



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Janne Pirhonen

# PPK-mittauksen prosessi ja laatu UA- kuvauksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinöörityö

24.5.2019

Tekijä Otsikko	Janne Pirhonen PPK-mittauksen prosessi ja laatu UA-kuvauksessa
Sivumäärä Aika	52 sivua + 3 liitettä 24.5.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaajat	lehtori Ilkka Partonen asiantuntija Joni Salo
<p>Opinnäytetyössä selvitettiin UAV-kuvatun ja fotogrammetrisesti prosessoidun pistepilven tarkkuutta vaaka- ja pystysuuntaisesti kahdella eri miehittämättömällä ilmakuvauksen menetelmällä. Tässä työssä vertailuun käytettiin Post-Processed Kinematic- (PPK) ja Ground Control Points (GCP) -ilmakuvausmenetelmiä.</p> <p>Työssä käytettiin suomalaisvalmisteista GeoDrone X4L -UA-kopteria, jonka valmistaja on VideoDrone Finland Oy. Tutkimus toteutettiin Järvenpään keskustassa sijaitsevalla puisto-alueella.</p> <p>Kahdella eri ilmakuvauksen menetelmällä tuotettuja pistepilviaineistoja verrattiin takymetrimittauksesta laskettuun maastomalliin. Pistepilviaineistojen vertailu suoritettiin Järvenpään kuvausalueella sijaitsevien kolmen eripituisen kevyen liikenteen väylän ja yhden hiekkakentän osalta. Alueet määräytyivät tutkinnan kohteeksi niiden kovapintaisen alustan takia.</p> <p>Järvenpäässä suoritettu ilmakuvauksen tehtiin noin 75 metrin korkeudesta. Tässä työssä käytetyn UAS-järjestelmän kalustolla se tarkoittaa noin 1,5 cm:n maastoresoluutiota. PPK- ja GCP-pistepilvien korkeustarkkuudet olivat noin 3 cm, kun vertauspintana käytettiin takymetrimittauksesta saatua maastomallia. Horisontaalisessa tarkkuudessa molemmilla ilmakuvauksen menetelmillä päästiin noin 2 cm:n tarkkuuteen. PPK- ja GCP-kuvaukset suoritettiin samalla lennätyskerralla, joten prosessoitavat kuvat olivat täysin identtiset. Jälkiprosessoinnin menetelmät eroavat toisistaan.</p> <p>Ilmakuvaukset Järvenpäässä osoittivat, että PPK-menetelmällä mitattu ja fotogrammetrisesti käsitelty aineisto soveltuu maanmittaustekniikan alaan. Tämän lisäksi PPK-menetelmässä ei tarvita yhtä paljon signaalipisteiden mittauksia maastossa, kuten GCP-menetelmässä. Tämä lisää toiminnan kustannustehokkuutta varsinkin suuremmilla kuvausalueilla.</p>	
Avainsanat	PPK, pistepilvi, maastomalli, fotogrammetria

Author Title	Janne Pirhonen Process and Quality of Post-Processed Kinematic survey in Unmanned Aerial Photography
Number of Pages Date	55 pages + 3 appendices 24 May 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructors	Ilkka Partonen, Senior Lecturer Joni Salo, Specialist
<p>The aim of this bachelor of thesis was to research the photogrammetrical accuracy of point cloud horizontally and vertically by using two different UAV (Unmanned Aerial Vehicle) methods. Post-Processed Kinematic (PPK) and Ground Control Points (GCP) were used for comparison in this thesis.</p> <p>The results of these two methods were compared to reference data which was measured by tachometer. The point cloud comparison was made between three asphalt parts and one sand field because of the hard surfaces.</p> <p>The height of the UAV flight was about 75 meters. With the equipment used that translates to ground sample distance of about one and half centimeters. The accuracy of the point cloud compared to the DTM on the sites was approximately three centimeters. Horizontally the accuracy was 2 centimeters in both methods. PPK and GCP measurements were carried out at the same flight which means both processing methods used the same photos, but the methods of post processing were different.</p> <p>PPK UAV data has already achieved an accuracy useable for many applications within land surveying. In addition, the PPK method does not require as much signal point measurements on terrain as the GCP method. This increases the cost-effectiveness of operations especially in larger UAV areas.</p>	
Keywords	UAV, point cloud, terrain model, photogrammetry

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Unmanned Aircraft System	2
	2.1.1 UA-laitteet	3
	2.1.2 Kamerat	4
	2.1.3 Akut	5
	2.1.4 Ohjainyksikkö (GCS) ja tietoyhteys (CDL)	7
2.2	Toimintaperiaate	9
2.3	Lainsäädäntö	10
2.4	Esimerkkejä käyttökohteista	16
	2.4.1 Harrastukset ja elokuvat	16
	2.4.2 Pelastustoiminta	17
	2.4.3 Luonnonvarat	17
	2.4.4 Kartoitussmittaukset	17
3	Post-Processed Kinematic	19
	3.1 Toimintaperiaate	20
	3.2 Maatukiasema	21
	3.3 PPK-prosessina	22
	3.4 PPK-mittauksen hyötypuolet	23
4	Maastotyöt Järvenpäässä	25
	4.1 Esivalmistelut	27
	4.1.1 Lähtöpisteet	27
	4.1.2 Signaaliointi	29
	4.1.3 Lennätyksen esivalmistelu	30
	4.2 Lennätys	32
	4.3 Takymetrilla referenssimittaukset	33
	4.4 GCP-menetelmä ilmakuvauksessa	35
5	Jälkilaskenta	36
	5.1 PPK-laskenta	36

5.1.1	Tiedostojen lataus	37
5.1.2	Tiedostojen käsittely	38
5.1.3	Geotagaus	39
5.2	Agisoft Photoscan Professional	40
5.2.1	Aloitustoimenpiteet	40
5.2.2	Signaalipisteet prosessoinnissa	41
5.2.3	Pistepilvi	42
5.2.4	Teksturoidi	44
5.2.5	Lopputuotteet	44
6	Mittaustulosten vertailu	45
6.1	Korkeuden vertailu	46
6.2	Tukipisteiden vertailu	47
7	Pohdintoja	51
	Lähteet	52
	Liitteet	
	Liite 1. Agisoft-raportti PPK-prosessoinnista	
	Liite 2. Agisoft raportti GCP-prosessoinnista	
	Liite 3. PPK-mittauksen havainnekuvat	

## Lyhenteet

Autopilot	Laite tai järjestelmä, joka pitää huolen automaattisesta ohjauksesta.
CDL	Communication Data Link. GCS:n ja UA:n välinen tietoyhteys.
DEM	Digital Elevation Model. Korkeusmalli.
EASA	European Aviation Safety Agency. Euroopan ilmailuviranomainen.
GCP	Ground Control Point. Maatukipiste.
GCS	Ground Control Station. Laite tai ohjelma, jolla seurataan tai ohjataan miehittämätöntä ilma-alusta.
GIMBAL	Kameravakain.
GNSS	Global Navigation Satellite System. Yhteisnimitys maailmanlaajuisille satelliittipaikannusjärjestelmille.
GPS	Global Positioning System. Yhdysvaltojen armeijan kehittämä satelliittipaikannusjärjestelmä.
GSD	Ground Sample Distance. Sensorin pikselikoko maastossa.
IMU	Inertial Measurement Unit. Inertiamittausjärjestelmä. Mittaa laitteen sisäistä liikettä kiihtyvyyssanturien ja gyroskooppien avulla.
LiDAR	Light Detection and Ranging. Kaukokartoituslaite, joka mittaa laservalon pulssin kuluaikaa.
PPK	Post Processed Kinematic. Satelliittimittausmenetelmä, jossa tukiasema ja vastaanotin tallentavat vaihehavaintoja, joiden erotuksella lasketaan tarkka sijainti jälkilaskennalla.

RPAS	Remotely Piloted Aircraft System. Kauko-ohjatun ilma-aluksen käytön koko järjestelmä, jota käytetään lentotyöhön.
RTK	Real-Time Kinematic. Satelliittimittausmenetelmä, jossa tukiasema lähettää omat vaihehavaintonsa vastaanottimelle, joka laskee erotushavaintojen avulla tarkan sijainnin reaaliajassa.
UA	Unmanned Aircraft. Miehittämätön ilma-alus, joka on tarkoitettu lentämään ilman ilma-aluksessa olevaa ohjaajaa.
UAS	Unmanned Aircraft System. Miehittämätön ilma-alusjärjestelmä.
VTOL	Vertical Take-Off and Landing. Pystysuora nousu ja lasku.

## 1 Johdanto

PPK-mittaus tarkoittaa uudenlaista teknologiaa miehittämättömässä ilmailussa. Tämän insinööriyön tarkoitus oli tutkia PPK-menetelmällä tuotetun ja siitä fotogrammetrisesti jälkiprosessoidun pistepilviaineiston korkeus- ja vaakatarckkuuksia suhteessa perinteiseen GCP-menetelmään. Näiden kahden ilmakuvauksen menetelmän tuloksia verrattiin taikymetrimittauksella suoritettuihin tuloksiin, joita pidetään tässä työssä referenssiaineistona. Lisäksi tässä työssä selvitetään PPK-menetelmän työprosessia kokonaisuutena.

Insinööriyön aihealueeksi valikoitui ilmakuvauksen miehittämättömällä ilma-aluksella, sillä se kiinnostaa itseäni ja PPK-mittaus valikoitui aihealuetta täsmentäväksi valinnaksi sen ajankohtaisuuden perusteella.

Insinööriyö tehtiin yhteistyössä Geotrim Oy:n kanssa. Lisäksi työssä apuna toimi kyseisen yhtiön UAV-asiantuntija Joni Salo, joka oli maastossa lennättämässä työn ilmakuvauksessa käytettyä GeoDrone X4L -tyyppistä miehittämätöntä ilma-alusta. Tässä työssä käytetty UAS-järjestelmä oli kokonaisuudessaan Geotrim Oy:n omistama.

Maastotyöt suoritettiin Järvenpään keskustan läheisyydessä sijaitsevassa puistossa, jossa oli fotogrammetriseen laskemiseen soveltuvia kovia pintoja. Puistoa kiertävät asfaltoidut kevyen liikenteen väylät ja kuvausalueen keskellä sijaitseva kovapintainen hiekkakenttä valikoituvat tutkimuksen kohteiksi.



## 2 Unmanned Aircraft System

UA (Unmanned Aircraft) on miehittämätön ilma-alus, joka on tarkoitettu lentämään ilman ilma-aluksessa mukana olevaa ohjaajaa. Tätä termiä käytetään, kun tarkoitetaan ammattimaista lennätystyötä. Ammattimaisella lennätystyöllä tarkoitetaan työtä, jota tehdään säännöllisesti ja korvausta vastaan. [1]

Miehittämätön ilmailu voi perustua esimerkiksi harraste- ja urheilutarkoitukseen, jolloin ilma-aluksesta käytetään nimitystä lennokki. Harraste- ja urheilutarkoituksiin käytettävissä lennokeissa voi olla esimerkiksi kamera. Vaikka kyse ei ole ammattimaisesta kuvaustoiminnasta, tätäkin toimintaa koskevat ilmailualan säädökset. [1]

RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) on kauko-ohjatun ilma-aluksen käytön kokonaisjärjestelmä, joka pitää sisällään kauko-ohjatun ilma-aluksen, sen kauko-ohjauspaikat, tarvittavat ohjaus- ja seurantayhteydet ja muut käytön edellyttämät järjestelmänosat. RPAS on UA-termin tavoin ammattimaiseen lennätystyöhön tarkoitettua toimintaa. [1]

Vuonna 2017 UA-laitteiden maailmanlaajuinen markkina-arvo arvioitiin 18 000 miljoonan dollarin arvoiseksi ja sen on oletettu kasvavan 52 000 miljoonaan dollariin vuoteen 2025 mennessä [2].

UAS (Unmanned Aircraft System) tarkoittaa Colominan [3] mukaan laajempaa kokonaisuutta, joka koostuu kolmesta eri komponentista. Komponenteiksi luetellaan miehittämätön ilma-alus (UA), ohjausyksikkö (GCS, Ground Control Station) ja laitteiden kommunikaatiota varten tarkoitettu tietoyhteys (CDL, Communication Data Link). [3]

Markkinoilta saatavat UAS-järjestelmät ovat hintaluokaltaan 1 000–60 000 euroa, joka käsittää valmiin ja testatun laitteiston. On suositeltavaa käydä laitevalmistajan järjestämä kurssi, jossa perehdytetään lennättäjä nimenomaisen laitteen käyttöön. Kursseilla opastetaan lennättäjää tarvittaviin toimenpiteisiin lennon suorittamiseksi. [6]

### 2.1.1 UA-laitteet

UA-laitteiden jaotteluja on useita erilaisia. UA-laitteet voidaan jaotella esimerkiksi painon mukaisesti, kuten Partonen [23] on asian esittänyt.

UA-laitteet voidaan jaotella myös sen mukaan, miten alus suorittaa lentoonlähdön ja laskeutumisen. Tämän jaottelu jakaa UA-laitteet kahteen eri ryhmään, joista jaottelun ensimmäiseen osaan määritellään vertikaalisesti lennätysten nousun ja laskun (VTOL, Vertical Takeoff and Landing) suorittavat UA-laitteet, näissä tapauksissa kyseessä on yleensä UA-kopteri. [4]

Jaottelun toinen osa koostuu kiinteäsiipisistä (Fixed Wing) ilma-aluksista, jotka muistuttavat malliltaan hyvin paljon perinteistä lentokonetta. Kiinteäsiipiset UA-laitteet tarvitsevat nousuun ja laskuun joko kiitoradan tai jonkin katapulttiavusteisen laukaisumekanismiä. Kiinteäsiipiset UA-laitteet tarvitsevat tilaa kääntyessään, kun UA-kopterit suoriutuvat käännöksistä hyvinkin pienessä tilassa. [4]

UA-kopterit ovat useampiroottorisia multikoptereita, eli quad-, heksa- tai oktokoptereita. UA-koptereissa on nimensä mukaisesti joko 4, 6 tai 8 roottoria. Roottoreista joka toinen pyörii vastapäivään ja joka toinen myötäpäivään. UA-kopterien kallistaminen tapahtuu teknisesti moottorien kierroslukemia säätämällä. Suunnan kääntäminen lennätksessä tehdään nostamalla esimerkiksi myötäpäivään pyörivien moottorien kierroslukemia ja samalla pienentämällä vastapäivään pyörivien moottoreiden kierroslukemia. [6] Kuvassa 1 on nähtävillä tässä työssä käytetty 4-roottorinen UA-kopteri.



Kuva 1. GeoDrone X4L -UA-kopteri [7].

### 2.1.2 Kamerat

UA-laite heilahtelee ilmatilassa tuulenpuuskien ja turbulenssien voimasta. Stabiloidulla kameratelineellä eli gimbaalilla (eng. Gimbal) voidaan kamera pitää vakaana, jotta ilmakuvat ovat käyttökelpoisia. UA-laitteessa on omat anturit gimbaalia varten, jolloin UA-järjestelmä osaa automatisoida kameran kulman haluttuun asentoon, vaikka UA-laite horjuisikin tuulenvoimakkuudesta. UA-järjestelmissä käyttäjä pystyy yleensä myös määrittämään kameran kuvauskulman operaation aikana ohjausyksiköstä esimerkiksi, jos on tarvetta ilmakuvata kiinnostavaa kohdetta erilaisista kuvakulmista. [6; 11.]

UA-laitteiden kameroille asetetaan kovat vaatimukset. Kameran pitää olla lujarakenteinen ja mahdollisimman kevyt. Kameran linssin pitäisi olla mahdollisimman valovoimainen, jotta valotusaika olisi mahdollisimman lyhyt. Kuvakennon koon olisi oltava mahdollisimman iso, jotta pystytään tehokkaaseen ja tarkkaan ilmakuvaukseen. Kamerassa täytyy olla mahdollisuus automaattiseen kuvanottoon, ja lisäksi kamerassa tarvitaan nopein mahdollinen muistikortti. Kamerassa tulisi olla myös mahdollisimman suorituskykyinen kuvan tarkennus, jotta ilmakuvien laatu olisi mahdollisimman hyvä. Kameran virransäästö pitää kytkeä pois, jotta kamera ei sammuta itseään operoinnin aikana. [6]

Tässä työssä käytettiin ilmakuvaksessa Sony A6000 -pokkarikameraa. Kamerassa on 24,3 megapikselin Exmor HD -kuvauskennon, jossa on BIONZ X -prosessori. Kamerassa on lisäksi hybridiautomaattitarkennus, jonka avulla ilmakuvat tarkentuvat riittävän nopeasti UA-kopterin liikkeessä. [38]

Nykyään on saatavilla kameroita, joissa on sisäänrakennettu GPS (Global Positioning Systems). Tämän avulla valokuvien ominaisuustietoihin voidaan tallentaa kuvauspaikan koordinaatit, korkeus merenpinnasta ja kuvaussuunta. Tällaista kameraa ei voida asentaa hiilikuitukoteloon, sillä GPS ei saa signaalia hiilikuidun läpi. [6]

UA-laitteisiin voidaan myös asentaa erikoiskameroita. Lämpökameran tekniikkaa hyödynnetään myös UA-laitteissa. Lämpökameran toiminta perustuu erilämpöisten kohteiden erottamiseen infrapunasäteilyn aallonpituuden ja säteilemisvoimakkuuden perusteella. Lämpökameran ilmaisimien muodostaa mitatun lämpösäteilyn lämpötilan metatiedoksi, jolloin syntyy lämpökuva. Pintojen lämpötilat näkyvät lämpökuvassa eri väreinä, ja näin pystytään tutkimaan UA-laitteen ja lämpökameran avulla esimerkiksi korkeiden

rakennuksien lämpövuotoja ulkopuolisesti. Lämpökuvaus vaatii selkeät lämpötilaerot, jotta kameran ilmaisin pystyy tunnistamaan kahden erilämpöisen pinnan toisistaan. [8]

LiDAR (Light Detection and Ranging) -tekniikkaa eli laserkeilausta hyödynnetään myös UA-laitteissa. Tekniikka perustuu tutkamaiseen menetelmään, joka toimii näkyvän valon, lähi-infran tai ultravioletin alueella. Laserkeilain mittaa etäisyyden lähettämällä pulssin laservaloa mitattavaan kohteeseen, josta se heijastuu takaisin keilaimeen. Tästä saadaan UA-laitteesta lähtevän ja palaavan pulssin aikaerotus, josta saadaan sopivilla jälkikäsittelyyn tarkoitetuilla ohjelmistoilla muodostettua säteen kulkema matka. UA-laitteen GPS-vastaanottimen, IMU-yksikön ja mahdollisten maassa sijaitsevien GPS-tukiasemien avulla mittaustuloksia saadaan tarkennettua. Laserkeilaimella varustettu UA-laite lentää kartoitettavan kohteen ylitse ja kykenee skannaamaan 20 000–150 000 pistettä sekunnissa. [9]

Laserkeilaus soveltuu esimerkiksi voimalinjojen kartoitukseen ja puustoisien maaston maanpinnan muotojen kartoitukseen. Laserkeilauksen etuna pokkarikameroihin verrattuna on se, että laserkeilaimen tekniikalla päästään yksityiskohtaisempiin tuloksiin esimerkiksi voimalinjojen kartoituksessa. Pokkarikamera-tekniikalla voimalinjoista ei voida tulkita yhtä tarkasti esimerkiksi roikkuvia voimalinjoja, sillä laserkeilaimen tekniikalla saavutetaan huomattavasti suurempi ja tarkempi pistemäärä kohteesta. [9]

### 2.1.3 Akut

UA-laitteissa käytetään pääsääntöisesti LiPo (Litium-Polymeeri) -akkuja, joissa on korkea energiatiheys. Akkujen käsittelyssä on oltava huolellinen ja noudatettava käyttöohjeita, sillä väärinkäytön seurauksena voi syntyä tulipalo tai räjähdys. [6]

Akkujen lataukseen käytetään niihin tarkoitettua laturia, jossa on Balancer-toiminto, joka estää yllilatautumisen. Akkujen lataus on turvallisinta suorittaa palamattomalla alustalla esimerkiksi sammutuspeitteen, saviruukun tai LiPo-akkupussin avustuksella. Akkulaturit säätävät virran ja jännitteen niin, että yksittäisessä kennossa jännite ei nouse yli 4,2 volttia. Akut eivät saa lämmetä tai turvota latauksen aikana, muissa tapauksissa akku tulee poistaa välittömästi latauksesta räjähtämisen riskin välttämiseksi. Vioittuneet akut tulee poistaa käytöstä. [6]

Akun yhden kennon jännite on 3,7 voltia. Akku voi koostua useammasta kennosta, jotka on kytketty sarjaan. Sarjakytkenällä saadaan akusta isompi tehohyöty, joka mahdollistaa UA-laitteen pitkäkestoisemman operoinnin ilmatilassa. Akkujen huono puoli on niiden rajallinen käyttö pakkasessa, jolloin kylmyys vähentää radikaalisesti akun varausta. Geo-Drone X4L -kopterin manuaalissa suositellaan maksimissaan lennätystä  $-5\text{ °C}$ :n lämpötilassa. Talvella lennätysajat ovat huomattavasti lyhyempiä kuin kesällä. [6; 7.]

Tehokkaassa ilmakuvausoperaatioissa on hyvä olla akkuja vähintään niin paljon, että toinen akkusarja voi latautua samanaikaisesti toisen sarjan ollessa käytössä. Akkuja voidaan ladata operaation aikana esimerkiksi ottamalla virta akkulaturiin suoraan auton akusta. [6]

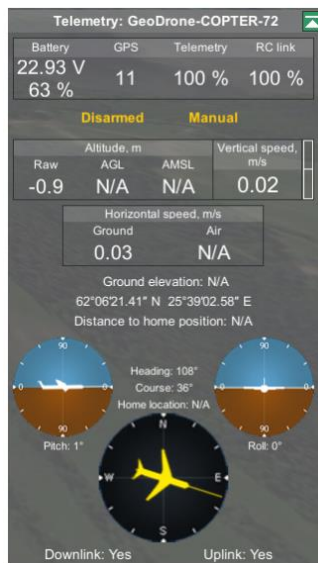
### 2.1.4 Ohjainyksikkö (GCS) ja tietoyhteys (CDL)

Ohjainyksiköt (GCS, Ground Control Station) ovat paikallaan olevia tai kuljetettavia laitteita ja ohjelmia, joilla seurataan ja ohjataan miehittämätöntä ilma-alusta. Ohjainyksiköllä voidaan ohjata samanaikaisesti useampaakin ilmatilassa operoivaa UA-laitetta. Tässä tapauksessa ohjainyksikön käyttämiseen vaaditaan laadukkaat ohjainyksiköt ja monta operoivaa henkilöä. Mitä isompi operaatio, sitä suorituskykyisempi ohjainyksikkö tarvitaan. Tässä työssä käytettiin kuvan 2 näköistä ohjainyksikköä. [4]



Kuva 2. GeoDrone 4XL -kopterin ohjainyksikkö [7].

UA-laitteen ja ohjainyksikön välillä on tietoyhteys (CDL, Common Data Link), joka lähettää telemetriä tietoa lennättäjälle tietoyhteyden välityksellä. Tietoyhteys toimii radiolin-kin välityksellä. Kuvassa 3 näkyy telemetrian ilmoittamia tietoja lennätysten ajalta, joista on nähtävillä UA-laitteen akkujen varaustilanne, GPS-satelliittien määrä, datalinkin toimivuus, kallistuskulmat, kompassin suunta ja reaaliaikainen nopeus. Telemetriset tiedot näkyvät lennättäjälle esimerkiksi tietokoneessa, tabletissa tai matkapuhelimessa olevalla sovelluksella. Ohjainyksikkö voidaan yhdistää esimerkiksi tietokoneeseen USB-kaapelilla, jolloin telemetriset tiedot näkyvät tietokoneen näytöltä. Ohjainyksikkö pyrkii havainnollistamaan, opastamaan ja auttamaan lennättäjää lentotehtävän aikana. [4; 6.]



Kuva 3. GeoDrone X4L, telemetrinen ikkuna [21].

UA-laitteen yksi tärkeä komponentti on Autopilot-järjestelmä, joka on automatisoitu UA-laitteen ohjausjärjestelmä. Autopilotti on yksi UA-laitteen osa, jossa on mikroprosessori eli pieni tietokone ja erilaisia antureita. Autopilotin toiminta perustuu satelliittipaikannukseen, jossa määritetään UA-laitteen sijaintitiedot GPS-vastaanottimien avulla. Autopilotissa on myös IMU-järjestelmä, joka sisältää kolme kiihtyvyyssanturia, jotka mittaavat UA-laitteen kiertymiskulmia. Lisäksi siellä on kolme gyroskooppia mittaamassa laitteen suunnan muutoksia ja näiden tietojen avulla saadaan laitteen asento määriteltävä. [3; 6.]

Käytännössä lennättäjän tehtävänä RPAS-toiminnassa on nostaa UA-laite manuaalisesti haluttuun korkeuteen, minkä jälkeen varmistetaan turvallinen ympäristö ja annetaan UA-laitteen autopilotille lennätyskomento. Tämän jälkeen lennättäjä tarkkailee ilmatilaa ja muuta ympäristöä mahdollisten häiriöiden osalta. Tehtävän loputtua lennättäjä ohjaa UA-laitteen manuaalisesti ilmasta takaisin maahan.

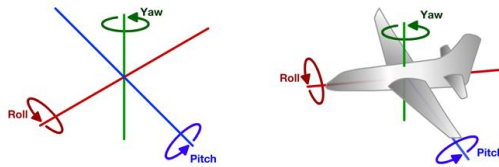
## 2.2 Toimintaperiaate

Kartoitustarkoitukseen tehtävä lennätys miehittämättömällä ilma-aluksella suoritetaan hyvin samankaltaisesti kuin normaalissa lentokoneesta tai helikopterista tapahtuvassa ilmakuvauksessa, jossa lennetään kuvausjonoja ilmatilassa. Pituus- ja sivupeitot ovat edellytys ilmakuvaukselle, jotta mittauksesta saadaan mahdollisimman tarkat ja yhtenevät tulokset. Pituuspeitolla tarkoitetaan pituussuuntaisten kuvajonojen päällekkäin asetumista ja sivupeitoilla puolestaan sivusuuntaisesti. UA-lennätyksessä käytetään tavallisesti vähintään 80 %:n pituuspeittoa ja 60 %:n sivupeittoa. UA-laitteille on oleellista operoida luotettavasti ilmatilassa ja tuottaa hyvälaatuisia ilmakuvia. [6; 11.]

UA-laitteessa on sisäänrakennettu GPS-vastaanotin, jonka avulla se pystyy seuraamaan alukseen ladattavaa reittisuunnitelmaa. GPS:n avulla UA-laite pystyy toimimaan ns. autopilottina. Lentosuunnitelman pohjalta ilma-aluksesta onnistutaan ottamaan kaikki kuvat samalta korkeudelta, oikeaan suuntaan ja oikein väliajoin, jolloin pituus- ja sivupeitot saavuttavat tarvittavat arvot. UA-laite tallentaa kuvat kameran muistikortille ja lentotiedot omalle muistikortille. Lentotiedoista selviää jokaisen kuvan tallennusaika ja kopterin suurpiirteinen sijainti ja kallistustiedot. [10; 11.]

Kuvassa 4 on nähtävillä ilma-aluksen kiertymiskulmat Yaw, Pitch ja Roll. Yaw kertoo aluksen kompassisuunnan, Pitch aluksen kallistuksen ylös ja alaspäin ja Roll puolestaan aluksen kiertymän sen pituusakselinsa ympäri. Kallistustietoja käytetään hyväksi aineiston jälkilaskennassa. [10]





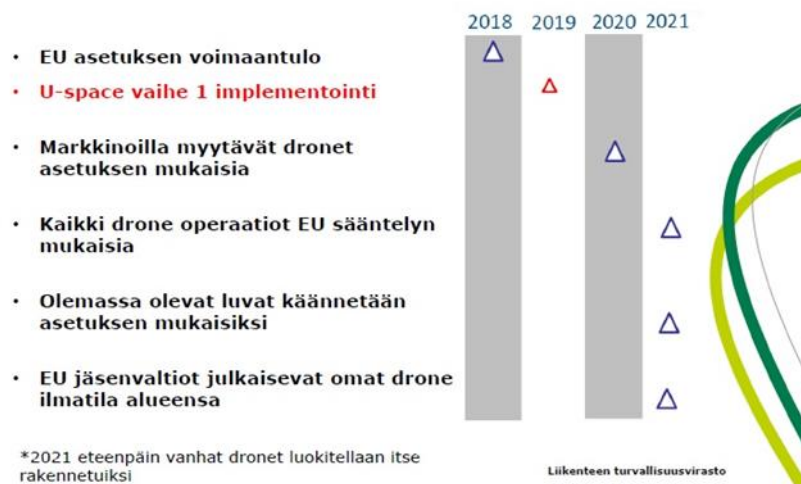
Kuva 4. Lentoaluksen kiertymiskulmat [10].

### 2.3 Lainsäädäntö

Kansainvälisellä tasolla ilmailuhallinnollisia tehtäviä hoitaa siviili-ilmailujärjestö CIAO (International Civil Aviation Organization), jossa kehitetään ja ylläpidetään yhteistä turvallisuutta. Euroopan yhteinen ilmailuviranomainen on EASA (European Aviation Safety Agency), sen keskeisin tavoite on yhtenäisen ja korkean lentoturvallisuustason luominen ja ylläpitäminen koko Euroopassa.

EU-lainsäädäntö on tiukentumassa yhteneväisemmäksi miehittämättömässä ilmailussa. Euroopan ilmailuviranomaisen tuorein asetus on EASA-asetus (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 2018/1139), joka astui voimaan 11.9.2018. Asetuksen uudistamisen tavoitteena on ollut korkea turvallisuustason ylläpitäminen ja ilmailutoimialan kilpailukykyinen parantaminen. EASA-asetus sisältää kansallista liikkumavaraa, jonka käyttämisestä päättää kansalliset ilmailuviranomaiset. Euroopan ilmailuviranomainen jatkaa Euroopan laajuista miehittämättömän ilmailun säädöksiensä tarkentamista. [12; 15.] Kuvassa 5 näkyy EASA-asetuksen arvioitu aikataulu.

## Aikataulu



Kuva 5. EASA-asetuksen aikataulu [17].

Suomessa kansallinen ilmailuviranomainen on Traficom (Liikenne- ja viestintävirasto). Suomessa tapahtuva ilmailu perustuu ilmailulakiin (ilmailulaki 864/2014), joka on astunut voimaan 7.11.2014. Traficom antaa miehittämättömä-ilmailua koskevia tarkempia sää-döksiä, jotta yhteiset säännökset toimivat sujuvasti myös käytännön tasolla. Tuorein sää-dös on OPS-M1-32, joka on astunut voimaan 7.12.2018. [13; 15.]

Liikenne ja viestintäministeriö käsittelee tällä hetkellä hallituksen esittämää ilmailulain muutosta. Muutoksen taustalla on uudistunut EASA-asetus (2018), joka aiheuttaa tar-peen päivittää kansallista ilmailun turvallisuutta koskevaa sääntelyä yhteneväiseksi Eu-roopan laajuisesti. Hankkeessa tavoitellaan entistä yhteneväisempää ilmailun turvalli-suustasoa Euroopassa ja edistetään automaation ja robotiikan hyödyntämistä luomalla miehittämättömälle ilmailulle lainsäädäntökehityksen Euroopan sisämarkkinoilla. Lopulli-nen ilmailulain muutos on arvioitu astuvan voimaan vuoden 2020 aikana. [16]

EASA-asetuksen (2018) mukaan miehittämättömän ilmailun sääntelyn tasoja tulee jat-kossa olemaan kolme:

- OPEN-kategoriassa ei tarvita hyväksyntää viranomaiselta. Vaatimukset koskevat laitteiden valmistajia, myyjiä, ilma-aluksien rekisteröintiä ja koulu-tusta.
- SPECIFIC-kategoriassa tarvitaan erillinen ilmoittamis- tai hyväksyntäme-nettely viranomaisen kanssa ennen toiminnan aloittamista.
- CERTIFIED-kategoriassa vaaditaan tyyppihyväksyty ilma-alus, luvallinen operaattori ja koulutetut lentäjät lentotoimintaa varten. [17]

Sääntelyn tasot jaotellaan riskien mukaan. Matalariskisen OPEN-kategorian turvallisuus varmistetaan operatiivisilla toimintarajoituksilla, kuten kuvassa 6 havaitaan. Riskitason määrittää operaation turvallisuus, esimerkiksi UA-laitteen paino ja lennätettävän alueen muu liikennöinti. Enemmistö nykyisistä RPAS-toimijoista tulee siirtymään OPEN-katego-ria luokituksen alaiseksi. [18]

A1			A2	A3			Alakategoria
Ihmisten päällä*			Ihmisten lähellä	Kaukana ihmisistä**			
DIY	C0	C1	C2	C3	C4**	DIY**	Drone tyyppi
<250g		<80g tai 900g	900g – 4kg	<25kg			Massaraja
<50m	<50m	<120m tai 50m esteen yläpuolella omistajan luvalla	<120m tai 50m esteen yläpuolella omistajan luvalla	<120m tai 50m esteen yläpuolella omistajan luvalla			Korkeusraja
Ohje	Ohje	Nettikurssi + testi	Drone-ajokortti koe	Nettikurssi + testi			Koulutus
-	14 tai valvoja		16 tai valvoja	16 tai valvoja			Ikäraja
-***	Toimija		Toimija sekä dronet	Toimija sekä dronet			Rekisteröinti
-	Suomen päätettävissä alueittain		Kyllä	Suomen päätettävissä alueittain			S-tunnistaminen Geofencing

\*Ei kuitenkaan ihmisjoukkojen päällä

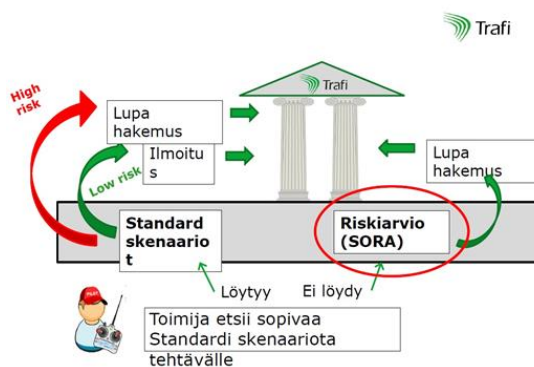
\*\*Kaukana ihmisistä, lentoasemista ja asutuskeskuksista

\*\*\* <250g UAS tulee rekisteröidä, jos koneessa yli 5MP kamera tai mikrofoni

Liikenteen turvallisuusvirasto

Kuva 6. OPEN-kategorian rajoitukset [18].

SPECIFIC-kategoria luokitellaan keskiuuren riskin toiminnaksi ja luvista vastaa kansallinen ilmailuviranomainen. Tämän kategorian riskinarviointi on operaatiokohtaista, jolloin lennättäjän vastuulla on varmistaa turvallinen toimintamalli. Standarditilanteessa riittää ilmoitus lennätystoiminnasta, mikäli riskitasot ovat pienet. Kuvassa 7 on havainnollistettu SPECIFIC-kategorian toimintamalli. [18]



Kuva 7. SPECIFIC-kategorian toimintamalli [17].

Mikäli operaatiolle ei löydy ns. standardi skenaariota, tulee silloin tehdä riskiarviointi SORA (Specific Operations Risk Assessment) -mallin mukaisesti. SORA-pohjaisia lupahakemuksia on saatavilla kansalliselta ilmailuviranomaiselta. Operaatiota suorittava toimija täyttää lupahakemuksen, jonka kansallinen ilmailuviranomainen käsittelee ja antaa tämän jälkeen päätöksensä. [18]

CERTIFIED-kategoria luetaan korkeariskisen jaottelun piiriin, jossa miehittämätön ilma-alus tulee olla tyyppihyväksyty. Tämä kategoria on EASA-asetuksen (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetusta 2018/1139) mukaisesti vielä keskeneräinen ja tulee tarkentumaan jatkossa. [17]

Tällä hetkellä miehittämättömälle ilmailulle selkeimmät säännöt ovat Traficomien tuoreimman määräyksen (OPS M1-32/2018), joka nojautuu Suomen ilmailulakiin (ilmailulaki 864/2014) [14].

RPAS-toimijat veloitetaan ilmoittamaan tekniset perustiedot Liikenteen turvallisuusvirastolle ennen ensimmäisen lennätysten suoritusta. Perustietoihin luetaan tiedot käyttäjästä, tekniset perustiedot ilma-aluksesta, toiminnan laatu ja laajuus. [14]

RPAS-toimijoiden on tallennettava jokaisesta lennosta vähintään seuraavia asioita:

- lennon päivämäärä
- lennon lähtö- ja laskupaikka
- ilma-aluksen lennättäjä
- ilma-aluksen valmistaja ja malli
- lennon aloitus- ja päättymisaika [14].

Lisäksi toimijoiden pitää ilmoittaa, onko kyseessä suoraan näköyhteyteen perustuva lennätys (VLOS, Visual Line Of Sight) vai suoran näköyhteyden ulkopuolella tapahtuva toiminta (BVLOS, Beyond Visual Line Of Sight). [14]

UA-laitteen lento-ohjelmassa saa olla enintään 25 kg, ja siihen ei lasketa mukaan mahdollista UA-laitteeseen kiinnitettävää pelastuslaitetta. UA-laitteen lennättäjällä täytyy olla koko ajan valmius ohjata laitetta. UA-laitetta täytyy lentää vallitsevan sään ja valoisuuden

huomioon ottaen riittävän lähellä lennättäjää tai kauko-ohjausavustajaa, jotta muu ilma- liikenne ja mahdolliset vaarat pystytään tunnistamaan ennakkoon. Kauko-ohjaustähtystäjää käytettäessä on kauko-ohjaajan ja lennättäjän välillä oltava yhteydenpitoa varten luotettava viestintäväline, esimerkiksi radiopuhelimet. [14]

Suomessa lennätyskorkeuden on oltava alle 150 metriä maan tai veden pinnasta. Korkeusrajoitus ei koske kiinteän esteen läheisyydessä tapahtuvaa lennätystoimintaa, jos lennätukseen on kohteen omistajan lupa. Korkeusrajoitus ei koske myöskään siinä tapauksessa, jos lennätystoiminta tapahtuu niille tarkoitetuilla lennätyspaikoilla. [14]

Suomessa on myös alueita, joissa ei UA-laitteilla saa operoida. Kiellettyjä alueita ovat esimerkiksi lentoasemat ja puolustusvoimien erityisalueet (kasarmialue, sotasatama, sotilaslentokenttä, varikot, varastot, viestiasemat). Lentoasemien läheisyydessä on erilliset ohjeistukset UA-laitteiden operoinnille. Puolustusvoimilla on käytössä oma lupamenetely miehittämättömälle ilmailulle. [14; 27.]

Kuvassa 8 esitetään Traficomien julkaisema DroneInfo-sovellus, jonka avulla lennättäjät pystyvät havaitsemaan lentokieltoalueet. Sovellus tarjoaa myös tietoa erilaisista rajoituksista, määräyksistä ja paikallisista sääolosuhteista.

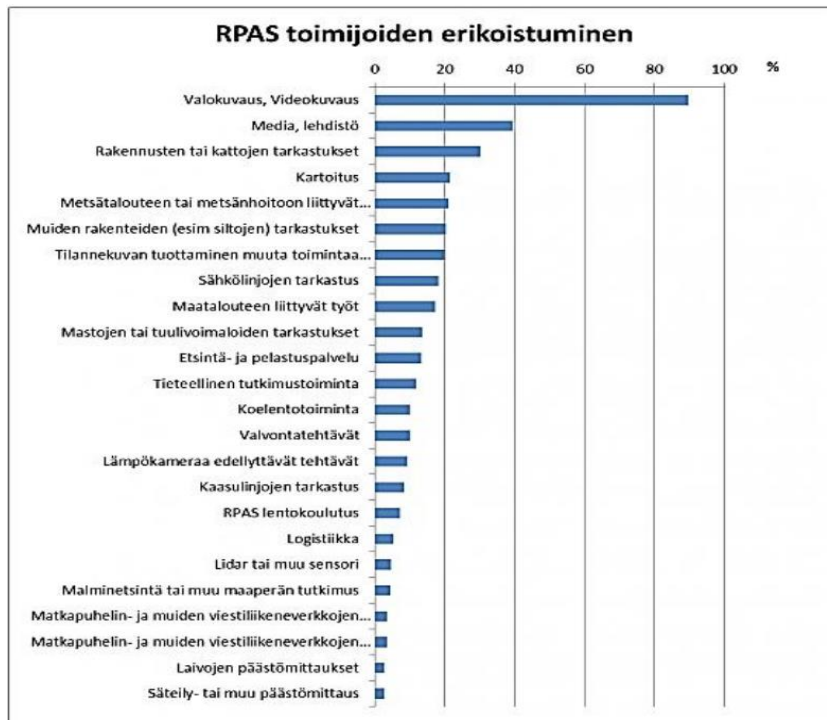


Kuva 8. Kuvakaappaus DroneInfo-sovelluksesta.

Lentoasemien lennätyskieltoalueilla ei saa operoida ilman lennonjohdon lupaa, kuten kuvassa 8 havainnollistetaan. Sovelluksella on myös mahdollista tehdä lennätysilmoitus, jolloin muut ilmatilan käyttäjät pystyvät havaitsemaan lentotoiminnan ja välttämään mahdollista vaaratilannetta.

## 2.4 Esimerkkejä käyttökohteista

Suomessa on kirjattu 2 278 UAS-operaattoria vuoden 2018 lopussa. Käytössä olevia ilma-aluksia puolestaan 2 943 kappaletta. Tilastoitujen ilma-alusten painohajonta on 500 grammasta 150 kilogrammaan. Valtaosa RPAS-toimijoista on erikoistunut valo- ja videokuvaukseen, kuten kuvasta 9 voidaan havaita. [17]



Kuva 9. RPAS-toimijoiden erikoistumisen osa-alueet [17].

### 2.4.1 Harrastukset ja elokuvat

UA-laitteilla voidaan tuottaa perinteistä rakennus- ja maisemakuvausta joko kaupalliseen tarkoitukseen tai yksityiseen käyttöön. UA-laitteita käytetään myös esimerkiksi laskettelijoiden, skeittailijoiden ja pyöräilijöiden kuvaamiseen. UA-laitteilla saadaan urheilusuorituksista näyttäviä kuvia tai videoita, joita voidaan käyttää esimerkiksi markkinointitarkoitukseen. Elokuvatuotannossa käytetään myös UA-laitteiden tekniikkaa hyödyksi. [6]

#### 2.4.2 Pelastustoiminta

UA-laitetta voidaan käyttää pelastustoiminnan tukena esimerkiksi maastopalojen, ihmisten etsintöjen ja vaikeakulkuisten onnettomuuspaikkojen selvityksessä. UA-laite kykenee lähettämään ilmasta reaaliaikaista ilmakuvaa, mutta kuvanlaatu ei ole hyvälaatuista. Esimerkiksi paikallaan olevan ihmisen löytäminen isosta metsästä on haastavaa. Toinen vaihtoehto on ottaa UA-laitteella yksittäisiä valokuvia ja katsoa ne jälkeinpäin, jolloin kuvien tarkkuus on huomattavasti parempi. UA-laite soveltuu hyvin etsintätöihin matalakasvuiseen ympäristöön, josta voidaan havaita etsittävä henkilö selkeästi paremmin kuin korkeakasvuisessa ympäristössä. [6; 36.]

Jos etsintää tehdään poliisi- tai pelastusviranomaisen pyynnöstä, niin heitä voi pyytää sulkemaan ilmatila muulta liikenteeltä. Tämä antaa mahdollisuuden UA-laitteelle operoida korkeammalla ja laajemmalla alueella. [6]

#### 2.4.3 Luonnonvarat

UA-laitteita voidaan hyödyntää peltojen tarkastuksiin. Ilmakuvilla voidaan esimerkiksi todentaa lannoitusta kaipaavat alueet peltopalstalla. UA-laitteita on hyödynnetty maailmanlaajuisesti kasvitautilien etsimiseen. Infrapunakuvauksella voidaan todeta orastavia kasvitauteja jo viikkoja ennen kuin tauti näkyisi muuten. [3]

Ilmakuvauksella saadaan pelloista ja metsistä paljon informatiivisempi tieto verrattuna maastossa kävellen suoritettavaan katselmukseen. Ilmakuvaus on nopeampi ja kustannustehokkaampi tapa kartoittaa aluetta. [6]

#### 2.4.4 Kartoitusmittaukset

UA-laitteita voidaan hyödyntää esimerkiksi hakekasojen tilavuuksien laskentaan, avolouhosten ja hiekkamonttujen mittaamiseen. UA-laitteella lennätetään mitattavan alueen yllä useampi kuvausjono, josta kuvien perusteella fotogrammetriset erikoisohjelmat kykenevät laskemaan kohteesta kolmiulotteisen pintamallin ja pistepilven. Laskennalliset tulokset saadaan suurilla alueilla nopeammin ja edullisemmin kuin perinteisillä mittausmenetelmillä. [36]

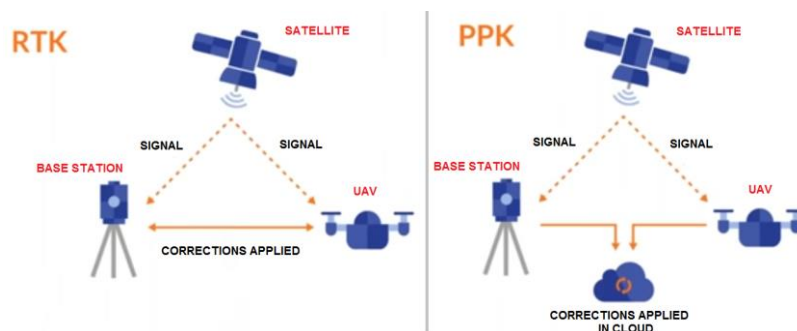


Yhdestä lennätyspaikasta saadaan n. 20–100 hehtaarin ilmakekuvaus, riippuen UAS:n laadusta. Suuremmat alueet vaativat useamman lennätysten, jolloin kuvaolosuhteet, valaistus tai pilvisuus voivat vaihdella otettujen kuvien välillä. Tämä saattaa vaikuttaa tulosten laatua heikentävällä tavalla, kun eri sääolosuhteissa otetut kuvat yhdistetään mosaiikiksi. [6]

### 3 Post-Processed Kinematic

PPK-mittauksessa (Post-Processed Kinematic) UA-laitteen paikannusjärjestelmä koostuu satelliittipaikannuksesta, (GNSS) sekä inertiamittausjärjestelmästä (IMU). Satelliittipaikannuksessa käytetään satelliiteista saatavia signaaleja paikan, ajan ja nopeuden määrittämiseen. UA-laitteessa oleva IMU-järjestelmä tallentaa tietoa UA-laitteen kiertokulmista (Yaw, Pitch, Roll) ja kiihtyvyydestä. IMU-järjestelmä määrittää UA-laitteen kallistuskulmat, eli kuvan asennot. GNSS-järjestelmä määrittää kuvien sijainnit. Näiden kahden järjestelmän havaitsemia tietoja hyödynnetään jälkilaskennassa.

Kuvasta 10 havaitaan RTK- ja PPK-menetelmien eroavaisuus ilmakuvauksen aikana. PPK-mittauksessa ei tarvita reaaliaikaista yhteyttä UA-laitteen ja maatuokiaseman välille, sillä lennonaikaiset korjausdatat tallentuvat pilvipalveluun, josta niitä hyödynnetään myöhemmin sijainnin määrittämiseen jälkilaskennassa. RTK-mittaus (Real-Time Kinematic) puolestaan tarvitsee yhteyden, jotta voidaan suorittaa reaaliaikainen sijainnin määrittäminen.



Kuva 10. RTK- ja PPK-menetelmien toimintamallit [26].

PPK-mittauksessa UA-laitteeseen asennetaan ennen lennätystä PPK-moduuli, joka tallentaa omalle muistille lennon aikaisia havaintoja satelliittien ja UA-kopterin väliltä. Kuvassa 11 on havainnollistettu GeoDrone X4L -kopterin PPK-moduuli, joka kiinnitetään kopteriin ennen lentoa lähtöä.



Kuva 11. PPK-moduuli [19].

Kuvan 11 mukainen PPK-moduuli hyödyntää GNSS/IMU-järjestelmää, jota käytettiin tässä työssä. PPK-moduuli asennetaan UA-laitteeseen ennen lennätystoiminnan suorittamista. [19]

Puhelinhaastattelussa Mäenpää [28] kertoi PPK-option maksavan GeoDrone X4L -tyypiseen UA-kopteriin n. 6 500 euroa ja hinta sisältää PPK-moduulin ja jälkikäsitteilyyn tarkoitetut ohjelmistot. Lisäksi PPK-option kustannuksiin kuuluu Trimnetin VRS-maatukiasemapaalveluiden käyttömaksut, mikäli ei käytetä operaattorin omia fyysisiä maatukiasemia. [35]

### 3.1 Toimintaperiaate

PPK-laskenta tarkoittaa tapaa yrittää ratkaista täysien vaihesyklien määrän satelliitin ja vastaanottimen väliltä, eli pyritään ratkaisemaan alkutuntemattonta. Tukiaseman ollessa tunnetussa sijainnissa voidaan tietoa käyttää tunnistamaan ympäristön aiheuttamat paikannusvirheet, joilla korjataan UA-laitteen paikannusta. Korjaus kaventaa aluetta, jossa UA-laitteen mahdollinen sijainti on. Pienempi alue nopeuttaa alkutuntemattomien ratkaisua, sillä mahdollisia UA-laitteen sijainteja on vähemmän. Kun alkutuntemattomat on

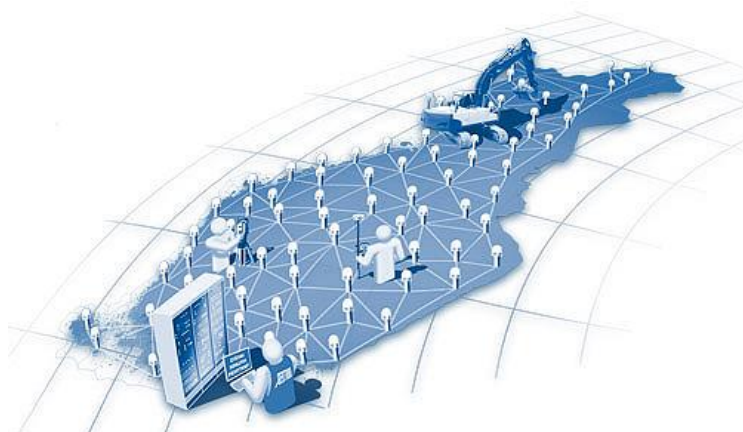
ratkaistu, lasketaan UA-laitteen kolmiulotteinen sijainti käyttäen kantoaallon vaihemittausta sekä ratatietoa useasta eri satelliitista. [19]

### 3.2 Maatukiasema

PPK-moduulin käyttö edellyttää RINEX-muodossa tallentavan tukiaseman alle kymmenen kilometrin säteen sisäpuolelle lentopaikasta. Ilman tukiasemaa PPK-laskenta ei ole mahdollista. Fyysinen maatukiasema voi olla esimerkiksi GNSS-vastaanotin, joka pystytetään kolmijalkaisen tuen päälle. Virtuaalisessa maatukiaseman käytössä ei tarvita fyysistä maatukiasemaa. [19]

Geotrimin ylläpitämä Trimnet VRS (Virtual Reference Station) on koko Suomen kattava GNSS-tukiasemaverkko, jonka laskentakeskus sijaitsee Vantaalla. Kuvassa 12 havainnollistetaan Trimnetin maatukiasemat, joita on yli 100 kappaletta. Maatukiasemat vastaanottavat GNSS-satelliittisignaaleja, jotka laskentakeskus mallintaa ja korjaa. Tämän jälkeen laskentakeskus luo mittaajan läheisyyteen virtuaalitukiaseman, jonka avulla mitauksia voidaan suorittaa jopa muutaman senttimetrin tarkkuudella. [31]

Virtuaalista tukiasemaa voidaan hyödyntää reaaliaikaisiin ja jälkilaskentaan perustuviin mittaussovelluksiin läpi vuorokauden. Reaaliaikaisen virtuaalisen tukiasemaverkon käytössä saadaan korjausdata välittömästi operaation aikana, kun puolestaan jälkilaskennallisessa operaatiossa korjausdata ladataan jälkikäteen Trimnetin tietokannasta. Trimnet tarjoaa asiakkailleen virtuaalisen tukiasemaverkon tarkkuuden 1 metristä aina 1 millimetriin, riippuen käytettävän laitteiston ja palvelumuodon laadullisuudesta. Virtuaalisen tukiasemaverkon käyttäminen vaatii erillisen palvelusopimuksen Geotrimin kanssa. [31]

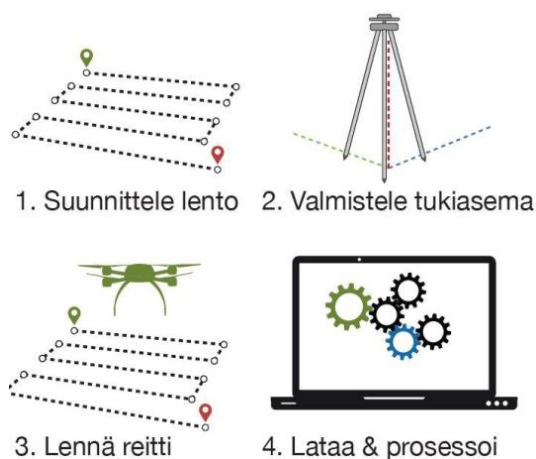


Kuva 12. Trimnet-verkko [31].

### 3.3 PPK-prosessina

Työ aloitetaan luomalla projektille lentoreitti, joka ladataan UA-kopteriin ennen lennätystä. Tukiasema voidaan rakentaa fyysisesti kuvausalueelle, kuitenkin enintään 10 kilometrin säteelle kuvattavalta alueelta. Tässä työssä käytettiin virtuaalista tukiasemaa, joka nopeutti prosessin kulkua.

Seuraavaksi kiinnitetään PPK-moduuli UA-kopteriin ja suoritetaan normaali kuvauslento operoitavalla alueella. Lennätyksen jälkeen ladataan jälkilaskentaa tarvittavat havaintotiedostot RINEX-muodossa PPK-moduulista ja virtuaalisen tukiaseman palvelimesta. Tiedostot lisätään jälkilaskenta ohjelmistoon, jossa ne voidaan prosessoida. Kuvassa 13 on nähtävissä PPK-prosessin neljä vaihetta.



Kuva 13. PPK-prosessointi tiivistettynä [28].

### 3.4 PPK-mittauksen hyötypuolet

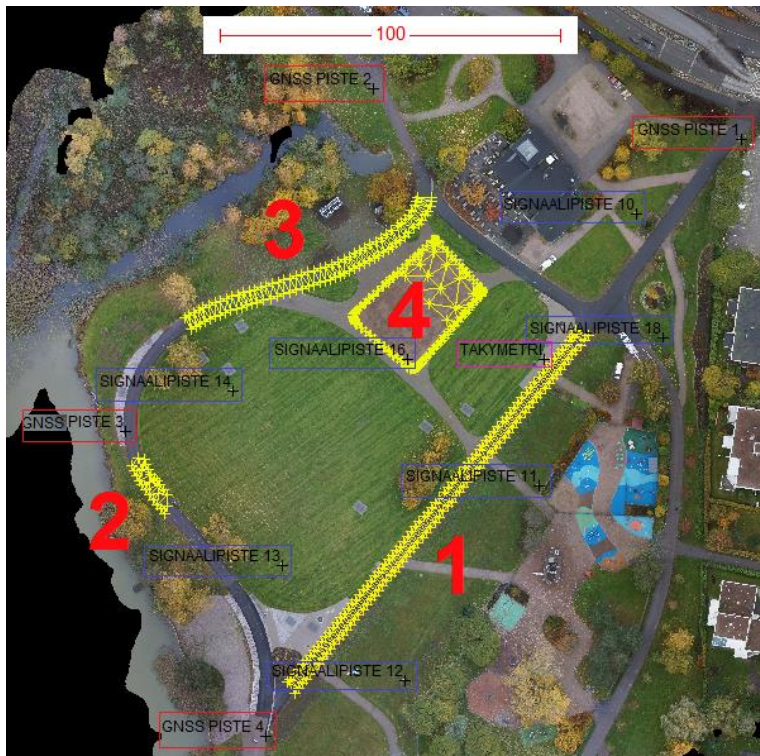
Laadukkailla PPK GNSS/IMU -järjestelmillä saadaan UA-laitteen sijaintitiedot muutamien senttimetrin tarkkuudella, joka on suoraan verrannollinen sijaintitietojen tarkkuuteen. Hyviä UA-laitteen sijaintitietoja hyödynnetään ulkoisessa orientaatioissa fotogrammetrisessä laskennassa. [24; 25.]

GNSS/IMU-järjestelmien ansiosta signaalipisteiden tarve vähenee huomattavasti verrattuna perinteiseen signaalipisteisiin perustuvaan ilmakuvaukseen, jossa lopullinen mittaus tarkkuus perustuu hyvin pitkälti signaalipisteiden runsauteen kuvausalueella. PPK-mittauksen avulla RPAS-toimijat pystyvät säästämään signaalipisteiden mittaukseen kuluvan ajan erityisesti suurilla kuvausalueilla. Tämä on maastotöiden suurin osio ajassa mitattuna. [24; 25.]

PPK-mittauksessa ei tarvita tietoliikenneyhteyttä korjausdatan lähetykseen UA-kopterin ja maatukiaseman välillä. Tämä on avuksi esimerkiksi kaupunkialueilla, joissa on korkeita rakennuksia ja mahdollisia puita yhteyden esteenä. RTK-menetelmä vaatii reaaliaikaisen yhteyden korjausdatan lähettämiseksi, ja hankalissa olosuhteissa se tuottaa epäluotettavaa dataa. [24; 25.]

## 4 Maastotyöt Järvenpäässä

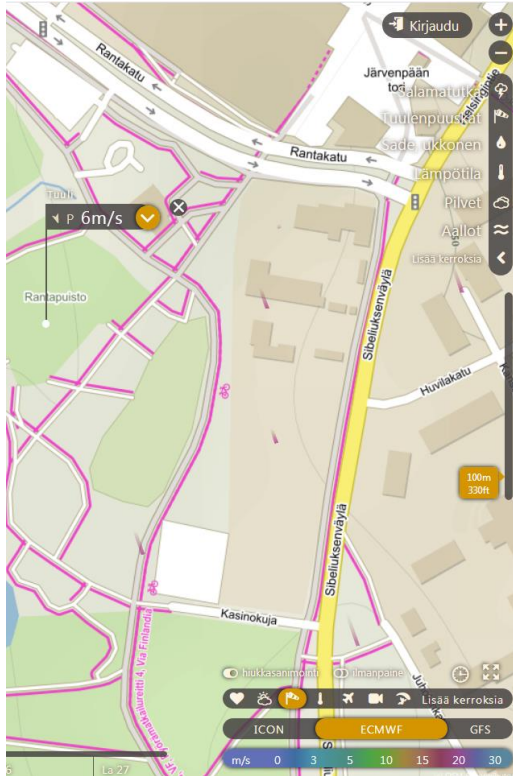
Tutkimus suoritettiin Järvenpään keskusta-alueen läheisyydessä sijaitsevalla puistoalueella. Maastotyöt kokonaisuudessaan suoritettiin 10.10.2018. Sääolosuhteet olivat lennätystoiminnan kannalta kelvolliset. Lämpötila oli n. 10 astetta, tuulivoimakkuus 100 metrin korkeudelta maasta n. 6 m/s ja puolipilvinen sää. Maastotyöt kestivät yhteensä 3 tuntia, jonka aikana mitattiin lähtöpisteet (4 kpl), signaalipisteet (7 kpl), takymetri referenssit ja suoritettiin ilmakuvauus. Kuvassa 14 mitatut kohteet ovat nähtävillä. Työn kesto ei ole suoraan verrannollinen työtehokkuuteen, sillä 3 mittaustunnin aikana takymetrillä mitattiin paljon tämän tutkimuksen kannalta tarpeettomia kohteita ja UA-laitteella ilmakuvattiin dataa monelta eri korkeudelta ja kahdella eri kameralla.



Kuva 14. Kuvakaappaus 3D-Win-ohjelmistosta, josta havaitaan alueiden ja pisteiden sijainnit.



Työssä käytettiin sääolosuhteiden selvittämisessä kuvan 15 esitettyä Windy-sovellusta, joka ilmoittaa käyttäjälleen mm. tuulen nopeuksia, puuskatuulien nopeuksia, tuulen suuntauksia, pilvisyytilanteen ja ilmanpaineen. Sovelluksessa voidaan lisäksi määrittää korkeustaso maanpinnasta jopa 13 kilometrin korkeuteen, josta ilmoitetut havainnot ovat nähtävillä.



Kuva 15. Kuvankaappaus Windy-sovelluksesta, joka ilmoittaa tuulennopeuden mittauskohteessa 100 metrin korkeudelta.

Tämän tutkimuksen tarkoitus oli selvittää kahdella eri menetelmällä (PPK ja GCP) fotogrammetrisesti määritettyjen pistepilvien tarkkuutta korkeuden ja vaakatakkkuuden osalta. Vertailukohtina toimivat Järvenpään puistoalueella sijaitsevat kovapintaisten kevyen liikenteen väylät ja hiekkakenttä. Kovilla pinnoilla tarkoitetaan tämän työn yhteydessä kevyen liikenteen väylän alueita. Tämän työn tulevissa osioissa käytetään kartoituskohteiden numerointia tuloksien yksilöimisen helpottamiseksi.

Alueella oli paljon lyhytkasvuisia nurmikkoalueita, jotka eivät sovellu tarkkaan fotogrammetriseen ilmakuvaukseen. Fotogrammetrian avulla lyhytkasvuisesta maastosta ei

saada tarkkoja havaintoja maanpinnasta, sillä laskettavat pisteet muodostuvat epätasaisesti. Lyhytkasvustoiseen maastoon sopivat erilaiset mittausmenetelmät esimerkiksi laserkeilain, jonka pulssimittauksella pystytään mittaama

Kuva 14 muodostettiin fotogrammetrisen PPK-jälkikäsittelyn jälkeen ulos kirjoitetusta ortokuvasta, joka vietiin TIFF-muodossa 3D-Win-ohjelmistoon. Orto-oikaistun kuvan päällä on esitetty takymetrin referenssimittaukset.

Takymetrillä suoritettuja referenssimittauksia pidetään tässä työssä vertailun 0-tasona, sillä se on suhteellisessa tarkkuudessa paras tämän tutkimuksen menetelmistä. Ilmakuvausmenetelmiä olivat PPK- ja GCP-mittaukset, joista jälkiprosessoinnista saatavia pistepilviaineistoja verrattiin takymetrimittauksesta saataviin referenssimittauksiin korkeuden ja vaakatarkkisuuden osalta.

GeoDrone X4L -UA-kopteriin asennettiin PPK-moduuli, joka mahdollisti PPK-mittaukseen tarvittavan tiedonkeruun. Tämän ansiosta molemmat ilmakuvausmenetelmät suoritettiin yhdellä lennätyksellä 75 metrin korkeudella maanpinnasta ja UA-kopterissa oli Sony A6000 -kamera kiinnitettynä. PPK- ja GCP-mittausmenetelmät käyttivät jälkiprosessoinnissa samoja ilmakuvia, mutta jälkilaskennan menetelmät erosivat toisistaan. Tämän avulla pystyttiin vertailemaan kahden eri ilmakuvausmenetelmän tarkkuuksia uskottavasti, sillä jälkiprosessoitavat ilmakuvat olivat identtiset molemmissa menetelmissä.

## 4.1 Esivalmistelut

### 4.1.1 Lähtöpisteet

Alueelle mitattiin Trimble R10-GNSS-vastaanottimella virtuaalisella GNSS-mittauksella 4 lähtöpistettä, jotka sijoitettiin kuvausalueelle tasaisesti. Lähtöpisteet mitattiin kiintopistemittauksena siten, että jokaisella pisteellä kerättiin GNSS-havaintoja kolme minuuttia, yhteensä 180 havaintoa/piste. Jokaisessa mittauksessa käytettiin statiivia, jotta GNSS-vastaanotin pysyy tukevasti paikallaan mittauksen ajan. Kuvassa 16 ovat nähtävillä GNSS-mittattujen lähtöpisteiden virhearviot. Lähtöpisteet mitattiin ETRS-GK25-koordinaattijärjestelmällä, ja korkeuden geodimallina oli FIN2005N00, joka muuntaa korkeuden N2000-korkeusjärjestelmään. [32]

Piste	1	Hz-tarkkuus	0.006	Vt tarkkuus	0.012
Piste	2	Hz-tarkkuus	0.008	Vt tarkkuus	0.016
Piste	3	Hz-tarkkuus	0.004	Vt tarkkuus	0.007
Piste	4	Hz-tarkkuus	0.006	Vt tarkkuus	0.011

Kuva 16. Mittausraportista saadut lähtöpisteiden mittaustarkkuudet GNSS-mittauksessa.

Maastomittauksissa käytettiin Trimble S5-takymetria, joka orientoitiin neljän GNSS-mittauksen lähtöpisteistä. Näin varmistuttiin, että lähtöpisteiden keskinäinen suhteellinen tarkkuus on mahdollisimman tarkka. Trimble S5-takymetrin kulman mittaus tarkkuudeksi on ilmoitettu 0.15 mgon (mitattaessa pysty- ja vaakakehällä) ja etäisyyden mittauksen tarkkuudeksi 2 mm + 2 ppm (mitattaessa Standardi-mittauksella). [33]

Takymetrin orientointi suoritettiin heti lähtöpisteiden GNSS-mittauksen jälkeen siten, että prisma-auva tuettiin statiivilla jokaisella neljällä mitatulla pisteellä. Kulma- ja etäisyyshavainnot mitattiin Standardi-mittauksella (STD) keskiarvoistetulla havaintomenetelmällä siten, että mittausaika oli 20 sekuntia/piste. Havainnot syntyivät n. 10 kappaletta/piste, joista takymetri laski keskiarvoitetun tuloksen. Kuvassa 17 nähdään orientoinnin tulokset.

Vapaa-asemapiste	10102018	P keskivirhe	0.002	I keskivirhe	0.002	Kork. keskivirhe	0.003
Asemapisteen residuaalit							
Piste	4	dP	0.003	dI	0.001	dKork	0.000
		dVk	0°00'04"	dPk	0°00'00"	dVinoEt	0.002
Piste	3	dP	0.000	dI	0.002	dKork	0.003
		dVk	0°00'00"	dPk	0°00'04"	dVinoEt	0.002
Piste	2	dP	0.006	dI	0.001	dKork	0.007
		dVk	0°00'06"	dPk	0°00'15"	dVinoEt	0.006
Piste	1	dP	0.005	dI	0.003	dKork	0.008
		dVk	0°00'04"	dPk	0°00'19"	dVinoEt	0.006
Koje							
Kojeen tyyppi	TrimbleVXandSSeries						
EDM Refractive Index	273.6						
EDM kantoaallon pituus	79.2						
Vaakasuunnan asetus	Asetettu suuntakulmaksi						
Vaakakulman tarkkuus	0°00'05"						
Pystykulman tarkkuus	0°00'05"						
Etäisyysmittarin tarkkuus	2mm + 2ppm						

Kuva 17. Takymetri orientoinnin tulos, kun mitattiin 4 GNSS-lähtöpistettä. Kuvankaappaus mittausraportista.

#### 4.1.2 Signalointi

Signaalipisteet ovat ilmakuvattavalle alueelle sijoitettavia tukipisteitä, joiden avulla voidaan georeferoida ilmakuvauksesta saatava aineisto haluttuun koordinaatistoon. Signaalointipisteitä tulisi tehdä kuvausalueelle tasaisesti. Signaalipisteiden määrää tulisi tihentää alueilla, joissa on paljon korkeusvaihteluita. [11]

Järvenpään kuvausalueelle sijoitettiin kuvan 18 näköisiä signaalipisteitä 7 kappaletta. Signaalipisteet mitattiin takymetrimittauksella samalla menetelmällä kuin takymetrin orientointi, eli keskiarvoistetuilla havainnoilla. Signaalipisteet voidaan myös mitata GNSS-mittauksella, mutta tässä työssä haluttiin varmistua referenssipisteiden sisäisestä tarkkuudesta.



Kuva 18. Aeropoints-signaalipiste.

#### 4.1.3 Lennätyksen esivalmistelu

Ennen lennätyspaikalle lähtöä tarkastimme ladattujen LiPo-akkujen virranvaraustilan-teen, jotta vältetään yllättäviltä ongelmilta lentosuorituksen aikana. Ennen lennätyspai-kalle lähtöä tarkastettiin, että autoon pakattu laitteisto ja työhön tarvittavat välineet olivat mukana.

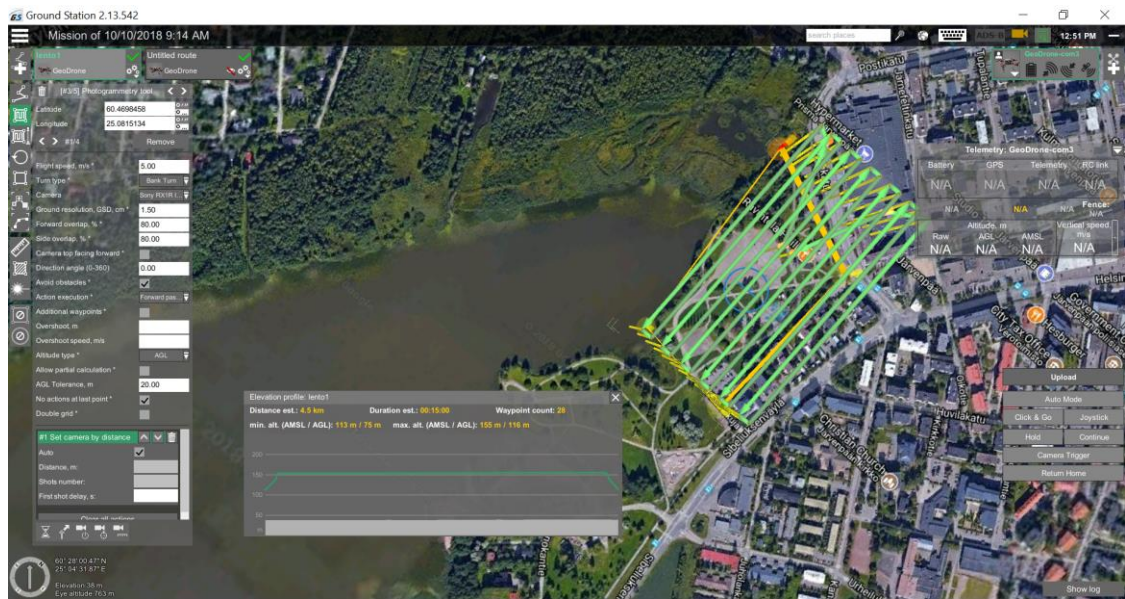
Lennätyspaikalla varmistettiin alueen olevan turvallinen ja esteetön lennätystoiminnalle. Keliolosuhteet oli varmistettu hyviksi jo edeltävinä päivinä, joskaan aina ei voi olla varma ennusteiden pitävyydestä. Miehittämättömälle ilmakuvaukselle oleellista ovat mahdolli-simman hyvät sääolosuhteet. Liian kovassa tuulessa ei operaatiota pystytä suoritta-maan, sillä mittaustuloksien tarkkuus laskee UA-laitteen heilumisen takia. Tässä työssä käytetyn GeoDrone X4L -kopterin manuaalissa annetaan tuulirajaksi 8 m/s ja puuskissa 12 m/s. UA-laitteiden kamerat eivät kestä vesisadetta, ja kameras linssit eivät saa kas-tua, jos halutaan hyvälaatuista ilmakuvaa. [6; 7.]

Esivalmisteluihin kuuluu olennaisesti lentoreitin suunnittelu. Lentoreitti voidaan suunni-tella jo ennen lennätyspaikalle saapumista karttapohjaisilla sovelluksilla. Lentoreitin lo-pullinen varmentaminen suoritetaan lennätyspaikalla, jossa voidaan reagoida mahdolli-siin esteisiin esimerkiksi korkeiden rakennuksien tai savupiippujen törmäysriksin pien-en-tämiseksi. UA-laitteen lentoonlähtö paikka tulisi valita siten, että lennättäjän näköyhteys ilma-alukseen säilyy koko lennätyksen ajan.

Lentosovelluksena käytettiin Videodronen Ground Station -lentosovellusta, joka on yh-teensopiva operaatiossa toimivan Geodrone X4L -tyyppisen UA-kopterin kanssa. Lento-suunnitelma tehtiin paikan päällä, jotta pystyttiin valitsemaan turvallinen lennätysreitti. Sovelluksen pohjakartan avulla merkattiin kuvattavan alueen rajat ja ns. reittipisteet, joilla tarkoitetaan UA-kopterin kulkemaa reittiä kuvattavalle alueelle ja sieltä takaisin las-keutumisaikkaan. [21]



Lentosovelluksessa määritettiin lentoa koskevat tiedot, kuvassa 19 on nähtävillä tämän työn lennätystä koskevat asetukset. Näitä tietoja olivat lennätyskorkeus (75 metriä), pituus- ja sivupeitot (80 %) ja käytössä oleva kamera (Sony A6000). Annettujen arvojen mukaisesti digitaalisen kuvan pikselikooksi (GSD, Ground Sample Distance) muodostui 1.5 cm. Kuten Partonen opinnäytetyössään [23] toteaa, on kuvasta havaittavien ja tulkittavien kohteiden koko todellisuudessa oltava suurempi kuin edellä mainittu GSD-arvo. Sovellus määrittä annettujen arvojen perusteella lentonopeudeksi 5 m/s ja lentoajaksi 15 minuuttia. [11; 23.]



Kuva 19. Kuvankaappaus lentoreitin suunnitteluun Ground Station -sovelluksesta.

UA-laitteen lentoonlähtöpaikaksi soveltuu parhaiten avoin paikka, jossa ei olisi taivasta peittäviä esteitä. Suosituksen mukaan esteet kuten puut ja rakennukset eivät saisi sijaita korkeammalla kuin 30 asteen kulmassa horisonttiin nähden, jotta laitteiston yhteydet ja signaalien vahvuus olisivat mahdollisimman hyvälaatuiset. [19]

Valitsimme lentoonlähtöpaikaksi kuvausalueen keskikohdalla sijaitsevan tasaisen hiekka-alueen. Ennen lennätystä tarkastettiin kopterin ja ohjainyksikön välisen yhteyden toimivuus, jotta telemetriatiedot näkyvät lennätysten ajan. Lisäksi asennettiin UA-kopteriin PPK-moduuli, joka ilmoitti toimintavalmiudesta vilkuttamalla ledivaloa hi-

taasti vihreänä ja valkoisena, mitä pidetään merkinä sijaintitiedon tallennuksen alkamisesta. Sijaintitiedon tallentamisen alettua pidetään UA-kopteri hetken paikallaan, jotta varmistutaan signaaliyhteyksien toimivuudesta.

Ennen lento-ohjelmistoa tarkastettiin kuvan 20 mukaiset asiakohdat, jotta varmistettiin lennätysten turvallisuudesta ja laadukkuudesta. Noudatimme lennätyskäsikirjassa VideoDrone Finland Oy:n julkaisemaa käyttöohjetta. [19]

#### Checklist ennen lentoa

1. Varmista lentopaikan luvallisuus, esteettömyys ja turvallisuus.
2. Varmista keliolosuhteiden soveltuvuus lentämiselle. Myös jäätävä keli huomioitu?
3. Varmista "GPS-keli".
4. Tarkista lähetin jännite.
5. Tarkista ajoakun jännite tasausliittimestä. Maksimi jännite on 25,2 V.
6. Tarkista akkuliittimien kunto.
7. Tarkista potkureiden, moottoreiden ja hyötykuorman kiinnitys.
8. Varmista kompassin toiminta.
9. Tarkista kameran kiinnitys.
10. Tarkista onko kamerassa muistikortti ja muistikortilla riittävästi tilaa?
11. Loggerin muistikortti asennettu?
12. *RTH* -kytkin etuasennossa.
13. *F.MOD* -kytkin halutussa lentotilassa.
14. *TILT* -slider yläasennossa (optio).
15. *ZOOM* -slider keskiasennossa (optio).
16. *Video* -kytkin yläasennossa (optio).
17. Kytke lähetin päälle.
18. Varmista, että kopteri on tasaisella alustalla ja suorassa.
19. Kytke ajoakku kopteriin.
20. Anna kopterin olla paikoillaan liikkumatta, kunnes kopterin ja gimbaalin alustus on valmis.
21. Varmista, että radion näytöllä telemetria päivittyy.
22. Varmista, että kamera on päällä.
23. Varmista kameran toiminta ottamalla testikuva *SHUT* -kytkimellä.
24. Odota kunnes kopteri on saanut yhteyden vähintään seitsemään satelliittiin.
25. Jos aiot lentää ennalta suunnitellun reitin, niin varmista vielä kerran reitin laskennan tulokset, kuten ne on ohjeistettu Ground Stationin käyttöohjeissa.

Kuva 20. Tarkastuslista ennen lennätystä [7].

## 4.2 Lennätys

Alkuvalmisteluiden jälkeen UA-kopteri nostettiin manuaalisella ohjauksella 75 metrin korkeudelle vertikaalisesti lento-ohjelmistopaikasta katsottuna, joka riitti olemaan selvästi alueella olevien puiden ja rakennuksien yläpuolella, jotka jäivät arviolta n. 15 metrin korkeuteen maanpinnasta.

Tämän jälkeen ohjainyksiköllä lähetettiin UA-kopterille autopilotointi komento, jonka jälkeen UA-kopteri ryhtyi operoimaan ilmakehässä lentosuunnitelmassa määritetyn nopeuden 5 m/s mukaisesti. Operoinnin aikana tarkkailtiin UA-laitteen etenemistä ja telemetriatietoja ohjainyksikön näytöstä ja siihen USB-liitännällä kiinni olleesta tabletista.

Ympäriällä olevaa ilmatilaa tarkkailtiin myös siinä määrin, että oli valmius mahdolliseen väistötoimenpiteeseen, mikäli toinen ilma-alus olisi lähestynyt kuvausalueetta.

Kartoituslennätys onnistui hyvin, eikä telemetrian mukaan siinä ollut virheitä. UA-kopteri komennettiin autopilotin avustuksella palaamaan lentoonlähtöpaikan yläpuolelle 75 metrin korkeutta noudattaen, minkä jälkeen UA-kopteri laskettiin manuaalisesti takaisin maanpinnalle. Laskeutuminen tulee tehdä manuaalisella suorituksella, sillä autopilottiin vaadittavien GPS-signaalien tarkkuus saattaa heiketä lähellä maata esteiden takia. [7]

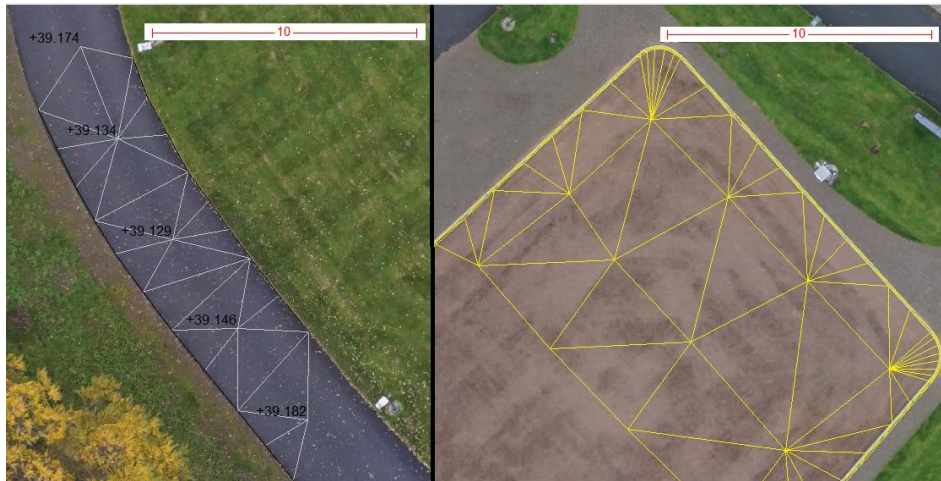
#### 4.3 Takymetrilla referenssimittaukset

Keveän liikenteen väylän kaikki kolme kartoituskohdetta (1–3) kartoitettiin takymetrimittauksella siten, että väylän molemmat reunat mitattiin n. 3 metrin välein tai tiheämpään ja lisäksi väylän keskeltä otettiin hajapisteitä.

Kartoituskohde numero 3 oli kovapintainen hiekkakenttä, joka mitattiin n. 5 metrin välein hajapisteinä. Kenttää ympäröi reunakivi, jonka yläpinta oli hiekkakenttään asennettuna niin, että kynnystä ei ollut. Reunakivi mitattiin viivana molemmista reunoista ja pyöreiden kulmien kohdalla tiheämmin, jotta reunakiven pyöreys saatiin tarkasteltavaksi myöhemmän laskentavaiheeseen.



Kuvassa 21 havainnollistetaan 3D-Win-sovelluksessa laskettua kolmiointia takymetrimittauksista saaduilla tuloksilla, jossa taustalla on PPK-mittauksesta jälkilaskettu ortokuva. Kuvan 21 vasemmalla puolella on kevyen väylän kartoituskohde numero 2, jossa näkyy hajapisteiden korkeustiedot ja oikealla puolella kohde numero 4, joka on hiekkakentän osio.

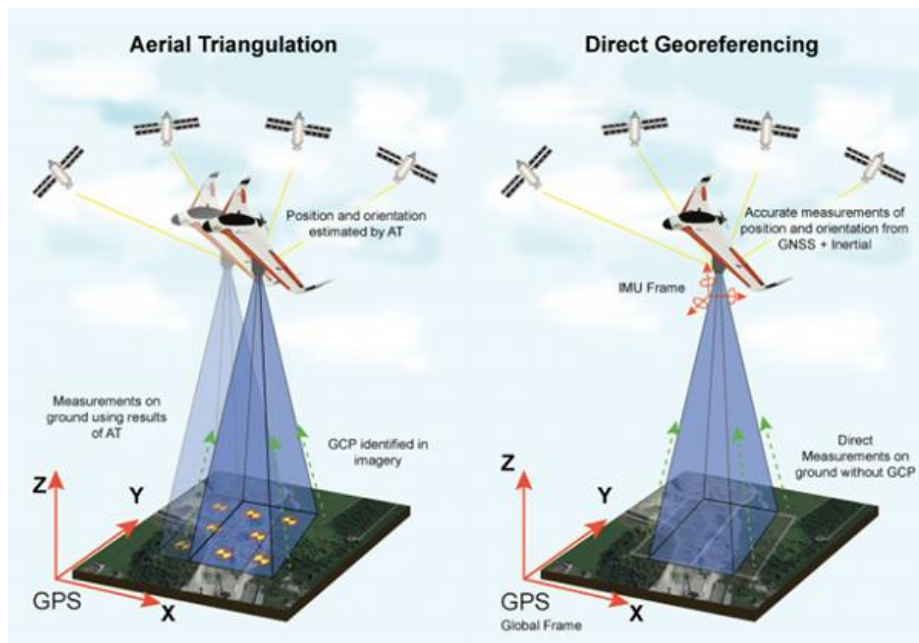


Kuva 21. Kuvankaappaus 3D-Win-sovelluksesta, jossa on kolmioidut takymetrimittauksen referenssiaineistot ortokuvan päällä.

Kartoitusmittauksessa käytettiin Trimble AT360 -aktiiviprismaa, jonka kohdistustarkkuus prismaan mitattaessa on 2 millimetriä 200 metrin etäisyydellä. Prismän mittauskantama on 500 metriä takymetrin sijainnista laskettuna. [37]

#### 4.4 GCP-menetelmä ilmakuvauksessa

GCP-ilmakuvausmenetelmä perustuu signaalipisteiden mittaamiseen ja UA-laitteen tallentamiin GPS-havaintoihin, joiden avulla ilmakolmioinnilla ratkaistaan sijaintitietoja. GCP-menetelmän UA-kopterin sijainnin määrittäminen lennätysreitillä perustuu GPS-satelliittisignaaleista saatavaan tietoon, mutta GCP-menetelmässä ei käytetä korjausdataa lähettävää maastukiasemaa, kuten PPK-menetelmässä. [34] Kuvassa 22 on hahmotettu GCP- ja PPK-menetelmien eroavaisuuksia.



Kuva 22. GCP- ja PPK-toimintamallien eroavaisuuksia [34].

GCP-menetelmässä mittauksen tarkkuus perustuu signaalipisteiden sijoitteluun, niiden määrään ja laadukkaaseen mittaamiseen. Signaalipisteet osoitetaan myöhemmin jälki-prosessoinnissa ilmakuvista, jonka avulla aineisto georeferoidaan. Isot alueet ovat GCP-menetelmällä työläitä, sillä alueelle joudutaan mittaamaan paljon signaalipisteitä. Tässä mielessä PPK- ja RTK-menetelmät ovat kustannustehokkaampia tapoja operoida. [34]

## 5 Jälkilaskenta

PPK-laskennassa UA-laitteen ja käytetyn maatukiaseman (fyysinen tai virtuaalinen) GNSS/IMU-havainnot jälkikäsitellään erikoisohjelmistoilla. Tämä on tarpeen, sillä mitauksessa ei käytetä reaaliaikaista korjausdataa. PPK-laskennassa ratkaistaan UA-laitteen ja maatukiaseman korjausdatan avulla kameran sijainti- ja asentotiedot kuvanottohetkellä, jotka voidaan geotagauksen avulla viedä jatkokäsittelyyn fotogrammetriaan erikoistuneisiin ohjelmistoihin. Geotagauksella tarkoitetaan paikkatiedon lisäämistä esimerkiksi valokuvalle.

Tässä työssä käytettiin jälkikäsitelyssä AfterFlight 2.0 -sovellusta, joka sisälsi tarvittavat lisäosat (RTKPOST ja RTKPLOT), joilla jälkilaskenta suoritettiin.

Jälkilaskennan jälkeen kuvat olivat valmiita fotogrammetriseen prosessointiin, joka suoritettiin tässä työssä Agisoft PhotoScan -ohjelmistolla. GCP-ilmakuvausmenetelmässä jälkiprosessointi suoritettiin kokonaisuudessaan Agisoft-ohjelmistolla. Työvaiheet olivat hyvin samantapaiset, vain muutamia asetuksien kohtia valittiin toisin. Tässä osiossa pääpaino on PPK-mittauksen jälkiprosessoinnin käsittelyssä, jota avataan GCP-mittausta laajemmin.

### 5.1 PPK-laskenta

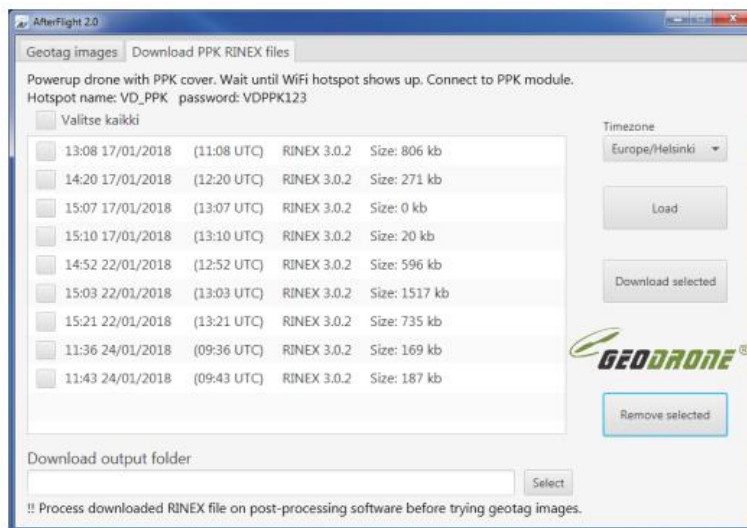
PPK-laskenta suoritettiin Geotrim Oy:n toimistotiloissa Vantaalla yhdessä Joni Salon kanssa. PPK-aineiston jälkilaskentaan kului aikaa noin tunnin verran. Kävimme jälkilaskennan lävitse perusteellisesti, joten todellinen prosessointiaika tämän työn PPK-mittauksien osalta olisi arviolta noin 20 minuuttia.

PPK-jälkilaskenta suoritettiin siihen soveltuvilla erikoisohjelmistoilla, jotka esitellään tulevassa luvussa. PPK-jälkilaskennan periaate on selvittää tarkat kameran kuvanottopaikat lennon ajalta sekä ilma-aluksen kiertymiskulmat. Näiden tietojen avulla voidaan suorittaa jälkiprosessointi vaihde Agisoft PhotoScan -ohjelmistossa.

### 5.1.1 Tiedostojen lataus

Laskenta aloitettiin lataamalla Trimnetin verkkopalvelusta virtuaalisen maatukiaseman GNSS-havainnot lennätyksen aikaiselta jaksolta. UA-kopterin GNSS-havainnot ladattiin langattoman yhteyden avulla siten, että yhdistettiin prosessointiin valittu tietokone PPK-moduulin luomaan WiFi-verkkoon. UA-kopterissa täytyy olla virrat päällä ja PPK-moduuli kytkettynä, jotta WiFi-verkkoon saadaan yhteys. [19]

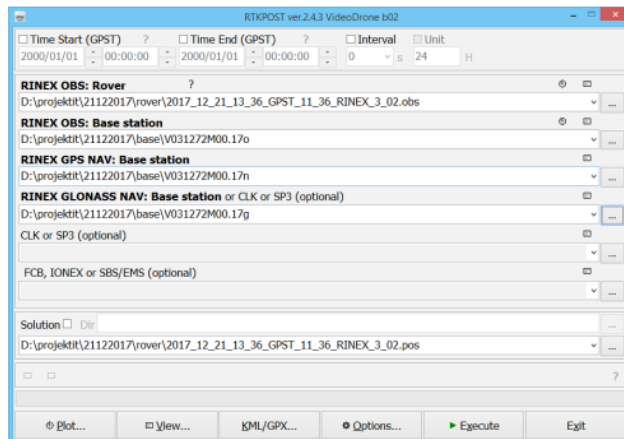
WiFi-yhteyden muodostamisen jälkeen AfterFlight-sovelluksessa valittiin PPK-moduulista kuvan 23 mukaisesta listauksesta Järvenpäässä lennätetyn aikaleimauksen mukainen RINEX-tiedosto (raakadatatiedosto lennätyksestä).



Kuva 23. GeoDrone PPK.

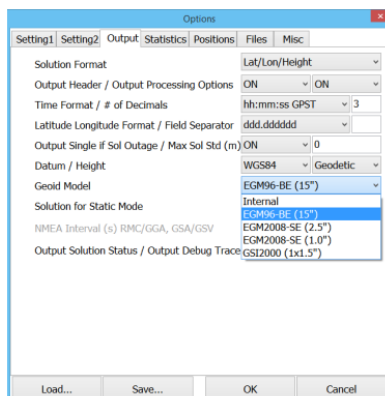
### 5.1.2 Tiedostojen käsittely

UA-kopterin ja virtuaalisen maatukiaseman raakadata tiedostot siirrettiin RTKPOST-ohjelmistossa niille kuuluville sarakkeille. Kuvassa 24 näkyy esimerkki, kuinka havaintotiedot syötetään ohjelmistoon. Ensimmäiselle riville syötettiin UA-kopterista saatava havaintotiedosto ja kolmelle seuraavalle riville Trimnetin palvelimelta ladatut havaintotiedot.



Kuva 24. GeoDrone PPK.

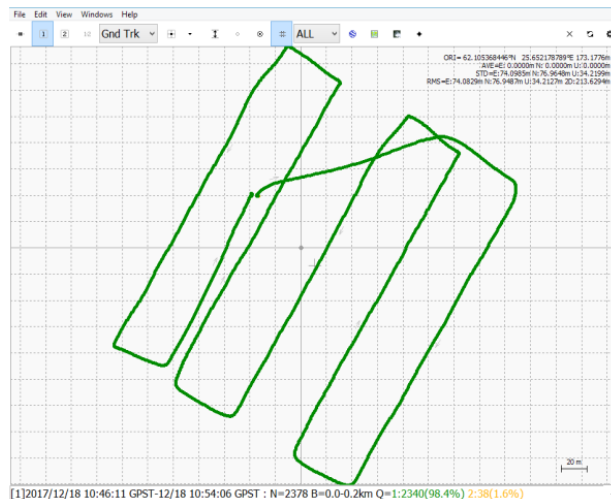
Tämän jälkeen Options-valikosta määrätään haluttu koordinaatti- ja korkeusjärjestelmä. Tässä työssä käytettiin PPK-laskennassa maantieteellisiä WGS84-koordinaatteja ja EGM96-korkeusjärjestelmää, kuten kuvasta 25 voidaan havaita. Aineisto georeferoitiin myöhemmin Agisoft-ohjelmassa jälkiprosessoinnin aikana.



Kuva 25. RTKPOST-sovelluksen Options-valikko [19].

Raakadata tiedostojen ja asetuksien lisäämisen jälkeen AfterFlight-ohjelmistolle annettiin prosessointi käsky kuvan 24 alalaidassa sijaitsevasta Execute-näppäimestä painamalla.

Onnistuneen laskennan jälkeen tarkastettiin jälkilaskennasta saadut sijaintien ratkaisut RTKPLOT-sovelluksessa. Kuvassa 26 havaitaan vihreällä värillä lennätysten reitti, joka ilmoittaa käyttäjälleen sijainnin ratkaisun onnistumisesta.



Kuva 26. RTKPLOT-sovelluksen oikein ratkaistu sijainninmääritys [19].

### 5.1.3 Geotagaus

Geotagaaminen (eng. geotagging) tarkoittaa menettelytapaa, jossa lisätään paikkatietoa esimerkiksi valokuviiin, videoihin ja web-sivuille. Tässä projektissa geotagausta hyödynnetään lisäämällä sijaintitietoja ilmakuvien ominaisuustietoihin.

Onnistuneiden jälkilaskenta vaiheiden jälkeen voidaan suorittaa ilmakuvien geotagaus. Geotagaus suoritettiin AfterFlight-ohjelmistolla, josta löytyy geotagaamiseen oma toiminto. Toiminnolle annettiin alkutietoina jo ratkaistun lennetyn reitin ja jälkilaskennalla lasketut kuvien sijaintitiedot. Toiminnolle syötettiin lisäksi tiedostopolku prosessoitavasta koneesta, jossa sijaitsi yksittäiset ilmakuvat. Tämän jälkeen ohjelmisto prosessoivat geotagausta muutamien minuuttien ajan. Prosessoinnin jälkeen meillä oli käytössä geotag-lokitiedosto, jossa jokaisella ilmakuvalla oli tarkat sijainnit määritelty kuvakohtaisesti. [19]

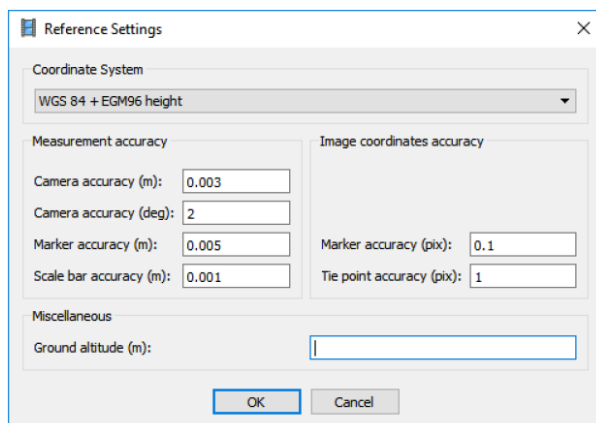
## 5.2 Agisoft Photoscan Professional

Tässä työssä käytettiin fotogrammetriseen laskentaan Agisoft Photoscan Professional -ohjelmistoa, joka perustuu 4-vaiheiseen prosessointiin. Tässä työssä käytetyn ohjelmiston versio oli 1.4.4.

Aluksi muodostettiin kuvausblokki, jonka jälkeen laskettiin tiheä pistepilvi kuvilta. 3d-malli laskettiin tiheän pistepilven ympärille, josta muodostettiin ortokuvamosaiikki ja 3d-mallin teksturointi.

### 5.2.1 Aloitustoimenpiteet

Prosessoinnin ensimmäisenä toimenpiteenä tuotiin kuvat sovellukseen. Kuvissa oli jo valmiiksi jälkilaskennassa geotagatut ominaisuustiedot mukana, joten erillisistä tekstitiedostoa ei tarvittu. Seuraavaksi asetettiin kuvan 27 mukaisesti sovelluksen asetuksista käytettävät järjestelmät, jotka määriteltiin jälkilaskennan aikana (WGS84 ja EGM96).



Kuva 27. Agisoft PhotoScan -sovelluksen asetusikkuna [29].

Kuvan 27 tarkkuusasetukset olivat säädetty ohjeistuksen mukaisesti. Puhelinhaastattelussa Mäenpään [35] mukaan PPK-tekniikka miehittämättömässä ilmailussa on sen verran uusi teknologia, että valmiita PPK-prosessointiohjeistuksia ei ole olemassa. Mäenpään mukaan PPK-prosessointeja on kokeiltu erilaisin arvoin tutkimusmielessä ja kuvan 27 asetetut arvot ovat todettu käyttökelpoisiksi. [35]



Seuraavaksi tuotiin ohjelmistoon jälkilaskennassa lasketut koordinaatit (WGS84 ja EGM96) kameran kuvanottoaikoista csv-muodossa. Kuvassa 28 on esimerkki PPK-jälkilaskennasta saatavista lopputuloksista, jotka toimivat ulkoisena orientaationa fotogrammetrisessä laskennassa. [29]

%	GPST	latitude(deg)	longitude(deg)	height(m)	Q	ns	sdn(m)	sde(m)	sdu(m)	sdne(m)	sdeu(m)	sdun(m)	age(s)	ratio
2018/06/26	07:49:42.850	65.669270528	25.772304333	114.6011	2	6	0.0092	0.0090	0.0190	-0.0025	0.0051	0.0099	-0.01	0.0
2018/06/26	07:50:43.931	65.669156196	25.772591308	114.4579	1	18	0.0040	0.0031	0.0087	0.0008	-0.0005	0.0037	-0.01	6.3
2018/06/26	07:50:45.490	65.669156186	25.772591295	114.4606	1	18	0.0040	0.0031	0.0086	0.0008	-0.0005	0.0037	-0.41	6.5
2018/06/26	07:51:22.431	65.669156223	25.772591255	114.4429	1	18	0.0039	0.0031	0.0086	0.0008	-0.0005	0.0036	-0.41	151.1
2018/06/26	07:52:37.869	65.669156209	25.772591255	114.4352	1	18	0.0040	0.0031	0.0087	0.0008	-0.0005	0.0036	-0.01	262.6
2018/06/26	07:52:57.711	65.669156141	25.772591271	114.4351	1	18	0.0039	0.0031	0.0086	0.0008	-0.0005	0.0036	-0.21	238.0
2018/06/26	07:55:23.870	65.672105578	25.769815909	263.8113	1	18	0.0039	0.0031	0.0087	0.0009	-0.0004	0.0036	-0.01	105.2
2018/06/26	07:55:35.611	65.672199311	25.768334465	263.9834	1	18	0.0039	0.0031	0.0087	0.0009	-0.0004	0.0036	-0.21	122.2
2018/06/26	07:55:39.370	65.672262822	25.767849331	263.3502	1	18	0.0039	0.0031	0.0087	0.0009	-0.0004	0.0036	-0.61	128.1
2018/06/26	07:55:43.052	65.672325594	25.767377300	263.4605	1	18	0.0039	0.0031	0.0087	0.0009	-0.0004	0.0036	-0.81	134.2
2018/06/26	07:55:46.850	65.672389318	25.766896255	263.1716	1	18	0.0039	0.0031	0.0087	0.0009	-0.0004	0.0036	-0.01	139.9
2018/06/26	07:55:50.611	65.672452538	25.766424939	262.9185	1	18	0.0039	0.0031	0.0087	0.0009	-0.0004	0.0036	-0.21	145.5
2018/06/26	07:55:54.470	65.672516234	25.765944802	262.9002	1	18	0.0039	0.0031	0.0087	0.0009	-0.0004	0.0036	-0.41	151.5
2018/06/26	07:55:58.251	65.672578454	25.765476227	262.5769	1	18	0.0039	0.0031	0.0087	0.0009	-0.0004	0.0036	-0.61	156.9
2018/06/26	07:56:02.130	65.672642620	25.764997258	262.5674	1	18	0.0039	0.0031	0.0087	0.0009	-0.0004	0.0036	-0.81	161.9

Kuva 28. PPK-laskennasta saatava lopputulos [28].

Lähtötietojen syötön jälkeen muodostettiin kuvablokki, joka on usean kuvan muodostama kokonaisuus, jossa kuvien keskinäinen asemointi tunnetaan. Kuvablokki muodostetaan havaitsemalla kuvien välisiä vastinpisteitä. Agisoft-sovelluksessa toiminto on nimellä Align Photos, josta valittiin laskentatarkkuuden asetukseksi High ja kuvaparin muodostamisen asetukseksi Reference.

Kuvaparin muodostamisen asetuksena on kaksi eri vaihtoehtoa, jossa toisessa tapauksessa asetukset on tilanteeseen, missä ei tunneta kameran kuvanottoaikojen sijainteja tarkasti. Tällainen tilanne on esimerkiksi GCP-mittaukseen perustuva ilmakuvauksen menetelmä, jossa autopilotin GPS:sta saadaan likimääräiset kuvien sijaintitiedot. Tässä työssä tunnettiin kameran kuvanottoaikojen sijainti tarkasti PPK-laskennan jälkeen, joten käytettiin Reference-asetusta. [30, s. 20.]

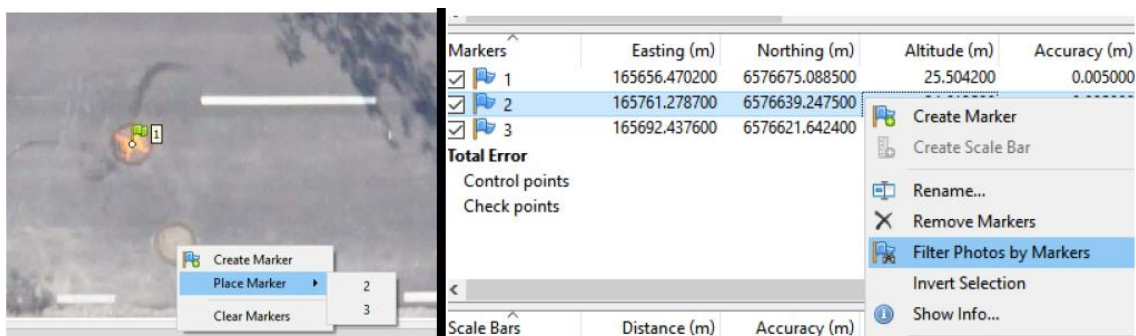
### 5.2.2 Signaalipisteet prosessoinnissa

Perinteisessä fotogrammetrisessä RPAS-projektissa käytetään yleensä signaalipisteitä (GCP, Ground Control Point). Signaalipisteiden tehtävänä on lisätä kameran sisäisen ja ulkoisen parametrin optimointia jo sisäisen orientoinnin sisältävälle kuvablokille. Signaalipisteiden avulla saadaan prosessoitava aineisto georeferoitua ja kuvablokille mitta-kaava. [23]



Signaalipisteet luettiin Agisoft-ohjelmistoon csv-tiedostona, jossa oli 3 signaalipistettä. Näitä signaalipisteitä käytettiin PPK-prosessoinnissa tukipisteinä ja georeferoinnin tukena. Mäenpään mukaan [35] PPK-menetelmässä ei teoriassa tarvita signaalipisteitä onnistuneen mittatarkan aineiston prosessoinnissa, mutta on suositeltavaa käyttää vähintään muutamaa sijainniltaan tunnettua signaalipistettä. Tällä toimenpiteellä varmistetaan prosessoitavan aineiston mittatarkkuudesta. [35]

Huomion arvoista on se, että signaalipisteet luettiin ETRS GK25 -tasokoordinaatein ja korkeutena käytettiin N2000-järjestelmää. Kuvilta etsittiin maastoon merkatut signaalipisteet, jotka osoitettiin sovelluksessa pistetunnusta vastaavasti, kuten kuvassa 29 vasemmalla puolella on nähtävissä. Ohjelmisto kykenee muutaman osoitetun pisteen jälkeen laskemaan likimääräisen sijainnin signaalipisteelle kuvalta, jonka jälkeen operaattorin tehtävänä on kohdistaa piste signaaliin keskitetysti. Tämä nopeuttaa prosessoinnin kulkua etenkin suurilla alueilla, joissa on paljon osoitettavia signaalipisteitä. Kuvablokille täytyy muodostaa ensin harva Mesh-verkko, jotta signaalipisteiden avustustoiminto on mahdollinen. [30]

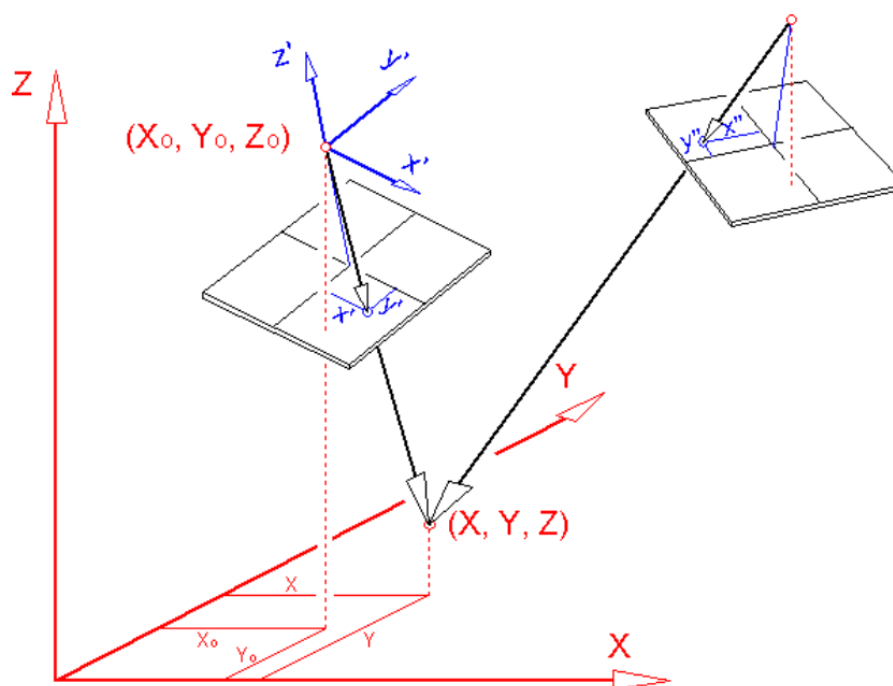


Kuva 29. Signaalipisteiden osoitus ja listaus Agisoftissa [29]

### 5.2.3 Pistepilvi

Seuraavaksi muodostetaan tiheä pistepilvi, joka perustuu kolmiointiin. Kolmiointi tehdään aina kuvablokissa, jossa blokin kuvat orientoidaan samanaikaisesti toisiinsa. Tiheän pistepilven luomisessa kolmioinnilla määritetään uusia pisteitä, joiden keskinäinen tarkkuus perustuu ensisijaisesti siihen, miten hyvin kuvat liittyvät geometrisesti toisiinsa. Kuvablokin geometriaa voidaan parantaa havaitsemalla lisää kuvien välisiä liitospisteitä, esimerkiksi tekemällä signaalipisteitä maastoon. [22]

Kolmioinnin avulla tehdään eteenpäinleikkaus, jossa määritetään uuden kohdepisteen avaruuskoordinaatit. Eteenpäinleikkaus suoritetaan orientoiduilta kuvilta, joko kuvaparin keskinäiseltä orientoinnilta mallikoordinaatistossa tai kummankin kuvan ulkoisen orientoinnin kohdekoordinaatistossa. Tämän työn PPK-menetelmässä hyödynnettiin jälkimmäistä vaihtoehtoa. Kuvassa 30 määritetään kohdepisteen 3 koordinaattia (X, Y, Z) kahden kuvan vastinpisteiden havainnoista. [22; 23.]



Kuva 30. Eteenpäinleikkaus avaruussuorilla [22].

Pistepilvi voidaan luokitella Agisoft-sovelluksessa esimerkiksi automaattisella luokittelulla, jossa ohjelmisto erottaa maanpinnan ja muut pisteet kahteen eri luokitteluun. Pistepilviaineistoa voidaan myös muokata tarpeen mukaan esimerkiksi harventamalla pistepilveä ennen 3D-mesh-mallin luontia. Pistepilvi aineistolle voidaan myös tehdä muokkauksia ulkoisissa ohjelmistoissa kirjoittamalla data Export-toiminnolla ulos ja muokkauksien jälkeen aineisto voidaan tuoda Import-toiminnolla takaisin Agisoft-sovellukseen, minkä jälkeen voidaan jatkaa prosessointia. [23; 30.]

#### 5.2.4 Teksturointi

Teksturoinnilla tarkoitetaan kuvan kiinnittämistä korkeusmalliin. Tässä työssä ilmaku-  
vista saadaan väriarvot, jotka kiinnittyvät laskettavaan pistepilviaineistoon. Teksturoin-  
nilla saadaan pistepilviaineistoista ja 3D-mesh-malleista luonnollisemman näköisiä, ja  
tämän avulla mitatut kohteet pystytään havainnollistamaan selkeämmin. Teksturoinnin  
luominen ei ole aina välttämätöntä laskennan kannalta, sillä esimerkiksi ortokuvan las-  
kenta voidaan suorittaa ilman teksturointia. [23]

#### 5.2.5 Lopputuotteet

Agisoft-sovelluksesta on saatavilla erilaisia lopputuotteita, kuten harvat ja tiheät pistepil-  
vet, kameran kalibrointi- ja orientointitiedot, ortokuvat ja digitaaliset korkeusmallit (DSM  
ja DTM). Pistepilviaineisto, kameran kalibrointitulokset ja ulkoisen orientaation tulokset  
voidaan kirjoittaa ulos ohjelmistosta heti, kun kuvablokki on sovitettu yhteen. Kaikkien  
muiden lopputuotteiden uloskirjoittaminen vaatii aina kyseisen lopputuotteen prosessoin-  
nin, esimerkiksi ortokuvien laskenta suoritetaan vasta korkeusmallin laskennan jälkeen.  
[23; 30.]

## 6 Mittaustulosten vertailu

Onnistuneiden jälkiprosessointien jälkeen Agisoft Photoscan -ohjelmistosta kirjoitettiin LAS.-formaattissa ulos PPK- ja GCP-prosessoidut pistepilviaineistot. Pistepilvitiedostot olivat kooltaan suuret, sillä molemmat aineistot sisälsivät yli 30 miljoonaa pistettä.

3d-Win -ohjelmistolla asetettiin LAS.-tiedostojen vektoriluentaan otantaväliksi 20, eli ohjelmisto ottaa joka 20. pisteen luentaan, joka helpottaa tiedostojen käsittelyä. Tiedostoista karsittiin kaikki ylimääräiset pisteet pois lukien kartoituskohteet 1–4, minkä jälkeen tiedostot olivat helposti käsiteltävissä. PPK-pistepilvestä muodostettiin keskiarvoisesti lopulta n. 11 pistettä neliometriä kohden (20 cm ruudukko) ja GCP-pistepilvestä vastaava luku oli n. 14 pistettä (15 cm ruudukko). Näiden arvojen pohjalta korkeuseroja verrattiin takymetrin referenssimittauksiin.

Lisäksi tarkastettiin PPK- ja GCP-mittausten luotettavuutta kontrollipisteiden avulla. PPK-aineistossa kontrollipisteinä käytettiin signaalipisteitä 10, 11, 12 ja 18. Nämä signaalipisteet toimivat hyvin aineiston kontrollipisteinä, sillä niitä ei käytetty georeferointiin jälkiprosessoinnissa.

GCP-aineistossa signaalipisteitä ei voitu käyttää kontrollipisteinä, koska GCP-mittauksen orientointi suoritettiin jokaista signaalipistettä hyödyntäen. GCP-mittauksen kontrollipisteeksi valikoitui kaksi lähtöpistettä (GNSS-piste 1 ja 2) ja yksi umpikantinen kaivo alueen keskeltä. GNSS-pisteet 1 ja 2 oli mitattu myös takymetrillä, sillä takymetrin orientointi suoritettiin lähtöpisteistä, joten vertailupisteinä käytettiin takymetrin antamia tuloksia. Umpikantinen kaivo oli mitattu takymetrin referenssimittauksien aikana siten, että kaivon keskipiste mitattiin.

## 6.1 Korkeuden vertailu

Korkeusvertailun referenssinä käytettiin takymetrimittauksen tuloksia. Takymetrillä mitattiin kohdealueet 1–4, joista laskettiin 3D-Win-ohjelmistossa maastomallit kolmioimalla maastossa mitatut pisteet. PPK- ja GCP-mittauksien pistepilviaineistot asetettiin maastomallien päälle, joista laskettiin korkeus mallista -toiminnon avulla jokaiselle pistepilven hajapisteelle korkeuserolukema takymetrimittauksen maastomalliin nähden. Tämän jälkeen pisteet kirjoitettiin 3D-Win-ohjelmistosta txt-formaatissa ulos ja siirrettiin Microsoft Excel -ohjelmaan, jossa suoritettiin taulukon 1 mukaiset laskelmat.

Taulukko 1. Kartoituskohdeiden 1–4 korkeusvertailun tulokset PPK-mittauksen ja takymetrin referenssipisteiden väliltä.

### PPK

Kohde	Pisteet (kpl)	Keskiarvo	Mediaani	Moodi	Keskihajonta	Max	Min
1	5157	-0.007	-0.006	-0.006	0.019	0.052	-0.078
2	667	0.020	0.021	0.020	0.014	0.062	-0.035
3	3204	0.002	0.003	0.004	0.013	0.050	-0.075
4	3443	-0.016	-0.016	-0.015	0.015	0.042	-0.068

Taulukkojen 1 ja 2 keskihajonta on molemmilla mittausmenetelmillä jokaisessa kartoituskohdeessa samantapainen. Moodilukemalle ei anneta tässä laskennassa liikaa painoarvoa, mutta se vahvistaa keskiarvolaskentojen luotettavuutta. Pistepilviaineistoissa esiintyy tuloksien osalta ”piikkejä”, joista esimerkkinä ovat Min- ja Max-arvojen lukemat. Tässä työssä taulukkojen 1 ja 2 tuloksien perusteella voidaan todeta pistepilviaineistot luotettaviksi vertailun suhteen.

Taulukko 2. Kartoituskohdeiden 1–4 korkeusvertailun tulokset GCP-mittauksen ja takymetrin referenssipisteiden väliltä.

### GCP

Kohde	Pisteet (kpl)	Keskiarvo	Mediaani	Moodi	Keskihajonta	Max	Min
1	6516	0.005	0.005	0.009	0.017	0.061	-0.053
2	869	0.008	0.010	0.018	0.014	0.053	-0.055
3	4318	-0.010	-0.010	-0.010	0.015	0.066	-0.088
4	4312	-0.009	-0.009	-0.009	0.015	0.051	-0.065

3D-Win-ohjelmistolla muodostettiin jokaisesta kartoituskohteesta kuvan 31 mukaiset havainnekuvat. Kuvassa 31 on PPK-mittauksesta laskettu ortokuva, jonka päälle on lisätty PPK-pistepilvestä ja referenssimittauksista lasketut maastomallit, joiden korkeuseroja havainnollistetaan väriarvojen avulla.



Kuva 31. PPK- ja referenssimittauksien korkeuserot väriarvoilla havainnollistettuna.

Kuvasta 31 voidaan havaita kuvan ylä laidassa olevan puun merkitystä fotogrammetriseen laskentaan. Kevyen liikenteen väylän yläpäästä jouduttiin poistamaan puun kohdalta vertailuun laskettavaa pistepilveä, sillä ilmakuvista lasketut pisteet osuivat osittain puuhun. Kartoituskohteiden 1, 2 ja 4 havainnekuvat ovat nähtävillä liitteessä 3.

## 6.2 Kontrollipisteiden vertailu

Kontrollipisteitä käytetään ilmakuvauksen aineiston laadun varmentamisessa. Kontrollipisteenä voidaan käyttää taso- tai korkeuskontrollipistettä, joka erottuu myös selkeästi ilmakuvasta. Prosessoidun aineiston ortokuvasta voidaan tarkistaa XY-suuntainen sijainti asettamalla kuvan päälle esimerkiksi takymetrillä mitatut kontrollipisteet, kuten tässä työssä tehtiin.

Korkeus voidaan varmistaa esimerkiksi kolmioimalla prosessoidun aineiston pistepilvi tunnetun pisteen kohdalta. Tässä työssä käytettiin korkeuskontrollipisteen määrittelyyn

3D-Win-ohjelmistoa, jonka avulla pistepilvet kolmioitiin tunnettujen pisteiden kohdalta. Tämän jälkeen verrattiin tunnettua pistettä mallin korkeuteen, josta erotuksena saatiin korkeusero.

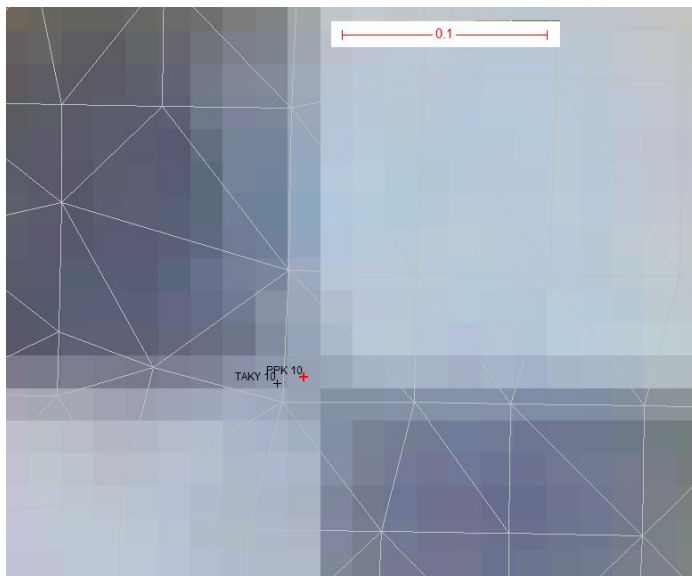
PPK-mittauksien kontrollipisteet muodostuivat signaalipisteistä 10, 11, 12 ja 18. PPK:n jälkiprosessoinnissa käytettiin signaalipisteitä 13, 14 ja 16, joten niitä ei voitu käyttää tukipisteinä. Jälkiprosessoinnissa käytetyt signaalipisteet ovat liian painotettuja käytettäväksi kontrollipisteinä, sillä prosessointi vaiheessa ohjelmisto hyödyntää ennalta syötettyjä koordinaatti tietoja. Taulukossa 3 havainnollistetaan PPK-aineiston ortokuvasta ja pistepilvestä saatujen tuloksien tarkkuuksia suhteessa takymetrillä mitattuihin referensseihin.

Taulukko 3. PPK-mittauksen tukipisteiden tarkkuusvertailua takymetrin referenssiin nähden.

<b>Tukipiste</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
Signaali 10	0.003	0.013	-0.030
Signaali 11	0.005	-0.007	-0.014
Signaali 12	-0.006	-0.002	-0.003
Signaali 18	0.007	0.001	-0.031

PPK-mittauksen ortokuva kirjoitettiin Agisoft-ohjelmistosta ulos TIFF-formaatissa, minkä jälkeen se vietiin 3D-Win-ohjelmistoon. Tämän jälkeen ortokuvasta etsittiin tukipisteet, eli signaalit, joiden keskipisteeseen luotiin kontrollipiste. Tässä vaiheessa takymetrillä mitatut referenssipisteet olivat piilotettuna, jotta tulos ei ohjaudu tunnetun sijainnin perusteella.

Kuvassa 32 on näkymä signaalipisteen keskikohdasta, jossa on silmä määräisesti hahmoteltu keskipiste ortokuvalta ja takymetrilla mitattu referenssipiste. Kuvassa 32 yksi pikseli vastaa 1,5 cm:ä ruudukossa, joten signaalipisteen keskikohdan erottaminen silmä määräisesti onnistui hyvin.



Kuva 32. Tukipisteen kohdistus ortokuvasta 3D-Win-ohjelmistossa.

GCP-mittauksessa käytettiin työn jokaista signaalipistettä hyödyksi jälkiprosessoinnin orientoinnissa, joten signaalipisteitä ei voitu hyödyntää tukipisteinä. Lähtöpisteet 1 ja 2 oli merkintämaalilla värjätty keskitetysti takymetrilla mitattuun pisteeseen nähden, joten näitä pisteitä hyödynnettiin tukipisteenä. Kuvassa 33 esitetään lähtöpisteen numero 2 merkintämaalattu kohta, joka ortokuvalta digitoitiin.



Kuva 33. Ortokuvan erotuskyky GCP-mittauksista lasketulta kuvalta.



Kuvan 33 tukipiste ei ole optimaalisin, sillä keskikohdan tarkka määrittäminen on hankalaa. Kolmas tukipiste GCP-mittauksessa oli kaivon kannen keskipiste. Kansi saatiin ortokuvasta digitoitua, mutta keskipisteen määrittäminen on hieman likimääräistä, kuten kahdessa lähtöpisteen digitoinnissakin. GCP-mittauksen tukipisteet digitoitiin ortokuvasta ilman takymetrillä mitatun referenssin näkymistä kuvalla.

Taulukossa 4 esitellään GCP-menetelmän tukipisteiden sijaintien tarkkuutta suhteessa takymetrillä mitattuun referenssiin.

Taulukko 4. GCP-mittauksen tukipisteiden tarkkuusvertailua takymetrin referenssiin nähden.

Tukipiste	X	Y	Z
GNSS1	0.015	0.010	-0.028
GNSS2	-0.002	0.015	-0.029
KAIVO	-0.003	-0.007	0.001

Vertailun vuoksi taulukossa 5 esitetään PPK-mittauksen jälkiprosessointiin käytettyjen signaalipisteiden tarkkuuksien tuloksia suhteessa takymetrin referenssipisteisiin. Taulukon 5 mukaiset tulokset laskettiin samalla tavalla ortokuvasta ja pistepilvestä, kuten em. tukipisteen vertailutkin.

Taulukko 5. PPK-mittauksen georeferoinnissa käytettyjen signaalipisteiden tarkkuuseroja suhteessa takymetrillä mitattuihin referenssipisteisiin.

Tukipiste	X	Y	Z
Signaali 13	0.002	0.004	0.004
Signaali 14	-0.002	0.003	0.000
Signaali 16	0.003	-0.005	-0.009

Taulukon 5 tulokset kuvaavat jäännösvirheitä jälkiprosessoinnista syntyneiden pisteiden tasoituksen jälkeen.

## 7 Pohdintoja

PPK-mittauksen teknologiaa on hyödynnetty jo vuosia sitten maanmittaustekniikassa ilmakuvauksen menetelmänä. Viime vuosina PPK-mittaus on tullut myös osaksi miehittämättömien ilma-alusten kartoitusmenetelmiä. PPK-menetelmällä voidaan säästää huomattava määrä maastotyöhön kuluvaan aikaan erityisesti suurilla alueilla, sillä työn tuloksien kannalta tarvittavien signaalipisteiden määrä vähenee huomattavasti GCP-menetelmään verrattuna.

Tässä työssä esitetyt tulokset osoittavat PPK-tekniikan kilpailukykyä GCP-menetelmään verrattuna. On mielenkiintoista seurata minkälaisia askelia PPK-teknologia ottaa tulevaisuudessa ja tarvitaanko signaalipisteitä jatkossa ollenkaan? Varmaa on kuitenkin se, että signaalipisteiden määrä tulee jatkossa vähenemään PPK-teknologian ansiosta.

Siinä missä miehittämättömien ilma-alusten kartoitustekniikat ovat kehittyneet huimin askelin, on myös lainsäädäntö muuttumassa tiukemmaksi. Euroopanlaajuinen sääntely on vaikuttanut lainsäädäntöön myös Suomessa. Tulevaisuudessa RPAS-toimijat joutuvat entistä enemmän toimimaan luvanvaraisesti, jota pidän henkilökohtaisesti hyvänä asiana. Näin varmistutaan yhteisen turvallisuuden osalta, kun lennätystoiminta kasvaa teknologian kehityksen kasvaessa.

PPK-menetelmä miehittämättömässä ilmailussa on uusi ja voimakkaasti kehittyvä tekniikka, siinä on vielä tutkittavaa. Yksi mielenkiintoinen tutkimuskohde olisi verrata PPK- ja GCP-menetelmien työn tehokkuutta ja sijaintien (XYZ -koordinaatit) tarkkuuksia suuressa alueella (esim. 80 hehtaaria). Tämänkokoiseen alueeseen kuluu aikaa huomattava määrä signaalipisteiden mittaukseen GCP-menetelmässä, joten olisi mielenkiintoista selvittää, kuinka vähäisillä signaalipisteillä PPK-menetelmästä saadaan tarkkoja tuloksia.

## Lähteet

- 1 Miehitämättömät ilma-alukset ja lennokit. 2018. Usein kysyttyä. Verkkoaineisto. DroneInfo. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. <[https://www.droneinfo.fi/fi/usein\\_kysyttya/ilmailu - miehitamattomat ilma-alukset ja lennokit](https://www.droneinfo.fi/fi/usein_kysyttya/ilmailu_-_miehitamattomat_ilma-alukset_ja_lennokit)>. Päivitetty 19.12.2018. Luettu 31.3.2019.
- 2 Unmanned aerial vehicle market. 2018. Technical report. Dallas, Usa. Verkkoaineisto. MarketsAndMarkets. <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/unmanned-aerial-vehicles-uav-market-662.html>>. Luettu 1.4.2019
- 3 Colomina I. & P. Molina. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. Verkkoaineisto. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, s. 79–97. <<https://pdfs.semanticscholar.org/63c8/0cf679ff3a0e307ae763be7cd69ef51611ad.pdf>>. Luettu 1.4.2019.
- 4 Teittinen, Hannu. 2017. Georeferoidun pistepilven tuottaminen miehitämättömällä lentoaluksella kerätystä kuva-aineistosta. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Fotogrammetria ja kaukokartoitus. Aaltodoc-tietokanta.
- 5 Kunnas, Olli. 2018. RPAS-toiminnan aloittaminen kuntaorganisaatiossa ja siihen liittyvät työprosessit. Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 6 Hassinen, Alpo. 2016. UAV-lennokit ja -kopterit. Kokemuksia UAV- ja RPAS-laitteista. Verkkoaineisto. Itä-Suomen Yliopisto. <[http://epublications.uef.fi/pub/urn\\_isbn\\_978-952-61-2244-1/](http://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-952-61-2244-1/)>. Luettu 1.4.2019
- 7 GeoDrone X4L V4 käyttöopas. 2018. Ohjekirja. VideoDrone Finland Oy.
- 8 Keränen, Henri. 2017. Miehitämättömien ilma-alusten käyttö lämpökuvauksessa. Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 9 Tikka, Jesse. 2016. Airborne LiDAR autonomisessa UAV:ssa. Opinnäytetyö. Tampereen Ammattikorkeakoulu.
- 10 Lentoaluksen kiertymiskulmat. 2007. Verkkoaineisto. <<https://www.touringmachine.com/Articles/aircraft/6/>>. Luettu 3.4.2019.
- 11 Hokkanen, Jeremia. 2015. UAV-kopterin pistepilven tarkkuus. Insinöörityö. Metropolian Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

- 12 Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2018/1139. 2018. Verkkoaineisto. Euroopan unioni. <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018R1139&from=EN#d1e3726-1-1>>. Päivitetty 22.8.2018. Luettu 4.4.2019.
- 13 Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lennättämistä koskeva määräys päivitetty. 2018. Verkkoaineisto. DroneInfo. <<https://www.droneinfo.fi/fi/tiedotteet/6712/kauko-ohjatun-ilma-aluksen-ja-lennokin-lennattamista-koskeva-maarays-paivitetty>>. Päivitetty 4.12.2018. Luettu 5.4.2019.
- 14 OPS-M1-32 määräys. Säädökset. 2018. Verkkoaineisto. Traficom. <[https://arkisto.trafi.fi/filebank/a/1544017881/36449b3e46367e0de0a247f2f68fefa1/32674-OPS\\_M1-32\\_2018\\_fi\\_korjattu.pdf](https://arkisto.trafi.fi/filebank/a/1544017881/36449b3e46367e0de0a247f2f68fefa1/32674-OPS_M1-32_2018_fi_korjattu.pdf)>. Voimaantulopäivä 7.12.2018. Luettu 5.4.2019.
- 15 Suomen ilmailun turvallisuusohjelma. 2018. Verkkoaineisto. Traficom <[https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/Suomen\\_ilmailun\\_turvallisuusohjelma\\_2018\\_%28FASP\\_2018%29.pdf](https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/Suomen_ilmailun_turvallisuusohjelma_2018_%28FASP_2018%29.pdf)>. Julkaistu 2/2018. Luettu 5.4.2019.
- 16 EASA-asetuksen edellyttämät kansalliset lainsäädäntömuutokset. Säädösvalmistelu. 2018. Verkkoaineisto. Valtioneuvosto. <<https://valtioneuvosto.fi/hanke?tunnus=LVM076:00/2018>>. Asettamispäivä 20.9.2018. Luettu 5.4.2019.
- 17 Hannola, Jukka. 2018. Säädösinfo. Verkkoaineisto. Traficom. <[https://arkisto.trafi.fi/filebank/a/1540308556/a31a3abf04653ae26fc61a300cfd79c2/32229-Dronet\\_Hannola\\_saadosinfo2018.pdf](https://arkisto.trafi.fi/filebank/a/1540308556/a31a3abf04653ae26fc61a300cfd79c2/32229-Dronet_Hannola_saadosinfo2018.pdf)>. Julkaistu 23.10.2018. Luettu 5.4.2019.
- 18 Luonnosvaiheessa olevan EASA-asetuksen seminaarilaisuus Liikenne- ja viestintäministeriössä. 2017. Tilaisuus pidetty 20.5.2017. Traficom. Luettu 5.4.2019
- 19 GeoDrone PPK Käyttöohje V 1.2. 2018. Ohjekirja. VideoDrone Finland Oy. Luettu 8.4.2019
- 20 Gunell, Nina. 2017. Puhelintukiasema-antennin säteilykuvon mittaus multikopterilla. Kandidaatintyö. Aalto-yliopisto. Aaltodoc-tietokanta.
- 21 VideoDrone GS -käyttöohje 2.13. 2018. Paperinen ohjekirja. VideoDrone Finland Oy. Luettu 12.4.2019
- 22 Haggren, Henrik. 2002. Fotogrammetrian yleiskurssi. Luento 7: Eteenpäinleikkaus avaruudessa. Verkkoaineisto. Aalto-yliopisto. <https://foto.aalto.fi/opus/301/luennot/7/7.html>. Julkaistu 17.11.2002. Luettu 13.4.2019

- 23 Partonen, Ilkka. 2014. Pienellä UAV-lennokilla (sUAV) kerätyn datan pistepilven korkeustarkkuuksista – case Nokian Renkaat. Opinnäytetyö. Metropolian Ammatikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 24 Stöcker C, Nex F, Koeva M & Gerke M. 2017. Quality assessment of combined IMU/GNSS data for direct georeferencing in the context of UAV-based mapping, s. 355-360. Verkkoaineisto. The International Archives of the Photogrammetry. <[https://its4land.com/wp-content/uploads/2017/10/QUALITY\\_ASSESSMENT\\_OF\\_COMBINED\\_IMUGNSS\\_DATA\\_FOR\\_DI.pdf](https://its4land.com/wp-content/uploads/2017/10/QUALITY_ASSESSMENT_OF_COMBINED_IMUGNSS_DATA_FOR_DI.pdf)>. Luettu 14.4.2019.
- 25 Do RTK/PPK drones give you better results than CGPs? 2017. Verkkoaineisto. Pix4D. <<https://www.pix4d.com/blog/rtk-ppk-drones-gcp-comparison>>. Julkaistu 27.8.2017. Luettu 14.4.2019
- 26 Zhang, Dick. 2017. GCP vs PPK vs RTK Drone Mapping Webinar and Identified Technologies. Verkkoaineisto. <<https://www.youtube.com/watch?v=0vJqXm-QcrC8>>. Julkaistu 14.9.2017. Katsottu 14.4.2019.
- 27 Ohje ilmakeuhkajalle. 2019. Verkkoaineisto. Puolustusvoimat. <[https://puolustusvoimat.fi/ilmakuvaus-lupa?fbclid=IwAR3N10AISDkxY\\_ckHrrC3Xfibca0nQidQX6p5LxEZ-WmRSAGtCj59WjbdZk](https://puolustusvoimat.fi/ilmakuvaus-lupa?fbclid=IwAR3N10AISDkxY_ckHrrC3Xfibca0nQidQX6p5LxEZ-WmRSAGtCj59WjbdZk)>. Päivitetty 20.3.2019. Luettu 15.4.2019
- 28 Mäenpää, Sakari. 2018. Laitetekniset vaatimukset ammattimaiselle dronetoiminnalle. Verkkoaineisto. Geotrim Oy. [https://www.geotrim.fi/images/Pdf-liitteet/2018\\_09\\_Sannainen/2018\\_UAV\\_Laitetekniset\\_vaatimukset\\_Geotrim.pdf](https://www.geotrim.fi/images/Pdf-liitteet/2018_09_Sannainen/2018_UAV_Laitetekniset_vaatimukset_Geotrim.pdf). Luettu 15.4.2019
- 29 PPK PhotoScan workflow. 2018. PDF. Trimtec. Luettu 13.4.2019
- 30 Agisoft PhotoScan User Manual Versio 1.4. 2018. Verkkoaineisto. Agisoft. <[https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro\\_1\\_4\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf)>. Luettu 15.4.2019
- 31 Trimnet VRS. 2019. Verkkoaineisto. Geotrim Oy. <https://www.geotrim.fi/palvelut/trimnet-vrs>. Luettu 18.4.2019.
- 32 Koivula-Bilker, Mirjam. 2008. Miten GPS-korkeudet eroavat vaaitusta? PDF. Luettu 18.4.2019.
- 33 Tekniset tiedot. Trimble S5 takymetri. 2018. Verkkoaineisto. Geotrim Oy. [http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-758820/022516-153A-FIN\\_TrimbleS5\\_DS\\_0515\\_LR.pdf](http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-758820/022516-153A-FIN_TrimbleS5_DS_0515_LR.pdf). Luettu 18.4.2019

- 34 Why is an Inertial Navigation System (INS) important for unmanned aerial vehicle (UAV) survey and mapping applications? 2016. Verkkoaineisto. OXTS. <  
<https://www.oxts.com/technical-notes/why-is-an-ins-important-for-mapping/>>. Julkaistu 23.2.2016. Luettu 18.4.2019.
- 35 Mäenpää, Sakari. 2019. Tuotepäällikkö, Geotrim Oy, Vantaa. Puhelinhaastattelu 18.4.2019.
- 36 Jokinen, Ari-Pekka. 2014. UAV-kuvaus kiviainesten kartoituksessa. Insinööriyö. Metropolian ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 37 Trimble AT360 aktiiviprisma. 2019. Verkkoaineisto. Geotrim Oy. <https://shop.geotrim.fi/trimble-at360-aktiiviprisma.html>. Luettu 21.4.2019
- 38 A6000 -kameran tekniset tiedot. 2019. Verkkoaineisto. Sony Europe B.V. <  
[https://www.sony.fi/electronics/jarjestelmakamerat/ilce-6000-body-kit#product\\_details\\_default](https://www.sony.fi/electronics/jarjestelmakamerat/ilce-6000-body-kit#product_details_default)>. Luettu 22.4.2019

## PhotoScan-raportti

PhotoScan-sovelluksen automaattinen raportti Järvenpään PPK-prosessoinnista.

# 75 metriä, 3 signaalia, PPK-mittaus

Prosessoinnin tulokset

15 April 2019



## Survey Data

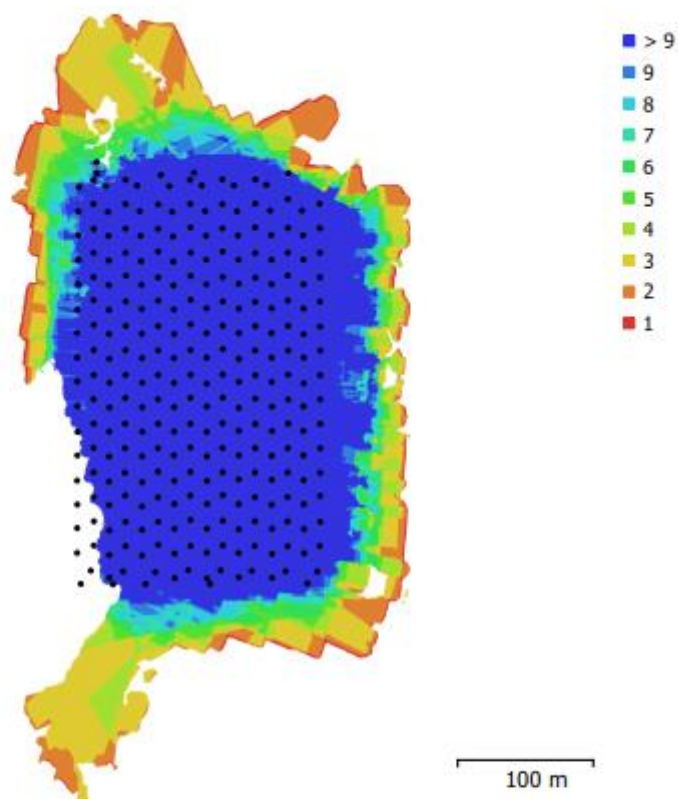


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	276	Camera stations:	275
Flying altitude:	87 m	Tie points:	34,410
Ground resolution:	1.58 cm/pix	Projections:	272,631
Coverage area:	0.109 km <sup>2</sup>	Reprojection error:	1.07 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
ILCE-6000 (20 mm)	6000 x 4000	20 mm	4 x 4 μm	No

Table 1. Cameras.



## Camera Calibration

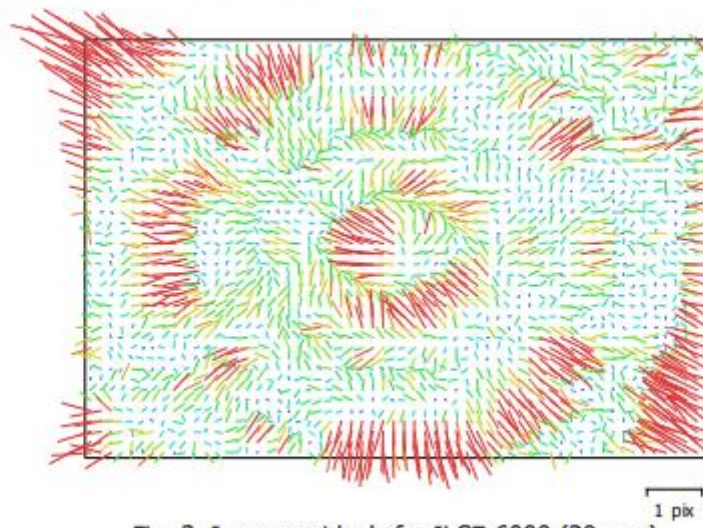


Fig. 2. Image residuals for ILCE-6000 (20 mm).

### ILCE-6000 (20 mm)

276 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
<b>Frame</b>	<b>6000 x 4000</b>	<b>20 mm</b>	<b>4 x 4 <math>\mu</math>m</b>

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	P1	P2
<b>F</b>	<b>5156.94</b>	0.14	1.00	0.05	-0.04	-0.12	0.02	-0.11	0.14	-0.00	-0.00
<b>Cx</b>	<b>-33.462</b>	0.051		1.00	0.01	0.03	-0.02	0.00	0.00	0.96	0.01
<b>Cy</b>	<b>-30.8955</b>	0.035			1.00	0.00	0.03	-0.00	0.00	0.01	0.85
<b>B1</b>	<b>0.340716</b>	0.029				1.00	0.00	0.00	0.03	0.02	-0.01
<b>B2</b>	<b>0.970708</b>	0.03					1.00	0.01	-0.01	-0.01	0.01
<b>K1</b>	<b>-0.0241479</b>	2.9e-05						1.00	-0.96	0.02	0.00
<b>K2</b>	<b>0.0343137</b>	6.3e-05							1.00	-0.02	-0.00
<b>P1</b>	<b>-0.000495213</b>	3.7e-06								1.00	0.00
<b>P2</b>	<b>-0.000614503</b>	2.6e-06									1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

## Ground Control Points

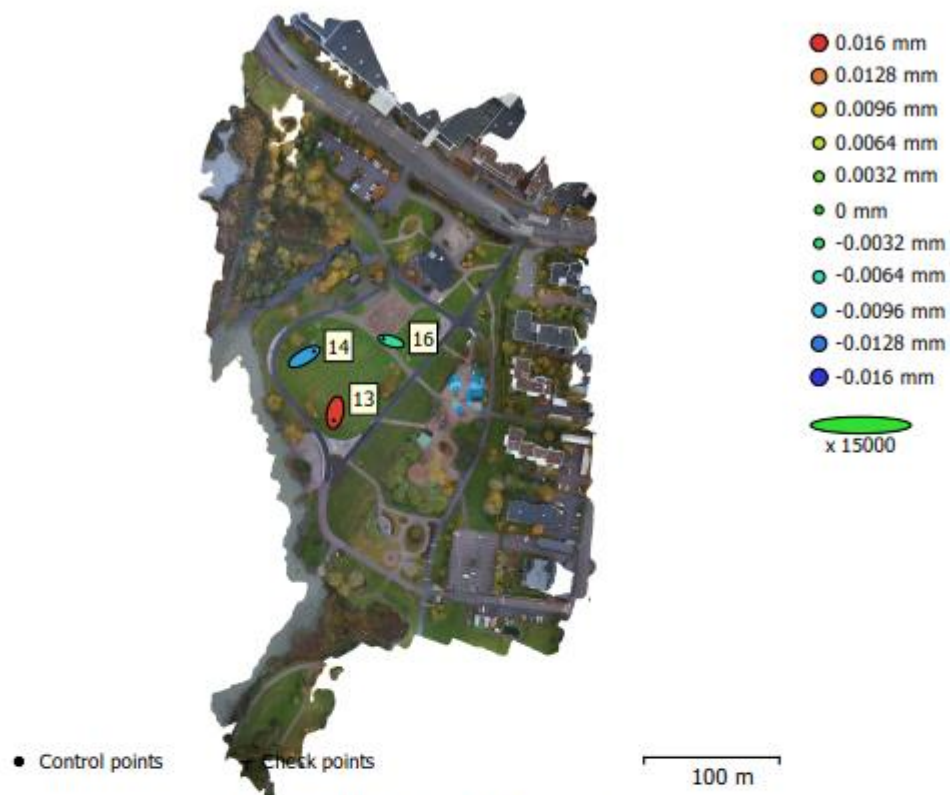


Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.  
Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
3	0.695218	0.560095	0.011256	0.892768	0.892839

Table 3. Control points RMSE.

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

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
13	-0.152962	-0.777134	0.0155068	0.792197	0.594 (27)
14	0.921882	0.533765	-0.0108401	1.06531	0.828 (21)
16	-0.759422	0.228638	-0.00470356	0.793107	0.663 (30)
<b>Total</b>	<b>0.695218</b>	<b>0.560095</b>	<b>0.011256</b>	<b>0.892839</b>	<b>0.690</b>

Table 4. Control points.

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

## Digital Elevation Model

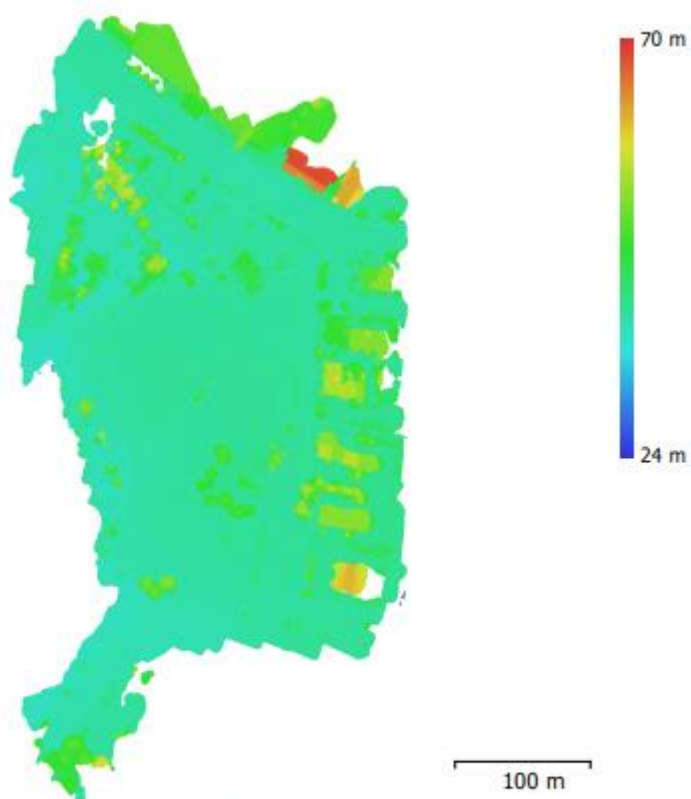


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 6.31 cm/pix  
Point density: 251 points/m<sup>2</sup>

# Processing Parameters

<b>General</b>	
Cameras	276
Aligned cameras	275
Markers	3
Coordinate system	ETRS89 / GK25FIN (EPSG::3879)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
<b>Point Cloud</b>	
Points	34,410 of 41,820
RMS reprojection error	0.273254 (1.06778 pix)
Max reprojection error	0.82259 (56.2374 pix)
Mean key point size	3.64259 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	8.69094
<b>Alignment parameters</b>	
Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Yes
Key point limit	40,000
Tie point limit	1,000
Filter points by mask	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	1 hours 7 minutes
Alignment time	55 seconds
<b>Dense Point Cloud</b>	
Points	31,819,408
Point colors	3 bands, uint8
<b>Reconstruction parameters</b>	
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	8 hours 13 minutes
Dense cloud generation time	17 minutes 1 seconds
<b>Model</b>	
Faces	2,121,292
Vertices	1,069,463
Vertex colors	3 bands, uint8
Texture	4,096 x 4,096, 4 bands, uint8
<b>Reconstruction parameters</b>	
Surface type	Arbitrary
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Face count	2,121,293
Processing time	41 minutes 4 seconds
<b>Texturing parameters</b>	
Mapping mode	Generic
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096 x 4,096
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	Yes
UV mapping time	1 minutes 49 seconds
Blending time	17 minutes 39 seconds
<b>Software</b>	
Version	1.4.4 build 6848



## PhotoScan-raportti

PhotoScan-sovelluksen automaattinen raportti Järvenpään GCP-prosessoinnista.

# 75 metriä, 7 signaalia, GCP-mittaus

Prosessoinnin tulokset  
15 April 2019



## Survey Data

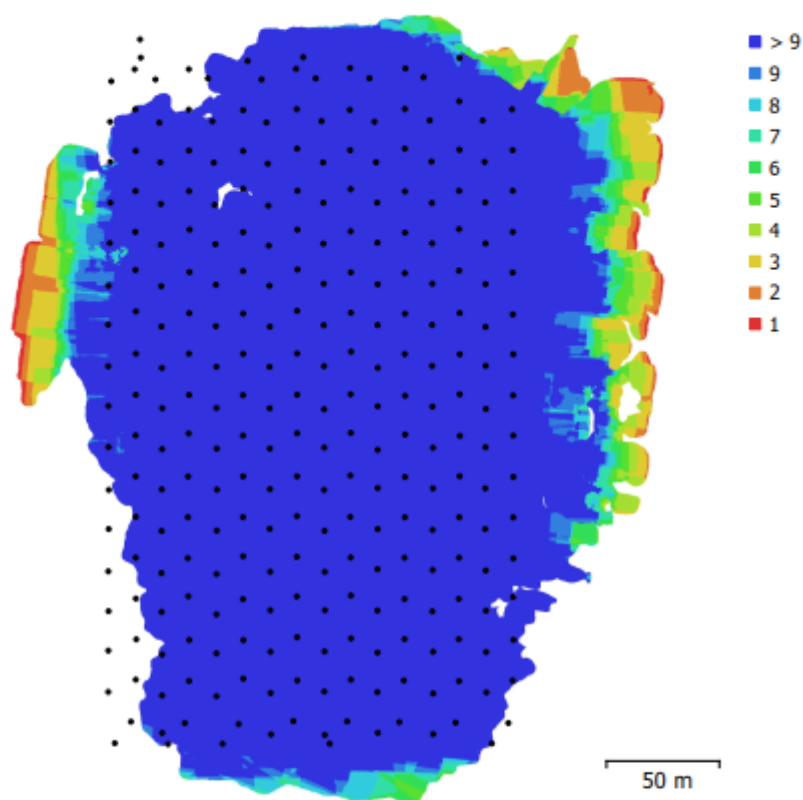


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	276	Camera stations:	275
Flying altitude:	86.9 m	Tie points:	18,717
Ground resolution:	1.58 cm/pix	Projections:	210,086
Coverage area:	0.0726 km <sup>2</sup>	Reprojection error:	0.993 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
ILCE-6000 (20 mm)	6000 x 4000	20 mm	4 x 4 $\mu$ m	No

Table 1. Cameras.

## Camera Calibration

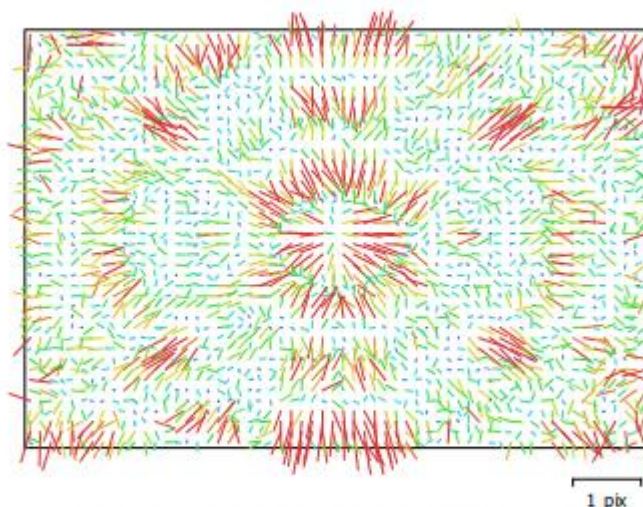


Fig. 2. Image residuals for ILCE-6000 (20 mm).

### ILCE-6000 (20 mm)

276 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
<b>Frame</b>	<b>6000 x 4000</b>	<b>20 mm</b>	<b>4 x 4 μm</b>

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2	P3
<b>F</b>	<b>5160.94</b>	0.37	1.00	0.06	-0.11	0.18	0.02	-0.03	0.10	-0.07	-0.01	-0.05	-0.06
<b>Cx</b>	<b>-36.7472</b>	0.058		1.00	0.01	0.02	0.13	0.04	-0.04	0.04	0.61	-0.09	-0.26
<b>Cy</b>	<b>-31.4189</b>	0.053			1.00	-0.18	0.02	0.01	-0.03	0.03	0.02	0.50	0.02
<b>B1</b>	<b>0.706833</b>	0.039				1.00	-0.00	0.00	-0.01	0.02	-0.01	-0.00	-0.00
<b>B2</b>	<b>0.709271</b>	0.039					1.00	0.03	0.00	-0.00	-0.01	-0.01	-0.02
<b>K1</b>	<b>-0.0250712</b>	6.6e-05						1.00	-0.93	0.89	0.06	0.01	0.04
<b>K2</b>	<b>0.0417323</b>	0.00032							1.00	-0.98	-0.06	-0.04	-0.07
<b>K3</b>	<b>-0.0131897</b>	0.00047								1.00	0.07	0.05	0.08
<b>P1</b>	<b>-0.00108706</b>	4.5e-06									1.00	0.04	0.04
<b>P2</b>	<b>-0.00113122</b>	4e-06										1.00	0.41
<b>P3</b>	<b>-1.15331</b>	0.0035											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.



## Ground Control Points

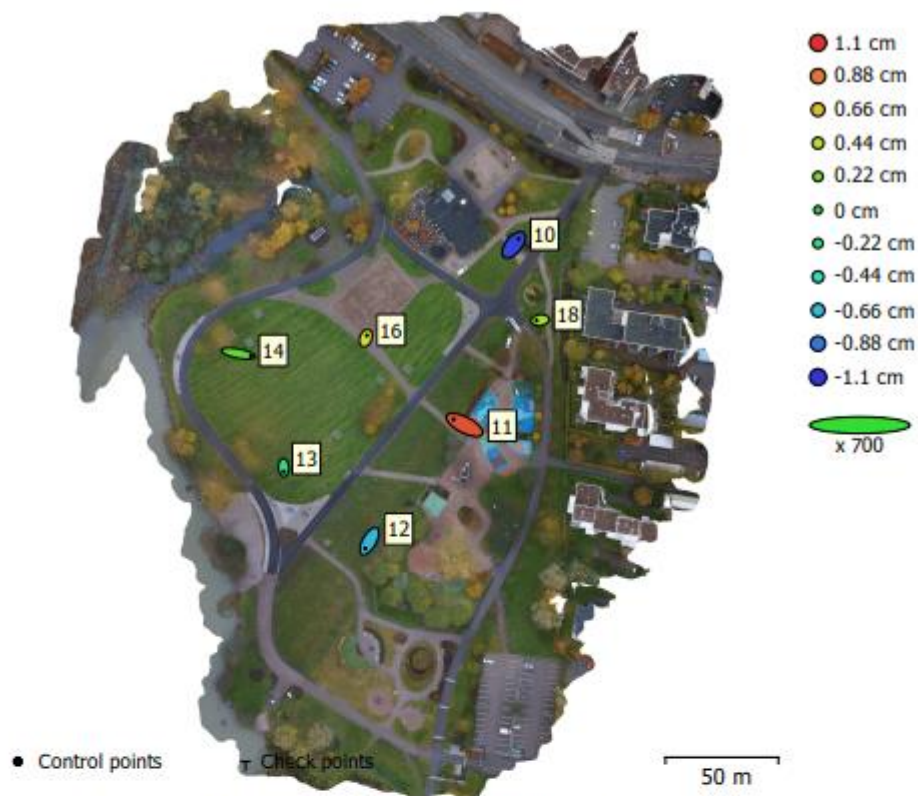


Fig. 3. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.  
Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
7	0.86223	0.584044	0.65225	1.04142	1.22881

Table 3. Control points RMSE.

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

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
10	0.609079	0.755697	-1.03572	1.41943	0.162 (25)
18	-0.456526	-0.0638553	0.353669	0.581012	0.180 (26)
13	0.0264025	-0.495237	-0.26615	0.562843	0.193 (27)
12	-0.530328	-0.930794	-0.677106	1.26732	0.256 (26)
14	1.57817	-0.310507	0.12584	1.61334	0.212 (21)
11	-1.35482	0.693979	0.994043	1.81804	0.209 (30)
16	0.128813	0.350625	0.496926	0.621665	0.173 (30)
<b>Total</b>	<b>0.86223</b>	<b>0.584044</b>	<b>0.65225</b>	<b>1.22881</b>	<b>0.199</b>

Table 4. Control points.

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



## Digital Elevation Model

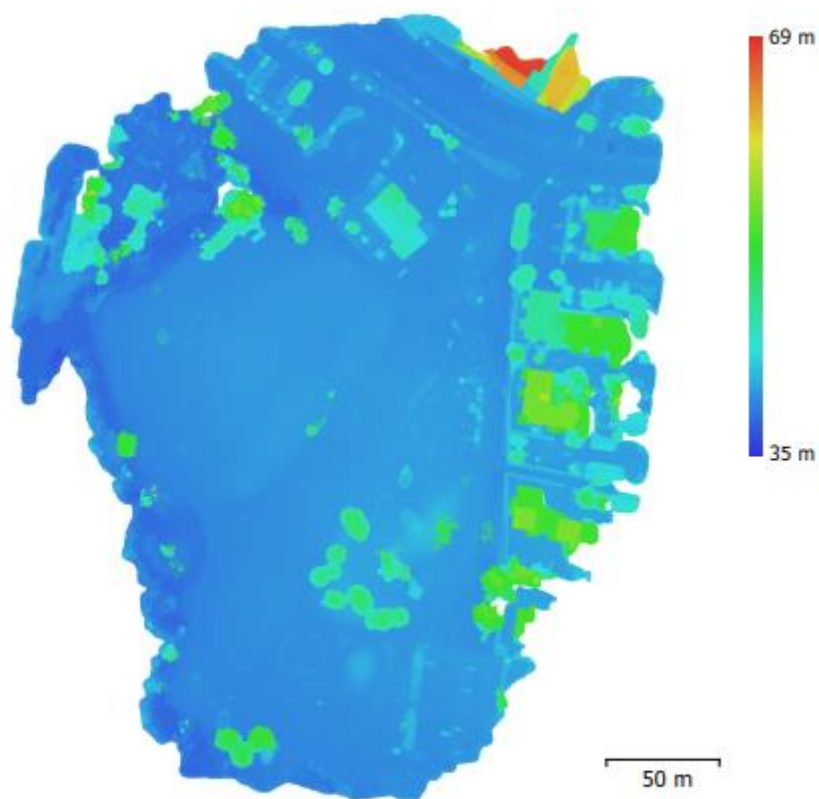


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 6.32 cm/pix  
Point density: 251 points/m<sup>2</sup>

# Processing Parameters

## General

Cameras	276
Aligned cameras	275
Markers	7
Coordinate system	ETRS89 / GK25FIN (EPSG::3879)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

## Point Cloud

Points	18,717 of 41,861
RMS reprojection error	0.256354 (0.992989 pix)
Max reprojection error	1.25859 (56.2621 pix)
Mean key point size	3.49015 pix
Point colors	3 bands, uint8
Key points	No
Average tie point multiplicity	8.72141

## Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	No
Key point limit	40,000
Tie point limit	1,000
Filter points by mask	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	48 minutes 42 seconds
Alignment time	1 minutes 17 seconds

## Optimization parameters

Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1-p3
Optimization time	4 seconds

## Dense Point Cloud

Points	22,945,777
Point colors	3 bands, uint8

## Reconstruction parameters

Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	1 hours 28 minutes
Dense cloud generation time	15 minutes 26 seconds

## Model

Faces	1,529,718
Vertices	771,265
Vertex colors	3 bands, uint8
Texture	4,096 x 4,096, 4 bands, uint8

## Reconstruction parameters

Surface type	Arbitrary
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Face count	1,529,718
Processing time	36 minutes 26 seconds

## Texturing parameters

Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096 x 4,096
Enable color correction	No
Enable hole filling	Yes
UV mapping time	5 minutes 51 seconds
Blending time	1 minutes 46 seconds

<b>Tiled Model</b>	
Texture	3 bands, uint8
<b>Reconstruction parameters</b>	
Source data	Dense cloud
Tile size	256
Processing time	47 minutes 46 seconds
<b>DEM</b>	
Size	6,670 x 9,989
Coordinate system	ETRS89 / GK25FIN (EPSG::3879)
<b>Reconstruction parameters</b>	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	1 minutes 23 seconds
<b>Orthomosaic</b>	
Size	18,286 x 22,044
Coordinate system	ETRS89 / GK25FIN (EPSG::3879)
Colors	3 bands, uint8
<b>Reconstruction parameters</b>	
Blending mode	Mosaic
Surface	Mesh
Enable color correction	No
Enable hole filling	Yes
Processing time	6 minutes 5 seconds
<b>Software</b>	
Version	1.4.4 build 6848

## PPK-mittauksen havainnekuvat

Tässä liitteessä esitellään 3D-Win-ohjelmistossa lasketut havainnekuvat kartoituskohteiden 1, 2 ja 4 osalta. Taustalla on PPK-jälkiprosessoinnista laskettu ortokuva ja pinnalle on laskettu takymetrimittauksista saadut maastomallit, joiden korkeuden pintoja verrataan PPK-pistepilveen. Tästä korkeuden erotuksesta syntyy väriarvo, jota kuvataan tämän liitteen havainnekuvin.

