

Teemu Laine

# RPAS-kuvaus yhdistettynä RTK-mitattuihin kuvanotto paikkoihin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinöörityö

4.5.2016

Tekijä Otsikko  Sivumäärä Aika	Teemu Laine RPAS-kuvaus yhdistettynä kuvanottoaikkoihin  37 sivua + 2 liitettä 4.5.2016  RTK-mitattuihin
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaajat	varatoimitusjohtaja Mikko Ilmonen lehtori Jussi Laari
<p>Tämän insinöörityön tarkoituksena oli selvittää onko RPAS-järjestelmällä, johon on liitetty RTK-vastaanotin, mahdollista tuottaa riittävän tarkkaa georeferoitua ilmakuvauksmateriaalia. Selvitettävän tarkkuuden tulisi olla niin hyvää, että perinteisten maankontrollipisteiden rakentamisen ja niistä tehtävän kuvan georeferointi olisi turhaa.</p> <p>Laskentavaiheessa vertailtiin tunnettujen kuvanottoaikkokojen ja maankontrollipisteisiin liitettyjen simulaatioblokkien teoreettista tarkkuutta. Teoreettisen tarkkuuden perusteella pystyttiin määrittämään todellinen eli käytännön tarkkuus. Laskentaoperaatio suoritettiin PIEngeeringin RapidStation -ohjelmalla.</p> <p>Tulosten perusteella voidaan sanoa, että tunnetuilta kuvanottoaikoilta blokkitasoitettu kuva haastaa tavallisen GCP-georeferoidun kuvaamisen. Voidaan todeta, että ainakin tämän tyyppisissä ilmakuvauksblokeissa maankontrollipisteden rakentaminen ja niistä kuvan orientoiminen on turhaa, koska tulokset tutkitusta materiaalista olivat huomattavasti laadukkaampia kuin GCP-georeferoidussa.</p>	
Avainsanat	RPAS, fotogrammetria

Author Title	Teemu Laine RPAS-aerial photography combined with RTK-measured camera locations
Number of Pages Date	37 pages + 2 appendices 4 May 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructors	Mikko Ilmonen, Vice president Jussi Laari, Senior Lecturer
<p>In this Bachelor the goal was to examine if it is possible to get accurate enough aerial photography data with a RPAS that uses an onboard RTK-receiver. The results need to be so accurate, that they would make original georeferencing from ground control points useless.</p> <p>In computations both theoretical accuracy with exposure locations and with ground control points were examined. With the theoretical accuracy it was possible to achieve a so called practical accuracy. Computations were made by using PIEnearings RapidStation software.</p> <p>According to the computations it can be said that the accuracy with exposure locations easily reaches the accuracy of traditional georeferencing with ground control points. The results in the underlying block were so good that building and using ground control points will be useless at least in these kinds of blocks.</p>	
Keywords	RPAS, fotogrammetry

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	RPA-lennokkikuvaus	2
2.1	Ilmakuvauksen lyhyt historia	2
2.1.1	Ilmakuvauksen alkuvaiheet	2
2.1.2	Miehittämättömien ilma-alusten historiaa	3
2.2	RPAS-järjestelmän määritelmä	4
2.3	Lainsäädäntö Suomessa	7
2.4	RPA-ilmakuvauksen perusperiaate	9
2.5	Käytännön mittaustoiminta	9
2.5.1	Suunnittelu	10
2.5.2	Lento	10
2.5.3	Lennon jälkeen	11
2.5.4	Signalointi	11
2.5.5	Kuvaus- ja lento-olosuhteet	13
2.6	Käyttökohteet ja sovellukset	15
2.7	Ongelmat ja virhelähteet	17
2.8	MAVinci SIRIUS PRO RPAS	18
2.8.1	Tekniset ominaisuudet	19
2.8.2	Lentoprosessi	20
2.8.3	Haasteet ja ongelmat	21
3	Satelliittimittaukset	21
3.1	Satelliittimittausten perusperiaate	21
3.2	Perusmittaustavat	22
3.3	RTK:n perusperiaate	23
4	Fotogrammetrinen blokkitasoitus	25
5	Testidatan käsittely	26
5.1	Datan kuvaus	26
5.2	Pieneering RapidStation -ohjelma	26
5.2.1	Ohjelman ominaisuudet	26
5.2.2	RTK-mitattujen kuvanottoaikkujen käsittely RapidStationilla	27

5.3	Laskennan vaiheet	28
5.3.1	Teoreettinen tarkkuus	28
5.3.2	Teoreettiseen tarkkuuteen pääseminen	30
5.3.3	Todellinen tarkkuus	32
5.3.4	Viimeinen malli	33
5.4	Johtopäätökset	34
6	Yhteenveto	35
	Lähteet	37
	Liitteet	
	Liite 1. Mallin varmentaminen	
	Liite 2. Tarkkuuden varmentaminen	

## Lyhenteet

GCP	Ground control point. Maastoon mitattu maatukipiste, joiden avulla ilmakuvat saadaan käännettyä haluttuun koordinaatistoon.
GLONASS	Venäjän puolustusministeriön ylläpitämä satelliittipaikannusjärjestelmä.
GPS	Global positioning system. Yhdysvaltojen armeijan ylläpitämä satelliittipaikannusjärjestelmä.
RPA	Remotely Piloted Aircraft. Kauko-ohjattava ilma-alus
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System. Kauko-ohjattavan ilma-aluksen kokonaisjärjestelmä.
RTK	Real Time Kinematic. Satelliittimittausmetodi, jonka on mahdollista päästä senttimetrin tarkkuuteen.

## 1 Johdanto

RPA-teknologia on viimeisten vuosien aikana ottanut suuria harppauksia eteenpäin. Komponenttien halventuminen, pienentyminen ja parantuminen ovat mahdollistaneet yhä erilaisempien ominaisuuksien hyödyntämisen lennokki-ilmakuvauksessa. Laitteiden kehittyessä ja laadun parantuessa myös vaatimukset datan tuottamisen tarkkuuden ja tehokkuuden parantamiseksi ovat kasvaneet merkittävästi. Lisäksi tavallisen lentokoneista tehtävän ilmakuvausten huomattavasti kalliimmat kustannukset ovat antaneet jalansijan paljon halvemmille miehittämättömällä ilma-aluksilla tehtäville operaatioille.

Siviilikäytössä ylisimmät RPA-ilma-alukset ovat joko yksisiipisiä lennokkeja tai moniroottoria helikoptereita. Lennokeilla on monia käyttötarkoituksia, jotka vain kasvavat laitteiden kehittyessä. Tavalliseen lentokoneesta tehtyyn ilmakuvaukseen verrattuna lennokeilla tehdyt kuvaukset kattavat huomattavasti pienemmän alueen, koska ne tehdään matalammalta: maksimissaan 150 metrin korkeudelta. Toisaalta näin matalalta otetuissa kuvissa on hyvin korkea maastoresoluutio, joka havainnollistaa maanpinnan ominaisuuksia erittäin yksityiskohtaisesti.

Ilmakuvauslennokkiin yhdistetty reaaliaikainen satelliittimittaus eli RTK, jolla lennokin sijainti voidaan tuntea senttimetrin tarkkuudella kuvanottohetkellä, on yksi uusista keksinnöistä, jolla pyritään tehostamaan kuvausmateriaalin tuottamista sekä tarkkuutta. Yhdistämällä RTK RPAS-järjestelmään pyritään poistamaan lennokokuvaamisesta maakontrollipisteiden ja signalointityön tekeminen, joka voi viedä koko prosessista aikaa jopa yli 50 prosenttia. On myös alueita, joille maakontrollipisteiden rakentaminen ei onnistu, tai niiden näkyvöittäminen maaston peitteisyyden takia ei olisi mahdollista. [2]

Tässä insinööriyössä tutkimuksen kohteena on MAVincin ja Topconin yhdessä toteuttaman RPAS-järjestelmän SIRIUS -järjestelmän tuottama ilmakuvausmateriaali, jossa lennokkiin sijoitetun RTK-vastaanottimen avulla kuvanottosijainnit on mitattu senttimetrin tarkkuudella. Tarkoituksena on tutkia ja vertailla PIEngeeringin RapidStation ohjelmaa käyttäen kuvausdatan georeferoitua koordinaattitarkkuutta sekä verrata sitä tavalliseen maastokuvien georeferoituun tarkkuuteen. Lisäksi käsitellään RPAS- järjestelmien sekä RTK- ja satelliittimittauksen perusperiaatteita. Työn tarkoituksena on selvittää, onko RTK-korjauksella mahdollista poistaa raskas maastokuvien georeferointi ja

signalointi, niin että tarkkuus ei kärsi. Työ on tehty Mitta Oy:lle yhteistyössä PIEnengineering Oy:n kanssa. [2]

## 2 RPA-lennokkikuvaus

### 2.1 Ilmakuvauksen lyhyt historia

#### 2.1.1 Ilmakuvauksen alkuvaiheet

Ilmakuvauksen ensimmäiset askeleet otettiin 1800-luvun puolivälissä. Ranskan armeija onnistui ottamaan ensimmäistä kertaa ilmasta käsin valokuvan käyttämällä ilmapalloja ja leijoja. Maapallon kuvaaminen yläilmoista käsin on ollut ihmiskunnalle tärkeää jo alkuajoista lähtien. Tätä kuvastaa jo ensimmäiset kaupungeista maalaamalla tuotetut kartat, joissa lintuperspektiiviä on pyritty harjoittamaan. Ennen 1900-lukua ilmakuvausta harjoittavat vain harvat, sillä se oli hyvin kallista sekä vaarallista. Vaikka ensimmäisissä ilmakuvissa käytettiin ilmapalloa lentoalustana, tuli leijakuvaamisesta huomattavasti kehittyneempää ja yleisempää. 1900-luvun taite oli leijakuvaamisen kulta-aikaa. George R. Lawrence onnistui ikuistamaan leijoihin kiinnitetyllä panoraamakameralla San Franciscon suuren tulipalon jälkeen, joka tuhosi kaupungin. Lawrence'n ottamaa kuvaa (kuva 1) pidetään yhtenä aikakautensa parhaista valokuvista. [12]



Kuva 1. George R. Lawrence'n leijoiilla ottama panoraama ilmakuva San Franciscosta kaupungin palamisen jälkeen [16].



1900-luvulla ilmakeuhminen lisääntyi valtavasti, kun moottoroidut lentokoneet tulivat mukaan lentoalustoiksi. Ensimmäinen ja toinen maailmansota kiihdyttivät innovaatioita ilmakeuhuksen saralla, kun uusia sotilaallisia sovelluksia pyrittiin keksimään kuumeisesti jokaisen valtion toimesta. Varsinkin tiedustelupuolella ilmakeuhus oli suuresti arvostettua ja kehittyessään helpotti huomattavasti vihollisen havaitsemista. [12]

Ensimmäisen maailmansodan aikana ilmakeuhus jakaantui kahteen pääsuuntaukseen, joita olivat kartoitus sekä tiedustelukäyttö. Kartoituksessa käytetyt koneet olivat huomattavasti suurempia verrattuna tiedustelussa käytettyihin koneisiin. Sodan jälkeen kehitys alkoi näkyä myös siviilipuolella. Ilmakeuhusta alettiin käyttää muun muassa kartografiaan, metsänhoitoon, maaperän tutkimiseen sekä moniin muihin teknillisiin aloihin. [12]

Toinen maailmasota sekä sen jälkeinen kylmä sota tuottivat monia teknillisiä innovaatioita, joiden avulla kuvauslaitteet saatiin jopa avaruuteen asti. Näillä ensimmäisillä maapallon kiertoradalla kiertävillä satelliiteilla saatiin otettua ensimmäiset kuvat suurista luonnonilmiöistä avaruudesta käsin. Kylmän sodan jälkeisten vuosien aikana ilmakeuhuksen tekninen kehitys on ollut valtavaa. Tietokoneistuminen sekä muut elektroniset laitteet ovat mahdollistaneet uudenlaisen ilmakeuhamisen sekä pienten miehittämättömien ilma-alusten käytön. Filmikamerat ovat vaihtuneet digitaalisiin, joiden tallennuskapasiteetti ja käsiteltävyys ovat mahdollistaneet useita uusia sovelluksia. [12]

### 2.1.2 Miehittämättömien ilma-alusten historiaa

Miehittämättömien ilma-alusten käyttö juontaa juurensa jo aikaan ennen kuin ensimmäiset ilmakeuh otettiin. Tietävästi ensimmäisenä miehittämättömiä ilma-aluksia käyttivät itävaltalaiset hyökätessään Venetsiaan 1840-luvulla. Lento-alustana itävaltalaiset käyttivät ilmapalloja, jotka tuulen mukana kulkeutuivat viholliskohteisiin ja räjähtivät. Tuulien arvaamattomuuden vuoksi suureksi ongelmaksi muodostui ohjattavuus, ja pallot päätyivätkin pääasiassa muualle kuin alkuperäisenä tarkoituksena oli ollut. [12]

Miehittämättömät ilma-alukset ovat kehittyneet läheisesti suurten sotien yhteydessä. Miehittämättömät ilma-alukset tarjosivat mahdollisuuden suorittaa operaatioita, jossa ei uhata omia sotilaita. Myös inhimillisen epäonnistumisen mahdollisuutta voitiin vähentää. [12]

Ensimmäiset miehittämättömät ilma-alukset olivat ilmapalloja ja leijoja. Vasta 1916 valmistettiin ensimmäiset miehittämättömät moottoroidut lentokoneet. Koneiden kauko-ohjaamisen mahdollisti radio-ohjauksen hyödyntäminen. Gyroskoopin yhdistäminen ilma-alukseen mahdollisti koneiden vakauttamisen ja ohjaamisen ylipäättään. Ensimmäisen maailmansodan jälkeen 1930-luvun taitteessa keksittiin ensimmäiset autopilottijärjestelmät, joita käytettiin kuitenkin lähinnä risteilyohjauksissa. [12]

Ensimmäinen nykystandardien mukainen miehittämätön ilma-alus näki päivänvalon toisen maailmansodan aikana. Edward M. Sorensen patentoi aluksen, jolla pystyi lentämään näkö-alueen ulkopuolelle. Maa-asemasta, josta konetta ohjattiin, oli mahdollista seurata aluksen korkeutta, nopeutta, suuntaa, moottorin kierroslukua sekä muita ominaisuuksia, joille hän oli asentanut anturit. [12]

Kylmästä sodasta nykypäivään miehittämättömät ilma-alukset ovat yleistyneet valtavasti. Markkinataloudellinen kilpailu on ajanut hintoja alaspäin ja pakottanut kehityksen yhä tehokkaampaan suuntaan. Lentokoneesta tehdyn ilmakuvauskehyksen korkea hinta on antanut miehittämättömille ilma-aluksille mahdollisuuden kilpailla ja laajentua, koska niillä suoritettu ilmakuvaus on huomattavasti halvempaa toteuttaa.

## 2.2 RPAS-järjestelmän määrittely

Malleiltaan yleisimmin miehittämättömät ilma-alukset ovat joko kiinteäsiipisiä, lentokoneen mallisia tai multiroottorisia koptereita. Kiinteäsiipisten ja multiroottorisien lentoalustojen lisäksi käytetään myös ilmapalloja, leijoja, zeppeliinejä ja helikoptereita (kuva 2). RPAS-kokonaisjärjestelmä sisältää kauko-ohjattavan ilma-alustan, kauko-ohjauspaikat, ohjaus- ja seurantayhteydet sekä muita kauko-ohjatun ilma-aluksen käytön edellyttämiä järjestelmän komponentteja, jotka on erikseen määriteltä. Lisäksi järjestelmään kuuluu maastuasema, josta konetta ohjataan. Käyttötarkoitusten vaihdellessa RPAS-järjestelmiin liitetään usein erilaisia dataa keräviä laitteita, kuten esimerkiksi kameroita ja laserkeilaimia. Kameroilla on miehittämättömiä ilma-aluksia varusteltu jo pitkään, mutta vasta viime vuosina myös esimerkiksi laserkeilaimet ovat kehittyneet tarpeeksi kevyiksi, jotta siviilikäyttöiset miehittämättömät ilma-alukset jaksavat niitä kantaa. [14; 10.]

Kauko-ohjattavan miehittämättömän ilma-aluksen ja kauko-ohjattavan lennokin erottaa toisistaan vain käyttötarkoitus. Ilma-alukseksi kutsutaan sellaista RPAS-järjestelmää, joka on ammattikäytössä, kun taas lennokit ovat useimmiten harrastekäytössä. On siis mahdollista, että täysin sama RPAS-järjestelmä voi olla joko lennokka tai ilma-alus. Huolimatta siitä, että järjestelmä saattaa olla täysin samanlainen, on kauko-ohjattavalle lennokille ja ilma-alukselle omat säädöksensä Trafin julkaisemassa määräyksessä, joka koskee kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lennättämistä. [9; 10.]



Kuva 2. Erilaisia miehittämättömiä ilma-aluksia. Ylhäällä Aibotix X6, Keskellä vasemmalla ranskalaisen ABS Aerolight Industriesin valmistama varjoliidin, Keskellä oikealla, Scout B1-100 RPA Helicopter ja alimmaisena MAVinci SIRIUS pro. [15; 17; 12; 18.]

RPAS-järjestelmä operoi autopilotilla tai manuaalisesti miehittämättömän ilma-aluksen päällikön toimesta ohjattuna. Autopilotilla lennettäessä käytetään hyväksi satelliittipaikantamista, jonka avulla ilma-alus pystyy lentämään ennalta suunnitellun reitin.

RPAS-järjestelmiä on kaikenkokoisia ja -näköisiä, ja ne painavat tuhansista kiloista vain muutamaan grammaan. Kaikkein suurimmat ja pienimmät RPAS-järjestelmät ovat lähestulkoon poikkeuksetta sotilasteollisuuden käytössä. Miehittämättömillä sotilasteollisuuden Predator Droneilla lentoonlähtömassa saattaa ylittää tuhatkin kiloa. Pienimmät vakoiluun ja tiedusteluun käytettävät miehittämättömät ilma-alukset painavat vain muutamia grammoja. Monien maiden ilmailusäädökset ja -lait antavat siviili- ja yrityskäyttöön mahdollisuuden lentää vain kohtalaisen kevyillä lennokeilla yleisen ilmatilan turvallisuuden vuoksi. [13]

### 2.3 Lainsäädäntö Suomessa

Syksyllä 2015 Trafi julkaisi kauan odotetun ohjeistuksen miehittämättömien ilma-alusten käytöstä, jonka tavoitteena oli luoda liberaali minimisääntely, joka mahdollistaa miehittämättömien ilma-alusten turvallisen käytön. Lisäksi miehittämättömän ilma-aluksen käytössä sovelletaan ilmailulakia siltä osin, että kaikki lentoliikenteen sujuvuutta häiritsevä toiminta on kiellettyä. Lisäksi valtioneuvoston asetuksen mukaiset kielto- ja rajoitusalueet koskevat myös miehittämättömällä ilma-aluksella lentämistä. On syytä muistaa, että toiminnassa tulee huomioida, mitä on säädetty kotirauhasta, salakatselusta, aluevalvonnasta, yksityisyydensuojasta, tekijänoikeuksista, yleisestä vaaranaiheuttamisesta, sekä kasvinsuojeluaineiden ilmalevityksestä. [9; 10.]

Trafín määräyksessä kauko-ohjatun ilma-aluksen lennättämiseen sekä sillä operoimiseen ei vaadita lentotyölupaa. Myöskään lentotyöstä annettavaa määräystä ei sovelleta kauko-ohjattavien ilma-alusten kohdalla. Ennen kauko-ohjattavan ilma-aluksen käyttöönottoa tulee Liikenteen turvallisuusvirastolle tehdä ilmoitus, josta selviää käyttäjän tiedot, aluksen tekniset perustiedot, aiottu toiminta sekä sen laajuus, sekä mahdollinen operointi tiheästi asutulla alueella taikka kokoontuneen ihmisryhmän yläpuolella. [10]

Lentotyö on suunniteltava niin, ettei siitä synny vaaraa ihmisille taikka omaisuudelle ja meluhaitat on pyrittävä minimoimaan. Ilma-aluksen käyttäjän tulee olla vähintään 18-vuotias ja omata taidot ilma-aluksen hallitsemiseksi hätätilanteissa. Tällaisia tilanteita varten ilma-aluksessa tulee olla järjestelmä, joka pystyy ohjaamaan aluksen turvalliseen sijaan, jos esimerkiksi alus vioittuu taikka yhteys ilma-alukseen katkeaa. Ilma-alus on kyettävä tunnistamaan tarvittaessa, eli siitä tulee löytyä sen käyttäjän nimi sekä yhteystiedot. Lisäksi lentotyöstä tulee säilyttää seuraavat tiedot kolmen vuoden ajan:

- lennon päivämäärä
- lennätyspaikka
- ilma-aluksen päällikkö
- ilma-aluksen valmistaja ja malli
- lennätysten tai lennätysjärjelmän alkamis- ja päättymisaika
- onko lento ollut sellainen että ilma-alukseen on ollut suora näköyhteys, vai onko lento tehty näköyhteyden ulkopuolella
- lentotehtävän luonne sekä tieto siitä onko mahdollista kauko-ohjaustähystäjää käytetty. [10]

Ilman Liikenteen turvallisuusviraston myöntämää poikkeusta tulee rajoittamattomassa ilmatilassa kauko-ohjattavan ilma-aluksen lentoonlähtömassa olla alle 25 kg. Koko lennon ajan kauko-ohjattavaan ilma-alukseen on säilytettävä näköyhteys, joko aluksen ohjaajan taikka kauko-ohjaustähystäjän toimesta. Tähystäjän on pystyttävä kommunikoimaan ohjaajan kanssa kaikissa tilanteissa joko puhe- tai etäyhteydellä. Kauko-ohjattavan ilma-aluksen lentokorkeuden tulee olla alle 150 metriä veden- tai maanpinnasta, mutta korkeita kiinteitä kohteita on mahdollisuus tarkastella korkeammaltakin, kunhan kiinteään kohteeseen säilyy yli 15 metrin etäisyys. Lentokenttien lähialueilla on lennettävä alle 50 metrin korkeudessa, ja etäisyyden kiitorataan tulee olla vähintään viisi kilometriä. Jos määräyksistä on tarve joustaa, on pyydettävä lupaa ilmailukäyttöpalvelun tarjoajalta. Kauko-ohjattavan ilma-aluksen on kaikissa tilanteissa väistettävä muita ilma-aluksia. [10]

Lennettäessä ihmisjoukon tai tiheän asuinalueen yllä tulee ilma-aluksen lentoonlähtömassan olla alle 7 kg. Lentokorkeus tulee määrätä siten, että hätälaskun tapahtuessa vaara ihmisille tai omaisuudelle on mahdollisimman pieni. Käyttäjän tulee ennen lentoa tehdä kirjallinen turvallisuusarviointi sekä toimintaohjeistus hätätilanteiden

varalle. Mahdolliset aiheutuneet vaaratilanteet tulee ilmoittaa Liikenteen turvallisuusvirastolle. [10]

#### 2.4 RPA-ilmakuvauksen peruseriaate

Ilma-alus lentää useita lentolinjoja kuvattavan alueen yli. Ilma-aluksella tehdyt kuvat vaativat yleensä kohtalaisen suuret kuvapeitot, jotta laskentaohjelma osaa yhdistää ne toisiinsa jälkikäteen. Kuvien tulee peittää toisiaan niin pituus-, kuin sivuttaissuunnassakin, ja tarkkojen ortokuvien ja pistepilvien saamiseksi tulee kuvapeittojen olla 60–80% välissä. Miehitettömällä ilma-aluksella suoritettu ilmakuvaus lennetään lainsäädännöstä johtuen kohtalaisen matalalla, maksimissaan 150 metrin korkeudessa. Lentokorkeutta voidaan pitää verrattaen matalana, jos sitä vertaa esimerkiksi miehitetystä lentokoneesta tehtyihin kuvauksiin. [13]

Matalta otetuissa kuvissa on kuitenkin omat hyvät puolensa, sillä kuvat ovat paljon tarkempia ja maastopikselin koko on hyvin pieni. Mavincin lentämä demodatan lentokorkeus oli 65 metriä, jolloin maastopikseli oli vain 1,6 cm. Lentokorkeus ja maastopikseli määrittävät toisiaan, eli mitä korkeammalta lennetään, sitä suurempi maastopikselin koko on, ja päinvastoin. Maastopikseli määrittää kuvan tarkkuutta, sillä tasotarkkuus on noin puolet maastopikselin koosta. Korkeudessa maastopikselin ja korkeuden suhde menee kutakuinkin yksi yhteen. [2]

#### 2.5 Käytännön mittaustoiminta

RPAS-järjestelmillä tehtävät ilmakuvaukset sisältävät useita tärkeitä vaiheita, joiden kautta hyvään lopputulokseen on mahdollista päästä. Ennen mittauksien ja niiden suunnittelemisen aloittamista tulee selvittää tietyt asiat, jotta kuvaukset voivat onnistua. Kaikki suunnittelu lähtee siitä, että tiedetään ja valitaan tehtävä tuote. Tulee miettiä, minkälaista dataa on kerättävä, jotta haluttuun lopputuotteeseen päästään ja jotta sen laatu olisi paras mahdollinen. On mietittävä, onko mittausta ylipäätään mahdollista tehdä esimerkiksi vuodenajasta tai muista ilmastollisista tekijöistä, kuten maanpinnan lumisesta peitteestä, johtuen. Lisäksi on mietittävä tarkkuusvaatimuksia, sillä toisinaan erittäin tarkka tuote ei ole sen parempi kuin hieman epätarkempi. [6]

### 2.5.1 Suunnittelu

Ennen lentoa tulee tehdä lento- tai kuvaussuunnitelma, mikä tapahtuu yleensä kätevästi RPAS-järjestelmän mukana tulleilla ohjelmilla. Lentosuunnitelmassa määritellään lento- ja kuvanottokorkeus sekä radat, joita pitkin järjestelmä lentää autopilotin avulla satelliittipaikannusta hyödyntäen. Ohjelmalle tulee asettaa pituus- ja sivupeittomäärät prosentteina, jotta kuvat voidaan käsittelyvaiheessa yhdistää toisiinsa. Peitteisyyden prosentit määräytyvät yleensä maanpinnan muotojen tai lopputuotteen mukaan. Jyrkkämuotoiset alueet tai kaupungit saattavat vaatia jopa 80 %:n peittoja, kuitenkin usein kuvapeitot ovat hieman pienempiä. Laadukkaat kameran tasausjärjestelmät taikka GPS-järjestelmän käyttö voi vähentää kuvien peitteisyyttä. [6]

Lisäksi tulee rajata alue, jota lennokki ei saa ylittää, vaan palaa takaisin kuvausalueelle. Tulee myös varmistaa, että järjestelmän kaikki osat ja toiminnot ovat kunnossa, kuten potkurit sekä kamera. Kuvauksia suunniteltaessa tehdään usein signalointisuunnitelma, jossa näkyvöitettävien tukipisteiden paikat päätetään. Signalointisuunnitelmassa tulee myös selvittää, kuinka signaloiduille kohteille mitataan koordinaatit, millä järjestelmällä ja kuinka tarkasti. Tukipisteiden tarkkuus yhdessä lukumäärän kanssa määrittää pitkälti koko kuvauksen tarkkuuden. [6]

Suunnittelussa tulisi huomioida auringon asento, jotta kuvausmaastossa sijaitsevien kohteiden varjot eivät olisi turhan pitkiä. Varjojen vaikutuksen vähentämiseksi lentoradat tulisi suunnitella niin, että ne kulkevat itä-länsisuuntaisesti ja että paras kuvanottovalaistus saadaan, kun aurinko paistaa kameran takaa. Kustannustehokkuutta lisää, jos lentoradat suunnitellaan mahdollisimman pitkiksi ja että niitä olisi mahdollisimman vähän. Rantaviivaa kuvattaessa tulisi mahdollisuuksien mukaan suorittaa lennot pitkin rantaviivaa, sillä näin pystytään säästämään kustannuksissa. Mahdollisuuksien mukaan lentolinjat tulisi suunnitella niin, että lentolinjat kulkisivat tuulen suunnassa, jolloin tuuli ei pääse puhaltamaan lennokkia pois reitiltä. On tunnettu fakta, että tuuli vaikuttaa kaiken tyypisiin RPA-aluksiin, mutta erityisesti multiroottoriset kopterit pystyvät toimimaan paremmin tuuliolosuhteissa. [6]

### 2.5.2 Lento

Autopilotilla varustettu järjestelmä ei lentoon lähetettyään vaadi kaiken toimiessa minkäänlaisia toimenpiteitä. Lennokki lentää lentosuunnitelmassa tehdyn reitin



automaattisesti ja suorittaa kuvaukset. Ilma-aluksen päällikön tehtävä lennon aikana on valvoa ilmatilaa, sillä RPAS-lennokin on väistettävä kaikkia muita ilmatilassa liikkujia. Samalla on myös hyvä tarkkailla tietokoneen telemetriasta, että lennokka pysyy varmasti reitillään, sillä tuuli saattaa ajaa sitä sivuun, jolloin otetut kuvat eivät ole halutunlaisia. Jos tuuli vaikuttaa lennokkiin huomattavasti, tulee harkita lento-operaation keskeyttämistä. [2; 6.]

### 2.5.3 Lennon jälkeen

Lennokin laskeuduttua siirretään kameran ottamat kuvat sekä lennokin GPS-sijaintitiedot lennon ajalta tietokoneelle. Lisäksi tulee siirtää tiedot lentokorkeudesta ja kameran kallistuksista kuvien ottohetkillä, sillä niitä tarvitaan jälkilaskennassa esimerkiksi fotogrammetrisen ilmakuvausblokin tekemiseen. Mahdolliset laskeutumisesta aiheutuneet vauriot tulee myös tarkastaa. [6]

### 2.5.4 Signaointi

Signaoinnilla pyritään saattamaan näkyviksi kuvilta haluttuja kohteita. Yleensä kohteet ovat runko- tai tukipisteitä, joiden avulla kuvaukset voidaan sijoittaa haluttuun koordinaatistoon (kuva 3). Yleistä on myös se, että kuvilta signaloidaan kohteita, joita halutaan kartoittaa. Kartoitus voidaan tehdä myös ilman signaointia, jos kohde on tarpeeksi näkyvä. Usein kohde on kuitenkin liian pieni, joten se pitää signaloida. Kiinteistöjen rajapyykit ovat hyvä esimerkki tällaisista kohteista. [6; 7.]



Kuva 3. Neliö- ja ristisignaali. Neliösignaalia on vahvistettu maalaamalla tausta mustaksi [7].

Signaaleita on monen muotoisia, mutta yleisimpiä ovat ristin ja ympyrän malliset signaalit. Signaalit ovat yleensä materiaaleilta puuta tai muovia ja väriltään valkoisia tai muuten hyvin maastosta ilmaan erottuvia. Signaalit sijoitetaan näkyväksi tehtävän pisteen päälle siten, että kuvion keskipiste tai leikkauspiste on näkyväksi saatettavan kohteen keskellä. [7]

Ennen signaloimista tulee tehdä signalointisuunnitelma. Suunnitelmalla halutaan varmistaa että lopullisen kuvan sitomiseen koordinaatistoon on tarvittava määrä sidospisteitä, joilla se onnistuu. Signaloitavien pisteiden sijoittaminen riippuu maastonmuodoista, kuvausalueen laajuudesta ja sijaintitarkkuudesta mitä kuvaukselta halutaan. Signaloitava pisteistö tulisi sijoittaa niin, että kuvattava alue jää kokonaisuudessaan sen sisälle. Lisäksi suositeltavaa olisi, että kuvausjonojen saumoihin signaloitaisiin muutamia pisteitä. Usein signaloiminen on hyvin hankalaa, sillä kuvattavat alueet ovat usein hankalakulkuisia, kuten esimerkiksi tiheät metsät. Lisäksi signaaleille joudutaan vielä mittaamaan koordinaatit X,Y,Z (kuva 4), ja mittalaitteilla signaloitavalle pisteelle voi olla vielä hankalampaa päästä. Erittäin peitteiselle alueelle ei ole mahdollista satelliittimittauksia hyödyntäen kartoittaa pistettä. [6; 7.]



Kuva 4. Koordinaattien mittaamista signaloidulle tukipisteelle satelliittimittauskalustolla [6].

Maasto saattaa olla joskus niin vaikeakulkuista, tai aikataulu niin tiukkaa, ettei signalointia voida tehdä. Silloin on mahdollista jälkikäteen mitata kuvilta kohteita, jos se vain projektin puitteissa on sallittua. Menetelmässä kuvilta poimitaan näkyviä kohteita ja ne sitten kartoitetaan jälkikäteen maastossa. Tapaa voidaan käyttää rakennetuilla alueilla, joissa sijaitsee tarpeeksi selkeitä kohteita. [6]

#### 2.5.5 Kuvaus- ja lento-olosuhteet

Sääolosuhteiden vaikutus miehittämättömällä ilma-aluksella tehtyihin kuvauksiin on huomattava. Laadukkaiden kuvien saamiseksi tulee huomioida useita asioita. SIRIUS pro:lle luvataan valmistajan puolesta täyttä operointikykyä jopa tuulessa noin 14 m/s. Lisäksi se kestää puuskittaista tuulta noin 18 m/s. Tuuliolosuhteiden kanssa kannattaa kuitenkin olla tarkkana, sillä tuulen heiluttaessa konetta vähänkin saattavat otetut kuvat olla aivan väärästä paikasta. Kopterinmallisilla RPAS-järjestelmillä tuulensietokyky on vielä hieman kehittyneempää, ja erilaisilla vakauttimilla kamerakin pysyy hyvin paikallaan. Kova tuuli taikka tuulen puuskaisuus aiheuttaa vaikeuksia laskeutumisessa, sillä se saattaa ohjata koneen kauksikin asetetusta laskeutumispaikasta, erityisesti kiinteäsiipiset lennokit ovat alttiita tälle ongelmalle. On mahdollista, että kone vaurioituu laskun yhteydessä kovan tuulen paikatessa sen maahan. Tuulen voimakkuutta arvioidessa tulee huomioida, että kun kone lentää yläilmoissa, jopa 150 metrin

korkeudessa, saattavat tuulet siellä olla huomattavasti maanpinnan tasoa voimakkaampia. [6]

Optimaalinen kuvaussää on aurinkoinen, puolipilvinen tai pilvinen, ja tuulen tulisi olla melko tyyni. Optimaalinen kuvaussää riippuu myös kamerasta, sillä jotkut tarvitsevat enemmän valoa ja jotkut vähemmän parhaan mahdollisen kuvan saamiseksi. Hyvin kirkaalla säällä auringon valo aiheuttaa kuvausalueelle varjoja, jotka heikentävät kuvan laatua ja vääristävät maanpinnan kohteita. Auringon aiheuttamat, maanpinnan peilaavista kappaleista johtuvat heijastukset voivat pahimmillaan pilata kuvan täysin. [6]

MAVincin SIRIUS pro, toisin kuin monet muut lennokit, kestää vettä ja pystyy toimimaan myös sateella, vaikka synkät sadepilvet sekä pisarat haittaavat varmasti laadukkaan lopputuloksen saamista. Useat lennokit eivät kestä vettä ollenkaan, ja jo muutama pisara vettä voi elektroniikkakomponentteihin tunkeutuessaan aiheuttaa ongelmia ja pahimmillaan koko lennokka saattaa tuhoutua. [2; 6.]

Liika kylmyys tai kuumuus voi pilata kuvausaikomukset. Varsinkin pakkasella tulisi lennokka, kamera sekä muut järjestelmän komponentit ottaa ulos jäähtymään ennen lentoa. Jäähdyttämisen tarkoitus on saada järjestelmän anturit näyttämään oikein. Pakkasilma syö akkujen varausta, joten niitä ei kannata ottaa pakkaseen kuin vasta juuri ennen lentoa. SIRIUS pro lupaa toimia -20 ja +45 asteen lämpötiloissa. Lukuihin tulee kuitenkin suhtautua varauksella, koska varsinkin kova pakkas syö hetkessä järjestelmän akut tyhjäksi, jolloin lennosta ei tule kovin pitkä. Talvella runsas lumi saattaa haitata lentoa, koska laskeutuminen lumihankeen voi tuottaa hankaluuksia, kun lumi tunkeutuu koneen järjestelmiin ja kastelee ne, kuten kuvassa 5 on käynyt. [2; 6.]



Kuva 5. Lumen aiheuttamaa haittaa RPA-lennokin laskeutuessa [6].

## 2.6 Käyttökohteet ja sovellukset

RPAS-järjestelmien käyttökohteiden määrä karttuu vuosi vuodelta, kun kehitys tekniikan alalla menee eteenpäin. Parhaimmillaan lennokeilla tehdyt ilmakuvaukset ovat pienillä, alle 10 neliökilometrin alueilla, jotka pystytään lentämään yhdellä lentokerralla. Läjitysalueilla, maa-aineksen ottoalueilla, louhoksilla ja kaivosalueilla tilavuuden määrittäminen lennokeista kuvaamalla on osoittautunut käytännölliseksi. Lennokkikuvaamalla saadaan nopea ja ajantasainen tieto siitä, kuinka paljon esimerkiksi maa-ainesta on jäljellä ja missä kasat tarkalleen ottaen sijaitsevat. Tilavuuden määrittämisessä voidaan myös paikallistaa, kuinka paljon jätettä mahtuu kaatopaikalle ja seurata kasojen kasvamista esimerkiksi vuotuisella seurannalla. [2]

RPAS-järjestelmällä tehdyistä kuvista on myös mahdollista tehdä 3D-malleja. Malleilla voidaan havainnollistaa esimerkiksi olemassa olevia ja tulevia asuinalueita. Niitä voidaan hyödyntää liikennesuunnittelussa, ja niillä on helppo havainnollistaa suuriakin kohteita, kuten tuulimyllyjä (kuva 6). Virtuaalimaailman ohjelmia käyttämällä voidaan ortokuvia ja maastomalleja yhdistää 3D-visualisointiin, jolloin esimerkiksi tien ympäristöön voidaan



sijoittaa suunnitelman havainnollistamiseksi äänivalleja, valaisinpylväitä ja suojakaiteita. Luodussa 3D-ympäristössä käyttäjä voi liikkua vapaasti ja tutkia, miltä lopputulema näyttäisi. Kuvista voidaan myös laskea maastomalleja, joiden perusteella voidaan alkaa suunnitella uuden asuinalueen kaavoittamista. Lennokkikuvaus sopii erittäin hyvin kuvatarkkuuden ja kuvauksien suorittamisen nopeuden takia kunnan ilmakuvakartan täydennyskartoituksiin tai kaavakartan pohjaksi, sillä niiden kuvausominaisuudet sopivat hyvin julkishallinnon suosituksiin. [2; 19; 20.]



Kuva 6. MAVinci SIRIUS prolla tuotettu 3D-malli [15].

Ympäristön seuranta voidaan suorittaa kätevästi miehittämättömillä ilma-aluksilla, joilla esimerkiksi eri lajien leviämistä voidaan tutkia. Myös erilaisten kasvisairauksien kartoittamiseen voidaan käyttää ilmakuvauslennokkia. RTK-korjausta käyttävä miehittämätön ilma-alus sopii hyvin tiheiden metsien kartoittamiseen, johon tavallinen RPAS-järjestelmä ei kykene, sillä maatukipisteitä on mahdotonta tällaiselle alueelle saada näkyviin. Neste Oil on käyttänyt miehittämättömiä ilma-aluksia Kajaanissa kartoittaessaan vuodon aiheuttamia öljyvahinkoja, josta YLE uutisoi 22.5.2012. [2; 4.]

Potentiaalinen käyttökohte voi olla myös erilaisten väylien, kuten teiden, kuvaaminen RTK-korjatulla RPAS-järjestelmällä. Usein tällaisille pitkille väylille on hankalaa sijoittaa tukipisteitä, koska ne ovat kapeita ja usein peitteisen alueen kuten metsien ympäröimiä.

Etsinnässä ja valvonnassa voidaan myös käyttää miehittämättömiä ilma-aluksia. Sotilasteollisuudessa onkin jo pitkään ollut käytössä RPA-lennokkeja, joilla pystytään nopeasti ja huomaamattomasti tarkastamaan viholliskohteita sekä vihollisen liikkeitä. Tiettävästi Suomen Rajavartiolaitos käyttää valtion rajojen vartioimiseen miehittämättömiä ilma-aluksia. [3]

## 2.7 Ongelmat ja virhelähteet

Ilmakehän heijastuvuus eli siroaminen vaikeuttaa kuvaamista. Kuitenkin kohtalaisen matalalla lennettäessä vaikutus on varsin vähäistä. Haitta on paljon suurempi miehitystä lentokoneista tehdyissä ilmakuvauksissa. Satelliiteista otetut kuvat ovat kaikkein alteimpia siroamisesta aiheutuvalle haitalle.

Vääristymä linssissä on yksi kuvauksen ongelmista. Oletuksena linssi on täysin symmetrinen, mutta käytännössä linseissä on aina hieman virhettä symmetrisyydessä. Varsinkin RPAS-kuvaamisessa käytetään usein tavallisista liikkeistä saatavia kameroita, jotka ovat hinnoiltaan moninkertaisesti halvempia kuin varsinaiset ilmakuvauuskamerat. Kameroiden alhaisemmat hinnat johtavat myös heikompiin komponentteihin, kuten symmetrisyydeltään epätäydellisiin linseihin. Kamera ei myöskään aina ole samassa kunnossa kuin tehtaalta tullessaan. Virheellisyyden vähentämiseksi useimmat kuvan jälkikäsitteilyyn käytettävät ohjelmat mahdollistavat kamerasäätöjen kalibroinnin blokkien tasoituksen yhteydessä.

Signalointipisteen koordinaattien epätarkkuus aiheuttaa vääristymää lopullisessa kuvassa, kun kuvat yhdistetään maaston koordinaattipisteisiin. Esimerkiksi pisteen mittauksessa on voinut sattua virhe, tai piste on voitu mitata liian epätarkasti ja liian epätarkoilla välineillä. Sääolosuhteiden vaikutuksesta pisteen paikka on saattanut vääristyä. Näin saattaa tapahtua lämpötilan aiheuttaman väreilyn vuoksi.

Ilmakuvauksen lennokit ovat hyvin alttiita sääolosuhteille, ja monissa fixed-wing tyyppisissä lennokeissa jo tuuli 5 m/s voi olla este lentämiselle. Uusimmat kopterit ovat kuitenkin suunniteltu niin, että teknisten tietojen mukaan niillä lentäminen onnistuu jopa 30 m/s ylittävissä tuulissa.

Sähkölinjojen aiheuttamat magneettikentät voivat aiheuttaa kauko-ohjaukselle häiriön, joka haittaa lennokin ohjaamista. Myös järjestelmän muut sähkölaitteet ovat alttiina magneettikenttien vaikutukselle ja tiedettävästi muutamia lennokkeja on tippunut maahan niiden takia.

## 2.8 MAVinci SIRIUS PRO RPAS

MAVinci SIRIUS pro on RPAS-järjestelmä (kuva 7), joka tuottaa ilmakuvia ja 3D-maastomalleja. SIRIUS prota käyttämällä on mahdollista päästä 5 cm:n maastotarkkuuteen, kun lentokorkeus on kohtalaisen matala. Laadukkaan datan tuottaminen ei vaadi signaloituja tukipisteitä, vaan kuvat saadaan oikeaan koordinaatistoon RTK-satelliittimittauksin. SIRIUS prolla on RTK-mittaamisen lisäksi seuraavia tärkeitä ominaisuuksia:

- Vuoristoisessa ja maastonmuodoiltaan vaihtelevassa ympäristössä lentäminen, koska lentosuunnitelma voidaan yhdistää automaattisesti korkeusmallin.
- Suurten alueiden kuvaamisessa mahdollisuus säästää jopa 30 prosenttia lentoajasta, koska lentosuunnitelma jakaantuu automaattisesti ja säästää aikaa.
- Ei vaadi laukaisualustaa, sillä lentoon lähdetään heittämällä.
- Jos laskeutuminen ei ole mahdollista esimerkiksi maaston esteisyyden vuoksi, voi koneen käyttäjä ohjata koneen turvalliseen paikkaan ja laskeutua puoliksi autopilotin avulla, jolloin käyttäjä ohjaa ja autopilotti säätelee korkeutta.
- Toimintakyky säilyy vahvassakin tuulessa.
- Ankarissa lämpötilaloissa, niin kylmässä kuin kuumassa, SIRIUS pro säilyttää toimintakykynsä. Lisäksi kone on vedenpitävä ja pystyy suoriutumaan ilmakuvausoperaatiosta myös sateella.
- Kamera on laadultaan hyvä ja pystyy tuottamaan hyviä kuvia vaikka hieman vähäisemmässä valaistuksessa. [2]
- Turvallisuusominaisuuksiensa vuoksi SIRIUS prolle on myönnetty toimintalupa useissa Euroopan maissa.





Kuva 7. MAVinci SIRIUS pro [15]

### 2.8.1 Tekniset ominaisuudet

Lennoxin runko on tehty elaporista, joka on styroksin kaltainen materiaali, mutta kestävämpi. Siipien väli lentokoneen näköisellä rungolla on 163 cm ja pituus keulasta perään 120 cm. Painoa koneella järjestelmän kanssa on 2,7 kg, josta 550 g koostuu akusta, kamerasta ja muista komponenteista. Lentoaika yhdellä akulla on noin 45 minuuttia. Maksiminopeus nollatuudessa lennokilla on 65 km/h. Lentonopeus vaihtelee suuresti riippuen tuulten nopeuksista. [2]

Lennoxin potkuri sijaitsee koneen keulassa, ja se on suojattu niin, ettei se voi herkästi vaurioitua laskeutumisen yhteydessä. Lennoxki saa energiansa yhdestä akusta, jolla myös kamera toimii. Koneeseen implementoitu kamera on 16 megapikselin Panasonicin GX1. Koneen peräsimeen on asennettu vilkkuvat huomiovalot, jotta lennoxki olisi helpompi havaita ilmatilassa. [2]

Koneessa on MAVincin kehittämä autopilotti-järjestelmä, joka mahdollistaa koneen lentämisen ilman ohjausta taikka manuaalisesti kauko-ohjaimella lennättäjän toimesta. Lisäksi autopilotissa on hybridimuoto, jossa ohjaaja kontrolloi vain lennoxin lentorataa mutta autopilotti säätelee korkeutta. Näin ollen jopa aloittelijalla on mahdollisuus käyttää lennoxkia sitä tiputtamatta. Autopilotti säätelee korkeutta IMU (Inertial Measurement Unit) -sensorilla, joka havainnoi koneen asentoa, kiihtymistä sekä hidastumista kolmiulotteisessa tilassa. IMU-järjestelmä on hyvin yleinen lennoxkien autopiloteissa. Autopilotti-komponentti on hyvin pieni ja painaa vain noin 20 g. [2]

SIRIUS prossa yhdistyy Mavincin precision timing -teknologia ja Topconin RTK-vastaanottimet, joista toinen sijaitsee maassa tunnetulla pisteellä ja toinen on implementoitu koneen radio-antenniin. RTK-järjestelmän avulla kameran sijainti ilmassa kuvanottohetkellä on mahdollista selvittää senttimetrin tarkkuudella. Kuvanottohetken ajankohta on myös tärkeää selvittää, sillä jopa sekunnin murto-osan heitto saattaa aiheuttaa useiden metrien virheen, kun kone lentää jopa 18 m/s. MAVincin ja Topconin järjestelmien yhteiskäytöllä on mahdollista saavuttaa jopa alle millisekunnin kuvanottohetken ajastustarkkuus. [2]

Tarkkuuksien osalta MAVinci lupaa 1,5 cm:n maastopikselillä absoluuttisen tarkkuuden liikkuvan noin välillä 2–5 cm. Maastopikselin suuruus riippuu lentokorkeudesta. SIRIUS prolla maastopikselin koko voi vaihdella välillä 1,5–20 cm, riippuen kuvattavasta kohteesta. Kuitenkin Suomen olosuhteissa lentokorkeus saa olla enintään 150 m, jolloin maastopikselin koko pysyy kohtalaisen pienenä: noin 1,5–5 cm. [2]

SIRIUS pro on suunniteltu lentoon lähetettäväksi heittämällä, joten se ei vaadi tilaa vievää laukaisualustaa. RTK-implemентаation tarkoituksena on siirtää lennokki-ilmakuvauksessa tavallisesti käytetyt maatumipisteet ilmaan, jolloin raskas maapisteitten mittaaminen voidaan poistaa kuvauksista. SIRIUS pron uudella toimintaperiaatteella pyritään tehostamaan kuvausprosessia jopa 50 prosentilla. [2]

## 2.8.2 Lentoprosessi

Ennen lennättämistä ohjelmistoon syötetään alue, joka halutaan kuvata. Ohjelma luo automaattisesti lentosuunnitelman, jolla kuvattava alue tulisi lentää. Lentosuunnitelman voi myös luoda itse, jos tarve niin vain vaatii. Lentosuunnitelmaa on mahdollista muokata vielä lennokin ollessa ilmassakin. RTK-korjausta varten maatumiasema tulee pystyttää kiintopisteelle lähelle kuvausaluetta, mielellään alle 10 km kohteesta. [1; 2.]

Lentosuunnitelman data siirretään langattomasti tietokoneelta RPAS-järjestelmään, minkä jälkeen kuvaus voidaan aloittaa lähettämällä kone lentoon heittämällä. Lennon aikana RPAS-järjestelmä on mahdollista ottaa haltuun ja kontrolloida manuaalisesti, jos

esimerkiksi ilmatilaan saapuu muuta liikennettä ja kone pitää turvallisuuden vuoksi ohjata pois tieltä. Laskeutuminen tapahtuu automaattisesti, puoliautomaattisesti tai manuaalisesti. Kone laskeutuu mahalleen maahan, joten laskeutumispaikaksi tulee valita mahdollisimman tasainen alusta. Koneen pohjan muoto on sellainen, ettei lennokka pääse laskeutumisen yhteydessä vaurioitumaan esimerkiksi roottorista tai muista tärkeistä komponenteista. [2]

Laskeutumisen jälkeen tulee tarkastaa päällisin puolin, että otetut kuvat ovat halutunlaisia eikä lennon aikana ole sattunut mitään odottamattomia virheitä. Lopuksi lennokin tallentamat kuvat ja paikannustiedot siirretään langattomasti tietokoneelle, jossa ne voidaan jälkikäsitellä haluttuun muotoon. [2]

### 2.8.3 Haasteet ja ongelmat

RTK-korjaus vaatii, että tukiasema saadaan sijoitettua tunnetun pisteen päälle, jotta korjausdata voidaan laskea. Pisteverkko Suomessa ei kuitenkaan ole niin laaja, että se kattaisi koko maan pinta-alan. Näin ollen järjestelmän toimivuus siinä suhteessa on hieman puutteellinen. Korjausdata vaatii myös kohtuullisen peitteettömän maastoon, jotta signaali tukiasemasta RPAS-järjestelmään saadaan perille. Usein 10 km:n matkalle sattuu esteitä, jotka vaikuttavat yhteyden laatuun ja saattavat katkaista sen. [1; 2.]

## 3 Satelliittimittaukset

### 3.1 Satelliittimittausten peruseriaate

Satelliittipaikantaminen perustuu maapalloa kiertävien satelliittien lähettämien signaalien havainnoimiseen. Tällä hetkellä täysin toimintakykyisiä satelliittijärjestelmiä on kaksi: Yhdysvaltojen ylläpitämä GPS ja Venäjän ylläpitämä GLONASS. Yhteensä GPS- ja GLONASS-satelliitteja on maan kiertoradalla 60. Lisäksi EU:n ylläpitämän GALILEO-järjestelmän oletetaan olevan toimintavalmis vuosien 2018–2020 aikana ja Kiinan BeiDou-järjestelmän vuonna 2020. Näiden kahden järjestelmän tavoite on saada maan kiertoradalle yhteensä 60–70 satelliittia. Signaaleiden perusteella voidaan laskea etäisyys satelliittiin, jonka sijainti tunnetaan satelliitin lähettämän ratatiedon perusteella. Alkutuontemattomat X,Y ja Z voidaan laskea, kun etäisyydet havaitaan vähintään

kolmeen satelliittiin. Kuitenkin virheiden kontrolloimiseksi pitäisi etäisyydet mitata mielellään vähintään neljään satelliittiin.

Satelliittien etäisyyksiä voidaan mitata kahdella tavalla: havaitsemalla lähetetyn signaalin paikannuskoodia tai kantoaallon vaihehavaintoina. Paikannuskoodi on eräänlainen signaaliin nidottu mitta-asteikko, jota on teknisesti helppoa laskea. Paikannuskoodin avulla tehty paikannus on huomattavasti epätarkempaa kuin vaihehavaintoihin perustuva mittaus. Vaihehavainnot perustuvat satelliittisignaalin kantoaallon kokonaisten aallonpituuksien havaitsemiseen. Aallonpituus kantoaallossa on huomattavasti lyhempi kuin paikannuskoodi, mikä mahdollistaa suhteellisen tarkan paikantamisen. Teknisesti vaihemittaus on kuitenkin huomattavasti raskaampaa ja monimutkaisempaa. [13]

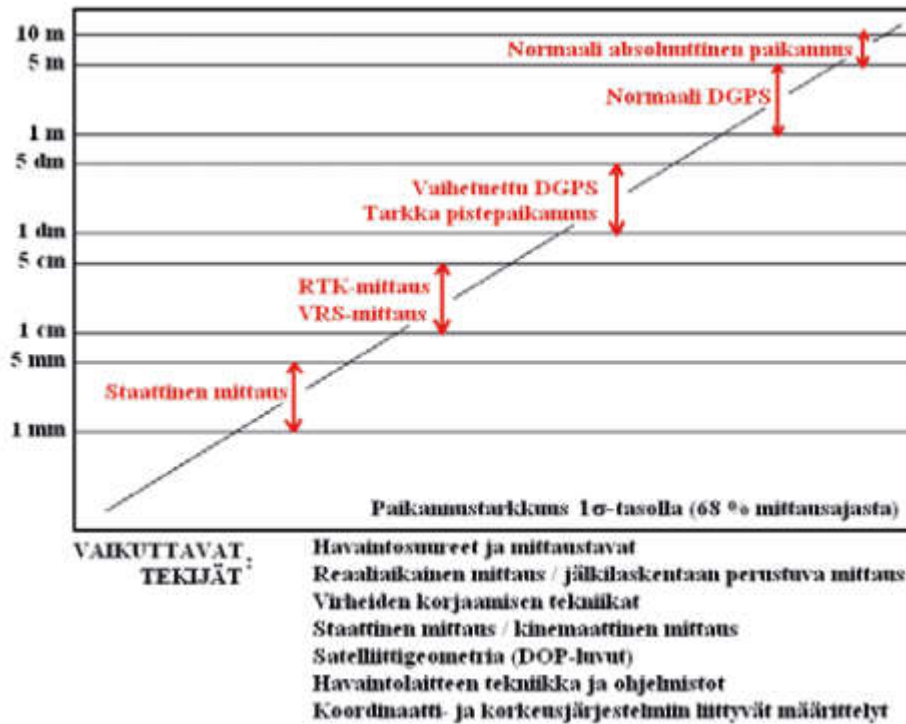
### 3.2 Perusmittaustavat

Satelliittipaikantaminen jaetaan kolmeen perinteiseen mittaustapaan, joita ovat absoluuttinen paikannus, differentiaalinen paikannus ja suhteellinen mittaus. Lisäksi kolme perusmenetelmää jakautuu niin sanottuihin erityissovelluksiin, joissa mittauksissa käytetyt havaintosuureet, virheiden korjaamisen ratkaisut ja havaintolaitteet sekä niiden lukumäärät luovat oman mittaustapansa. [11; 13.]

Absoluuttista paikannusta kutsutaan niin sanotusti peruspaikantamiseksi ja maailmanlaajuisesti se on kaikista käytetyin mittaustapa. Etäisyyden mittaaminen perustuu koodihavaintoihin ja paikannuslaitteita on vain yksi. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi autonavigaattorit. Absoluuttisen mittauksen tarkkuus on noin muutamasta metristä 20 metriin. [11; 13.]

Differentiaalisessa paikannuksessa (DGPS) tarvitaan käyttäjän vastaanottimen lisäksi tunnetulle pisteelle asetettu tukiasema, joka korjaa systemaattisia virheitä, jotka liittyvät muun muassa ilmakehän aiheuttamiin vääristymiin. Mittaus perustuu paikannuskoodin havaitsemiseen, mutta koska käytössä on kaksi laitetta, on differentiaalisella mittauksella mahdollisuus päästä tarkkuuteen 0,5–2 m. Tapaa käytetään yleisesti ammattimaisessa auto- ja laivaliikenteessä, jossa absoluuttinen mittaus ei ole navigoinnin kannalta riittävän tarkka. [11; 13.]

Interferometrinen satelliittimittaus perustuu vaihehavaintoihin ja on kolmesta perustavasta kaikkein tarkin, jossa jopa alle 1 cm:n tarkkuuksiin on mahdollista päästä. Menetelmä vaatii käyttäjältä kaksi vastaanotinta, joista toinen kannattaa sijoittaa tunnetulle pisteelle. Kuva 8 kokoaa yhteen kaikkia mittausmenetelmiä ja havainnollistaa niiden karkeasti arvioituja tarkkuuksia. [11; 13.]

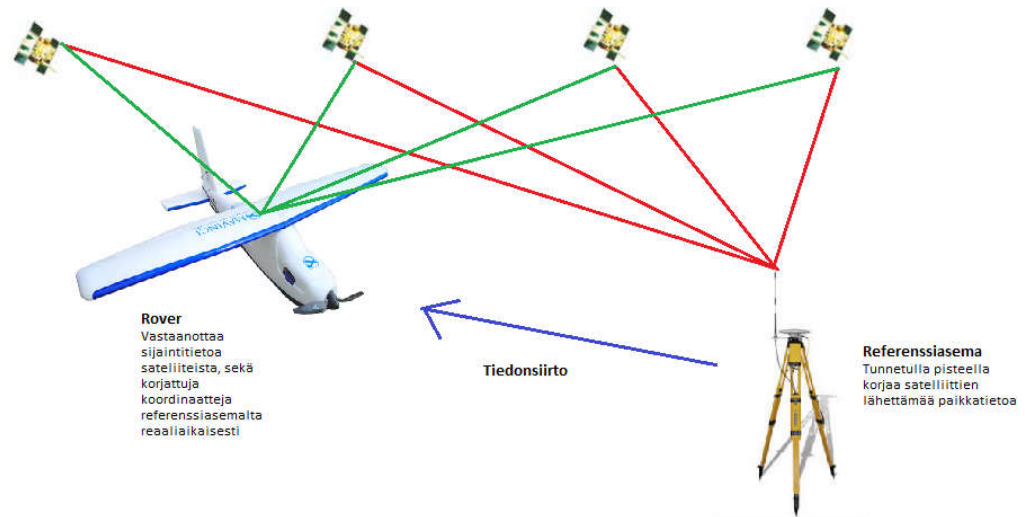


Kuva 8. Satelliittimittauksien eri menetelmien arvioituja tarkkuuksia [11, s. 315]

### 3.3 RTK:n peruseriaate

RTK-mittaaminen vaatii käyttäjältä kaksi satelliittihavaintoja vastaanottavaa antennia. Signaaleja vastaanottavat antennit toimivat toistensa pareina. Toinen vastaanottimista sijoitetaan pisteelle, jonka koordinaatit tiedetään. Tätä vastaanotinta kutsutaan tukiasemaksi. Tukiasema tekee havaintoja staattisesti, havaitsemalla näkyvien satelliittien lähettämää signaalia, josta se suodattaa vaihehavainnot ja laskee oman sijaintinsa. Satelliiteista saatua sijaintitietoa verrataan tunnetun pisteen koordinaatteihin, joiden eroavaisuudesta tukiasema laskee korjausarvon. Toinen vastaanotin on liikkuva, ja sitä kutsutaan Roveriksi (kuva 9). Rover havaitsee samoja satelliitteja kuin tukiasema ja pystyy laskemaan niistä sekä tukiaseman lähettämästä korjausdatasta oman sijaintinsa 1–2 cm:n tarkkuudella. Tukiaseman ja Roverin välinen etäisyys tulisi olla alle

20 km, mutta jo pienemmilläkin etäisyyksillä yhteys saattaa pätkiä. RTK-mittaamisella on mahdollisuus päästä senttimetritarkkuuteen, kun olosuhteet ja virhetekijät saadaan mahdollisimman tehokkaasti eliminoitua. Kuva 9 havainnollistaa mittaamisen peruseriaatetta. [1; 11; 13.]



Kuva 9. RTK-mittaamisen peruseriaate

Yleensä yhteys tukiaseman ja Roverin välillä tapahtuu UHF (Ultra High Frequency), VHF (Very High Frequency) tai hajaspektrisillä radiotaajuuksilla. Näiden yhteyksien kantomatka on suhteellisen lyhyt, ja esteisellä alueella yhteyden saaminen toisiinsa on kohtalaisen hankalaa. RTK:n tarkkuus heikkenee, mitä kauemmaksi tukiasemasta mennään. Myös matkapuhelinverkon käyttäminen on mahdollista, ja sen kantomatkalla ei käytännössä katsoen ole rajoitusta, kuitenkin mittaustekniset syyt pakottavat sitäkin käyttämällä tukiaseman alle 20 kilometrin säteelle Roverista. [1; 13.]

RTK-mittaamisessa on useita virhelähteitä, jotka tulisi varmistaa ennen mittaamisen aloittamista. Tukiaseman laatuun on kiinnitettävä huomiota, jotta laskentakapasiteetti riittää halutun toimenpiteen suorittamiseen. Lähtöpisteen koordinaattien tarkkuus tulisi varmistaa, sillä tukiaseman korjausdata on niistä riippuvainen. Tukiaseman paikan valinnan tulee olla tarkkaan harkittu, sillä ilmatilan laitteen lähistöllä on oltava peitteetön. Maaperä tukiaseman alla tulisi olla tukeva, jottei havaintolaite liikkuisi mittausten aikana. Satelliittien näkyvyys havaintoaikana tulisi varmistaa, sillä ajankohdasta riippuen voi olla, että tarpeeksi satelliitteja ei ole näkyvissä. [1; 13.]

Virheet saattavat olla myös mittaaajasta riippumattomia. Tällaisia virheitä aiheuttavat muun muassa monitieheijastus, jossa satelliitista lähtenyt signaali tulee vastaanottiin jonkin esteen kautta, kuten esimerkiksi peltikatosta tai vedenpinnasta kimmonneena. Myös ilmakehässä tapahtuvan siroamisen vuoksi saattaa vastaanottimille tulla virheellistä tietoa, jonka vaikutuksesta paikantaminen vääristyy. [1; 13.]

#### **4 Fotogrammetrinen blokkitasoitus**

Fotogrammetrisen blokkitasoituksen tarkoitus on kääntää kuvat haluttuun koordinaatistoon sekä yhdistää kaikki blokin kuvat toisiinsa. Fotogrammetrisestä blokkitasoituksesta saatetaan käyttää myös termiä ilmakolmiointi. Blokkitasoitusprosessi koostuu kolmesta päävaiheesta, jotka ovat keskinäinen orientointi, absoluuttinen orientointi ja blokkitasoitus. [5]

Kuvablokki koostuu useista lentoradoista, joista otetut kuvat sivuavat toisiaan. Ensimmäisessä vaiheessa, eli kuvien keskisessä orientoinnissa, toisiaan sivuavista kuvista etsitään kohteita, jotka näkyvät useilla kuvilla. Yhtenevät pisteet voivat olla signaloituja tai ympäristöstä muuten helposti ja selvästi erottuvia pieniä maaston kohteita. Kuvien suurella pituus- ja sivupeitteellä pystytään yhdistämään toisiinsa jopa kymmeniä kuvia, jolloin keskinäisessä orientoinnissa kuvat saadaan yhdistymään toisiinsa erittäin hyvin. Kuvien peittämät kannattaa pitää isoina, myös siksi että tuulen vaikutus lennokkiin voi olla suuri, jolloin kuvanottohetkellä kamera saattaa olla hieman vinossa, ja otettu kuva saattaa poiketa suunnitelman mukaisesta sijainnista. [5]

Absoluuttisessa orientoinnissa maanpinnalle erikseen takymetrillä tai GPS-mittauksilla mitatut tukipisteet yhdistetään keskinäiseen orientointiin, jolloin kuvat saadaan haluttuun koordinaatistoon. Orientointia varten kuvilta etsitään nämä tukipisteet ja annetaan niille maanpinnan koordinaatit. Näiden maatukipisteiden käyttöä ei tarvita, kun RTK-mittauksen avulla kameran kuvanottosijainti pystytään määrittämään senttimetrin tarkkuudella. [5]

Absoluuttisen orientoinnin seurauksena kuvat eivät koskaan osu täydellisesti yhteen. Tämä johtuu siitä, että kaikissa havainnoissa on aina enemmän tai vähemmän virhettä. Kuvat pakotetaan yhdistymään toisiinsa virheistä huolimatta, jolloin eri alueille syntyy aukkoja, repeämiä ja pullistumia. Näitä vääristymiä korjataan blokkitasoituksella, joka on

fotogrammetrinen laskutekniikka, jolla tilastollisesti paras kuva voidaan luoda. Blokkitasoituksessa kuvauksista ja mittauksista tulleet virheet tasoitetaan tasaisesti eri puolille blokkia, jotta tulokseksi saadaan kuva, joka on niin virheetön kuin mahdollista. [5]

## 5 Testidatan käsittely

### 5.1 Datan kuvaus

Demodatan lento on tehty Sankt Leon-Rot -nimisessä kaupungissa eteläisellä Rhein-Neckarin alueella Saksassa elokuussa vuonna 2014. Kuvattu kohde on noin 24 hehtaarin kokoinen avonainen pelto. Data koostuu kuvista, joita on otettu 1268. Lentolinjoja on ollut 31 ja kuvien pituuspeitto 78 % ja leveyspeitto 66 %. GCP-kontrollipisteitä on mitattu 9, ja ne sijaitsevat kuvausalueen laitamilla, kiertäen kuvausblokin. Mavincin antama oletettu tarkkuus havaitulle kuvanotto paikalle käyttäen RTK/GNSS-tekniikkaa on 5 cm. [2]

Vaikka kuvauksessa on käytetty suuria kuvapeittoja ja kuvien määrä (1 268) on hyvin runsas, ei kuvattu blokki ole optimaalinen tarkkuuksien arvioimiseen. Ongelmana on kontrollipisteiden määrä ja niiden sijoittelu. Tarkkuuden arvioimiseksi kontrollipisteitä on liian vähän, sillä niitä käytetään verifiointipisteinä. Kaikki kontrollipisteet sijaitsevat kuvatun alueen laitamilla. On tunnettu tosiasia, että tarkkuus sekä epävarmuus kasvaa, mitä lähemmäksi blokin keskustaa mennään. [21]

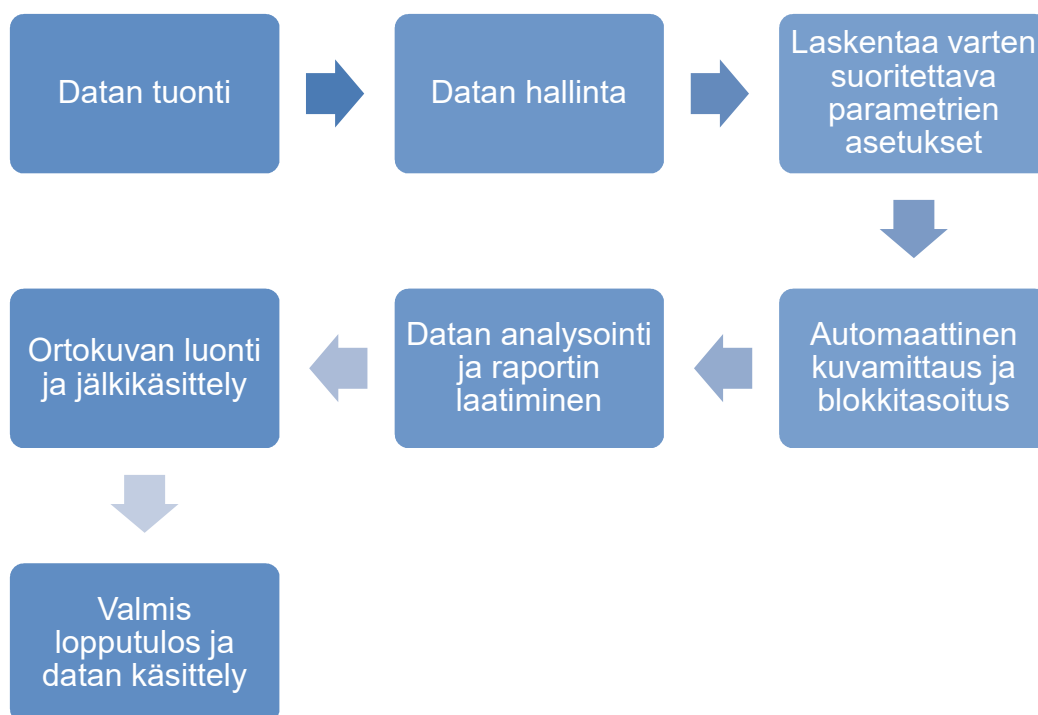
### 5.2 Pieneering RapidStation -ohjelma

#### 5.2.1 Ohjelman ominaisuudet

RapidStation on ohjelma, jota käytetään ilmakolmioinnissa. Ohjelma on suunniteltu niin RPAS-ilmakuvien kuin suurten metrinen ilmakuvauuskameroiden tuottamien kuvien jälkikäsittelyyn. Ohjelman avulla fotogrammetriset blokit pystytään ratkaisemaan monien eri sovellusten ja käyttötarkoitusten tarpeisiin. Ohjelma ei myöskään vaadi käyttäjältään suurta fotogrammetrian tuntemusta, sillä ohjelma antaa monenlaisia tukitoimia ongelmien ratkaisuun. [8]



Ohjelma tasoittaa blokit matemaattisen mallin avulla. Blokkitasoitus suoritetaan yhdistämällä ulkoinen orientointi ja kameran laukaisuhetkellä otetut kuvat. Ohjelman käyttäjän tehtävä on lähinnä hienosäätää mallia, jotta lopputulos olisi paras mahdollinen. RapidStationin päävaiheet auttavat käyttäjää pääsemään parhaaseen lopputulokseen (kuvio 1). [8; 21.]



Kuvio 1. RapidStation -ohjelman työvaiheet

### 5.2.2 RTK-mitattujen kuvanottoaikojen käsittely RapidStationilla

Blokkitasoitus tunnetuilla kuvanottoaikoilla, vaatii laskentaohjelmalta hieman normaalia poikkeavia ominaisuuksia. ”Clock shift/drift” -ominaisuudella pystytään korjaamaan havaintojen jatkuvaa taikka systemaattista virheellistä siirtymää/ajelehtimistä. Yhden tällaisen aikariippuvaisen siirtymän aiheuttaa viive kuvanottokäskyn ja kuvanoton välillä. Viive käskyn ja kuvanoton välillä saatta olla satoja millisekunteja, mikä nopeasti lentävään lennokkiin yhdistettynä voi aiheuttaa useiden senttien tai jopa metrien sijaintivirheen. ”Clock shift/drift” -malli voidaan suorittaa koko blokkiin tai jakaa se pienempiin blokkeihin. Se on mahdollista määrittää myös jokaiselle lentolinjalle erikseen.

RapidStation pystyy käsittelemään ongelmaa, jossa satelliittiyhteys katkeaa. Tällaisen ongelman käsittely on erittäin tärkeää, sillä signaalin saaminen koneeseen voi kestää

joskus suhteellisen pitkään, jolloin tuotettu paikkatieto voi pitkiltäkin matkoilta olla erittäin epätarkkaa. RapidStation käsittelee ongelman blokkitasoituksen yhteydessä, jolloin kuvanottoaikojen GPS-havainnot luokitellaan uudelleen tarkkuusluokkiin. [21]

### 5.3 Laskennan vaiheet

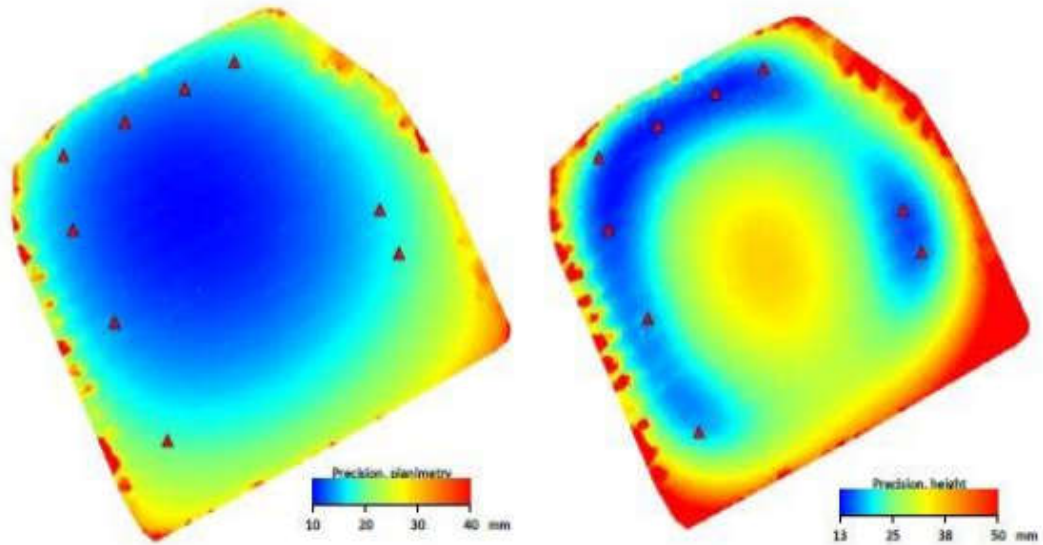
Jotta tuloksia saatiin ja niitä pystyttiin vertailemaan, tuli laskennoissa suorittaa useita vaiheita ja varmuuksia. Havaittujen kuvanottoaikojen käsittelyyn liittyy haasteita, jotka asettavat vaatimuksia etenkin laskentaohjelmistolle. Tuloksien analysoimiseksi tuli ohjelman käydä läpi yhteensä neljä päävaihetta, jotka olivat teoreettisten tarkkuuksien määrittäminen, tarkkuuteen pääsemisen varmistus, tarkkuuden varmuus ja lopullinen lopputulos. [21]

#### 5.3.1 Teoreettinen tarkkuus

Ensimmäiseksi määritetään blokkien teoreettinen tarkkuus, eli niin sanottu paras lopputulema. Tarkkuuden määrittämiseksi ohjelma käyttää satunnaisvirheiden kasautumislakia, jossa kuvamittausten koordinaattien ja havaittujen kuvanottoaikojen epävarmuudelle annetaan oletettu arvo. Jotta simulaatio voidaan tehdä, tuli kuvatuun testiblokin ja nyt läpikäytävän simulaatioblokin olla geometrioiltaan yhtenevät.

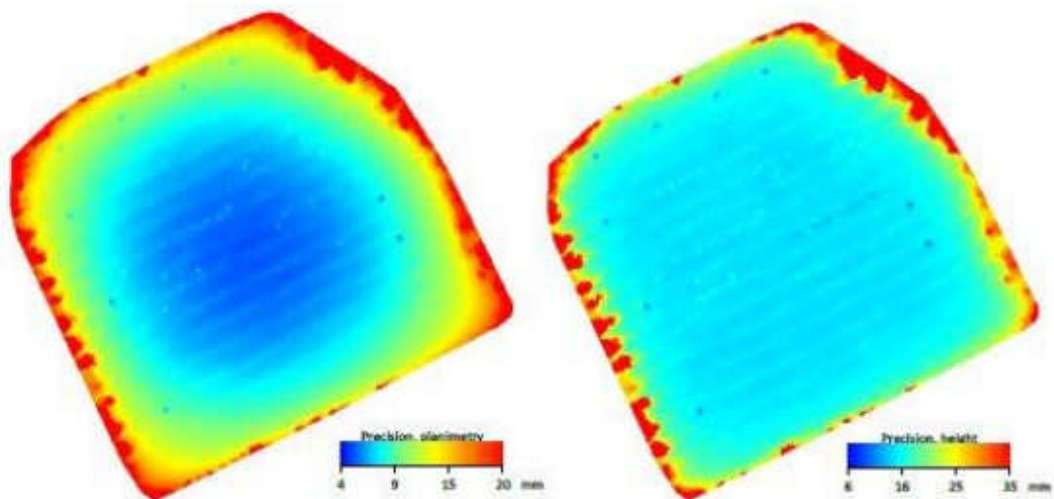
Simulaatioissa tutkitaan tavallista maankontrollipisteisiin georeferoitua ilmakekusblokkia sekä havaituilta kuvanottoaikoilta georeferoitua ilmakekusblokkia. Kuutta eritasoista virhettä lisättiin kuvanottoaikojen havaintoihin. Ne olivat suuruuksiltaan 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm, 1 m ja 2 m.

Tukipisteiden avulla tuetussa blokkissa etenkin korkeus heikkenee, mitä lähemmäs blokin keskustaa mennään. Tämänlainen käytös oli ennustettavissa, sillä pelkästään tukipisteisiin nojautuvan blokin keskellä tulisi olla myös kontrollipiste. On yleisesti tiedossa, että tällöin tarkkuus heikkenee, mitä kauemmaksi kontrollipisteistä mennään. Blokin teoreettinen tarkkuus tasossa keskiarvolta on 1,1 cm ja korkeudessa 2,2 cm. Tarkkuudet etenkin korkeudessa vaihtelevat huomattavasti (kuva 10).

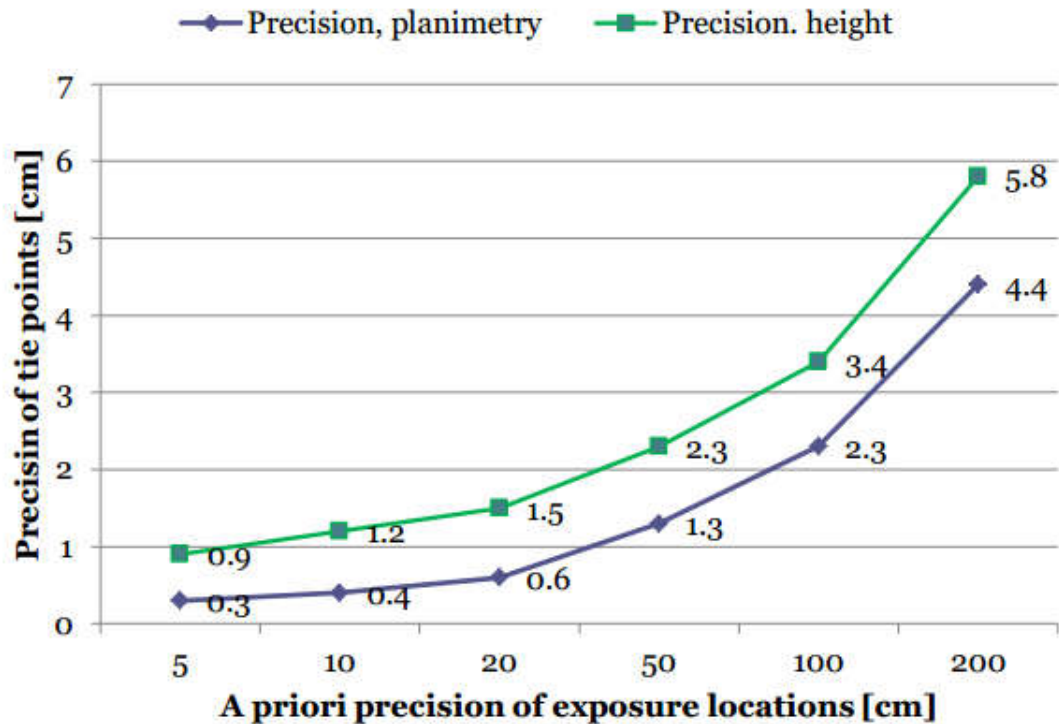


Kuva 10. GCP-pisteiden avulla suoritetun georeferoinnin teoreettinen tarkkuus liukuvärikuvana. Vasemmalla tasossa ja oikealla korkeudessa.

Havaittujen kuvanottoaikojen avulla georeferoitu blokki on tarkkuudeltaan huomattavasti tasaisempi ja etenkin korkeudessa suuria vaihteluita ei ole havaittavissa. Tutkimuksen kannalta merkittävillä alueilla tarkkuus tasossa on keskiarvolta 0,6 cm ja korkeudessa 1,5 cm. Tuloksien mukaan tällainen blokki antaa paremman teoreettisen tarkkuuden (kuva 11).



Kuva 11. Havaittujen kuvaottoaikojen (tarkkuus 20 cm) avulla suoritetun georeferoinnin teoreettinen tarkkuus liukuvärikuvana. Vasemmalla tasossa ja oikealla korkeudessa.



Kaavio 1. Havaittujen kuvanottoaikkajien avulla suoritettujen georeferoimien teoreettinen tarkkuus. Alempi viiva osoittaa tarkkuuden tasossa ja ylempi korkeudessa.

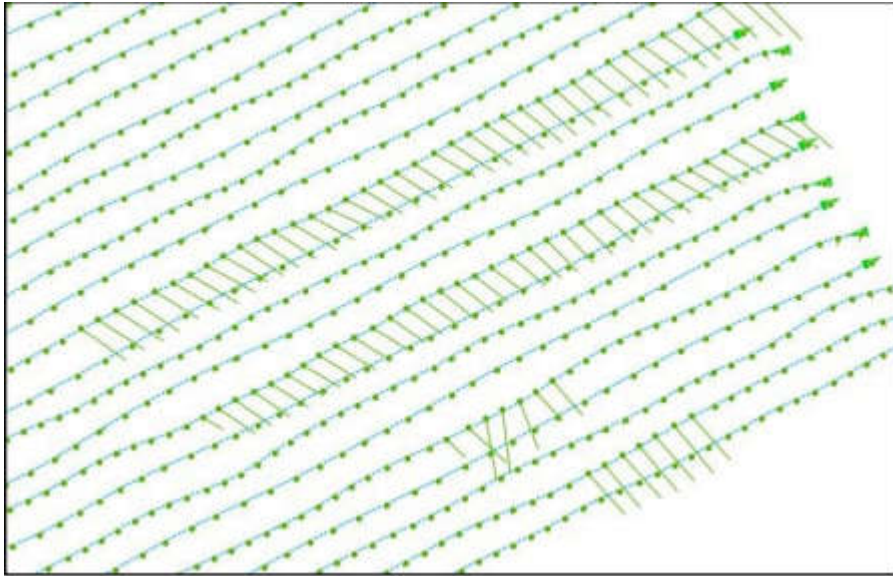
Kaaviossa 1 on yhteenveto teoreettisista tarkkuuksista. Taulukosta on havaittavissa, että päästäksemme korkeudessa tarkkuuteen, joka vastaa 1,6 cm:n blokin kuvaresoluutiota (maastopikseliä), tulee kuvanottoaikan sijainti tuntea 20 cm:n tarkkuudella. [21]

### 5.3.2 Teoreettiseen tarkkuuteen pääseminen

Tässä vaiheessa kaikkia varmennepisteitä käytettiin kontrollipisteinä, jotta pystyttiin päättämään, onko 20 cm:n tarkkuuteen mahdollista päästä. Tuloksien mukaan kaikki kuvanottosijainnit eivät ole 5 cm tarkkuudella. Kaikki kolme laskentakertaa ilman uudelleenluokittelua osoittavat näin. Kuvanottoaikkajien havaintojen virheet heijastavat myös kontrollipisteiden jäännösvirheiden neliöllisen keskiarvoon, joka vaihtelee 5 cm:n ja 12,7 cm:n välillä.

Kaikki tulokset saadaan hyväksyttävälle tasolle, kun blokkitasoituksessa käytetään uudelleenluokittelua. Kontrollipisteiden jäännösvirheiden neliökeskiarvo laskee 1–2 senttimetriin ja maksimivirhe 1,8–3,3 senttimetriin. Laskennassa, jossa uudelleenluokitellaan kuvanottoaikkajien tarkkuusluokat, ei käytetä kameran

laukaisuajankohdan viiveen määrittämistä, kaikilla idästä länteen suuntautuneilla lentolinjoilla ilmenee suurempi virhe kuin lännestä itään lennetyillä. Voidaan päätellä, että Mavincin järjestelmässä on pieni virhe kameranlaukaisimen ajastuksessa. Lisäksi lennokin GPS-yhteys on menetetty muutama otteeseen. Kuvasta 12 on nähtävissä, kuinka virhe toistuu useissa perättäisissä kuvanottoaikoissa.



Kuva 12. Selkeästi suuremmat peräkkäiset virheet, luultavasti GPS-yhteyden katkeaminen

Kaiken kaikkiaan 700–800 havaintoa on oletetulla 5 cm:n tarkkuudella, eli noin 55–63 % kokonaishavaintomäärästä. Jotta pääsisimme haluttuun tarkkuuteen, tuli kuvanottoaikoilla olla vähintään 20 cm:n tarkkuus. Tällaisia paikkoja oli 1 268:sta 1 150, eli yli 90 % kaikista havainnoista (taulukko 1). Voidaan siis todeta, että 1,6 cm:n vastaavan maastopikselin tarkkuuteen on mahdollista päästä. [21]

Taulukko 1. Laskentojen yhteenveto

		Model / classification state (yes/no)					
		no modeling		common drift		drift per flight line	
		no	yes	no	yes	no	yes
<b>GCPs</b>	<b>RMS [cm]</b>						
	Easting	8.8	1.7	8.9	2.0	6.4	2.2
	Northing	7.2	1.3	5.0	1.0	6.2	1.1
	Height	12.7	1.6	9.3	0.9	7.3	1.1
	<b>Max. error [cm]</b>						
	Easting	17.0	2.8	15.4	3.2	10.2	3.2
	Northing	11.9	1.9	9.9	2.4	11.9	2.0
	Height	23.6	3.3	20.8	1.9	14.5	1.8
<b>Exposure locations</b>	<b>Variance component []</b>						
	Easting	6.1	0.92	5.0	0.85	3.6	0.91
	Northing	4.6	0.65	4.1	0.70	5.0	0.81
	Height	7.5	0.40	7.1	0.63	5.1	0.64
	<b>Max. standardized error []</b>						
	Easting	19.3	1.9	22.3	1.9	24.7	2.0
	Northing	29.4	1.9	29.8	1.9	29.4	1.9
	Height	50.6	1.7	51.1	2.0	47.3	2.0
<b>Classification</b>	5 cm [no.]		264		698		792
	≤ 20 cm [no.]	-	603	-	1158	-	1138
	> 20 cm [no.]	-	665	-	110	-	130

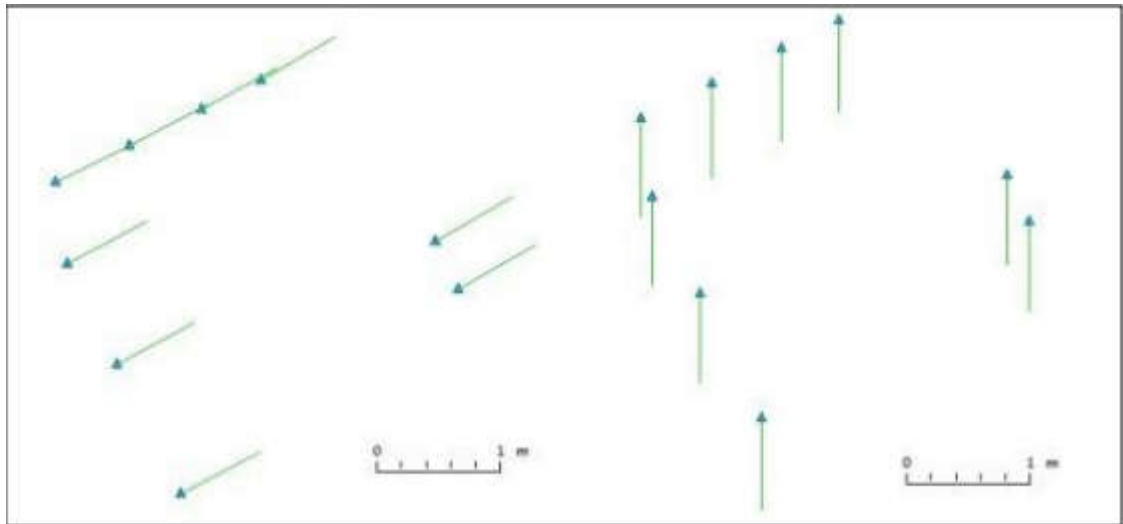
### 5.3.3 Todellinen tarkkuus

Kaikkia kontrollipisteitä käsiteltiin tuntemattomina suureina, jotta todellista tarkkuutta pystyttiin arvioimaan. Tarkistuspisteiden avulla lopputuloksen tarkkuus saadaan vertaamalla laskennan antamia koordinaatteja tarkistuspisteiden tunnettuihin koordinaatteihin. Todellinen georeferointi suoritettiin siis ainoastaan lennokin sijaintidataa käyttämällä.

Tässäkin laskennan vaiheessa voidaan todeta, että yli 90 % kaikista havainnoista on tarkempia tai yhtä tarkkoja kuin 20 cm. Voidaan myös havaita, että aikaisempi puhdas uudelleenluokittelu ei sijoita kuvia oikeaan paikkaan (kuva 13). Tämä johtuu siitä, että havaittua kameran laukaisun virhettä ei ollut mallinnettu havainnoista.

Paras lopputulema saatiin, kun käytettiin kaikille havainnolle yhteistä ajalehtimismallia. Kokeiltiin myös lentolinjakohtaista ajalehtimismallia, mutta se aiheutti 7 cm:n systemaattisen virheen korkeudessa, mitä voidaan pitää merkinä yliparametrisoinnista. Kaikille havainnoille yhteistä ajalehtimisen mallia käytettäessä saatiin lopulliseksi tarkkuudeksi tasossa 3 cm ja korkeudessa 2,5 cm. Georeferointi ei siis aseta havaintoja oikeaan

paikkaan, kuten kuvan 13 systemaattiset virheet osoittavat, vaan on niin sanotusti paras keskiarvo yhdisteltynä tarkkaa ja virheellistä dataa. [21]

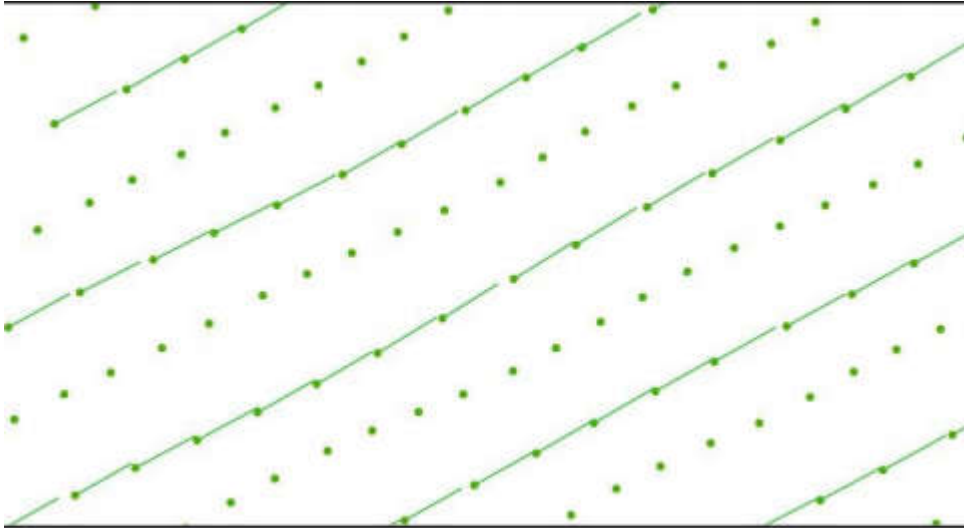


Kuva 13. Virheet varmennuspisteissä, vasemmalla tasossa ja oikealla korkeudessa.

#### 5.3.4 Viimeinen malli

Edellisistä laskennan tuloksista pystytään päättämään, että kaikille havainnoille yhteinen ajelehtimismalli ei ole oikeanlainen tälle blokille. Tuulen suuntaan otetuissa havainnoissa on paljon enemmän virhettä kuin toiseen suuntaan lennetyissä (järjestelmässä virhe), jolloin ne uudelleen luokittelussa sijoitetaan epätarkempaan eli väärään ryhmään (kuva 14).





Kuva 14. Myötätulessa otetut kuvat sisältävät huomattavasti enemmän virhettä.

Lopullinen ratkaisu oli jakaa kaikki havainnot kahteen erilliseen blokkiin. Toinen blokki sisälsi kaikki havainnot lännestä itään suuntautuneilta lentolinjoilta ja toinen vastaavasti havainnot lentolinjoilta idästä länteen. Kummallekin blokille kohdennettiin oma, erillinen ajalehtimismalli. Kahteen erilliseen blokkiin jaettu tasoitus tuotti parhaan lopputuloksen. Lopullinen tarkkuus on tasossa 2 kertaa suurempi kuin teoreettinen tarkkuus, mutta korkeudessa vain 0,67-kertainen teoreettisesta tarkkuudesta (taulukko 2). [21]

Taulukko 2. Lopulliset tulokset

		Model: drift per sub block, classification YES		
		Easting	Northing	Height
Verification	Mean [cm]	0.3	0.1	-0.2
	RMS [cm]	2.1	1.3	1.1
	Max. error [cm]	4.2	2.5	2.5
	STD [cm]	2.1	1.3	1.1
Classification		5 cm [no.]	≤ 20 cm [no.]	> 20 cm [no.]
		766	1160	108

#### 5.4 Johtopäätökset

Tuloksista näkee, että lennokkiin liitetyllä RTK/GNSS-vastaanottimella, jolla kuvanotto-paikat pystytään mittaamaan suhteellisen tarkasti, on mahdollista tuottaa hyvää ja tarkkaa georeferoitua ilmakuvaa. Järjestelmään liittyy kuitenkin kysymyksiä, sillä noin 10 % testilennolla tuotetusta demodatasta oli virheellistä ja epätarkkaa. Tällainen



virheellisyys aiheuttaa epävarmuutta käyttäjäpuolella tuotetun datan oikeellisuudesta. On toivottavaa, että Mavinci olisi uudemmissa päivityksissään parantanut järjestelmää niin, että tämänkaltaista virheellistä dataa tulee vähemmän ja signaali pysyy lennokissa silloinkin, kun se kääntyy uudelle lentolinjalle.

Tarkkuus, johon Mavincin järjestelmällä päästään, on erittäin kilpailukykyinen perinteisen maakontrollipisteillä georeferoituun ilmakuvaukseen verrattuna. Voidaan todeta, että oikeat olosuhteet saavutettaessa havaituilta kuvanottoaikoilta tehty ilmakuvaukset tuottaa tarkempaa ja huomattavasti tasalaatuisempaa aineistoa kuin tavallinen. Tässä yhteydessä tämä voitiin kuitenkin varmentaa vain tutkitun tyyppiselle blokille, jossa kuvapeitot ovat suuria ja kuvia on paljon.

## 6 Yhteenveto

Laskennassa tutkitaan RTK/GNSS-satelliittimitattujen kuvanottoaikojen ilmakuvaukset georeferoitu tarkkuus. Laskennoista selviää niin teoreettinen kuin käytännön tarkkuus. Teoreettista tarkkuutta määritettäessä voidaan huomata, että tunnetulta kuvanottoaikalta tuotettu data on keskimääräisesti tarkempaa.

Lopputulosta voidaan tarkkuuksien osalta pitää erittäin tyydyttävänä. Teoreettinen tarkkuus vaihteli välillä 0,4–2 cm tasossa, sekä välillä 1,3–3 cm korkeudessa. Mittauksista laskettiin keskiarvo, jolloin tarkkuus tasossa oli 0,6 cm ja korkeudessa 1,5 cm. Näiden tulosten perusteella pystyttiin hakemaan blokille niin sanottua käytännön tarkkuutta. Samalla laskettiin myös GCP-georeferoidulle blokille teoreettinen tarkkuus, joka oli tasossa 1,1 cm ja korkeudessa 2,2 cm. Teoreettisia vertaillessa voitiin todeta, että tunnettuihin kuvanottoaikoihin georeferoitu blokki oli noin 1,5 kertaa tarkempaa ja huomattavasti homogeenisempää kuin GCP-georeferoitu.

Lopputuloksen saamiseksi tuli laskentaohjelman pystyä mallintamaan kuvausjärjestelmän aiheuttamat virheet, esimerkiksi kuvanottohetken synkronointi GPS-sijainnin kanssa, jossa oli hieman virhettä. Lopullisten tulosten voidaan sanoa olevan hyviä, sillä tasotarkkuus oli noin 1,3 cm eli noin 2 kertaa teoreettinen tarkkuus. Korkeudessa päästiin 1,1 cm:n tarkkuuteen, joka on vain 0,67 kertaa teoreettinen tarkkuus.

Mavincin järjestelmä lupaa kuvanottoaikkojen tarkkuuden olevan alle tai yhtä suuri kuin 5 cm. Näin kuitenkin oli vain 766 kuvassa 1 268:sta, eli noin 60 %:ssa kuvista. Jotta päästiin maastopikselin määräämään 1,6 cm:n tarkkuuteen laskettiin, että 20 cm:n tarkkuus kuvanottoaikasta olisi riittävä. Tämä toteutuikin 1 160:ssä kaikista kuvista, eli selkeästi yli 90 %:ssa, mitä voidaan pitää hyvänä.

Kuten tulokset osoittavat, tunnetuilla kuvanottoaikoilta tehty lennökkikuvaus on tarkkuudeltaan niin hyvää, että se pystyy haastamaan tavallisen maakontrollipisteistä georeferoidun ilmakehän kuvauksen. Tulokset osoittavat, että oikeanlaiset olosuhteet saavutettaessa tunnetuilta kuvanottoaikoilta tehty ilmakehän kuvaus on huomattavasti tarkempaa ja tasalaatuisempaa kuin perinteinen ilmakehän kuvaus. Tulokset pätevät kuitenkin vain tässä työssä tutkittuun ilmakehän kuvausblokkiin, jossa on yli tuhat kuvaa ja joilla on suuret pituus- ja sivupeitot.

Lennoikin virheellisen ja epätarkan datan määrää pitää pystyä vähentämään sekä GPS-signaalin säilyvyyttä parantamaan, jotta datan käsittely olisi varmempaa ja helpompaa. Uskon, että näin tapahtuu. Lennokeilla, joiden kuvanottoaikainti pystytään tuntemaan näinkin tarkasti, on potentiaalia viedä ilmakehän kuvaus uudelle tasolle. Tämä tekniikka nopeuttaa datan tuottamista sekä parantaa laatua ja luotettavuutta.

## Lähteet

- 1 Donahue Brian, Wentzel Jan & Berg Ron. 2013. Guidelines for RTK/RTN GNSS Surveying in Canada. Ontario Ministry of transportation.
- 2 Sirius UAS. Complete Product Range Brochure. Mavinci. 2014.
- 3 TS: Rajavalvonta vahvistumassa miehittämättömillä lentokoneilla. 2011. Verkkodokumentti. Helsingin Sanomat. 1.11.2011  
<<http://www.hs.fi/kotimaa/a1305548407321>> Luettu 15.1.2016
- 4 Lennokit kartoittamaan öljyvahinkoa.2015. Verkkodokumentti. Yle uutiset. 22.5.2015. <[http://yle.fi/uutiset/lennokit\\_kartoittamaan\\_oljyvahinkoa/6105681](http://yle.fi/uutiset/lennokit_kartoittamaan_oljyvahinkoa/6105681)> Luettu 1.2.2016
- 5 Vinni Päivi. 2003. Kuva kertoo enemmän kuin tuhat sanaa – Mitä on fotogrammetria?. Verkkodokumentti.  
<<http://www.kotikone.fi/faryan/Teksteja/JatkokurssiB.htm>> Luettu 8.2.2015
- 6 Hassinen, Alpo. 2013. UAV-lennokit, kokemuksia UAV-laitteista. Mekrijärven tutkimusasema, Itä-Suomen yliopisto.
- 7 Kostamo, Miika. 2013. Kaukokartoituksen perusteet opintopakso, luentokalvot. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 8 PIEngeering, RapidStation user`s guide
- 9 Ilmailu/RPAS. Sääntelyn sidosryhmäinfo. Trafi. 19.11.2015.
- 10 Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lennättäminen. OPS M1-32. Määräys. Trafi. 9.10.2015.
- 11 Laurila, Pasi. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemen Ammattikorkeakoulu.
- 12 Aber James, Marizolff Irene, Ries Johannes. 2010. Small-Format Aerial Photography. Amsterdam: Elsevier.
- 13 Kråknäs, Pasi. 2013. Satelliittimittaukset, opintopakso, luentokalvot. Metropolia Ammattikorkeakoulu
- 14 Paikkatiedon hankintaa lennokilla. PIEngeering.
- 15 SIRIUS PRO Surveying UAS. 2015. Verkkodokumentti. Mavinci.  
<<http://www.mavinci.de/en/siriuspro>> Luettu 8.2.2015

- 16 Photo cervolisme. 2015. Verkkodokumentti. Wikipedia  
<[http://fr.wikipedia.org/wiki/Photo\\_cervolisme](http://fr.wikipedia.org/wiki/Photo_cervolisme)> Luettu 16.4.2015
- 17 Scout B1-100 UAV Helicopter. 2015. Verkkodokumentti. Aeroscout.  
<<http://www.aeroscout.ch/index.php/scout-uav-helicopter>> Luettu 16.4.2015
- 18 Leica Geosystems and Aibotix to Provide Multicopter UAV Solutions for Inspection and Mapping. 30.3.2013. Verkkodokumentti. Leica geosystems.  
<<https://asmmag.com/products/hardware/5269-leica-geosystems-and-aibotix-to-provide-multicopter-uav-solutions-for-inspection-and-mapping.html>> Luettu 16.4.2015
- 19 Asemakaavan pohjakartan laatiminen. JHS 185. Julkisen hallinnon tietohallinnon neuvottelukunta. 2.5.2014.
- 20 Paikkatiedon laadunhallinta. JHS 160. Julkisen hallinnon tietohallinnon neuvottelukunta. 22.6.2006
- 21 Heikkilä Jani. 2015. UAS flight with HQ positional data. Mavinci Sirius PRO test flight 8.9.2014 (set 1). Analyysiaineisto.

## Mallin varmentaminen

Ilman mallia ja uudelleenluokittelua

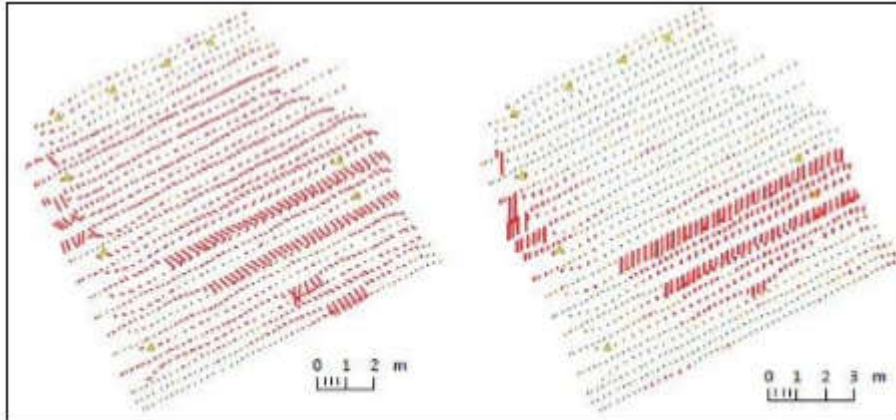


Figure A1. Residuals on exposure location observations, left planimetry, right altitude

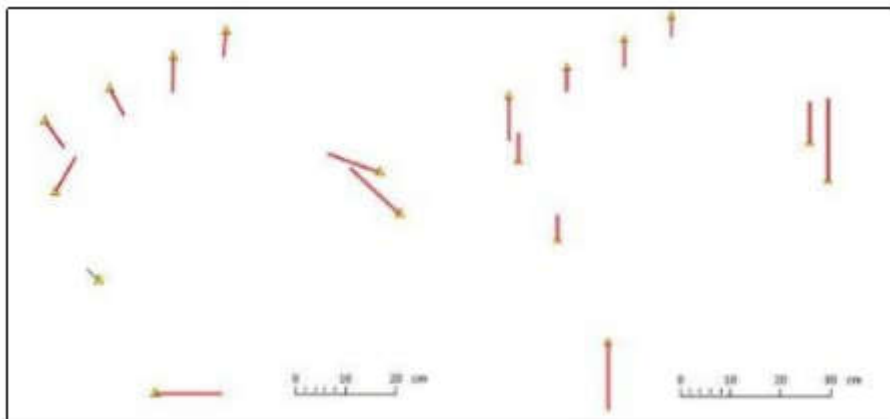


Figure A2. Residuals on ground control points, left planimetry, right height.

Yleisen siirtymisen malli, ei uudelleenluokittelua

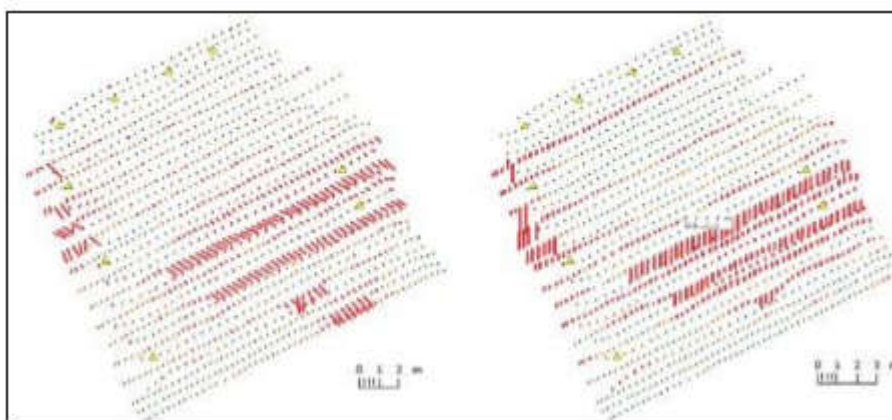


Figure A3, Residuals on exposure locations, left planimetry, right altitude,

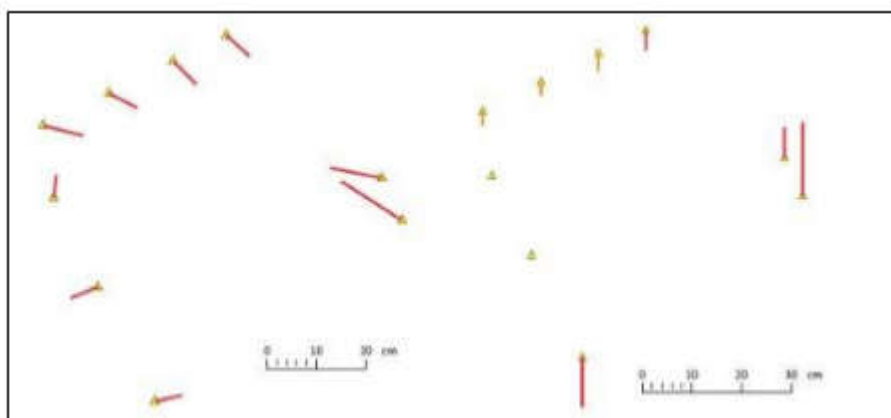


Figure A4, Residuals on ground control points, left planimetry, right height.

Ajelehtimisenmalli lentolinjoittain, ei luokittelua

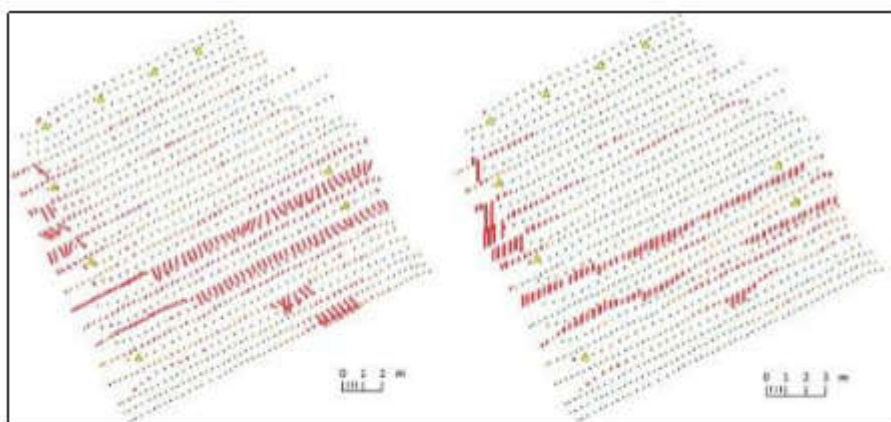


Figure A5, Residuals on exposure locations, left planimetry, right altitude,

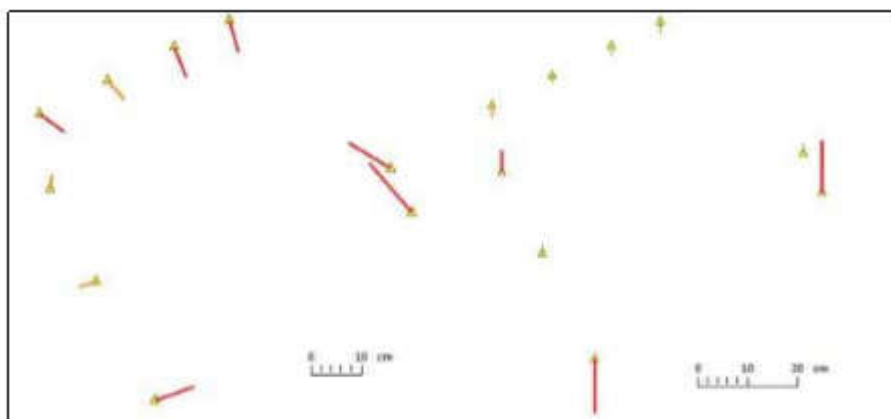


Figure A6, Residuals on ground control points, left planimetry, right height

Ei mallinnusta, havaintojen uudelleenluokittelu

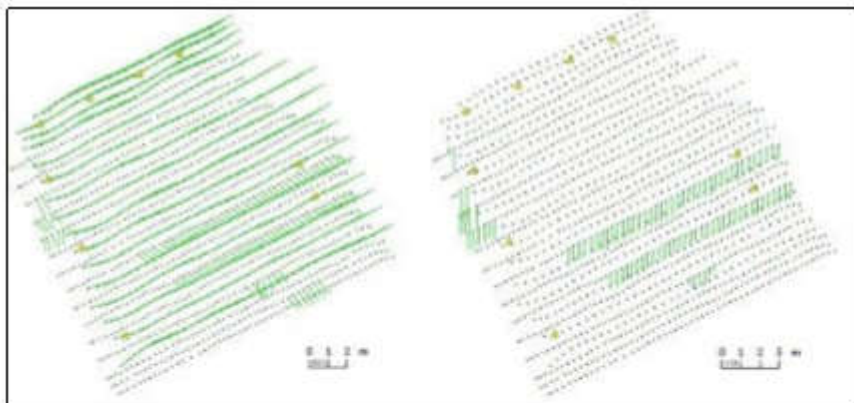


Figure A7. Residuals on exposure location observations, left planimetry, right altitude

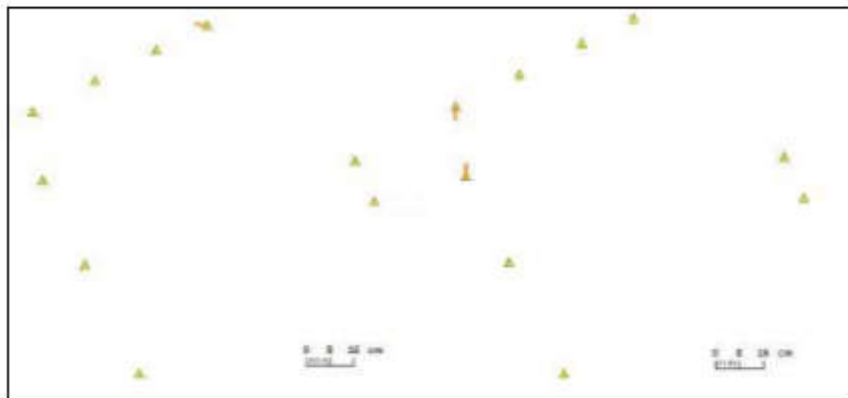


Figure A8. Residuals on ground control points, left planimetry, right height.

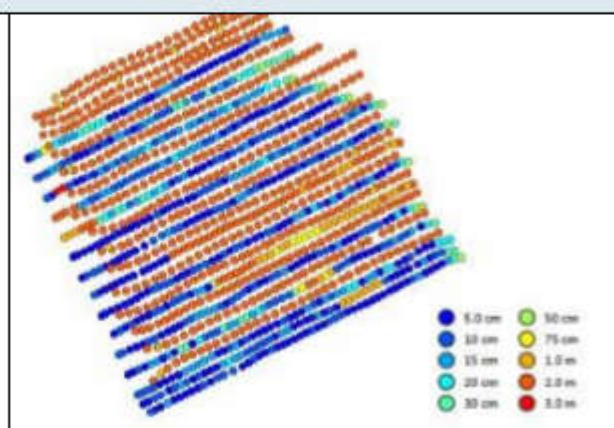


Figure A9. Re classification of exposure location accuracy to weight classes



Yleisen ajalehtimisen malli ja havainojen uudelleenluokittelu

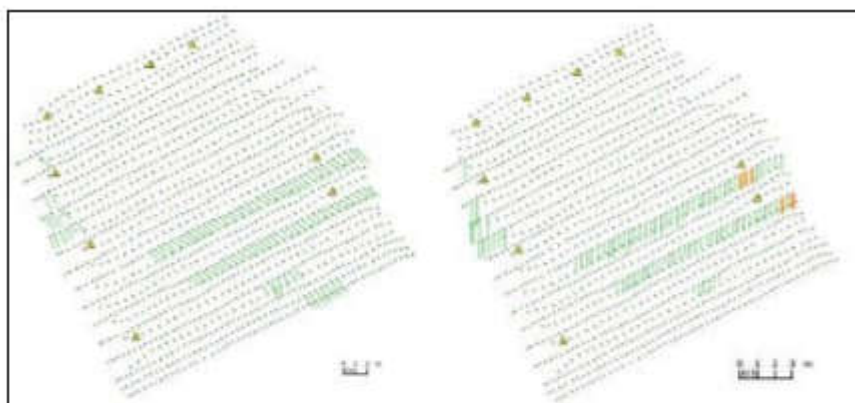


Figure A10, Residuals on exposure location observations, left planimetry, right height

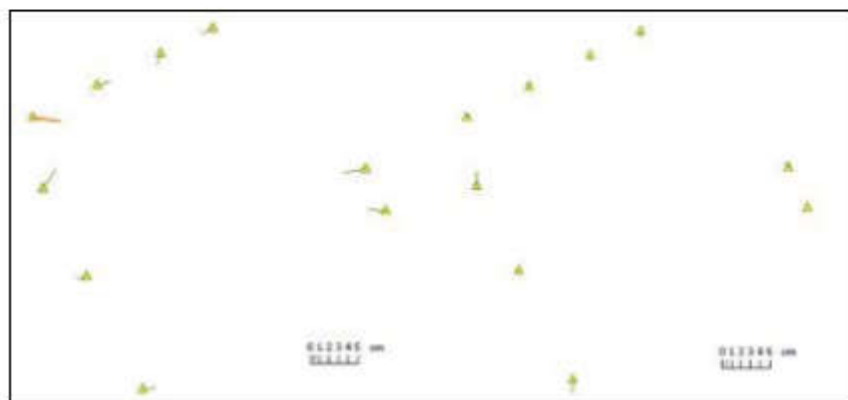


Figure A11, Residuals on ground control points, left planimetry, right height

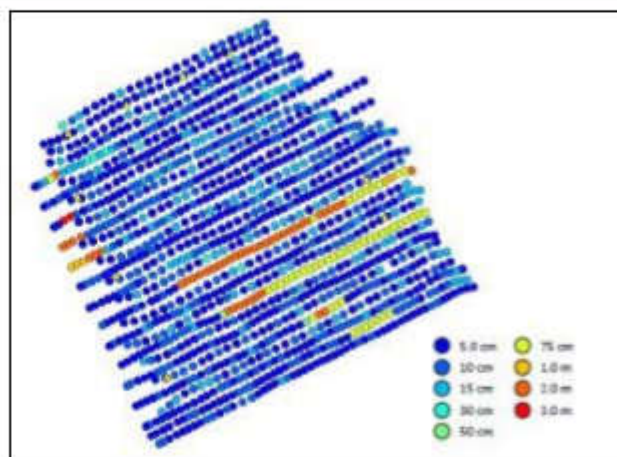


Figure A12, Re classification of exposure location accuracy to weight classes

Ajelehtimisen malli lentolinjoittain, havaintojen uudelleenluokittelu

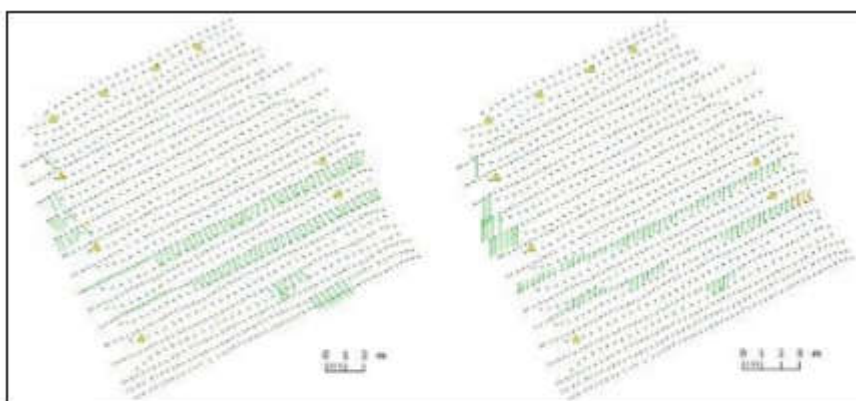


Figure A13. Residuals on exposure location observations, left planimetry, right



Figure A14. Residuals on ground control points, left planimetry, right height.

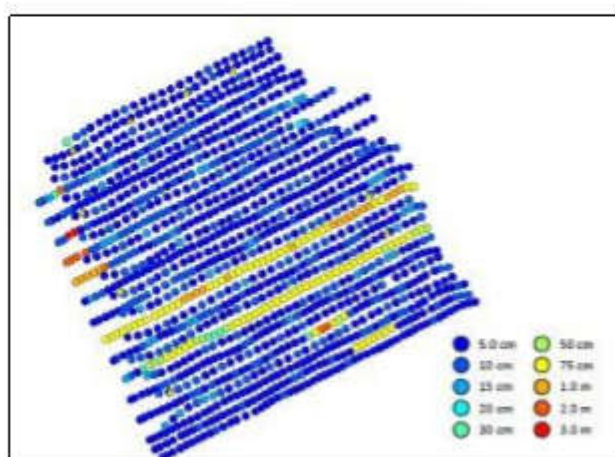
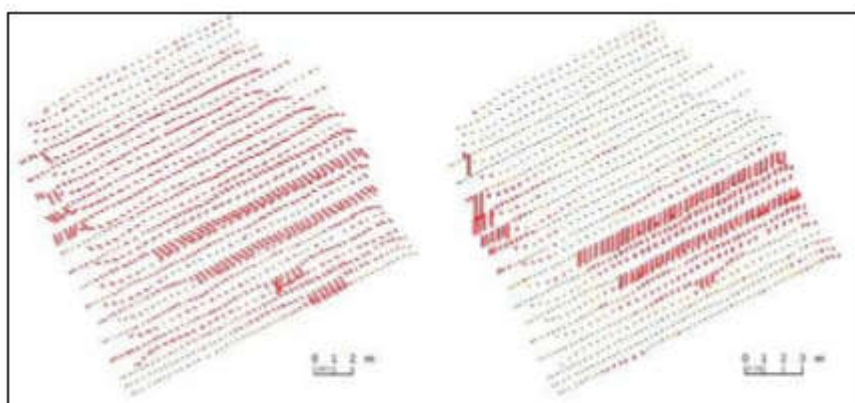


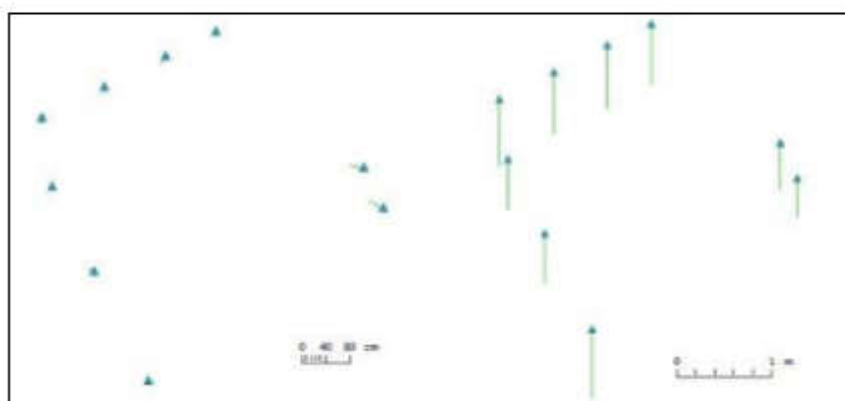
Figure A15. Re classification of exposure location accuracy to weight classes

## Tarkkuuden varmennus

Ilman mallinnusta, ei uudelleenluokittelua



**Figure A16,** Residuals on exposure location observations, left planimetry, right



**Figure A17,** Errors in verification points, left planimetry, right height.

Tavallinen ajalehtimisen malli ja havaintojen uudelleenluokittelu

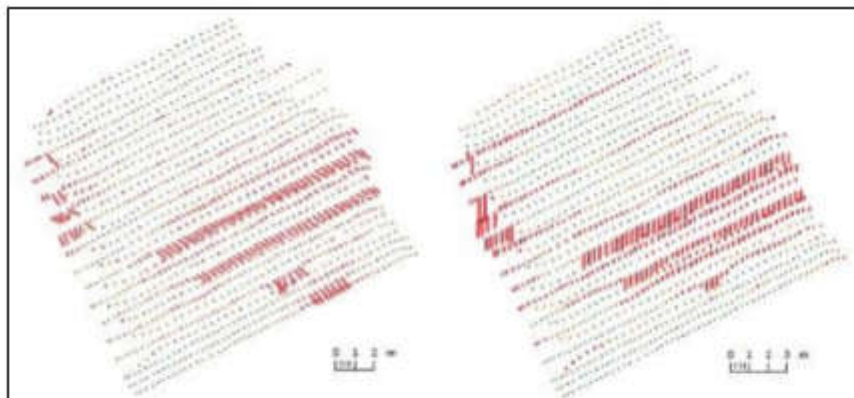


Figure A18, Residuals on exposure location observations, left planimetry, right

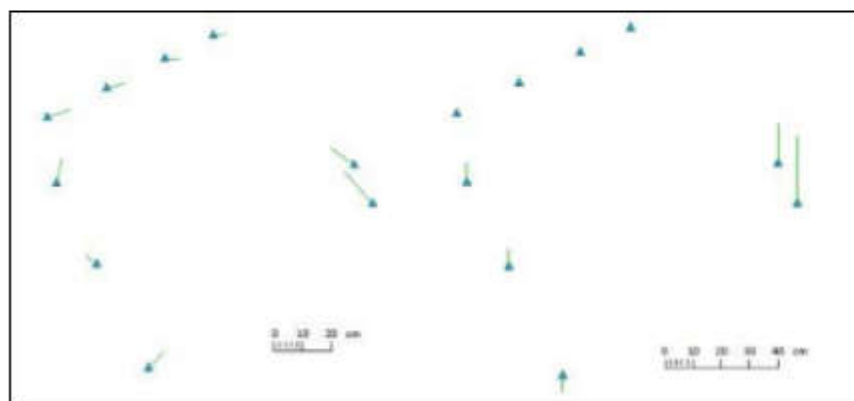


Figure A19, Errors in verification points, left planimetry, right height.

Ajelehtimisen malli lentolinjoittain, ei havaintojen uudelleenluokittelua

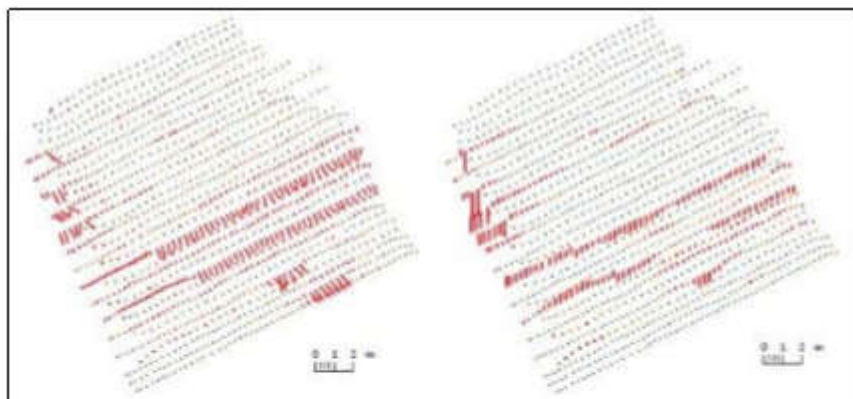


Figure A20, Residuals on exposure location observations, left planimetry, right



Figure A21, Errors in verification points, left planimetry, right height.

Yleinen ajalehtimisen malli, havaintojen uudelleenluokittelu

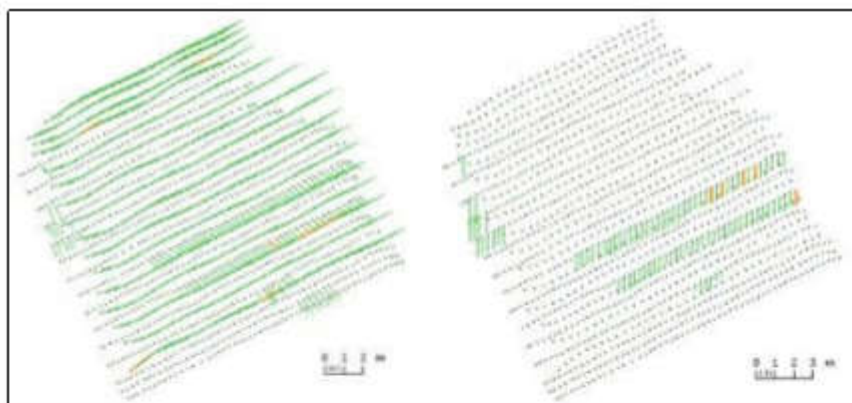


Figure A22, Residuals on exposure location observations, left planimetry, right altitude

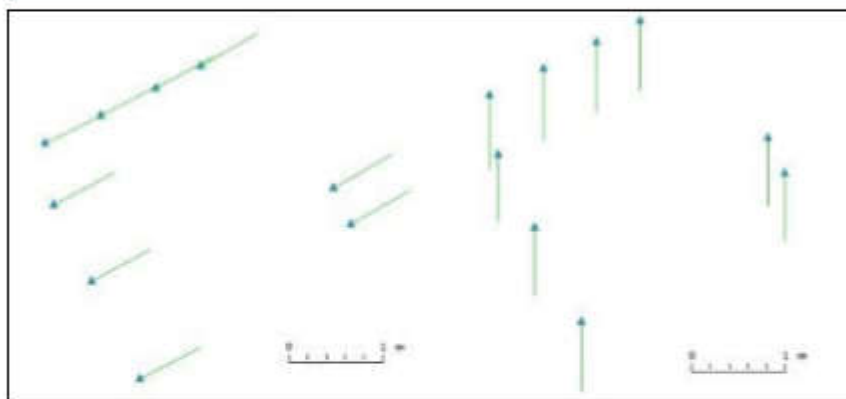


Figure A23, Errors in verification points, left planimetry, right height.

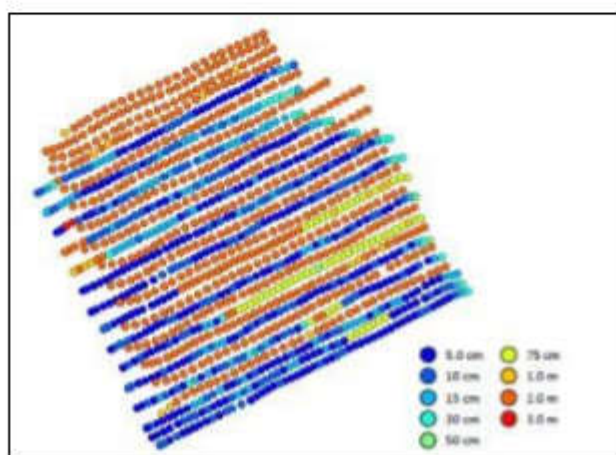


Figure A24, Re classification of exposure location accuracy to weight classes



Ajelehtimisen malli lentolinjoittain, havaintojen uudelleenluokittelu

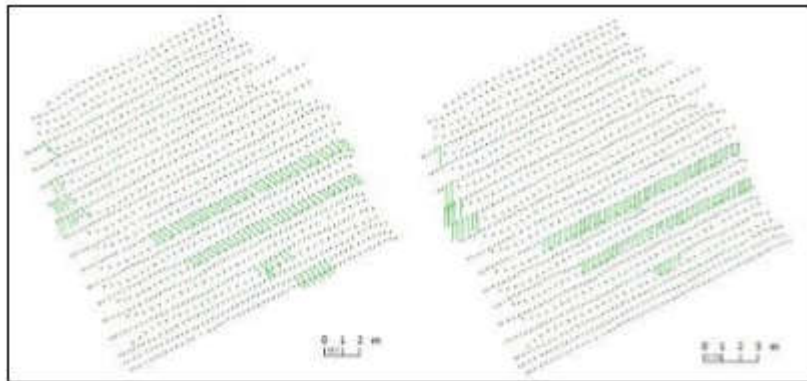


Figure A28, Residuals on exposure location observations, left planimetry, right altitude

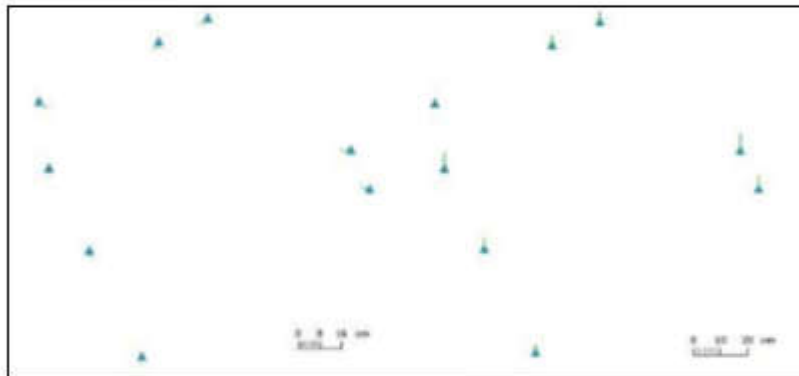


Figure A29, Errors in verification points, left planimetry, right height.

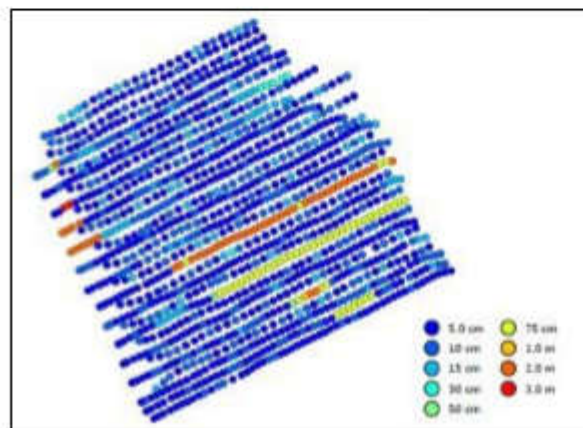


Figure A30, Re classification of exposure location accuracy to weight classes