla peitolla tuotettuun FPI-korkeusmalliin.

Tämä työ osoittaa, että eri ympäristöjen FPI- ja RGB-kuvaukset ja geometrinen prosessointi sisältävät omat haasteensa. Peltoaineistojen korkeusmallit ja ortomosaiikit olivat absoluuttisilta tarkkuuksiltaan hyviä (FPI $RMSE_x = 11,9$ cm, $RMSE_y = 11,9$ cm ja $RMSE_z = 13,0$ cm; RGB $RMSE_x = 4,0$ cm, $RMSE_y = 4,0$ cm ja $RMSE_z = 5,4$ cm) verrattaessa muihin tutkimuksiin. Viljakasvien CHM korreloi parhaassa tapauksessa referenssien kanssa hyvin ($R^2 = 0,75 - 0,87$) ja näin ollen sen hyödyntäminen biomassojen estimoinnissa on mahdollista. Metsäaineistojen FPI-korkeusmallit olivat tarkkuudeltaan huonompia ($RMSE_z = 31,0 - 309,5$ cm), mihin osaltaan vaikutti haastava maasto.

Avainsanat FPI-kamera, RGB-kamera, Structure-from-Motion, ilmakekuvaus, RPAS, UAV, fotogrammetria, kaukokartoitus

Author Niko Viljanen

Title of thesis Environmental 3D photogrammetric hyperspectral and RGB measurements on lightweight Remotely Piloted Aircraft System's

Degree programme Degree Programme in Geomatics

Major Photogrammetry and Remote Sensing**Code** M3006

Thesis supervisor Professor Henrik Haggrén

Thesis advisor(s) TkT Eija Honkavaara

Date 6.2.2017**Number of pages** 82+23**Language** Finnish

Abstract

The use of Remotely Piloted Aircraft System's (RPAS) in Remote Sensing has increased rapidly in recent years. Their advantage compared to airplanes and helicopters is their small size and cheap price. A number of new hyperspectral instruments, suitable for light aircraft platforms due to their small size and light weight, have been developed for RPAS. One of these is a hyperspectral camera developed in Finland that utilises the Fabry-Pérot interferometer to measure a number of different wavelength ranges and collect whole image arrays. Unlike the old hyperspectral scanners that recorded only individual lines, these image arrays enable the creation 3D point clouds, orthorectified images and surface models using photogrammetric techniques.

This work developed a geometric processing chain for FPI and RGB camera images and examined how different environments and parameters affect the geometric processing of these images. In the work the measurement of coordinate errors of 3D point clouds, orthorectified images and surface models, created from FPI and RGB camera images with photogrammetric Structure-from-Motion (SfM) technique, was carried out. In addition, the work investigated if canopy height models (CHM) created from FPI and RGB images could be utilized to estimate biomass of vegetation instead of manual field measurement. This study utilized FPI and RGB images collected by the RPAS of Paikkatietokeskus in fields located in Vihti and forest located in Mustila Arboretum National Forest.

The collected data was processed with the SfM technique to create 3D point clouds, which were used to calculate a digital elevation model (DSM) and a digital terrain model (DTM) as well as orthorectified images. CHM was calculated by subtracting DTM from DSM, and from this the average heights corresponding with the sampling frames of reference were extracted and compared. The measurement of absolute error of the field surface models and orthorectified images was carried out using reference control points, and these errors were compared with the results obtained in other studies. The assessment of the forest FPI-surface models was carried out using FPI-surface model which had highest overlaps.

This work shows that FPI and RGB imaging and the geometric processing of images of different environments pose their own challenges. The absolute accuracies of the field surface models and the orthomosaic coordinates were good (FPIs $RMSE_x = 11.9$ cm, $RMSE_y = 11.9$ cm ja $RMSE_z = 13.0$ cm; RGBs $RMSE_x = 4.0$ cm, $RMSE_y = 4.0$ cm ja $RMSE_z = 5.4$ cm) when compared to the other studies. In the best case the crops CHM correlated with the references well ($R^2 = 0.75 - 0.87$), and thus its utilization in biomass estimation is possible. The accuracies of the forest FPI-surface models were worse ($RMSE_z = 31.0 - 309.5$ cm).

Keywords FPI-camera, RGB-camera, Structure-from-Motion, aerial imaging, RPAS, UAV, photogrammetry, remote sensing

Alkusanat

Tämä työ on toteutettu osana Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskuksen eri projekteja. Ensinäkin haluan kiittää työnantajaani osastonjohtaja, prof. Juha Hyyppää, joka tarjosi mahdollisuuden saada työskennellä näin mielenkiintoisten tutkimuksien parissa. Lisäksi haluan kiittää työn rahoittajia Tekesiä ja Suomen Akatemiaa, jotka mahdollistivat tämän työn toteuttamisen (Tekes HSI-stereo 2208/31/2013; Suomen Akatemia UAV_4D_Bio 273806; Tekes DroneKnowledge 1617/31/2016). Kiitos myös yhteistyökumppaneille Luonnonvarakeskus (Luke), Senop Oy (ent. Rikola Ltd.) ja Arboretum Mustila Foundation. Lukelta haluan erityisesti kiittää Jere Kaivosojaa, Senop Oy:ltä Jussi Soukkamäkeä ja Petteri Aittaa ja Arboretum Mustila Foundationista Jukka Reinikaista, jotka kaikki mahdollistivat työn tekemisen.

Erityiskiitos työni ohjaajalle TkT Eija Honkavaaralle, joka on antanut erittäin hyödyllisiä kommentteja ja ohjannut menestyksekkäästi läpi työn. Haluan kiittää myös työni valvojaa prof. Henrik Haggrénia, diplomityön läpikäymisestä ja lämpimistä kommentteista. Kiitos myös kaukokartoituksen ja fotogrammetrian osaston työntekijöille, etenkin Roope Näsi, Teemu Hakala, Paula Litkey, Tomi Rosnell, Lauri Markelin ja Olli Nevalainen, jotka ovat aina auttaneet pyydetessä omienkin kiireidensä keskellä.

Haluan kiittää myös perhettäni ja ystäviä, jotka ovat aina olleet tukenani. Heini, kiitos että olet kannustanut ja tukenut minua. Kiitos vanhemmille ja siskolle, jotka ovat kannustaneet minua läpi opiskelujeni. Lopuksi haluan kiittää myös ystäviäni, joiden ansiosta opiskeluaikat ovat olleet ikimuistoiset.

Kirkkonummi 6.2.2017



Niko Viljanen

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	1
1.1	Tutkimuksen tausta ja tavoitteet.....	1
1.2	Tutkimusmenetelmät ja aineisto	2
1.3	Työn rajaus ja rakenne	3
2	Lennoikkisysteemit ja -kuvaukset	5
2.1	Lennokkisysteemit	5
2.2	Kuvausinstrumentit	6
2.3	Laadun määrittäminen	10
2.4	RPAS-laitteistot tutkimuksissa maailmalla.....	13
2.4.1	Lentoalustat	13
2.4.2	Kuvaussensorit	13
2.4.3	Maastoreferenssit	15
2.4.4	Kuvien geometrinen prosessointi	17
2.4.5	Tarkkuusmittausten tulokset	19
2.4.6	Pelto- ja metsäaineistojen CHM.....	20
3	Lennoikkisysteemi ja -kuvaukset Paikkatietokeskuksessa.....	23
3.1	Laitteistot.....	23
3.1.1	Lentolaitteet.....	23
3.1.2	Kuvaussensorit	23
3.1.3	Paikannus	26
3.1.4	Maastoreferenssi	26
3.2	Testialueet	27
3.2.1	Hovi	27
3.2.2	Mustila.....	28
3.3	Kuvaukset.....	29
3.3.1	Hovi	29
3.3.2	Mustila.....	31
3.4	Referenssiaineistot	32
3.4.1	Laserpistepilvet	32
3.4.2	Maastokoealat	33
3.5	Kameroiden kalibroinnit	34
4	Menetelmät.....	36
4.1	Kuvien esiprosessointi	36
4.1.1	Radiometrinen korjaus.....	36
4.1.2	Spektraalinen korjaus.....	37

4.1.3	Kanavasovitus.....	38
4.1.4	Kanavairrotus	39
4.1.5	Kuvien sijaintitietojen laskeminen	41
4.2	Kuvien geometrinen prosessointi.....	42
4.2.1	Itsekalibrointi	42
4.2.2	Tiheän pistepilven laskeminen.....	46
4.2.3	Korkeusmallien (DSM/DTM) muodostaminen.....	47
4.3	Virheen mittaus	49
5	Tulokset	53
5.1	Kuvausten laatu.....	53
5.2	Kuvien laatu	53
5.3	Kuvien sijaintitiedon laatu	55
5.4	Peltoreferenssiaineistojen laatu.....	56
5.5	Kuvien geometrinen prosessointi.....	56
5.5.1	Itsekalibrointi	56
5.5.2	Tiheän pistepilven laskeminen.....	58
5.5.3	Korkeusmallien (DSM/DTM) muodostaminen.....	59
5.6	Virheiden mittaus peltoalueilla	61
5.7	Mustila tarkkuusmittaukset DTM:llä.....	68
6	Johtopäätökset ja yhteenveto.....	71
	Lähteet	76

Liite 1: Mustilan RGB-blokkien kameran sisäiset parametrit (IOP:t) (1s.)

Liite 2: Mustilan FPI- ja RGB-blokkien kameran sisäiset parametrit (IOP:t) (2s.)

Liite 3: Vihdin FPI- ja RGB-blokkien DSM:en ja DTM:en vertailun tulokset (6s.)

Liite 4: Mustilan FPI-blokkien DSM:en ja DTM:en vertailun tulokset (6s.)

Liite 5: Mustilan FPI-blokkien erotuskuvat (3s.)

Liite 6: Mustilan laserkeilaus, RGB-kuvien ja FPI-kuvien DTM:en X- ja Y-profiilien vertailu (3s.)

Liite 7: Näytteenottoruutujen Nro, referenssi korkeudet (cm), tuore- ja kuivabiomassat (kg/m^2) (2s.)

Lyhenteet

BINEX	Binary Exchange Format; Operatiivinen binääri-formaatti standardi
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function; kaksisuuntainen heijastusfunktio
CCD-kenno	Charge Coupled Device; Valoherkkä kenno, joita käytetään mm. digitaalikameroissa valon tai infrapunasäteilyn muuntamiseksi digitaaliseksi signaaliksi. Laadultaan paras vaihtoehto kennovaihtoehto
CMOS-kenno	Complementary metal-oxide-semiconductor; Nykyisin suurimassa osassa digitaalikameroita oleva kenno, joka kuluttaa CCD-kennoa vähemmän virtaa. Ei yhtä valoherkkä kuin CCD-kenno
DEM	Digital Elevation Model; Digitaalinen korkeusmalli
DSM	Digital Surface Model; Kohteen pintaa kuvaava korkeusmalli
DTM	Digital Terrain Model; Digitaalinen maanpintaa kuvaava korkeusmalli
ETRS-TM35FIN	Suomalaisissa maastokartoissa vuodesta 2005 alkaen käytetty karttaprojektio ja projektioon liittyvä tasokoordinaatisto
FPI	Fabry-Pérot –interferometer; Fabry-Pérot –interferometri
FWHM	Full Width at Half Maximum; Puoliarvoveveys
GSD	Ground Sample Distance; Maastopikselin koko
GLONASS	Global Navigation Satellite System (Russia); Venäjän maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä
GNSS	Global Navigation Satellite System; Maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä
GNSS/IMU	GNSS:n ja IMU:n yhdistävä mittausjärjestelmä, joka määrittää samanaikaisesti laitteen sijainnin ja kallistukset
GPS	Global Position System (Usa); Yhdysvaltojen maailmanlaajuisen paikannusjärjestelmä
IMU	Inertial Measurement Unit; Inertiaalimittausyksikkö, joka mittaa laitteen kallistukset
RGB-kuva	Red, Green, Blue; Värikuva, sisältää punaisen (R:red), vihreän (G:green) ja sinisen (B: blue) aallonpituuden

RMSE	Root Mean Square Error; neliökeskivirhe
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System; Kauko-ohjatun ilma-aluksen käytön kokonaisjärjestelmä, johon sisältyy: kauko-ohjattu ilma-alus, sen kauko-ohjauspaikat, tarvittavat ohjaus- ja seurantayhteudet ja muut erikseen määrätyt käytön edellyttämät järjestelmän osat
SIFT	Scale-invariant feature transform; Algoritmi, joka tunnistaa ja piirtää lokaaleita ominaisuuksia kuvilta. Sitä käytetään mm. kohteiden tunnistuksessa ja 3D mallinnuksessa
SfM	Structure-from-motion; Photogrammetrinen mittaus-menetelmä, jossa muodostetaan 3-ulotteisia malleja 2-ulotteisista kuvista
UAS	Unmanned Aerial System; Miehittämätön ilma-alusjärjestelmä
UAV	Unmanned Aerial Vehicle; Miehittämätön ilma-alus
WGS84	World Geodetic System 1984; Maailman geodeettinen järjestelmä vuodesta 1984 lähtien

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Kauko-ohjattavien ilma-alusten (RPAS) käyttö kaukokartoiskuvauksissa on viime vuosien aikana lisääntynyt nopeasti. Tämän mahdollistavat laitteistojen alhaiset hinnat ja käyttökustannukset. RPAS-laitteita on myös suhteellisen helppo käyttää niiden lähes automaattisten autopilottien ansiosta. Kuitenkaan niiden pienen koon vuoksi ne eivät pysty kantamaan perinteisiä tarkkoja kaukokartoituksen instrumentteja. Aluksi niissä käytettiin halpoja sensoreita, joiden vakaus ja kuvan laatu eivät vastaa läheskään samaa kuin korkealaatuisten sensoreiden (Eisenbeiß, 2009). Viime vuosina on kuitenkin alettu kehittää uusia instrumentteja, jotka soveltuvat pienen kokonsa ja tarkkuutensa puolesta RPAS-laitteiden tarkkoihin kaukokartoitustutkimuksiin (Mäkynen ym., 2011; Lucieer ym., 2014; Büttner ja Röser 2014; Hruska ym., 2012). Yksi nopeasti kehittyvä teknologia on hyperspektriinstrumenttien kehitys ja soveltaminen RPAS-laitteistoissa. Hyperspektrikuvausta on tehty jo vuosikymmeniä satelliiteista ja lentokoneista käsin, mutta näille suunnatut sensorit ovat olleet whiskbroom tai pushbroom –sensoreita. Dynaamisen kuvanomuodostuksen takia sensorit ovat vaatineet tarkkoja GNSS/IMU mittaustaitteistoja georeferointia varten ja näillä sensoreilla ei ole pystytty tuottamaan 3D-pintamalleja kohteesta (Saari ym., 2009).

Uusilla 2D-kuvaa muodostavilla hyperspektrikameroilla voidaan mitata kohteen 3D muodon lisäksi kohteen spektri (Saari ym., 2009). Hyperspektrikamerat mahdollistavat RPAS-laitteistoilla tehtävän ilmakuvauksen avulla suurienkin alueiden monipuolisen tarkkailun. Niitä on käytetty jo laajasti esimerkiksi metsien (Saari ym. 2011; Näsi ym., 2015), peltojen (Honkavaara ym., 2013a; Kaivosoja ym., 2013; Saari ym., 2011; Büttner ja Röser, 2014), karujen olosuhteiden kasvillisuuden biodiversiteetin (Lucieer ym., 2014), kuiven alueiden (Mitchell ym., 2012) ja kosteikkojen (Madden ym., 2015) tutkimuksissa ympäri maailmaa. Tutkimusten pohjalta hyperspektriaineistoja on ruvettu hyödyntämään mm. peltojen lannoitekarttojen tekemiseen sekä metsien inventointiin ja sen luokitteluun (Salami ym., 2014). Paikkatietokeskuksen (entinen Geodeettinen laitos) tutkimuksessa on tutkittu hyperspektriaineiston soveltuvuutta mm. maataloussovelluksissa (Honkavaara ym., 2013a; Kaivosoja ym., 2013), vesistöjen kaukokartoituksessa (Honkavaara ym., 2013b), metsätuhojen havainnoimisessa (Näsi, 2014), puulajiluokittelussa (Nevalainen ym., 2016) sekä turvetuotantoalueiden monitoroinnissa (Honkavaara ym., 2016). Muita tärkeitä sovellusalueita ovat mm. sotilassovellukset ja kaivosten tutkiminen.

VTT:n kehittämä Fabry-Pérot –interferometriin (FPI) perustuva FPI hyperspektrikamera kerää 2D-kuvia (Mäkynen ym., 2011; Saari ym., 2011, 2013). Tämän vuoksi spektritiedon lisäksi FPI-kameran kuvista voidaan tuottaa 3D-geometriatietoa, kuten kohteen pintamalleja ja tiheitä 3D-pistepilviä fotogrammetrisilla menetelmillä. Tässä tutkimuksessa perehdytään erilaisten ympäristökohteiden, metsä ja pelto, hyperspektriseen 3D-mittaukseen fotogrammetrisesti ja pohditaan niiden ominaisuuksia tällaisen kartoituksen kannalta. Tutkimuksessa keskitytään hyperspektristen kuvien geometriseen prosessointiin Structure-from-motion (SfM) menetelmällä (Lowe ym., 1999). Kehittyneiden SfM algoritmien myötä monet ilmakuvien orientointien ja sijaintien määrittämiseen käytettävät ohjelmat hyödyntävät juuri SfM tekniikkaa. Tutkimuksessa perehdytään hyperspektristen fotogrammetristen 3D-mittauksen lisäksi myös RGB-kuvien 3D-mittaukseen. Tutkimuksessa pyritään selvittämään hyperspektri- ja RGB-kuvien keruuseen ja geometriseen prosessointiin vaikuttavat tekijät. Lisäksi tutkitaan hyperspektri- ja RGB-kuvilta tuotettujen 3D-pistepilvien, ortomosaiikkien ja korkeusmallien virheen mittausta. Tutkimuksessa määritetään Paikka-

tietokeskuksen yhdelle metsäaineistolle ja kahdelle peltoaineistolle, niiden 3D-pistepilvien, ortomosaiikkien ja korkeusmallien tarkkuudet.

Tässä tutkimuksessa on tavoitteena selvittää hyperspektri- ja RGB-kuvien geometrisen prosessoinnin parhaat menetelmät metsä- ja peltoympäristöissä. Etenkin tavoitteena on kehittää FPI-kameran kuville optimaalinen geometrinen prosessointiketju ja sen virheen mittausta lentokuvausaineistoja varten näissä ympäristöissä. Kokonaista FPI-kameran kuvien lentokuvausaineistojen geometrista prosessointiketjua ei ole aikasemmin toteutettu. Peltoaineistoista lasketaan myös kasvillisuuden korkeusmallit (engl. Canopy Height Model, CHM) ja tutkitaan voidaanko niitä hyödyntää biomassojen estimoinnissa manuaalisesti mitattujen korkeuksien sijaan. Työssä tutkitaan myös kirjallisuuden kautta kuinka CHM:ä on hyödynnetty pelto- ja metsäaineistoilla biomassojen estimoinnissa. Biomassojen estimointi on erittäin tärkeää mm. maanviljelyssä ja siinä on aikaisemmin käytetty apuna manuaalisesti mitattuja kasvuston korkeuksia. Näiden kerääminen on kuitenkin hidasta ja aikaavievää, minkä vuoksi fotogrammetrisen CHM:n käyttö biomassojen estimoinnissa olisi tarpeen. Työssä selvitetään myös, miten hyperspektri- ja RGB-kuvien geometrinen prosessointi ja mallien tarkkuuksien mittaaminen on muissa tutkimuksissa toteutettu.

1. Mitkä ovat tarkkuuden, tiedonkeruun tehokkuuden ja prosessoinnin tehokkuuden kannalta parhaat hyperspektri- ja RGB-kuvien keräyksen ja geometrisen prosessoinnin menetelmät?

- a. Mitä vaiheita kuvien keräykseen ja prosessointiin liittyy ja kuinka ne tulee suorittaa erilaisissa ympäristöissä?
- b. Miten hyperspektri- ja RGB-kuvien keruu ja geometrinen prosessointi on muissa tutkimuksissa toteutettu?

2. Virheen mittaaminen hyperspektri- ja RGB-kuvilta tuotetuilta ortomosaiikeilta ja DSM:ltä

- a. Miten virheen mittaaminen on toteutettu muissa tutkimuksissa?
- b. Kuinka tarkkoja ovat Paikkatietokeskuksen ortomosaiikit ja DSM:t

3. Voiko kasvillisuuden korkeusmalleja (CHM) hyödyntää manuaalisesti mitattujen kasvillisuuden korkeuksien sijaan biomassojen määrittämisessä?

1.2 Tutkimusmenetelmät ja aineisto

Työssä käytetään Paikkatietokeskuksen RPAS-laitteistolla Mustila Arboretumin kansallispuiston alueella vuonna 2015 kuvattuja hyperspektri- ja RGB-kuvablokkeja metsästä sekä vuoden 2016 toukokuussa ja heinäkuussa kuvattuja hyperspektri- ja RGB-kuvablokkeja Vihdin Hovin pelloilta. Näillä kaikilla lennoilla oli RPAS-laitteistossa yksitaajuus GPS-vastaanotin, jolla saadaan kuvien sijaintitieto ratkaistua jokaiselle kuvalle. Maastoreferenssinä on käytetty signaloituina maastotukipisteitä (engl. Ground Control Point, GCP) mustia noin 40 cm x 40 cm kokoisia vanerilevyjä, joihin on maalattu valkoisella maalilla ympyrä halkaisijaltaan 30 cm. Hovin peltoalueelle rakennettiin 32 GCP:tä ja Mustilan metsäalueelle rakennettiin yhteensä 5 GCP:tä. GCP:iden sijainnit mitattiin RTK-GPS:llä X- ja Y-koordinaateissa 3 cm absoluuttisella tarkkuudella ja Z-koordinaatissa 4 cm absoluuttisella tarkkuudella (Häkli ym., 2004). Mustilan metsäaineisto edustaa geometrialtaan erittäin

vaikeasti mallinnettavaa kohdetta, jossa on suuria korkeuseroja. Vihdin peltoaineisto edustaa geometrialtaan helpommin mallinnettavaa, tasaista kohdetta.

Tässä tutkimuksessa hyperspektri- ja RGB-kuvien orientoinnit ja sijainnit ratkaistaan käyttämällä SfM tekniikkaan perustuvaa AgiSoft Photoscan Professional (Versio 1.2.5) ohjelmaa (AgiSoft, 2016). Tämän lisäksi Photoscanilla lasketaan alueiden 3D-pistepilvet, ortomosaiikit ja korkeusmallit. Photoscan-ohjelmistoa on laajasti hyödynnetty tieteellisissä tutkimuksissa hyperspektri- ja RGB-kuvien orientointien määrittämisessä sekä 3D-pistepilvien, ortomosaiikkien ja korkeusmallien laskemisessa (Honkavaara ym., 2016a, 2016b; Suomalainen ym., 2014; Lucieer ym., 2014a, 2014b; Wallace ym., 2016; Bendig ym., 2015b; Anders ym., 2013; Turner ym., 2012). Valmiiden 3D-pistepilvien, ortomosaiikkien X- ja Y-koordinaattien ja korkeusmallien Z-koordinaattien absoluuttisia tarkkuuksia voidaan määrittää mm. tunnettujen tarkistuspisteiden avulla (Kraus, 1993, s. 317-319). 3D-pistepilvien, ortomosaiikkien ja korkeusmallien virheen määrittäystä tarkistuspisteiden avulla on tutkittu myös aikaisemmin (Rosnell ja Honkavaara, 2012; Lucieer ym., 2014a, 2014b; Bendig ym., 2013, 2014b). Niiden tarkkuutta voidaan arvioida myös vertaamalla niitä laserpistepilviin ja niistä tuotettuihin pintamalleihin (Wallace ym., 2016). Suurinosa kaupallisista SfM ohjelmistoista, kuten Photoscan, ei ilmoita ortomosaiikkien ja korkeusmallien absoluuttisia virhe-estimointeja laskennoissaan. Photoscan kuitenkin ilmoittaa kuvien liitospisteiden koordinaatien keskivirhe-estimaatit. Absoluuttisten virheiden määrittämiseen käytetään tässä tutkimuksessa QGIS (Versio 2.18.2) ohjelmaa (QGIS, 2016) ja MATLAB (Versio 2015b) ohjelmaa (MathWorks, 2015).

Kolmanteen tutkimuskysymykseen pyritään vastaamaan vertaamalla Vihdin peltoaineiston pintamalleista laskettuja CHM:ä manuaalisesti mitattujen kasvillisuuden korkeuksien sekä kuiva- ja tuorebiomassojen korkeuksien kanssa.

Tutkimuksen empiirisen tutkimusosuuden tutkimusmenetelmät ovat siis kvantitatiivisia eli tässä käytetään ongelman ratkaisemisessa määrällisiä ominaisuuksia. Empiirisen osion apuna on käytetty myös kirjallisuutta, joka on siis kvalitatiivista tutkimusta.

Kirjallisuustutkimusta käytetään myös pääsääntöisenä menetelmänä tutkittaessa miten hyperspektri- ja RGB-kuvien keruu ja geometrinen prosessointia on aikaisemmin tehty. Tässä osiossa, sekä edellisen osion kirjallisuuslähteinä käytetään pääsääntöisesti tuoreita tieteellisiä julkaisuita. Tämän osion tutkimusmenetelmä on puhtaasti kvalitatiivinen. Tutkimus koostuu siis kvantitatiivisesta ja osittain kvalitatiivisesta empiirisestä osasta sekä kvalitatiivisesta kirjallisuustutkimuksesta.

1.3 Työn rajaus ja rakenne

Tämän tutkimuksen aiheena on fotogrammetria ja kaukokartoitus. Tästä syystä tutkimuksessa perehdytään erityisesti näihin aiheisiin liittyviin kysymyksiin. Työssä perehdytään etenkin hyperspektri- ja RGB-kuvien keräykseen, geometriseen prosessointiin sekä kuvailaan hyperspektrikuvien kokonaisprosessointi. Työssä kuvaillaan tarkasti FPI- ja RGB-kuvien geometriset ominaisuudet ja tutkitaan näistä tehtyjen 3D-pistepilvien, ortomosaiikkien ja korkeusmallien tarkkuuksia.

Tutkimuksessa käytettävät aineistot on kaikki kerätty käyttämällä RPAS-laitteistoa, minkä vuoksi työ rajataan koskemaan vain RPAS-laitteistolla kerättyjä hyperspekttri- ja RGB-kuvia. Kuvattaviksi ympäristöiksi on valikoitu metsä ja peltoaineistot, koska metsäaineisto

edustaa geometrialtaan hankalaa mallinnettavaa ja peltoaineisto taas geometrialtaan helppoa mallinnettavaa.

Metsäaineistojen osalta tutkitaan Mustilan Arboretumissa vuonna 2015 kuvattua sekametsää ja peltoaineistoista valikoitui tutkittavaksi Vihdin Hovissa vuonna 2016 kuvatut peltoaineistot. Aineistojen käsittely rajattiin koskemaan vain näitä kahta tapausta, jotta aineistojen käsittelyn määrä pysyy kohtuullisena.

Työ koostuu kahdesta osasta: empiirisestä tutkimuksesta ja kirjallisuustutkimuksesta. Luvussa 2 pyritään hakemaan vastauksia ensimmäiseen tutkimuskysymykseen kirjallisuustutkimuksella. Luvussa kuvataan ensin yleisesti kaukokartoitusta, RPAS-laitteistoja, RPAS-laitteistoille suunnattuja instrumentteja ja kuvien laadun määrittystä. Tämän jälkeen luvussa kuvataan erilaisia hyperspektri- ja RGB-lennokkisysteemeitä, niillä kerättyjä kuvia sekä tarkastellaan kuvien geometrista prosessointia ja kuvilta tuotettujen 3D-mallien tarkkuuksia. Luku loppuu päätelmiin RPAS-laitteistoista ja niiden kuvauksista. Luvussa 3 esitellään Paikkatietokeskuksessa ilmakuvaukseen käytettävät laitteistot, testialueet, kuvaukset, referenssiaineistot ja kameroiden kalibroinnit. Luvussa 4 käydään tarkemmin läpi työssä käytettyjä menetelmiä ja kuvaillaan FPI- ja RGB-kuville vaadittavat esiprosessoinnit, geometrinen prosessointi ja tuotettujen mallien virheen arviointi menetelmät. Viidennessä luvussa esitellään työssä saatuja tuloksia kuvausten ja kuvien laadun sekä neljännessä luvussa esiteltujen kohtien pohjalta. Viimeisessä kuudennessa luvussa kootaan työn tulokset johtopäätöksiin ja yhteenvetoon.

2 Lennokkisysteemit ja -kuvaukset

2.1 Lennokkisysteemit

Maailmanlaajuisesti lennokkisysteemien (engl. Unmanned Aerial System, UAS) markkina arvo vuonna 2013 oli 5400.0 miljoonaa euroa ja sen on odotettu kasvavan jopa 6350 miljoonaan euroon vuoteen 2018 mennessä. UAS:t tunnetaan useilla eri nimillä ja nimityksillä, kuten miehittämätön ilma-alus (engl. Unmanned Aerial Vehicle, UAV), ilmarobotti (engl. Aerial robot) tai yksinkertaisesti drooni (engl. Drone). Termi UAS vakiintui käytettäväksi Yhdysvaltojen Department of Defense (DOD) ja Iso-Britannian the Civil Aviation Authority (CAA) toimesta. International Civil Aviation Organization (ICAO) esitteli UAS termin alaluokaksi kauko-ohjattu ilma-alus (engl. Remotely-Piloted Aerial System, RPAS) integroitavaksi kansainväliseen kansalaisilmailusysteemiin (engl. international civil aviation system). (Colomina ja Molina, 2014.)

UAS:t luokitellaan useisiin eri kategorioihin mm. niiden lentoalustan ominaisuuksien, kuten koon, painon, kestävyys, aerodynaamisuuden mukaan, kun myös lennokkisysteemin operatiivisten ominaisuuksien, kuten maksimietäisyyden tai lentokorkeuden mukaan (Champion ja Everaerts, 2009). Eisenbeiss (2009) lajittelee UAS:t mm. niiden painon, maksimietäisyyden, kestävyden, sää ja tuulen kesto-ominaisuuksien, hinnan ja kantokyvyn mukaan. Myös Blyenburgh (2013) on luokitellut UAS:t eri kategorioihin mm. niiden koon, painon, maksimietäisyyden ja sertifiointi-potentiaalin (engl. certification potential) mukaan.

Tässä työssä käytetään ICAO:n esittelemää nimitystä Kauko-ohjattu ilma-alus (RPAS). RPAS-laitteilla mitataan ja kuvataan ympäristöä ilmasta käsin erilaisilla lentoalustoilla ja kuvausinstrumenteilla. RPAS-laitteen lentoalusta on yleensä joko kiinteäsiipinen (engl. fixed wing) tai multikopterimallinen. Näiden lisäksi se voi olla myös esimerkiksi ilmapallo, leija, zeppelin tai kopterimallinen. Multikopterimalliset lennokit jaotellaan niiden roottorien lukumäärän ja koon perusteella eri luokkiin (Champion ja Everaerts, 2009). RPAS-laitteistojen etuina ovat niiden halvat hinnat ja alhaiset käyttökustannukset. Niillä pystytään kartoittamaan tehokkaasti ja turvallisesti vaikeasti saavutettavia kartoituskohteita, kuten esimerkiksi tulipalojen tarkkailu tai päästöönnettomuudet, kuten kaasupäästöt.

RPAS-laitteistoissa on useimmiten kuvausinstrumenttien lisäksi myös muita mittaus-, paikannuslaitteita sekä lentokomponentteja ja maa-asema. Nämä kaikki on useimmiten integroitu toimimaan keskenään lennossa olevan autopilotin ja pienen tietokoneen kautta. Lentoalustoihin voidaan asentaa useita eri kaukokartoituksen instrumentteja erikseen tai yhdessä eri sovellus tarkoituksiin. Viime vuosina keveät hyperspektri-instrumentit ovat yleistyneet RPAS-laitteistoille. Muita kaukokartoitusinstrumentteja ovat mm. perinteiset digitaalikamerat, laserkeilamat ja lämpökamerat. Paikannuslaitteistoihin kuuluvat GPS-vastaanotin ja -antenni, jotka mittaavat tarkasti lennokin sijaintitietoa. Näiden lisäksi usein lentoalustassa on myös inertiamittausyksikkö (IMU), joka mittaa RPAS kallistuksia ja asentoa. GPS:n ja IMU:n lisäksi RPAS-laitteesta löytyy usein myös barometri ja kompassi, joita käytetään navigoinnin apuvälineinä. Useimmissa RPAS-laitteissa on myös autopilotti, jonka avulla sillä pystytään lentämään suunnitellut kartoitusreitit automaattisesti. RPAS-laitteistot ja niiden instrumentit vaativat myös virtaa, joten laitteisto sisältää useita akkuja.

RPAS-laitteistojen hyötykuorman kantokyky riippuu pitkälti sen moottorien ja ropellien koosta. Tyypillisesti pienet RPAS-laitteistot jaksavat nostaa noin 1-10 kg:n hyötykuorman

ja painavat noin 1-15 kg. Lentoaika vaihtelee tyypillisesti 10-30 min välillä koptereilla ja kiinteä siipisillä 30 min - useiden tuntien välillä. Lentoaikaan vaikuttavia tekijöitä ovat niin ikään moottorien ja roottorien koko, lennokin paino sekä akkujen teho. Useat kiinteäsiipiset lennokit käyttävät akkujen sijaan polttoainetta, jonka avulla pystytään olemaan ilmassa pidempään kuin akkujen virralla. Akkuteknologian kehittyessä myös lennokeiden lentoajat ja hyötykuorman määrä kasvavat.

RPAS-laitteistoja säädellään eri valtioiden alueilla niiden ilmailulakien mukaan. Suomessa RPAS-laitteistojen käyttöä koskevista säädöksistä ja niiden valvonnasta vastaa Trafi (Trafi, 2016). Suomessa RPAS-laitteistot kuuluvat Ilmailulakien piiriin ja jokainen RPAS-laitteisto tulee tästä syystä rekisteröidä. Trafi myös ylläpitää tätä rekisteriä (Trafi, 2016).

RPAS-laitteistolla toteutettava kaukokartoituskuvaus sisältää tyypillisesti laitteistojen kalibroinnin, lennon suunnittelun sekä aineiston keräys- ja käsittelyprosesseja. Lennon suunnittelussa tulee ottaa huomioon mm. alueen koko, sivu- ja pituuspeitot sekä tarvittaessa rakennettava etukäteen maastoon tunnettuja GCP:tä. Aineiston keräykseen sisältyy kuvaus-, mittaus- ja paikannusaineiston tallentaminen. Kuvausaineisto käsittää tyypillisesti digitaalikameralla, hyperspektrikameralla tai lämpökameralla kerättyä aineistoa. Mittausaineistoja voi olla esimerkiksi laserkeilauksella kerättyä pistepilveä tai spektrometrillä kerättyä irradianssitietoa. Paikannusaineisto on tyypillisesti GPS:n tai GPS:n ja IMU:n tuottamaa reaaliaikaisesti tai jälkilaskentaa varten tallentamaa aineistoa. Useimmiten myös kuvaus- ja mittausaineisto prosessoidaan vielä jälkilaskemalla ja niihin sisältyviä prosessointeja ovat mm. kuvien georeferointi, pistepilven muodostaminen, mallinnus, tulosten analysointi ja mittaustarkkuuden arviointi. RPAS-laitteilla tullaan kuitenkin lähivuosina siirtymään täysin tai lähes reaaliaikaisesti toteutettaviin kaukokartoitussovelluksiin. Täysin reaaliaikaisia RPAS-laitteiden kartoitussovelluksia on jo toteutettu mm. Velodynen PUCK VLP-16 laserkeilaimella (Velodyne, 2016).

2.2 Kuvausinstrumentit

Yleisesti ottaen hyperspektrikamerat tuottavat kapeita spektraalisia kanavia jatkuvalla aallonpituusalueella tuottaen jokaiselle yksittäiselle kuvapikselille spektrin. Multispektrikamerat taas tuottavat epäjatkuvia, leveäkaistaisia kanavia eri aallonpituusalueilta ja niiden spektraalinen resoluutio on useimmiten huonompi kuin hyperspektrikameroilla. Hyperspektrikamera tuottaa siis hyperkuutioita, joissa esitetään X:nä ja Y:nä kahta spatiaalista ulottuvuutta, sekä λ :na spektraalista ulottuvuutta. Hyperkuution kerääminen toteutetaan joko pistemäisellä mittaamisella, riviskannaamalla (1D) tai 2D-kuvauksena (engl. snapshot imaging). (Colomina ja Molina, 2014; Aasen ym., 2015.)

Ennen hyperspektri-ilmakuvaus toteutettiin pääasiassa lentokoneisiin kiinnitettävillä skannaukseen perustuvilla painavilla hyperspektrisensoreilla, kuten AVIRIS, HyMap ja Specim AISA-keilaimilla (Büttner ja Röser, 2014). Siinä perinteisten kokonaisten kuvien sijaan keilataan ympäristöä riveinä, joko lentolinjaa kohtisuoralla skannauksella (eng. across track scanning) eli whiskbroom-skannerilla tai lentosuuntaisella keilauksella (engl. along-track scanning) eli pushbroom-skannerilla. Whiskbroom-skannerissa on useimmiten pyörivä tai oskilloiva peili, joka sijoitetaan lentoalustan pohjaan useimmiten 90 – 120 asteen kulmaan. Se tallentaa kohteiden aallonpituudet kapeina kaistaleina tai yksittäisinä pikselinä jatkuvalla kuvauksella muodostaen linjojen sarjoja lentolinjojen suuntaisesti lentoalusta molemmin puolin. Näistä linjoista, jotka kohteiden aallonpituudet, pystytään rakentamaan jälkilaskemalla tarkkojen sensorin sijainti- ja orientointitietojen avulla matriisikuva ympä-

ristöstä tai maastomallia hyödyntämällä saadaan liitettyä spektritieto maastomalliin. (Lillesand ym., 2008, s. 326–332.) Uto ym. (2016) on esitellyt RPAS-laitteille suunniteltua whiskbroom-skanneria.

Pushbroom-skanneri rakentuu 2D CCD-kennoista, joiden kukin rivi tallentaa erilaisen aallonpituuden (Lillesand ym., 2008, s. 332–334). Pushbroom-skanneri tuottaa lentolinjaan nähden kohtisuoraan pitkiä kapeita linjoja, jotka voidaan jälkilaskemalla tarkkojen sensorin sijainti- ja orientointitietojen avulla matriisikuvana tai maastomallin avulla saada liitettyä spektritieto maastomalliin (Büttner ja Röser 2014). Pushbroom-skannerin kuva on sisäisesti vakaa keskusprojektiokuva lentosuuntaan nähden kohtisuorassa suunnassa, mutta lentosuunnassa sen geometriseen tarkkuuteen vaikuttavat kuvausalu-
stun liikkeet (Lillesand ym., 2008, s. 326–332).

Whiskbroom- ja pushbroom-skanneri tekniikoiden käyttö ilmakuvauksessa vaatii siis erittäin tarkkaa kameran sijainnin ja orientoinnin määrittämistä. Tyypillisesti tämä toteutetaan suoralla sensorientoinnilla GNSS- ja IMU-mittausjärjestelmiä hyödyntäen. Suoralla sensorientoinnilla saadaan korjattua kuvausalu-
stun liikkumisen vaikutukset kuvilta. Tämän lisäksi lentoalu-
stun on oltava hyvin vakaa, jotta aineistosta pystytään luomaan tarkka georeferoitu malli (Lillesand ym., 2008, s. 332–334). Pushbroom-skanneri tekniikkaan perutuvia hyperspektrisensoreita on käytetty laajasti RPAS-laitteistoilla (Lucieer ym., 2014a, 2014b; Büttner ja Röser, 2014; Suomalainen ym., 2014; Hruska ym., 2012; Mitchell ym., 2012).

Nykyään RPAS-laitteistoille on yleistynyt 2D-kuvaukseen eli snapshot tekniikkaan perustuvat multi- hyperspektrikamerat. Siinä jokaisen eri aallonpituuskanavan sijainti ja spektri tieto tallennetaan yhtäaikaisesti tai lähes yhtäaikaisesti datakuutioksi, ilman skannausta. Tässä tutkimuksessa käytettiin kahta eri snapshot tekniikkaan perustuvaa hyperspektrika-
mera. Niiden toimintaa kuvaillaan tarkemmin luvussa 3.

Taulukkoon 1 on koottu muutamia esimerkkejä snapshot multispektraalisistakameroista ja Taulukkoon 2 on koottu esimerkkejä snapshot hyperspektrikameroista. Taulukoiden 1 ja 2 kamerat ovat nimenomaan suunnattuja RPAS-laitteiden käyttöön. Taulukoissa 1 ja 2 on esiteltyä sensoreiden keskeisimpiä ominaisuuksia, kuten sensorin resoluutio, aallonpi-
tuusalueet, kuvataajuus ja paino. Taulukossa 1 esiteltyä Tetracam MiniMCA-6 kameran sensorin korjausta on käsitelty mm. Kelcey ym. (2012), ja sitä ovat käyttäneet maatalous-
sovellusten tutkimuksessa mm. Bendig ym. (2012) ja Jeong ym. (2016).

Taulukko 1 Yleisimpien RPAS-laitteille suunniteltujen multispektraalikameroiden ominaisuuksia.

Valmistaja ja malli	Sensorin koko (mm)	Sensori; Resoluutio (Pikseli x pikseli)	Polttoväli (mm)	Pikseli koko (µm)	Paino (kg)	Kuvataajuus (fps)	Aallonpituusalue (nm)
Tertracam MiniM-CA-6	6.66 x 5.32	CMOS; 1280 x 1024	9.6	5.2 x 5.2	0.7	Yhden kuvan otolla: 0.2 – 0.33 / Sarja kuvauksella: 1.3	450–1050 (4 tai 6 asiaan valitsemaan kanavaa täitä väliä)
RedEdge by MicroSense	4.8 x 3.6	-; 1280 x 960	5.5	-	0.150 + 0.18 irradianssi sensori	1	Viisi kanavaa: 480, 560, 670, 720, 840
Sequoia by Parrot	4.8 x 3.6	Monokromaattinen; 1280 x 960	3.98	3.75 x 3.75	0.072 + 0.035 irradianssi sensori	1	Neljä kanavaa valittuna väleillä: 530-570, 640-680, 730-740, 770-810
Quest Innovations Condor-C5 UAV-285	10.2 x 8.3	CCD; 1360 x 1024		6.45 x 6.45	1.45 sisältäen 50 mm linssin / 1.95 sisältäen 15 mm linssin + 0.35 Micro-pc	5	400–1000
SpectroCam UV	6.4 x 4.8	-; 1392 x 1040	-	4.65 x 4.65	0.908	-	200-900

Taulukko 2 Uusien keveiden hyperspektrikameroiden ominaisuuksia. * Kamerasta on saatavilla myös toinen vastaava, joka toimii 470 – 630 nm:n alueella.

Valmistaja ja malli	Spektrikanavien lkm; Spektraalinen erotuskyky	Sensorin koko (mm x mm)	Sensori; Resoluutio (Pikseli x pikseli)	Pikseli koko (μm x μm)	Paino (kg)	Kuvataajuus (fps)	Aalloittuusalue (nm)	Kuvausperiaate
Rikola Ltd. FPI-kamera	380; <10 nm	5.6 x 5.6	CMOS; 1010 x 1010	5.5 x 5.5	0.72	30	500-900	Säädettävä FPI, aika- viivetekniikka
Cubert UHD 185-FirefEye SE	125; 8 nm @532 nm	2 x 1	CCD; 50 x 50	-	0.49 + muut osat 0.35	5	450-950	FPI-pohjainen, yhtäaikaiset kanavat
Cubert ButterfEye	25; 20 nm	2 x 2	CMOS; 400 x 218	-	-	20	600-1000	FPI-pohjainen filmi- filterit, samanai- kaiset kanavat
SM5X5-600-1000*	25; <10 nm	-	CMOS; 2048 x 1088 (409 x 216 per kana- va)	5.5 x 5.5	0.03 + lins- si	340 (8 bit)	600-1000	FPI-pohjainen mosa- ikkifilteri, saman- aikaiset kanavat
Micro-Hyperspec VNIR model, A-series	837; 5 nm kun 260 kanavaa	-	CCD;	7.4 x 7.4	2.8	45	380-1000	Pushbroom
AISA Kestrel 10	-; 1.75/3.5/7 nm	-	1312 x 1312 / 2048 x 2048	-	2.1 / 4.75*	-	400-1000	Pushbroom
AISA Kestrel 16	-; 4 nm	-	640 x 640	-	2.3 / 5.0*	-	600-1640	Pushbroom
HySpex MjoInir-1024	200; 3nm	-	1024 x 1024	-	4.5	-	400-1000	Pushbroom
Specim FX10	200; < 10 nm	-	512 x 512	-	-	Kaikki kanavat mu- kana: 330 FPS / Yksi kanava: 9900 FPS	400-1000	Pushbroom

Hyper- ja multispektrikameroiden lisäksi useimmissa RPAS-laitteistoissa on RGB-kamera. RGB-kameralla saadaan spatiaaliselta resoluutiolta tarkkoja kuvia kohteesta, minkä vuoksi sillä saadaan tuotettua kohteesta erittäin tarkkoja ortomosaiikkeja ja korkeusmalleja. Usein hyper- ja multispektrikameroiden kuvien spatiaalinen resoluutio on huomattavasti huonompi kuin RGB-kameran kuvilla ja lisäksi niillä on usein kapea katselukulma. Tämän vuoksi Paikkatietokeskuksen tutkimuksissa on usein hyödynnetty RGB-kameran kuvia hyperspektrikameran kuvien orientointien tukena sekä tarkan DSM:n ja ortokuvamosaiikkien teossa (Honkavaara ym., 2016a, 2016b). RGB-kameran kuvilta luotua DSM:ää hyödyntävät myös mm. Lucieer ym. (2013), Buttner ja Röser (2014) sekä Suomalainen ym. (2014) tutkimuksessa pushbroom hyperspektrikameran spektrilinjojen georeferoinnissa.

Kaukokartoitukseen suunnattujen RGB-kameroiden parhaimmiston lukeutuu Phase One IXU 1000. One IXU 1000 on medium format kamera CMOS-kennolla, jossa on 100 megapikseliä. Sensorin koko on 53.4 x 40.0 mm ja pikseli koko 4.6 μm . Kamera painaa noin 1.4 kg 80 mm linssin kanssa. Kameran valovoimaisen kennon maksimi ISO 6400 mahdollistaa kuvaamisen pimeälläkin säällä. Kamerassa on 7 eri linssivaihtoehtoa 32 mm:stä aina 150 mm asti. Kameran millimetrien kuvaustarkkuuden takaa sille toteutettavat tiukat laboratoriossa toteutettavat tärahtelytestit eri lämpötiloissa. Myös Trimbleltä löytyy IQ180 metrinen kamera, joka on CDD-kennoinen 80 megapikselinen medium format kamera. Sen sensorin koko on 53.4 x 40.0 mm, kuten Phase onessa ja sen pikselikoko on 5.2 μm . Painoa kameralla on noin 1.5 kg ja linssi valikoimana on 35 mm:stä 100 mm:n.

Medium format kamerat ovat kuitenkin lähtökohtaisesti hinnaltaan ja painoltaan korkeita RPAS-laitteistoihin. Tästä syystä RPAS-laitteistoissa käytetään usein small format kameroita. Parhaimpia ilmakuvaukseen soveltuvia small format kameroita ovat täysikennoiset DSLR kamerat. Niiden suuren koon ja painon vuoksi ne eivät kuitenkaan sovellu pienimpiin RPAS-laitteistoihin. Parhaimpia kevyitä ja pieniä small format kameroita on mm. Sony a7 II. Siinä on täysikennoinen 24,3 MP CMOS-sensori, jonka koko on 35,8mm x 23,9 mm ja pikseli koko on 3,9 μm . Sony a7 II painaa noin 0,6 kg ja sen linssivalikoima kattaa kaikki laajakulmasta aina superzoomeihin. Toinen useissa RPAS-laitteistoissa käytetty small format kamera on Panasonic GX1 16 MP kamera (Bendig, 2015a; Suomalainen ym., 2014, Anders ym., 2013). Tässä tutkimuksessa on käytetty Samsung NX300 ja NX500 small format kameroita. Ne on esitelty tarkemmin luvussa 3.

2.3 Laadun määrittäminen

Taulukossa 3 on esitelty ilma- ja ortokuvien laatuun liittyviä käsitteistöä ja niiden merkitykset. Stereo- ja ortoilmakuvien laatutekijät ovat: geometrinen tarkkuus, spatiaalinen erotuskyky, radiometrinen laatu ja kuvilla esiintyvät häiriöt.

Käytännössä geometrinen tarkkuus riippuu fotogrammetrisen mittauksen tarkkuudesta sekä identifiointitarkkuudesta. Sijaintitarkkuuden estimaatti (m_{meas_tot}) saadaan summaamalla nämä tekijät neliöllisesti, koska nämä virhekomponentit voidaan nähdä toisistaan riippumattomina tekijöinä:

$$m_{meas_tot} = \pm \sqrt{m_{id}^2 + m_{foto}^2} \quad (1),$$

missä m_{id} on identifioinnin tarkkuuden estimaatti ja m_{foto} on fotogrammetrisen mittauksen tarkkuuden estimaatti. (MML, 2016a).

Fotogrammetrisen mittauksen tarkkuus riippuu erityisesti kuvien georeferoinnin tarkkuudesta, sekä kuvasäteiden leikkauskulmasta ja lukumäärästä stereo- ja 3D-mittauksessa. Kuvien georeferoinnin tarkkuus määräytyy ulkoisten ja sisäisten orientointien sekä kalibrointien mukaan. Kuvasäteiden leikkauskulma määritetään kanta/korkeus-suhteella. Ortokuvilta voidaan suorittaa X- ja Y-koordinaattien mittausta. Niiden tarkkuuteen vaikuttavat ortokuvan orientointien tarkkuuden lisäksi ortokuvan laskennassa käytetyn korkeusmallin tarkkuus. Korkeusmallin tarkkuuden selvittämiseksi voidaan mitata sen Z-koordinaatti. Ortokuvan orientointien tarkkuuden määrittäminen on merkittävin kuvatuotteiden geometriseen tarkkuuteen vaikuttava tekijä.

Identifioinnin tarkkuus riippuu mittausmenetelmästä sekä kohteesta. Parhaaseen identifiointitarkkuuteen päästään symmetrisillä, taustastaan selkeästi erottuvilla kohteilla, kuten signaloituilla pisteillä. Näiden tarkkuus on tyypillisesti pikselin osia. Ihmisen tekemällä interaktiivisella mittauksella ei yleensä päästä aivan yhtä hyviin tarkkuuksiin kuin automaattisella mittauksella.

Hyvän spatiaalisen erotuskyvyn kuvilta pystytään erottamaan pienten kohteiden lisäksi myös lähekkäin olevat kohteet. Spatiaalisen erotuskyvyn mittari on GSD. Käytännössä mm. kuvausolosuhteet, kuvausasetukset, kuvaliike ja signaali-kohinasuhde vaikuttavat todelliseen erotuskykyyn, joka voi olla heikompi kuin GSD.

$$GSD = \frac{(FH - GH_{min})}{f} pikseli_koko \quad (2),$$

missä FH on lenkokorkeus, GH_{min} on pienin maastonkorkeus kuvausalueella ja f on polttoväli. Maaston korkeusvaihteluiden vuoksi kuvausmittakaava vaihtelee kuvan alueella.

Geometrisen tarkkuuden laatumittareita ovat koordinaattivirhe, tasovirhe, 3D-virhe, systemaattinen virhe, satunnainen virhe, kokonaisvirhe ja ympyrävirhe (engl. Circular error). Taulukkoon 4 on merkitty näiden laatumittareiden laskentakaavat.

Taulukko 3 Ilma- ja ortokuvien laatuun liittyviä käsitteistöä ja niiden merkitykset (MML, 2016a).

Käsite	Merkitys
Geometrisen tarkkuus	Sijaintitarkkuus taso- ja/tai korkeuskoordinaateissa. Sijaintitarkkuuteen liittyvät keskeiset käsitteet ovat absoluuttinen ja suhteellinen sijaintitarkkuus.
Absoluuttinen sijaintitarkkuus	Aineistosta mitattujen koordinaattiarvojen ja todellisten arvojen läheisyys. Todelliset koordinaattiarvot ovat joko tosia tai niiksi hyväksytyjä.
Suhteellinen sijaintitarkkuus	Aineistosta mitattujen kohteiden suhteellinen sijainti verrattuna kohteiden todelliseen suhteelliseen sijaintiin, tai sellaiseksi hyväksytyyn sijaintiin.
Virhe	Virhe on tarkkuuden mittari. Mittauksen todellinen virhe (v) on mitatun ja oikean arvon erotus: v = Mitattu arvo – Oikea arvo. Virheet jaotellaan yleensä karkeisiin, systemaattisiin ja satunnaisiin virheisiin.
Karkea virhe	Karkea virhe on luonteeltaan erehdys. Se johtuu tyypillisesti esim. väärästä numeroinnista, kohteen väärästä identifioinnista mittauksen aikana tai virheistä havaintojen kirjaamisesta. Karkeat virheet pyritään tunnistamaan ja eliminomaan mittausprosessista.

Systemaattinen virhe	Systemaattinen virhe noudattaa jotakin sääntöä. Se voi johtua mm. mittauslaitteesta, ympäristöolosuhteista tai laskukaavojen käytöstä pätevyysalueen ulkopuolella. Esim. ilmakuvakameran objektiivin piirtovirhe ja ilmakehän refraction aiheuttama kuvasäteen kaareutuminen. Systemaattiset virheet pyritään eliminoimaan mittausprosessista. Systemaattista virhettä kutsutaan myös ulkoiseksi epävarmuudeksi.
Satunnainen virhe	Mittauksissa esiintyvä vaihtelu sen jälkeen kun karkeat ja systemaattiset virheet on poistettu. Satunnaista virhettä kutsutaan myös sisäiseksi epävarmuudeksi.
Kokonaisvirhe	Kokonaisvirhe on systemaattisen ja satunnaisen virheen yhdistelmä. Virhekomponentit yhdistetään neliöllisesti. Kokonaisvirheen estimaatti (m_{kok}): $m_{kok} = \pm \sqrt{m_{syst}^2 + m_{sat}^2} \quad (3),$ missä m_{syst} on systemaattisen ja m_{sat} on satunnaisen virheen estimaatti
Neliökeskivirhe, RMSE	Virheiden (poikkeamien) neliökeskiarvo (Engl. Root Mean Square Error, RMSE). Mitatuista virheistä (poikkeamista) laskettu keskivirhe, joka kuvaa satunnaisten ja systemaattisten virheiden yhteisvaikutusta eli kokonaisvirhettä.
Spatiaalinen erotuskyky	Kuinka pieniä yksityiskohtia kuvilta voidaan erottaa.
Dynamiikka	Kuville rekisteröidyn kohteen kirkkausjakauman laajuus ilman kirkkaiden tai tummien sävyarvojen satureitumista.
Sävykyky	Miten hyvin kohteen kontrastit toistuvat kuvilla. Sävykykyden parantuessa yhä pienemmät kohteen kontrastit voidaan erottaa kuvalla. Kuvan sävykyky riippuu voimakkaasti käytetyn sensorin dynamiikasta, pikselisyvyydestä ja sävyn-toistosta.

Taulukko 4 Eri laatumittareita ja niiden laskentakaavat (MML, 2016a).

Laatumittari	Laskentakaava
Koordinaattivirhe	$dX_i = X_{havainto_i} - X_{ref_i}; dY_i = Y_{havainto_i} - Y_{ref_i}; dZ_i = Z_{havainto_i} - Z_{ref_i}$ (4)
Pistevirhe	$dXY_i = \sqrt{dX_i^2 + dY_i^2} \quad (5)$
3D-virhe	$dXYZ_i = \sqrt{dX_i^2 + dY_i^2 + dZ_i^2} \quad (6)$
Systemaattisen virheen mittari on otoskeskiarvo. n = tarkistuspisteiden lukumäärä	$\mu_X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dX_i; \quad \mu_Y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dY_i;$ $\mu_Z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dZ_i; \quad (7)$
Satunnaisen virheen mittari on otoskeskihajonta	$S_X = \sqrt{\frac{\sum(dX_i - \mu_X)^2}{n-1}}; S_Y = \sqrt{\frac{\sum(dY_i - \mu_Y)^2}{n-1}}; S_Z =$ $\sqrt{\frac{\sum(dZ_i - \mu_Z)^2}{n-1}} \quad (8)$
Koordinaattikeskivirhe	$RMSE_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dX_i^2}; RMSE_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dY_i^2};$ $RMSE_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dZ_i^2} \quad (9)$
Tasosijainnin keskivirhe	$RMSE_r = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (10)$
3D-keskivirhe	$RMSE_{3D} = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2 + RMSE_z^2} \quad (11)$

2.4 RPAS-laitteistot tutkimuksissa maailmalla

2.4.1 Lentoalustat

Taulukkoon 5 on listattu viimeaikaisissa kaukokartoitustutkimuksissa käytettyjen RPAS-laitteistojen teknisiä tietoja, mm. lentoalustat, niiden kantokyky, lentoaika ja autopilotti sekä kuvaussensoreiden sijaintitietojen mittaukseen käytettävät GPS, IMU ja tietokone, jolla laitteistot on synkronoitu toimimaan keskenään. Mukaan on valittu tutkimukset, joissa on käytetty RPAS-laitteistoja ja sen lisäksi kuvaus on toteutettu joko hyperspektrisensorilla tai RGB-kameralla tai molemmilla.

2.4.2 Kuvaussensorit

Taulukossa 6 on esitelty eri tutkimuksissa RPAS-laitteistoissa käytettyjä hyperspektri- ja RGB-kameroita. Hyperspektrikameroita, jotka perustuvat pushbroom-skannaukseen on käytetty laajasti UAV tutkimuksissa, mm. Büttner ja Röser (2014), Lucieer ym. (2014), Suomalainen ym. (2014), Hruska ym. (2012) ja Mitchell ym. (2012). Büttner ja Röser (2014) tutkivat viljelypeltoja, Stuttgartenissa Saksassa. Lucieer ym. (2014) tutkivat kasvien biomassoja laidunmailla ja ohrapelloilla Hobartissa, Australiassa sekä sammalpeitteiden terveyttä Antarktiksella. Suomalainen ym. (2014) tutkivat erilaisia viljelykasveja Dronenissa, Alankomaissa. Hruska ym. 2012 testasivat PIKO II sensoria ja Mitchell ym. (2012) käyttivät sitä kuivien maiden (engl. dryland) tutkimiseen Idahon Kansallisen Laboratorion (Idaho National Laboratory) Tutkimuspuistossa, Yhdysvalloissa. Uto ym. (2015) on esitellyt itserakennetun halvan ja pienen hyperspektrikameran, joka perustuu whiskbroom-skannaukseen ja on suunniteltu RPAS-laitteistoille.

Paikkatietokeskuksen lisäksi 2D-hyperspektrikameroiden käyttöä ovat tutkineet mm. Aasen ym. (2015, 2014) ja Bareth ym. (2015). Aasen ym. (2014) tutkimuksessa kehitettiin Cubert UHD 185-Firefly hyperspektrikameralle kalibrointimenetelmiä, kuten ”pimeäkuva” (engl. dark current) ja todellisen dynaamisen kantaman (engl. real dynamic range) kalibrointeja. Aasen ym. (2015) ja Bareth ym. (2015) hyödynsivät Cubert UHD 185-Firefly hyperspektrikameran kuvia mm. kasvillisuuden NDVI:n määrittämisessä ja RGB-kuvilta tuotetuilta CHM:ltä he laskivat kasvuston korkeuden (engl. Plant Height, PH), jota käytettiin kasvillisuuden kasvun ja kasvillisuuden biomassojen määrittämisessä ohra ja riisipelloilla, Kiinassa. Bareth ym. (2015) kokeilivat myös Rikola Ltd:n hyperspektrikameraa (500-900 nm), mutta kohtasivat sen radiometrisen kalibroinnin kanssa ongelmia.

Sima ym. (2016) esittelee COSI hyperspektrikameran, joka perustuu lineaarisesti vaihtuviin suodattimiin (engl. Linearly Variable Filters, LVF). Siinä, jokainen kuva koostuu eri aallonpituuksia sisältävistä linjoista. Se voidaan mieltää eräänlaiseksi pushbroom-skanneriksi. Kuville tehtävän sovituksen avulla saadaan kuvattava alue katettua kokonaisuudessaan eri aallonpituuksilla. (Sima ym., 2016.)

Taulukko 5 RPAS-laitteistojen sisältämät lentoalustat, niiden kantokyky, lentoaika ja autopilotti, sekä kuvauksensensoreiden sijaintitietojen mittaukseen käytettävät GPS, IMU ja tietokone. MK on lyhenne mikroko-
p-terista.

	Tietokone	lentoaika (min)	Lennotki	Kantokyky yhteensä (kg)	IMU	GPS	Autopilotti
Paikkatie-tokeskus	Raspberry Pi	25	Tarot 960	5	XSENS	L1-GPS (NVS NV08C-CHM)	Pixhawk
Lucieer ym. (2014a)	Gumstix Verdex Pro XM4-BT	2-3	Droidworx Skyjib 8 multi-rotor heavy-lift UAS + MK elektronikka	4,5	MEMS	L1/L2-GPS (Novatel OEMV-1DF)	MK
Büttner ja Röser (2014)	Linux PC	30	Itserakennettu kiinteäsiipinen	25	MEMS	L1-GPS (Tallysman TW 2410)	Paparazzi
Bareth (2015), Bendig ym. (2015b, 2014b, 2013)	ARM-prosessori	5-15	MK	2	-	MKGPS	MK
Anders ym. (2013)	-	45 - 60	MAVinci Sirius 1 Fixed-wing	2,6	-	-	MAVinci
Suomalainen ym. (2014)	Raspberry Pi	5-10	Aerialtronics Altura AT8 v1 octocopter	2 (instrumentit)	Xsens Mti-G-700 GPS-INS	Xsens Mti-G-700 GPS-INS	Aerialtronics
Turner ym. (2012, 2014), Lucieer ym. (2014), Wallace ym. (2016), Harwin ja Lucieer (2012)	a single board computer (SBC)	5-10	Droidworx AD8 heavy lift airframe + MK elektronikka	2 (instrumentit)	MK IMU	L1-DGPS (Novatel Flexpak G2L with an OEMV-2 board)	MK
Aasen ym. (2016, 2014)	SBC	15-30	MK OktaXL	5	-	MKGPS	MK
Hruska ym. (2012), Mitchell ym. (2012)	-	yli 720 (12 h)	Arcturus T-16 airframe	8	-	-	Piccolo II

Taulukko 6 RPAS-laitteistoissa käytety Hyperspektri- ja RGB-kamerat ja niiden gimbaalit

	Hyperspektrikamera	RGB-kamera	Gimbaali
Paikkatietokeskus	FPI 2012b (400-900 nm); Rikola Ltd. Proto2 (400-1000 nm)	Samsung NX300 ja NX500	stabisiaattori
Lucieer ym. (2014)	Headwall photonics Micro-Hyperspec VNIR scanner (400-900 nm) (Headwall inc., USA)	DSLR kamera	AV130 stabilized camera mount (photohigher.co.nz)
Büttner ja Röser (2014)	Pushbroom spektrometri (380 nm-1100 nm) koottu osista: linssi (OLE9), monokromaattinen CCD-kamera (Prosilica GEI900) ja spektrometri (Specim ImSpector V10E)	Industrial matrix camera	-
Aasen ym. (2015), Bareth ym. (2015)	Cubert UHD185 Firefly (450-950 nm) ja Rikola Ltd. Hyperspectral camera (500-900nm)	Panasonic Lumix GX1 + Panasonic Lumix G F1 20 mm linssi	kyllä
Anders ym. (2013), Bendig ym. (2015b, 2014a, 2014b, 2013)	-	Panasonic Lumix GX1 + 20 mm linssi	-
Suomalainen ym. (2014)	HYMSY Pushbroom spektrometri (400-950 nm) koottu osista: PhotonFocus SM2-D1312, Specim ImSpector V10 2/3" + 12 mm linssi	Panasonic GX1 + 14 mm pancake linssi	-
Turner ym. (2012, 2014), Lucieer ym. (2014), Wallace ym. (2016), Harwin ja Lucieer (2012)	-	Canon 550D DSLR + Canon EF-S 18-55 mm linssi.	AV130 stabilized camera mount (photohigher.co.nz)
Aasen ym. (2014)	Cubert UHD 185-Firefly hyperspectral full-frame imaging system (450-950 nm)	-	Kyllä
Hruska ym. (2012), Mitchell ym. (2012)	Resonon PIKA II imaging spectrometer (400 – 900 nm) + P-CAQ airborne data acquisition unit (Resonon, Inc., Bozeman, MT)	Digitaalikamera (GSD 4.2 cm)	-

2.4.3 Maastoreferenssit

Kaukokartoituskampanjoissa maastoreferenssinä on käytetty signaloituja GCP:tä, muita geometrisiä mittauksia ja radiometristä korjausta varten tarvittavia reflektanssikohteita.

Taulukossa 7 on esitelty eri tutkimuksissa käytössä olleiden GCP:iden ominaisuuksia. Pääsääntöisesti GCP:iden koko ja määrä määräytyy tutkittavan alueen mukaan. Näissä Taulukon 7 esitellyissä tutkimuksissa kaikki GCP:t oli joko pyöreitä tai niissä oli maalattu ympyrä, joiden halkaisijat vaihtelivat 0.1 m ja 0.4 m välillä. Kooltaan suurimmat GCP:t olivat

käytössä Paikkatietokeskuksella lentokorkeuksilla 140 m ja pienimmät Lucieer ym. (2014a, 2014b) 30-50 metrin lentokorkeuksilla. Lucieer ym. (2014a, 2014b), Turner ym. (2012, 2014) ja Harwin ja Lucieer (2012) tutkimuksissa GCP:t oli maalattu reunoista tai kokonaan oranssilla hyvin valoa heijastavalla maalilla. Tätä oranssia väriä hyödynnettiin semi-automaattisessa GCP:n tunnistuksessa pistepilviltä. Kaikissa Taulukon 7 tutkimuksissa GCP:t oli levitelty joko tasaisesti tutkittavalle alueelle tai satunnaisesti, mahdollisimman näkyville paikoille. Lucieer ym. (2014a) suoritettiin kolme erillistä testiä, joissa testeissä 2 ja 3 oli GCP:t ja mittausteippi käytössä. Mittausteippiä hyödynnettiin mm. hyperspektriskannerilla tuotetun aineiston tarkkuuden määrittämisessä. Wallace ym. (2016) käytetään kahden tyyppisiä GCP:tä, joista toiset pystytään erottamaan laserskannerilla ja fotogrammetrisista kuvista ja toiset pelkästään fotogrammetrisista kuvista. Näitä hyödynnetään laserpistepilvien ja fotogrammetristen pistepilvien georeferoinneissa.

Taulukko 7 Eri tutkimuksissa käytössä olleiden GCP:iden kuvaus, määrä (kpl), koko (m) ja mittaustekniikka.

	Kuvaus	Määrä (kpl)	Koko (m x m)	Mittaus
Paikkatietokeskus	Mustat vanerilevyt, joissa 30 cm halkaisijalla valkoinen ympyrä		0.4 x 0.4	Trimble R8 tai R10 RTK-DGPS
Lucieer ym. (2014a)	1) Isot kiekot 2) pienet kiekot 3) mittausteippi	testi 2: 1) 20 2) 30 3) 1; testi 3:1) 9 2) 36 3) 1	1) 0.22 x 0.22 2) 0.10 x 0.10 3) 30m	DGPS
Lucieer ym. (2014b)	1) pyöreä alumiininen levy, jonka reunat on maalattu kirkkaan oranssilla, keskipiste merkitty mustalla 2) pyöreä alumiininen levy	1) 12 2) 30	1) 0.22 x 0.22 2) 0.10 x 0.10	DGPS Leica 1200 (Leica Geosystems, USA)
Bareth ym. (2015), Bendig ym. (2015b, 2014a, 2013)	1) Laminoidut pahviset neliöt, jotka oli kiinnitetty puiseen pylvääseen 2) suorakulmaiset kolmiulotteiset laatikot, joiden kulmapisteet mitattiin	1) 15 2) 2	1) 0.3 x 0.3	DGPS, Hiper Pro Topcon, Tokyo, Japan
Turner ym. (2012)	Pyöreä alumiininen levy, jonka reunat on maalattu fluoresentti maalilla oranssiksi	22	0.3 x 0.3	DGPS
Turner ym. (2014)	1) ja 2) Pyöreä oranssilla fluoresentti maalilla maalattu levy	1) 25 2) 2	1) 2) 0.12 x 0.12	DGPS
Wallace ym. (2016)	1) vahvasti refleктоiva kohde havaittavissa sekä laser skannerilla, että RGB-kuvilta ja 2) RGB-kuvilta havaittava kohde	-	-	RTK-DGPS
Harwin ja Lucieer (2012)	1) tasainen pyöreä oranssi levy 2) tasainen pyöreä alumiinilevy, johon porattu keskipisteeseen reikä ja reunat maalattu oranssilla maalilla (laadun arviointiin)	1) 90 2) 21	1) 0.1 x 0.1 2) 0.22 x 0.22	Leica Viva RTK DGPS + Leica Total Station (TC407) survey

Taulukon 7 tutkimuksissa kaikissa on käytetty RTK-DGPS:ää mittausten toteuttamisessa, mutta mallit ja merkit vaihtelevat. Harwin ja Lucieer (2012) tutkivat RTK-DGPS:llä mitattujen GCP:iden mittaustarkkuutta vertaamalla sillä mitattuja pisteitä staattisiin mittauksiin, joiden koordinaattivirheet X-, Y-, ja Z-koordinaateissa on noin 10-15 mm.

Aasen ym. (2015), Bendig ym. (2015b, 2014a, 2014b, 2013) ja Bareth ym. (2015) tarkaste- li 36 peltokoealaa (3 m x 7 m), jotka oli jaettu 3 m x 5 m tutkimusruutuun ja 3 m x 2 m näytteenottoruutuun. Puolille ruuduista annettiin lannoitetta 40 kg N/ha ja toiselle puolis- kolle 80 kg N/ha. Kasvillisuuden korkeus (PH_{ref}) mitattiin jokaisesta näytteenottoruudusta manuaalisesti kymmenestä eri kohdasta ja näiden keskiarvoa käytettiin selitysasteissa. Myös jokaisen näytteenottoruudun kasvillisuus kerättiin talteen ja niistä laskettiin tuore- ja kuivabiomassat (Bendig ym., 2014a).

Harwin ja Lucieer (2012) käyttivät semi-automaattista GCP:iden georeferointia, jossa pis- tepilven pisteet analysoidaan ja siitä irrotetaan pisteet, jotka vastaavat GCP:iden oranssia väriä. Tämä väri perustuu kynnyksarvoon, joka on kerätty satunnaisesti valituista kuvien lajitel- masta, joissa GCP:t näkyivät ja värinpoiminta menetelmällä laskettu RGB-sävyjen keskiarvo GCP:ille. Tämän jälkeen irrotetuilta GCP:iltä määritettiin ympyrän keskipiste klusterointi-algoritmeilla käyttämällä kriteereinä keskus ja keskiarvo. (Harwin ja Lucieer, 2012.)

Maasta mitattavia referenssirefleksseja mitattiin Bareth ym. (2015) ASD Fieldspec3 spektrometrillä peltokoealoilta. Lucieer ym. (2014a, 2014b) ja Suomalainen ym. (2014) käyttivät ASD HandHeld2 field spektrometri. Lucieer ym. (2014a, 2014b) mittasi sillä hy- perspektrisensorille referenssinä olleet reflektanssipaneelit (0.25 m x 0.25 m, heijastusomi- naisuus 5-70 %) ja validointia varten 10 kallioista ja 10 sammaleenpeittämään aluetta. Suomalainen ym. (2014) käytti spektrometriä Spectralonin reflektanssipaneelin (heijas- tusominaisuus 25 %) mittaukseen ennen ja jälkeen lennon sensorin radiometristä korjausta varten. Büttner ja Röser (2014) suorittivat sensorin radiometrisen korjauksen mittaamalla reflektanssipaneelin (heijastusominaisuus 50 %) ennen ja jälkeen lennon.

2.4.4 Kuvien geometrinen prosessointi

Kaikki Taulukossa 8 esitellyt tutkimukset käyttivät SfM tekniikkaa soveltavaa kuvien geo- referointiohjelmaa. Valtaosa fotogrammetristen ilmakehäväläisten kuvien geometrisesta pros- sessoinnista tehdään nykyään SFM tekniikkaa käyttävillä ohjelmilla niiden käyttöystä- väällisyyden, tarkkojen lopputuotteiden ja tehokkuuden ansiosta. Nämä menetelmät eivät myöskään vaadi tarkkoja kameran kalibrointeja eikä kuvien orientointien likiarvojen tun- temista, koska ne ratkovat nämä kuvauskohtaisesti. Taulukon 8 tutkimuksista valtaosa hyödyntää kuvien geometrisessa prosessoinnissa Photoscania, jota tässäkin työssä on käy- tetty. Pituuspeitot vaihtelivat eri tutkimuksissa 70-95 % välillä ja sivupeitot vaihtelivat 12- 80 % välillä (Taulukko 8). Turner ym. (2014), Wallace ym. (2016) ja Lucieer ym. (2014b) lennot kuvattiin yli 90 % pituuspeitoilla, jonka jälkeen niistä poistettiin epäterävät kuvat. Tämän jälkeen automaattisella ohjelmalla loput ylimääräiset kuvat poistettiin niin, että peitoksi jäi 80 %. Kuvien georeferointi suoritettiin joko suoralla georeferoinnilla hyödyn- täen pelkkää kuvien sijaintitietoa tai kuvien sijainti- ja kallistustietoja, GCP:iden avulla tai GCP:iden ja kuvien sijaintitietojen avulla.

Taulukko 8 Eri tutkimuksissa käytettyjä kuvien georeferointi ohjelmia, georeferointiin käytetyt maasatotuet (GPS, GPS/IMU, GCP) sekä kuvausten pituus- ja sivupeitto (%).

	Georeferointi ohjelma	Georeferointi tyyppi	Pituuspeitto (%); Sivupeitto (%)
Paikkatietokeskus	Photoscan	GCP, GCP+GPS, GPS	80-94; 12-75
Lucieer ym. (2014a)	The airborne Parametric Geocoding (PARGE) (PARGE Manual Versio 3.1,	GPS/IMU	

	2011) + SfM Photoscan		
Büttner ja Röser (2014)	Kustomoitu ohjelma, perustuu kollineaarisuusyhtälöihin / SFM	GPS/IMU	
Bendig (2015b, 2014a, 2014b, 2013)	Photoscan	GCP	90; 44
Anders ym. (2013)	Photoscan	GCP	85; 60
Suomalainen ym. (2014)	PARGE + RGB-kuville Photoscan	GCP	
Turner ym. (2012)	Photoscan/Pix4D/Bundler	GCP	80; 80
Lucieer ym. (2014b)	Photoscan	GCP	80; 80
Turner ym. (2014)	SfM-ohjelma (ei tarkemmin määritelty)	GPS, GCP	
Wallace ym. (2016)	Photoscan	GPS/IMU, GCP	80; 66
Mitchell ym. (2012)	ENVI (mosaiikit)	GPS/IMU	
Harwin ja Lucieer (2012)	Photoscan, Bundler ja PMVS2	GCP	70-95%

Hyperspektriskannauksella tuotetut spektrilinjat tulee ortomosaikoida johonkin valittuun koordinaatistoon. Tämä toteutettiin Lucieer ym. (2014a) ja Suomalainen ym. (2014) ”Parametric Geocoding” (PARGE) sovelluksella, joka on alun perin suunniteltu lentokoneista pushbroom keilaimella tehtävien hyperspektriskannausten ortomosaikointiin. Vastaavan toteuttamiseen Büttner ja Röser (2014) käytti kollineaarisuusyhtälöihin perustuvaa kustomoitua ohjelmaa ja Mitchell ym. (2012) toteutti sen ENVI-ohjelmistolla. Menetelmässä hyödyntään sensorin geometriaa, GPS:n lentoratatietoja (engl. trajectory) ja sensorin orientointeja luodakseen skannauksen jokaiselle pikselille koordinaattitiedot tasaisessa maastossa. Tarkempaa lopputulosta varten menetelmässä voidaan hyödyntää myös DSM:ää alueesta. Menetelmä vaatii erittäin tarkat GPS:n lentoratatiedot ja sensorin orientoinnit, jotta hyvä georeferoinnin laatu saavutettaisiin. Suomalainen ym. (2014) käytti huonojen GPS:n lentoratatietojen takia vaihtoehtoista menetelmää hyperspektriskannarin ortomosaikointia varten. Siinä ratkaistiin ensin samanaikaisesti hyperspektriskannerin kanssa kuvattujen RGB-kuvien orientointitiedot ja DSM ratkaistiin SfM:llä GCP:itä hyödyntäen. Tämän jälkeen RGB-kuvien orientoinnit konvertoitiin ja interpoloitiin spektrometrin orientointeihin ”boresight” kalibrointimenetelmällä. Lopuksi näiden orientointitietojen ja fotogrammetrisen DSM:n avulla PARGE:lla laskettiin hyperspektriaineistosta ortomosaiikit.

Turner ym. (2014) suoritti RGB-kameran kuvien geometrinen prosessointien tarkkuuksien vertailun Photoscanin, Pix4D web-servicen ja Bundlerin välillä. Näillä tuotettujen ortomosaiikkien absoluuttiset koordinaattivirheet määritettiin käyttämällä tunnettuja GCP:tä.

Bendig ym. (2014a) tuotti eri kasvillisuuden vaiheissa tehdyistä kuvauksista DSM:t ja ortomosaiikit Photoscanilla. Kasvillisuuden korkeuden malli (CHM) laskettiin vähentämällä DSM:stä DTM. DTM:nä käytettiin kuvauksen, jossa ei vielä kasvillisuutta kasvanut DSM:ää ja DSM:nä käytettiin myöhäisimpänä ajankohtana kuvattua kuvausta, jolloin kasvillisuus oli korkeimmillaan. Ortomosaiikeilta määritettiin mallien X- ja Y-koordinaattien tarkkuudet ja DSM:ltä Z-koordinaatin tarkkuus tarkastuspisteiden avulla. CHM:stä irrotettiin kaikki tutkimusruudut (3 m x 2 m) ja näiltä laskettiin kasvillisuuden korkeuksien (PH_{CHM}) keskiarvo, jota verrattiin manuaalisesti mitattuihin kasvillisuuden korkeuksiin (PH_{ref}) sekä tuore- ja kuivabiomassoihin. (Bendig ym., 2014a.)

2.4.5 Tarkkuusmittausten tulokset

Harwin ja Lucieer (2012) määrittivät RTK DGPS:n paikannusvirheeksi vähemmän kuin 2,6 cm X- ja Y-koordinaateissa sekä vähemmän kuin 4,0 cm Z-koordinaatissa. Häkli ym. (2004) on saanut vastaavia tuloksia RTK DGPS mittauksista Suomessa. Kaikissa Taulukossa 7 esitellyissä tutkimuksissa GCP:iden mittaustarkkuudet olivat Harwin ja Lucieer (2012) esittelemien tulosten mukaisia, paitsi Wallace ym. (2016), jonka mukaan huonon näkyvyyden takia paikannusvirhe oli X- ja Y-koordinaateissa 5 cm ja Z-koordinaatissa noin 20 cm.

Harwin ja Lucieer (2012) GCP:iden keskipisteen automaattisen mittauksen menetelmässä käyttämällä kriteerinä keskiarvoa saatiin 3D-keskivirheeksi 3,35 cm ja keskus (engl. centroid) kriteerillä 3,44 cm.

Büttner ja Röser (2014), Lucieer ym. (2014b) ja Mitchell ym. (2014) hyperspektriskannerin keräämä aineisto georeferoitiin käyttämällä suoraa georeferointia hyödyntämällä GPS/IMU kombinaatiota. Taulukossa 9 on ilmoitettu eri tutkimuksissa tehtyjen kuvausten lentokorkeudet, ortomosaiikkien ja DSM:en resoluutiot ja näille lasketut koordinaattikeskivirheet (kaava 9), tasosijainnin keskivirhe (kaava 10), keskihajonta ja keskiarvo. Taulukosta 9 nähdään, että hyperspektriskannereiden suoralla georeferoinnilla Lucieer ym. (2014b) on saanut pienimmät koordinaattivirheet. Büttner ja Röser (2014) ja Hruska (2012) tutkimuksissa suoralla georeferoinnilla on päädytty useiden metrien koordinaattivirheisiin. Büttner ja Röser (2014) ja Hruska (2012) todistivat, että MEMS-sensoreilla ei päästä riittävään tarkkuuteen suoralla georeferoinnilla hyperspektriskannereiden aineiston georeferoinnissa. Tähän ratkaisuna on RPAS-laitteistoon lisätty erillinen RGB-kamera, jonka orientointeja hyödyntämällä hyperspektriskannereiden aineistot pystytään georeferoimaan, suoraa georeferointia tarkemmin (Büttner ja Röser, 2014; Lucieer ym., 2014b).

Turner ym. (2014) testeissä Photoscan oli nopein (4,3 h), helpoin käytettävä ja sen spatiaalinen tarkkuus oli paras, tasosijainnin keskivirheen (kaava 10) ollessa 0,11 m ja keskihajonta (kaava 8) 0,02 m. Vastaavan aineiston prosessointi Pix4D:llä kesti 11 h, joista 7h meni datan lataamiseen web-serverille. Pix4D:n tasosijainnin keskivirhe (kaava 10) oli 0,24 m ja keskihajonta 0,03 m. Bundler oli näistä kaikista hitain (41 h) ja myös sen spatiaalinen tarkkuus oli huonoin, tasosijainnin keskivirhe (kaava 10) oli 0,76 m ja keskihajonta (kaava 8) 0,15 m. Bundlerin huonompi spatiaalinen tarkkuus johtui siitä, että se käsittelee jokaisen kuvan erillisenä kamerana, jonka takia se vaatii huomattavasti tarkemmat kameran sisäiset parametrit kuin Photoscan ja Pix4D (Rosnell ja Honkavaara, 2012; Turner ym., 2014). Turner ym. (2014) tutkivat myös ns. ”Lever-arm” korjauksen vaikutusta suoraan georeferointiin. ”Lever-arm” korjauksessa otetaan huomioon GPS-antennin ja kameran keskuksen sijainnillinen ero ja korjataan tämä virhe laskettaessa GPS:n lentoratatiedoista kuvien sijaintitiedot. ”Lever-arm” korjauksen avulla saavutettiin kameroiden sijaintitiedon tasosijainnin keskivirheeksi (kaava 10) 0,19 m ja keskihajonnaksi (kaava 8) 0,024 m, joka oli noin 42 % parempi kuin ilman korjausta lasketuilla sijaintitiedoilla (Turner ym., 2014). Myös Daakir ym. (2016) on päätenyt vastaaviin tuloksiin ”Lever-arm” korjauksen tarpeellisuudesta.

Taulukko 9 Eri tutkimuksissa tehtyjen kuvausten lentokorkeus, ortomosaiikkien resoluutio (m), DSM resoluutio (m), sekä näiden koordinaattikeskivirheet (kaava 9; $RMSE_{xyz}$) ja tasosijainnin keskivirhe (kaava 10; $RMSE_r$), keskihajonnat $_{xyz}$ (kaava 8; m) ja keskiarvo $_{xyz}$ (m).

	Lentokorkeus (m)	Ortomosaiikki resoluutio (m)	DSM resoluutio (m)	RMSE (X; Y; Z; r) (m)	Keskihajonta (X; Y; Z; r) (m)	Keskiarvo (X; Y; Z; r) (m)
Paikkatietokeskus						
Lucieer ym. (2014a) hyper-spektri suora georeferointi	10	0,002		0,22; 0,13; -; 0,25	0,09; 0,08; -; 0,09	0,19; 0,07; -; 0,20
Lucieer ym. (2014a) RGB gcp	30	0,005	0,01	-		
Lucieer ym. (2014b)	50	0,01	0,02	0,037; 0,045; 0,044; 0,042		0,017; 0,028; 0,005; -
Büttner ja Röser (2014) suora georeferointi	300	1,0 x 1,0		1-10; 1-10; -; -		
Bendig (2015b, 2014b, 2013)	30	0,01	0,02	-; -; 0,02; -	-; -; 0,008; -	0,017
Anders ym. (2013)	185		0,12	-; -; 0,45; -	-; -; 0,45; -	
Anders ym. (2013)	90		0,07	-; -; 0,35; -	-; -; 0,45; -	
Suomalainen ym. (2014)	> 120	0,01 - 0,05	0,05 - 0,1	-	-	-
Turner ym. (2014) suora georeferointi RGB 1) Photoscan 2) Pix4D (web-service) 3) Bundler		0,11		1)0,0299; 0,108; -; 0,1149 2)0,2371; 0,0598; -; 0,2471 3)0,7381; 0,1372; -; 0,7574	1) 0,0214 2) 0,0277 3) 0,1481	
Turner ym. (2012) suora georeferointi	50			0,65-1.2; 0,65-1.2; 0,65-1.2; -		
Turner ym. (2012) gcp	50			0,1-0,15		
Wallace ym. (2016)	30			0,4; 0,4; 0,14; -	0,12; 0,12; 0,14	

2.4.6 Pelto- ja metsäaineistojen CHM

Taulukossa 10 on esitelty Bendig ym. (2014a) Peltokuvauksen RGB-kuvablokilta tuotetusta CHM:stä määritetyt kasvuston korkeuksien (PH_{CHM}), referenssi korkeuden (PH_{ref}) sekä tuore- ja kuivabiomassojen minimiarvo, maksimiarvo, keskiarvo, keskivirhe ja aineistojen koko.. PH_{CHM} on saanut matalampia arvoja kuin vastaavasti PH_{ref} . Peltokuvauksissa Aasen

ym. (2015) on saanut hyperspektriaineistoista tuotetusta CHM:stä referenssiä korkeampia arvoja. Bendig ym. (2014a) PH_{CHM} maksimi 0,8 m poikkeaa 0,2 m PH_{ref} maksimista. Erot johtuvat mm. DTM:n ja DSM:n tarkkuusvirheistä ja siitä, että PH_{CHM} edustaa koko kasvilisuuden pinnan muotoa, eikä ainoastaan kasvin korkeinta kohtaa (Bendig ym., 2014a). Bendig ym. (2014b) saatu selitysaste PH_{CHM} ja referenssien kanssa ovat hyviä ($R^2 = 0,92-0,79$) (Taulukko 11). Parhain selitysaste on 0,92 PH_{CHM} :n ja PH_{ref} välillä. Lähes yhtä hyvä selitysaste on PH_{CHM} ja tuorebiomassan välillä 0,85. Vastaavasti Aasen ym. (2015) Cubert UHD185 Firefly (450-950 nm) hyperspektrikuvalta tuotetun CHM:n korkeudet selitysaste manuaalisesti mitattuiden korkeuksien kanssa oli huonompi ($R^2 = 0,70$).

Rahmayudi ym. (2016) on saanut metsäisillä alueilla fotogrammetrisen automaattisella maanpintaluokittelulla huonoja DTM:n tarkkuuksia ja tästä syystä myös CHM:t olivat tarkkuudeltaan huonoja. Wallace ym. (2016) on kohdannut vastaavia ongelmia fotogrammetrisen DTM:n muodostuksessa tiheillä metsäisillä alueilla. Kuitenkin tarkkoja CHM:ä on saatu tiheillä metsäisillä alueilla hyödyntämällä laserpistepilvestä tuotettuja DTM:ä, koska laserkeilain tunkeutuu maanpintaan paremmin kuin ilmakuvauksessa käytettävät kamerat (Wallace ym., 2016; Lisein ym., 2013; Jensen ja Mathews ym., 2015; Ressler ym., 2016). Wallace ym. (2016) ja Ota ym. (2015) vertailivat metsäaineistolla laserkeilaus pistepilvestä tuotettua DTM:ää ja fotogrammetrisesti tuotettua DTM:ää keskenään. Molemmat suosittelivat CHM:n määrittämiseen käytettäväksi laserkeilaus pistepilvestä tuotettua DTM:ää, koska se tunkeutuu paremmin kasvuston läpi maanpintaan ja täten se on tarkempi kuin fotogrammetrisesti tuotettu DTM:ä. Tästä syystä mm. Ressler ym. (2016) SfM menetelmällä tuotettu CHM sai systemaattisesti matalampia arvoja kuin laserkeilauksella tuotettu CHM.

Vaihtoehtoisesti voidaan toteuttaa SfM pistepilvelle manuaalinen tai semiautomaattinen maanpintaluokittelu, joilla on myös saatu aikaan parempia DTM:ä metsäisessä ja mäkisessä ympäristössä kuin automaattisessa maanpintaluokittelussa (Rahmayudi ym., 2016; Oliveira ym., 2016). Oliveira ym. (2016) käytti k-means luokittelua fotogrammetrisen hyperspektripistepilven luokittelussa neljään luokkaan: 1) maanpinta (varjossa), 2) maanpinta (kasvillisuus), 3) puiden latvusto ja 4) alue maanpinnan ja puiden latvuston välillä. Tällä menetelmällä saatiin lupaavia maanpinnan luokittelun ja DTM:n tuloksia tiheillä metsäisillä alueilla Suomessa (Oliveira ym., 2016). Myös harvemmillä metsäisillä alueilla fotogrammetrisiltä pistepilviltä on saatu laskettua hyvällä tarkkuudella CHM:ä (Guerra ym., 2016).

Taulukko 10 Bendig ym. (2014a) RGB-kuvilta tuotetun kasvustonkorkeusmallin (PH_{CHM}), kasvuston referenssin (PH_{ref}), tuorebiomassan ja kuivabiomassan minimi, maksimi, keskiarvo, keskivirhe (SE) ja aineiston koko(n)

	PH_{ref} (m)	PH_{CHM} (m)	Tuorebiomassa (kg/m ₂)	Kuivabiomassa (kg/m ₂)
Minimi	0,14	-0,03	0,22	0,03
Maksimi	1	0,8	8,29	2,7
Keskiarvo	0,55	0,43	3,24	0,81
SE	0,25	0,25	1,96	0,68
n	216	216	216	216

Taulukko 11 Bendig ym. (2014a) kasvustonkorkeusmallin (PH_{CHM}), kasvuston referenssikorkeuden (PH_{ref}), tuorebiomassan ja kuivabiomassan keskinäisiä regression selityskertoimet empiirisen viivan menetelmällä.

R^2	PH_{ref} (m)	PH_{CHM} (m)	Tuorebiomassa (kg/m ²)	Kuivabiomassa (kg/m ²)
PH_{ref} (m)	1			
PH_{CHM} (m)	0,92 (lin.)	1		
Tuorebiomassa (kg/m ²)	0,85 (exp.)	0,81 (exp.)	1	
Kuivabiomassa (kg/m ²)	0,79 (exp.)	0,82 (exp.)	0,67 (lin.)	1

3 Lennokkisysteemi ja -kuvaukset Paikkatietokeskussa

3.1 Laitteistot

3.1.1 Lentolaitteet

Lentoalustana toimi Tarot 960 hiilikuituinen heksakopterimallinen RPAS-laite, jonka lentonopeutta pystyttiin säätämään 2-10 m/s:n välillä, lentoaika oli noin 20-30 min noin 5 kg painolla. Lentoon lähdöt ja laskeutumiset tehtiin manuaalisesti, mutta muuten automatisoidun lennon mahdollisti radioyhteys Pixhawk autopilottiin. Haluttu lentoreitti peittoineen määriteltiin käyttämällä Mission Planner -autopilottiohjelmaa. Vihdin Hovissa tehtävälle lennolle järjestelmään lisättiin myös kameroiden stabilointilaite, joka vähensi kuvien tärähdysherkkyttä ja mahdollisti näin terävämpien kuvien ottamisen (Kuva 1).



Kuva 1 Paikkatietokeskuksen kauko-ohjattava ilma-alus (RPAS) sekä sen navigointi- ja kuvauskomponentit.

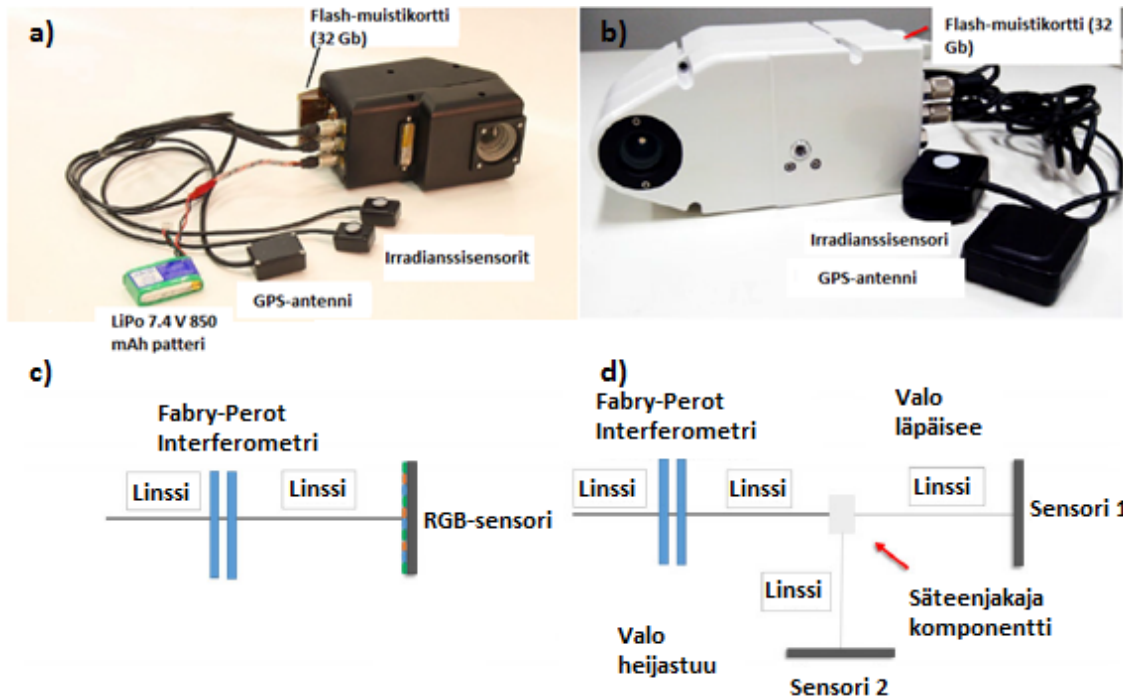
3.1.2 Kuvaussensorit

RPAS-laitteistossa käytettiin kahta Fabry-Pérot'n interferometriaan (FPI) perustuvaa hyperspektrikameraa sekä kahta RGB kameraa.

Paikkatietokeskus hankki VTT:n kehittämän FPI 2012b prototyyppikameran vuonna 2012 (Honkavaara ym., 2013; Saari ym., 2013). FPI 2012b on n. 700 grammaa painava hyperspektrikamera, johon sisältyy myös kameran GPS-antenni, irradianssisensorit ja patteri (Kuva 2a). Fabry-Pérot'n interferometrin molemmin puolin on puoliläpäisevät peilit, jotka

läpäisevät vain pieniä aallonpituusalueita. Näiden peilien välistä etäisyyttä vaihtelemalla eli väliin jäävä ”ilma-aukko” (engl. airgap) määrittää aallonpituuden, joka päästetään FPI:n läpi, kun taas muut aallonpituudet heijastetaan takaisin. Kun ”ilma-aukon” kokoa muutetaan saadaan eri aallonpituusalueet kulkemaan FPI:n läpi vuorotellen. Kamerassa on kolme pientä aktuaattoria (engl. actuator), jotka liikuttavat toista peileistä sekä mittaavat elektronisesti peilien välisen etäisyyden kolmessa eri kohdassa. Peilit pysyvät jatkuvasti samansuuntaisina toisiinsa nähden ja haluttu etäisyys peilien välillä pysyy vakaana säätöpiirin (engl. control loop) avulla. FPI käy läpi ennalta määritellyssä järjestyksessä eri ”ilma-aukon” sekvenssien arvot ja samanaikaisesti kamera tallentaa jokaisen eri ”ilma-aukon” eli aallonpituuden tiedon omaksi kuvakseen. Tätä varten kamerassa on yksi RGB-sensori, jota ohjaa elektroninen suljin (Kuva 2c). Nämä kaikki eri ennalta määritellyt aallonpituuskanavien muodostamat kuvat kootaan kameran muistikortille yhdeksi kuvakuutioksi. Kaikkien kameran ottamien eri aallonpituuskanavien valotus ei tapahdu siis samanaikaisesti, minkä vuoksi kanavien välillä on ajallista eroavaisuutta (Saari ym., 2009). Tästä kanavien ajallisesta erosta johtuu se, että jokaisella kanavalla on hieman toisistaan poikkeavat orientointitiedot ja sijainti kun kameraa operoidaan liikkuvalla alustalla (Honkavaara ym., 2014a). Kameran aukkosuhdetta on pyritty parantamaan sallimalla enimmillään 10 asteen kulma FPI-yksikön läpi kulkevalle säteelle. Kameran aallonpituusalue sijoittuu 400-900 nm:n alueelle ja sen kuvakuution koko on 1024 x 648 pikseliä 2 x 2 binnatussa versiossa. Tässä formaatissa sensorin puoliarvoveveys (engl. Full Width at Half Maximum, FWHM), joka kuvaa kameran spektraalistaerotuskykyä, on 10 nm:n ja 40 nm:n välillä. Kameralla on oma GPS-vastaanotin, joka tallentaa jokaisen kuvakuution valotuksen alkuaian, sijainnin itä- ja pohjoiskoordinaatistossa. Kameralla on myös erilliset irradianssisensorit, joiden dataa voisi hyödyntää mm. ilmakehäkorjauksessa (Saari ym., 2009).

Kuvauksissa käytettiin myös toista VTT:n ja Rikola Ltd:n yhteistyössä kehittelemä, Rikola Proto2 FPI-kameraa, joka toimii 400 – 1000 nm:n aallonpituusalueella. Se on ensimmäinen snapshot hyperspektrikamera, joka kattaa koko VNIR:n aallonpituusalueen. Kamera on toimintaperiaatteeltaan vastaava kuin edellä kuvailtu FPI 2012b hyperspektrikamera, mutta Rikola Proto2 kamerassa on yhden RGB-sensorin sijaan kaksi RGB-sensoria sekä säteenjakaja (engl. beamsplitter), joka jakaa kohteesta tulevan signaalin kahdelle sensorille (Kuva 2d). Toinen sensorin kerää näkyvän valon (VIS) ja toinen lähi-infran (NIR) aallonpituudet. Rikolan Proto2 FPI-kamera eroaa Taulukossa 2 esitellystä Rikola Ltd. kaupallisesta FPI-kamerasta siten, että kaupallisessa versiossa on RGB-sensoreiden tilalla monokromaattiset sensorit ja lisäksi kaupallinen versio kattaa aallonpituudet 500-900 nm (Rikola Ltd., 2016). Taulukossa 12 on vertailtu tässä tutkimuksessa käytettyjen FPI 2012b ja Rikola Proto2 FPI-kameroiden ominaisuuksia.



Kuva 2 a) FPI 2012b kameran komponentit: FPI-kamera, kompakti flash-muistikortti, kaksi irradianssisensoria, GPS-antenni ja LiPo patteri (muokattu Honkavaara ym., (2013)) b) Rikolan Proto2 FPI-kameran komponentit: FPI-kamera, Flash-muistikortti, Irradianssisensori ja GPS-antenni (muokattu Oliveira ym., 2016). Rikola Proto2 toimii vastaavalla LiPo patterilla, kuin FPI 2012b, c) FPI 2012b kameran sisäinen optiikka ja d) Rikola Proto2 kameran sisäinen optiikka (muokattu Oliveira ym., 2016).

Taulukko 12 FPI 2012b ja Rikola Proto2 FPI-kameroiden ominaisuuksia. Spektraalinen erotuskyky eli aallonpituusalueen leveyttä kuvaava arvo FWHM.

	FPI 2012b	Rikola Proto2
Sensori koko (pikseli x pikseli)	2048 x 2048	2048 x 2048
Kuvakoko (pikseli x pikseli)	1024 x 648 (2 x 2 binnattu)	Voi vaihdella 1010 x 648 pikselin ja 1010x1010 pikselin välillä
Pikseli koko (μm x μm)	5.5 x 5.5	5.6 x 5.6
Paino (kg)	< 0,7	< 0,7
Aallonpituusalue (nm)	500-900	400-1000
Spektrikanavien lukumäärä; Spektraalinen erotuskyky (FWHM)	maksimi 24x3, yleensä 30-40; 10-40 nm	36; 10-15 nm
Kuvataajuus (fps)	15	30 (valotuksen ollessa 15 ms 1010 x 648 pikselillä)
Katselukulma (HFOV;VFOV)	> 50°; >37°	37°; 37°
Polttoväli (mm)	10,9	8,9
Koko (mm x mm x mm)	80 x 92 x 150	75 x 89,5 x 151,5

RGB-kameroina käytettiin kuluttajakameroita Samsung NX300 ja NX500. Taulukossa 13 on vertailtu niiden ominaisuuksia. Kamerat valittiin niiden pienen koon, tarkkuuden ja valotusnopeuden perusteella. NX500 on NX300:sta päivitetty versio. Siinä on enemmän pikseleitä, vähemmän painoa ja kuvanottonopeus on parempi kuin NX300:ssa. NX500 otetut kuvat ovat myös terävämpiä kuin NX300:lla johtuen lisätyistä pikselien määrästä ja poistetusta ”Anti-Aliasing” suodattimesta (Kuva 3). Molemmissa RGB-kameroissa käytet-

tiin Samsung 16mm f/2.4 linssiä. GPS-vastaanotin lähettää kameroille pulssin, joka laukaisee kamerasäädin välein automaattisesti. Näitä RGB-kameralla otettuja kuvia voidaan käyttää mm. hyperspektrikameran kuvien orientointien tukena ja tarkkojen pintamallien muodostamisessa.



Kuva 3 Kuvassa vasemmalla puolella Hovin heinäkuun ensimmäiseltä lennolta Samsung NX500:sen ottama RGB-kuva 140 m:stä. Oikealla Samsung NX300:sen ottama kuva Mustilan lennolta 110 m:stä.

Taulukko 13 Paikkatietokeskuksen Samsung NX300 ja NX500 RGB-kameroiden ominaisuudet.

	Samsung NX300	Samsung NX500
Sensori; Resoluutio (pikseli x pikseli)	CMOS; 5472 x 3648	CMOS; 6480 x 4320
Sensorin koko (mm x mm)	23,5 x 15,7	23,5 x 15,7
Pikseli koko (µm x µm)	4,29 x 4,29	3,63 x 3,63
Paino (kg)	0,549	0,454
JPEG kuvanotto nopeus (s/kuva)	1,12	0,83

3.1.3 Paikannus

Järjestelmässä käytettiin yksitaajuus GNSS-vastaanotinta NVS NV08C-CSM (NVS, 2016). Vastaanotin on kooltaan 20 mm x 26 mm x 2,5 mm. GNSS-vastaanotin tallentaa GPS, GLONASS ja Galileo satelliittijärjestelmien L1-vaihetietoa raakadatan RINEX-formaatissa 1 Hz taajuudella. Paikkatietokeskuksen RPAS-laitteeseen kuuluu myös vectornav VN-100 IMU-järjestelmä (Vectornav, 2017), mutta tässä tutkimuksessa sen keräämää aineistoa ei käytetty.

3.1.4 Maastoreferenssi

Reflektanssireferenssipaneeleina käytettiin 1 m x 1 m kokoisia levyjä, joiden reflektanssit mitataan laboratoriossa ja näin ollen ne tunnetaan. Reflektanssipaneeleita on kolme erilaista: musta, harmaa ja valkoinen. Mustan ja harmaan paneelin pintamateriaalina oli karhea mattokangas ja valkoisen paneelin pinta oli maalattu erikoismaalilla. Näiden pintojen heijastusominaisuudet vaihtelevat 3 – 50 % heijastuksien väliltä ja näitä tietoja voidaan hyödyntää kuvakuutioille suoritettavassa radiometrisessä korjauksessa (kuva 4).

Radianssin ja irradianssin mittaukseen maasta käsin käytettiin ASD Field Spec Pro -spektrometriä, joka painaa yli 7 kg. Lennon aikana sillä kerätään kohtisuoraan ylöspäin irradianssia käyttäen ns. kosini-optiikkaa ja lennon jälkeen sillä mitattiin reflektanssipanee-

leiden radianssi ja reflektanssiarvot käyttäen radianssoptiikkaa. ASD Field Spec Pro mittaa spektritietoa 350 nm ja 2500 nm aallonpituuksien väliltä. Sen keräämää aineistoa voidaan käyttää hyväksi muunnettaessa sensorin pikseleiden harmaasävyarvot (DN) sensorin reflektanssin arvoiksi.

Testialueille pystytettiin noin 40 cm x 40 cm mustapohjaisista vaneerilevyistä valmistetut GCP:t, joihin on valkoisella maalilla maalattu ympyrät, joiden halkaisija on noin 30 cm. Nämä GCP:t mitattiin joko Trimble R8 tai R10 RTK-GPS:llä

Hovin testialueella kerättiin myös maa-asemadataa vastaavalla yksitaajuus GNSS-vastaanottimella (NVS NV08C-CSM) kuin kopterissa. Tämän keräämää staattista sijaintitietoa voidaan hyödyntää mm. kopterin keräämän GPS-datan jälkilaskennassa.



Kuva 4 Valkoinen (reflektanssi 0,5), harmaa (reflektanssi 0,1) ja musta (reflektanssi 0,03) reflektanssipaneeli, ASD-spektrometri, kosinikeräinoptiikka ja PC sekä GPS-antenni ja GPS-vastaanotin. GPS-vastaanottimen keräämän maa-aseman sijaintitietoa voidaan hyödyntää mm. kopterin keräämän GPS-datan jälkilaskennassa.

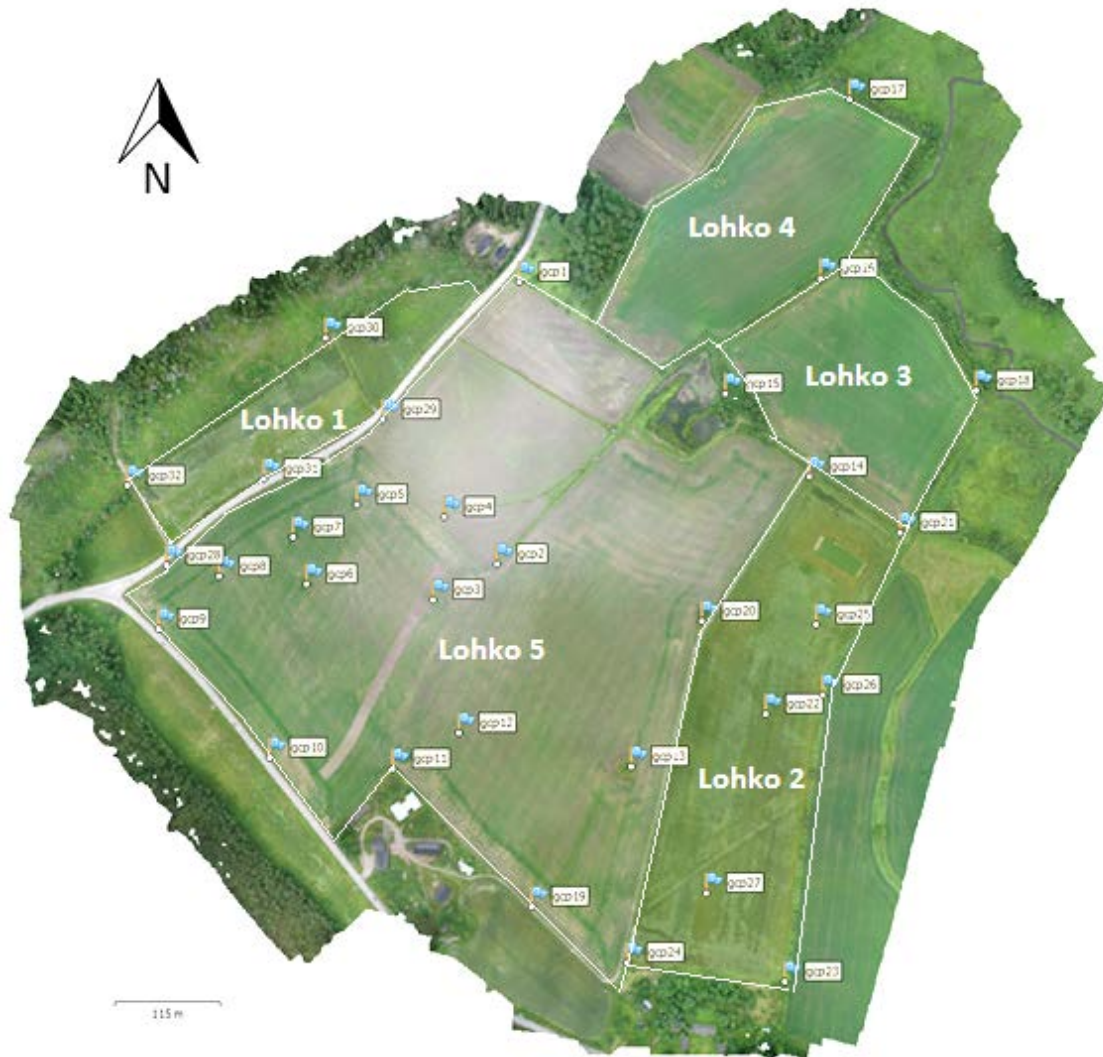
3.2 Testialueet

3.2.1 Hovi

Vihdin Hoviin Luonnonvarakeskuksen (Luke) tutkimuspelloille ($60^{\circ}25'34''N, 24^{\circ}22'9''E$) rakennettiin vuoden 2016 keväällä geometrinen testikenttä Paikkatietokeskuksen toimesta. Luken tutkimuspellot kattavat yhteensä 5 erillistä peltolohkoa (Kuva 5). Peltolohkoilla 1 ja 2 kasvatettiin nurmea, lohkoilla 3 ja 4 viljeltiin ohraa sekä lohkon 5 pohjois-osassa viljeltiin kvinoa ja lohkon 5 muulla alueella viljeltiin ohraa.

Tutkittavalle alueella pystytettiin yhteensä 32 pysyvää GCP:itä, joiden koordinaatit mitattiin Trimblen R10 RTK-GPS:llä. GCP:t kiinnitettiin keskipisteestä nauloilla noin 0.05 m x 0.05 m x 1.20 m kokosiin puupaaluihin, jotka hakattiin maahan noin m:n syvyyteen.

Vuonna 2016 Paikkatietokeskus järjesti Hovin testikentän alueella yhteensä 7 eri RPAS-kuvausta ja yhden lentokonekuvauksen. Tämän lisäksi testikenttä oli vapaasti muiden lennokkiharrastajien käytössä laitteistojen testausta varten.



Kuva 5 Vihdin Hovissa sijaitsevan testikentän heinäkuun lennoilta tehty ortomosaiikki, johon on merkitty alueelle pystytettyjen GCP:iden sijainnit ja peltolohkojen rajat.

3.2.2 Mustila

Arboretum Mustilan kansallispuisto sijaitsee Elimäellä (60°44'0"N, 26°25'60"E). Se on perustettu vuonna 1902 ja on täten Suomen vanhin ja myös suurin arboretum eli puulajipuisto. Mustilassa koeviljellään koti- ja ulkomaisten puulajien kestäviä alkuperiä tutkimusmetsiköissä (Kuva 6). Se on tunnettu erityisesti eksoottisista havupuumetsiköistään sekä sadoista alppiruusuista ja atsaleoistaan. Siellä kasvaa yli 100 havupuulajia ja noin 200 lehtipuulajia sekä satoja pensaita ja perennoja. Tarkemmat kuvaukset ja lisätieto löytyy Mustilan omilta internetsivuilta (Mustila, 2016).

Tässä tutkimuksessa keskityttiin Kuvaan 6 punaisella rajatulle alueelle. Alueelle mitattiin 5 GCP:tä, joista 4 näkyi RGB-kuvilla ja vain 3 oli tunnistettavissa FPI-kuvilta. Alueen lounaiskulman GCP:tä ei pystytty erottamaan RGB- eikä FPI-kuvilta, koska se oli sijoitettu liian kauas alueen reunoilta. Alueen maanpohjan vahvan magneettisuuden vuoksi lennokin GPS-vastaanottimen keräämän lentoratatiedon tarkkuus oli X- ja Y-koordinaateissa noin 0,2 m, mutta Z-koordinaatissa yli 7 m.



Kuva 6 Maanmittauslaitoksen ladattavien aineistojen ilmapäät Arboretum Mustilan kansallispuiston alueesta. Kuvaan on punaisella rajattu tässä tutkimuksessa tutkittavan alueen rajat (MML, 2016a).

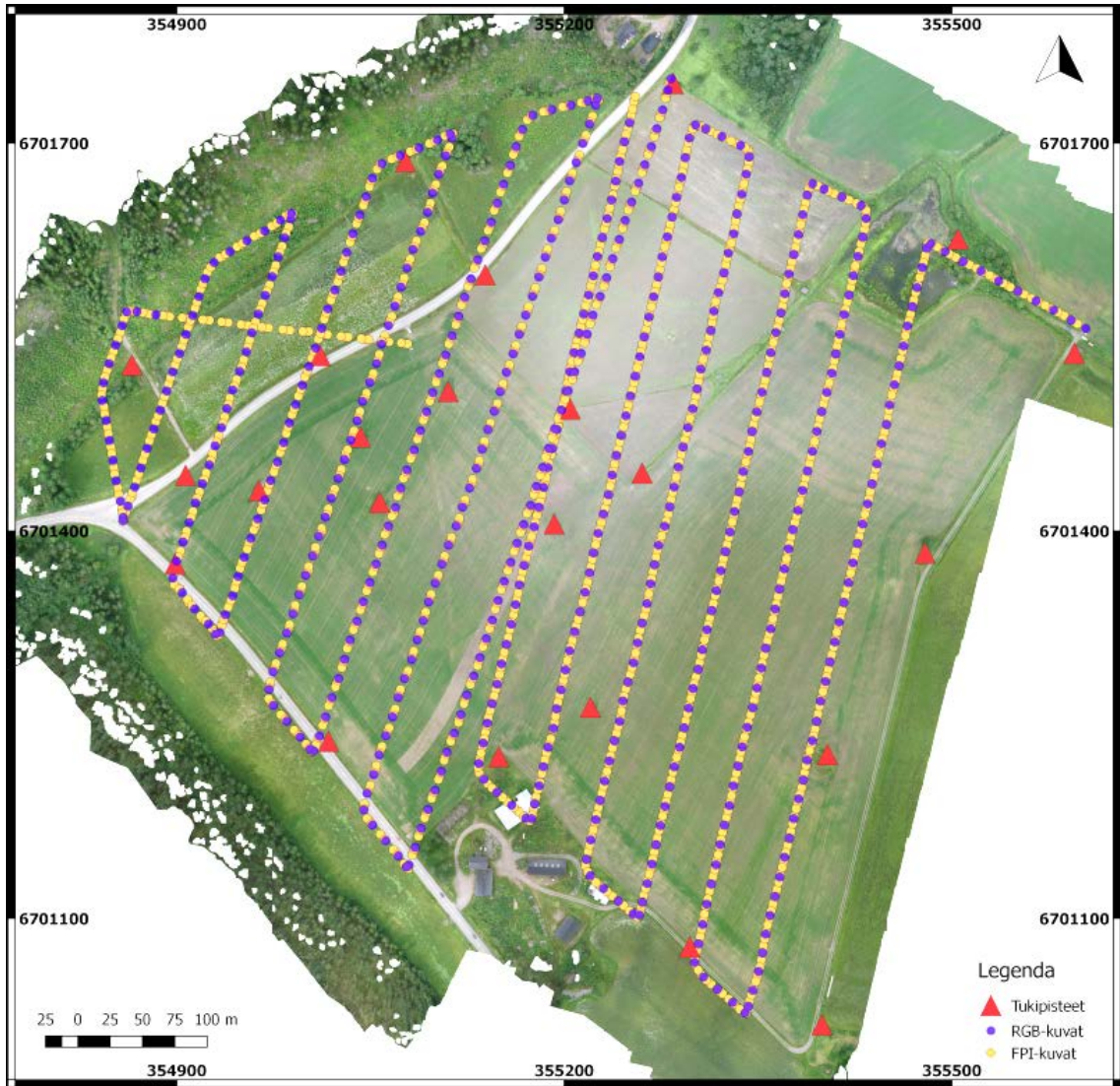
3.3 Kuvaukset

3.3.1 Hovi

Tutkimuksessa käytettävät peltokuva-aineistot kerättiin Vihdin Hovissa 31.5. ja 4.7.2016. Molemmilla kerroilla kuvattiin yhteensä 4 lentoa, joista tämän tutkimuksen geometriseen tarkasteluun on valittu toukokuun 3 lentoa (Vihti1, Vihti2, Vihti3) ja heinäkuun 2 lentoa (Vihti4, Vihti5), mitkä kattoivat suuren peltolohkon lisäksi läntisimmän peltolohkon alueen. Tutkittava alue kattoi rakennetuista GCP:istä yhteensä 23 (Kuva 7).

Toukokuun lennoilla kerättiin RGB-kameralla 2186 kuvaa ja FPI-kameralla 1334 kuvakuutiota. Heinäkuun lennoilta RGB-kameran keräämiä kuvia oli 1419 ja FPI-kameralla 941 kuvakuutiota. Näistä karsittiin pois maasta ja nousuun lähdössä otetut kuvat sekä terävyydeltään huonot kuvat. Toukokuun lennon RGB-kuvista poistettiin lisäksi joka toinen kuva, jonka jälkeen RGB-kuvia oli yhteensä 590 ja pituuspeitto jäi 88 % ja sivupeitto 75 %. FPI-kuvakuutioilta irrotettiin 3 kuvakanavaa, jonka jälkeen FPI-kuvia oli yhteensä 2183. Näiden pituuspeitto oli 90 % ja sivupeitto 65 %. FPI-kuvakuutioiden kanavairrotuksesta kerrotaan tarkemmin luvussa 4.1.4. Heinäkuun lennon RGB-kuvat jaettiin pituuspeittojen mukaan kolmeen aineistoon: 1) 94 % 2) 88 % ja 3) 82 %. Tapauksessa ”1) 94 %” käytössä oli kaikki RGB-kuvat, yhteensä 998 kuvaa, tapauksessa ”2) 88 %” joka toinen

kuva yhteensä 500 kuvaa ja tapauksessa ”3) 82 %” joka kolmas kuva, yhteensä 333 kuvaa. Heinäkuun FPI-kuvia oli kolmen kanavan irrotuksen jälkeen yhteensä 2034 ja näiden peitot olivat samat kuin toukokuun lennolla (Taulukko 14). Lennon aikana kerättiin myös kuvanottoaikkojen sijaintitiedot lennokissa olleella GNSS-vastaanottimella. Kuvanottoaikkojen sijaintitietoja hyödynnettiin kuvien georeferoinnissa.



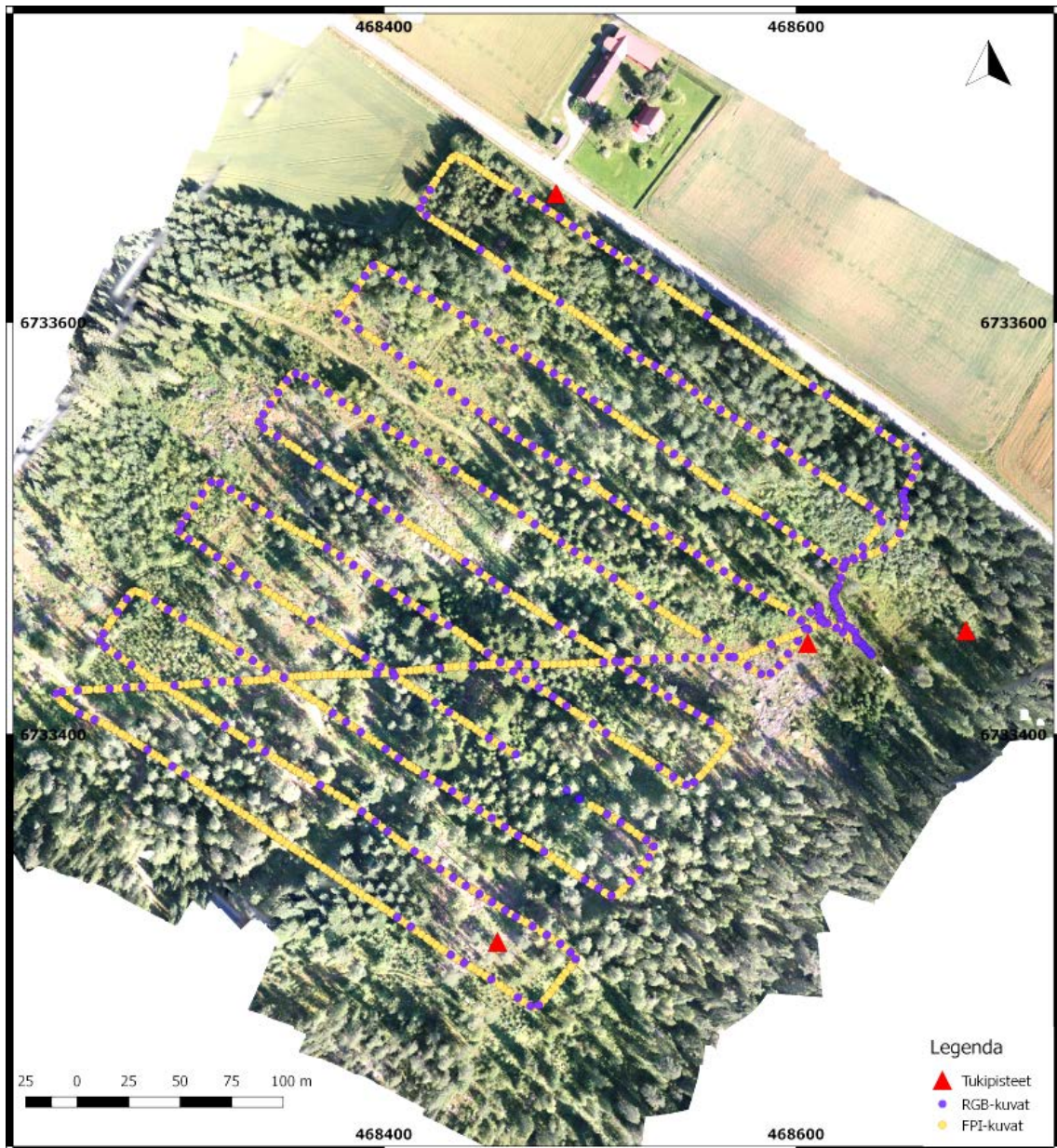
Kuva 7 Vihdin heinäkuun lennon kuvista tehty ortomosaikki esittää tutkimuksessa käytetyn Vihdin peltoaineiston alueen, otettujen RGB- ja FPI-kuvien sijainnit sekä GCP:t.

Taulukko 14 Tutkimuksessa tehtyjen lentojen tiedot: lentokorkeus (m), GSD (cm), kamerat, valotusaika (ms), aukkoluvun (F-stop), peitot (%), lentoaika (UTC +3), atsimuuttikulma (Az, °) ja korkeuskulma (El, °). NX300 ja NX500 on lyhenteet Samsung NX300 ja NX500 RGB-kameroista.

Alue	Lento korkeus (m)	GSD (cm)	Kamera	Valotus (ms)	F-stop	Pituuspeitto (%); Sivupeitto (%)	Lentoaika (UTC +3)	Az (°)	El (°)
Mustila	110	6,9	Rikola Proto2	30	2,8	80; 55	10:38-10:59	134	35
		2,9	NX300	autom.	4,0	93; 81			
Vihti1	140	14,1	FPI 2012b	10	2,8	90; 65	10:10-10:34	121	41
		3,2	NX500	autom.	4,0	93; 75			
Vihti2	140	14,1	FPI 2012b	8	2,8	90; 65	11:26-11:50	144	48
		3,2	NX500	autom.	4,0	93; 75			
Vihti3	140	14,1	FPI 2012b	10	2,8	90; 65	14:34-14:54	210	49
		3,2	NX500	autom.	2,8	93; 75			
Vihti4	140	14,1	FPI 2012b	25	2,8	90; 65	12:42-13:02	167	52
		3,2	NX500	autom.	4,0	93; 75			
Vihti5	140	14,1	FPI 2012b	20	2,8	90; 65	15:55-16:15	234	43
		3,2	NX500	autom.	4,0	93; 75			

3.3.2 Mustila

Mustilan metsäaineistot kerättiin 20.8.2015. Alueella lennettiin yhteensä 4 lentoa, joista tähän tutkimukseen valittiin ensimmäinen lento (kuva 8). Tällä alueella oli 4 GCP:tä. Tältä lennolta kerättiin RGB-kameralla 412 kuvaa ja FPI-kameralla 564 kuvakuutiota. Näistä karsittiin pois maasta ja nousuun lähdessä otetut kuvat sekä terävyydeltään huonot kuvat. Jäljelle jäi 385 RGB-kuvaa. Rikola Ltd:n Proto2 FPI-kameran molemmilta RGB-sensoreilta irrotettiin 2 kanavaa eli yhteensä 4 kanavaa, jolloin kuvamäärä oli yhteensä 1616 FPI-kuvaa. Mustilan RGB-kuvien pituuspeitto oli 93 % ja sivupeitto oli 81 % ja FPI-kuvien pituuspeitto oli 91 % ja sivupeitto oli 55 % (Taulukko 14). Lennon aikana kerättiin myös kuvanottoaikkojen sijaintitiedot lennokissa olleella GNSS-vastaanottimella. Kuvanottoaikkojen sijaintitietoja hyödynnettiin kuvien georeferoinnissa.



Kuva 8 Mustilan lennon RGB-kuvista tuotettu ortomosaiikki esittää tässä tutkimuksessa käytettävän tutkimusalueen. Ortomosaiikkiin on merkitty myös RGB- ja FPI-kuvien kuvanotto sijainnit ja GCP:t.

3.4 Referenssiaineistot

3.4.1 Laserpistepilvet

Laserpistepilvet on ladattu Maanmittauslaitoksen (MML) avoimien aineistojen tiedostopalvelusta (MML, 2016b). Avoimien aineistojen tiedostopalvelusta voi itsepalveluna ladata mm. karttoja, laserpistepilviä ja korkeusmalleja ilmaiseksi. MML:n laserkeilausaineisto on kolmiulotteinen pistemäinen aineisto, joka kuvaa maanpintaa ja maanpinnalla olevia kohteita. Tiedostossa jokaisella pisteellä on X-, Y- ja Z-koordinaattitiedot ETRS-TM35FIN-koordinaatistossa ja N2000-korkeusjärjestelmässä. Laserkeilausaineistosta voidaan tuottaa mm. maastomalleja, joita voidaan käyttää esimerkiksi tulvia ja melua mallintavissa ja

maanpinnan muotoja tutkivissa sovelluksissa. Taulukossa 15 on esitelty Mustilan ja Vihdin lennokikuvausten alueelta tulostettujen laserpistepilvien metatiedot.

Tässä tutkimuksessa laserpistepilvistä tuotettuja maastomalleja käytetään referenssinä tutkittaessa ovatko fotogrammetriset korkeusmallit deformatuneita. Fotogrammetrisen ja laserkeilauksen aikaero oli Mustilassa 6 vuotta ja Vihdissä 5 vuotta. Laserkeilaukset on tehty lehdettömään aikaan jolloin aluskasvillisuus oli vähäistä. Mustilan alueella on tällä välillä ollut iso myrsky, joka kaatoi monia puita ja puut ovat myös kasvaneet, lisäksi myös aluskasvillisuus voi vaikuttaa maanpinnan korkeuteen. Vihdin peltoalueilla maanpinnan muokkas on saattanut muuttaa maanpinnan korkeutta joitakin desimetrejä. Tutkimuksessa referenssiksi valittiin mahdollisimman muuttumattomat kohteet eli maanpintaa. Suuren aikaeron vuoksi laserpistepilveä ei käytetä enemmässä määrin fotogrammetristen mallien tarkkuuksien määrittämisessä.

Taulukko 15 Mustilan ja Vihdin laserpistepilvien informaatiota (MML, 2016c).

	Mustila laserpistepilvi	Vihti laserpistepilvi
Keilauspäivä	20.4.2009	23.4.2011
Koordinaatisto	ETRS-TM35FIN	ETRS-TM35FIN
Korkeusjärjestelmä	N2000	N2000
Lentokorkeus (m)	1800	2150
Korkeustarkkuus	0,15	0,15
Pistetiheys (pistettä/m²)	0,56	0,85
Tiedostomuoto	LAZ	LAZ
Multipulse	Ei	2 pulssia
Keilain	Optech ALTM GEMINI	Leica ALS60

3.4.2 Maastokoealat

Hovin testialueelta kerättiin 8.7.2016 yhteensä 36:lta näytteenottoruudulta (50 cm x 50 cm) kasvillisuuden keskimääräinen korkeus (cm), tuorebiomassa (kg/m²) ja kuivabiomassa (kg/m²) (Kuva 9, Liite 7). Näytteenottoruutujen paikat mitattiin Trimblen GeoXH-GPS:llä noin 10 cm:n X-, Y- ja Z-koordinaattien tarkkuudella. Kasvillisuuden keskimääräinen korkeus on arvio kasvuston ”latvuston” keskimääräisestä tasosta. Näytteenottoruudut oli valittu siten, että kasvillisuus oli mahdollisimman homogeenistä näytteenottoruutujen sisällä. Näytteenottoruuduista 13 oli niin sanottuja nollaruutuja eli näissä ei kasvanut ollenkaan kasvillisuutta, paitsi rikkakasveja, joita ei otettu korkeusmittauksissa tai biomassojen laskennassa huomioon.



Kuva 9 Hovin testialueen 36:n näytteenottoruudun numerot ja sijainnit Vihdin heinäkuun kuvauksesta tuotetun ortomosaiikin päällä.

3.5 Kameroiden kalibroinnit

FPI-kameroille suoritettiin geometrinen ja radiometrinen kalibrointi. Geometrisella kalibroinnilla saatiin Photoscaniin kameran sisäisten orientointien parametrien (IOP:t) lähtöarvot, joilla varmistettiin ratkaisusta saatavat paremmat kuvien orientoinnit ja sijaintitiedot. Radiometrinen kalibrointi sisälsi absoluuttisen-, suhteellisen- ja spektraalisen kalibroinnin (Hokavaara ym., 2013, Saari ym., 2011, 2013, Mäkyne ym., 2011).

Rikola Proto2 kameran molemmille sensoreille suoritettiin itsekalibrointi Photometrix iwitness (versio 3) kalibrointiohjelmalla (Photometrix, 2016). Kameralla kuvattiin eri korkeuksilla olevia kohteita 0, 90, 180 ja 270 asteen kallistuksilla. Lisäksi kuvat otettiin ainakin kahdeksasta eri kuvausasemapistestä ympäri kuvattavia kohteita. Itsekalibroinnin tuloksena saatiin ratkaistua likimääräiset kameran IOP:t: kameran sensorin polttoväli (c), pääpisteet (x_p , y_p), radiaaliset piirtovirheet (k_1 , k_2 , k_3) sekä tangentialiset piirtovirheet (p_1 , p_2) (Luhmann ym., 2006, s.263–264). Berveglieri ja Tommaselli (2016) sekä Tommaselli ym. (2016) on toteuttanut terrestriaalisella kalibrointikentällä itsekalibroinnin ja Oliveira ym. (2016a) on toteuttanut kanavakohtaisen geometrisen kalibroinnin Rikola Ltd. hyperspektrikameralle.

Vihdissä käytössä olleelle Samsung NX500 RGB-kameralle käytettiin kameran IOP:den lähtöarvoina Vihdin toukokuun kuvablokin ratkaisuja (23 tukipistettä). Samsung NX300 RGB-kameralle ja FPI 2012b kameralle käytettiin kameran IOP:den lähtöarvoina Tammelessa turvesuo kuvablokin ratkaisuja (16 tukipistettä).

Taulukossa 16 on esitetty kaikkien kameroiden IOP:den lähtöarvot. Kalibrointia tarkennetaan myöhemmin orientointilaskennan yhteydessä, mahdollisen kameran epästabiiliuden ja kalibroinnin epätarkkuuden vuoksi. Blokkilaskennan onnistumista pystytään testaamaan vertaamalla kameroiden IOP:n lähtöarvoja blokkilaskennassa ratkaistujen IOP:n arvoihin. Jos kuvablokeilta ratkaistut kameroiden IOP:t eroavat lähtöarvoista paljon, on kuvablokin sisäinen tarkkuus luultavasti huono. Tämä voi johtua esimerkiksi kameran vioittumisesta, huonolaatuisista kuvista tai liian heikoista kuvien peitoista.

Kameroiden sensoreille on tehty myös spektraalinen kalibrointi, jossa on selvitetty sensorin spektrikanavien keskiaallonpituudet ja FWHM (Mäkynen ym., 2011).

Taulukko 16 Kameroiden IOP:n lähtöarvot: kameran sensorin polttoväli (c), pääpisteet (x_p , y_p), radiaaliset piirtovirheet (k_1 , k_2 , k_3) sekä tangentialiset piirtovirheet (p_1 , p_2).

	NX300	NX500	FPI 2012b	Rikola Proto2 S1	Rikola Proto2 S2
C	16,7	16,7324	10,64	8,31	8,79
XP	-0,2227	0,1215	0,0059	-0,2781	-0,2556
YP	-0,0998	-0,015	0,1232	-0,0497	0,0756
K1	6,53E-05	3,92E-05	2,62E-03	4,71E-03	3,74E-03
K2	-3,87E-07	-3,58E-07	2,48E-06	-4,44E-05	1,62E-04
K3	7,37E-10	8,75E-10	-5,81E-08	4,14E-06	-1,21E-05
P1	9,95E-05	-4,57E-05	-5,06E-05	1,84E-08	-8,37E-05
P2	5,65E-05	7,03E-07	8,06E-05	2,36E-07	1,80E-04

4 Menetelmät

4.1 Kuvien esiprosessointi

Jotta eri ajanhetkillä tai eri instrumenteilla otettuja hyperspektrikuvakuutioita voidaan vertailla keskenään, tulee kaukokartoitusaineistot georeferoida tai rekisteröidä samaan koordinaatistoon ja niille tulee suorittaa radiometrinen- ja spektraalinen korjaus. Kuvien georeferointia varten FPI-kuutioilta tulee irrottaa yksittäisiä kanavia ja muuntaa ne esimerkiksi tiff-kuvaformaattiin. FPI-kuution eri kanavien hieman toisistaan poikkeavien valotusajankohtien ja tästä johtuvat kanavien spatiaaliset erot tulee korjata. Tässä luvussa esitellään FPI-kuvakuutioille tehtävät esiprosessointivaiheet.

RGB-kamerat tallentavat kuvat JPG-kuvaformaattissa, joka kelpaa sellaisenaan SfM ohjelmistoihin. Tämän vuoksi RGB-kuvat eivät vaadi esiprosessointeja.

4.1.1 Radiometrinen korjaus

Kuvan harmaasävyarvoja (DN) voidaan hyödyntää kohteiden tunnistamisessa ja muutosten seurannassa, koska kaikki kohteet heijastavat säteilyä yksilöllisesti havaintogeometriasta ja aallonpituudesta riippuen. Kuitenkin, jotta eri ajanhetkillä ja eri sensoreilla kerättyjä aineistoja voidaan analysoida keskenään, täytyy niille toteuttaa radiometrinen korjaus. Kerättyjen kuvien DN-arvoihin vaikuttavat sensorin ja kohteen radiometriset ominaisuudet, ilmakehä ja valaistusolosuhteet. Valaistusolosuhteiden erot johtuvat mm. auringon kulmien eroista ja varjojen vaikutuksesta eri kulmista. Valaistuseroja pyritään kuvaamaan kaksisuuntaisella heijastuksen funktiolla (engl. bidirectional reflectance distribution function, BRDF), jota on kuvattu mm. Honkavaara ym. (2014a) ja Honkavaara ym. (2012) tutkimuksissa tarkemmin.

Radiometrisessä laboratoriokalibroinnissa määritetään sensorin vääristymät, kuten esimerkiksi vinjetointi ja CMOS-kennon epähomogeisuus. VTT on määrittänyt FPI 2012b kameralle (Mäkyne ym., 2011; Saari ym., 2013) ja Rikola Ltd. Rikola Proto2 kameralle kalibrointiparametrit käyttämällä integroivaa palloa, joka muodostaa kirkkaudeltaan tasaisen ja tunnetun referenssikohteen.

FPI-kameran kuvilta vähennetään myös pimeävirtakuva (engl. dark signal), koska FPI-kameran sensori reagoi eri olosuhteissa, kuten kosteudessa ja lämmössä, hieman eri tavalla. Pimeävirtakuva otetaan aina juuri ennen aineiston keräämisen aloittamista ja heti sen jälkeen. (Mäkyne ym., 2011).

Koska sensorin mittaama heijastunut säteily on vaikutuksissa ilmakehän kanssa ja tämän vaikutuksesta osa säteilystä absortoituu tai hajoaa, on kuville toteutettava radiometrinen korjaus (Lillesand ym., 2008, s. 9). Kuvien harmaasävyarvot (DN) voidaan muuntaa korjausmenetelmillä vastaamaan reflektansseja eli maan pinnan heijastusta (Lillesand ym., 2008, s. 490–498). DN-arvojen muuntamiseen reflektansseiksi on hyperspektrisessä RPAS-kuvauksissa kolme päämenetelmää: 1) samanaikaisesti, joko maanpinnalla tai RPAS-laitteella kerätyn auringon säteilyn irradianssin avulla, 2) lennon aikana mitattujen reflektanssikohteiden, joiden spektraaliset ominaisuudet tunnetaan avulla tai 3) Ennen lentoa toteutettava referenssikohteiden, joiden spektraaliset ominaisuudet tunnetaan, kalibroinnilla (Aasen ym., 2014).

Paikkatietokeskuksessa tämä toteutetaan radiometrisella blokkitasoitusmenetelmällä, joka perustuu siis menetelmään ”2)” (Honkavaara ym., 2012, 2013, Hakala ym., 2013). Menetelmän ideana on käyttää radiometrisia liitospisteitä toisiaan peittäville kuvilla ja määrittää malli, joka muodostaa DN-arvon eri kuvilla. DN-arvojen muunnos reflektansseiksi toteutetaan seuraavalla kaavalla:

$$DN_{jk} = a_{rel_j}(a_{abs}R_{jk}(\theta_i\varphi_i\theta_r\varphi_r) + b_{abs}) + b_{rel_j} \quad (12),$$

missä $R_{jk}(\theta_i\varphi_i\theta_r\varphi_r)$ on kohdepisteen, k, kaksisuuntaisen heijastuksen kerroin (engl. bi-directional reflectance factor, BRF) kuvalla j; a_{abs} ja b_{abs} ovat empiirisen viivan mallin parametrit reflektanssimuunnokselle ja a_{rel_j} ja b_{rel_j} ovat kuvan j relatiivisen korjauksen parametrit (engl. relative correction parameters) (Hakala ym., 2013). Referenssinä tässä mallissa käytetään Paikkatietokeskuksella kuvan 4 reflektanssipaneeleilta mitattuja DN-arvoja.

4.1.2 Spektraalinen korjaus

FPI-kamerassa valonsäteet kulkevat suoraan FPI-yksikön läpi, mutta aukkosuhteen parantamiseksi on sallittu enimmillään 10 asteen kulma läpi kulkevalle valonsäteelle. Tämä aiheuttaa ”spektraalinen hymy” (engl. spectral smile) ilmiön, jossa kuvien keskiaallonpituus muuttuu siten, että kuvan keskellä aallonpituus on suurempi kuin kuvan reunoilla (Kuva 10).



Kuva 10 ”Spektraalisen hymyn” (engl. Spectral smile) ilmiön havainnollistamiseksi keskiaallonpituudet on skaalattu väreiksi siten, että keskellä kuvaa olevat pikselit (valkoiset) vastaavat keskiaallonpituutta 711 nm. Reunoja kohti mentäessä keskiaallonpituus laskee niin, että reunimmaisten pikseleiden (siniset) vastaavat arvoa 704 nm (Näsi, 2015).

”Spektraalisen hymyn” korjaamiseksi on muutamia eri vaihtoehtoja. Mäkyinen ym. (2011) esittelee VTT:n kehittäemän menetelmän, jossa yksittäiset kuvat korjataan käyttämällä kahta toisiaan spektraalisesti ja spatiaalisesti lähekkäin olevaa kanavaa. Siinä valitaan kaksi kanavaa, jotka sovitetaan keskenään päällekkäin, niiden poikkeavasta kuvanottoajasta johtuvan liikkeen poistamiseksi. Jotta kanavasovitus onnistuu, kanavat eivät saa poiketa toisistaan kuin enimmillään 20 pikseliä. Tämän jälkeen interpoloimalla yhdistettävien kanavien aallonpituuksia tavoitteena olevaan aallonpituuteen saadaan laskettua korjattu kuva. Kaikille alkuperäisille kanaville ei kuitenkaan tällä menetelmällä löydy sekä spektraalisesti

että spatiaalisesti tarpeeksi lähellä olevaa kanavaa. Tämän vuoksi kanavien lukumäärä pienenee alkuperäisestä. (Mäkynen ym., 2011).

Honkavaara ym. (2013) esittelee toisen menetelmän ”spektraalisen hymyn” korjaamiseksi, mikä perustuu siihen, että vain kuvien keskiosaa hyödynnetään lopullisissa sovelluksissa. Tällöin ”spektraalinen hymy” efekti on hyvin pieni (alle 5 nm), että sen vaikutus voidaan suurimmassa osassa sovelluksia jättää huomioimatta. Tämä vaatii kuitenkin sitä, että kuvien peittoprosentin on oltava vähintään 60 %:a. (Honkavaara ym., 2013).

4.1.3 Kanavasovitus

Koska lentoalusta liikkuu ja jokainen FPI-kameran kanava tallennetaan omalla ilma-raolla, niin johtaa tämä jokaisen kanavan hieman toisistaan poikkeavaan sijaintiin ja orientointeihin (Mäkynen ym., 2011). Tyypillisesti yhden hyperspektri kuution valotuksen aikana lentoalusta liikkuu pitkin lineaarista rataa, joka aiheuttaa yhteensopimattomuutta lentosuunnan mukaisen etenevän liikkeen vuoksi (Honkavaara ym., 2017). Tämän liikkeen aiheuttama ero kahden kanavan a ja b (dx_{ab}) välillä:

$$dx_{ab} = v dt_{ab} [m] \quad (13),$$

missä v on lentonopeus ja dt_{ab} on aikaero kahden kanavan välillä. Myös lentoalusta voi olla epästabiili aiheuttaen suhteellisen orientaatio eron eri kanavien välillä kaikkiin suuntiin, mikä voi aiheuttaa yhteensopimattomuuden mihin tahansa suuntaan. Lentoalustan stabilisointi auttaa vähentämään näiden vaikutusta. Kohteen siirtymä kahden kanavan välillä voidaan ilmaista kaavalla

$$dX_{ab} = dX_a - dX_b = -\frac{dZ v dt_{ab}}{(FH-dZ)} [m] \quad (14),$$

missä X_a ja X_b ovat kohteen etäisyys projektiokeskuksen vertikaaliprojektiosta maassa kahdella eri kanavalla (etäisyys nadiiripisteestä), dZ on kohteen korkeus referenssi tasosta ja FH on lentokorkeus, joka voidaan ajatella pysyvän samana molemmilla kanavilla. Kohteen siirtymää kanavien välillä voidaan vähentää lisäämällä lentokorkeutta ja vähentämällä lentonopeutta, aikaeroa kanavien välillä ja korkeuseroja kohteessa (kaava 13). Lisähaasteena kanavasovitukseen tuo se, että kaikki pisteet eivät välttämättä näy eri kanavien kuvilta, koska niiden ajallisen poikkeavuuden vuoksi, myös niiden katselukulma muuttuu. Katselukulman lisäksi tähän vaikuttaa kohteen jyrkkyys ja mahdolliset muut kohteet, jotka estävät kyseisen pisteen näkymisen eri katselukulmista. Tämän vuoksi esimerkiksi metsäiset kohteet ovat erityisen hankalia kanavasovitukselle. (Honkavaara ym., 2017.)

Täydelliseen kanavasovitukseen vaaditaan tarkkaa kohteiden korkeustietoa ja kuvautumismallia. Tästä syystä kanavasovitus toteutetaan kollineaarisuusyhtälöllä, joka toisin kuin 2D muunnos poistaa maaston vaihteluiden aiheuttamat yhteensopivuusongelmat. Kohteen skaalaerot on otettava huomioon käytettäessä kohteen 3D-mallia. Myös linssivääristymät tulee huomioida, minkä vuoksi kollineaarisuusyhtälöön on lisätty kuvan vääristymien parametrit (Fraser, 1997). Tarkka malli on seuraava:

$$\begin{aligned} x - x_0 - \delta x &= -c \frac{m_{11}(X-X_0)+m_{12}(Y-Y_0)+m_{13}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0)+m_{32}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} \\ y - y_0 - \delta y &= -c \frac{m_{21}(X-X_0)+m_{22}(Y-Y_0)+m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0)+m_{32}(Y-Y_0)+m_{33}(Z-Z_0)} \end{aligned} \quad (15),$$

missä x ja y ovat kuva pisteiden koordinaatit; X , Y ja Z ovat saman pisteen maastokoordinaatit; m_{ij} ovat orientointimatriisin elementit; X_o , Y_o ja Z_o ovat kameran perspektiivikeskuksen maastokoordinaatit; x_o ja y_o ovat polttopisteen koordinaatit; c on kameravakio ja δx ja δy ovat linssin ja kuvan vääristymien korjausparametrit, jotka aiheuttavat poikkeavuutta kollineaarisuusyhtälössä.

Kanavasovitus kollineaarisuusyhtälöiden avulla vaatii jokaisen kuvan ulkoisten parametrien (EOPs), kameran sisäisten parametrien (IOPs) ja kohteen 3D-pintamallin ratkaisut (Honkavaara ym., 2017). Ilmakuvauksessa EOP:t voidaan ratkaista, joko sädekimpputasoituksella tai suoralla georeferoinnilla. Suorassa georeferoinnissa kuvien sijainnit ja kierrot määritetään lennon aikana GNSS:n ja IMU:n avulla, ja georeferointi toteutetaan käyttäen kuvien informaatiota ja kameroiden kalibrointitietoja. Suoran georeferoinnin menetelmä on tehokas, mutta käytännössä se sisältää aina epävarmuutta, johtuen mm. suoran georeferoinnin orientointien mittauksen virheistä, kameran ja GPS:n aika informaatioiden synkronointivirheistä, kameran kalibroinnin epästabiiliudesta ja datum virheestä, mitkä kaikki aiheuttavat georeferointiin virhettä (Honkavaara ym., 2017). Tämän vuoksi Paikkatietokeskuksella käytetään sädekimpputasoituksen menetelmää, koska sillä saadaan maastotuen avulla ratkaistua luotettavammin IOP:t ja EOP:t. Kohteen 3D-geometria pystytään ratkaista tarkasti tiheän kuvasovituksen avulla. Sädekimpputasoitus ja tiheä kuvasovitus esitellään luvussa 4.2. Jokainen FPI-kameran sovittamattoman kanavan EOP voitaisiin ratkaista yksittäin sädekimpputasoituksella, mutta kanavien suuren määrän vuoksi tämä on erittäin aikaa vievää.

Paikkatietokeskuksessa kehitetyllä menetelmällä (Honkavaara ym., 2017) pystytään määrittämään tarkka EOP ratkaisu jokaiselle kanavalle ilman kaikkien kanavien samanaikaista sädekimpputasoitusta. Ensin sädekimpputasoituksella ratkaistaan rajatulta määrältä referenssikanavia EOP:t, jonka jälkeen lopuille kanaville interpoloidaan EOP:t ratkaistujen referenssikanavien lentorataen avulla (Honkavaara ym., 2017). Tämän jälkeen taaksepäin leikkauksen ja liittopisteiden avulla ratkaistaan tarkat orientoinnit kaikille kanaville.

4.1.4 Kanavairrotus

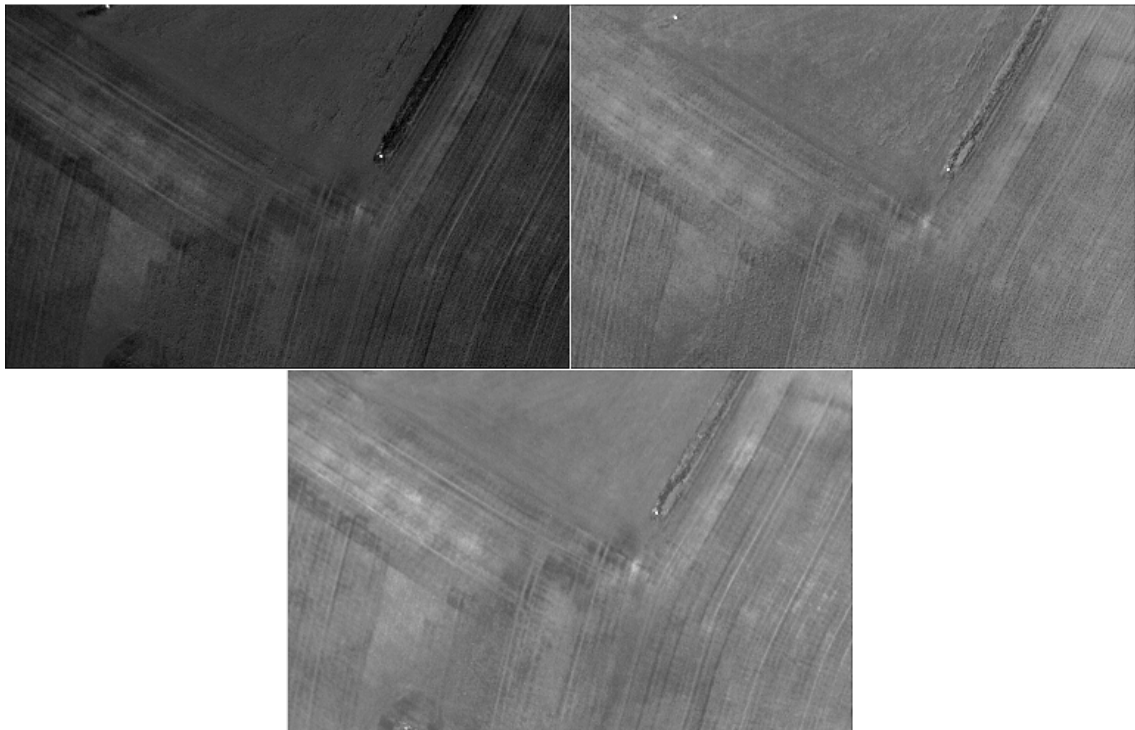
FPI-kuvakuutioiden kanavien irrotus toteutettiin Rikola Ltd:n kehittämällä kanavairrotusohjelmalla. Ohjelmaan syötetään kuvakuutiot, joilta kanavat halutaan irrottaa ja määritetään halutut irrotettavat kanavat ja skaalausarvo. Skaalausarvolla määritetään, kuinka kuvien pikseleiden DN-arvot jakautuvat kuville. Skaalausarvon ollessa liian suuri kuvista tulee tummia ja niiltä saatetaan hukata heikkoja signaaleita. Skaalausarvon ollessa liian pieni kuvista tulee kirkkaita ja ne saattavat palaa puhki. Oikean skaalausarvon valinta vaikuttaa siis merkittävästi irrotettujen kanavien sävykkyyteen. Parhaan skaalausarvon saa tutkimalla yksittäisiä kuvakuutioita ja kirjaamalla niiden kirkkaimpia valotusarvoja ylös. Tämän jälkeen kirkkain löydetty arvo jaetaan luvulla 65 000 ja näin saatu arvo on käytettävä skaalausarvo. On suotavaa laittaa ohjelmaan kuitenkin hieman tätä lukua suurempi arvo, jotta varmistetaan, että miltään kovalta ei menetetä sen sävykkyyttä. Skaalausarvo Rikola Proto2 kameran kuvakuutioille oli 0.007 ja FPI 2012b kameran kuvakuutioille 0.00005. Skaalausarvojen suuret erot johtuvat FPI-kameroiden optiikoiden eroista.

FPI 2012b kameran referenssikanavat valittiin niin, että yksi kanava on kuvakuution alusta, yksi keskeltä ja yksi kuution lopusta (Taulukko 17, Kuva 11). Näin saatiin mahdollisimman hyvät pituuspeitot kuville sekä taataan mahdollisimman hyvä kanavasovitus, sillä kanavasovituksessa vaikuttavia tekijöitä ovat kuution temporaalinen (sijainnillinen) ja spekt-

raaliset ominaisuudet. Kolme kanavaa on osoittautunut aikaisemmissa tutkimuksissa riittäväksi laadukkaan geometrisen prosessoinnin takaamiseksi (Honkavaara ym., 2016a). Mustilan FPI-aineistolle valittiin neljä kanavaa, jotta saatiin molemmilta sensoreilta kaksi erillistä kanavaa. Valitut kanavat ovat jakaantuneet tasaisesti kuution valotuksen ajalle: kanava 10 on sensorin 2 alusta, kanava 9 sensorin 2 lopusta, kanava 22 sensorin 1 alusta ja kanava 23 sensorin 1 lopusta (Taulukko 17, Kuva 12).

Taulukko 17 Esittää FPI 2012b ja Rikola Proto2 kanavien aallonpituudet (nm), spektraalinen erotuskyky FWHM, sekä kanavien aikaero (s) ja sijaintierot (m) kuution alusta. Sijaintierojen laskemiseen on käytetty Mustilan ja Vihdin lentojen lentonopeutta 4 m/s.

	Aallonpituus (nm)	FWHM (nm)	Kanavien aikaero (s)	Sijaintiero (m)
FPI 2012b kanava 3	520,400024	20,443001	1,05	4,2
FPI 2012b kanava 11	595,900024	21,35	1,725	6,9
FPI 2012b kanava 14	625,099976	27,632999	0,075	0,3
Rikola Proto2 s2 kanava 9	490,002838	12,104892	0,48	1,92
Rikola Proto2 s2 kanava 10	499,974701	13,523658	0	0
Rikola Proto2 s1 kanava 22	646,779846	14,309130	0,711	2,84
Rikola Proto2 s1 kanava 23	656,883667	11,09846	1,335	5,34



Kuva 11 Ylhäältä vasemmalta oikealle FPI 2012b kameran kanavien 3, 11 ja 14 irrotetut tif-kuvat Vihdin heinäkuun kuvauksen ensimmäiseltä lennolta.



Kuva 12 Ylhäältä vasemmalta oikealle Rikola Proto2 kameran kanavien 9, 10, 22 ja 23 irrotetut tif-kuvat Mustilan lennolta.

4.1.5 Kuvien sijaintitietojen laskeminen

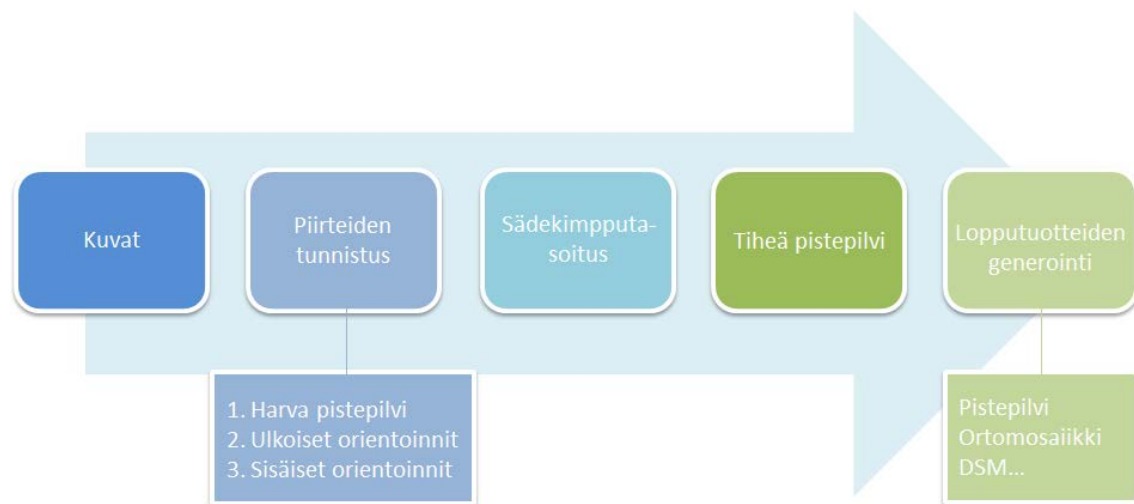
GPS-vastaanottimen keräämistä lentoradoista interpoloidaan kuvanottoaikkojen X-, Y- ja Z-koordinaatit parhaimmillaan jopa kymmenien cm:en absoluuttisella tarkkuudella (Taulukko 21) RTKLIB (Versio 2.4.2) ohjelmalla (RTKLIB, 2013). RTKLIB on opensource ohjelmisto, jolla pystytään toteuttamaan gps-aineistojen jälkilaskentaa. Jälkilaskennassa käytettiin korjausdatana virtuaalista tukiasemaa, joka luotiin Geotrimin ja Trimblen Trimnetillä (Trimnet, 2016) (Web-palvelu). Nämä tukiasemadatat ladattiin lentojen ajalta 1 Hz taajuudella Rinex 2.10 formaatissa. Ensimmäiseksi RTKLIBISSÄ GPS-vastaanottimen tallentamat lentoradat purettiin Rinex 2.10 formaattiin 1 Hz intervallilla RTKCONV nimistä ohjelmaa käyttämällä. Seuraavaksi GPS-vastaanottimen tallentama data korjattiin virtuaalisen tukiasema datan avulla RTKPOST ohjelmalla. RTKPOST ohjelmaan valittiin paikannustyyppiä kinematic, korkeusmaskiksi (engl. ”elevation mask”) 15° ja SNR maskilla kaikki yli 30 dBHz signaalit suodatettiin pois.

Jälkilasketusta GPS-datasta laskettiin jokaiselle FPI- ja RGB-kuvalle niiden kuvanottoaikat käyttämällä MATLAB:ssa kustomoitua koodia. Näille laskettiin vielä Z-koordinaatin ”Lever-arm” korjaus. Tämä toteutettiin manuaalisesti mittaamalla GPS-vastaanottimen ja kameroiden korkeusero ja vähennettiin kuvien kuvanottokorkeuksista. FPI-kuvien sijaintitiedot ratkaistaan käyttämällä hyväksi FPI-kameran oman GPS:n tallentamia tarkkoja aikaleimoja jokaiselle kuvakuutiolle. FPI 2012b kamerassa jokaisen kuution valotusaika oli Vihdissä 3,0 s ja Rikola Proto2 kameran Mustilassa 2,2 s. FPI 2012b kameran eri ”ilmaukkojen” välinen aikaero on 0,075 s ja Rikola Proto2 kameran 0,048 s. Kun siis tiedetään jokaisen kuvakuution kuvanottoaika, yhden kanavan vaatima valotusaika ja kanavien järjestys, pystytään määrittämään jokaiselle kuvakuution kanavalle sijaintitieto jälkilasketusta GPS:n lentoradoista. Tämä toteutetaan MATLAB:ssa koodilla, jossa kuvakuutioiden aikaleimojen perusteella etsitään jälkilasketusta GPS-datasta kanavien sijaintitiedot.

RGB-kameran kuville ei tallenneta tarkkoja aikaleimoja kuten FPI-kuville, koska RGB-kameralla ei ole omaa GPS-vastaanotinta. RGB-kameralle lähetetään lennokissa olevalta tietokoneelta pulssi, joka laukaisee kameras ja tästä laukaisusta lähtee takaisin tietokoneelle pulssi, jonka vastaanoton kellonaika tallennetaan tietokoneen muistiin. Kun tiedetään RGB-kamerasta lähtevän pulssin kulku-aika tietokoneeseen, pystytään jokaiselle kuvalle interpoloimaan kuvan sijainti jälkilasketusta GPS-dastasta. Pulssiajan tarkka määrittäminen on kuitenkin hankalaa ja lisäksi interpoloinnista seuraa virheitä, minkä vuoksi RGB-kuvien sijainteja ei onnistuttu määrittämään yhtä tarkasti kuin FPI-kuvien.

4.2 Kuvien geometrinen prosessointi

Työssä kuvien geometrinen prosessointi toteutettiin Photoscan-ohjelmalla, joka perustuu SfM algoritmiin. Se on edistynyt kuvien 3D-mallinnukseen tarkoitettu ohjelmisto, joka käyttää kuvasovitusta muodostaakseen kohteesta 3D-malleja. Kuvassa 13 on esitetty Photoscanin prosessointiketju kuville. Ensin Photoscan toteuttaa kuvasovituksen, jossa se etsii yleisiä piirteitä jokaiselta kuvalta ja muodostaa näiden piirteiden avulla kaikki mahdolliset kuvaparit. Tämän jälkeen ohjelma määrittää kameras sisäisten orientointien parametrit (IOP:t) ja kuvien ulkoiset orientoinnit (EOP:t) eli kuvien orientoinnit ja sijainnit, sekä muodostaa liitospisteistä harvan pistepilvi esityksen mallikoordinaatistossa. Seuraavaksi kuvien tunnettuja sijaintitietoja ja GCP:itä tai jompaakumpaa käyttämällä tehdään sädekimpputasoitus, jossa kameroiden IOP:t ja kuvien EOP:t tarkentuvat ja mallikoordinaatistosta päästään tunnettuun kohdekoordinaatistoon. Seuraavaksi ohjelma laskee kuvaparien, ratkaistujen kameras IOP:den ja kuvien EOP:n perusteella tiheän pistepilven alueesta. Tämän jälkeen tiheän pistepilven informaatiosta lasketaan alueen korkeusmalli. Korkeusmallia ja kuvia hyödyntäen pystytään laskemaan myös ortomosaiikit kuvablokille. Lopputuotteina ohjelmasta pystytään tulostamaan mm. pistepilviä, ortomosaiikkeja ja korkeusmalleja (DSM, DTM) useissa eri formaateissa (Kuva 13).



Kuva 13 Photoscanin prosessointiketju kuville. Ulkoiset orientoinnit kattavat kuvien orientoinnit ja sijainnit ja sisäiset orientoinnit kameras sisäisen orientoinnit parametrien ratkaisun.

4.2.1 Itsekalibrointi

Ensimmäisessä vaiheessa Photoscan tunnistaa kuiltä pisteitä, jotka ovat stabiileita katse-lukulman ja valon vaihteluille, ja generoi piirteitä jokaiselle pisteelle sen naapureiden perusteella (AgiSoft, 2016). Näitä piirteitä käytetään myöhemmin tunnistamaan yhtäläisyyk-

siä kuvien välillä. Tämä on samantapainen menetelmä kuin SIFT-algoritmi (Lowe, 1999), mutta Photoscan käyttää omia algoritmejaan sen toteutuksessa, mitkä mahdollistavat korkeampilaatuisemman kuvasovituksen kuin perinteisen SIFT-algoritmi. Tässä siis ratkaistaan kameroiden IOP:t ja kuvien EOP:t eikä luodaan harva pistepilvi mallikoordinaatistossa. Photoscan ei hyödynnä harvaa pistepilveä myöhemmissä vaiheissa, mutta sen voi haluttaessa tulostaa ohjelmasta ja käyttää muissa sovelluksissa. Mm. Paikkatietokeskuksen ”in-house C++” 3D-kuvasovitus ohjelmassa hyödynnetään harvaa pistepilveä.

Photoscan käyttää ensin likimääräistä (engl. rough) algoritmia löytääkseen kameroiden IOP:t ja kuvien EOP:t, ja ratkaisee nämä tarkemmin tämän jälkeen tehtävässä sädekimpputasoituksessa, joka käyttää bundle-adjustment algoritmia. Tämä perustuu Wu ym. (2011) esiteltyyn Multicore Bundle Adjustment algoritmiin. Photoscanin bundle-adjustment algoritmi sisältää paljon myös yhtäläisyyksiä Bundlerissa tehtävään kameroiden sisäisten (IOP:t) ja ulkoisten parametrien (EOP:t) ratkaisuun (Bundler, 2016). Sädekimpputasoituksessa hyödynnetään kuvien tunnettuja sijaintitietoja ja GCP:itä tai jompaakumpaa tarkempien kameroiden IOP:n ja kuvien EOP:n ratkaisuun ja mallikoordinaatistosta päästään tunnettuun kohdekoordinaatistoon.

Taulukossa 18 on esitelty Photoscanissa valittavat eri laatuasetukset ja kuvaparien esivalinta-asetukset selityksineen itsekalibrointivaiheeseen. Kuvaparien esivalinta-asetuksista ”Reference” ja ”Generic” ovat molemmat huomattavasti nopeampia prosessoiteja kuin ”Disabled” ja niillä onnistutaan löytämään kuvaparien ratkaisut useimmissa tapauksissa. Jos kuvien sijainnit tunnetaan yksitajuus GPS-vastaanottimen tarkkuudella, joka on useimmiten noin 5-10 m X-, Y- ja Z-koordinaateissa, kannattaa valita kuvaparien etsimiselle ”Reference” esivalinta-asetus. Muussa tapauksessa esivalinta-asetus ”Generic” on erinomainen valinta ajankäytön optimoimiseksi (Taulukko 22). Suositeltavaa on käyttää ”Disabled” esivalinta-asetusta siinä vaiheessa, jos muilla vaihtoehdoilla ei onnistuta kuvien orientoinneissa. Näiden lisäksi itsekalibrointia varten voidaan valita etsittävien piirteiden maksimi määrä ”Key point limit” ja liitospisteiden maksimi määrä ”Tie point limit” (Taulukko 18).

Taulukko 18 Photoscan ohjelmiston itsekalibrointi vaiheessa valittavat eri kuvien laatuasetukset ja kuvaparien esivalinta-asetukset selityksineen.

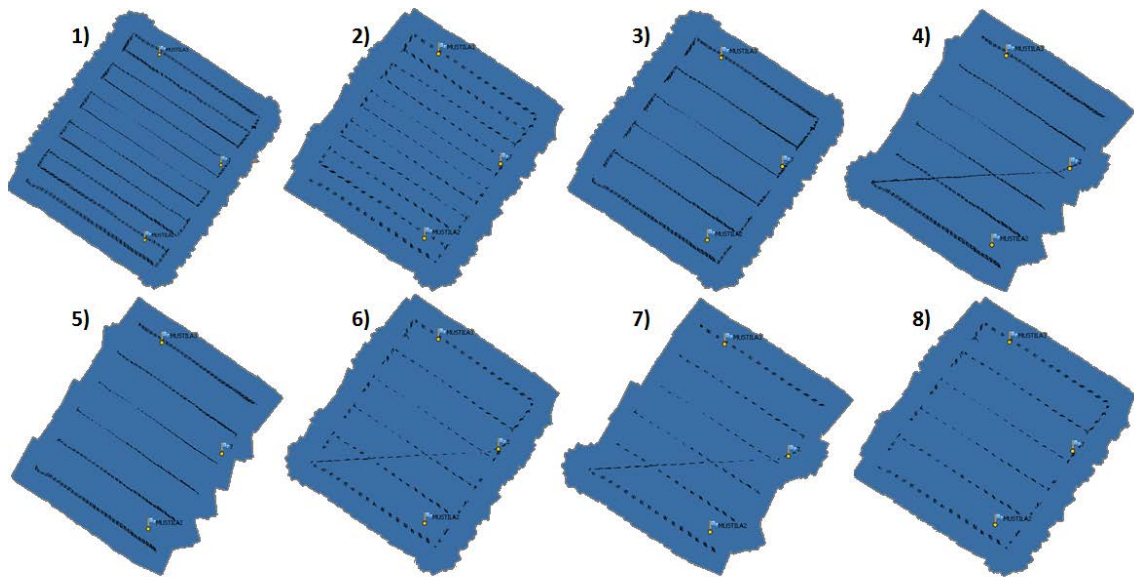
Kuvien laatuasetukset:	Merkitys
"Highest"	Kuvat käsitellään kaksinkertaisina alkuperäiseen kokoon nähden
"High"	Kuvat käsitellään alkuperäisen kokoisina
"Medium"	Kuvat käsitellään 1/2:n kokoisina alkuperäiseen kokoon nähden
"Low"	Kuvat käsitellään 1/4:n kokoisina alkuperäiseen kokoon nähden
"Lowest"	Kuvat käsitellään 1/6:n kokoisina alkuperäiseen kokoon nähden
Kuvaparien esivalinta-asetukset:	
"Reference"	Käyttää kuvien sijaintitietoa hyväksi määritellään mahdollisia kuvapareja
"Generic"	Käsittelee kuvat ensin neljäsosan kokoisina ja muodostaa näiden perusteella kuvaparit
"Disabled"	Ei käytetä mitään esivalintaa kuvapareille, vaan kuvaparit etsitään laatuasetuksen mukaisilta kuvilta
Lisäasetukset:	
"Key point limit"	Määrittää mahdollisten piirteiden ylärajan jokaisella kuvalla. Arvolla 0 Photoscan etsii kaikki mahdolliset ”key points” kuvilta, mutta tulokset ovat mahdollisesti vähemmän luotettavampia
"Tie point limit"	Määrittää liitospisteiden ylärajan jokaisella kuvalla. Arvolla 0 ei suodateta ollenkaan piirteitä, vaan kaikkia löydettyjä käytetään

Tässä tutkimuksessa sekä Mustilan, että Vihdin kaikki kuvat prosessoitiin käyttämällä laatuasetusta ”High” eli kuvat käsiteltiin alkuperäisen kokoisina. Mustilan FPI-kuvat prosessoinnissa käytettiin ”Disabled” kuvaparien esivalinta-asetusta, koska haluttiin varmistaa, että esimerkiksi eri lentopeittojen riittämättömyys ei johtunut esivalinta-asetuksien käytöstä. Mustilan RGB-kuville käytettiin ”Generic” esivalinta-asetusta. Vihdin FPI- ja RGB-kuvat prosessoitiin käyttämällä ”Reference” kuvaparien esivalinta-asetusta, koska Vihdin kuville mitattiin alle m:n tarkkuudella kuvien sijainnit. Mustilan aineistolla testattiin useita eri ”Key point limit” ja ”Tie point limit” arvoja (Taulukko 22) ja näiden tulosten perusteella päädyttiin Mustilan ja Vihdin aineistojen prosessoinneissa käyttämään ”Key point limit”:n arvoa 40000 ja ”Tie point limit”:n arvoa 4000.

FPI-kuvien ideaalisen blokkirakenteen selvittämistä varten Mustilan FPI-kuville tehtiin 8 eri blokkivariaatiota: 1) kaikki lentolinjat, 2) kaikki lentolinjat ja jokatoinen kuvakuutio, 3) joka toinen lentolinja, 4) joka toinen lentolinja/ei päätyjä/poikittaislinja, 5) joka toinen lentolinja/ei päätyjä, 6) joka toinen lentolinja/joka toinen kuvakuutio/poikittaislinja, 7) joka toinen lentolinja/ei päätyjä/joka toinen kuvakuutio, 8) joka toinen lentolinja/joka toinen kuvakuutio (Kuva 14). Blokkivariaatiota ”9) joka toinen lentolinja/ei päätyjä/joka toinen kuutiokuutio” oli myös testissä mukana, mutta sillä ei onnistuttu ratkomaan kameroiden IOP:ta eikä kuvien EOP:ta. Lisäksi näillä blokkivariaatioilla tarkasteltiin myös, kuinka GCP:t ja kuvien tunnetut sijainnit (lyhennetty blokkirakenteissa ”gps”) vaikuttavat blokkirakenteeseen. Tätä varten kaikki eri 8 blokkivariaatiota tuettiin vielä kolmella eri vaihtoehdolla: 1) GCP:illä, 2) GCP:illä ja gps:illä ja 3) gps:illä. Yhteensä siis Mustilan FPI-kuvat jaettiin 24:ään erilaiseen blokkivariaatioon, joista jokainen käsiteltiin itsenäisinä prosesseina.

Taulukkoon 19 on merkitty jokaisen blokkivariaation pituus- ja sivupeitot. Photoscanilla prosessoitavan kuvablokin suositeltava pituuspeitto on noin 80 % ja sivupeitto noin 60 % (AgiSoft, 2016). Blokkivariaatio ”2) kaikki lentolinjat ja jokatoinen kuvakuutio” vastaa parhaiten näitä peittoja 82 %:n pituuspeitolla ja 55 % sivupeitolla. Kuitenkin Taulukosta 8 nähdään, että Bendig ym. (2015b, 2014a, 2013) on käyttänyt korkeampia pituuspeittoja ja Turner ym. (2012) sekä Lucieer ym. (2014b) on käyttänyt korkeampia sivupeittoja Photoscanilla erinomaisin lopputuloksien (Taulukko 9). Täten blokkivariaatiolla ”1) kaikki lentolinjat” voidaan olettaa tulevan parhaat ratkaisut FPI-blokeista.

Blokkivariaatioiden ”3) joka toinen lentolinja”, ”4) joka toinen lentolinja/ei päätyjä/poikittaislinja”, ”5) joka toinen lentolinja/ei päätyjä” ja ”6) joka toinen lentolinja/joka toinen kuvakuutio/poikittaislinja” jonojen pituus- ja sivupeitot ovat kaikilla samat (Taulukko 20), mutta blokkia ”3)” on tuettu sen lisäksi jonojen päädyissä olevilla kuvilla, blokkia ”4)” on tuettu poikittaislinjalla, blokkia ”6)” on tuettu päädyissä olevilla kuvilla sekä poikittaislinjalla ja blokkia ”5)” ei ole tuettu kummallakaan edellä mainituista (Kuva 14). Blokeilla ”7) joka toinen lentolinja/ei päätyjä/joka toinen kuva kuutio” ja ”8) joka toinen lentolinja/joka toinen kuvakuutio” on myös toisiaan vastaavat jonojen pituus- ja sivupeitot, mutta blokkia ”7)” on tuettu sen lisäksi poikittaislinjalla ja blokkia ”8)” on tuettu päädyissä olevilla kuvilla (Kuva 14).



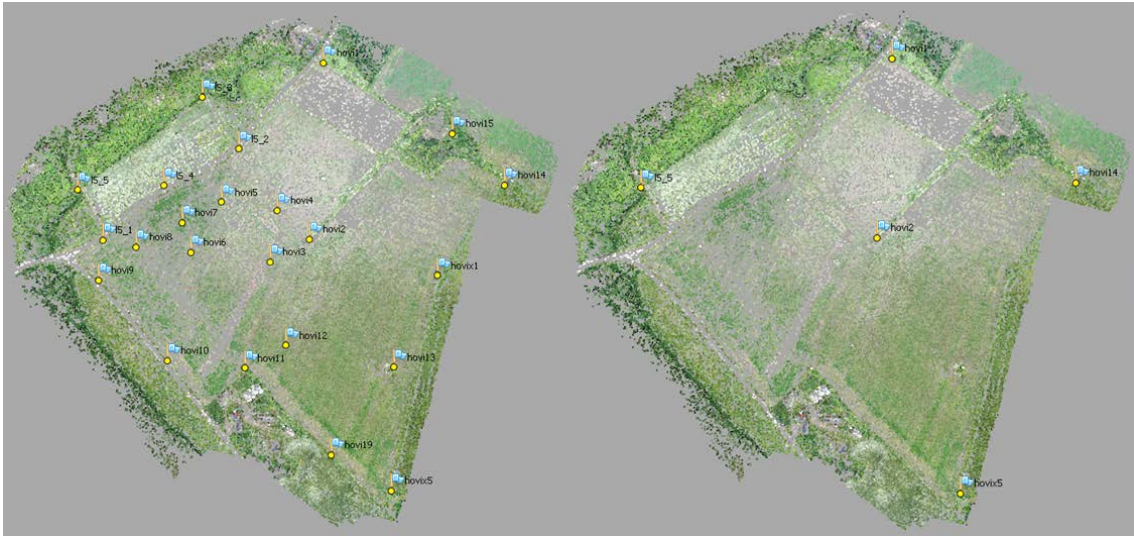
Kuva 14 Mustilan FPI-aineistojen 8 eri variaatiota vasemmalta oikealle: 1) kaikki lentolinjat 2) kaikki lentolinjat ja jokatoinen kuutio 3) jokatoinen lentolinja 4) jokatoinen lentolinja/ei päätyjä/poikittaislinja 5) jokatoinen lentolinja/ei päätyjä 6) jokatoinen lentolinja/jokatoinen kuutio/poikittaislinja 7) jokatoinen lentolinja/ei päätyjä/jokatoinen kuutio 8) jokatoinen lentolinja/jokatoinen kuutio.

Taulukko 19 Mustilan 8 eri FPI-kuvablokin pituus- ja sivupeitot. Kuvapeittoihiin ei ole laskettu mukaan päätyjen tai poikittaislinjan tuomaa lisäpeittoa.

	Pituuspeitto (%)	Sivupeitto (%)
1) kaikki lentolinjat	91	55
2) kaikki lentolinjat ja joka toinen kuutio	82	55
3) joka toinen lentolinja	91	12
4) joka toinen lentolinja/ei päätyjä/poikittaislinja	91	12
5) joka toinen lentolinja/ei päätyjä	91	12
6) joka toinen lentolinja/joka toinen kuutio/poikittaislinja	91	12
7) joka toinen lentolinja/ei päätyjä/joka toinen kuutio	82	12
8) joka toinen lentolinja/joka toinen kuutio	82	12

Vihdin lentojen 4 ja 5 FPI- ja RGB-kuvilla tutkittiin, kuinka eri GCP:iden variaatioilla ja kuvien tunnetuilla sijainneilla (lyhennetty blokkirakenteissa ”gps”) prosessoidut blokkirakenteet eroavat toisistaan. Tätä tarkastelua varten FPI- ja RGB-kuvat jaettiin viiteen eri blokkirakenteeseen: 1) kaikki GCP:t, 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:tä 4) 5 GCP:tä ja GPS 5) GPS. Blokkivariaatioissa ”1)” ja ”2)” käytettiin kaikkia alueella olevia 23 GCP:itä ja blokkivariaatioihin ”3)” ja ”4)” viisi GCP:tä valikoitiin niin, että jokaiseen nurkkaan ja keskelle tuli yksi GCP (Kuva 15). Blokkivariaatiot ”3)” ja ”4)” edustavat tyypillistä kaukokartoitussovellusta ja blokit ”1)” ja ”4)” edustavat erityistä tarkkuutta vaativia kaukokartoitussovelluksia. Blokkivariaatioissa ”5)”, jossa siis käytettiin pelkkiä jälkilaskettuja kuvien sijaintitietoja, tutkitaan suoran georeferoinnin tarkkuutta.

Sädekimpputasoituksen jälkeen harvasta pistepilvestä on karsittu Photoscanin automaattisella työkalulla Mustilan FPI-blokeilta kaikki pisteet, joiden RMS residuaali-arvo on suurempi kuin 0,35 ja kaikki pisteet, joiden epävarmuus taso on suurempi kuin 40. Mustilan RGB-blokeilta poistettiin kaikki pisteet, joiden RMS residuaali-arvo on suurempi kuin 2,0 ja kaikki pisteet, joiden epävarmuus taso on suurempi kuin 85. Vihdin FPI-blokeilta poistettiin kaikki pisteet, joiden RMS residuaali-arvo on suurempi kuin 0,35 ja kaikki pisteet, joiden epävarmuustaso on suurempi kuin 25. Vihdin RGB-blokeilta poistettiin kaikki pisteet, joiden RMS residuaali-arvo on suurempi kuin 0,75 ja kaikki pisteet, joiden epävarmuus taso on suurempi kuin 30. Tämä toistettiin iteroimalla 5 kertaa jokaisen blokin kohdalla niin, että pisteiden poistojen jälkeen toteutettiin aina uusi sädekimpputasoitus.



Kuva 15 Vihdin lentojen 4 ja 5 RGB-blokkien harvat pistepilvet ja GCP:t. Vasemmalla kaikki blokkivariaatioissa "1)" ja "2)" käytetyt kaikki GCP:t ja oikealla blokkivariaatioissa "2)" ja "3)" käytetyt 5 GCP:tä.

4.2.2 Tiheän pistepilven laskeminen

Photoscanissa tiheän pistepilven rakentaminen on jaettu kahteen osaan: syvyyskarttojen (engl. depth maps) luomiseen ja tiheän pistepilven (engl. dense point cloud) laskentaan. Ensimmäisessä vaiheessa Photoscan arvioi syvyyskartan, eli tässä tapauksessa kuvaparien etäisyyden eron kamerasta kohteen pintaan, jokaiselle kuvaparille. Tämä tehdään lähes jokaiselle pikselille kaikilta kuvilta. Nämä syvyyskartat yhdistetään kokonaiseksi syvyyskartaksi alueesta. Syvyyskarttojen luomisessa Photoscan hyödyntää variaatiota Semi-globaalista yhteensovitus algoritmista (engl. Semi-global matching) (AgiSoft, 2016).

Photoscanissa voidaan valita eri kuvien laatuasetuksia ja syvyyskarttojen suodatusasetuksia tiheän pistepilven laskennassa (Taulukko 20). Suodatusmenetelmillä poistetaan harhapisteteet (engl. outliers), joita esiintyy paljon esimerkiksi kohinallisilla tai huonosti fokusoiduilla kuvilla. Laatuasetusta vaihtamalla korkeammaksi saadaan tuotettua tiheämpää ja tarkempaa pistepilveä, mutta pistepilven prosessointiaika kasvaa huomattavasti (AgiSoft, 2016). Näin ollen ajankäytön optimoimiseksi sovellukselle sopivaksi tulee tietää, kuinka tarkkaa ja tiheää pistepilveä tarvitsee. Pistepilven luontiin kuluvaan aikaan vaikuttavat laatuasetusten lisäksi merkittävästi myös kuvien koko, kuvien määrä ja tietokoneen prosessorin ja näytön tehon tehot (AgiSoft, 2016).

Taulukko 20 Tiheän pistepilven kuvien laatuasetukset sekä syvyyskarttojen suodatusasetukset ja niiden selitykset.

Kuvien laatuasetukset:	Merkitys
"Ultrahigh"	Kuvat käsitellään alkuperäisen kokoisina
"High"	Kuvat käsitellään 1/2 kokoisina alkuperäiseen kokoon nähden
"Medium"	Kuvat käsitellään 1/4 kokoisina alkuperäiseen kokoon nähden
"Low"	Kuvat käsitellään 1/6 kokoisina alkuperäiseen kokoon nähden
"lowest"	Kuvat käsitellään 1/8 kokoisina alkuperäiseen kokoon nähden
Syvyyskarttojen suodatusasetukset:	
"Disabled"	Ei suodata mitään pisteitä pois. Tätä ei suositella, koska tällä asetuksella tiheä pistepilvi saattaa olla erittäin kohinainen.
"Mild"	Säilyttää kuvilla olevat pienetkin kohteet niin, että ne mallinnetaan spatiaalisesti oikein. Suositellaan käytettäväksi myös ilmakuvausissa, esimerkiksi alueella, joka sisältää niukasti teksturoituja kattoja. Poistaa osan harhapisteistä.
"Moderate"	Tuottaa tuloksia "Mild" ja "Aggressive" suodatusasetusten väliltä.
"Aggressive"	Suodattaa pois suurimman osan harhapisteistä, mutta poistaa myös kuvilla olevat pienet kohteet. Tätä asetusta suositellaan käytettäväksi valtaosassa ilmakuvausprojekteja.

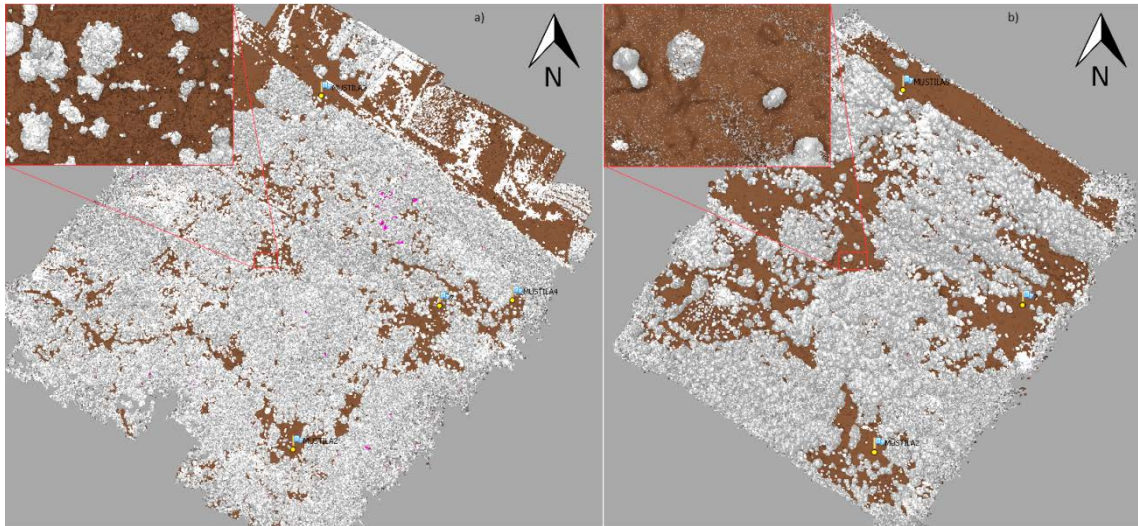
Tässä tutkimuksessa kokeiltiin Mustilan ja Vihdin kuville eri tiheän pistepilven laatuasetuksia sekä syvyyskarttojen suodatusasetuksia, minkä perusteella valikoitiin prosessoinneille parhaiten toimivat asetukset. Mustilan FPI- ja RGB- sekä Vihdin RGB-kuvien prosessointiin käytettiin ”High” laatuasetusta. Vihdin FPI-kuvat prosessoitiin ”Ultrahigh” laatuasetuksella. Nämä laatuasetukset valittiin siten, että saatiin mahdollisimman tarkat lopputulokset, kuitenkin niin, että prosessointiin kulunut aika ei ollut kohtuuton.

4.2.3 Korkeusmallien (DSM/DTM) muodostaminen

Ennen DTM:n muodostamista Photoscanissa suoritettiin tiheän pistepilven pisteille automaattinen maanpintaluokittelu, jossa pisteet luokitellaan kolmeen luokkaan: maanpinnan pisteet, kohinaiset pisteet ja muut pisteet. Luokittelu sisältää kaksi vaihetta, joista ensimmäisessä vaiheessa tiheä pistepilvi jaetaan tasaiseksi gridiksi, jonka solukoko määritetään aineiston perusteella. Solukoko tulee valita tarpeeksi isoksi, jotta jokaisen solun alueelta löytyy vähintään yksi maanpinnan piste. Esimerkiksi, jos alueen suurin rakennus on kooltaan 10 m x 10 m, niin solukoon tulee olla tätä suurempi. Tämän jälkeen jokaisen solun alueella olevista tiheän pistepilven pisteistä alhaisin piste tunnustetaan. Näiden tunnustettujen pisteiden kolmiointi antaa ensimmäisen approksimaation maanpinnan mallille. Toisessa vaiheessa uusia pisteitä lisätään maanpinta luokkaan sen perusteella, että piste täyttää kaksi kriteeriä: 1) piste sijaitsee tietyllä etäisyydellä maanpinnan mallista sekä 2) maanpinnan mallin ja pisteen väliin jäävän viivan kulma on määrättyä kulmaa pienempi. Toinen vaihe toistetaan, niin kauan kuin uusia testattavia pisteitä riittää eli kunnes on käyty läpi kaikki tiheän pistepilven pisteet. Kriteeri ”1)” eli maksimietäisyys (engl. Max distance) on arvio maan korkeuden maksimivaihteluista alueella. Kriteeriksi ”2)” eli maksimikulmaksi (engl. Max angle) Photoscan suosittelee käytettävän tasaisilla alueilla vakiona olevaa 15°, ja korkeampaa arvoa, jos maanpinta sisältää jyrkkiä rinteitä tai mäkiä.

Mustilan ja Vihdin FPI- ja RGB-kuville tehtiin useita testejä eri parametrien arvoilla, joista visuaalisesti ja MML:n laserpistepilvestä tuotettuun DTM:ään vertaamalla valittiin parhaat

parametrit maanpinnan luokittelua varten. Mustilan FPI- ja RGB-kuville valittiin solukooksi 25 m, maksimietäisyydeksi 0,5 m ja maksimikulmaksi 15° (Kuva 16). Solukoko oli näinkin suuri, koska tiheän metsän alueella maanpinnan pisteitä oli hyvin rajallinen määrä. Vaikka 15° maksimikulmaa suositellaan tasaisille alueille käytettäväksi toimi se myös parhaiten Mustilan blokeille. Tämä johtui siitä, että Mustilan maastossa ei ole jyrkkiä mäki, vaan se nousee suhteellisen tasaisesti etelään päin mentäessä. Vihdin FPI-kuville solukooksi valittiin 5 m, maksimietäisyydeksi 0,05 m ja maksimikulmaksi 3°. Vihdin RGB-kuville valittiin solukooksi myös 5 m, maksimietäisyydeksi 0,03 m ja maksimikulmaksi 0° (Kuva 17).



Kuva 16 Mustilan aineistoille toteutetun automaattisen maanpintaluokittelun tulokset, jossa maanpinnan pisteet ruskealla, kohinaiset pisteet pinkillä ja muut pisteet valkoisella. Kuvassa a) Mustilan RGB-blokki ja b) Mustilan FPI blokkivariaatio ”1)gps+gcp”.



Kuva 17 Vihdin RGB- ja FPI-blokeille, joissa gps ja gcp tuki, toteutetun automaattisen maanpintaluokittelun tulokset, jossa maanpinnan pisteet ruskealla, kohinaiset pisteet pinkillä ja muut pisteet valkoisella. Kuvassa a) Vihdin RGB-blokki ja b) Vihdin FPI-blokki.

Tämän jälkeen generoitiin grid DSM. DSM esittää alueen pintamallia korkeuden arvojen säännöllisenä gridinä. Se voidaan Photoscanissa rasteroida joko tiheästä pistepilvestä, harvasta pistepilvestä tai polygoniverkosta eli meshistä. Kaikista parhaaseen korkeustarkkuuteen päästään, kun lasketaan DSM:n käyttäen tiheän pistepilven pisteitä. DSM lasketaan luomalla säännöllinen gridi tarkasteltavalle alueelle ja interpoloimalla tai ekstrapoloimalla

tiheän pistepilven pisteistä jokaiselle gridin solulle korkeustieto. Kaikkille Vihdin ja Mustilan blokeille laskettiin DSM:t käyttämällä kaikkia tiheän pistepilven pisteitä ja interpolointia. Samalla menetelmällä laskettiin myös DTM:t käyttämällä laskennassa pelkkiä tiheän pistepilven luokiteltuja maanpinnan pisteitä ja interpolointia. Lisäksi DSM:ä käyttämällä Photoscanilla laskettiin jokaiselle blokille ortomosaiikit.

Saadut korkeusmallit tulostettiin Photoscanista ulos tekstitiedostona xyz-tiedostoformaattissa, joka sisältää jokaisella rivillä yhden gridin solun itäisen ja pohjoisen sijaintitiedon ETRS-TM35FIN-koordinaattijärjestelmässä sekä korkeustiedon N2000-korkeusjärjestelmässä. FPI-kuvista tuotetut korkeusmallit tulostettiin 0,15 m:n resoluutiolla ja RGB-korkeusmallit 0,10 m:n resoluutiolla. Näitä käytettiin myöhemmin korkeusvirheiden määrittämisessä MATLABILLA ja QGIS:lla sekä CHM:n laskennassa QGIS-ohjelmalla. Ortomosaiikit tulostettiin georeferoituina tiff-kuvina ETRS-TM35FIN-koordinaattijärjestelmässä. Niitä käytettiin X- ja Y-koordinaattivirheiden määrittämisessä QGIS:lla.

Kasvillisuuden korkeusmalli (CHM) laskettiin Vihdin alueelta kolmella eri tavalla: 1) heinäkuun RGB-kuvablokin DSM:stä vähennettiin heinäkuun RGB-kuvablokin DTM:ä (Kuva 24a), 2) heinäkuun RGB-kuvablokin DSM:stä vähennettiin toukokuun RGB-kuvablokista vastaavasti tuotettu DSM (Kuva 24b). 3) heinäkuun FPI-kuvablokista tuotetusta DSM:stä vähennettiin heinäkuun FPI-kuvablokista tuotettu DTM (Kuva 24c). Kaikissa tapauksissa kuvablokit oli tuettu kuvien tunnetuilla sijainneilla ja kaikilla GCP:illä. Näistä CHM:stä laskettiin kasvuston korkeudet (PH_{CHM1} , PH_{CHM2} , PH_{CHM3}) käyttämällä näytteenotto-ruutujen korkeuksien keskiarvoa. Lisäksi PH_{CHM1} määritettiin myös käyttämällä näytteenotto-ruutujen korkeuksien maksimi- ja minimiarvoa.

MML:n laserpistepilvestä muodostettiin DSM ja DTM kustomoidulla MATLAB-koodilla. Ensin muodostetaan säännölliset gridit vastaamaan Mustilan ja Vihdin fotogrammetrisesti tuotettujen korkeusmallien X- ja Y-koordinaatteja. Tämän jälkeen gridin jokaiselle solulle interpoloidaan korkeustieto laserpistepilven pisteiltä. DSM:n laskennassa käytettiin kaikkia laserpistepilven pisteitä ja DTM:n laskennassa käytettiin vain maanpintaluokan pisteitä. Maanpintaluokan pisteet ovat alin pinta, joka ilmasta käsin on havaittavissa laserkeilaimella. Ne on luokiteltu automaattisesti kaikkien pisteiden joukosta ja luokittelutulos on tarkistettu ja jatkoluokiteltu interaktiivisesti ilmakuvastereomallien avulla (MML, 2016c). Näitä MML:n laserpistepilvistä tuotettuja pintamalleja käytettiin referenssinä tutkittaessa fotogrammetrisesti tuotettujen korkeusmallien tarkkuuksia.

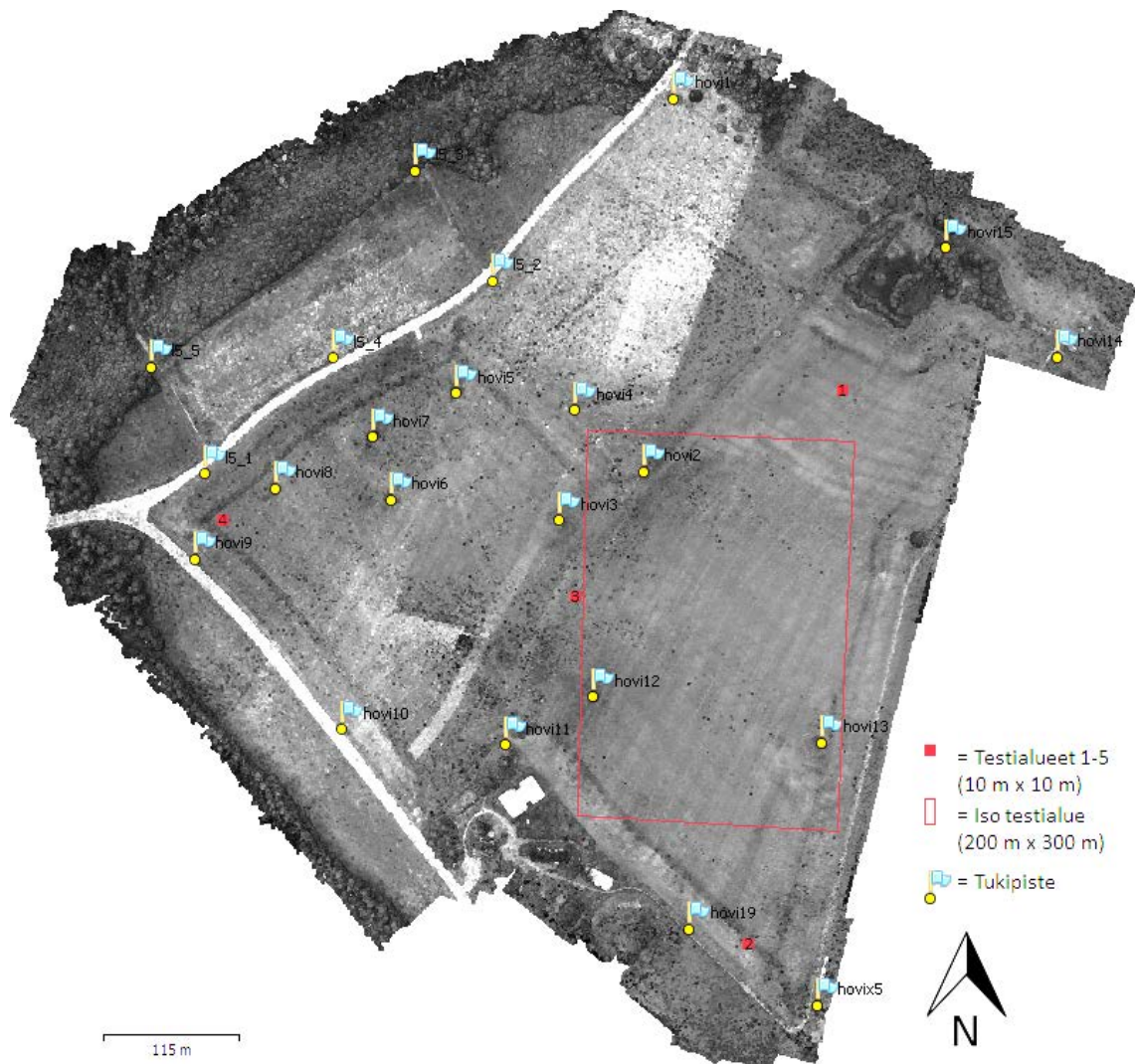
4.3 Virheen mittaus

Vihdin kuvausalueella mitattiin 23 GCP:tä, joista osa toimi myös tarkastuspisteinä eri blokkivariaatioissa: 1) kaikki GCP:t, 2) kaikki GCP:t ja gps, 3) 5 GCP:tä, 4) 5 GCP:tä ja gps ja 5) gps. Blokkivariaatioissa ”3)” ja ”4)” loput GCP:t toimivat tarkastuspisteinä ja blokkivariaatioissa ”5)” kaikki GCP:t toimivat tarkastuspisteinä blokkien sisäisen geometrian tarkkuuden mittauksessa. Blokkivariaatioissa ”1)” ja ”2)” käytettiin ”leave-one-out” menetelmää blokkien sisäisen geometrian tarkkuuden mittauksessa. ”Leave-one-out” menetelmässä jokainen GCP jätettiin vuorollaan tarkastuspisteeksi toteuttamalla blokille sädekimpputasoitus ilman sitä. Tarkastuspisteille määritettiin niiden X-, Y- ja Z-koordinaattivirheet (kaava 4), joista laskettiin koordinaattikeskivirheet (kaava 9) ja 3D-keskivirhe (kaava 11).

Mustilassa ei ollut riittävästi GCP:itä sisäisen geometrian tarkkuuden mittausta varten, minkä vuoksi Mustilan RGB-blokin DSM:ä ja DTM:ä vertailtiin MML:n laserkeilauspistepilvestä muodostettuun DSM:ään ja DTM:ään. Testaus toteutettiin kustomoidulla MATLAB-koodilla, jossa fotogrammetriset DSM:t ja DTM:t vähennettiin MML:n laserkeilaus DSM:stä ja DTM:stä. Näiden erotuksista muodostettiin visuaalinen esitys, jossa korkeuserot esitettiin väriskaaloilla. RGB-blokkivariaation pistepilveä verrattiin MML:n laserkeilaus pistepilveen X- ja Y-tasoissa (Liite 6). Tässä tutkittiin, että onko RGB-blokki deformoitunut tai kallellaan johonkin suuntaan. Tämän perusteella Mustilan RGB-blokkia käytettiin selvittäessä parasta FPI-blokkia (Liite 6). Paras FPI-blokki valittiin referenssiksi muille FPI-blokeille tarkkuusmittaukseen. Myös Vihdin RGB- ja FPI-blokeja verrattiin visuaalisesti toisiinsa ja näiden absoluuttiset tarkkuudet määritettiin tukipisteiden avulla. Tulosten perusteella tarkin DSM ja DTM valittiin referenssiksi Vihdin muille blokeille.

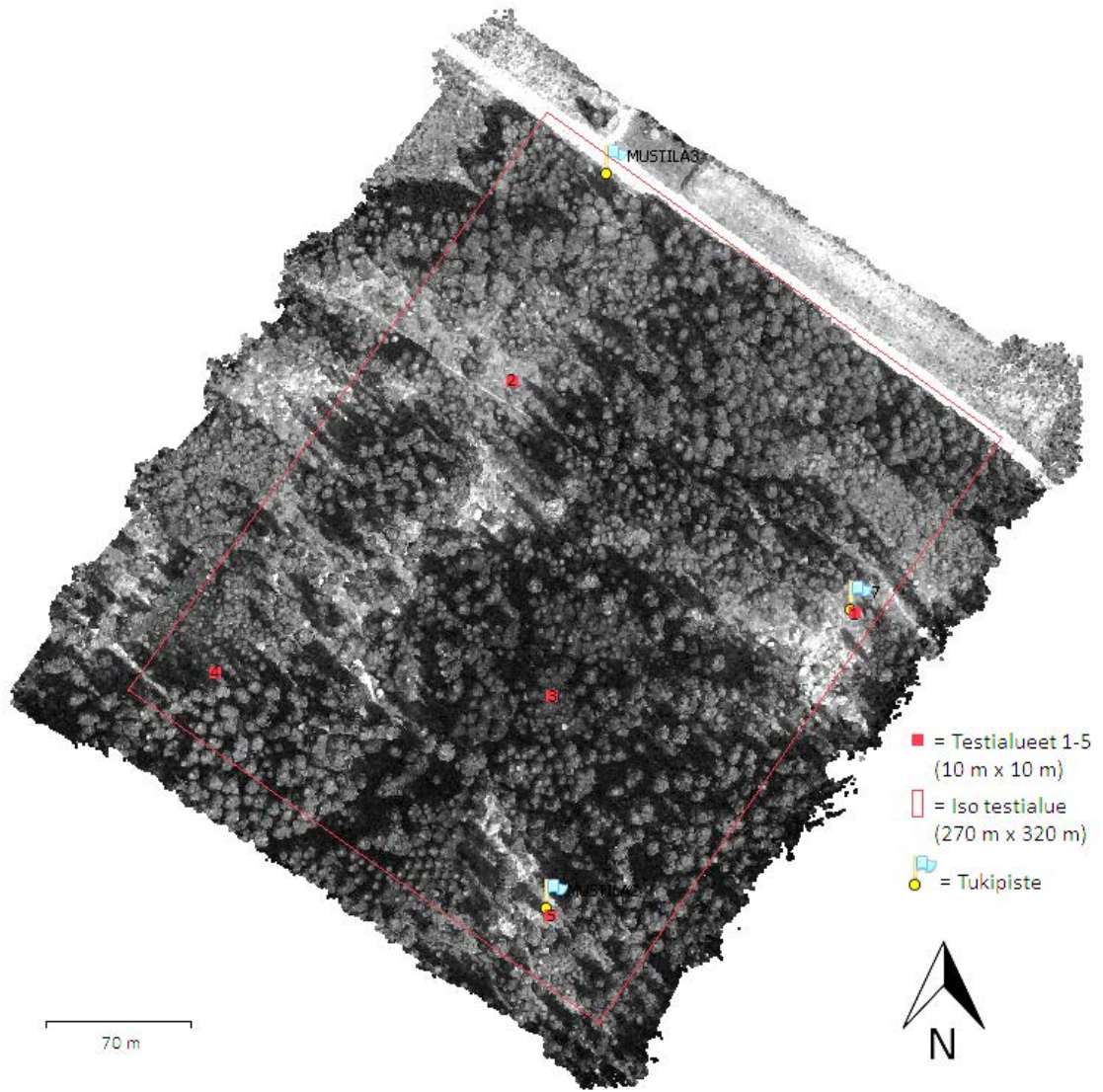
Vihdin tapauksessa RGB-blokkivariaatio ”2) kaikki GCP:t ja gps” valikoitui parhaaksi. Tätä käytettiin referenssinä selvittääkseen kuinka tarkkoja loput RGB- ja FPI-blokkien korkeusmallit olivat. Vertailua varten jokaisen RGB-blokin korkeusmallit tulostettiin ulos Photoscanista XYZ-tiedostoformaattissa 0,10 m:n resoluutiolla ja FPI-blokkien korkeusmallit 0,15 m:n resoluutiolla. Tämän jälkeen korkeusmallit siirrettiin MATLAB:iin, jossa kustomoidulla koodilla kaikkien eri blokkiratkaisujen pintamalleista muodostettiin referenssin kanssa yhtäläiset gridit. Referenssigridistä vähennettiin erikseen jokaisen RGB- ja FPI-blokkien DSM:ää ja DTM:ää vastaavat gridit. Näitä erotuksia tutkittiin Kuvan 18 neljällä 10 m x 10 m alueella ja yhdellä isommalla 200 m:n x 300 m:n alueella. Näiltä alueilta laskettiin erotuksien korkeuksien koordinaattikeskivirhe (kaava 9), keskihajonta (kaava 8), minimiarvo, maksimiarvo, keskiarvo ja mediaani.

Lisäksi Vihti 4 ja 5 lentojen eri pituuspeitoilla (82 %, 88%, 94%) tuotettujen ortomosaiikien X- ja Y-koordinaattien ja DSM:n Z-koordinaattien absoluuttinen tarkkuus määriteltiin blokista ”3) 5 GCP:tä”. Ortomosaiikkien tarkkuusmittaus toteutettiin QGIS määrittämällä ortomosaiikeista 18 tarkistuspisteen sijainnit ja vertaamalla näitä RTK-GPS:llä laskettuihin todellisiin sijainteihin. Vastaavasti verrattiin DSM:n korkeuksia näiden tarkispisteiden todellisiin korkeuksiin QGIS:lla. Blokin ”5) gps” ortomosaiikin ja DSM:n tarkkuudet määritettiin myös vastaavalla menetelmällä käyttämällä kaikkia 23 GCP:tä tarkistuspisteinä.



Kuva 18 Vihdin FPI-kuvien tiheä pistepilvi, johon on merkitty GCP:t sekä tarkkuusmittauksiin valitut pienet testialueet (1-4) ja iso testialue.

Mustilan kaikki FPI-blokkivariaatioiden DSM:t ja DTM:t vähennettiin RGB-blokin DSM:stä ja DTM:stä ja näistä laskettiin erotuskuvat, kuten Vihdin tapauksessa. Näitä erotuksia tutkittiin Kuvan 19 viidellä 10 m x 10 m alueella ja yhdellä isolla 270 m x 320 m alueella, joka kattoi koko alueen reunoja lukuun ottamatta. Reuna-alueet jätettiin laskennasta pois, koska niissä tunnetusti tavataan suurimmat deformaatiot (Bendig, 2015a). Näiltä alueilta laskettiin erotuksien korkeuksien koordinaattikeskivirhe (kaava 9), keskihajonta (kaava 8), minimiarvo, maksimiarvo, keskiarvo ja mediaani.



Kuva 19 Mustilan FPI-kuvien tiheä pistepilvi, johon on merkitty GCP:t sekä tarkkuusmittauksiin valitut pienet testialueet (1-5) ja iso testialue.

5 Tulokset

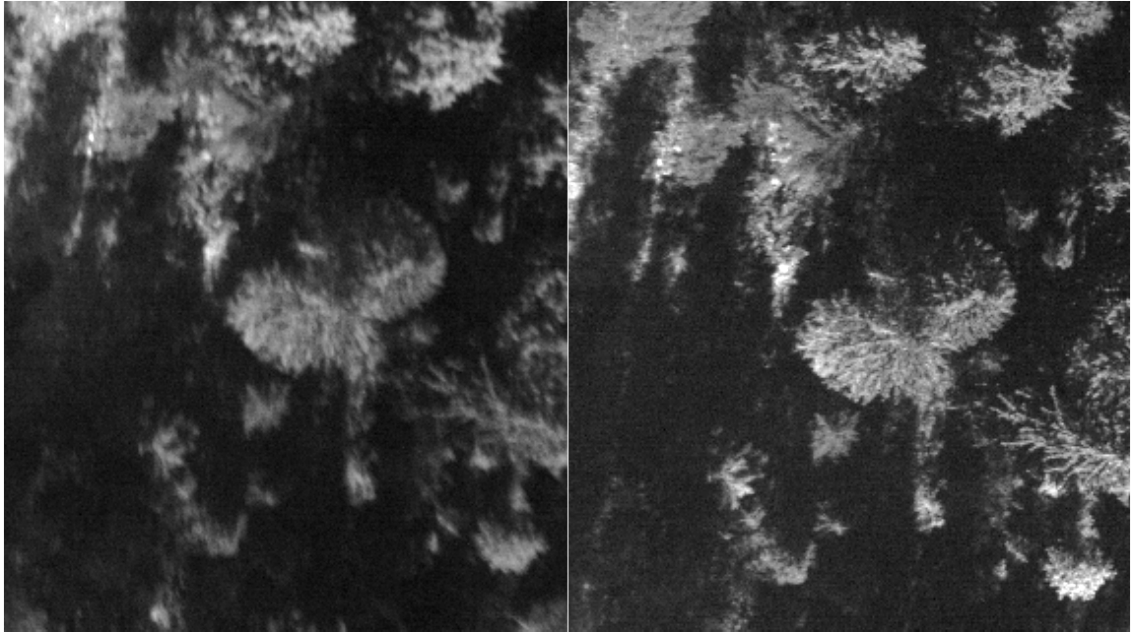
5.1 Kuvausten laatu

Pääsääntöisesti kaikki lennot suoritettiin joko tasaisella pilvipeitteellä tai tasaisen auringon sääolosuhteiden vallitessa. Tämä takasi lentojen sisällä tasaisen kuvien laadun keskenään tarkasteltaessa. Kuitenkin eri lentojen välillä, etenkin FPI-kuvien tapauksessa, on havaittavissa eri valotusten ja eri valaistusolojen takia eroja kuvien kirkkaudessa. Vihdin 4 ja 5 lentojen välillä oli 3 tunnin aikaero, ja täten myös auringon atsimuuttissa ja –korkeudessa oli huomattavat erot (Taulukko 14). Valaistuksen muuttuessa kuvausten välillä myös varjot muuttuvat, joiden liikkuminen tunnetusti vaikeuttaa kuvasovitusta. Tämä on nähtävissä Vihdin 4 ja 5 lentojen FPI-blokkien välillä kuvausalueen pohjoisosan keskellä kohdassa, jossa vierekkäiset jonot ovat eri lennoilta. Kuvasta 18 nähdään, että näiden lentojen tiheän pistepilven laatu oli selkeästi huonompaa kuin muiden lentojen. Kahden eri lennon vierekkäisten linjojen liitoskohdassa on havaittavissa myös aukko maanpinnassa kuvausalueen lounaisosassa (Kuva 18). Tämä johtui mm. siitä, että keskinäisiä liitospisiteitä ei ole löytynyt riittävästi kahden eri lennon kuvien väliltä. Vastaavia ongelmia ei esiintynyt samassa määrin RGB-kuvilla, koska RGB-kamerassa on automaattinen valotuksensäätö, joka takaa tasalaatuiset kuvat eri valotusolosuhteiden vallitessa. Kuitenkin varjojen liikkuminen aiheuttaa aina häiriötä.

Mustilan blokeissa kaikki kuvat olivat yhdeltä lennolta ja lennon aikana vallitsi pilvetön aurinkoinen taivas, mikä johti valotukseltaan tasalaatuisiin kuviin. Mustilan lennolla RGB-kamera ei ottanut kuvia tasaisin väliajoin, mikä johti lyhyisiin aukkoihin lentojonoissa (Kuva 8). Tämä johtui mahdollisesti siitä, että RGB-kameran ja tietokoneen tai tietokoneen ja GPS-vastaanottimen välinen datalinkki ei toiminut oikein. Peitot olivat kuitenkin riittävät RGB-kuvilla koko alueella, koska lennon peittoprosentit oli suunniteltu kapeakulmaisemman Rikola Proto2 kameran mukaan.

5.2 Kuvien laatu

Mustilan lennon Rikola Proto2 kameran sensorin 1 kanavien 22 ja 23 kuvat olivat terävyydeltään hyvänlaatuisia. Sensorin 2 kanavien 9 ja 10 kuvat olivat selkeästi epäteräviä ja ne sisälsivät sumeutta (engl. blur) enemmän kuin sensorin 1 kanavien kuvat (Kuva 20). Tämä johtui osiltaan siitä, että kyseinen FPI-kamera oli vasta testikäytössä ja sen sensorin 2 fokus ei ollut vielä säädetty oikein. Kanavien 9 ja 10 kuvat olivat sensorin 2 kanavien kuvista terävimmät, minkä vuoksi ne valittiin geometriseen prosessointiin. Sensorin 2 kanavat oltaisiin voitu jättää geometrisestä prosessoinnista kokonaan pois ja näin saatu luultavasti vieläkin laadukkaampia tuloksia. Kuitenkin, jotta luvussa 4.1.3 esitelty kanavasovitus voidaan toteuttaa mahdollisimman tarkasti, tuli molemmilta sensoreilta ratkaista referenssi-kanavat. Rikola Proto2 kameran sensorin 2 kanavien 9 ja 10 kuvat ovat myös hieman tummempia kuin sensorin 1 kanavien 22 ja 23 kuvat. Kanava 9 (490 nm) ja 10 (500 nm) aallonpituudet sijoittuvat vihreän valon alueelle, kun taas kanavien 22 (647 nm) ja 23 (657 nm) kanavat sijoittuvat punaisen valon alueelle (Taulukko 17). Punaisen valon alueella maanpinnan reflektanssi on vihreän valon aluetta suurempi, kun taas kasvillisuuden reflektanssi on suurempi vihreän valon alueella. Suurin syy sensoreiden välisten kanavien kirkkauseroon onkin luultavimmin edellä esitelty sensorin 2 fokusointi ongelma, jonka vuoksi kuvien sävykykyys on kärsinyt.



Kuva 20 Vasemmalla kuvassa Rikola Proto2 sensorin 2 kanavan 9 kuva ja oikealla sensorin 1 kanavan 22 kuva. Sensorin 2 kuva on terävyydeltään pehmeämpi kuin sensorin 1 kuva. Kuvista näkee myös eri kanavien välillä olevan aikaeron, vaikka näiden kahden kanavan aikaero onkin vain noin 0.2 sekuntia.



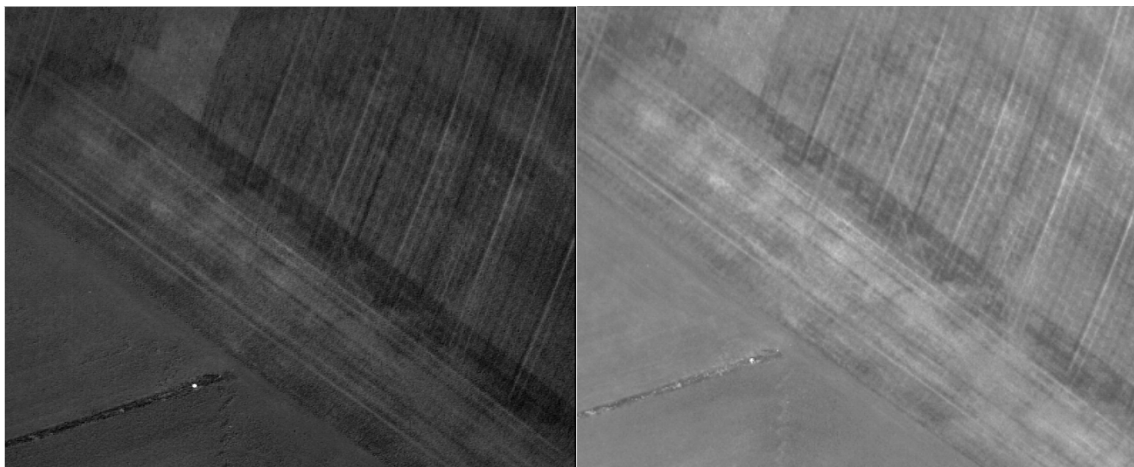
Kuva 21 Oikealla Vihdin toukokuun lennolta GCP kuvan keskellä ja vasemmalla samalta lennolta sama GCP toisen kuvan reunalla. Oikean puoleisesta kuvasta nähdään, että se on terävämpi kuin vasemmanpuoleinen kuva.

Vihdin heinäkuun lentojen FPI 2012b kameran eri irrotettujen kanavien keskinäisillä sävykkyyseroilla oli negatiivinen vaikutus kuvablokin tiheän pistepilven laskentaan (Kuva 18). Kanavan 3 kuvien sävykkyys poikkesi eniten kahdesta muusta kanavasta ja se sisältsi myös eniten kohinaa. Tämän vuoksi siltä löytyi huomattavasti vähemmän liitospisteitä kahden muun kanavan kanssa. Kanava 3 (1,05 s) on FPI-kameran keskimmäisiä valotettavia kanavia (Taulukko 17), täten jättämällä tämän georeferoinnista pois voitaisiin mahdollisesti saada parempia tuloksia kuvasovituksessa. Kanava 3 (1,05 s) voitaisiin myös korvata jollain kanavalla kanavan 14 (0,075 s) ja kanavan 11 (1,725 s) väliltä. Terävyydeltään FPI 2012b kameran eri kanavien kuvat olivat kuitenkin tasalaatuisia. Näissä ei ole havaittavissa samanlaista epäterävyyttä, kuin Rikola Proto2 sensorin 2 kuvien kohdalla, mutta ne olivat silti hieman epäterävämpiä kuin Rikola Proto2 sensorin 1 kuvat. Tämä johtuu siitä, että uudemmassa Rikola Proto2 kameran sensoreissa on mm. parempi dynaamiikka kuin

FPI 2012b kameran sensorissa. Kuvasta 11 nähdään, että myös FPI 2012b kanavista 3 (520 nm) on tummempi kuin kanava 11 (596 nm) ja kanava 14 (625 nm). Tummuuserot johtuvat sensorin eri kanavien herkkyseroista (Taulukko 17).

RGB-kameroiden kuvat ovat sävykkyydeltään tasalaatuisia kameroissa olevan automaattisen valotuksen säädön ansiosta. Samsung NX300 kuvat ovat teräviä kuvan keskeltä, mutta reunoille päin mentäessä kuvien terävyys vähenee ja reunat ovat selkeästi sumeampia kuin keskus (Kuva 3). Samsung NX500 kuvat ovat erittäin teräviä kuvan keskeltä, mutta myös siinä reunoille päin mentäessä terävyyttä katoaa ja reunat ovat hieman sumeammat kuin keskus (Kuva 3). Molemmilla kameroilla käytettiin samaa Samsung:n 16mm f2.4 linssiä, joka on hyvin valovoimainen ja tarkka keskeltä kuvaa, mutta aiheuttaa reuna-alueille sumeutta (Everglade, 2015). Kuitenkin NX500 lisättyjen pikseleiden ja poistetun ”Anti-Aliasing” suodattimen ansiosta terävyyden katoaminen reunoille päin mentäessä on vähäisempää kuin NX300:lla. Myös stabilaattorin lisääminen Mustilan kuvausten jälkeen auttoi terävämpien kuvien ottamisessa. Lisäksi stabilaattori laski kameroita alemmas ja poisti näin kopterin jalkojen näkymisen kuvilla (Kuva 3). Kaikissa kuvauksissa RGB-kameroiden aukkoluvuksi valittiin f4.0, jolla saavutetaan Samsung 16mm f2.4 linssillä paras suorituskyky (Everglade, 2016).

Reuna-alueiden epäterävyyden vaikutusta kuvablokkien tarkkuuteen voitaisiin testata vertaamalla samanaikaisesti kuvattuja NX500 ja Sony Alpha a7 II kuvablokkeja esimerkiksi Vihdin testialueella. Sony Alpha a7 II on suurempi sensori ja parempi dynaaminen erotuskyky eikä sen kuvien reuna-alueilla esiinny epäterävyyttä.



Kuva 22 Vasemmillä kuvassa FPI 2012b kameran kanavan 3 kuva ja oikealla saman kameran kanavan 14 kuva Vihdin heinäkuun ensimmäiseltä lennolta. Kanavan 3 kuva on huomattavasti tummempi, kuin kanavan 14 kuva.

5.3 Kuvien sijaintitiedon laatu

Mustilan GPS:llä mitatuissa FPI-kuvien sijaintitiedoissa oli korkeuskoordinaateissa suuri koordinaattivirhe. Tämän vuoksi näille tehtiin systemaattisen virheen poisto. Systemaattinen virhe laskettiin FPI-blokkivariaatioilta ”1) gcp+gps” ja ”2) gcp+gps” kuvien korkeuden avulla. Nämä vähennettiin GPS:n lentoradoista jälkilaskemalla määritellyistä kuvien korkeuksista ja niistä laskettiin Kaavan 9 mukaisesti korkeuden koordinaattikeskivirhe. Näiden kahden eri blokkivariaatioista laskettujen koordinaattikeskivirheiden keskiarvosta

saatiin systemaattiseksi virheeksi 7 m. Tämä vähennettiin GPS:n lentoradoista jälkilaskemalla määritellyistä kuvien korkeuksista. Näitä korjattuja kuvien sijaintitietoja käytettiin kaikkissa gps:llä tuetuissa blokeissa. Taulukosta 21 nähdään, että systemaattisen virheen poiston jälkeen Mustilan FPI-kuvien sijaintitietojen koordinaattikeskivirheet (kaava 9) ja 3D-keskivirhe (kaava 10) ovat samaa suuruus luokkaa kuin Vihdin 1, 2 ja 3 lentojen FPI-kuvien. Vihdin lennoilla 4 ja 5 lentojen koordinaattikeskivirheet (kaava 9) ja 3D-keskivirhe (kaava 10) ovat näitä selkeästi parempia.

RGB-kuvien sijaintitietojen koordinaattikeskivirheet (kaava 9) ja 3D-keskivirhe (kaava 10) olivat huomattavasti suuremmat kuin samalla lennolla kerättyjen FPI-kuvien. Tämä johtuu siitä, että RGB-kuvien sijaintitiedot määritetään hieman poikkeavasti kuin FPI-kuvien sijaintitiedot (luku 4.1.5). RGB-kuvien sijaintitiedon tarkkuutta voidaan vielä parantaa mm. selvittämällä entistä tarkemmin pulssien kulkuajan RGB-kameran ja tietokoneen sekä tietokoneen ja GPS-vastaanottimen välillä. Lisäksi systeemille tehtävän ”Lever-arm” korjauksen tarkkuutta parantamalla saadaan RGB-kuvien sijaintitiedot määritettyä yhtä tarkasti kuin FPI-kuvienkin.

Taulukko 21 GPS:llä määritettyjen kuvien sijaintitietojen X-, Y-, Z-koordinaattikeskivirheet (cm) ja 3D-keskivirhe (RMSE, cm) laskettu tukipisteillä määriteltyjen kuvien todellisten sijaintien avulla.

Alue	Kamera	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	RMSE (cm)
Mustila	Rikola Proto2	26,88	20,29	15,52	37,08
	Samsung NX300	-	-	-	-
Vihti123	FPI 2012b	18,37	24,34	18,03	35,43
	Samsung NX500	24,17	84,07	17,19	89,15
Vihti45	FPI 2012b	9,16	7,81	11,01	16,31
	Samsung NX500	31,16	23,41	11,68	40,69

5.4 Peltoreferenssiaineistojen laatu

Näytteenottoruutujen paikannuksen dm-tason X- ja Y-koordinaattivirheet aiheuttavat sen, että näytteenottoruutujen absoluuttista sijaintia ei täysin tunneta. Täten vertailtaessa CHM:ltä mitattuja kasvillisuuden korkeuksia (PH_{CHM123}), referenssi korkeuksiin (PH_{ref}) sekä biomassoihin, tulee nämä koordinaattivirheet ottaa huomioon. Jatkossa näytteenottoruutujen mittaus tulisi tehdä RTK-GPS:llä, jolla X- ja Y-koordinaattivirheet ovat vain 2-3 cm. Näytteenottoruudut voisivat olla myös hieman suuremmat, kuten esimerkiksi Bendig ym. (2015b), jossa käytettiin 1 m x 1 m kokoisia näytteenottoruutuja. Tällöin koordinaattivirheiden vaikutus olisi vähäisempi vertailuja tehtäessä. Useissa nollaruuduissa oli myös rikkakasveja, joita ei ole otettu huomioon kasvuston korkeuksia mitattaessa tai biomassoja kerätessä. Rikkakasvit kuitenkin erottuvat CHM:llä ja aiheuttavat näin virhettä selityksasteihin. Luotettavampien selityksasteiden saamiseksi rikkakasvit tulisi kitkeä nollaruuduista pois.

5.5 Kuvien geometrinen prosessointi

5.5.1 Itsekalibrointi

Taulukossa 22 on esitelty Mustilan RGB-kuville eri parametrejä käyttämällä tehtyjen itsekalibrointi tuloksia ennen sädekimpputasoituksen tekemistä ja Taulukossa 23 on esitelty

vastaavat tulokset sädekimpputasoituksen jälkeen. Lisäksi Liitteessä 1 on esitelty RGB-kameran IOP:t ennen sädekimpputasoitusta ja sädekimpputasoituksen jälkeen.

Taulukosta 22 nähdään, että suurempi ”Key point limit” ja ”Tie point limit” on sitä enemmän harvaan pistepilveen tulee pisteitä. Näiden parametrien arvojen kasvattaminen lisää myös huomattavassa määrin prosessointiin kuluva aikaa. Näitä kasvattamalla myös RMS residuaali-arvo pienenee, mutta toisaalta Taulukosta 23 nähdään, että sädekimpputasoituksen jälkeen kaikilla eri parametriasetuksilla RMS residuaali-arvo on lähes sama. Myös RGB-kameran IOP:t ovat lähes samat sädekimpputasoituksen jälkeen (Liite 1) Kuvaparien esivalinta-asetuksella ”Generic” itsekalibrointi oli jopa kuusi kertaa nopeampi kuin ”Disabled” esivalinta-asetuksella (Taulukko 22). Sillä oli myös vain hieman suurempi RMS residuaali-arvo ennen sädekimpputasoitusta ja sädekimpputasoituksen jälkeen ero pieneni entisestään (Taulukko 22, Taulukko 23). Näin ollen ajansäästön optimoimiseksi paras prosessointivaihtoehto Mustilan RGB-kuvien kohdalla oli ”Key point limit” 40 000, ”Tie point limit” 4000 ja ”Generic” kuvaparien esivalinta-asetus. Tällä saatiin lähes yhtä hyvät tulokset kuin testissä olleilla suurimmilla ”Key point limit” 120 000 ja ”Tie point limit” 0 parametrien asetuksilla, mutta lähes 23 kertaa nopeammin.

Mustilan FPI-kuville toteutettiin samat eri parametrien testit kuin RGB-kuville, mutta niistä kaikista saatiin samat tulokset. Tämä johtui siitä, että FPI-kuvilta ei löytynyt edes Taulukossa 22 esiteltyjen matalimpien asetusten rajoittamaa määrää piirteitä ja liittopisteitä. Näin ollen parametrien rajojen kasvattamisella ei ollut vaikutusta itsekalibroinnin tarkkuuteen tai ajan käyttöön.

Taulukko 22 Mustilan RGB-kuville sovituksessa kokeiltu eri ”Key point limit” ja ”Tie point limit” arvoja. Taulukossa on kuvattu onnistuneesti orientoitujen kuvien määrä, harvan pistepilven pisteiden lukumäärä, projektoiden lukumäärä, kuvien orientointiin ja yhdistämiseen kuluneet ajat ja RMS-residuaaleille ennen sädekimpputasoituksen suorittamista.

Kuvasovitus parametrit (”Key point limit”/”Tie point limit”)	Orientoidut kuvat	Harvan pistepilven pisteitä	Projekti-oita	Sovitukseen kulunut aika	Kameran orientointiparametrien las-kenta	RMS Residuaali (pikseli)
40000/4000	385	177 013	734831	5h 58 min	2 min 41 s	1,283
40000/4000/generic	385	291 236	1 215 109	56 min 32 s	2 min 57 s	1,337
40000/10000	385	663 550	2 181 707	5h 58 min	6 min 4 s	1,167
40000/20000	385	950 017	2 943 263	5 h 59 min	7 min 52 s	1,054
40000/0	385	958 797	2 961 139	5 h 58 min	7 min 19 s	1,054
80000/0	385	1 907 621	5 898 910	14 h 10 min	16 min 30 s	1,056
120000/0	385	2 774 133	8 569 682	22 h 36 min	24 min 51 s	1,025

Taulukko 23 Mustilan RGB-kuvien sädekimpputasoituksen jälkeiset harvojen pistepilvien pisteiden lukumäärä, projektioiden lukumäärä ja RMS-residuaali.

Kuvasovitus parametrit ("Key point limit"/"Tie point limit")	Harvan pistepilven pisteitä	Projektioita	RMS residuaali (pikseli)
40000/4000	101 524	303 882	1,073
40000/4000/generic	170 844	517 224	1,106
40000/10000	409 960	1 163 182	1,041
40000/20000	543 536	1 527 036	0,980
40000/0	543 968	1 524 277	0,975
80000/0	1 083 824	3 055 139	0,965
120000/0	1 572 206	4 435 910	0,924

Mustilan FPI-kuvien blokkivariaatioiden "3)" – "8)" pelkillä gcp:llä tuettujen blokkien eteläisimmän kuvajonon kuvien EOP:n ratkaisemisessa oli ongelmia tai ne puuttuivat kokonaan. Tämä johtui blokkivariaatioiden "3)" – "8)" puutteellisesta sivupeatosta (12 %) sekä GCP:een puuttumisesta alueen lounaskulmasta (Kuva 8). Photoscanissa suoritettiin automaattisen kuvien EOP:n määrittämisen jälkeen yksittäisten tai kuvajoukkojen uusi orientointi, jossa onnistuttiin määrittämään näiden ulkoiset orientoinnit. Kuitenkin uudelleen orientoidessa yksittäisiä kuvia tai muutamien kuvien joukkoja on niiden orientointien tarkkuus useimmiten huonompi kuin koko kuvablokin yhtenäisessä orientoinnissa. Kuvien sijaintitietojen mukana olo paransi huomattavasti tämän ongelmallisen kuvajonon kuvien EOP:n löytymistä, ja täten kuvien sijaintitiedoilla tuettuja blokkivariaatioita ei jouduttu uudelleen orientoimaan. Liitteestä 2 nähdään, että etenkin harvemmillä peitoilla tuotettujen blokkivariaatioiden kameran IOP:t vaihtelivat huomattavasti referenssi blokista eli "1) gcp+gps". Tästä voidaan päätellä, että harvemmillä peitoilla olevien blokkien kuvien orientointi ei ole onnistunut yhtä hyvin kuin tiheämmillä peitoilla olevien blokkien.

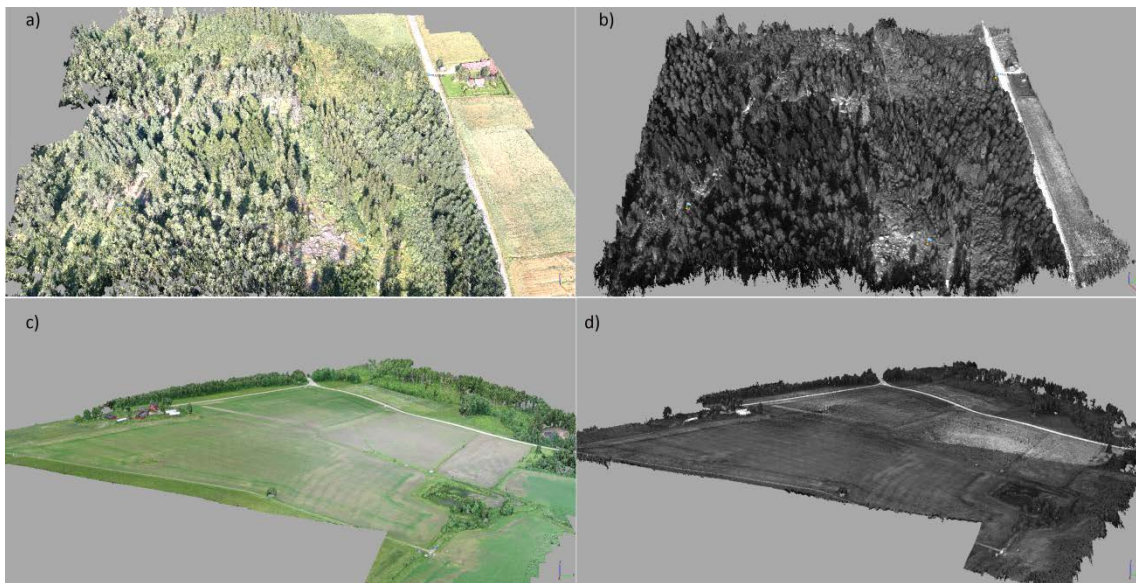
5.5.2 Tiheän pistepilven laskeminen

Tässä tutkimuksessa kokeiltiin "Mild", "Moderate" ja "Aggressive" syvyyskarttojen suodatusasetuksia Vihdin ja Mustilan FPI-kuville ja verrattiin näitä visuaalisesti RGB-kuvilta tuotettuihin tiheisiin pistepilviin. "Disabled" suodatusasetusta ei kokeiltu ollenkaan, koska sitä ei suositella ilmakuvaukseen (AgiSoft, 2016). Eri suodatusasetuksilla saatiin hyvin erilaisia tiheiden pistepilvien lopputuloksia. Molemmassa ympäristöissä tasaisimman laatuiset tiheet pistepilvet saatiin käyttämällä "Mild" suodatusasetusta. Tämä suodatti suurimman osan harhapisteistä pois ilman, että se karsi liikaa esimerkiksi puiden tai viljojen latvoja. Tämä suodatusasetus onnistui myös säilyttämään parhaiten maanpinnan pisteet. Eniten maanpinnan pisteitä karsiutui Mustilan FPI-kuvilta "Aggressive" suodatusasetuksella, koska Mustilassa valtaosa maanpinnan pisteistä oli puiden tai kivien varjoissa ja näin ollen ne muistuttivat harhapisteitä. "Aggressive" suodatusasetuksella saatiin parhaiten Mustilan puiden latvustot mallinnettua. "Moderate" suodatusasetuksella päästiin maanpinnan osalta lähelle "Mild" suodatusasetuksen tuloksia, mutta myös latvuston kohdalla lähes yhtä hyvin tuloksiin kuin "Aggressive" suodatusasetuksella. Mustilan metsäaineistolla suodatusasetusten erot tulivat selvemmin esiin kuin Vihdin peltoaineistolla.

Tässä tutkittiin myös laatuasetuksien "Ultrahigh", "High" ja "Medium" vaikutusta Mustilan ja Vihdin blokkien tiheään pistepilveen. Mustilan FPI-kuvien kohdalla laatuasetuksien valinnalla oli myös merkitystä maanpinnan ja puiden latvustojen erottumiseen. Parhaiten maanpinnan pisteitä mallensi laatuasetus "High", kun taas vähiten niitä oli laatuasetuksella

”Ultrahigh”. ”Medium” laatuasetus suoriutui näiden kahden väliltä maanpinnan pikselien mallinnuksessa. Laatuasetus ”High” mallensi myös parhaiten puiden latvuston, ”Ultrahigh”:n toimiessa lähes yhtä hyvin. ”Medium” mallensi puiden latvuston näistä huonoiten. Vihdin FPI-kuvien kohdalla laatuasetuksella ”Ultrahigh” saatiin parhaita malleja, laatuasetuksen ”High” ollessa toiseksi paras. ”Medium” laatuasetuksella alettiin jo hukkaamaan pienimpiä yksityiskohtia tiheästä pilvestä.

Aukeilla ja tasaisilla alueilla, kuten autoteillä, laatuasetuksella ”Ultrahigh” ja suodatusasetuksella ”Aggressive” päästiin kaikista tasaisimpiin lopputuloksiin. ”Aggressive” suodatusasetuksella pistepilvet sisälsivät huomattavasti vähemmän harhapisteitä, kuin muilla suodatusasetuksilla. Kuvassa 23 on esitelty Mustilan ja Vihdin RGB- ja FPI-kuvilta tuotetut valmiit tiheät pistepilvet. Varsinkin Mustilan pistepilvistä huomataan, että reuna-alueilla pistepilvi alkaa deformatua. Tämän vuoksi reuna-alueita ei käytetty suoritettaessa virheiden mittauksia DSM:ltä ja DTM:ltä.



Kuva 23 a) Mustila tiheä RGB-pistepilvi b) Mustila tiheä FPI-pistepilvi c) Vihti45 tiheä RGB-pistepilvi d) Vihti45 tiheä FPI-pistepilvi

5.5.3 Korkeusmallien (DSM/DTM) muodostaminen

Taulukkoon 24 on merkitty Vihdin ja Mustilan FPI- ja RGB-kuvablokeista laskettujen ortomosaiikkien ja korkeusmallien maksimiresoluutiot. Mustilan ja Vihdin RGB-kuvablokkien ja Mustilan FPI-kuvablokin korkeusmallien resoluutiot ovat vain puolet ortomosaiikkien resoluutiosta, koska näiden blokkien tiheät pistepilvet laskettiin käyttämällä ”High” laatuasetusta eli ½ kokoisia kuvia alkuperäisistä kuvista, kun taas Vihdin FPI-blokit ratkaistiin käyttämällä ”Ultrahigh” laatuasetusta eli alkuperäisen kokoisia kuvia. Nämä tulokset ovat samansuuntaisia kuin Taulukossa 9 esitellyissä tutkimuksissa saadut ortomosaiikkien ja korkeusmallien resoluutiot, kun otetaan huomioon lentokorkeus.

Taulukko 24 Esitetty Mustilan ja Vihdin eri lentojen kuvablokkien ortomosaiikkien ja DSM/DTM resoluutiot (cm). Lisäksi on ilmoitettu kamera ja sille laskettu GSD (cm).

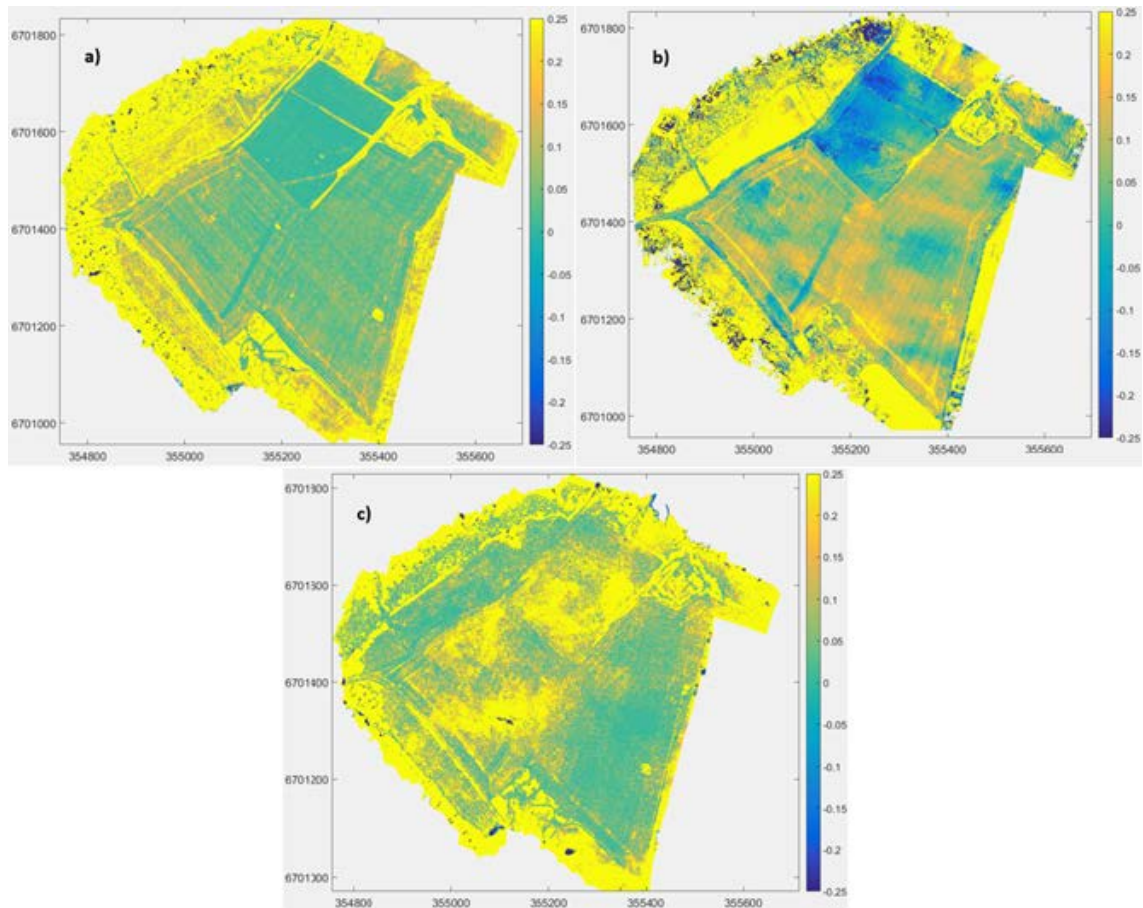
Alue	Kamera	GSD (cm)	Ortomosaiikki resoluutio (cm)	DSM/DTM resoluutio (cm)
Mustila	Rikola Proto2	6,9	7,1	14,2
	NX300	2,9	2,8	5,6
Vihti123	FPI 2012b	14,1	13,3	13,3
	NX500	3,2	3	5,9
Vihti45	FPI 2012b	14,1	13,1	13,1
	NX500	3,2	2,9	5,8

Mustilan FPI-kuvilta tuotettujen DTM:en tarkkuus oli paikoitellen huono. Etenkin metsäisten alueiden maanpintaluokittelun tulokset olivat huonoja, koska metsän seasta ei löytynyt tarpeeksi maanpinnan pisteitä tarkkaa luokittelua varten (Kuva 32, Liite 4). Kuvan 32 tuloksista nähdään, että puuttomilla alueilla (Kuvan 19 alueet 1, 2, 4 ja 5) maanpinnan luokittelu on onnistunut huomattavasti paremmin kuin tiheään puuston alueella. Koko aluetta tarkastellessa huomataan, että tiheiden metsäisten alueiden luokittelun epätarkkuuden vuoksi myös koko alueen tarkkuus on huono. Automaattisen maanpintaluokittelun käyttäminen kyseisen tyyppisellä tiheällä metsäalueella ei tuota siis tarkkoja DTM:ä. Huonon tarkkuuden ja referenssi korkeuksien ja biomassojen puuttumisen vuoksi Mustilan aineistosta ei tuotettu ollenkaan CHM:ää.

Kuvasta 16 nähdään, että Mustilan RGB-blokin tapauksessa pienemmät kasvillisuudet, kuten pensaat, on luokiteltu useammin ”muut pisteet”, kun taas FPI-blokissa nämä on luokiteltu ”maanpinta” luokkaan. Tämä johtuu mm. FPI-kuvien huonommasta spatiaalisesta erotuskyvystä. Spatiaaliseen erotuskykyyn vaikuttavat mm. sensorin resoluutio ja dynamiikka. Täten FPI-kuvilta ei pystytä erottamaan kaikista pienempiä kohteita, varsinkaan maanpinnalla, jossa varjojen vaikutus on suurempi. Tästä johtuen pienet pensaat ja kivet sekoittuvat maanpintaan aiheuttaen automaattisessa maanpintaluokittelussa virheet.

Vihdin peltojen automaattisella maanpintaluokittelulla tuotetut DTM:t olivat tarkkuudeltaan parempia kuin Mustilan metsäaineistoilla (Kuva 27, 28 ja 32 sekä Liite 3 ja 4). Vastaavia havaintoja on tehty mm. Wallace ym. (2016), että automaattiset maanpintaluokittelumenetelmät toimivat luotettavammin tasaisilla alueilla.

Kuvassa 24 on esitelty kolmella eri tavalla tuotettujen CHM:en visuaaliset esitykset. Vertaamalla RGB-kuvablokeista tuotettuja CHM:ä FPI-kuvablokin CHM:ään nähdään, että FPI-kuvablokin CHM:ä sisältää Länsipuoliskolla erittäin korkeita arvoja (> 25 cm). Tämä johtuu siitä, että läntisemmän puolen lennon geometrisessa prosessoinnissa oli huomattavia ongelmia ja etenkin lentojen välisellä alueella ongelmat oli suurimmat.



Kuva 24 Vihdin kasvillisuuden korkeusmalli (CHM) esitetty väriskaalalla -0.25 – 0.25 cm. a) Heinäkuun RGB-kuvablokin DSM:stä vähennettiin heinäkuun RGB-kuvablokin DTM:ä (CHM1). b) Heinäkuun RGB-kuvablokin DSM:stä vähennettiin toukokuun RGB-kuvablokista vastaavasti tuotettu DSM:ä (CHM2). c) Heinäkuun FPI-kuvablokista tuotetusta DSM:stä vähennettiin heinäkuun FPI-kuvablokista tuotettu DTM:ä. Kaikissa tapauksissa kuvablokit oli tuettu kuvien tunnetuilla sijainneilla ja kaikilla GCP:illä (CHM3).

5.6 Virheiden mittaus peltoalueilla

5.6.1 Tarkkuusmittaukset tukipisteillä

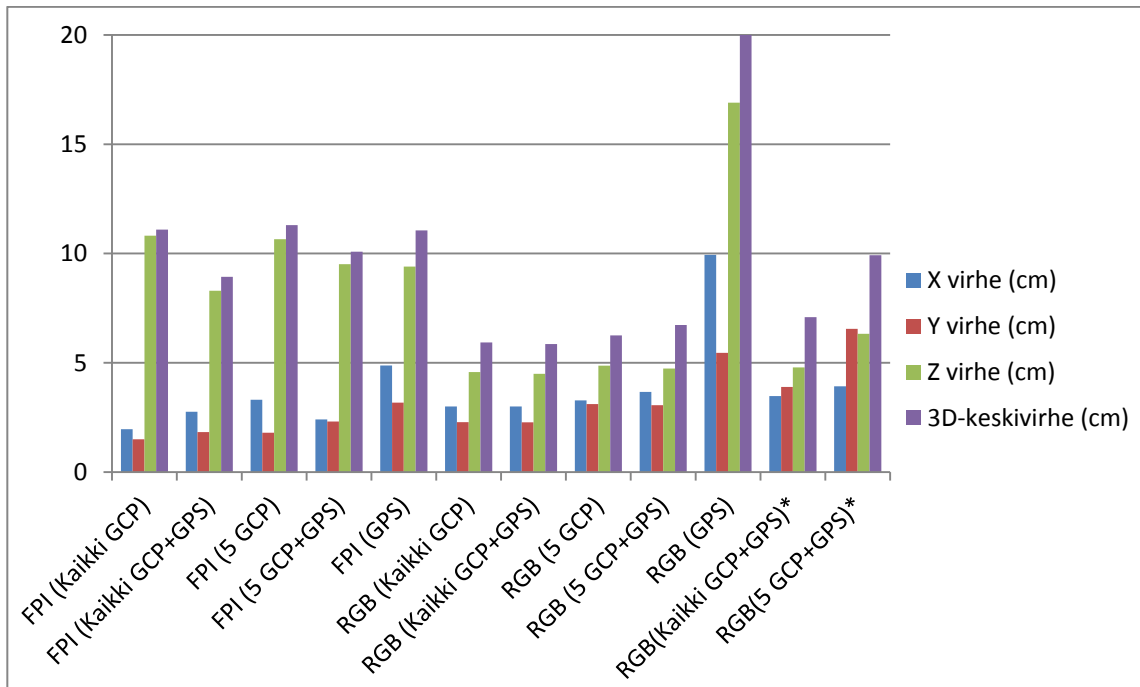
Vihdin heinäkuun FPI- ja RGB-kuvablokkien viiden eri blokkivariaatio tarkkuuden määrittämisessä käytettiin GCP:itä tarkastuspisteinä. RGB-blokkien blokkitasoituksen 3D-keskivirheet vaihtelivat 5,85 cm:n ja 20,35 cm:n välillä ja FPI-blokkien 8,93 cm:n ja 11,30 cm:n välillä. Kuvasta 25 nähdään, että blokkitasoituksessa pienimmät 3D-keskivirheet saavuttivat blokkivariaatiot ”2) kaikki gcp:t ja gps” RGB- ja FPI-kuvien osalta. Lähes yhtä hyvään tulokseen päästiin RGB-blokkivariaatiolla ”1) kaikki gcp:t”. FPI-blokeista toiseksi parhaaseen tarkkuuteen päästiin käytännönsovellusten kannaltakin mielenkiintoisella blokkilla ”4) 5 GCP:itä ja gps”, tämän ollessa RGB-blokeissa vain hieman tarkkuudeltaan huonompi kuin blokit ”1) kaikki gcp:t” ja ”2) kaikki gcp:t ja gps”. Myöskin käytännönsovellusten kannalta mielenkiintoinen blokki ”3) 5 gcp:itä” oli RGB ja FPI-blokkien, joissa GCP:t, tarkastelussa vain hieman tarkkuudelta huonompi kuin blokit ”1) kaikki gcp:t”, ”2) kaikki gcp:t ja gps” ja ”3) 5 gcp:tä” (Kuva 25).

Kuvassa 26 on esitetty ortomosaiikilta mitattujen X- ja Y-koordinaatin ja DSM:ltä mitattujen korkeuksien absoluuttiset tarkkuudet. RGB-blokeista selkeästi huonoin absoluuttinen 3D-keskivirhe oli blokkilla, jossa oli käytössä pelkät GPS:llä mitatut kuvien sijaintitiedot.

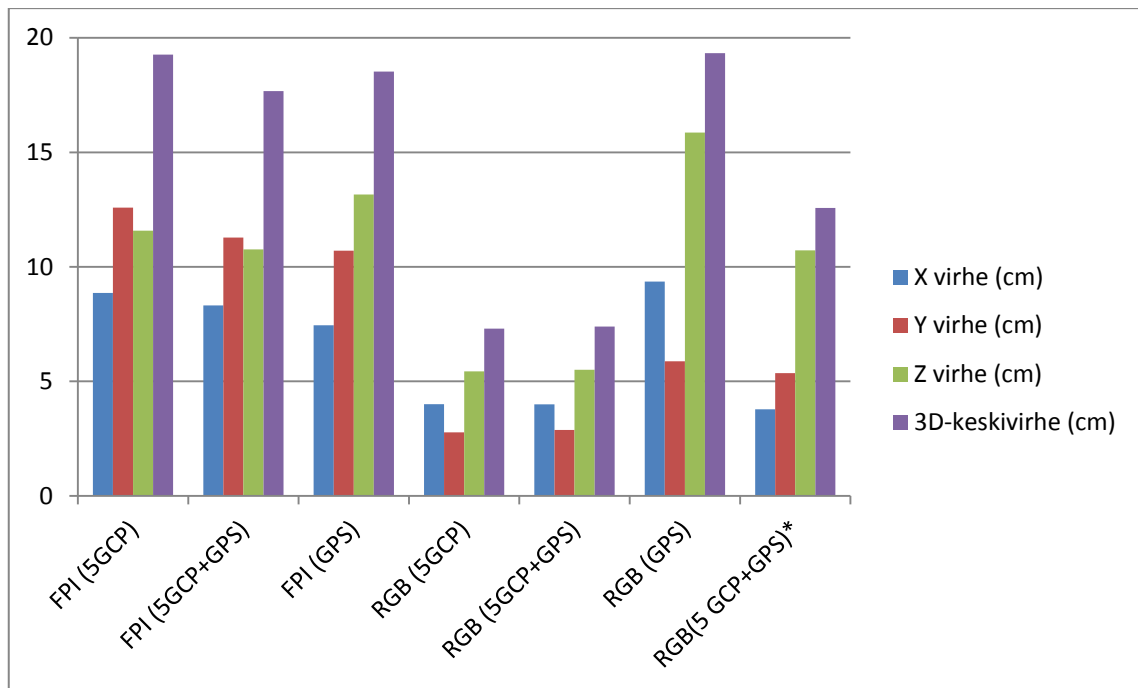
FPI-blokin, jossa oli käytössä pelkät GPS:llä mitatut kuvien sijaintitiedot absoluuttinen 3D-keskivirhe oli pienempi kuin blokin ”3) 5 GCP:itä” (Kuva 26). RGB-blokin ”5) gps” huonompi tarkkuus johtui mm. RGB-kuvien sijaintitietojen prosessoinnin epätarkkuudesta (Luku 5.3).

Kuvassa 29 on esitetty Vihdin heinäkuun lentojen eri pituuspeitoilla (82 %, 88%, 94%) blokkivariaation ”3) 5 GCP:itä” tarkistuspisteiden X-, Y-, ja Z-koordinaattikeskivirheet ja 3D-keskivirheet blokkitasoituksessa ja Kuvassa 30 samojen blokkien ortomosaiikkien X- ja Y-koordinaattien ja DSM:n Z-koordinaattien absoluuttisten tarkkuuksien mittausten tulokset. Näistä nähdään, että tulokset ovat hyvin konsistentteja keskenään. Nähdään, että vaikka suurimmilla kuvapeitoilla (94 %) on saatu pienimmät tarkastuspisteiden 3D-keskivirheet, niin kuitenkin 88 % kuvapeitoilla on saatu pienimmät absoluuttiset virheet. Tämä johtuu osittain siitä, että 94 % kuvapeitto on jo huomattavasti suurempi kuin Photoscanin optimaalinen noin 80 % kuvapeitto. Kuitenkaan 82 % kuvapeitolla ei saada parhaita tuloksia, vaan 88 % kuvapeitolla.

Kuvan 25 tuloksissa on osoitettu, että blokkirakenteen sisäinen tarkkuus paranee lisäämällä GCP:iden määrää. Rosnell ja Honkavaara (2012) ja Grenzdörffer ym. (2008) on saanut vastaavia tuloksia. Tämän lisäksi Kuvan 26 tulosten perusteella nähdään, että GCP:illä ja erittäin tarkkoilla kuvien sijaintitiedoilla tuettujen blokkien sisäinen tarkkuus on jopa parempi kuin minimi määrällä eli 5 GCP:llä tuettu blokki. Kuten edellä on osoitettu, että blokkitasoituksessa määritellyt koordinaattivirheet ovat hyvin konsistentteja absoluuttisten tarkkuuksien kanssa, ja täten voidaan olettaa, että blokkien ”1) Kaikki gcp” ja ”2) Kaikki gcp:t ja gps” absoluuttiset tarkkuudet ovat parempia tai yhtä hyviä kuin blokkien ”3) 5 gcp:tä” ja ”4) 5 gcp:tä ja gps” (Kuva 26).



Kuva 25 Vihdin heinäkuun FPI- ja RGB-kuvablokkien ja *toukokuun kahden RGB-kuvablokin blokkitasoituksessa määritetyt koordinaattikeskivirheet (X, Y, Z, cm) ja 3D-keskivirhe (cm).



Kuva 26 Vihdin heinäkuun ja *toukokuun lennon kuvilta tuotetuiden ortomosaiikkien X- ja Y-koordinaattikeskivirheet (X, Y, cm) ja DSM:n Z-koordinaattikeskivirhe (Z, cm) ja 3D-keskivirhe (cm).

5.6.2 Tarkkuusmittaukset DSM:illä ja DTM:illä

Vihdin heinäkuun lentojen FPI- ja RGB-blokkien viidelle eri variaatiolle tehtyjen korkeusmallien tarkkuusmittausten tulokset on esitetty Kuvissa 27 ja 28. Näissä on DSM ja DTM referenssinä käytetty heinäkuun RGB-blokkia ”2) kaikki gcp:t ja gps” ja lisäksi toisena DTM referenssinä toukokuun DSM:ää, joka myös tuettu kaikkilla GCP:illä ja gps:illä. Kuvassa 27 esitetty Z-koordinaattikeskivirhe on hyvin konsistentti Kuvassa 25 esitettyjen tulosten kanssa. FPI-blokeilla pienimmät virheet saavutettiin GCP:illä ja kuvien sijaintitiedoilla tuetuilla blokeilla.

Kuvan 27 esitettyjen RGB- ja FPI-blokkien Z-koordinaattikeskivirheiden tulokset ovat konsistentteja Kuvan 25 ja Kuvan 26 tulosten kanssa. Pienimmät virheet saavutettiin FPI-blokeilla ”2) Kaikki gcp:t ja gps” ja ”4) 5 gcp:tä ja gps”. RGB-blokkien ”1) Kaikki gcp:t”, ”3) 5 gcp:tä” ja ”4) 5 gcp:tä ja gps” DSM:en Z-koordinaattikeskivirheet vaihtelivat 0,54 – 1,55 cm välillä ja DTM:en vaihtelivat 0,70 – 1,77 cm välillä referenssistä heinäkuun referenssistä. RGB-blokin ”5) gps” DSM:n Z-koordinaattikeskivirhe vaihteli 4,29 – 9,44 cm välillä ja DTM:n 4,33 – 9,23 cm välillä referenssistä. FPI-blokkien DSM:en Z-koordinaattikeskivirheet vaihtelivat 4,76 – 15,92 cm välillä ja DTM:en 1,84 – 18,04 cm:n välillä heinäkuun referenssistä. FPI-blokkien korkeusmallien tarkkuudet olivat siis hieman huonompia kuin RGB-blokkien. Tämä johtuu mm. FPI-kameran sensorin huonommasta dynamiikasta ja spatiaalisesta erotuskyvystä, mutta osittain myös Vihdin heinäkuun lentojen poikkeavista valaistusolosuhteista ja varjojen liikkeestä, mitkä vaikuttivat enemmän FPI-kuviin.

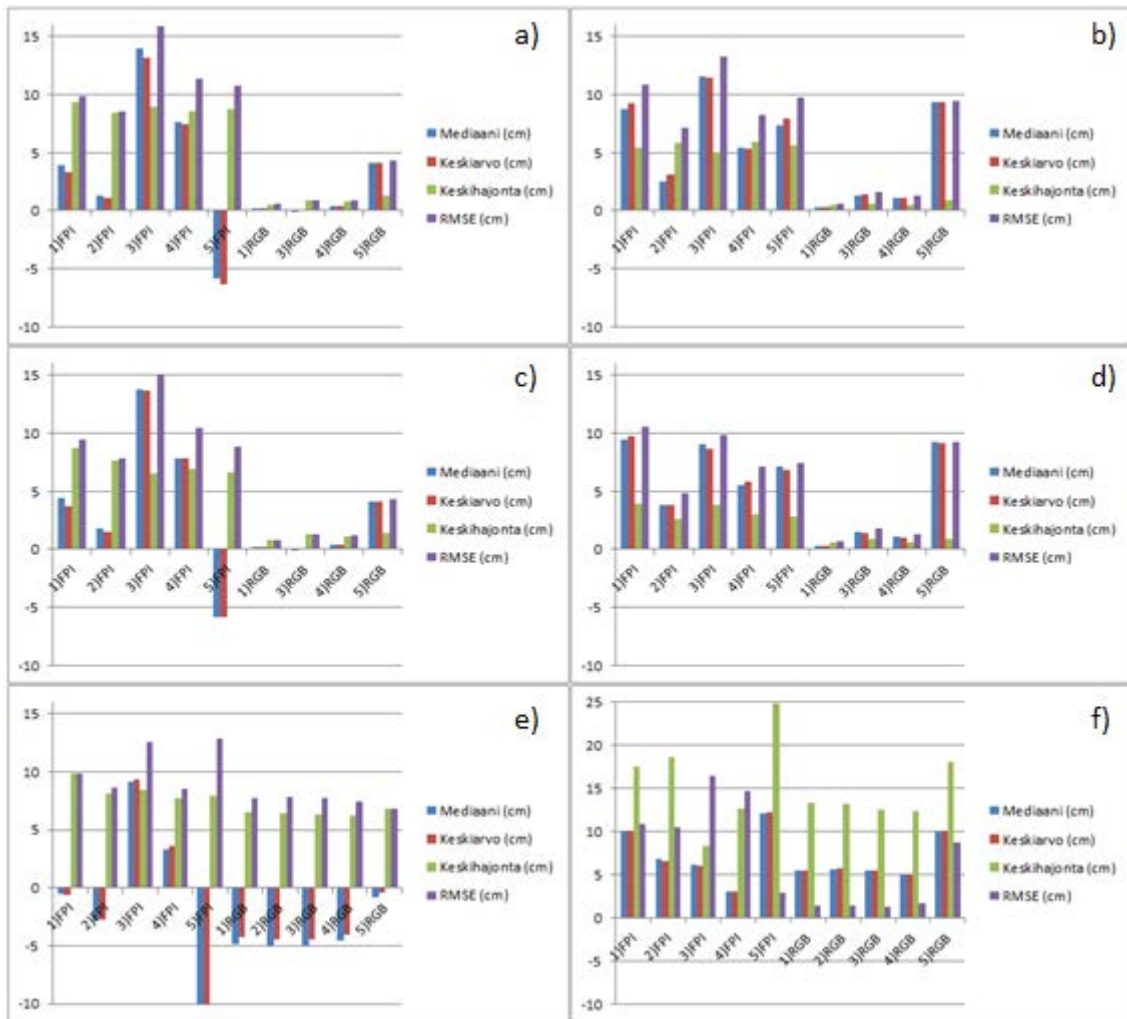
5.6.3 CHM:en vertailu referenssiin

Vihdin peltoaineistoista lasketuiden CHM:en korkeustarkkuuksien estimaatit laskettiin kaavan 1 mukaisesti eli summaamalla virhekomponentit neliöllisesti keskenään. Täten Vihdin heinäkuun lentojen RGB-kuvablokeista lasketun CHM1:n (Kuva 24a) korkeustarkkuuden

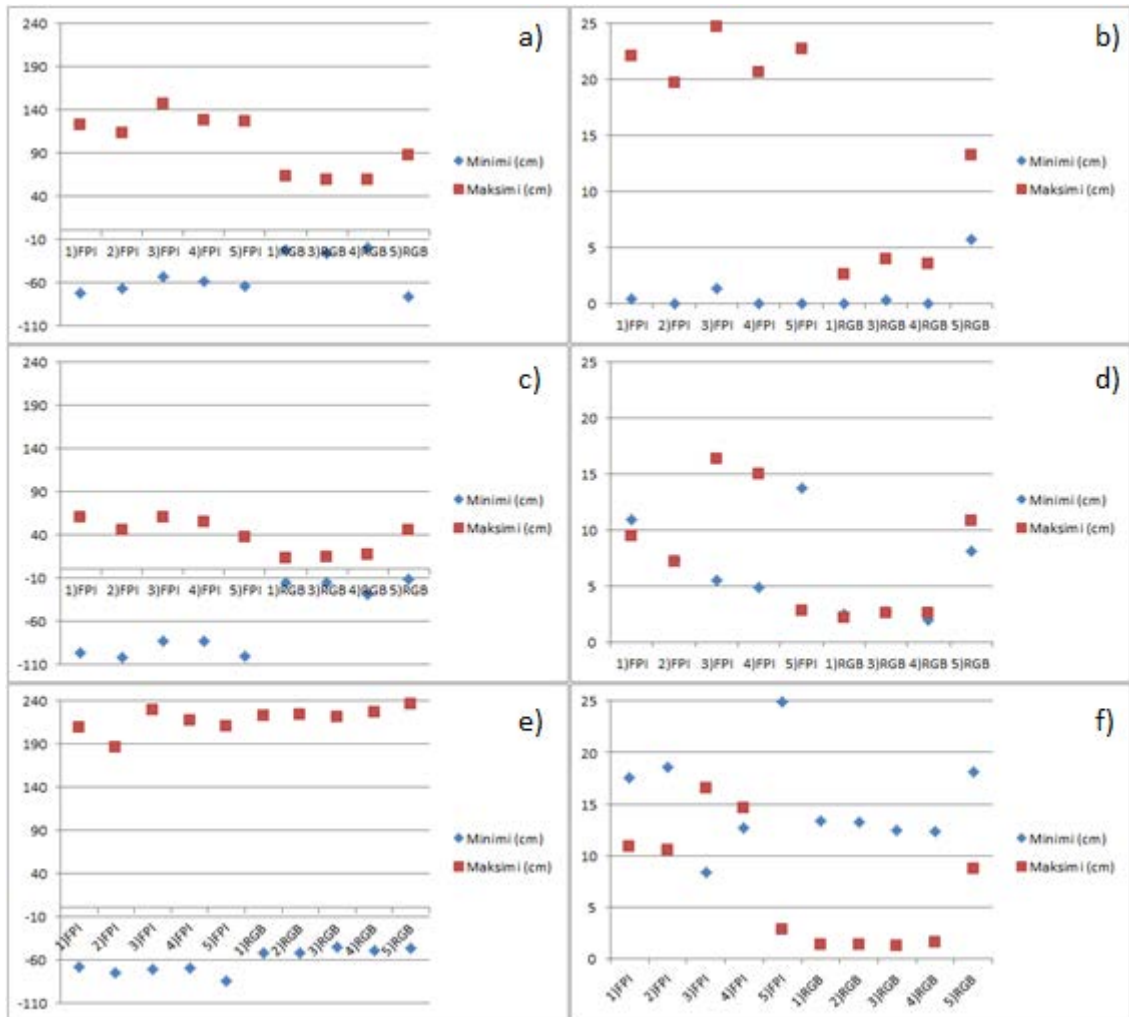
estimaatti on pienempi tai yhtäsuuri kuin Kuvassa 26 esitetyn blokin ”RGB(5GCP+GPS)” Z-koordinaattikeskivirheen tarkkuus 5,5 cm. CHM2 (Kuva 24b) on laskettu käyttämällä Vihdin toukokuun DTM:ää ja Vihdin heinäkuun DSM:ää ja näin ollen CHM2:n korkeuden sijaintitarkkuuden estimaatiksi saatiin XX. Vihdin heinäkuun FPI-kuvablokista lasketun CHM3:n (Kuva 24c) korkeustarkkuuden estimaatti on pienempi tai yhtäsuuri kuin Kuvassa 26 esitetyn blokin ”FPI(5GCP+GPS)” Z-koordinaattikeskivirheen tarkkuus 10,8 cm.

Liitteessä 7 on esitelty PH_{CHM1} , PH_{CHM2} , PH_{CHM3} , PH_{82} , PH_{88} ja PH_{94} saadut kasvillisuuden korkeudet. Taulukossa 25 on PH_{CHM1} , PH_{CHM2} , PH_{CHM3} , kasvuston referenssikorkeuden (PH_{ref}) sekä tuore- ja kuivabiomassojen minimiarvo, maksimiarvo, keskiarvo, keski-
virhe ja aineistojen koko. FPI-kuvablokin PH_{CHM3} maksimiarvo on yli 10 cm korkeammalla kuin PH_{ref} maksimiarvo. RGB-kuvablokin PH_{CHM1} ja PH_{CHM2} maksimiarvo on matalammalla kuin PH_{ref} maksimiarvo. PH_{CHM2} minimiarvo on -0,10, mikä johtuu CHM2:n laskentaan käytettyjen toukokuun DTM:n ja heinäkuun DSM:n korkeustarkkuus eroista. PH_{CHM3} minimiarvo on -0,04, mikä taas johtuu FPI-kuvablokin pistepilven huonommasta laadusta. PH_{CHM1} minimiarvo on 0,00, joka on identtinen PH_{ref} kanssa.

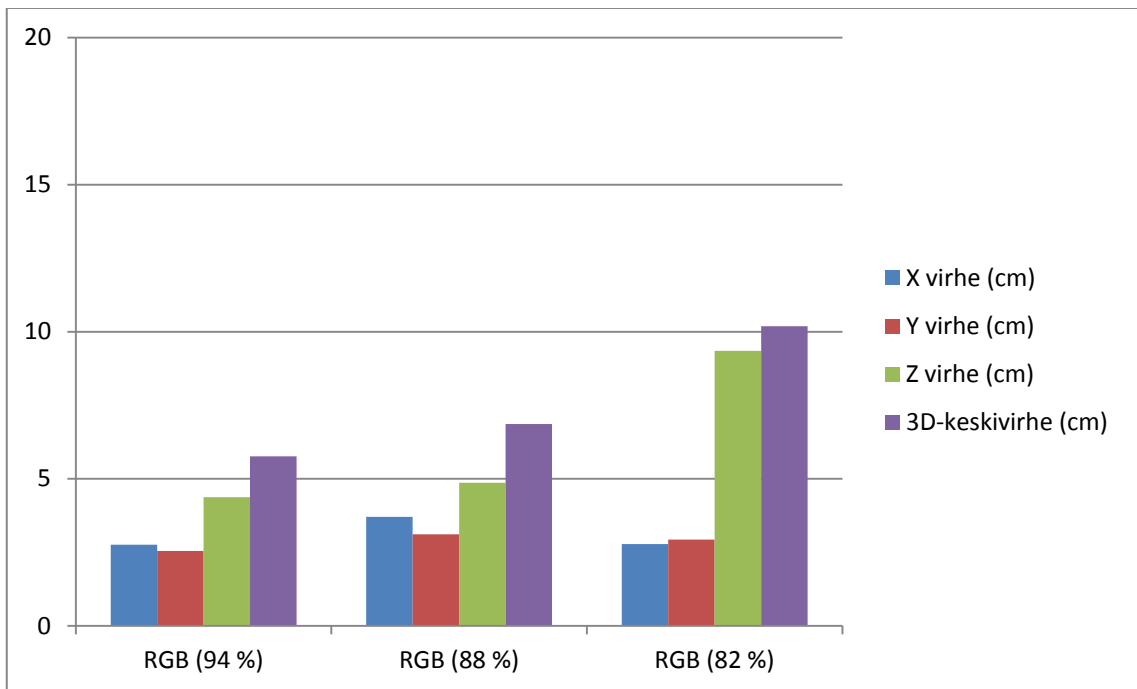
Taulukossa 27 on esitelty eri kuvapeitoilla saatujen PH_{82} , PH_{88} , PH_{94} selitysasteet (R^2) PH_{ref} ja biomassojen välillä empiirisen viivan menetelmällä. Nähdään, että suurimmat selitysasteet on saatu referenssien välille kuvapeitolla 88 %. Lähes yhtä hyvin tuloksiin päästiin myös kuvapeiton ollessa 94% ja huonompiin tuloksiin päästiin kuvapeiton ollessa 82 %. Taulukossa 26 on esitelty PH_{CHM1} , PH_{CHM2} , PH_{CHM3} , PH_{ref} ja biomassojen selitysasteet (R^2) empiirisen viivan menetelmällä. CHM:stä paras selitysaste PH_{ref} (0,75), tuorebiomassan (0,87) ja kuivabiomassan (0,84) välille saatiin RGB-kuvablokilta lasketulla PH_{CHM1} :llä. PH_{ref} ja tuorebiomassan selitysaste oli 0,85 ja PH_{ref} ja kuivabiomassan selitysaste oli 0,89. PH_{CHM1} :llä päästiin parempaan selitysasteeseen tuorebiomassan kanssa ja lähes yhtä hyvään selitysasteeseen kuivabiomassan kanssa kuin PH_{ref} . FPI-kuvablokilta lasketulla PH_{CHM3} :lla selitysasteet olivat huomattavasti huonommat (Taulukko 26). Parhaalla CHM1:llä kokeiltiin myös keskiarvolla määritetyn korkeuden lisäksi määrittää korkeus käyttämällä miniarvoa ja maksimiarvoa. Paras selitysaste saatiin PH_{ref} välille käyttämällä keskiarvoa ($R^2 = 0,75$), kun taas minimiarvolla saatiin $R^2 = 0,74$ ja maksimiarvolla saatiin $R^2 = 0,69$.



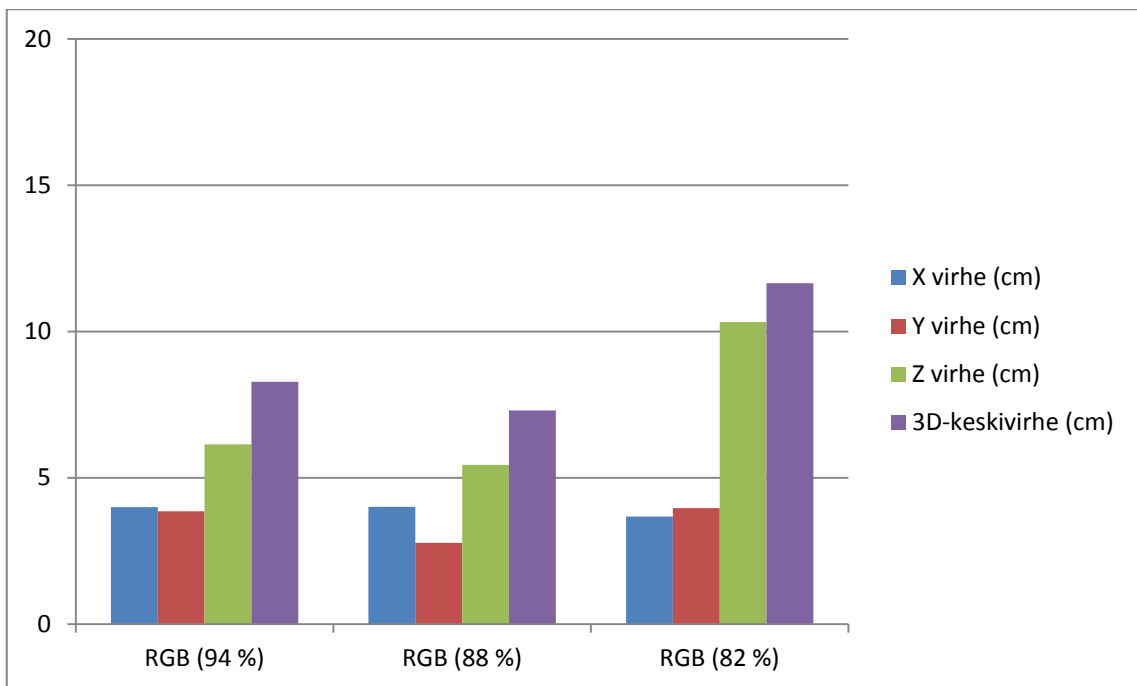
Kuva 27 Vihdin heinäkuun kuvablokkien DSM ja DTM vertailuiden mediaani (cm), keskiarvo (cm), keskihajonta (cm) ja Z-koordinaattikeskivirhe (kaava 9; RMSE:n (cm)). **a)** Iso alue DSM, **b)** Pienet alueet DSM keskiarvo, **c)** Iso alue DTM, **d)** Pienet alueet DTM keskiarvo, **e)** Iso alue DTM **f)** Pienet alueet DTM keskiarvo (huomioi eri skaalaus y-akselilla). Kuvissa **a) – d)** referenssinä oli Vihdin huhtikuun RGB-blokki ”2) kaikki gcp:t + gps” ja Kuvissa **e)** ja **f)** referenssinä oli Vihdin toukokuun RGB-blokki ”2) kaikki gcp:t + gps”. Eri blokkivariaatiot: 1) kaikki gcp:t, 2) kaikki gcp:t + gps, 3) 5 gcp:tä, 4) 5 gcp:tä + gps ja 5) gps.



Kuva 28 Vihdin heinäkuun kuvablokkien DSM ja DTM vertailuiden minimiarvot (cm) ja maksimiarvot (cm). **a)** Iso alue DSM, **b)** Pienet alueet DSM keskiarvo, **c)** Iso alue DTM, **d)** Pienet alueet DTM keskiarvo, **e)** Iso alue DTM **f)** Pienet alueet DTM keskiarvo (huomioi eri skaalaus y-akselilla). Kuvissa a) – d) referenssinä oli Vihdin huhtikuun RGB-blokki ”2) kaikki gcp:t + gps” ja Kuvissa e) ja f) referenssinä oli Vihdin toukokuun RGB-blokki ”2) kaikki gcp:t + gps”. Eri blokkivariaatiot: 1) kaikki gcp:t, 2) kaikki gcp:t + gps, 3) 5 gcp:tä, 4) 5 gcp:tä + gps ja 5) gps.



Kuva 29 Vihdin heinäkuun eri pituuspeitoilla tuotettujen RGB-kuvablokkien blokkitasoituksessa määritetyt koordinaattikeskivirheet (X, Y, Z, cm) ja 3D-keskivirhe (cm). Eri blokkivariaatiot: 1) 94 % pituuspeitto, 2) 88 % pituuspeitto ja 3) 82 % pituuspeitto, tuettu 5:llä GCP:llä.



Kuva 30 Vihdin heinäkuun eri pituuspeitoilla tuotettujen RGB-kuvablokkien ortomosaiikkien X- ja Y-koordinaattikeskivirheet (X, Y, cm) ja DSM:n Z-koordinaattikeskivirhe (Z, cm) ja 3D-keskivirhe (cm) (kaava 11). Eri blokkivariaatiot: 1) 94 % pituuspeitto, 2) 88 % pituuspeitto ja 3) 82 % pituuspeitto, tuettu 5:llä GCP:llä.

Taulukko 25 Kasvuston korkeusmallien (PH_{CHM1} , PH_{CHM2} , PH_{CHM3}), kasvuston referenssikorkeuden (PH_{ref}), tuorebiomassan (kg/m^2) ja kuivabiomassan (kg/m^2) minimiarvo, maksimiarvo, keskiarvo, keskihajonta ja näyttöönottoruutujen lukumäärä (n). PH_{CHM1} on laskettu vähentämällä heinäkuun RGB DSM:stä DTM:ä. PH_{CHM2} on laskettu vähentämällä heinäkuun RGB DSM:stä toukokuun RGB DTM:ä. PH_{CHM3} on laskettu vähentämällä heinäkuun FPI-blokin DSM:stä DTM:ä.

	PH_{ref} (m)	PH_{CHM1} (m)	PH_{CHM2} (m)	PH_{CHM3} (m)	Tuorebiomassa (kg/m^2)	Kuivabiomassa (kg/m^2)
Minimi	0,00	0,00	-0,10	-0,04	0,00	0,00
Maksimi	0,31	0,22	0,28	0,42	1,66	0,24
Keskiarvo	0,13	0,06	0,09	-0,04	0,00	0,00
Keskihajonta	0,11	0,06	0,09	0,11	0,51	0,08
n	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00

Taulukko 26 Kasvuston korkeusmallien (PH_{CHM1} , PH_{CHM2} , PH_{CHM3}), kasvuston referenssikorkeuden (PH_{ref}), tuorebiomassan ja kuivabiomassan keskinäisiä selityksasteita (R^2) empiirisen viivan menetelmällä. PH_{CHM1} on laskettu vähentämällä heinäkuun RGB DSM:stä DTM:ä. PH_{CHM2} on laskettu vähentämällä heinäkuun RGB DSM:stä toukokuun RGB DTM:ä. PH_{CHM3} on laskettu vähentämällä heinäkuun FPI-blokin DSM:stä DTM:ä.

R^2	PH_{ref} (m)	PH_{CHM1} (m)	PH_{CHM2} (m)	PH_{CHM3} (m)	Tuorebiomassa (kg/m^2)	Kuivabiomassa (kg/m^2)
PH_{ref} (m)	1					
PH_{CHM1} (m)	0,75	1				
PH_{CHM2} (m)	0,57	0,76	1			
PH_{CHM3} (m)	0,24	0,37	0,25	1		
Tuorebiomassa (kg/m^2)	0,85	0,87	0,65	0,34	1	
Kuivabiomassa (kg/m^2)	0,89	0,84	0,64	0,29	0,99	1

Taulukko 27 Kasvuston korkeusmallien (PH_{82} , PH_{88} , PH_{94}), kasvuston referenssikorkeuden (PH_{ref}), tuorebiomassan ja kuivabiomassan keskinäisiä selityksasteita (R^2) empiirisen viivan menetelmällä. Kasvuston korkeusmallit on laskettu vähentämällä heinäkuun RGB DSM:stä DTM:ä.

R^2	PH_{ref} (m)	Tuorebiomassa (kg/m^2)	Kuivabiomassa (kg/m^2)
PH_{82} (m)	0,62	0,73	0,78
PH_{88} (m)	0,75	0,87	0,84
PH_{94} (m)	0,65	0,81	0,84

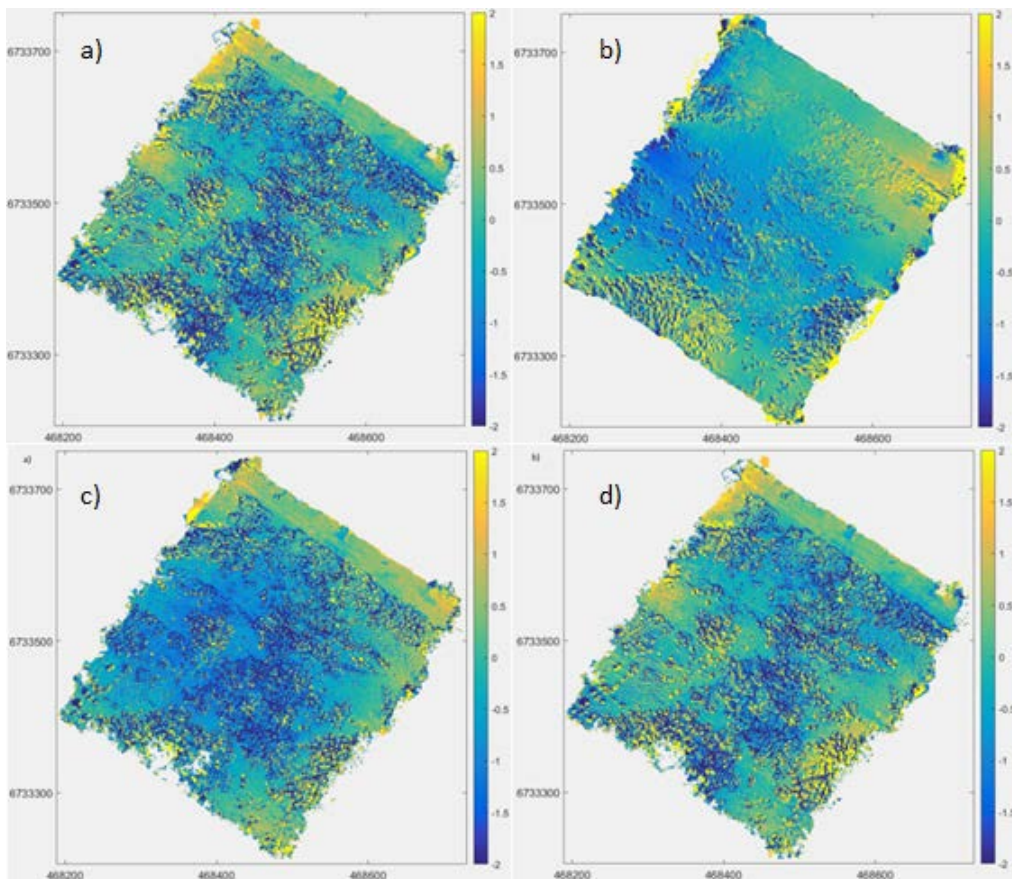
5.7 Mustila tarkkuusmittaukset DTM:llä

Kuvassa 32 on esitelty a) MML:n laserpistepilven DTM:n ja Mustilan RGB-blokin erotus, b) Mustilan FPI-blokkien ”1) gcp+gps” ja ”1) gcp” erotus, c) RGB-blokin ja FPI-blokin ”1) gcp+gps” erotus ja d) RGB-blokin ja FPI-blokin ”1) gcp” erotus. Liitteessä 6 on vertailtu MML:n laserpistepilven DTM:ää Mustilan RGB-blokista tuotettuun DTM:ään ja Mustilan FPI-blokista ”1) gcp+gps” tuotettuun DTM:ään. Lisäksi liitteessä 6 on vertailtu RGB-blokista tuotettua DTM:ää Mustilan FPI-blokista ”1) gcp+gps” tuotettuun DTM:ään. Kuvasta 32a ja Liitteestä 6 nähdään, että RGB-blokki on hyvin kohdillaan MML:n laserpistepilven kanssa tasaisia alueita tutkittaessa. Kuvaa 32b ja 32c vertaamalla nähdään, että FPI-blokki ”1) gcp+gps” on kohdikkain RGB-blokin kanssa tasaisilla alueilla paremmin kuin FPI blokki ”2) gcp”.

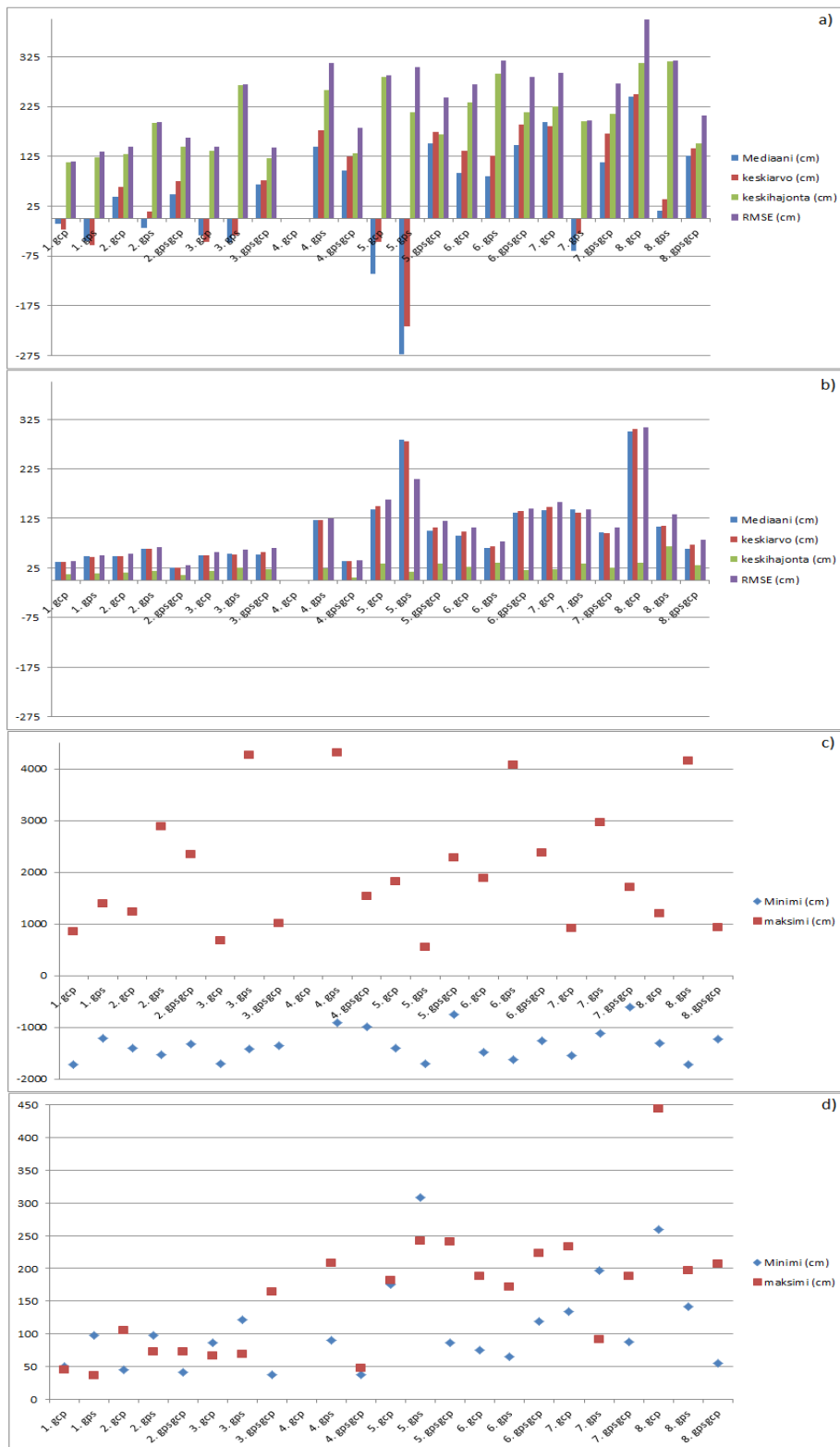
Kuvan 32 ja Liitteen 4 ja 5 tuloksista nähdään, että pelkillä GCP:illä tuetut Mustilan FPI-blokit deformatuivat lounaiskulmassa olevalla alueella, jossa ei GCP:itä ollut. Vastaavaa deformaatiota ei tapahtunut ”gps+gcp”:illä tai pelkillä ”gps”:illä tuetuissa blokeissa. Pelkillä ”gps”:illä tuetut blokit olivat kuitenkin muilla alueilla tarkkuudeltaan heikompia kuin

pelkillä gcp:llä tuetut blokit. Parhaimpiin tarkkuuksiin päästiin ”gps+gcp”:llä tuetuissa blokeissa kaikissa eri blokkivariaatioiden tapauksissa. Näistä parhaan tarkkuuden saavutti blokkivariaatio ”1) kaikki linjat”, jolla oli suurimmat kuvaveitot. Blokit, joita oli tuettu päädyissä olevilla kuvilla sekä poikittaislinjalla tai jommalla kummalla olivat geometrialtaan tarkempia kuin ilman niitä olevat blokit. Pienien alueiden ja ison alueen tarkkuusmittauksien suuret erot johtuvat siitä, että pienistä alueista muut paitsi alue 3 on mitattu tasaisilta aukeilla-alueilla, kun ison alueen tarkkuusmittauksiin on sisällytetty lähes koko alue. Nähdään, että puisilla alueilla (pieni alue 3) DTM:n virheet ovat huomattavasti suuremmat kuin tasaisilla alueilla (Liite 4, Liite 5). Tämä johtui automaattisen maanpintaluokittelun huonosta soveltuvuudesta tiheille metsäaineistoille.

Mustilan tapauksessa osoitettiin, että kuvien sijaintitietojen ollessa hyvä (3D-keskivirhe = 37,08 cm), parantaa se blokin sisäistä tarkkuutta, jos GCP:t eivät peitä koko tarkasteltavaa aluetta. Vihdin peltoaineistolla Kuvassa 26 osoitettiin, että GCP:den peittäessä koko tarkasteltavaa aluetta on kuvien sijaintitiedoista etua, kun niiden tarkkuus on painotettu oikein.



Kuva 31 Mustilan DSM:n erotuskuvat väriskaalalla 2 m – (-2m). a) MML laserkeilaus DTM-RGB DTM b) FPI ”1) gcp+gps” DTM - FPI ”1) gcp” DTM. c) RGB DTM - FPI ”1) gcp” DTM. d) RGB DTM - FPI ”1) gcp+gps” DTM.



Kuva 32 Mustilan eri blokkivariaatioiden DTM:n vertailuiden mediaani (cm), keskiarvo (cm), keskihajonta (cm), Z-koordinaattikeskivirhe (RMSE, (cm)), minimi (cm) ja maksimi (cm). a) Iso alue DTM b) Pienet alueet DTM itseisarvojen keskiarvo c) Iso alue DTM ja d) Pienet alueet DTM itseisarvojen keskiarvo. Kaikissa on käytetty referenssinä blokkia ”1) gcp+gps”.

6 Johtopäätökset ja yhteenveto

Tässä työssä oli tavoitteena selvittää tarkkuuden, tiedonkeruun tehokkuuden ja prosessoinnin tehokkuuden kannalta parhaat mahdolliset hyperspektri- ja RGB-kuvien keräyksen ja geometrisen prosessoinnin menetelmät. Hyperspektri- ja RGB-kuvaukset tulee toteuttaa mahdollisimman suurilla pituus- ja sivupeitoilla, minkä jälkeen karsitaan epätarkat kuvat niin, että jäljelle jää optimaaliset peitot. Monille SfM tekniikkaa käyttäville, kuten myös tässä tutkimuksessa käytetylle Photoscan-ohjelmalle, suositeltu pituuspeitto on 80 % ja sivupeitto 60-80% (AgiSoft, 2016; Lucieer ym., 2014a). Valtaosa RPAS-laitteistojen tutkimuksista on toteutettu juuri Photoscania käyttämällä ja vastaavilla peittoprosenteilla (Taulukko 8). Tässä tutkimuksessa osoitettiin, että Photoscanin suositus kuvapeittoja (80 %) suuremmilla kuvapeitoilla (88 % ja 94 %) saatiin paremmat absoluuttiset tarkkuudet ortomosaiikeille ja DSM:lle (Kuva 30).

Kuvauskorkeudella on kaavan 1 mukaisesti vaikutusta kuvatuotteen GSD:hen. Esimerkiksi jos kuvauskorkeutta vähennetään 100 metristä 50 metriin joudutaan myös vierekkäisten jonojen etäisyyttä kaventamaan puolella, mikä taas kasvattaa lentoaikaa. FPI-kameroiden sensorien kapean kuvauskulman johdosta niillä joudutaan kuvaamaan huomattavasti tiheämmillä jonoväleillä kuin RGB-kameroilla. Kuvauskorkeuden lisäksi lentoaikaan vaikuttaa lentonopeus. Lentonopeuden lisääminen aiheuttaa epäterävyyttä kuville, sekä lisää FPI-kuvien eri kanavien sijaintieroja ja näin ollen sillä voi olla negatiivinen vaikutus FPI-kuvien kanavien kuvasovituksessa. Kuitenkin, jos samalla nostetaan kuvauskorkeutta ei näitä ongelmia ilmene. Tulisi selvittää parhain ja optimaalisin kuvauskorkeus ja lentonopeus tarkkuuden, tiedonkeruun tehokkuuden ja prosessoinnin tehokkuuden kannalta. Näiden lisäksi myös eri sääolosuhteilla ja auringon korkeuskulmalla on merkitystä geometrisen prosessoinnin onnistumiseen ja sen tarkkuuteen. Heinäkuun Vihdin lentojen välillä oli suuri ero (9°) auringon korkeuskulman välillä ja tällä oli negatiivinen vaikutus kuvablokkinen, etenkin FPI-kuvablokin, geometrisessa prosessoinnissa (Taulukko 14, Kuva 18). Sääolosuhteilla on myös huomattava vaikutus kuvien geometrisen prosessoinnin laatuun. Tästä syystä kuvauksia ei tulisi toteuttaa huonolla säällä, kuten sumuisella tai sateisella säällä. Parhaita valotusolosuhteita kuvaukselle on hieman puolen päivän jälkeen tasaisen auringon paisteen tai ohuen tasaisen pilvipeitteen aikaan.

FPI-kuville paras geometrisen prosessoinnin tarkkuus, tiedonkeruun tehokkuus ja prosessoinnin tehokkuus saavutetaan kun RGB- ja FPI-kuvat kerätään samanaikaisesti ja käsitellään ne samassa geometrisessä prosessoinnissa. Tällöin RGB-kuvien tarkempi spatiaalinen erotuskyky auttaa myös FPI-kuvien tarkemmassa orientointien ratkaisemisessa. Tällöin tiedonkeruussa säästetään myös huomattavan paljon aikaa, koska pystytään laajakulmaisemmalla RGB-sensorilla keräämään kattavammat kuvapeitot. Vaikka pelkkä FPI-kuvajärjestelmä onkin kevyempi lentää, niin sensorin kapean katselukulman takia jouduttaisiin lentämään huomattavasti tiheämpi lentolinjoja kuin RGB-sensorin kanssa ja näin ollen myös lentoaika lisääntyy. Myös prosessoinnin tehokkuus kasvaa, koska ei tarvitse erikseen tuottaa RGB- ja FPI-kuvablokkeja. Tarkkojen FPI-hyperspektrimosaiikkien luominen geometrialtaan vaihtelevissa maastoissa, kuten metsässä vaatii tarkkoja DSM:ä ja tarkkoja orientointeja (Honkavaara ym., 2017). Tommaselli ym. (2016) on osoitettu, että kanavasovitus 2D-muunnoksella voi toimia tasaisilla peltolohkoilla. Kuten tässä tutkimuksessa on osoitettu saadaan RGB-kuvablokeilta myös tuotettua tarkemmat DSM:t kuin FPI-kuvablokeilta.

Kuvien terävyydellä on merkitystä prosessoinnin tarkkuuteen. Tämä osoitettiin vertaamalla epätarkemmilla RGB-kuvilla tuotettua Vihdin toukokuun lennon kuvablokin geometrista tarkkuutta terävämiltä RGB-kuvilta tuotettuun Vihdin heinäkuun kuvablokin geometriseen tarkkuuteen (Kuva 26). Kuvien terävyydellä oli huomattavaa vaikutusta etenkin DSM:en korkeuden tarkkuuteen. Vastaavasti Turner ym. (2014) toteaa, että epäterävillä kuvilla on potentiaalia vaikuttaa negatiivisesti SfM prosessiin, ja tämän vuoksi ne on poistettava. RGB-kameran kuvausasetuksia hienosäätämällä voitaisiin saada RGB-kuvista entistä terävämpiä. Myös vaihtoehtoisia RGB-kameroita tulee kokeilla, jos niillä päästäisiin RGB-kameran reuna-alueiden epäterävyydestä eroon. Kuvat tulee valita niin, että ne ovat mahdollisimman samankaltaisia sävykkyyksiltään. Koska valaistusolosuhteista ei koskaan saada täysin tasaisia tulee kuvien radiometriset erot eliminoida prosessoinnissa (Honkavaara ym., 2017).

Maastoon rakennettavina GCP:itä käytetään lähes poikkeuksetta selkeästi ympäristöstä erottuvia ympyrän muotoisia kohteita tai neliöitä, joihin on maalattu ympyrä. GCP:iden koko määräytyy mm. lentokorkeudesta ja kamerasta kuitenkin niin, että ne on selkeästi havaittavissa kuvilta. GCP:t tulee asentaa maastoon siten, että niillä on mahdollisimman esteetön näkyvyys, jotta ne näkyvät mahdollisimman monelta kuvalta (Taulukko 7). Lisäksi mittausalueelle tulee pystyttää erillisiä tarkistuspisteitä ortomosaiikkien ja korkeusmallien koordinaattivirhe-estimointia varten. GCP:iden koordinaattisijainnit tulee määrittää tyyppillisissä sovelluksissa esim. RTK-GPS:llä tai lyhyillä staattisilla mittauksilla riittävän tarkkuuden saamiseksi. Staattisen mittauksen X-, Y- ja Z-koordinaattivirheet ovat noin 1-1,5 cm (Harwin ja Lucieer, 2012) ja RTK-GPS:n X- ja Y-koordinaattivirheet ovat noin 2-3 cm ja Z-koordinaattivirhe noin 3-4 cm (Harwin ja Lucieer, 2012; Häkli ym., 2004). Tarkimmissa sovelluksissa voidaan käyttää esim. pitkiä staattisia mittauksia, takymetriä tai lasertracker-mittausta, joilla mm-tarkkuuteen X-, Y- ja Z-koordinaateissa.

Photoscanissa voidaan itsekaliibrointi ja pistepilvien prosessoinnissa käyttää eri laatuasetuksia, kuvien esivalinta-asetuksia ja suodatusasetuksia. Työssä selvitettiin näistä eri asetuksista soveltuvimmat metsäaineistolle ja peltoaineistolle. Itsekaliibrointia varten paras laatuasetus oli molemmissa aineistoissa ”High” ja kuvien esivalinta-asetuksista kannattaa käyttää ”Reference”, jos kuville tunnetaan sijaintitiedot yksitaajuus GNSS-vastaanottimen tarkkuudella (5-10 m). Muutoin kuvien esivalinta-asetuksista kannattaa valita ”Generic” ajankäytön optimoimiseksi. Tiheän pistepilven laatuasetuksien ja suodatusasetusten valinnoilla saatiin hyvin erilaisia tiheitä pistepilviä muodostettua. Eniten nämä eri asetusten valinnat vaikuttivat Mustilan metsäaineiston alueella. Eri laatuasetulla ja suodatusasetuksilla karsiutui eri verran joko maanpinnan pisteitä tai puiden latvuston pisteitä. Eniten näitä karsiutui ”Ultrahigh” laatuasetuksella ja ”Aggressive” suodatusasetuksella. Vihdissä eri laatuasetuksilla ja suodatusasetuksilla ei ollut yhtä suuria eroja kuin Mustilassa. Mustilan RGB- ja FPI-kuvilla sekä Vihdin RGB-kuvilla tasaisimman laatuista tiheitä pistepilviä tuotti laatuasetus ”High” ja suodatusasetus ”Mild”. Vihdin FPI-kuvilla parhaat pistepilvet saatiin laatuasetuksella ”Ultrahigh” ja suodatusasetuksella ”Mild”.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin myös yhtenä Photoscanin prosessinosana automaattista maanpintaluokittelua. Automaattinen maanpintaluokittelu ei toiminut luotettavasti tiheän metsän alueilla. Tämä osoitettiin Mustilan metsäaineistoilla DTM:n tarkkuusmittauksilla (Kuva 31, 32, Liite 4). Yhtäläisiä tuloksia on saanut mm. Rahmayudi ym. (2016) automaattisella maanpintaluokittelulla metsäaineistoilla. Automaattinen maanpintaluokittelu toimi kuitenkin paremmin Mustilan tasaisilla alueilla ja Vihdin peltoaineistoilla. Wallace ym. (2016), Ressler ym. (2016) ja Lisein ym. (2013) suosittelevat käytettävän fotogrammetrisen

DTM:n tilalla laserpistepilvestä tuotettua DTM:ää, koska laserkeilauksella päästään tunkeutumaan kasvillisuuden läpi syvemmälle maanpintaan asti. Kuitenkin mm. Oliveira ym. (2016) on saanut metsäaineistoilta tuotetusta fotogrammetrisesta hyperspektripistepilvestä lupaavia DTM:ä luokittelemalla pistepilven ensin k-means luokittelulla eri luokkiin (Oliveira ym., 2016). Wallace ym. (2016) osoittaa, että puiden latvusto on mahdollista mallintaa fotogrammetrisesti. Myös tässä tutkimuksessa on huomattu, että latvuston mallinnus onnistuu fotogrammetrisiltä pistepilviltä, kun prosessoinnin asetukset valitaan oikein. Näin ollen metsän CHM:n laskeminen on mahdollista käyttämällä laserpistepilvestä tuotettua DTM:ää ja fotogrammetrisesti tuotettua DSM:ää (Wallace ym., 2016; Ota ym., 2015).

RGB-kuvien GNSS paikannuksen tarkkuutta voidaan parantaa hieno säätämällä jälkilaskentaprosessia. Tällöin päästäisiin lähelle FPI-kuvien GNSS:n paikannuksen tarkkuutta (Taulukko 21). Lisäksi molempien kameroiden kuvien GNSS:n paikannuksen tarkkuutta voidaan entisestään parantaa suorittamalla ”Lever-arm” korjaus pelkän Z-koordinaatin sijaan X-, Y- ja Z-koordinaateille (Turner ym., 2014, Dakiir ym., 2016). Mustilassa FPI-blokkien tapauksessa osoitettiin, että kuvien sijaintitietojen ollessa hyvät (3D-keskivirhe = 37,08 cm), parantaa se selkeästi blokin sisäistä tarkkuutta kun GCP:t eivät peitä koko tarkasteltavaa aluetta. Vihdin FPI-blokkien tapauksessa osoitettiin, että kuvien GNSS:n paikannuksen tarkkuuden ollessa erinomaiset (3D-keskivirhe = 11,06 cm) on pelkillä kuvien GNSS-sijaintitiedoilla georeferoidulla blokilla mahdollista saavuttaa pienempi 3D-keskivirhe kuin viidellä GCP:llä sijoitettuna yksi jokaiseen nurkkaan ja yksi keskelle aluetta (Kuva 26). Kuitenkin GNSS-sijaintitiedon luotettavuus on huomattavasti huonompi kuin GCP:iden ja GNSS-järjestelmä vaatii erittäin tarkan kalibroinnin.

Ortomosaiikkien ja korkeusmallien koordinaattivirheiden ei tyypillisesti ilmoiteta SfM-ohjelmissa, vaan ne tulee määrittää ulkoisilla ohjelmilla, kuten QGIS, tarkistuspisteitä käyttämällä. Kuitenkin esimerkiksi Photoscanista saa tulostettua GCP:iden koordinaattivirheet, jotka ovat useissa tapauksissa hyvin lähellä ortomosaiikkien ja korkeusmallien koordinaattivirheitä. Näitä ja tarkennettuja kameroiden sisäisen kalibroinnin parametreja tarkastelemalla pystytään arvioimaan tulevien ortomosaiikkien ja korkeusmallien absoluuttisia koordinaattien tarkkuuksia. Tämä ei kuitenkaan takaa ortomosaiikkien ja korkeusmallien tarkkuutta, minkä vuoksi erillinen koordinaattivirhe-estimointi tulee suorittaa. Kuvassa 29 on esitelty Vihdin kolmen eri pituuspeiton RGB-blokkien blokkitasoituksessa määritetyt koordinaattikeskivirheet (kaava 9) ja 3D-keskivirhe (kaava 10) ja Kuvassa 30 vastaavien blokkien ortomosaiikeilta ja DSM:ltä mitatut absoluuttiset koordinaattivirheet. Blokkitasoituksessa määritetyt koordinaattikeskivirheet ovat hyvin konsistentteja ortomosaiikeilta ja DSM:ltä saatuihin virheisiin nähden. Vihdin RGB-blokkien GSD oli 3,1 cm ja FPI-blokkien GSD oli 14,1 cm. Parhaan RGB-kuvablokin blokkitasoituksessa määritetyt koordinaattikeskivirheet oli X-tasossa 1,0 pikseliä, Y-tasossa alle 0,8 pikseliä ja korkeudessa 1,5 pikseliä ($RMSE_x = 3,0$ cm, $RMSE_y = 2,3$ cm, $RMSE_z = 4,5$ cm). Parhaan FPI-kuvablokin koordinaattikeskivirheet oli X- ja Y-tasoissa alle 0,2 pikseliä ja Z-tasossa 0,6 pikseliä ($RMSE_x = 2,8$ cm, $RMSE_y = 1,8$ cm, $RMSE_z = 8,3$ cm). Parhaan käytännöllisen RGB-kuvablokin blokkitasoituksessa määritetyt koordinaattikeskivirheet oli X- ja Y-tasoissa noin 1,0 pikseliä ja Z-tasossa hieman yli 1,5 pikseliä ($RMSE_x = 3,3$ cm, $RMSE_y = 3,1$ cm ja $RMSE_z = 4,9$ cm). Parhaan käytännöllisen FPI-kuvablokin koordinaattikeskivirheet oli X- ja Y-tasoissa noin 0,2 pikseliä ja korkeudessa 0,7 pikseliä ($RMSE_x = 2,4$ cm, $RMSE_y = 2,3$ cm, $RMSE_z = 9,5$ cm). Parhaan käytännöllisen RGB-kuvablokin ortomosaiikin absoluuttiset tarkkuudet olivat X-tasossa alle 1,3 pikseliä, Y-tasossa 1,0 pikseliä ja DSM:n absoluuttinen korkeustarkkuus oli alle 1,7 pikseliä ($RMSE_x = 4,0$ cm, $RMSE_y =$

2,8 cm, $RMSE_z = 5,4$ cm). Parhaan käytännöllisen FPI-kuvablokin ortomosaiikin absoluuttiset tarkkuudet olivat X-tasossa 0,6 pikseliä ja Y-tasossa 0,8 pikseliä sekä DSM:n absoluuttinen korkeustarkkuus oli alle 0,8 pikseliä ($RMSE_x = 8,3$ cm, $RMSE_y = 11,3$ cm, $RMSE_z = 10,8$ cm). Käytännöllisellä tässä tarkoitetaan blokkia, jota on tuettu minimi määrällä tukipisteitä niin, että jokaisessa nurkassa ja keskellä on yksi tukipiste. Taulukossa 9 on esitelty muissa tutkimuksissa saatuja ortomosaiikkien ja DSM:n tarkkuuksia. Niissä parhaan RGB-kuvablokin ortomosaiikin absoluuttinen tarkkuus X- ja Y-tasoissa oli noin 4 pikseliä ja DSM:n absoluuttinen korkeustarkkuus noin 2 pikseliä ($RMSE_x = 3,7$ cm, $RMSE_y = 4,5$ cm ja $RMSE_z = 4,4$ cm) (Lucieer ym., 2014b).

Mustilan alueella ei ollut mitattuja GCP:itä riittävästi, minkä vuoksi tarkastuspisteiden avulla ei pystytty määrittämään ortomosaiikkien ja korkeusmallien absoluuttisia koordinaattivirheitä. Vaihtoehtoisesti Mustilan eri FPI-blokkien DSM:ä ja DTM:ä vertailtiin parhaaseen FPI-blokkii eli blokkiin, jossa oli suurimmat kuvapeitot (Taulukko 19). Paras FPI-blokki valikoitui vertaamalla kaikki FPI-blokkeja yksitellen Mustilan RGB-blokkiin. Mustilan RGB-blokin tarkkuus taas varmennettiin vertaamalla sitä MML:n laserpistepilvestä tuotettuun DSM:ään (Kuva 31a). FPI-blokkien DSM:n ja DTM:n vertailussa huomattiin, että korkeammilla peittoosenteilla saatiin tarkempia blokkeja aikaiseksi. FPI-blokit, jotka oli tuettu pelkillä GCP:illä deformatuivat lounaiskulmassa olevalla alueella, jossa ei GCP:itä ollut (Liite 4). GNSS-paikannuksella määritetyt kuvien sijaintitietojen käyttö esti deformaation syntymisen. Pelkällä ”gps”:llä tuetut blokit olivat kuitenkin muualla blokin alueella tarkkuudeltaan heikompia kuin pelkillä gcp:illä tuetut blokit. Parhaimpiin tarkkuuksiin päästiin GCP:illä ja kuvien jälkilasketuilla sijaintitiedoilla tuetuissa blokeissa kaikissa eri blokkivariaatioiden tapauksissa. Blokkien, joita oli tuettu päädyissä olevilla kuvilla sekä poikittaislinjalla tai jommallakummalla korkeusmallit olivat tarkempia kuin ilman niitä olevien blokkien.. Tällä menetelmällä ei kuitenkaan saada DSM:n ja DTM:n absoluuttisia koordinaattivirheitä mutta sillä nähdään, jos blokki on deformatunut.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin myös pystytäänkö kasvillisuuden korkeusmalleja (CHM) hyödyntää manuaalisesti mitattujen kasvillisuuden korkeuksien sijaan biomassojen määrittämisessä. Tätä tutkittiin ohrapeltoaineistoilla vertaamalla eri menetelmillä toteutettuja CHM:stä laskettuja kasvillisuuden korkeuksia (PH) manuaalisesti mitattuihin PH_{ref} :hin. Lisäksi näitä verrattiin pellolta kerättyihin tuore- ja kuivabiomassoihin. Eri kuvapeitoilla tuotetuista RGB-kuvablokeista laskettiin CHM:t ja näitä verrattiin myös referensseihin. Tässä tutkimuksessa metsäaineistosta ei tuotettu CHM:ää, koska saatavilla ei ollut referenssikorkeuksia tai biomassoja alueelta. Lisäksi metsäaineistolle ei saatu laskettua riittävän luotettavaa DTM:ää automaattisella maanpintaluokittelulla metsäaineistolle. Kuitenkin, kuten edellä jo mainittiin, on tiheillä metsäisillä alueilla kannattavaa käyttää laserkeilauksella tuotettua DTM:ää CHM:n tuottamisessa (Wallace ym., 2016; Ressler ym., 2016; Lisein ym., 2013).

Taulukosta 26 nähdään, että paras selitysaste PH_{ref} kanssa saatiin RGB-kuvilta tuotetulla PH_{CHM1} :lla ($R^2 = 0,87$). Tällä saatiin myös parhaat selitysasteet tuorebiomassan ($R^2 = 0,87$) ja kuivabiomassan ($R^2 = 0,84$) kanssa. PH_{ref} ja tuorebiomassan välinen $R^2 = 0,85$ sekä PH_{ref} ja kuivabiomassan välinen $R^2 = 0,89$. FPI-kuvien PH_{CHM3} suoriutui heikommin, selitysasteen ollessa 0,24 PH_{ref} ja PH_{CHM3} välillä, 0,34 tuorebiomassan ja PH_{CHM3} välillä ja 0,29 kuivabiomassan ja PH_{CHM3} välillä. Tämä johtui mm. FPI-kameran sensorin huonommasta spatiaalisesta erotuskyvystä ja dynamiikasta. Kuvien kuvapeitolla 88 % saatiin parhaat selitysasteet referenssi korkeuden ja biomassojen välille (Taulukko 27). Tässä osoitettiin, että ainakin RGB-kuvilta tuotettua CHM:ää pystytään käyttämään manuaalisesti mitat-

tujen kasvillisuuden korkeuksien sijaan biomassojen estimoinnissa. Bendig ym. (2015b) on tutkittu vastaavaa RPAS-laitteistoilla 50 metristä kerätyiltä RGB-kuvablokeilta ohra ja riisipelloilla Kiinassa. Tutkimuksessa PH_{CHM} ja PH_{ref} välille saatiin selityssasteeksi 0,92, PH_{CHM} ja tuorebiomassan välille saatiin selityssasteeksi 0,81, sekä PH_{CHM} ja kuivabiomassan välille saatiin selityssasteeksi 0,82. Nämä tulokset tukevat erinomaisesti tässä työssä saatuja tuloksia. Terrestiaalisella laserkeilauksella ovat Tilly ym. (2014) ja Phan ym. (2016) saaneet riisipeltojen mittauksessa PH_{CHM} ja PH_{ref} välille $R^2 = 0,86$, sekä (Phan ym., 2016) PH_{CHM} ja kuivabiomassan välille $R^2 = 0,90$. Terrestiaalisella laserkeilauksella ei kuitenkaan saada kuvattua yhtä laajoja alueita yhtä nopeasti kuin fotogrammetrisesti RPAS-laitteistoilla. Täten fotogrammetrisesti tuotetuilla CHM:llä on potentiaalia ainakin viljakasvien korkeuksien määrittämisessä.

Tuulella huomattiin olevan vaikutusta CHM:n ja kasvillisuuden korkeuden määrittämiseen (Bendig, 2015a). Parkes ym. (2016) havaitsi, että myös varjot johtivat alhaisempiin CHM:n kasvuston korkeuksiin. Tässä tutkimuksessa saatiin FPI-kuvablokeilta tuotetulla CHM:llä korkeampia arvoja kuin RGB-kuvablokilta tuotetulla CHM:llä tai referenssi mittauksella. Bendig ym. (2015b) mainitsee, että PH_{CHM} voisi tuottaa parempia tuloksia käyttämällä näytteenottoruutujen pikseleiden keskiarvon sijaan maksimiarvoa. Tässä tutkimuksessa testattiin tätä, mutta käyttämällä keskiarvoa saatiin paras selityssaste (0,75) PH_{CHM} ja PH_{ref} välille. Vastaavat selityssasteet minimiarvolla oli 0,74 ja huonoin selityssaste 0,69 saatiin maksimiarvolla.

PH_{ref} korreloi erittäin hyvin tuore- ja kuivabiomassojen kanssa, koska näytteenottoruudut oli valittu mahdollisimman homogeenisiksi. Referenssi korkeuden mittausta vain yhdestä kohdasta näytteenottoruutua ei kuitenkaan toimi yhtä hyvin, jos näytteenottoruudun kasvit ovat heterogeenisiä (Bendig, 2015a). Parempi tapa näytteenottoruudun korkeuden määrittämiseen olisi mitata kasvuston korkeus jokaisen näytteenottoruudun sisältä 0.05 m välein, jotta heterogeenisuus saadaan paremmin esiin (Bendig ym., 2015b).

Parantamalla GSD:tä 0.06 m:stä aina 0.01 m:in saataisiin mahdollisesti parempia selityssasteita CHM:n korkeuden ja referenssi korkeuden välille (Bendig ym., 2015b). Harwin ja Lucieer (2012) suosittelee myös keräämään kuvat eri kuvakulmista paremman lopputuloksen saavuttamiseksi. Jatkotutkimuksessa voitaisiin eri perspektiiveistä otettujen kuvien vaikutusta CHM:n tarkkuuteen määrittää. RPAS-järjestelmään voitaisiin asentaa kaksi samanlaista RGB-kameraa, joista toisella kerätään pystykuvia ja toisella viistokuvia. Täten aineistojen keruuseen kuluva aika ei lisääntyisi. Kuitenkin geometriseen prosessointiin kuluva aika lisääntyy kuvia lisättäessä ja kuten edellä on osoitettu liian tiheillä kuvapeitoilla saadaan huonompi maastomallien tarkkuus. Tämä tulee ottaa huomioon viisto- ja pystykuvien geometrisessa prosessoinnissa.

Lähteet

- Aasen, H.; Burkart, A.; Bolten, A.; Bareth, G., 2015. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: From camera calibration to quality assurance. vol. 108, s. 245-259. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.08.002>.
- Aasen, H.; Bendig, J.; Bolten, A.; Bennertz, S.; Willkomm, M.; Bareth, G., 2014. Introduction and preliminary results of a calibration for full-frame hyperspectral cameras to monitor agricultural crops with UAVs. The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XL-7. Doi:10.5194/isprsarchives-XL-7-1-2014.
- AgiSoft, 2016. AgiSoft Photoscan Professional (Versio 1.2.5) (Ohjelma). Saatavilla: <http://www.agisoft.com/downloads/installer/>. [Viitattu 18.10.2016].
- Anders, N.; Masselink, R.; Keesstra, S.; Suomalainen, J., 2013. High-Res Digital Surface Modeling using Fixed-Wing UAV-based Photogrammetry. Saatavilla: [Geomorphometry.org/Anders2013](http://geomorphometry.org/Anders2013).
- Bareth, G.; Aasen, H.; Bendig, J.; Gnyp, M. L.; Bolten, A.; Jung, A.; Michels, R.; Soukkamäki, J.; 2015. Low-Weight and UAV-based Hyperspectral Full-frame Cameras for Monitoring Crops: Spectral Comparison with Portable Spectroradiometer Measurements. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, vol. 1. Doi:10.1127/pfg/2015/0256.
- Bendig, J. V., 2015a. Unmanned aerial vehicles (UAVs) for multi-temporal crop surface modelling – A new method for plant height and biomass estimation based on RGB-imaging. Väitöskirja. University of Cologne. Saatavilla: http://kups.ub.uni-koeln.de/6018/1/Bendig_PhD_2014_Ort%26Datum_final_noCV.pdf.
- Bendig, J.; Yu, K.; Aasen, H.; Bolten, A.; Bennertz, S.; Broscheit, J.; Gnyp, M. L.; Bareth, G., 2015b. Combining UAV-based Crop Surface Models, Visible and Near Infrared Vegetation Indices for Biomass Monitoring in Barley. International Journal of Earth Observation and Geoinformation, vol. 39, s. 79-87. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.012>.
- Bendig, J.; Bolten, A.; Bennertz, S.; Broscheit, J.; Eichfuss, S.; Bareth, G., 2014a. Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CHMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging. Remote Sensing, vol. 6, s. 10395-10412. Doi:10.3390/rs61110395.
- Bendig, J.; Willkomm, M.; Tilly, N.; Gnyp, M. L.; Bennertz, S.; Lenz-Wiedemann, T. I.S.; Bareth, G., 2014b. Very High Resolution Crop Surface Models (CHMs) from UAV-based Stereo Images for Rice Growth Monitoring In Northeast China. GIS Science, vol. 1, s. 1-9.
- Bendig, J.; Bolten, A.; Bareth, G., 2013. UAV-based Imaging for Multi-Temporal, very high Resolution Crop Surface Models to monitor Crop Growth Variability. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, vol. 6, s. 551-562. Doi: 10.1127/1432-8364/2013/0200.

Bendig, J.; Bolten, A.; Bareth, G., 2012. INTRODUCING A LOW-COST MINI-UAV FOR THERMAL- AND MULTISPECTRAL-IMAGING. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 39-B1. Doi:10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-345-2012.

Berveglieri, A.; Tommaselli, A. M. G., 2016. EXTERIOR ORIENTATION OF HYPER-SPECTRAL FRAME IMAGES COLLECTED WITH UAV FOR FOREST APPLICATIONS, The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XL-3/W4. Doi:10.5194/isprsarchives-XL-3-W4-45-2016.

Bundler, 2016. Bundler (Ohjelma). Saatavilla: <https://www.cs.cornell.edu/~snaveily/bundler/>. [Viitattu 20.11.2016].

Büttner, A.; Röser, H.-P., 2014. Hyperspectral Remote Sensing with the UAS “Stuttgarter Adler” – System Setup, Calibration and First Results. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, vol. 4, s. 0265-0274. Doi:10.1127/1432-8364/2014/0217.

Champion, N. ja Everaerts, J, 2009. NEWPLATFORMS – Unconventional Platforms (Unmanned Aircraft Systems) for Remote Sensing. European Spatial Data Research.

Colomina, I.; Molina, P., 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 92, s. 79-97. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.

Daakir, M.; Pierrot-Deseilligny, M.; Bossier, P.; Pichard, F.; Thom, C.; Rabot, Y., 2016. STUDY OF LEVER-ARM EFFECT USING EMBEDDED PHOTOGRAMMETRY AND ON-BOARD GPS RECEIVER ON UAV FOR METROLOGICAL MAPPING PURPOSE AND PROPOSAL OF A FREE GROUND MEASUREMENTS CALIBRATION PROCEDURE. The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XL-3/W4, s. 10-12. Doi:10.5194/isprsarchives-XL-3-W4-65-2016.

Eisenbeiß, H., 2009. UAV Photogrammetry. Väitökirja. Institute of Geodesy and Photogrammetry. ISSN 0252-9335. ISBN 978-3-906467-86-3 Saatavilla: http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/blaue_Berichte_PDF/105.pdf. [Viitattu: 19.11.2016].

Everglade, M., 2015. Samsung 16mm F2.4 Review. Saatavilla: <https://matteverglade.com/lenses/samsung-16mm-f2-4-review/>. [Viitattu: 11.01.2017].

Fraser C.S., 1997. Digital camera self-calibration. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 52, s. 149-159. Doi:10.1016/S0924-2716(97)00005-1.

Guerra, J.; González-Ferreiro, E.; Sarmiento, A.; Silva, J. E. P; Nunes, A.; Correia, A.; Fontes, L.; Tomé, M.; Varela, R. D., 2016. Using high resolution UAV imagery to estimate tree variables in Pinus pinea plantation in Portugal. ResearchGate. Saatavilla: <https://www.researchgate.net/publication/305600867>.

Grenzdörffer, G. J.; Engel, A.; Teichert, B., 2008. THE PHOTOGRAMMETRIC POTENTIAL OF LOW-COST UAVs IN FORESTRY AND AGRICULTURE. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 37-B1.

- Hakala, T.; Honkavaara, E.; Saari, H.; Mäkynen, J.; Kaivosoja, J.; Pesonen, L.; Pölönen, I., 2013. Spectral imaging from UAVs under varying illumination conditions. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-1/W2. Doi:10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-189-2013.
- Harwin, S.; Lucieer, A., 2012. Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sensing*, vol. 4, s. 1573-1599, Doi:10.3390/rs4061573. ISSN 2072-4292.
- Honkavaara, E.; Rosnell, T.; Oliveira, R.; Tommaselli, A., 2017. Band registration of tunable frame format hyperspectral UAV imagers in complex scenes. *Lähetetty käsikirjoitus*.
- Honkavaara, E.; Eskelinen, M. A.; Pölönen, I.; Saari, H.; Ojanen, H.; Mannila, R.; Holmlund, C.; Hakala, T.; Litkey, P.; Rosnell, T.; Viljanen, N.; Pulkkanen, M., 2016a. Remote Sensing of 3-D Geometry and Surface Moisture of a Peat Production Area Using Hyperspectral Frame Cameras in Visible to Short-Wave Infrared Spectral Ranges Onboard a Small Unmanned Airborne Vehicle (UAV). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Doi:10.1109/TGRS.2016.2565471.
- Honkavaara, H.; Hakala, T.; Nevalainen, O.; Viljanen, N.; Rosnell, T.; Khoramshahi, E.; Oliveira, R.; Tommaselli, A., 2016b. GEOMETRIC AND REFLECTANCE SIGNATURE CHARACTERIZATION OF COMPLEX CANOPIES USING HYPERSPECTRAL STEREOSCOPIC IMAGES FROM UAV AND TERRESTRIAL PLATFORMS. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XLI-B7. Doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B7-77-2016.
- Honkavaara, E.; Saari, H.; Kaivosoja, J.; Pölönen, I.; Hakala, T.; Litkey, P.; Mäkynen, J.; Pesonen, L., 2013. Processing and Assessment of Spectrometric, Stereoscopic Imagery Collected Using a Lightweight UAV Spectral Camera for Precision Agriculture. *Remote Sensing*, vol. 5, s. 5006-5039. Doi:10.3390/rs5105006. ISSN 2072-4292.
- Honkavaara, E.; Hakala, T.; Markelin, L.; Rosnell, T.; Saari, H.; Mäkynen, J., 2012. A Process for Radiometric Correction of UAV Image Blocks. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, vol. 2, s. 115 - 127. Doi: <https://doi.org/10.1127/1432-8364/2012/0106>.
- Jensen, J. L. R.; Mathews, A. J., 2015. Assessment of Image-Based Point Cloud Products to Generate a Bare Earth Surface and Estimate Canopy Heights in a Woodland Ecosystem. *Remote Sensing*, vol. 8. Doi:10.3390/rs8010050.
- Jeong, S.; Ko, J.; Kim, M.; Kim, J., 2016. Construction of an unmanned aerial vehicle remote sensing system for crop monitoring. *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 10. Doi:10.1117/1:JRS.10.026027.
- Kraus, Karl, 1993. *Photogrammetry: Fundamentals and standard processes*. vol. 1. Dümmler. ISBN 3-427-78684-6.
- Kelcey, J.; Lucieer, A., 2012. Sensor Correction of a 6-Band Multispectral Imaging Sensor for UAV Remote Sensing. *Remote Sensing*, vol. 4, s. 1462-1493. Doi:10.3390/rs4051462. ISSN 2072-4292.

Lisein, J.; Pierrot-Deseilligny, M.; Bonnet, S.; Lejeune, P., 2013. A Photogrammetric Workflow for the Creation of a Forest Canopy Height Model from Small Unmanned Aerial System Imagery. *Forests*, vol. 4, s. 922-944. Doi:10.3390/f4040922. ISSN 1999-4907.

LOWE, D.G, 1999. Object recognition from local scale-invariant features. *Computer vision. The proceedings of the seventh IEEE international conference on*, vol. 2, s. 1150-1157.

Lucieer, A.; Malenovsky, Z.; Veness, T.; Wallace, L., 2014a. HyperUAS – Imaging spectroscopy from a multirotor unmanned aircraft system. *Journal of Field Robotics*, vol. 31 (4), s. 571-590. Doi:10.1002/rob.21508.

Lucieer, A.; Turner D.; King, D. H.; Robinson, S. A., 2014b. Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to capture micro-topography of Antarctic moss beds. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 27 (Part a), s. 53-62. Doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.011>.

MML, 2016a. Kansallisen maastotietokannan laatumalli – Ilma- ja ortokuvat (versio 1.2). Saatavilla: <http://kmtk.maanmittauslaitos.fi/maastotietojen-laatu/C3%A4rjestelm%C3%A4-kmtk-laatu>. [Viitattu 09.01.2017].

MML, 2016b. Maanmittauslaitoksen avoimien aineistojen tiedostopalvelu. Saatavilla: <https://tiedostopalvelu.maanmittauslaitos.fi/tp/kartta>. [Viitattu 11.11.2016].

MML, 2016c. Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineisto. Saatavilla: <http://www.maanmittauslaitos.fi/digituotteet/laserkeilausaineisto>. [Viitattu 11.11.2016].

Madden, M.; Jordan, T.; Bernardes, S.; Cotton, D. L.; O'Hare, N.; Alessandro, P., 2015. Unmanned Aerial Systems and Structure from Motion Revolutionize Wetlands Mapping. *ResearchGate*. Saatavilla: <https://www.researchgate.net/publication/274720467>.

Markelin, L; Honkavaara, E.; Näsi, R.; Nurminen, K.; Hakala, T., 2014. GEOMETRIC PROCESSING WORKFLOW FOR VERTICAL AND OBLIQUE HYPERSPECTRAL FRAME IMAGES COLLECTED USING UAV. *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-3. Doi:10.5194/isprsarchives-XL-3-205-2014.

MathWorks, 2015. MATLAB (Versio 2015b) (Ohjelma). Saatavilla: https://www.mathworks.com/products/new_products/release2015b.html. [Viitattu 18.11.2016].

Mitchell, J.; Anderson, M. O., 2012. Unmanned aerial vehicle (UAV) hyperspectral remote sensing for dryland vegetation monitoring. *IEEE Xplore Digital Library*. Doi:10.1109/WHISPERS.2012.6874315.

Mustila, 2016. Arboretum Mustilan kansallispuiston internetsivut. Saatavilla: <http://www.mustila.fi/>. [Viitattu 13.11.2016].

Mäkynen, J.; Holmlund, C.; Saari, H; Ojala, K; Antila, T., 2011. Unmanned aerial vehicle (UAV) operated megapixel spectral camera. *SPIE*, vol. 8186. Doi:10.1117/12.897712.

Nevalainen, O.; Honkavaara, E.; Tuominen, S.; Viljanen, N.; Hakala, T.; Yu, Xiaowei; Hyypä, J.; Saari, H.; Pölönen, I.; Imai, N.N.; Tommaselli, M.G., 2016. Individual tree detection and classification with UAV-based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging. *Remote Sensing*, vol 8. Hyväksytty käsikirjoitus. ISSN 2072-4292.

NVS, 2016. NVS Technologies NV08C-CSM. Saatavilla: <http://www.nvs-gnss.com/products/receivers/item/2-nv08c-csm.html>. [Viitattu 10.10.2016].

Näsi, R.; Honkavaara, E.; Lyytikäinen-Saarenmaa, P.; Blomqvist, M.; Litkey, P.; Hakala, T.; Viljanen, N.; Kantola, T.; Tanhuanpää, T.; Holopainen, M., 2015. Using UAV-Based Photogrammetry and Hyperspectral Imaging for Mapping Bark Beetle Damage at Tree-Level. *Remote Sensing*, vol. 7, s. 15467-15493. Doi:10.3390/rs71115467. ISSN 2072-4292.

Oliverita, R. A.; Tommaselli, A. M. G; Honkavaara, E., 2016a. GEOMETRIC CALIBRATION OF A HYPERSPECTRAL FRAME CAMERA. *The Photogrammetric Record*. Doi: 10.1111/phor.12153.

Oliveira, R. A.; Tommaselli, A. M. G.; Honkavaara, E., 2016b. Using Hyperspectral Frame Images from Unmanned Airborne Vehicle for Detailed Measurement of Boreal Forest 3D Structure. *IOP Science*. Doi: 10.1088/1755-1315/44/4/042029.

Ota, T.; Ogawa, M; Shimizu, K.; Kajisa, T.; Mizoue, N.; Yoshida, S.; Takao, G.; Hirata, Y.; Furuya, N.; Sano, T.; Sokh, H.; Ma, V.; Ito, E.; Toriyama, J.; Monda, Y.; Saito, H.; Kiyono, Y.; Chann, S.; Ket, N., 2015. Aboveground Biomass Estimation Using Structure from Motion Approach with Aerial Photographs in a Seasonal Tropical Forest. *Forests*, vol. 6, s. 3882-3898. Doi:10.3390/f6113882. ISSN 1999-4907.

Parkes, S. D.; McCabe, M. F.; Al-Mashhawari, S. K.; Rosas, J., 2016. Reproducibility of crop surface maps extracted from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) derived Digital Surface Maps. *SPIE*, vol. 9998. Doi:10.1117/12.2241280.

Phan, A. T. T.; Takahashi, A.; Higuchi, Y., 2016. Method for estimating rice plant height without ground surface detection using laser scanner measurement. *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 10. Doi:10.1117/1.JRS.10.046018.

Photometrix, 2016. Photometrix iWitness (versio 3) (Ohjelma). Saatavilla: <http://www.photometrix.com.au/iwitness/>. [Viitattu 15.11.2016].

QGIS, 2016. QGIS (Versio 2.18.2) (Ohjelma). Saatavilla: <http://www.qgis.org/fin/site/>. [Viitattu 28.12.2016].

Rahmayudi, A.; Rizaldy, A., 2016. COMPARISON OF SEMI AUTOMATIC DTM FROM IMAGE MATCHING WITH DTM FROM LIDAR. *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol XLI-B3. Doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B3-373-2016.

Ressl, C.; Brockmann, H.; Mandlbürger, G.; Pfeifer, N, 2016. Dense Image Matching vs. Airborne Laser Scanning – Comparison of two methods for deriving terrain models. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, vol. 2, s. 57-73. Doi:10.1127/pfg/2016/0288.

Rikola Ltd., 2016. Rikola Ltd. Hyperspektrikamera. Saatavilla: <http://www.rikola.fi/products/hyperspectral-camera/>. [Viitattu 11.11.2016].

Rosnell, T.; Honkavaara, E., 2012. Point Cloud Generation from Aerial Image Data Acquired by a Quadcopter Type Micro Unmanned Aerial Vehicle and a Digital Still Camera. *Sensors*, vol. 12, s. 453-480. Doi:10.3390/s120100453.

RTKLIB, 2013. RTKLIB (Versio 2.4.2) (Ohjelma). Saatavilla: <http://www.rtklib.com/>. [Viitattu: 16.12.2016].

Saari, H.; Pölönen I.; Salo, H.; Honkavaara, E.; Hakala, T.; Holmlund, C.; Mäkynen J.; Mannila, R.; Antila, T.; Akujärvi, A., 2013. Miniaturized hyperspectral imager calibration and UAV flight campaigns. *SPIE*, vol. 8889. Doi:10.1117/2028972.

Saari, H.; Pellikka, I.; Pesonen, L.; Tuominen, S.; Heikkilä, J.; Holmlund, C.; Mäkynen, J.; Ojala, K.; Antila, T., 2011. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) operated spectral camera system for forest and agriculture applications. *SPIE*, vol. 8174. Doi:10.1117/12.897585.

Saari, H.; Aallos, V.-V.; Akujärvi, A.; Antila, T.; Holmlund, C.; Kantojärvi, U.; Mäkynen, J.; Ollila, J., 2009. NOVEL MINIATURIZED HYPERSPECTRAL SENSOR FOR UAV AND SPACE APPLICATIONS. *SPIE*, vol. 7474. Doi:10.1117/12.830284.

Salami, E.; Barrado, C.; Pastor E., 2014. UAV Flight Experiments Applied to the Remote Sensing of Vegetated Areas. *Remote Sensing*, vol. 6, s. 11051-11081. Doi:10.3390/rs61111051.

Sima, A. A.; Baeck, P.; Nuyts, D.; Delalieux, S.; Livens, S.; Blommaert, J.; Delauré, B.; Boonen, M., 2016. COMPACT HYPERSPECTRAL IMAGING SYSTEM (COSI) FOR SMALL REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SYSTEMS (RPAS) – SYSTEM OVERVIEW AND FIRST PERFORMANCE EVALUATION RESULTS. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XLI-B1. Doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B1-1157-2016.

Suomalainen, J.; Anders, N.; Iqbal, S.; Roerink, G.; Franke, J.; Wenting, P.; Hünninger, D.; Bartholomeus, H.; Becker, R.; Kooistra, L., 2014. *Remote Sensing*, vol. 6, s. 11013-11030. Doi:10.3390/rs61111013. ISSN 2072-4292.

Tilly, N.; Hoffmeister, D.; Cao, Q.; Huang, S.; Lenz-Wiedemann, V.; Miao, Y.; Bareth, G., 2014. Multitemporal crop surface models: accurate plant height measurement and biomass estimation with terrestrial laser scanning in paddy rice. *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 8. Doi:10.1117/1JRS.8.083671.

Tommaselli, A. M. G.; Berveglieri, A.; Oliveira, R. A.; Nagai, L. Y.; Honkavaara, E., 2016. ORIENTATION AND CALIBRATION REQUIREMENTS FOR HYPERSPECTRAL IMAGING USING UAVs: A CASE STUDY. *The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-3/W4, s. 10-12. Doi:10.5194/isprsarchives-XL-3-W4-109-2016.

Trafi, 2016. Suomen Liikenteen turvallisuusvirasto. Saatavilla: <http://www.trafi.fi>. [Viitattu 15.12.2016].

- Trimnet, 2016. Trimblen ja GEOTRIMin Trimnet GPS/GNSS (Web-palvelu). Saatavilla: <http://www.trimnet.fi/>. [Viitattu: 11.11.2016].
- Turner, D.; Lucieer, A.; Wallace, L., 2014. Direct Georeferencing of Ultrahigh-Resolution UAV Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 5. Doi:10.1109/TGRS.2013.2265295.
- Turner, D; Lucieer, A.; Watson, C., 2012. An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Remote Sensing*, vol. 4, s. 1392-1410. Doi:10.3390/rs4051392. ISSN 2072-4292.
- Uto, K.; Seki, H.; Saito, G.; Kosugi, Y.; Komatsu, T., 2015. Development of a low-cost, lightweight hyperspectral imaging system based on a polygon mirror and compact spectrometers. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, s. 861-875.
- Vectornav, 2016. Vectornav VN-100 Rugged IMU / AHRS. Saatavilla: <http://www.vectornav.com/products/vn100-rugged>. [Viitattu 08.10.2016].
- Velodyne, 2016. Velodyne LiDAR PUCK VLP-16. Saatavilla: <http://velodynelidar.com/vlp-16.html>. [Viitattu 08.12.2016].
- Wallace, L.; Lucieer, A.; Malenovský, Z.; Turner, D.; Vopěnka, P, 2016. Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Forests*, vol. 7. Doi:10.3390/f7030062.
- WU, C.; Agarwal, S.; Curless, B.; Seitz, S. M., 2011. Multicore bundle adjustment. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE Conference on*, s. 3057-3064.

Taulukko 28 Mustilan RGB-kuville eri kuvasovituksen parametreilla toteutettujen blokkiratkaisujen kame-roiden sisäiset parametrit (IOP:t) ennen sädekimputasoitusta.

"Key point limit"/"Tie point limit"	40000/4000	40000/4000/gene ric	40000/10000	40000/20000	40000/0	80000/0	120000/0
C	16,6999	16,6557	16,6604	16,6691	16,6693	16,6662	16,6637
XP	-0,0059	-0,0073	-0,0075	-0,0048	-0,0051	-0,0047	-0,0042
YP	-0,1646	-0,1587	-0,1581	-0,1585	-0,1585	-0,1582	-0,1581
K1	6,13E-05	6,59E-05	6,61E-05	6,47E-05	6,47E-05	6,50E-05	6,51E-05
K2	-3,80E-07	-3,83E-07	-3,89E-07	-3,87E-07	-3,87E-07	-3,86E-07	-3,87E-07
K3	7,48E-10	7,54E-10	7,77E-10	7,73E-10	7,73E-10	7,69E-10	7,72E-10
P1	-3,59E-06	-1,62E-06	-1,23E-06	-3,52E-06	-3,37E-06	-3,47E-06	-3,85E-06
P2	5,59E-05	5,04E-05	5,03E-05	5,05E-05	5,04E-05	5,00E-05	4,98E-05

Taulukko 29 Mustilan RGB-kuville eri kuvasovituksen parametreilla toteutettujen blokkiratkaisujen kame-roiden sisäiset parametrit (IOP:t) sädekimputasoituksen jälkeen.

"Key point limit"/"Tie point limit"	40000/4000	40000/4000gene ric	40000/10000	40000/20000	40000/0	80000/0	120000/0
C	16,6933	16,689	16,6849	16,6844	16,6841	16,6793	16,6798
XP	-0,0066	-0,006	-0,0076	-0,0056	-0,0053	-0,005	-0,0034
YP	-0,1669	-0,1667	-0,1628	-0,1591	-0,1593	-0,1591	-0,1594
K1	6,01E-05	6,01E-05	6,18E-05	6,20E-05	6,19E-05	6,25E-05	6,22E-05
K2	-3,85E-07	-3,83E-07	-3,92E-07	-3,89E-07	-3,88E-07	-3,89E-07	-3,89E-07
K3	7,78E-10	7,73E-10	8,03E-10	7,94E-10	7,86E-10	7,93E-10	7,96E-10
P1	-1,54E-06	-1,74E-06	-7,01E-07	-2,66E-06	-2,75E-06	-3,21E-06	-4,29E-06
P2	5,71E-05	5,70E-05	5,23E-05	4,77E-05	4,72E-05	4,73E-05	4,77E-05

Taulukko 30 Mustilan RGB- ja eri FPI-blokkien kameroiden (s1 = sensori 1; s2 = sensori 2) sisäiset parametrit (IOP:t) sädekimpputasoituksen jälkeen. Eri FPI-blokkivariaatiot ovat: 1) kaikki lentolinjat, 2) kaikki lentolinjat ja joka toinen kuutio, 3) joka toinen lentolinja, 4) joka toinen lentolinja/ei päätyjä/poikittaislinja, 5) joka toinen lentolinja/ei päätyjä, 6) jokatoinen lentolinja/joka toinen kuutio/poikittaislinja, 7) joka toinen lentolinja/ei päätyjä/joka toinen kuutio, 8) jokatoinen lentolinja/joka toinen kuutio.

Lentoblokki	C	XP	YP	K1	K2	K3	P1	P2
RGB	16,6818	- 0,0082	- 0,1615	6,01E-05	-3,86E- 07	7,70E-10	2,64E-06	5,15E-05
1.s1gcp	8,75	- 0,2783	- 0,0702	4,56E-03	1,27E-05	3,14E-07	-1,02E- 04	-1,36E- 05
1.s1gps	8,7505	- 0,2759	- 0,0529	4,58E-03	1,17E-05	3,78E-07	-8,75E- 05	4,31E-05
1.s1gcp+gps	8,8018	- 0,2561	0,1171	4,47E-03	2,09E-05	-1,11E- 07	6,26E-05	7,49E-04
1.s2gcp	8,6849	- 0,2849	0,0223	4,15E-03	1,39E-05	-4,03E- 07	-4,49E- 05	1,27E-04
1.s2gps	8,6851	- 0,2816	0,0407	4,16E-03	1,53E-05	-5,05E- 07	-3,20E- 05	1,78E-04
1.s2gcp+gps	8,7307	- 0,2576	0,2014	4,04E-03	3,00E-05	-1,46E- 06	1,03E-04	7,59E-04
2.s1gcp	8,7324	- 0,2772	- 0,0712	4,61E-03	4,81E-06	8,61E-07	-8,56E- 05	4,42E-06
2.s1gps	8,7339	-0,276	- 0,0645	4,61E-03	5,70E-06	8,10E-07	-7,48E- 05	3,08E-05
2.s1gcp+gps	8,7976	- 0,2652	0,1009	4,51E-03	9,98E-06	6,17E-07	4,93E-05	7,64E-04
2.s2gcp	8,6689	- 0,2746	0,0243	4,15E-03	1,61E-05	-4,61E- 07	-3,41E- 05	1,37E-04
2.s2gps	8,6704	- 0,2725	0,0319	4,16E-03	1,42E-05	-3,52E- 07	-2,40E- 05	1,60E-04
2.s2gcp+gps	8,7264	- 0,2571	0,1886	4,05E-03	2,53E-05	-1,11E- 06	9,02E-05	7,80E-04
3.s1gcp	8,767	- 0,2818	- 0,0803	4,56E-03	9,67E-06	4,93E-07	-1,27E- 04	-3,17E- 05
3.s1gps	8,7579	- 0,2831	-0,079	4,57E-03	9,90E-06	4,89E-07	-1,27E- 04	-3,20E- 05
3.s1gcp+gps	8,8234	- 0,2648	0,1103	4,52E-03	8,41E-06	6,92E-07	-1,19E- 04	7,12E-04
3.s2gcp	8,7018	- 0,2866	0,0108	4,13E-03	1,46E-05	-3,63E- 07	-7,43E- 05	1,20E-04
3.s2gps	8,6928	- 0,2879	0,012	4,14E-03	1,46E-05	-3,59E- 07	-7,35E- 05	1,19E-04
3.s2gcp+gps	8,7532	- 0,2621	0,1967	4,08E-03	1,89E-05	-6,46E- 07	-8,48E- 05	7,41E-04
4.s1gcp	8,7193	- 0,2725	- 0,0754	4,58E-03	1,34E-05	3,06E-07	-9,70E- 05	-1,37E- 05
4.s1gps	8,7998	- 0,2694	- 0,0272	4,56E-03	1,38E-05	1,91E-07	-1,18E- 04	1,69E-04
4.s1gcp+gps	8,8537	- 0,2924	0,1063	4,61E-03	-2,42E- 06	1,25E-06	-1,21E- 04	7,66E-04
4.s2gcp	8,6558	- 0,2809	0,0152	4,17E-03	1,32E-05	-2,29E- 07	-4,48E- 05	1,39E-04
4.s2gps	8,7336	-0,272	0,0647	4,16E-03	1,12E-05	-1,53E- 07	-7,02E- 05	3,05E-04

4.s2gcp+gps	8,7838	- 0,2874	0,193	4,19E-03	-6,66E-07	5,76E-07	-6,06E-05	8,10E-04
5.s1gcp	8,7639	- 0,3013	- 0,0966	4,55E-03	6,83E-06	6,04E-07	-1,52E-04	-6,01E-05
5.s1gps	8,7472	- 0,2879	- 0,0867	4,54E-03	1,39E-05	2,88E-07	-1,40E-04	-4,83E-05
5.s1gcp+gps	8,8653	- 0,2283	0,131	4,55E-03	6,26E-06	5,60E-07	-1,01E-04	7,35E-04
5.s2gcp	8,7006	- 0,3028	- 0,0032	4,15E-03	4,21E-06	3,22E-07	-9,21E-05	9,77E-05
5.s2gps	8,685	- 0,2912	0,0022	4,16E-03	7,31E-06	1,80E-07	-8,24E-05	1,09E-04
5.s2gcp+gps	8,7939	- 0,2252	0,2094	4,10E-03	1,31E-05	-2,33E-07	-8,36E-05	7,60E-04
6.s1gcp	8,7355	- 0,2711	- 0,0669	4,62E-03	7,45E-06	7,44E-07	-8,98E-05	-1,98E-05
6.s1gps	8,7337	- 0,2685	- 0,0608	4,62E-03	7,85E-06	7,36E-07	-8,83E-05	-4,71E-06
6.s1gcp+gps	8,8701	- 0,2634	0,1247	4,43E-03	6,99E-06	1,15E-06	-9,58E-05	6,36E-04
6.s2gcp	8,6735	- 0,2678	0,0296	4,21E-03	1,19E-05	-3,86E-07	-3,82E-05	1,08E-04
6.s2gps	8,6709	- 0,2653	0,0355	4,22E-03	9,28E-06	-1,72E-07	-3,82E-05	1,21E-04
6.s2gcp+gps	8,7986	- 0,2581	0,218	3,92E-03	3,75E-05	-1,70E-06	-5,70E-05	6,64E-04
7.s1gcp	8,7047	- 0,2724	- 0,0616	4,64E-03	5,90E-06	9,99E-07	-9,97E-05	-1,16E-05
7.s1gps	8,7218	- 0,2748	- 0,0585	4,62E-03	7,74E-06	8,06E-07	-1,02E-04	1,76E-05
7.s1gcp+gps	8,8453	- 0,2653	0,0957	4,64E-03	-1,48E-05	2,06E-06	-1,12E-04	7,19E-04
7.s2gcp	8,6434	- 0,2738	0,0359	4,17E-03	2,57E-05	-1,20E-06	-5,01E-05	1,15E-04
7.s2gps	8,6593	- 0,2772	0,034	4,22E-03	9,86E-06	-1,50E-07	-5,13E-05	1,54E-04
7.s2gcp+gps	8,7739	- 0,2535	0,2005	4,13E-03	1,14E-05	-4,87E-07	-7,59E-05	7,32E-04
8.s1gcp	8,7176	- 0,2834	- 0,0599	4,67E-03	-2,56E-06	1,31E-06	-1,38E-04	9,59E-06
8.s1gps	8,7238	- 0,2765	-0,06	4,67E-03	-3,45E-06	1,33E-06	-1,38E-04	1,81E-05
8.s1gcp+gps	8,8583	- 0,2372	0,1066	4,54E-03	-1,89E-06	1,26E-06	-1,80E-04	6,38E-04
8.s2gcp	8,6548	- 0,2831	0,0362	4,11E-03	3,66E-05	-1,96E-06	-8,47E-05	1,43E-04
8.s2gps	8,6605	- 0,2762	0,0359	4,12E-03	3,40E-05	-1,79E-06	-8,86E-05	1,51E-04
8.s2gcp+gps	8,7854	- 0,2316	0,1997	3,87E-03	6,18E-05	-3,59E-06	-1,54E-04	6,53E-04

Taulukko 31 Vihdin heinäkuun lentojen Ison alueen (Kuva18) tarkkuusarvot DSM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin heinäkuun lentojen RGB-blokin ”2)” DSM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	3,90	1,30	14,00	7,60	-5,90	0,20	-0,10	0,40	4,10
keskiarvo (cm)	3,27	1,11	13,19	7,47	-6,35	0,18	0,00	0,40	4,09
Negatiivinen max (cm)	-72,80	-66,90	-54,00	-59,60	-64,50	-22,20	-26,70	-19,90	-77,20
Positiivinen max (cm)	122,40	113,00	147,40	127,90	126,50	63,20	59,40	59,10	87,20
Min (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Max (cm)	122,40	113,00	147,40	127,90	126,50	63,20	59,40	59,10	87,20
Keskihajonta (cm)	9,30	8,43	8,91	8,56	8,73	0,51	0,88	0,83	1,27
RMSE (cm)	9,86	8,51	15,92	11,36	10,79	0,54	0,88	0,92	4,29

Taulukko 32 Vihdin heinäkuun lentojen alueiden 1-4 (kuva 18) tarkkuusarvojen keskiarvot DSM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin heinäkuun lentojen RGB-blokin ”2)” DSM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	8,78	2,53	11,55	5,38	7,38	0,33	1,33	1,10	9,35
keskiarvo (cm)	9,20	3,11	11,49	5,27	7,94	0,28	1,35	1,10	9,36
Negatiivinen max (cm)	11,15	19,05	4,25	11,08	22,70	1,68	2,70	1,93	8,60
Positiivinen max (cm)	16,80	11,75	24,68	20,68	5,48	2,55	2,78	2,95	10,50
Min (cm)	0,43	0,03	1,40	0,03	0,00	0,00	0,30	0,00	5,73
Max (cm)	22,15	19,73	24,68	20,68	22,70	2,60	3,95	3,53	13,20
Keskihajonta (cm)	5,39	5,84	5,02	5,90	5,58	0,45	0,54	0,52	0,92
RMSE (cm)	10,81	7,08	13,25	8,20	9,74	0,57	1,55	1,33	9,44

Taulukko 33 Vihdin heinäkuun lentojen Ison alueen (Kuva 18) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin heinäkuun lentojen RGB-blokin ”2)” DSM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	4,40	1,80	13,80	7,80	-5,90	0,20	-0,10	0,40	4,10
keskiarvo (cm)	3,72	1,54	13,63	7,86	-5,86	0,20	0,01	0,39	4,08
Negatiivinen max (cm)	-96,80	-102,30	-83,80	-83,60	-	-15,50	-15,90	-28,90	-
					100,90				12,20
Positiivinen max (cm)	60,00	45,00	60,00	54,40	36,90	13,30	14,60	16,40	45,20
Min (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Max (cm)	96,80	102,30	83,80	83,60	100,90	15,50	15,90	28,90	45,20
Keskihajonta (cm)	8,71	7,64	6,54	6,93	6,58	0,81	1,31	1,10	1,43
RMSE (cm)	9,47	7,80	15,11	10,48	8,81	0,83	1,31	1,17	4,33

Taulukko 34 Vihdin heinäkuun lentojen alueiden 1-4 (Kuva 18) tarkkuusarvojen keskiarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin heinäkuun lentojen RGB-blokin ”2)” DTM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
--	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Mediaani (cm)	9,48	3,80	9,00	5,55	7,15	0,30	1,48	1,05	9,25
keskiarvo (cm)	9,75	3,83	8,63	5,78	6,86	0,23	1,43	0,97	9,14
Negatiivinen max (cm)	11,00	7,35	5,53	4,90	13,80	2,53	2,68	1,95	8,15
Positiivinen max (cm)	9,48	7,18	16,40	15,00	2,85	2,15	2,63	2,58	10,83
Min (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Max (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Keskihajonta (cm)	3,89	2,64	3,76	2,99	2,77	0,58	0,84	0,63	0,85
RMSE (cm)	10,56	4,80	9,84	7,15	7,47	0,70	1,77	1,28	9,23

Taulukko 35 Vihdin heinäkuun lentojen Ison alueen (Kuva 18) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin toukokuun lentojen RGB-blokin ”2)” DSM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	2)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	-0,50	-2,80	9,10	3,30	-10,40	-4,80	-5,00	-4,90	-4,50	-0,80
keskiarvo (cm)	-0,58	-2,76	9,33	3,56	-10,16	-4,26	-4,46	-4,45	-4,06	-0,37
Negatiivinen max (cm)	-68,50	-75,10	-71,60	-69,60	-85,20	-51,70	-51,60	-45,90	-49,90	-47,20
Positiivinen max (cm)	208,80	185,90	230,10	217,70	210,20	223,10	224,00	221,20	226,30	235,90
Min (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Max (cm)	208,80	185,90	230,10	217,70	210,20	223,10	224,00	221,20	226,30	235,90
Keskihajonta (cm)	9,80	8,16	8,42	7,76	7,93	6,49	6,45	6,27	6,24	6,85
RMSE (cm)	9,82	8,62	12,56	8,54	12,89	7,76	7,84	7,69	7,45	6,86

Taulukko 36 Vihdin heinäkuun lentojen alueiden 1-4 (Kuva 18) tarkkuusarvojen keskiarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin toukokuun lentojen RGB-blokin ”2)” DSM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	2)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	10,13	6,79	6,15	3,05	12,15	5,43	5,65	5,53	5,10	10,03
keskiarvo (cm)	10,04	6,61	6,03	3,06	12,25	5,46	5,67	5,53	5,12	10,06
Negatiivinen max (cm)	17,53	18,63	8,38	12,65	24,90	13,38	13,25	12,48	12,40	18,10
Positiivinen max (cm)	10,83	10,50	16,50	14,65	2,85	1,40	1,35	1,28	1,63	8,73
Min (cm)	1,68	0,38	0,00	0,00	0,48	0,10	0,08	0,03	0,00	5,88
Max (cm)	22,88	19,05	18,38	18,33	24,90	13,45	13,18	12,48	12,40	18,10
Keskihajonta (cm)	4,14	4,10	4,08	4,27	4,15	2,15	2,14	2,06	2,14	2,23
RMSE (cm)	11,19	8,27	7,54	5,86	13,02	5,90	6,09	5,92	5,55	10,65

Taulukko 37 Vihdin heinäkuun lentojen alueen 1 (Kuva 18) tarkkuusarvot DSM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin heinäkuun lentojen RGB-blokin ”2)” DSM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	-10,1	0,3	-0,3	5	-8,9	0,4	3,2	2,9	3,1
keskiarvo (cm)	-10,36	0,05	-0,2	4,9	-9,29	0,36	3,14	2,95	3,16
Negatiivinen max (cm)	-21,9	-16,2	-11	-10	-24	-1,2	1,2	0	1,3
Positiivinen max (cm)	6,5	15,5	14,6	20,3	5,2	2,5	5,8	4,8	5,1
Min (cm)	0	0	0	0	0	0	1,2	0	1,3
Max (cm)	21,9	16,2	14,6	20,3	24	2,5	5,8	4,8	5,1
Keskihajonta (cm)	5,47	6,36	4,76	6,15	5,88	0,38	0,47	0,45	0,47
RMSE (cm)	11,71	6,35	4,76	7,85	10,99	0,52	3,17	2,98	3,19

Taulukko 38 Vihdin heinäkuun lentojen alueen 2 (Kuva 18) tarkkuusarvot DSM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin heinäkuun lentojen RGB-blokin ”2)” DSM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	-3,3	-1,3	15	8,1	-4,7	-0,1	-0,5	0	3,9
keskiarvo (cm)	-3,99	-2,12	14,45	7,46	-4,82	-0,07	-0,49	0	3,87
Negatiivinen max (cm)	-16,9	-16,1	-0,9	-5,4	-17,8	-2,4	-3,2	-2,7	-0,7
Positiivinen max (cm)	10,9	12,3	29,1	20,4	7,6	2,2	1,8	2	8,6
Min (cm)	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0
Max (cm)	16,9	16,1	29,1	20,4	17,8	2,4	3,2	2,7	8,6
Keskihajonta (cm)	5,31	4,98	5,04	4,75	4,6	0,5	0,55	0,51	1,21
RMSE (cm)	6,64	5,41	15,3	8,84	6,66	0,51	0,73	0,51	4,06

Taulukko 39 Vihdin heinäkuun lentojen alueen 3 (Kuva 18) tarkkuusarvot DSM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin heinäkuun lentojen RGB-blokin ”2)” DSM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	12,7	1,4	19,6	7	-7,9	0,1	0	0,5	3,1
keskiarvo (cm)	12,6	1,41	19,27	6,59	-7,87	0,08	0,09	0,47	3,11
Negatiivinen max (cm)	-4,2	-13,6	3,7	-9,7	-21,5	-1,5	-1,7	-1,2	0
Positiivinen max (cm)	26,3	16,3	31,6	20,6	5,2	1,9	2,1	2,8	6,7
Min (cm)	0,1	0	3,7	0,1	0	0	0	0	0
Max (cm)	26,3	16,3	31,6	20,6	21,5	1,9	2,1	2,8	6,7
Keskihajonta (cm)	5,93	5,23	5,69	5,44	4,5	0,42	0,49	0,45	0,63
RMSE (cm)	13,92	5,41	20,09	8,54	9,06	0,43	0,49	0,65	3,17

Taulukko 40 Vihdin heinäkuun lentojen alueen 4 (Kuva 18) tarkkuusarvot DSM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin toukokuun lentojen RGB-blokin ”2)” DSM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	9	-7,1	11,3	-1,4	-8	0,7	-1,6	-1	-27,3
keskiarvo (cm)	9,85	-8,88	12,02	-2,15	-9,79	0,62	-1,69	-0,98	-27,3
Negatiivinen max (cm)	1,6	-30,3	1,4	-19,2	-27,5	-1,6	-4,7	-3,8	-32,4
Positiivinen max (cm)	23,5	2,9	23,4	21,4	3,9	3,6	1,4	2,2	-21,6
Min (cm)	1,6	0,1	1,4	0	0	0	0	0	21,6
Max (cm)	23,5	30,3	23,4	21,4	27,5	3,6	4,7	3,8	32,4
Keskihajonta (cm)	4,85	6,78	4,57	7,25	7,33	0,52	0,67	0,66	1,37
RMSE (cm)	10,98	11,16	12,86	7,55	12,23	0,81	1,82	1,18	27,34

Taulukko 41 Vihdin heinäkuun lentojen alueen 1 (Kuva 18) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin heinäkuun lentojen RGB-blokin ”2)” DTM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	-11,9	2,5	-1,4	7	-7	0,2	3,3	2,6	3
keskiarvo (cm)	-11,41	2,78	-1,18	7,36	-6,74	0,07	3,14	2,48	2,75
Negatiivinen max (cm)	-20,7	-3,1	-9	0,3	-16,2	-4,7	-0,3	-0,5	-2
Positiivinen max (cm)	1,4	12,2	9,2	18,2	3,1	1,5	5,5	4,1	4,5
Min (cm)	0,3	0	0	0,3	0	0	0	0	0
Max (cm)	20,7	12,2	9,2	18,2	16,2	4,7	5,5	4,1	4,5
Keskihajonta (cm)	4,05	2,94	3,43	2,99	3,08	0,81	0,86	0,71	0,94
RMSE (cm)	12,11	4,04	3,63	7,94	7,41	0,81	3,25	2,58	2,91

Taulukko 42 Vihdin heinäkuun lentojen alueen 2 (Kuva 18) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin heinäkuun lentojen RGB-blokin ”2)” DTM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	-11,3	-7,4	8,3	0,8	-10,2	-0,1	-0,9	-0,1	3,8
keskiarvo (cm)	-11,84	-6,51	7,15	0,59	-9,75	-0,04	-0,98	-0,05	3,7
Negatiivinen max (cm)	-19,6	-12,6	-1,7	-9,7	-17,2	-3,3	-4,2	-3,2	0,1
Positiivinen max (cm)	-1,8	3,1	14	9,5	4	2,5	2,5	3,2	7,5
Min (cm)	1,8	0	0	0	0,1	0	0	0	0,1
Max (cm)	19,6	12,6	14	9,7	17,2	3,3	4,2	3,2	7,5
Keskihajonta (cm)	4,49	3,52	3,89	3,55	3,4	0,73	1,02	0,88	0,99
RMSE (cm)	12,66	7,4	8,14	3,6	10,33	0,73	1,42	0,88	3,83

Taulukko 43 Vihdin heinäkuun lentojen alueen 3 (Kuva 18) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin heinäkuun lentojen RGB-blokin ”2)” RGB DTM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	9,5	1,2	18,3	12,9	-8,3	0,1	-0,1	0,6	3,1

keskiarvo (cm)	10,22	1,84	18,04	13,19	-8,19	0,04	-0,13	0,57	3,04
Negatiivinen max (cm)	1,8	-3,5	10,3	5,3	-13,3	-1,3	-2,5	-1,1	0,8
Positiivinen max (cm)	19,8	11,9	24,7	18,8	-1,6	2,1	1,9	1,7	6,2
Min (cm)	1,8	0	10,3	5,3	1,6	0	0	0	0,8
Max (cm)	19,8	11,9	24,7	18,8	13,3	2,1	2,5	1,7	6,2
Keskihajonta (cm)	3,06	2,83	3,39	2,34	2,15	0,36	0,73	0,36	0,71
RMSE (cm)	10,67	3,37	18,36	13,4	8,47	0,36	0,74	0,67	3,13

Taulukko 44 Vihdin heinäkuun lentojen alueen 4 (Kuva 18) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin heinäkuun lentojen RGB-blokin ”2)” DTM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	5,2	-4,1	8	1,5	-3,1	0,8	-1,6	-0,9	-27,1
keskiarvo (cm)	5,53	-4,21	8,14	2	-2,75	0,79	-1,48	-0,79	-27,06
Negatiivinen max (cm)	-1,9	-10,2	-1,1	-4,3	-8,5	-0,8	-3,7	-3	-29,7
Positiivinen max (cm)	14,9	1,5	17,7	13,5	2,7	2,5	0,6	1,3	-25,1
Min (cm)	0	0,2	0	0	0	0	0	0	25,1
Max (cm)	14,9	10,2	17,7	13,5	8,5	2,5	3,7	3	29,7
Keskihajonta (cm)	3,94	1,27	4,32	3,07	2,45	0,4	0,74	0,57	0,74
RMSE (cm)	6,79	4,39	9,22	3,66	3,69	0,88	1,65	0,98	27,07

Taulukko 45 Vihdin heinäkuun lentojen alueen 1 (Kuva 18) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin toukokuun lentojen RGB-blokin ”2)” DSM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	-16,00	-4,40	-5,90	0,10	-14,20	-5,90	-6,00	-2,90	-3,50	-3,10
keskiarvo (cm)	-15,58	-4,19	-5,42	0,56	-13,96	-5,93	-6,00	-2,86	-3,52	-3,25
Negatiivinen max (cm)	-28,80	-15,90	-16,30	-12,30	-26,70	-13,30	-11,40	-8,20	-9,60	-11,20
Positiivinen max (cm)	-2,90	14,70	8,80	17,50	3,00	0,70	-0,30	3,50	2,20	2,90
Min (cm)	2,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00
Max (cm)	28,80	15,90	16,30	17,50	26,70	13,30	11,40	8,20	9,60	11,20
Keskihajonta (cm)	4,15	4,52	3,84	4,54	4,50	1,68	1,49	1,58	1,59	1,74
RMSE (cm)	16,12	6,16	6,64	4,57	14,67	6,16	6,18	3,27	3,86	3,68

Taulukko 46 Vihdin heinäkuun lentojen alueen 2 (Kuva 18) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin toukokuun lentojen RGB-blokin ”2)” DSM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	2)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	-16,00	-14,35	1,20	-6,10	-16,90	-5,30	-5,30	-6,20	-5,40	-1,70
keskiarvo (cm)	-15,96	-14,16	1,35	-6,27	-17,09	-5,32	-5,28	-6,25	-5,33	-1,57
Negatiivinen	-26,10	-25,60	-10,30	-21,20	-28,70	-13,80	-13,30	-12,60	-12,80	-9,40

max (cm)										
Positiivinen max (cm)	-3,80	-1,50	15,10	6,50	-1,70	0,80	1,40	-0,10	1,10	5,80
Min (cm)	3,80	1,50	0,00	0,00	1,70	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00
Max (cm)	26,10	25,60	15,10	21,20	28,70	13,80	13,30	12,60	12,80	9,40
Keskihajonta (cm)	3,68	3,58	3,89	4,27	3,94	2,03	2,08	1,95	2,12	2,22
RMSE (cm)	16,38	14,60	4,12	7,59	17,54	5,69	5,67	6,55	5,74	2,72

Taulukko 47 Vihdin heinäkuun lentojen alueen 3 (Kuva 18) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin toukokuun lentojen RGB-blokin ”2)” DSM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	2)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	4,30	-1,00	9,60	5,40	-11,10	-6,90	-6,90	-7,10	-6,40	-3,80
keskiarvo (cm)	4,49	-1,26	9,70	5,38	-11,27	-6,85	-6,89	-7,02	-6,32	-3,85
Negatiivinen max (cm)	-7,30	-14,30	-1,40	-5,40	-24,10	-13,00	-13,30	-13,20	-12,80	-10,40
Positiivinen max (cm)	19,70	16,00	23,00	16,20	0,60	0,10	-0,40	0,00	0,30	2,70
Min (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
Max (cm)	19,70	16,00	23,00	16,20	24,10	13,30	13,00	13,20	12,80	10,40
Keskihajonta (cm)	4,75	4,04	4,34	3,26	3,88	2,35	2,42	2,32	2,39	2,32
RMSE (cm)	6,54	4,23	10,63	6,29	11,92	7,24	7,30	7,39	6,76	4,49

Taulukko 48 Vihdin heinäkuun lentojen alueen 4 (Kuva 18) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla: 1) kaikki GCP:t 2) kaikki GCP:t ja gps 3) 5 GCP:itä 4) 5 GCP:itä ja gps 5) gps. Referenssinä vertailussa on käytetty Vihdin toukokuun lentojen RGB-blokin ”2)” DSM.

	1)FPI	2)FPI	3)FPI	4)FPI	5)FPI	1)RGB	2)RGB	3)RGB	4)RGB	5)RGB
Mediaani (cm)	4,20	-7,40	7,90	-0,60	-6,40	-3,60	-4,40	-5,90	-5,10	-31,50
keskiarvo (cm)	4,11	-6,84	7,66	0,03	-6,68	-3,74	-4,53	-6,01	-5,32	-31,59
Negatiivinen max (cm)	-7,90	-18,70	-5,50	-11,70	-20,10	-13,40	-15,00	-15,90	-14,40	-41,40
Positiivinen max (cm)	16,90	9,80	19,10	18,40	6,10	4,00	3,30	1,50	2,90	-23,50
Min (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,50
Max (cm)	16,90	18,70	19,10	18,40	20,10	13,40	15,00	15,90	14,40	41,40
Keskihajonta (cm)	3,99	4,29	4,25	5,00	4,29	2,55	2,57	2,41	2,44	2,63
RMSE (cm)	5,73	8,07	8,76	5,00	7,94	4,53	5,20	6,47	5,85	31,70

Taulukko 49 Mustila Ison alueen (Kuva 19) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla. Referenssinä vertailussa on käytetty FPI-blokin ”1. gcp+gps” DTM.

	Mediaani (cm)	keskiarvo (cm)	Negatiivinen max (cm)	Positiivinen max (cm)	Min (cm)	Max (cm)	Keskihajonta (cm)	RMSE (cm)
1.gcp	-11,10	-21,33	-1715,70	857,00	0,00	1715,70	112,73	114,73
1.gps	-45,40	-52,97	-1216,70	1386,20	0,00	1386,20	123,08	134,00
2.gcp	43,50	63,51	-1396,30	1231,10	0,00	1396,30	130,33	144,98
2.gps	-18,70	14,64	-1525,70	2883,10	0,00	2883,10	192,95	193,51
2.gcp+gps	48,30	75,07	-1322,70	2338,50	0,00	2338,50	144,64	162,96
3.gcp	-33,40	-46,27	-1709,90	680,80	0,00	1709,90	135,96	143,62
3.gps	-48,20	-33,98	-1418,40	4270,80	0,00	4270,80	267,62	269,77
3.gcp+gps	69,10	76,23	-1348,00	1013,50	0,00	1348,00	120,93	142,95
4.gcp	-	-	-	-	-	-	-	-
4.gps	144,30	177,89	-915,60	4319,70	0,00	4319,70	257,49	312,96
4.gcp+gps	97,30	125,42	-994,30	1533,90	0,00	1533,90	131,21	181,51
5.gcp	-110,10	-46,57	-1396,10	1820,10	0,00	1820,10	284,72	288,50
5.gps	-272,00	-216,03	-1700,40	552,90	0,00	1700,40	213,36	303,63
5.gcp+gps	151,80	173,31	-746,00	2287,00	0,00	2287,00	169,90	242,70
6.gcp	92,20	136,04	-1484,90	1887,40	0,00	1887,40	233,63	270,36
6.gps	85,20	126,52	-1627,20	4079,90	0,00	4079,90	290,68	317,02
6.gcp+gps	147,50	188,47	-1258,70	2376,50	0,00	2376,50	213,72	284,95
7.gcp	193,70	185,62	-1544,80	911,50	0,00	1544,80	225,38	291,97
7.gps	-64,60	-29,59	-1109,40	2963,20	0,00	2963,20	194,93	197,16
7.gcp+gps	112,70	170,48	-608,00	1708,10	0,00	1708,10	211,10	271,34
8.gcp	244,60	250,25	-1311,80	1200,20	0,00	1311,80	311,60	399,64
8.gps	15,30	39,19	-1724,60	4162,60	0,00	4162,60	315,46	317,89
8.gcp+gps	126,50	141,91	-1232,60	929,70	0,00	1232,60	151,72	207,75

Taulukko 50 Mustila alueen 1 (Kuva 19) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla. Referenssinä vertailussa on käytetty FPI-blokin ”1. gcp+gps” DTM.

	Mediaani (cm)	keskiarvo (cm)	Negatiivinen max (cm)	Positiivinen max (cm)	Min (cm)	Max (cm)	Keskihajonta (cm)	RMSE (cm)
1.gcp	-1,50	-1,53	-12,60	10,30	0,00	12,60	3,52	3,84
1.gps	-96,70	-97,34	-143,30	-48,70	48,70	143,30	13,31	98,24
2.gcp	-9,20	-9,15	-34,00	12,60	0,00	34,00	6,90	11,46
2.gps	-108,80	-108,31	-152,90	-51,90	51,90	152,90	14,66	109,29
2.gcp+gps	-16,20	-16,71	-43,60	2,70	0,00	43,60	7,93	18,50
3.gcp	3,00	1,68	-25,20	19,80	0,00	25,20	7,85	8,02
3.gps	-103,60	-103,67	-171,50	-41,60	41,60	171,50	20,21	105,63
3.gcp+gps	5,60	5,39	-16,00	23,90	0,00	23,90	6,23	8,23
4.gcp	-	-	-	-	-	-	-	-
4.gps	-34,00	-34,06	-107,00	38,00	0,00	107,00	24,90	42,19
4.gcp+gps	-1,30	-1,01	-10,80	9,00	0,10	10,80	4,52	4,61
5.gcp	18,95	51,28	-58,20	292,50	0,00	292,50	75,64	91,38
5.gps	-387,80	-386,75	-400,60	-373,10	373,10	400,60	7,02	0,00
5.gcp+gps	29,70	34,27	-76,80	253,00	0,00	253,00	55,16	64,93
6.gcp	-5,80	-6,01	-37,20	18,80	0,00	37,20	9,08	10,88
6.gps	-43,50	-41,26	-107,60	40,20	0,00	107,60	25,24	48,36
6.gcp+gps	-4,10	-4,45	-31,00	14,60	0,00	31,00	7,33	8,58
7.gcp	2,20	2,00	-31,80	33,60	0,00	33,60	11,22	11,39
7.gps	-166,40	-165,50	-233,60	-72,10	72,10	233,60	23,12	167,10
7.gcp+gps	3,40	3,27	-24,30	35,40	0,00	35,40	9,23	9,79
8.gcp	-13,60	-14,14	-59,10	29,70	0,00	59,10	16,96	22,08
8.gps	-84,00	-83,06	-171,30	-9,60	9,60	171,30	28,39	87,78
8.gcp+gps	-3,40	-3,77	-39,70	25,50	0,00	39,70	11,47	12,08

Taulukko 51 Mustila alueen 2 (Kuva 19) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla. Referenssinä vertailussa on käytetty FPI-blokin ”1. gcp+gps” DTM

	Mediaani (cm)	keskiarvo (cm)	Negatiivinen max (cm)	Positiivinen max (cm)	Min (cm)	Max (cm)	Keskihajonta (cm)	RMSE (cm)
1.gcp	-63,40	-60,56	-96,80	-4,30	4,30	96,80	13,06	61,95
1.gps	-56,20	-55,33	-136,10	54,80	0,00	136,10	22,65	59,78
2.gcp	-1,40	3,19	-36,20	71,50	0,00	71,50	16,20	16,51
2.gps	-57,00	-56,28	-130,90	49,80	0,10	130,90	23,16	60,86
2.gcp+gps	-9,70	-6,03	-23,00	50,80	0,00	50,80	12,49	13,86

3.gcp	-113,80	-110,14	-148,70	-38,00	38,00	148,70	15,41	111,22
3.gps	-99,15	-98,27	-171,80	22,70	0,00	171,80	29,71	102,66
3.gcp+gps	46,70	52,69	17,00	165,90	17,00	165,90	19,56	56,21
4.gcp	-	-	-	-	-	-	-	-
4.gps	109,60	111,81	35,40	247,00	35,40	247,00	29,80	115,71
4.gcp+gps	49,10	48,60	41,30	55,00	41,30	55,00	2,89	48,68
5.gcp	-265,30	-262,29	-281,30	-180,60	180,60	281,30	13,36	262,63
5.gps	-397,50	-393,49	-414,60	-373,70	373,70	414,60	11,41	393,66
5.gcp+gps	94,40	98,25	40,10	204,00	40,10	204,00	18,00	99,88
6.gcp	64,80	69,48	43,30	148,00	43,30	148,00	17,30	71,60
6.gps	29,80	31,48	-54,10	162,70	57,30	198,50	28,88	42,71
6.gcp+gps	90,30	95,69	57,30	198,50	0,10	162,70	19,78	97,71
7.gcp	207,30	211,41	178,20	288,50	178,20	288,50	18,51	212,22
7.gps	-152,50	-144,88	-225,20	-20,20	20,20	225,20	37,48	149,65
7.gcp+gps	-0,20	4,77	-22,10	109,30	0,00	109,30	17,56	18,20
8.gcp	157,60	162,44	125,10	257,30	125,10	257,30	19,67	163,63
8.gps	-153,20	-152,46	-250,80	-27,50	0,20	158,00	39,84	157,58
8.gcp+gps	39,60	44,28	-3,20	158,00	27,50	250,80	22,06	49,47

Taulukko 52 Mustila alueen 3 (Kuva 19) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla. Referenssinä vertailussa on käytetty FPI-blokin ”1. gcp+gps” DTM

	Mediaani (cm)	keskiarvo (cm)	Negatiivinen max (cm)	Positiivinen max (cm)	Min (cm)	Max (cm)	Keskihajonta (cm)	RMSE (cm)
1.gcp	72,70	73,54	29,30	114,80	29,30	114,80	18,25	75,77
1.gps	14,10	12,00	-18,70	28,20	0,00	28,20	8,31	14,60
2.gcp	190,60	188,96	115,50	240,00	115,50	240,00	26,54	190,82
2.gps	84,85	89,79	42,80	174,20	42,80	174,20	25,67	93,38
2.gcp+gps	98,00	97,39	72,80	129,60	72,80	129,60	12,31	98,16
3.gcp	-18,60	-16,94	-61,60	46,80	0,00	61,60	19,10	25,53
3.gps	3,30	5,14	-24,20	33,00	0,00	33,00	7,37	8,98
3.gcp+gps	142,60	145,86	117,00	191,90	117,00	191,90	17,41	146,9

s					0	0		0
4.gcp	-	-	-	-	-	-	-	-
4.gps	144,20	140,95	106,30	162,60	106,30	162,60	12,44	141,50
4.gcp+gps	110,50	110,15	106,00	113,00	106,00	113,00	1,52	110,16
5.gcp	-101,90	-98,96	-139,30	-48,70	48,70	139,30	20,74	101,11
5.gps	-325,00	-321,81	-331,00	-293,70	293,70	331,00	8,15	321,92
5.gcp+gps	248,00	246,49	203,60	300,20	203,60	300,20	21,27	247,40
6.gcp	319,60	320,94	254,40	366,20	254,40	366,20	21,05	321,63
6.gps	183,10	184,68	84,70	300,00	84,70	300,00	47,00	190,56
6.gcp+gps	395,00	398,41	383,60	431,40	383,60	431,40	10,38	398,55
7.gcp	414,45	411,53	384,80	429,80	384,80	429,80	9,72	411,65
7.gps	102,30	102,80	72,90	138,60	310,40	414,60	14,80	103,86
7.gcp+gps	366,10	364,57	310,40	414,60	72,90	138,60	19,79	365,11
8.gcp	566,40	562,36	469,70	638,40	469,70	638,40	36,54	563,54
8.gps	83,15	81,69	-108,10	231,00	78,90	175,60	97,96	127,54
8.gcp+gps	127,00	125,64	78,90	175,60	0,00	231,00	23,89	127,89

Taulukko 53 Mustila alueen 4 (Kuva 19) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla. Referenssinä vertailussa on käytetty FPI-blokin ”1. gcp+gps” DTM

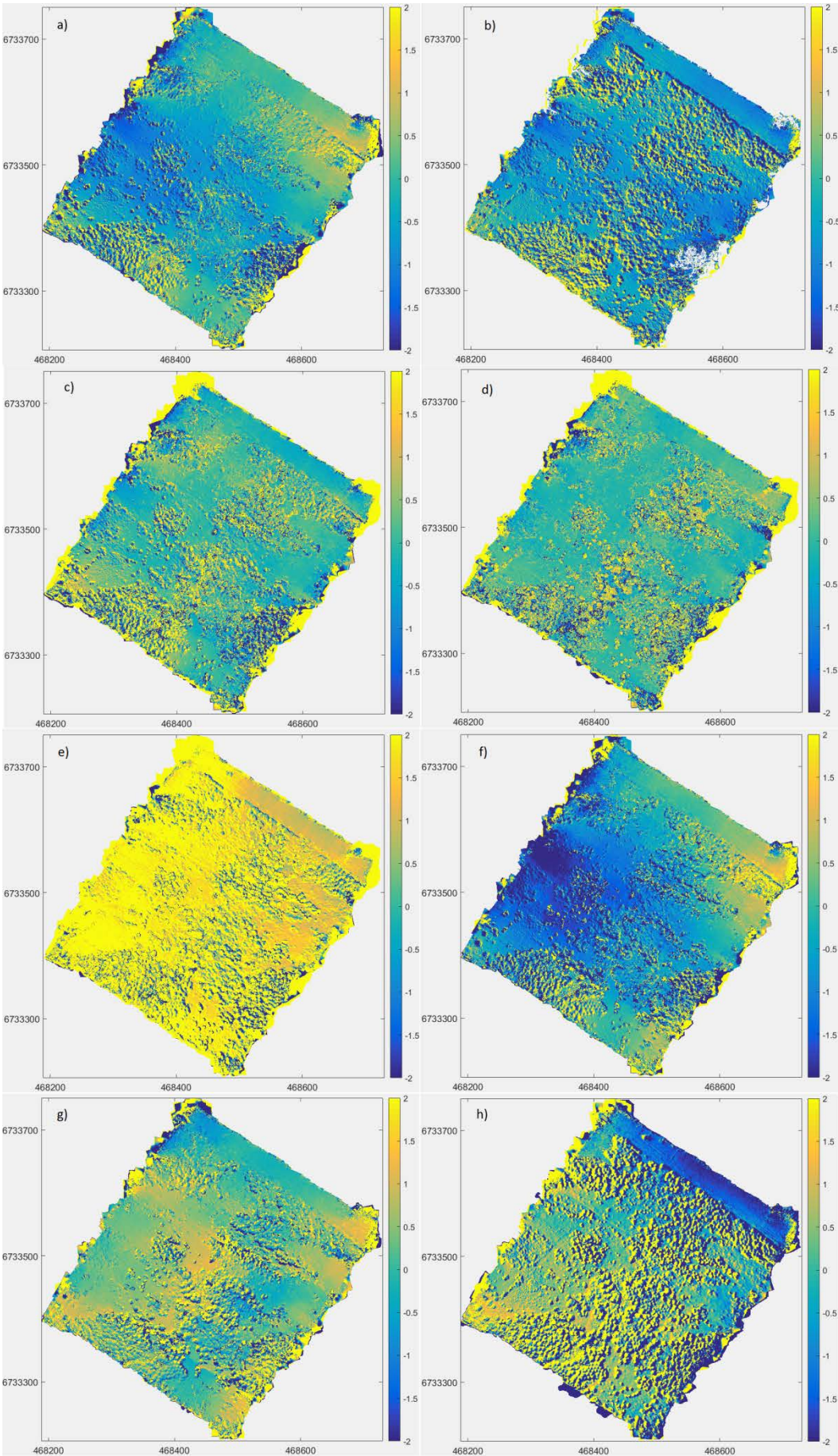
	Mediaani (cm)	keskiarvo (cm)	Negatiivinen max (cm)	Positiivinen max (cm)	Min (cm)	Max (cm)	Keskihajonta (cm)	RMSE (cm)
1.gcp	-46,20	-44,82	-101,40	35,20	0,10	101,40	19,38	48,83
1.gps	-33,30	-31,70	-79,10	45,30	0,10	79,10	17,57	36,24
2.gcp	32,00	35,42	-24,60	128,70	0,10	128,70	21,96	41,67
2.gps	-46,60	-43,29	-85,90	61,70	0,20	85,90	19,41	47,44
2.gcp+gps	4,90	7,37	-43,40	115,40	0,00	115,40	17,51	19,00
3.gcp	-107,50	-105,41	-168,30	62,80	0,70	168,30	23,20	107,93
3.gps	-41,00	-38,12	-151,70	129,10	0,00	151,70	47,62	60,99
3.gcp+gps	61,30	66,49	4,80	204,40	4,80	204,40	24,44	70,84
4.gcp	-	-	-	-	-	-	-	-
4.gps	130,60	133,05	64,00	234,30	64,00	234,30	25,79	135,53

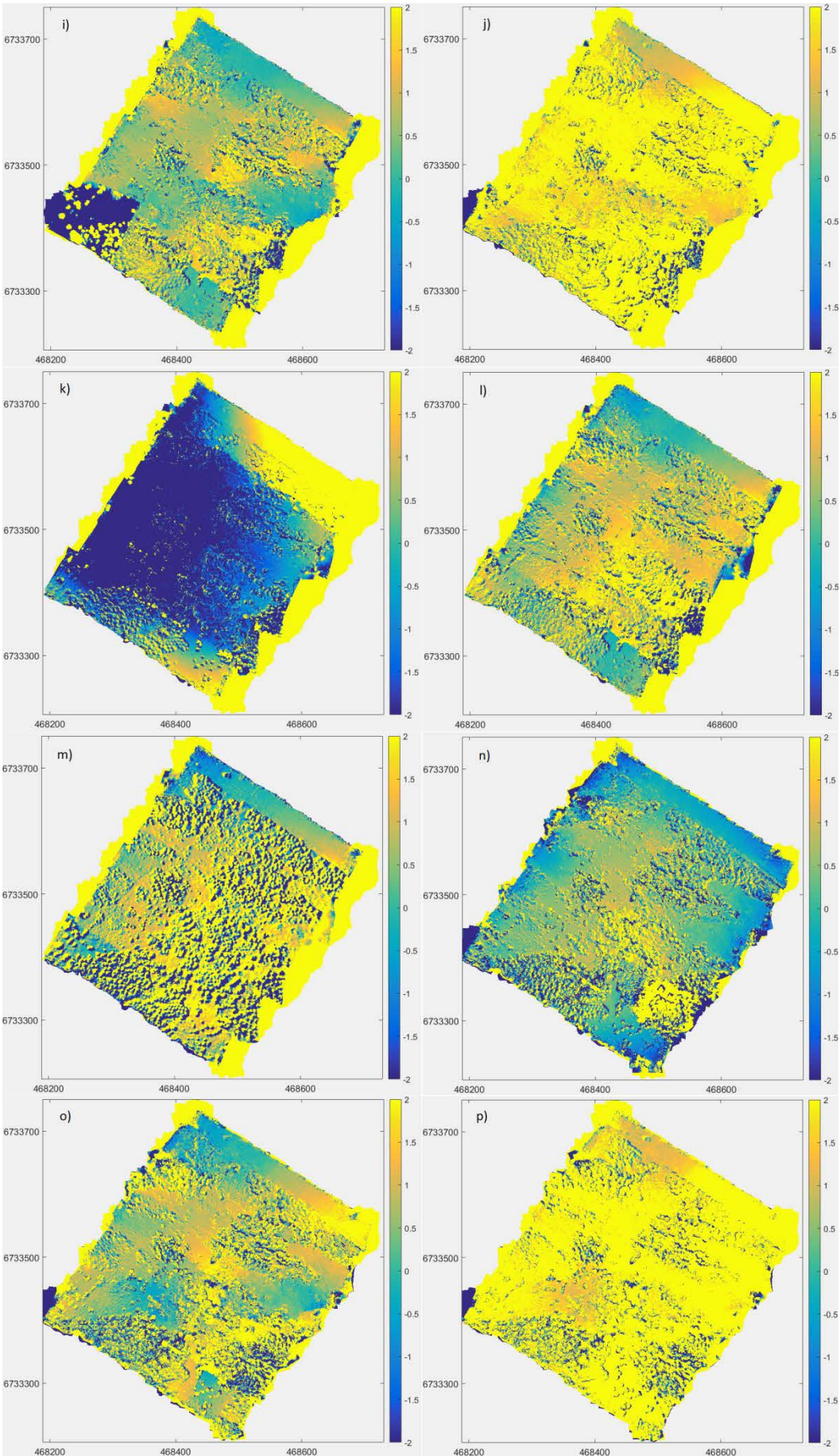
4.gcp+gps	22,80	24,79	8,30	56,60	8,30	56,60	12,66	27,80
5.gcp	-317,15	-312,72	-361,10	-168,30	168,30	361,10	22,71	313,54
5.gps	-147,20	-147,47	-197,90	-89,90	89,90	197,90	25,01	149,55
5.gcp+gps	122,25	125,59	69,40	232,00	69,40	232,00	25,97	128,25
6.gcp	45,80	51,11	-4,60	144,40	0,30	144,40	23,48	56,24
6.gps	27,70	31,69	-51,80	132,10	0,00	132,10	28,34	42,51
6.gcp+gps	24,40	28,99	-19,00	136,90	0,00	136,90	24,58	38,01
7.gcp	83,20	87,59	32,90	175,40	32,90	175,40	19,38	89,70
7.gps	-213,40	-212,10	-299,70	-97,70	97,70	299,70	33,68	214,76
7.gcp+gps	2,70	5,53	-45,50	98,70	0,00	98,70	19,36	20,14
8.gcp	585,80	607,46	517,50	992,50	517,50	992,50	71,37	611,63
8.gps	159,25	194,32	41,50	514,50	41,50	514,50	111,68	224,12
8.gcp+gps	144,80	166,26	100,80	474,80	100,80	474,80	55,41	175,24

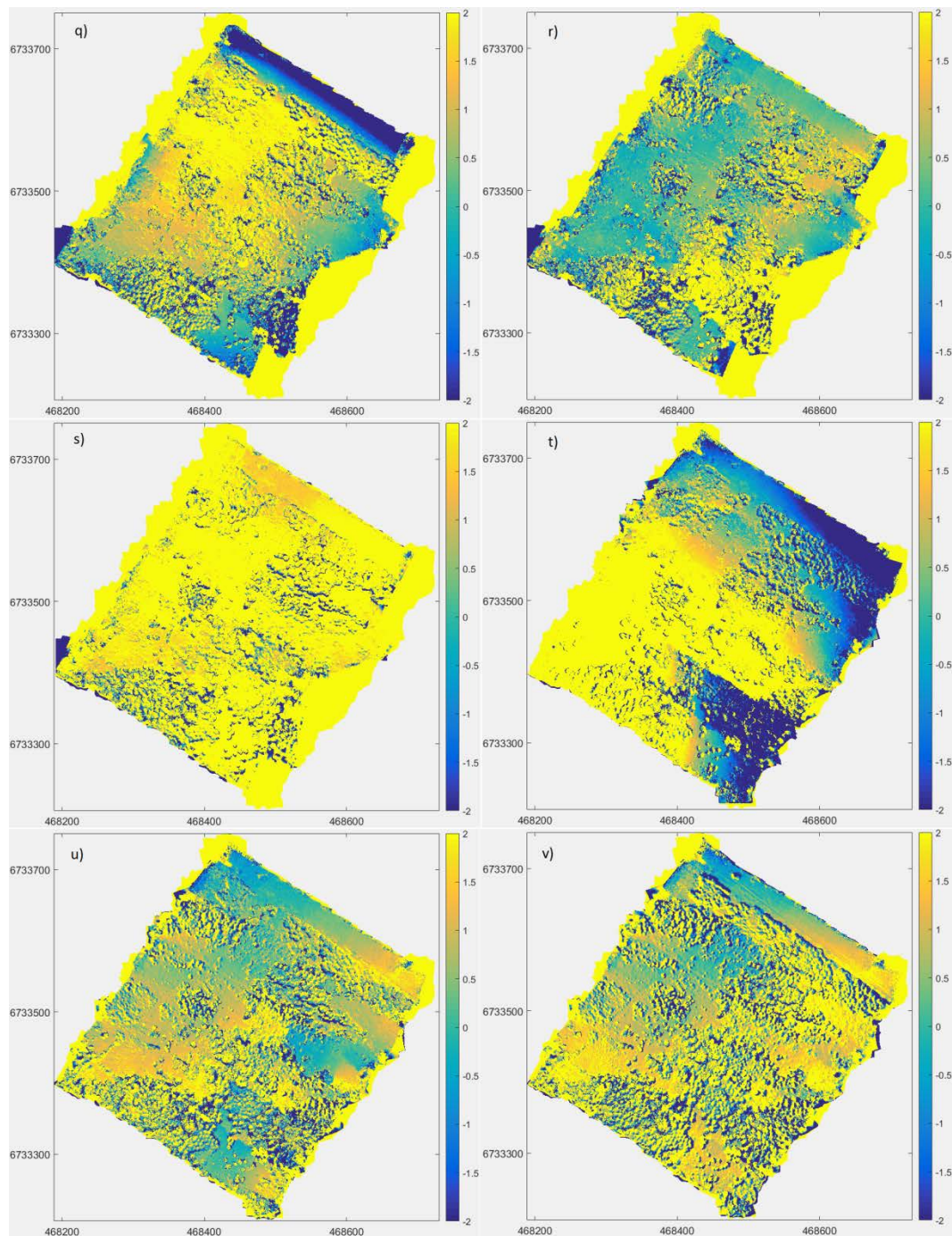
Taulukko 54 Mustila alueen 5 (Kuva 19) tarkkuusarvot DTM vertailusta eri blokkivariaatioilla. Referenssinä vertailussa on käytetty FPI-blokin ”1. gcp+gps” DTM

	Mediaani (cm)	keskiarvo (cm)	Negatiivinen max (cm)	Positiivinen max (cm)	Min (cm)	Max (cm)	Keskiahjonta (cm)	RMSE (cm)
1.gcp	6,40	6,13	-11,80	57,40	0,00	57,40	5,26	8,08
1.gps	-42,30	-42,39	-112,50	5,10	0,20	112,50	12,59	44,22
2.gcp	7,00	7,57	-15,90	74,90	0,00	74,90	6,91	10,25
2.gps	-22,10	-23,18	-77,00	23,60	0,00	77,00	10,40	25,41
2.gcp+gps	-0,60	-0,33	-23,50	63,50	0,00	63,50	5,26	5,27
3.gcp	7,80	16,00	-27,70	162,20	0,00	162,20	27,92	32,17
3.gps	-22,90	-19,71	-86,10	119,60	0,00	119,60	26,96	33,40
3.gcp+gps	6,20	18,33	-28,40	237,10	0,00	237,10	41,91	45,74
4.gcp	-	-	-	-	-	-	-	-
4.gps	189,40	191,33	134,00	355,10	134,00	355,10	27,39	193,28
4.gcp+gps	-7,10	-6,98	-21,50	1,20	0,00	21,50	4,78	8,45
5.gcp	15,35	25,84	-37,20	218,90	0,00	218,90	41,11	48,56
5.gps	-165,50	-156,44	-195,40	-77,70	77,70	195,40	33,92	160,00

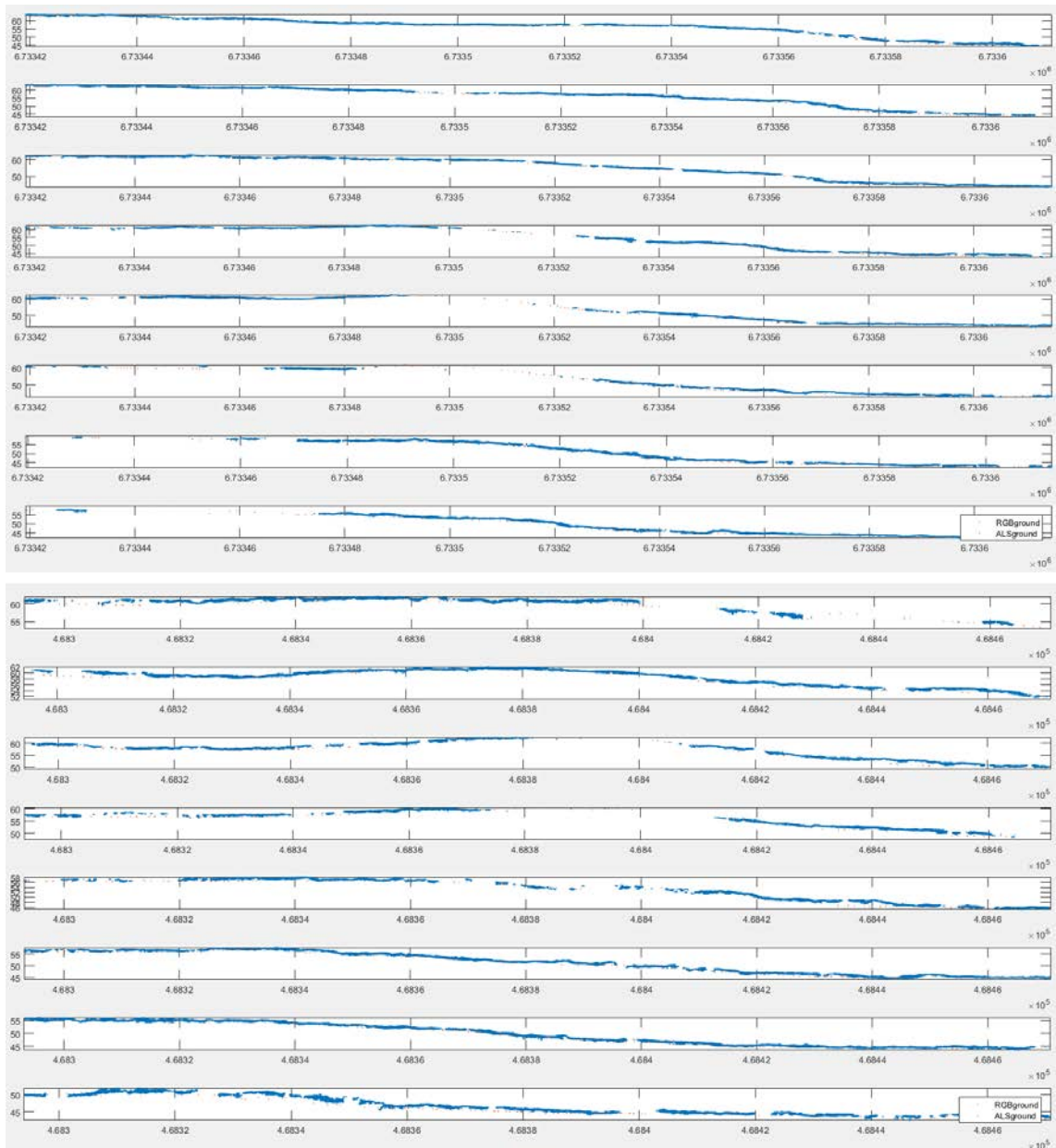
						0		3
5.gcp+gps	7,90	26,35	-39,70	215,50	0,00	215,50	49,38	55,96
6.gcp	13,20	42,77	-34,20	262,10	0,00	262,10	63,22	76,32
6.gps	40,90	52,26	-28,00	223,40	0,00	223,40	47,17	70,40
6.gcp+gps	165,75	174,26	104,00	331,20	104,00	331,20	44,92	179,96
7.gcp	1,80	31,89	-44,10	239,80	0,00	239,80	52,93	61,79
7.gps	-81,30	-55,49	-152,30	129,50	0,10	152,30	59,44	81,31
7.gcp+gps	109,85	99,74	-33,50	279,00	0,10	279,00	61,42	117,13
8.gcp	178,20	183,95	128,00	302,20	128,00	302,20	30,74	186,50
8.gps	-59,20	-39,36	-135,90	199,20	0,10	199,20	61,81	73,27
8.gcp+gps	4,10	18,64	-49,20	201,00	0,00	201,00	39,76	43,91



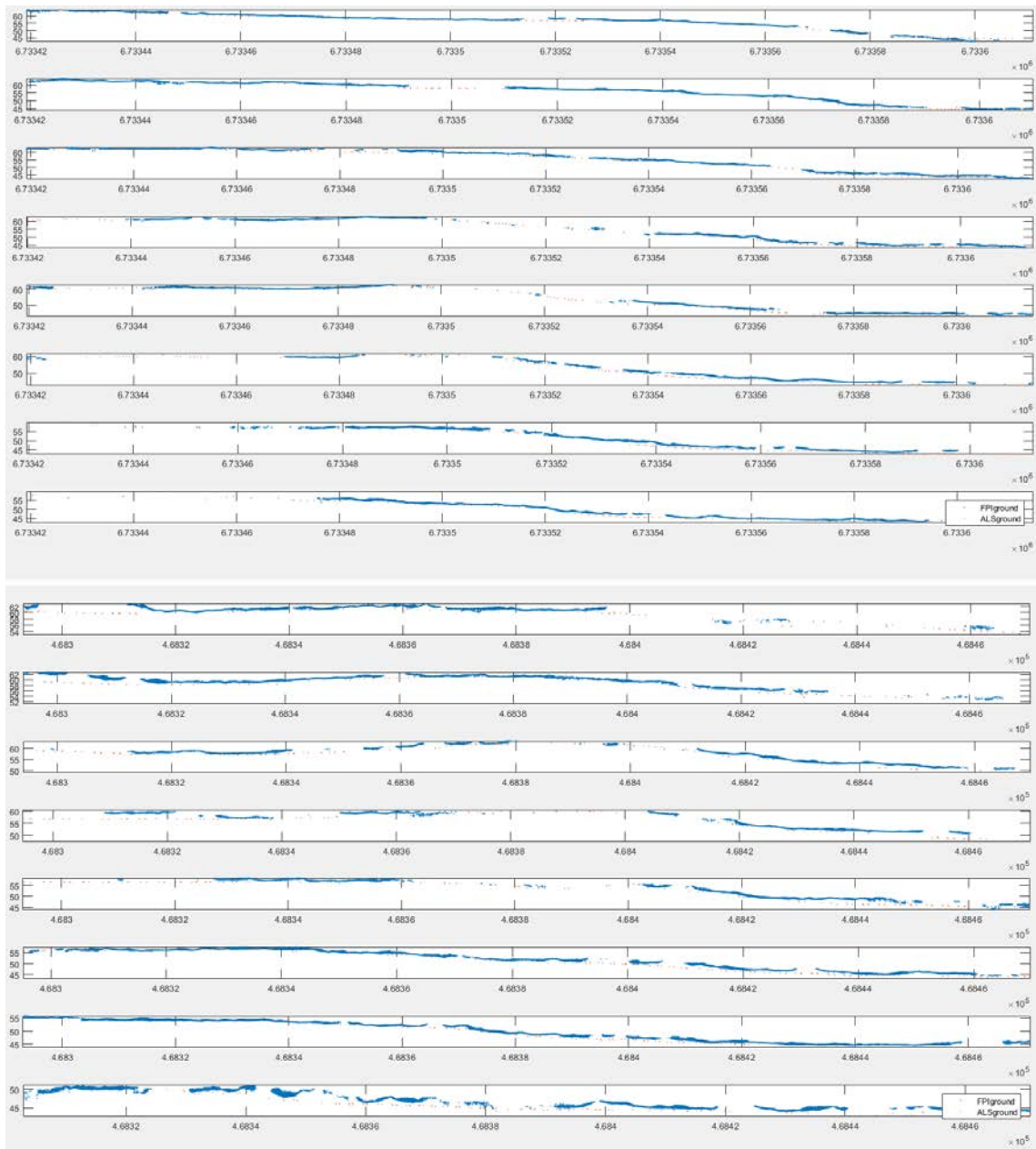




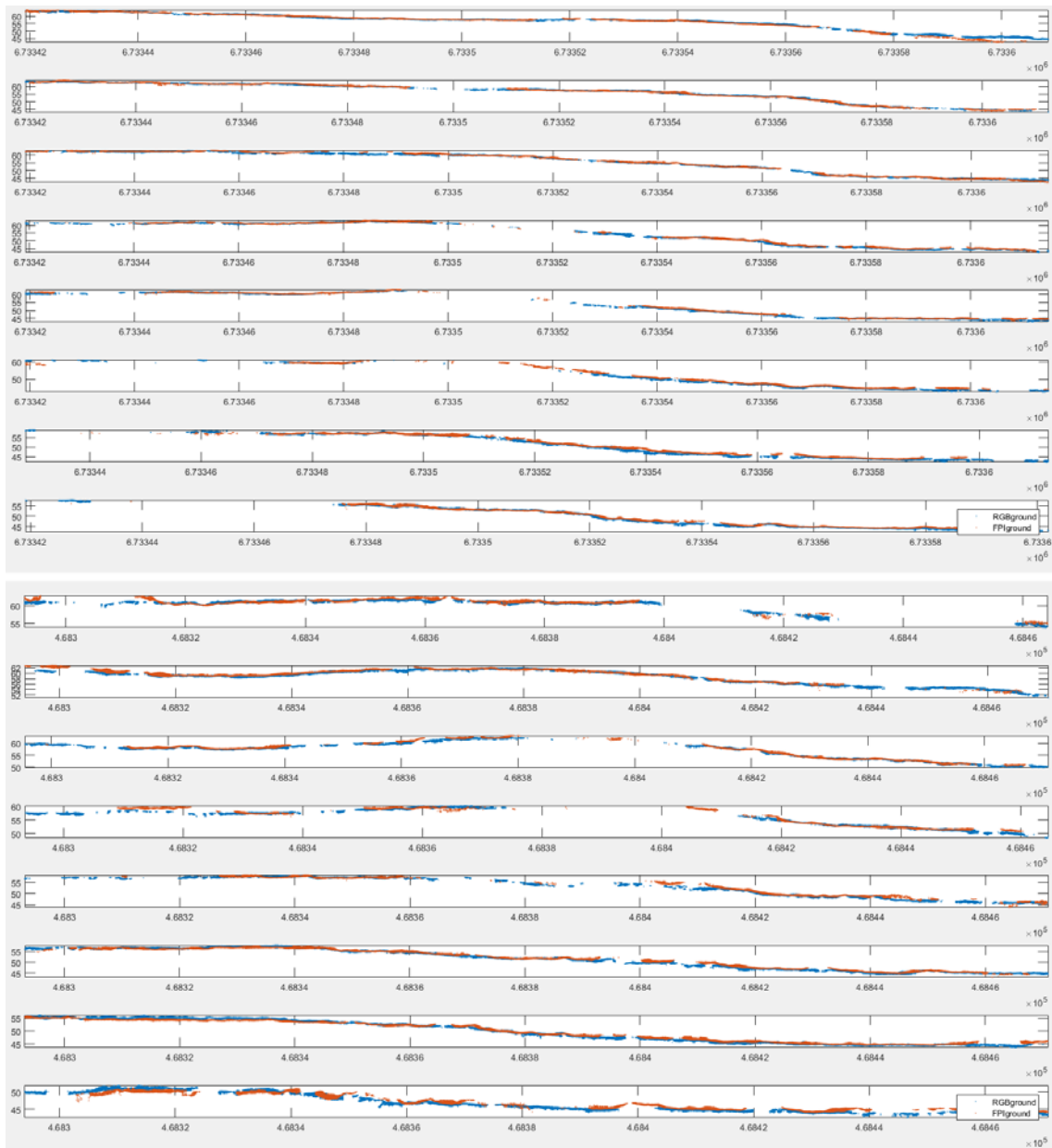
Kuva 33 Mustila FPI-blokkien referenssinä toimi ”1. gcp+gps”, josta vähennettiin kaikki loput FPI blokkirakenteet: a) ”1. gcp” b) ”1. gps” c) ”2. gcp” d) ”2. gcp+gps” e) ”2. gps” f) ”3. gcp” g) ”3. gcp+gps” h) ”3. gps” i) ”4. gcp+gps” j) ”4. gps” k) ”5. gcp” l) ”5. gcp+gps” m) ”5. gps” n) ”6. gcp” o) ”6. gcp+gps” p) ”6. gps” q) ”7. gcp” r) ”7. gcp+gps” s) ”7. gps” t) ”8. gcp” u) ”8. gcp+gps” v) ”8. gps”. Eri blokkivariaatiot ovat 1) kaikki lentolinjat 2) kaikki lentolinjat ja joka toinen kuutio 3) joka toinen lentolinja 4) joka toinen lentolinja/ei päätyjä/poikittaislinja 5) joka toinen lentolinja/ei päätyjä 6) joka toinen lentolinja/joka toinen kuutio/poikittaislinja 7) jokatoinen lentolinja/ei päätyjä/joka toinen kuutio 8) jokatoinen lentolinja/joka toinen kuutio (Kuva 14). Väriskaala arvojen 2 m – (-2 m) välillä.



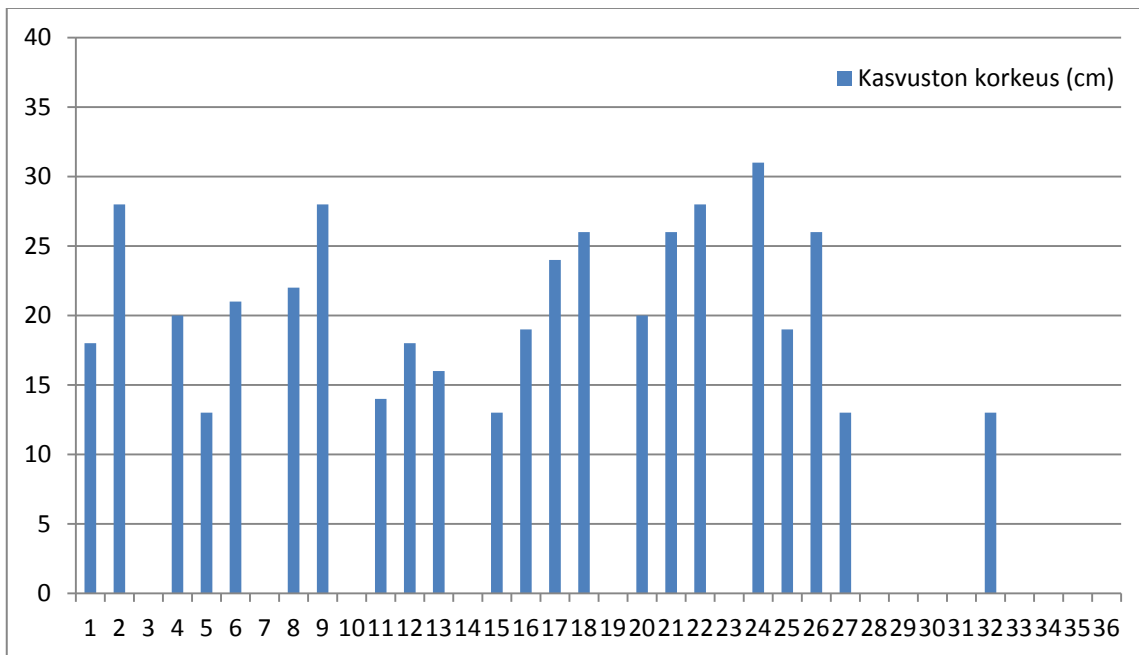
Kuva 34 Mustilan MML:n laserkeilaus DTM oranssilla ja RGB-kuvien DTM:n sinisellä. Kuvassa ylhäällä X-profiilit ja alhaalla Y-profiilit. Nähdään, että RGB-kuvien DTM on hieman korkeammalla kuin MML:n laserkeilaus DTM.



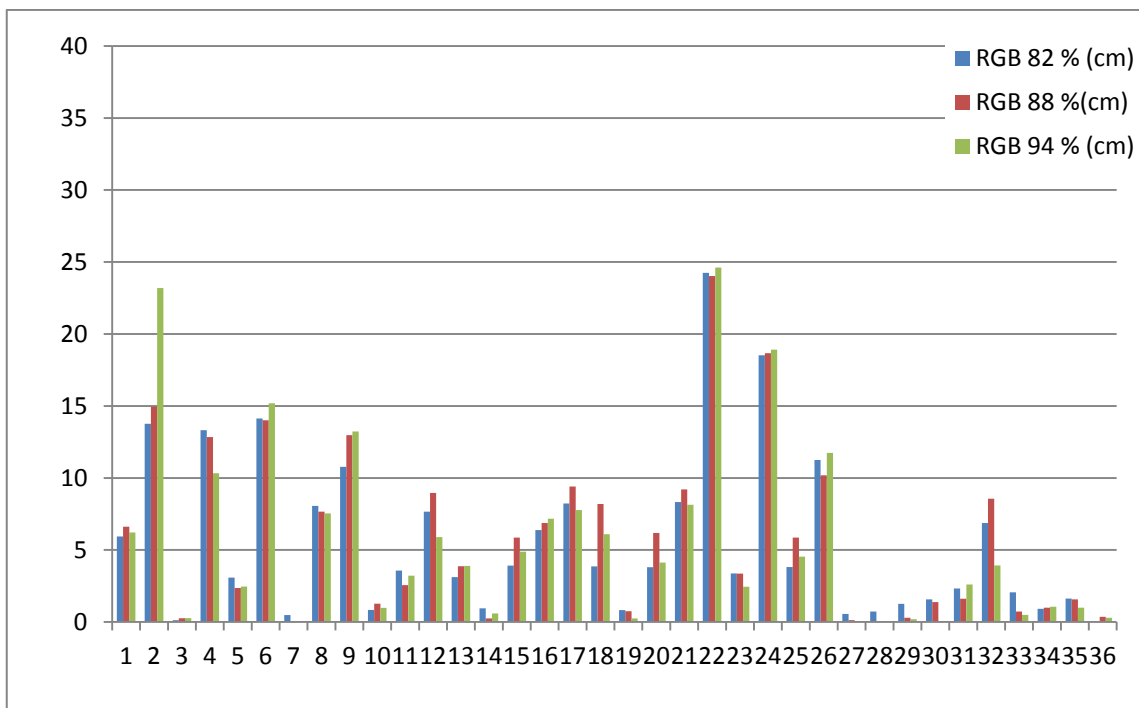
Kuva 35 Mustilan MML:n laserkeilaus DTM oranssilla ja FPI-kuvablokin ”1) kaikki linjat (gcp+gps)” DTM:n sinisellä. Kuvassa ylhäällä X-profiilit ja alhaalla Y-profiilit. Nähdään, että FPI-kuvien DTM:n on korkeammalla kuin MML:n laserkeilaus DTM.



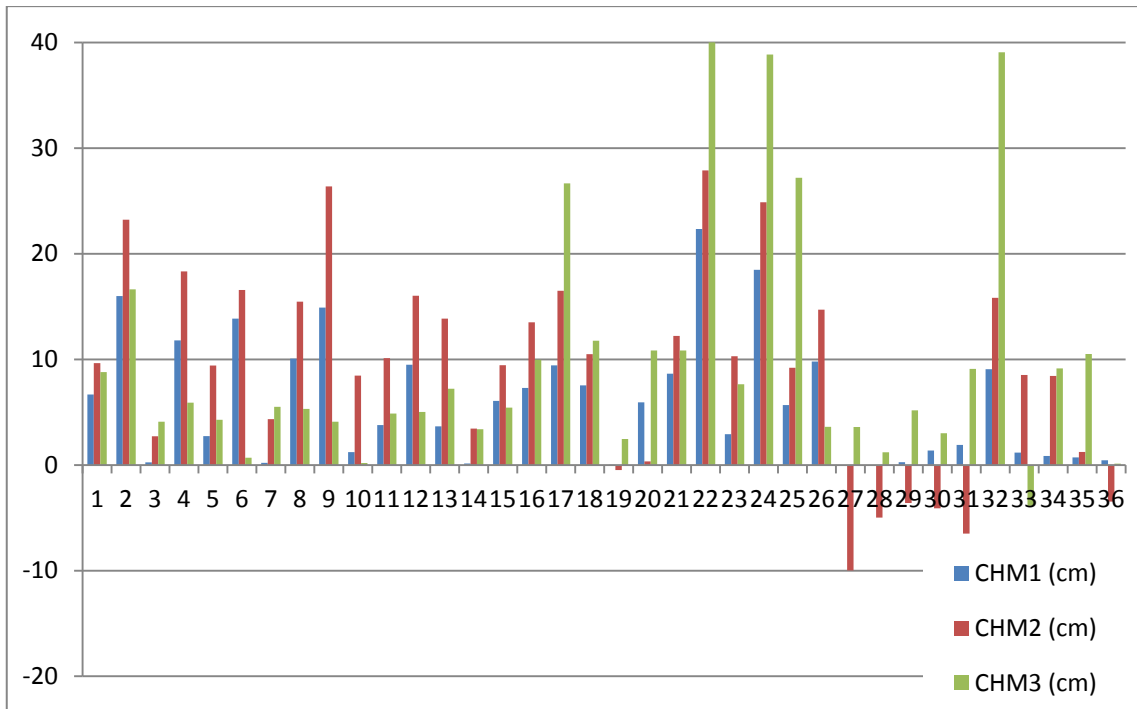
Kuva 36 FPI-kuvablokin ”1) kaikki linjat (gcp+gps)” DTM oranssilla ja RGB-kuvien DTM:n sinisellä. Kuvassa ylhäällä X-profiilit ja alhaalla Y-profiilit. Nähdään, että FPI-kuvien DTM:n on hieman korkeammalla kuin RGB-kuvien DTM.



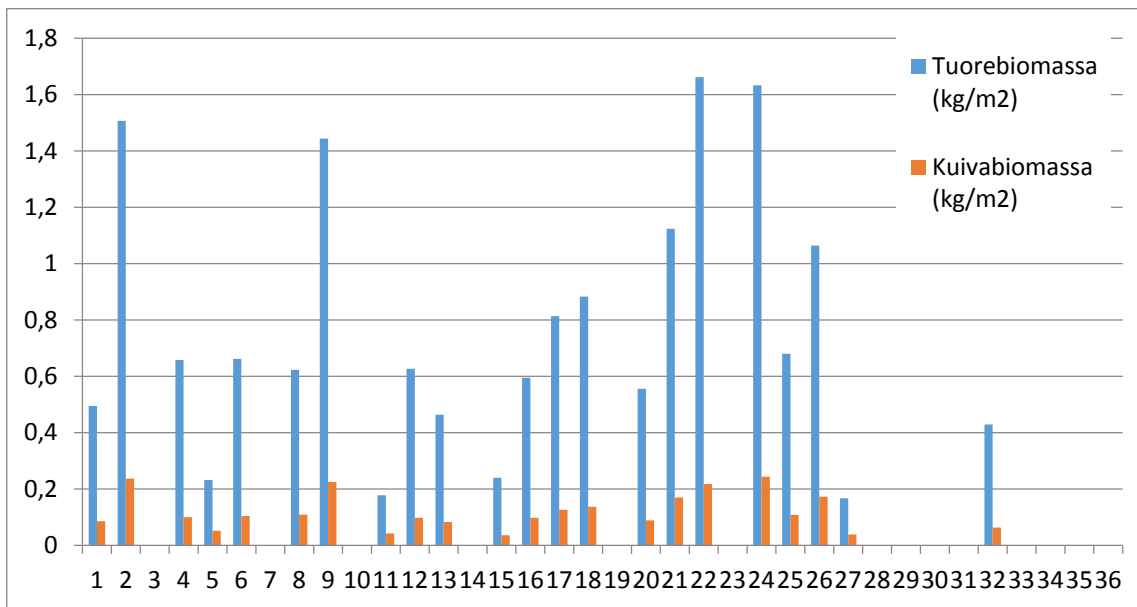
Kuva 37 Näytteenottoruutujen referenssi kasvuston korkeudet (cm).



Kuva 38 Näytteenottoruutujen kasvuston korkeudet (cm) 82 %, 88 % ja 94 % pituuspeittojen RGB-blokeilta laskettuna.



Kuva 39 Näytteenottoruutujen kasvuston korkeudet (cm) RGB- ja FPI-kuvablokeilta laskettuna. CHM1: heinäkuun RGB-kuvablokin DSM:stä vähennettiin heinäkuun RGB-kuvablokin DTM:ä (Kuva 24a). CHM2: heinäkuun RGB-kuvablokin DSM:stä vähennettiin toukokuun RGB-kuvablokista vastaavasti tuotettu DSM (Kuva 24b) CHM3: heinäkuun FPI-kuvablokista tuotetusta DSM:stä vähennettiin heinäkuun FPI-kuvablokista tuotettu DTM (Kuva 24c).



Kuva 40 Näytteenottoruutujen tuorebiomassa ja kuivabiomassa (kg/m²).