

RPAS-JÄRJESTELMÄN KÄYTTÖ TURUN KAUPUNGIN
PAIKKATIETO JA KAUPUNKIMITTAUKSESSA

Salo Niko-Petteri

Opinnäytetyö
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

2019

Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Niko-Petteri Salo	Vuosi	2019
Ohjaaja(t)	Pasi Laurila		
Toimeksiantaja	Turun kaupunki/Päivi Ala-Uotila		
Työn nimi	RPAS-järjestelmän käyttö Turun kaupungin Paikkatieto ja kaupunkimittauksessa		
Sivu- ja liitesivumäärä	64		

Opinnäytetyön tavoitteena oli dokumentoida RPAS-järjestelmän käyttö Turun kaupungin Paikkatieto ja kaupunkimittauksen palvelualueella. Työn toimeksiantajana toimi Turun kaupungin Paikkatieto ja kaupunkimittaus -palvelualue.

Tässä työssä tutkittiin RPAS-järjestelmän käyttöönottoa kaupunkiorganisaatiossa. Työssä tutkittiin laitteiston osia sekä niiden merkitystä fotogrammetriseen mittaukseen. Tämän lisäksi työssä tutkittiin RPAS-järjestelmän käyttöä yleisesti maanmittauksessa sekä tuotantoprosessia. Lopuksi työssä tutkittiin prosessista saatavia lopputuotteita sekä niiden tarkkuutta. Tarkkuusvertailun pohjaksi suoritettiin RPAS-prosessin mukaiset vaiheet, joiden lopputuotteita vertailtiin perinteisin menetelmin mitattuun aineistoon.

Työn tuloksena saatiin dokumentointi RPAS-järjestelmän käyttöönotosta. Lisäksi työn tuloksena saatiin dokumentointi laitteistolla saavutettavasta tarkkuudesta sekä siihen vaikuttavista tekijöistä. Työtä Turun kaupunki voi käyttää avukseen päivittäessään RPAS-kalustoa tai todetakseen laitteiston antaman aineiston tarkkuuden tulevaisuudessa.

Degree Programme in Land Surveying
Bachelor of Engineering

Author	Niko-Petteri Salo	Year	2019
Supervisor	Pasi Laurila		
Commissioned by	City of Turku/Päivi Ala-Uotila		
Subject of thesis	Use of a Remotely Piloted Aircraft System in the City Surveying and Geographic Information Unit of the City of Turku		
Number of pages	64		

The objective of this thesis was to document the use of a Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) in the City Surveying and Geographic Information Unit, in Finland. This thesis was commissioned by the Geographic Information and City Surveying unit of the city of Turku.

This thesis examined the implementation of RPAS in a city organization. The thesis investigated the components of the system and the importance of each in conducting photogrammetric measurements. In addition, this thesis explored the use of RPAS in general land surveying and the production process. Furthermore, the quality of the final measurements was examined. As a basis for quality comparison, the data was compared with measurements produced by conventional methods.

As a result, documentation of implementing RPAS in land surveying was provided. In addition, the results included comprehensive documentation of the measurement accuracy and the individual factors affecting it. The City of Turku benefits directly of this thesis when considering upgrading their RPAS equipment or when determining the quality of the RPAS data collected now and in the future.

Key words RPAS, city model

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	TEORIA	9
2.1	Miehittämättömät ilmailualukset	9
2.2	Miehittämättömän ilmailun historia	11
2.3	UA-järjestelmä	12
2.4	Miehittämättömän ilmailun lainsäädäntö	14
2.5	Käyttötarkoitukset	16
2.6	RPAS-tuotantoprosessi.....	17
2.6.1	Suunnitteluvaihe	17
2.6.2	Tiedonkeruu	18
2.6.3	Aineistokäsittely.....	19
3	RPAS-JÄRJESTELMÄN KÄYTTÖ TURUN KAUPUNGISSA	21
3.1	RPAS-järjestelmän hankinta	21
3.2	Järjestelmä ja ohjelmisto.....	23
3.2.1	RPAS-laitteisto	23
3.2.2	Prosessointiohjelmistot sekä -välineet.....	25
3.3	RPAS-tuotantoprosessi Turun kaupungissa	26
3.3.1	Suunnittelu	26
3.3.2	Tiedonkeruu	27
3.3.3	Aineistokäsittely.....	29
3.4	RPAS-aineiston hyödyntäminen lopputuotteeksi	40
3.4.1	Kaupunkimallin päivitys	40
3.4.2	Viistoilmakuvat	45
3.4.3	Mesh-mallit.....	46
3.4.4	Videot.....	46
4	RPAS-JÄRJESTELMÄN TARKKUUSTARKASTELU	47
4.1	Määrittely	47
4.2	RPAS-aineisto.....	47
4.3	Vertailuaineisto	50
4.4	Tulosten vertailu.....	50
4.4.1	Käytetyt sovellukset ja tavat	50
4.4.2	Tasosijaintitarkkuuden määrittely	51

4.4.3	Korkeussijaintitarkkuuden määrittely	54
4.4.4	Pistepilvien erot, mobiiliskannaus vs. fotogrametrinen	58
4.5	Lopputulos	59
5	POHDINTA	61
6	LÄHTEET	63

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

ATT	Automatic Aerial Triangulation
BBA	Bundle Block Adjustment
CTR	Control Zone
DEM	Digital Elevation Model
DSM	Digital Surface Model
DTM	Digital Terrain Model
DXF	Drawing Interchange or Exchange Format
GCP	Ground Control Point
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground sample distance
INS	Inertial navigation system
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
SfM	Structure-from-Motion
SHP	Shapefile
UA	Unmanned Aircraft
UAS	Unmanned Aircraft System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VLOS	Visual Line of Sight

1 JOHDANTO

Teknologia elää jatkuvassa murroksessa ja muokkaa kaikkia teknisen alan työkäytänteitä. Työtavat muuttuvat teknologian muutoksessa, mutta niiden perusta sekä aiemmin luodut työkäytänteet ja tiedot eivät saa unohtua. Samalla nopeassa tahdissa muuttuvien työtapojen sekä niiden käyttöönottamisen vaarana on, että uuteen tekniikkaan ja työtapoihin ei perehdytä riittävästi. Tämä luo vaaran, että muutamien vuosien kuluttua huomataan jotakin, joka on hankalasti korjattavissa ja saattaa vaatia useamman vuoden tehdyn työn uudelleen tekemistä.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on poistaa tai ainakin pyrkiä poistamaan tällainen todennäköisyys uuden mittausmenetelmän käyttöönoton yhteydessä. Työtä tehdessä on pyritty tunnistamaan ne tekijät, jotka vaikuttavat uuden mittausmenetelmän käyttöönotossa esimerkiksi uuden laitteiston tarkkuuteen.

Toimeksiantajana tämän opinnäytetyön osalta on Turun kaupunki, tarkemmin Kaupunkiympäristötoimialan Paikkatieto ja kaupunkimittaus -yksikkö. Opinnäytetyöntekijä itse työskentelee kyseisessä organisaatiossa paikkatietoasiantuntijana.

Teknisen alan yksi suurimmista seuraavista muutoksista tulee olemaan robotiikka. Yksi osa tätä robotiikkaa on jo nyt ja tulee vielä suuremmassa mittakaavassa tulevaisuudessa olemaan erilaiset miehittämättömät ilma-alukset. Nämä kansankielellä drone-nimityksen saaneet laitteet ja laitteistot ovat saavuttaneet suuren suosion teknisen sektorin erilaisissa sovellutuksissa. Ne hoitavat aiemmin olleita töitä helpommin, turvallisemmin ja tehokkaammin. Lisäksi ne ovat tuoneet täysin uusia mahdollisuuksia töiden suorittamiseen. Ovat ne tuoneet myös uusia työkäytänteitä, joita ennen ei olla voitu suorittaa lainkaan.

Yksi suuri hyötyjäkunta miehittämättömän ilmailun kehityksessä on ollut maanmittaus. Laitteistot ovat tulleet yksinkertaisemmiksi sekä edullisemmiksi, joten niitä on lähes kaikkien mahdollista hankkia. Samalla tuotettavien aineistojen prosessointisovellukset sekä niitä pyörittävien tietokoneiden tehot ovat kasvaneet siinä määrin, että se mahdollistaa lähes kaikille valmiudet tuottaa näitä aineistoja. RPAS-järjestelmät ovat tulleet jäädäkseen maanmittaukseen. Vain aika näyttää, mitä kaikkea niillä voidaan tehdä.

Aikoinaan opinnäytetyön aihe-esittelyssä tuli kerrottua, mitkä olivat ne juurisyyt, miksi opinnäytetyön tilaajan organisaatiossa oli ajateltu uuden teknologian lisäämistä mittauskalustoon. Näitä syitä olivat ajanhermolla pysyminen, työn tehostaminen laajoissa hankkeissa, vaarallisten alueiden työturvallisuusnäkökulma sekä 3D-kaupunkimallin uusien rakennusten mallintaminen ja tekstuurikuvien tuottaminen.

Nämä olivat ne lähtökohdat, joiden kautta tämän opinnäytetyön sisältöä on lähdetty miettimään sekä toteuttamaan. Opinnäytetyö on rajattu kokonaisuus miehittämättömän ilmailun historiaa sekä nykypäivää. Se kertoo RPAS-järjestelmien hyödyntämisestä maanmittauksessa sekä tällaisen laitteiston hankinnasta, käytönotosta sekä käytännön työstä. Työ keskittyy lähinnä maanmittaukseen ja käytännön tekemiseen, eikä siinä lähdetä esimerkiksi tutkimaan erilaisten miehittämättömien ilmailualusten teknisiä eroavaisuuksia tai teknistä toimintaa.

Toivon tämän opinnäytetyön tarjoavan lukijoille antoisia lukuhetkiä tämän aihepiirin parissa ja herättämään heidät pohtimaan, voiko kaikkeen uuteen ja hienoon teknologiaan luottaa sokeasti vai pitäisikö laitteiston teknistä toteutusta miettiä ja analysoida erilaisten testailujen ja analyysien kautta.

2 TEORIA

2.1 Miehitämättömät ilmailualukset

Miehitämättömistä ilmailualuksista puhuttaessa törmää useisiin eri lyhenteisiin. Osa lyhenteistä tarkoittaa samaa ja osalla voi olla pienen pieni ero toiseen lyhenteeseen verrattuna. Useimmin ja yleisesti vastaan tulevat nimitykset ovat UAV sekä UAS. Näistä ensimmäinen eli UAV on lyhenne sanoista Unmanned Aerial Vehicle ja UAS on puolestaan lyhenne sanoista Unmanned Aerial System. Nykyään lyhenne UAV on hieman vanhentunut ja se on lyhentynyt muotoon UA, joka tulee sanoista Unmanned Aircraft. Näiden lisäksi usein vastaan tulee lyhenne RPA, joka tulee sanoista Remotely Piloted Aircraft, sekä RPAS, joka taas tulee sanoista Remotely Piloted Aircraft System. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom 2019a.)

Näistä edellisessä kappaleessa mainituista lyhenteistä on tarpeellista tietää, miten ne eroavat toisistaan. UA eli aikaisemmin myös UAV on miehitämätön ilma-alus, joka on tarkoitettu lentämään ilman aluksessa olevaa miehistöä tai ohjaajaa, mutta tällä ei tarkoiteta lennokkia (Kuva 1). UAS tarkoittaa miehitämättömän ilma-aluksen kokonaisjärjestelmää, joka sisältää miehitämättömän ilma-aluksen kannalta välttämättömät ja sen käytön edellyttämät järjestelmän osat. RPA tarkoittaa kauko-ohjattua ilma-alusta, jossa ei ole miehistöä ja jota ohjataan kauko-ohjauspaikasta ja käytetään lentotyöhön. RPAS tarkoittaa kauko-ohjatun ilma-aluksen käytön kokonaisjärjestelmää, johon sisältyy kauko-ohjattu ilma-alus, kauko-ohjauspaikat, tarvittavat ohjaus ja seurantayhteydet sekä muut järjestelmän käytön edellyttämät osat. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom 2019a.)



Kuva 1. Erilaisia miehittämättömiä ilma-aluksia (Colomina & Molina 2014, 94)

Edellä mainittujen lyhenteiden lisäksi on olemassa ainakin kaksi paljon käytössä olevaa termiä, jotka yleisesti sekoittavat. Näistä toisella termillä on myös huomattava rooli, kun tulkitaan voimassa olevaa lainsäädäntöä ja ohjeita, jotka koskevat miehittämätöntä ilmailua. Kansan keskuudessa sana drone on varmaan kaikkein käytetyin, ja sillä voidaankin varmaan oikeastaan viitata kaikkiin miehittämättömiin laitteisiin maalla, merellä ja ilmassa. Lisäksi on käytössä sana lennokki, joka on lentämään tarkoitettu laite, jonka mukana ei ole ohjaajaa ja jota käytetään harraste- tai urheilutarkoitukseen. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom 2019a.)

Pääasiallinen tarkoitus näillä laitteilla on lentää ilmassa ennalta määritelty reitti oman paikannuslaitteen avulla. Laitteeseen ladataan ennen lentoa koordinaatit, joita seuraamalla laite ohjautuu automaattisesti hyödyntäen autopilot -toimintoa. Usein näissä laitteissa on myös mahdollisuus ohjata laitetta radio-ohjaimella tai

muulla vastaavalla tavalla käsin, jotta vika- tai vaaratilanteista voidaan selvittää ilman vaaran aiheuttamista ympäristölle. (Hassinen 2016, 7.)

Lainsäädännön ja asetusten sekä ohjeistuksen takia on merkityksellistä aina miettiä, mitä laitteella tehdään sen ollessa ilmassa. Mikäli laite on ilmassa täysin harrastus- tai urheilukäytössä, kutsutaan laitetta lennokiksi. Tällöin laitetta koskevat lainsäädännön ja asetusten kohdat, joissa puhutaan lennokista. Mikäli laite tekee ilmassa jotain muuta, on se laskettavissa lentotyöksi. Lentotyötä on kaikki sellainen ilmailu, joka on rinnastettavissa ansiotarkoituksiin. Tässä tapauksessa laitetta kutsutaan UA-laitteeksi ja sitä koskevat lainsäädäntö ja asetukset sen mukaisesti. Tähän erotteluun palataan lainsäädäntöä koskevassa kappaleessa tarkemmin. (Hassinen 2016, 7.)

2.2 Miehittämättömän ilmailun historia

Kuten varsin monen muunkin teknologian alkujuuret pohjautuvat ja tulevat sotilaallisista tarkoituksista, niin on myös miehittämättömässä ilmailussa. UAV-laitteiden innovointi alkoi 1900-luvun alkupuolella, jolloin alettiin ennen ensimmäistä maailmansotaa kehittää prototyyppisiä miehittämättömiä lentokoneita. Tätä ennen itävaltalaiset tosin olivat jo käyttäneet sotilastarkoituksissa vuonna 1849 kahtasataa miehittämättömää kuumailmapalloa, jotka oli varustettu pommeilla. Tätä pidetään jossain määrin miehittämättömän ilmailun sodankäynnin alkupisteenä. (Shaw 2014.)

Ehkä kuitenkin vuonna 1896 tehty ensimmäinen onnistunut miehittämätön höyryvoimainen Samuel P. Langley'n kehittämä aerodrome on ensimmäinen todellinen miehittämätön ilma-alus. Laite onnistui lentämään onnistuneesti lähellä Washington D.C:tä olevalla Potomac joella. Ensimmäisen kerran tuon tapaista miehittämättömää ilma-alusta käytettiin sotilaallisesti vuonna 1898 Espanjan ja Yhdysvaltain välisessä sodassa. Yhdysvaltain armeija asennutti kameran vastaavanlaiseen ilma-alukseen ja onnistui ottamaan sillä kuvia, jotka ovat tietävästi ensimmäisiä miehittämättömästä ilma-aluksesta otettuja ilmatiedustelukuvia. (Shaw 2014.)

Ensimmäisen maailmansodan aikana ilmatiedustelu miehittämättömillä ilma-aluksilla kasvoi räjähdysmäisesti. Esimerkiksi kuninkaallinen lennosto otti yli

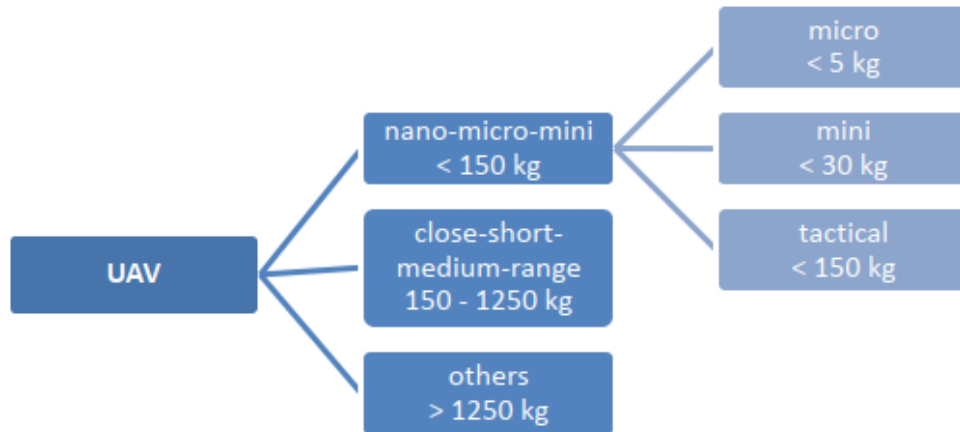
19 000 ilmakuva, jotka yhdisteltiin ilmakuvaamosaikeiksi. Näistä voitiin sitten tutkia vihollisten liikkeitä ja joukkojen sijoittelua. (Shaw 2014.)

Tämän jälkeen miehittämättömiä ilma-aluksia kehitettiin ja niiden kantokykyä saatiin nostettua toiseen maailmansotaan mennessä, jotta niiden kanssa voitiin kuljettaa pommeja vihollisen alueelle. Kylmän sodan aikoihin teknologian kehittyminen vasta alkoi olla riittävällä tasolla siihen, että aluksien navigointi ja ohjailtavuus parani. Yhdysvalloissa oli valtava määrä erilaisia protoja, joita kehitettiin yhdessä erilaisten toimijoiden kanssa, ja joita testailtiin esimerkiksi Area 51:llä. Nykyisin näissä laitteissa on valtavasti tekniikkaa ja vakoilu- sekä kantokykyä mahdollistavia tekijöitä. (Shaw 2014.)

2.3 UA-järjestelmä

Kuten edellä olevassa kappaleessa todettiin on miehittämättömien ilma-alusten kehitys alkanut sotilaallisista tarkoituksista. Nykyään kuitenkin on olemassa paljon muitakin sovellutuksia, mihin näitä laitteita käytetään. Kansan tietoisuuteen on viime vuosien aikana tullut kansankielisen nimityksen saaneet dronet. Tämä lienee parhaiten kansan tiedossa oleva miehittämättömän ilmailun tuote: pieni yleensä 4 tai 6 moottoria sisältävä helikopterimainen laite, joka toimii sähköllä. Todellisuudessa kuitenkin miehittämättömän ilmailun ilma-alukset ovat kehittyneet niin monenlaisiksi, että jaottelua voidaan tehdä koon, muodon, toimintatavan tai vaikka käytettävän energiamuodon mukaisesti.

Yleisin tapa luokitella miehittämättömät ilma-alukset on jaotella ne koon mukaan. Usein koko korreloi myös lentomatkan kanssa. Edellä mainittujen seikkojen perusteella voidaan tehdä kolme luokkaa (Kuva 2), joista pienin luokka koostuu nano-micro-mini -laitteista. Näistä esimerkkinä voidaan ottaa miniluokan laite, jonka kantosäde on 10km ja lentoonlähtömassa 30kg. Keskikokoiset laitteet kuuluisivat close-short-medium-range UAS laitteisiin, joiden lentoonlähtömassa olisi 150–1250kg välillä ja operaatiomatka 10–70km. Suurimpaan luokkaan sitten kuuluisivat vielä isommat laitteet, joita käytetään juuri esimerkiksi sotilaallisissa tarkoituksissa. (Colomina & Molina 2014, 81–82.)



Kuva 2. Miehitämättömien ilma-alusten luokittelu (Teittinen 2017)

Kuten on todettu, miehitämättömän ilmailun laitteet ovat tulleet sotilasteollisuudesta ja vaikka ne ovat olleet laajemman mielenkiinnon kohteena sekä keskusteluissa vasta reilun vuosikymmenen, ovat ne kuitenkin olleet esimerkiksi meteorologien käytössä jo ennen 2000-lukua. Suurin muutos on tapahtunut vuosien 2005–2013 välillä, jolloin kaikkien UA-järjestelmien määrä on kolminkertaistunut. Kehitykseen ja suosion kasvuun on suurimpana tekijänä vaikuttanut tekniikan kehittyminen, laitteita avustavien sensorien parantuminen ja lentoonlähdön sekä paluun yksinkertaistuminen. (Colomina & Molina 2014, 81–82.)

Miehitämättömän ilmailun laitteet koostuvat periaatteellisesti kaikki samoista komponenteista riippumatta siitä, miten isosta tai minkä mallisesta laitteesta on kyse. UA-laitteiden sisältämät komponentit esimerkiksi 4-roottorisen kopterin osalta ovat runko, kontrolliyksikkö, radiosignaalin lähetinvastaanotin, navigointijärjestelmä (GPS ja INS), akusto, moottoreiden nopeus ja suunta säätelijät, moottorit, propellit sekä halutuista ulkoisista sensoreista ja niiden lähettimistä esim. kamera ja kuvasignaali. (Teittinen 2017, 6–7.)

Tällä hetkellä suuren suosion ovat saaneet juuri edellisessä kappaleessa esimerkkeinä käytetyt 4-roottoriset joko ”plussan” tai ”ristin” malliset laitteet. Suosion väitetään olevan peräisi siitä, että kyseisen mallisia laitteita on edullista valmistaa ja niiden hallitseminen on huomattavasti helpompaa ja yksinkertaisempaa kuin esimerkiksi perinteisen mallisen helikopterin. Lisäksi jonkin verran käytössä on 6- tai 8-roottorisia malleja. (Teittinen 2017, 5–6.)

2.4 Miehittämättömän ilmailun lainsäädäntö

Suomessa siviili-ilmailun viranomaisena toimii Liikenne ja viestintävirasto Traficom. Traficom on esimerkiksi määritellyt Suomessa käytettävän terminologian miehittämättömän ilmailun osalta. Terminologia vastaa Yhdistyneiden kansakuntien alaisen Kansainvälisen siviili-ilmailujärjestön ICAO:n (International Civil Aviation Organisation) työryhmissä ja standardien kehitystyössä käytettyä sanastoa. Tällä pyritään tekemään erot selviksi siitä, mikä on lentotyötä suorittavan ja harrastus- tai urheilukäytössä olevan miehittämättömän ilma-aluksen ja lennokin ero. (Mansikkaniemi 2019, 4–5.)

Suomi tunnetaan varsin vapaana maana miehittämättömän ilmailun osalta. Muualla muussa maassa onkin huomattavasti tiukempi lainsäädäntö kuin Suomessa. Lainsäätäjillä ympäri maailman on ollut ongelmia viime vuosien aikana ja viime aikaisten tapahtumienkin vuoksi siinä, mitä laissa tulisi säätää miehittämättömästä ilmailusta.

Suomessa miehittämättömiä ilma-aluksia koskeva lainsäädäntö on myös hajautunut useaan eri säännökseen sekä lakiin. Suuressa mittakaavassa Suomessa voimassa oleva sääntely voidaan jakaa kahteen osaan: Sääntelyyn, joka tapahtuu liikennealan normeissa sekä sääntelyyn, joka tapahtuu muualla kuin liikennealan normeissa. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom 2019b.)

Tärkein yksittäinen normi, joka sääntelee miehittämättömää ilmailua Suomessa, on ”Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lennättäminen OPS M1-32”. Edellä mainittua määräystä sovelletaan kauko-ohjattujen ilma-alusten sekä yli 250 g painavien lennokkien lentämiseen Suomessa. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom 2019b.)

Määräyksessä on säädetty esimerkiksi miehittämättömän ilma-aluksen lennättämisen turvarajoista. Turvarajat on määritelty niin vaaka -kuin korkeussuunnassa esimerkiksi kiitoteihin, alukseen oltavasta näköyhteydestä, aluksen ohjailtavuudesta, aluksen painosta, sen lennättämisestä kokoontuneen väkijoukon yllä tai tiheästi asutulla alueella sekä muista tärkeistä turvalliseen lentämiseen liittyvästä

seikasta. Lisäksi tärkeänä asiana on eroteltu lentotyön ja harrastuksen ja urheilumielessä tapahtuvan lentotyön ero ja sääntelyeroavaisuudet. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom 2019b.)

Kuten edellä mainittiin, on miehittämätöntä ilmailua koskevia säännöksiä myös useita muita. Näitä ovat esimerkiksi EU:n komission asetus 923/2012 sekä SERA-lentosäännöt. Lisäksi on esimerkiksi ilmailulain 864/2014 tiettyjä pykäläitä, jotka koskevat miehittämätöntä ilmailua. Valtioneuvoston asetus 930/2014 ja yhtenä merkittävänä ilmailun vakuutusasetus (EY) N:o 785/2004, joka esimerkiksi määrittelee lentoliikenteen harjoittajia ja ilma-alusten käyttäjiä koskevista vakuutusvaatimuksista. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom 2019b.)

Muulla kuin liikennealan normeissa tapahtuvaa sääntelyä on esimerkiksi yksityisyyden suoja, kotirauha, tietosuojat, yleinen järjestys ja turvallisuus. Melu, luonnonsuojelu yms. ympäristöasia pitää myös huomioida lentotyötä ja harrastamista suorittaessa. Yhtenä huomiona on vielä otettava varsinkin, mikä lentotyötä/harrastusta tekee itserakennetuilla laitteilla, on käytettävät radiotaajuudet ja signaalien lähetys/vastaanotto tehot. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom 2019b.)

Koska sääntely on ollut niin rikkonaista eri maiden osalta, on EU tasoista sääntelyä lähdetty kehittämään. Uusi EU-tasoinen sääntely on astumassa voimaan 1.7.2020. Suurin ero sääntelyssä on ilma-alusten ja lennokkien erottelun poistuminen ja kaikille saman sääntelyn noudattaminen. Samoin uutena tulee kaikille pakollinen rekisteröityminen ja lentotoiminnan kategorisointi lentotyön vaativuuden mukaisesti. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom 2019c.)

RPAS-järjestelmän käyttö maanmittauksessa

2.5 Käyttötarkoitukset

Miehittämättömät ilma-alukset ja fotogrammetria sekä kaukokartoitus on esitelty ja yhdistetty toisiinsa jo useita vuosikymmeniä sitten. Kuitenkaan ei voida todeta, että niitä olisi käytetty kovin tehokkaasti kuin vasta muutamia vuosia, suurin kehitysaskel on otettu oikeastaan viimeisen 10vuoden aikana. Syynä voidaan ehkä pitää sitä, että UA-laitteiden kehitys on ollut huimaa, samoin esimerkiksi kamera-sensoreiden koko tuotettuun kuvaan nähden on parantunut huimasti. (Teittinen 2017, 7.)

RPAS-järjestelmiä on nykyään järjestäen kaikilla isoilla mittaus ja kartoitustöitä tekevillä yrityksillä, kunnilla ja kaupungeilla sekä valtiollisilla toimijoilla. UA-laitteet ovat yleistyneet ja niiden potentiaali on ymmärretty. Fotogrammetrian avulla karttoja voidaan päivittää nopeasti ja edullisesti. Samoin UA-laitteilla voidaan seurata ja monitoroida sekä valvoa esimerkiksi rakennustyömaita sekä rakenteiden muutoksia. Samoin ne sopivat hyvin erilaisten kasojen tilavuuksien mittaamiseen ja läjitysten laskentaan (Honkavaara, Hakala & Nevalainen 2018, 8–11.)

Muita sovellutuksia joissa RPAS-järjestelmää hyödynnetään, on ainakin maa-ainesvarastojen laskenta tai maamassojen tilavuuden laskenta, infrarakentaminen, kaivosteollisuus, energiateollisuus, kaupunkisuunnittelu, täydennyskartoitus sekä muissa ympäristösovellutuksissa. (Sippo 2013, 35.)

Lopputuotteina yleisesti UA-laitteella suoritettujen kartoituslennon prosessista saadaan ortokuva tai tosiortokuva, fotogrammetrisesti laskettu pistepilvi sekä 3D-mesh malli kuvatusta alueesta. Näistä tuotteista voidaan sitten jalostaa esimerkiksi erilaisia pintamalleja kuten DTM, DSM ja DEM.

Maanmittauslaitos on ottanut RPAS-järjestelmän tuottaman kartoitusaineiston käyttöön pilottimielessä ainakin yleisten alueiden lohkomisessa, rantarajan määrittämisessä sekä lunastus- tai halkomistoimitusten katselmointitarkoituksessa. Lisäksi käynnissä on ollut diplomityö lunastustoimituksen inventointi mielessä. (Syväjärvi 2017, 7.)

2.6 RPAS-tuotantoprosessi

RPAS-tuotanto prosessi on hyvin kuvattuna Kansallisen maastotietokanta-hankkeen yhteydessä (Kuva 3). Prosessi on jaettu karkeasti kolmeen osaa, joiden sisältö on kuvattu tarkemmin. Kolme pääosaa ovat suunnittelu, tiedonkeruu ja aineistokäsittelyvaihe. (Kansallinen maastotietokanta-hanke (KMTK) 2016-2017.)

1. Suunnittelu

- Yleinen suunnittelu ja päätös tiedonkeruumenetelmästä
- Luvat, määräykset ja riski- ja turvallisuusarvio
- Kartoitettavan alueen perehtyminen
- Mittaussuunnitelma

2. Tiedonkeruu

- Maastotuen mittaus
- Mittauslennon suoritus

3. Aineiston käsittely

- Fotogrammetrinen prosessointi
- Lopputuotteet: Ortokuva, pistepilvi, maastomalli yms.
- Aineiston laadunvarmistus
- Aineiston jatkokäsittely (esim. vektorointi)

Kuva 3. RPAS-tuotantoprosessi (Kansallinen maastotietokanta-hanke (KMTK) 2016-2017.)

2.6.1 Suunnitteluvaihe

Ensimmäisenä vaiheena on yleinen suunnittelu, jonka kautta pystytään tekemään johtopäätös siitä, mikä onärkevin tiedonkeruumenetelmä hankkeelle. Näihin päätöksiin vaikuttavia tekijöitä on työalueen ja kartoitettavien kohteiden ominaisuudet sekä esimerkiksi lopputuotteen tarkkuusvaatimukset. Mikäli yleisen suunnittelun päätöksenä on jatkaa hankkeen toteuttamista RPAS-järjestelmällä, tulee seuraavana vaiheena tutustua työalueella tarvittaviin lupiin, määräyksiin ja mahdollisiin riski- ja turvallisuusarvioihin. Mikäli tarvitaan lupia esimerkiksi puolustusvoimilta tai Traficomilta, on lupahakemukset tehtävä huolellisesti ja riittävän ajoissa. Lupien kanssa samanaikaisesti voidaan alkaa laatia tarkemmin mittaussuunnitelmaa, joka pitää sisällään lentosuunnitelman laatimisen, maastotuen suunnittelun sekä sensorin valinnan, mikäli sitä ei ollut vielä tehty aiemmassa

vaiheessa. Jo yleisessä suunnitteluvaiheessa kävi ilmi lopputuotteille määritellyt geometriset tarkkuusvaatimukset, joten ne pitää huomioida lentosuunnitelmaa laadittaessa, esimerkiksi lentokorkeus vaikuttaa tuotettavan ortokuvan maastoresoluutioon eli GSD:hen. Näin ollen lennon parametrit ovat suunniteltava niin, että saavutetaan haluttu tarkkuus tuotettavalle ortokuvulle. Yleisesti ilmakuvauksuunnitelma laaditaan käytössä olevan ilma-aluksen ja siinä käytössä olevan autopilotin ohjelmistolla. Ilmakuvauksuunnitelma tulee muistaa laatia siten, että toimitaan määräysten ja turvallisuusohjeiden mukaisesti sekä mikäli on tarvittu erillisiä lupia niin nämä huomioidaan. Aineiston absoluuttinen taso- sekä korkeus-tarkkuus määräytyy aineiston sitomisesta tai muunnoksesta haluttuun koordinaattijärjestelmään. Tämä työvaihe tehdään maastotukipisteiden (GCP) avulla. Maastotukipisteiden koordinaatit mitataan maastossa tarkasti sekä huolehditaan riittävästä näkyvöittämisestä kuville. Yleisesti voidaan todeta, että tuotettavasta aineistosta ei voi tulla tarkempaa, kuin mitä sen sitomiseen käytettävien maastotukipisteiden tarkkuus on. Mikäli kantoaluksessa on valmiudet käyttää jälkilaskennallista paikannusjärjestelmää ja hyvää inertialaitetta, voidaan maastotukipisteiden määrää ainakin laskea, jopa poistaa kokonaan. (Kansallinen maastotietokanta-hanke (KMTK) 2016-2017.)

2.6.2 Tiedonkeruu

Vaikka työ olisi suunniteltu huolellisesti tulee työmaalle tullessa varautua suunnitelman muutoksiin. Lopullinen päätös työn suorittamisesta RPAS-järjestelmällä tehdään vasta paikan päällä. Tärkeintä tiedonkeruutilanteessa on huolehtia turvallisuudesta toiminnasta sekä selkeistä toimintamalleista virheiden ja riskien minimoimiseksi. Paikan päällä ennen lentoa tulee tehtäviksi lähtöpaikan lopullinen päättäminen, maastotukipisteverkoston luonti ja mittaus, mittauslaitteiston valmistelu ja varmistus niiden kunnosta. Kun edellä mainitut valmistelutehtävät on saatu suoritettua, tulee toiminnallisen RPAS-toiminnan aika, jolloin äärettömän tärkeää on, että lentotyöstä vastaava saa tehdä työnsä rauhassa. Lennon aikana tunnistettavia vaiheita ovat ainakin jatkuva ilma-aluksen ja ilmatilan tarkkailu, laitteiston välittämän telemetriatiedon tarkkailu (esim. akkuvaraus), nousu lentokorkeuteen, lentosuunnitelman toteutus sekä laskeutuminen. Heti lentotyön päätyttyä on hyvä tarkistaa karkeasti, että kerätty materiaali on laatutasoltaan riittävää.

Mikäli aineistossa havaitaan parannettavaa, voidaan asetuksia lentosuunnitelmassa tai esimerkiksi kamerassa säätää ja suorittaa lento uudelleen. Lopuksi kerätään maastoon mahdollisesti levitetyt maastotukipisteet pois. (Kansallinen maastotietokanta-hanke (KMTK) 2016-2017.)

2.6.3 Aineistokäsittely

RPAS-toiminnan lisääntymisen yhtenä pääsyynä voidaan varmasti pitää aineistojen käsittelyohjelmistojen suurta kehitystä. Varsinaisesti ohjelmistoissa ei varmasti ole niin suurta kehitystä tapahtunut, kuin mitä on tapahtunut sitä suorittavissa tietokoneissa. Laskentatehot ovat nykyään kasvaneet niin suuriksi, että suuri määrä manuaalista työtä on voitu automatisoida, kuten esimerkiksi vastinpisteiden osoittaminen. Nykyaikaiset fotogrammetriset ohjelmistot ovat yhdistelmä konenäköä ja fotogrammetriaa. Kuten mainittu, niin suurten 3D-aineistojen tuottaminen 2D-aineistoista on tullut mahdolliseksi laskentatehojen ja -menetelmien kehittymisen seurauksena. Prosessit ohjelmistoissa on nykyään varsin automatisoituja, eikä käyttäjän tarvitse tehdä prosessoinnin aikana oikeastaan käsin kuin yksi työvaihe. Käyttäjälle jää tehtäväksi kuva-aineiston visuaalinen tarkastus sekä huonojen ja ylimääräisten kuvien poistaminen aineistosta. Näiden lisäksi käyttäjä syöttää jäljelle jäävät kuvat ohjelmalle, valitsee halutulle loppuaineistolle sopivat parametrit, osoittaa maastotukipisteet sekä lopputarkastaa aineiston prosessoinnin päätteeksi ja varmistuu halutusta tarkkuudesta. Ohjelmistot saattavat toimia hieman eritavoin, mutta pääpiirteittäin ohjelmiston toiminta etenee seuraavasti. Ohjelmisto lähtee tutkimaan kuvia ja irrottaa niiden piirteet ja alkaa yhteensovittamaan näitä piirteitä toisiinsa kuvien päällekkäisiltä osilta. Tämän jälkeen ohjelmisto tekee kameran alustavien orientointitietojen ratkaisun ja näiden perusteella laskee harvan pistepilven. Tätä seuraa kuvien blokkitasoitus, jossa pistepilveä tarkennetaan ja orientointitietojen tarkkuus paranee. Tämän jälkeen ohjelma tekee tiheän pistepilven laskennan, joka sitten viimeisessä vaiheessa toimii kaikkien lopputuotteiden pohjana. Lopputuotteita usein ovat pintamalli, ortokuva, pistepilvi ja mesh-malli. Usein ja yleisesti prosessoinnin jälkeen saadaan myös kameran parametrit sekä kuvien tasoitettut sijainnit eli orientointitiedot, sekä raportti miten prosessointi onnistui esimerkiksi maastotukipisteisiin nähden. On tärkeää osata tehdä aineistolle riittävän tarkka tarkistus esim. tarkistuspisteiden avulla, jotka eivät ole mukana prosessoinnissa, mutta ovat maastossa tarkasti

mitattuja kohteita. Tällaisista pisteistä voidaan ainakin useissa ohjelmistoissa ajaa ulos raportti, miten tarkastuspisteet sopivat laskettuun projektiin. Ohjelmilla tuotetut aineistot pääasiassa tarvitsevat aina lisätyöstämistä, jotta saavutetaan haluttu aineisto, esimerkiksi kantakartan vektoriviivat. Näitä ohjelmistoja on useita, jossa esimerkiksi pistepilveä voidaan jatkokäsitellä sekä analysoida. Niihin ei paneuduta tässä tarkemmin. Aineistoa yleisesti myös yhdistellään toisten tiedonkeruumenetelmien kanssa. Esimerkiksi mobiiliskannauksella tuotettua pistepilveä ja fotogrammetrisesti tuotettua pistepilveä yhdistellään, jolloin molempien järjestelmien heikkoja kohtia voidaan täydentää keskenään. Mobiiliskannauksesta pois jäävät esimerkiksi rakennustenkatot saadaan fotogrammetrisesti tuotetusta ja taas julkisivut ja puiden aluset, jotka jäävät fotogrammetrisestä uupumaan saadaan mobiiliskannauksesta. (Kansallinen maastotietokanta-hanke (KMTK) 2016-2017.)

3 RPAS-JÄRJESTELMÄN KÄYTTÖ TURUN KAUPUNGISSA

3.1 RPAS-järjestelmän hankinta

Opinnäytetyön tekijä tuli Turun kaupungin palvelukseen tammikuussa 2017. Vakanssin yhtenä suurimpana tehtäväkuvauksessa olleena kohtana oli uusien mittausmenetelmien käyttöönotto ja hyödyntäminen. Kaupungilla oli ajatuksena, että uusia mittausmenetelmiä pitäisi kokeilla vanhojen toimivien lisäksi, jotta sitä kautta saataisiin mahdollisesti lisätehokkuutta työn tekemiseen. Yhtenä asiana toivottiin uusilta mittausmenetelmiltä hankalien työturvallisuutta vaarantavien kohteiden turvallisempi ja tehokkaampi mittaus.

Kaupungilla oli RPAS-järjestelmistä kokemusta aiemmilta vuosilta, sillä Turussa oli tehty konsultin toimesta kiinteäsiipisen miehittämättömän ilma-aluksen kanssa muutamia alueita vuonna 2012. Näiltä alueilta konsultti oli lopputuotteena toimitanut ortokuvan. Tuolloin kuitenkin lopputuotteeseen ei oltu tyytyväisiä, eikä näin ollen yhteistyötä konsultin kanssa jatkettu.

Kaupungilla kuitenkin haluttiin yrittää pysyä kehityksessä mukana. Tästä johtuen tammikuussa 2017 alkoi taas aika olla kypsä siihen, että lähdettiin miettimään RPAS-järjestelmää. Osasyynä siis sysäykselle toimi opinnäytetyön tekijän uusi vakanssi organisaatiossa. Espoon kaupunki oli ottanut RPAS-järjestelmän käyttöön edellisen kesän ja syksyn aikana. Tämä kiinnosti ja siksi Turusta lähti muutamien ihmisten delegaatio tutustumaan Espoossa olevaan laitteistoon sekä siitä tuotettuun materiaaliin tammikuussa 2017. Espoossa käytössä ollut järjestelmä oli Suomessa hyvin yleisesti käytössä oleva VideoDronen valmistama GeoDrone. Käsittelysovelluksena Espoossa käytettiin Agisoft PhotoScan ohjelmistoa. Vierailu oli hyvä, mutta kuitenkin sen jälkeen iski huomattava epävarmuus, onko järjestelmä kuitenkin kovin ketterä, prosessointiajat tuntuivat todella pitkiltä eikä laitteisto kokonaisuudessaan jotenkin vakuuttanut Espoossa vierailulla mukanaolleita. Lisäksi järjestelmän kokonaishinta oli huomattava.

RPAS-järjestelmän hankinta oikeastaan jäi tämän jälkeen 1,5kk ajaksi kokonaan. Uutena työntekijänäkkään ei ollut vielä aikaa keskittyä asian tutkimiseen enempää, vaan muita töitä oli riittävästi. Uudelleen RPAS-järjestelmä tuli pinnalle maaliskuun puolessa välissä. Itselläni tuolloin oli UA-järjestelmistä kokemusta, sillä

omistin tuolloin DJI Phantom 3 Professional laitteen, joka oli ollut itselläni noin puoli vuotta. Olin useasti törmännyt internetissä Pix4D ohjelmistoon, josta löytyi myös lennätykseen sovellus Pix4DCapture. Tämän sovelluksen luvattiin tuolloin juuri toimivan jopa parhaiten itselläni olleen kopterin kanssa, joka oli tuolloin kuluttajamarkkinoilla saatavista miehittämättömistä ilma-aluksista hyvin yleinen. Omistin myös kohtuullisen tehokkaan tietokoneen, jolla voisin kokeilla Pix4D ohjelmistosta saatavaa 30 päivän kokeiluversiota.

Tein testilennon ohjelmistolla ja prosessoin sen tietokoneella. Tuolloin heti ymmärsin, että tästä saattaa tulla läpimurtohomma töissä, kun aineiston siellä esitelen. Tuolla testilennolla, en vielä tietenkään saanut käytettyä mitään maastotukipisteitä tai muuta ammattilaisten käyttämää koordinaatistoa, vaan aineisto oli ilma-aluksen tukemassa WGS84-koordinaatistossa. Itselläni ei siis ollut mitään käsitystä sen tarkkuudesta. Kuitenkin se, mikä oli silmiinpistävää, oli prosessoinnin nopeus, lennon suorittamisen yksinkertaisuus sekä ilma-aluksen halpa hinta, jolla tämä aineisto saatiin aikaiseksi, verraten Espoon vierailulla tutustumaamme kokoonpanoon.

Seuraavalla viikolla kokeilimme työkaverin kanssa uudelleen saman alueen lentämistä niin, että rakensimme maastotukipisteet ja toteutimme lennon. Tämän lennon aineistoa pystyttiin sitten jo vertailemaan olemassa olevaan muuhun aineistoon, kuten ilmalaserskannaukseen ja kantakarttaan. Tarkkuuden todettiin luultavimmin riittävän, mikäli saisimme prosessin hiottua ja lisää ymmärrystä, miten RPAS-järjestelmä prosessointi ohjelmistoinen ja laitteinen toimii halutulla tavalla.

Nämä testit osoittivat sen, että varsin edullisella kuluttajamarkkinoille suunnatulla laitteella pystytään hyvissä olosuhteissa, hyvällä ammattitaidolla ja kokemuksella varmasti saamaan riittävän laadukasta aineistoa, jota sitten voidaan jatkokäsittellä lopputuotteiksi, kuten kaupunkimalliksi.

Näiden testien jälkeen päätettiin lähteä edistämään RPAS-järjestelmän hankintaa sillä, että kartoitetaan markkinoilla olevat järjestelmätarjoajat tarkemmin. Laitteelta kuitenkin haluttiin varmuutta ja mahdollisuuksien mukaan huoltosopimus, joten tämän takia suoraan kuluttajille suunnatut aivan halvimmat laitteet jätettiin

pois. Laitteistotoimittajien kartoittamisen yhteydessä myös hieman tutkittiin saatavilla olevia prosessointiohjelmistoja. Loppupeleissä yhteensä vertailuun tuli kolmen eri toimittajan laitteistoa. Nämä laitteistot olivat GEOTRIM OY/GeoDrone X4L, Dronelytics/AscTec Falcon 8 sekä Dronefactory/DJI Matrice 210. Laitteistotoimittajilta pyydettiin laitteistoesittelyt Turkuun. Valitettavaa oli, että ainoastaan GeoDrone X4L laitteistoa päästiin oikeasti testaamaan Turussa, testilento tapahtui 24.5.2017. AscTec Falcon 8 laitteistosta pidettiin 18.4.2017 esittely Turussa. DJI Matrice 210 laitteistosta ei koskaan pidetty erillistä esittelyä eikä testausta Turussa. Tämä johtui siitä, että laitteisto oli tulossa markkinoille eikä sen saapumisesta ollut täyttä varmuutta. DJI oli luvannut laitteet markkinoille Q1/2017 aikana ja lopun viimeksi ne saatiin aivan Q4/2017 alussa. Meillä oli kuitenkin tieto kyseisen laitteiston kyvystä, sillä kamera, joka laitteen mukana oli mahdollista hankkia, oli tiedossa ja siitä oli olemassa testejä ulkomailta.

Esittelyn jälkeen pyysimme kaikista laitteista tarjoukset laitetoimittajilta. Tarjousten toimittamisen jälkeen tarjoukset käytiin läpi ja lopputuloksena päädyttiin hankkimaan Dronefactory/DJI Matrice 210 laitteisto. Laitteistovalintaa puolsi kokemus DJI-laitteistoista testialueidemme osalta, laitteiston yksinkertaisuus, Pix4DCapturen luvattu tuki laitteelle sekä yhtenä merkittävänä osana laitteen lähes puolta halvempi hankintahinta toisiin laitteistoihin nähden. Hankinnassa ajateltiin myös, sitä, että mikäli laitteisto osoittautuu huomattavan tehokkaaksi ja järkeväksi on helpompi lähteä päivittämään laitteisto kokemusten perusteella kalliimpiin kuin hankkia kallis laitteisto välittömästi. Samalla oltiin tultu siihen lopputulokseen prosessointiohjelman kanssa, että päätettiin valita ainakin aluksi vuoden lisenssillä Pix4DMapper ohjelma, sillä sen oli todettu olevan yksinkertainen ja tehokas. Laitteiston luovutus sekä luovutuskoulutus pidettiin Turussa 2.11.2017

3.2 Järjestelmä ja ohjelmisto

3.2.1 RPAS-laitteisto

Turun kaupungin RPAS-järjestelmä sisältää UA-laitteena DJI Matrice M210 ilma-aluksen. DJI Cendence radio-ohjaimen, jonka kanssa ilma-alusta operoidaan, mikäli alusta halutaan lentää käsin. DJI CrystalSky 7.85” näyttölaitteen, jonka si-

sään on upotettu Android käyttöjärjestelmä, näyttölaitteeseen saadaan reaaliaikainen telemetriatieto sekä videokuva ilma-aluksesta. Lisäksi ilma-alukseen on hankittu 8 kpl akkuja, joita käytetään aina kahta kerrallaan, ilma-alus kykenee vikatilanteessa laskeutumaan pelkän toisen akun varassa. Akkulaturit akuille sekä kova kuljetussalkku koko laitteistolle.

DJI Matrice 210 ilma-alus on tietävästi ensimmäinen IP43 luokituksen saanut sarjavalmisteinen laite, joka siis kestää kevyessä sateessa lentämisen. Laitteen käyttölämpötila on -20°C asteesta aina 45°C asteeseen. Laitetta voidaan lentää maksimissaan 12m/s puhaltavassa tuulessa ja sillä voidaan lentää lähes 80km/h nopeudella. Lentoaika on hyvin riippuvainen kytketyistä sensoreista sekä käytetyistä akuista ja siksi se vaihtelee 13min ja 38min välissä. Kaupungilla olevan ilma-aluksen lentoaika käytössä olevalla sensorilla on noin 22min. Laitteen runkoon voidaan laittaa maksimissaan 2.3kg hyötykuormaa ja laite itsessään painaa noin 3.8kg. (DJI 2019.)

Mittauskäytössä olevan laitteiston tärkeimpiä komponentteja, ellei jopa tärkein on kamera. Turun RPAS-järjestelmässä on olemassa mahdollisuus kahden kameran yhtäaikaiseen käyttöön. Tätä ominaisuutta ei tosin vielä ole hyödynnetty. Kamerana järjestelmässä toimii Zenmuse X4S kamera, joka on DJI:n valmistama ja se saadaan integroitua suoraan Matrice 210 ilma-aluksen runkoon, kamera itsessään sisältää myös gimbalin joka hoitaa kameran vakautusta. Kamerassa on 1" kenno jossa on 20megapixeliä. Linssi on F/2.8-11, 8.8mm ja FieldOfView on 84 astetta. Kameralla otettavien kuvien koko on näin ollen 5472x3648 pikseliä, mikäli ne otetaan kuvasuhteessa 3:2. (DJI 2019.)

Syy miksi valitsimme kameraksi X4S kameran, vaikka muitakin mahdollisuuksia olisi ollut, löytyy kameran toiminnasta. Fotogrammetriassa kuvien laatu vaikuttaa suoraan lopputulokseen. Kuvien laatuun ja ottamisen taas vaikuttaa kamerassa monta tekijää, mutta yksi tärkeimmistä tekijöistä on suljin. Useimmin kameroissa on käytössä kahdenlaista suljinta, ns. rolling shutter sekä global shutter sulkimet ovat useimmin käytössä olevat (Kansallinen maastotietokanta-hanke (KMTK) 2016-2017). Suljin vaikuttaa siihen, miten otettava kuva valotetaan kennolle. Rolling shutter -tyyppisessä kamerassa kennoa valotetaan "liukuvasti" eikä kuva tartu kennolle yhdestä paikasta, mikäli ilma-alus liikkuu kuvanottohetkellä. Global

shutter taas valottaa kennon kerralla ja yhdestä paikasta eikä kuvaan tule vääristymää vaikka kamera liikkuisi ilma-aluksen mukana. X4S on siinä mielessä poikkeava kamera, että siinä ei ole kumpaakaan edellä mainituista suljintyypeistä. X4S kamerassa käytetään harvinaisempaa leaf shutter tyyppistä suljinta, joka aukeaa keskeltä reunoille päin näin valottaen kuvan yhdellä kerralla, ja siten käy fotogrammetriseen mittaukseen hyvin. Tätä suljintyyppiä käytetään usein teollisuuden tarkoitetuissa kameroissa. X4S kameraa on kehuttu myös sen muiden ominaisuuksien osalta juuri fotogrammetrisessä kuvauksessa. Kamerassa olevien linssien pitää olla myös laadukkaita, jotta vältetään linssivääristymiltä (GIM International 2019).

3.2.2 Prosessointiohjelmitot sekä -välineet

RPAS-järjestelmän hankinnan yhteydessä tuli tarpeellisesti tietysti hankkia prosessointiohjelmitot. Ohjelmistoja on saatavissa eri valmistajilta. Turussa kuitenkin päädyttiin samaan ohjelmistoon, millä ensimmäiset testit oli tehty eli sveitsiläisen ohjelmistotalon Pix4D tuoteperheeseen. Pix4D ohjelmisto lienee yksi käytetyimmistä fotogrammetrisen prosessoinnin ohjelmistoista, varsinkin miehittämättömän ilmailun saralla. Ohjelmistoon kuuluu nykyisellään useita eri lisenssejä. Turussa ohjelmistossa on käytössä ilmainen Pix4DCapture lentoreittien suunnitteluun sekä toteuttamiseen, sekä sen lisäksi työpöytäsovelluksena Pix4DMapper. Näiden lisäksi on satavilla erilaisia kevyempiä versioita erimerkiksi työmaille ja maatalouteen. Aineisto voidaan käsitellä paikallisesti työasemalla tai tietyissä tapauksissa voidaan aineisto käsitellä Pix4D:n pilvipalvelussa. Turussa kaikki aineisto käsitellään paikallisesti työasemalla, tämän on todettu olevan kätevä tapa, sekä myös tietosuojan takia hyväksi todettu. Tällä tavalla myös pystytään varmasti vaikuttamaan kaikkiin parametreihin, mitä ohjelmistolle voi antaa, samoin kuin maastotukipisteiden sijainnin osoittaminen on tehtävä käsityönä eikä automaattisesti. (Pix4D 2019.)

Fotogrammetrinen laskenta vaatii huomattavan määrän laskentatehoa ja -kapasiteettia sekä levytilaa tietokoneilta, jotka tätä työtä tekevät. Huomasimme tämän varsin nopeasti jo heti testiaineistojen kanssa, mutta samoin selvittäessämme riittävää konetehoa, jota Pix4D ohjelmistossa suositellaan. Tämän lisäksi piti miettiä, ettei kenenkään työt keskeydy aina ohjelman käytön ajaksi, sillä ohjelma

ottaa koneesta kaikki tehot irti mitä on käytettävissä. Turussa päätettiin tilata IT-palveluilta erillinen työasema, jonka pääasiallinen tehtävä on prosessoida RPAS-aineistoja. Samaisella työasemalla hoidetaan nykyään myös muita pidempiä aineistoajoja kuten FME-ohjelmiston työtiloja. Pix4D:n kannalta koneessa merkittävässä roolissa on prosessori sekä näytönohjain, lisäksi toki tarvitaan reilusti keskusmuistia ja mielellään prosessoinnin levytilaksi nopeaa ssd-levyä. Turussa olevassa ”tehkoneessa” on Intel Xeon E5-1650v4 3,6Ghz prosessori, 64Gt keskusmuistia, NVIDIA Quadro P4000 8 Gt näytönohjain sekä työkiintolevynä 512GB M.2 ssd. Lisäksi valmiiden töiden tallentamiseen on olemassa kovalevytilaa 3Tr ja lisää saadaan tarvittaessa irtokovalevyillä.

3.3 RPAS-tuotantoprosessi Turun kaupungissa

3.3.1 Suunnittelu

Aiemmin käytiin läpi RPAS-tuotantoprosessi yleisesti ja mitä pitää ottaa huomioon, kun tehdään RPAS-järjestelmällä esimerkiksi kartoitusta. Tässä ja seuraavissa kappaleissa käydään läpi tuotantoprosessia Turun kaupungissa. Kuten todettu RPAS-tuotantoprosessi alkaa suunnittelusta. Turussa suunnittelu alkaa sen jälkeen, kun tilaus on saapunut kaupungin käytössä olevaan tilausjärjestelmään katu- ja viheralueiden ylläpidosta vastaavalta henkilöltä, tai sitten mikäli kyseessä on muu RPAS-toimintaan liittyvä tilaus, voi se tulla myös muilta kaupungin osastoilta, kuten esimerkiksi vaikka kaavoituksesta tai katusuunnittelusta.

Suunnittelu aloitetaan yleisellä suunnittelulla, jossa valitaan käytettävä tiedonkeruumenetelmä. Tässä tapauksessa se oikeastaan tarkoittaa sitä, että tullaanko kohde mittaamaan maastossa perinteisin menetelmin vai hyödyntäen RPAS-järjestelmää. Vaikka käytettäisiin RPAS-järjestelmää, on maastossa todennäköisesti aina sellaisia kohteita, jotka mitataan perinteisin menetelmin samalla kun ollaan tekemässä lentotyötä. Valintaan vaikuttaa huomattavan paljon työmaan sijainti, sillä Turussa oleva lentokenttä rajoittaa jonkin verran RPAS-järjestelmän hyödyntämistä. Muita vaikuttavia tekijöitä on kartoitettavana olevan alueen suuruus, sillä muutaman pisteen takia RPAS-järjestelmällä tehtävänä on työ luultavasti huomattavasti työläämpi. Yksi RPAS-järjestelmän puolestapuhuva tekijä on

turvallisuustekijät ja tässä lähinnä se, että saavutetaanko RPAS-järjestelmällä työturvallisuuden kannalta jotain hyötyä.

Mikäli päädytään RPAS-järjestelmän käyttöön, perehdytään työalueeseen tarkemmin ja aloitetaan mittaus- sekä lentosuunnitelman laadinta. Usein mittaus-suunnittelusta ei tehdä mitään erillistä dokumentaatiota, vaan suunnittelu tapahtuu lähinnä olemassa olevien karttajärjestelmien avulla sekä hyödyntäen esimerkiksi tuoreinta saatavilla olevaa ilmakuvaa, johon on helppoa sijoitella avoimille paikoille tarvittavat maastotukipisteet. Maastotukipisteitä suunnitellaan hyvää ilmakuvaustapaa noudattaen mahdollisimman tasaisesti kaikille reunoille sekä yksi tai kaksi alueen keskelle estämään kuvablokin taipuminen. Maastotukipisteiden määrä on alueesta riippuen 6-10 tai jopa enemmän. Lentosuunnitelma laaditaan tässä kohdin hyödyntäen Pix4DCapture ohjelmistoa suoraan RPAS-järjestelmän CrystalSky näytöltä, jossa tarvittavat parametrit annetaan. On myös päätettävä, tehdäänkö lento yksinkertaisena grid-lentona vai ns. tupla grid-lentona. Mikäli alueella toimiminen vaatii lupia, tulee ne haettavaksi usein tässä kohdin ja sovittaa niiden aikataulu mittausaikatauluun. Turussa RPAS-lentotyötä rajoittaa Turun lentokentän CTR-alue, joka rajoittaa lentokorkeuden lähes kaikkialla maksimissaan 50m korkeuteen. Tähän haetaan useasti poikkeusta, jolloin lennonjohdon kanssa ollaan yhteydessä ennen lentotyötä. Suunnitteluvaiheessa on myös usein mukana säätiedotus esim. samalle viikolle, jota peilataan sopivaan mittauspäivään. Suunnittelun ohessa varmistetaan RPAS-järjestelmän komponenttien toiminta ja esim. akkujen varaus, joka on voinut laskea automaation takia, mikäli edellisestä latauksesta on aikaa. Kun suunnittelu on tehty huolella, ei maastossa tule useinkaan mitään yllättävää vastaan.

3.3.2 Tiedonkeruu

Suunnittelun jälkeen tiedonkeruvaiheessa jalkaudutaan maastoon. Ensimmäisenä maastossa on tehtävä päätös lopullisesta lähtöpaikasta ja rauhoitettava se muulta liikenteeltä ja yleisöltä. Turussa tähän käytetään mittausautossa olevia huomiotötteröitä. Lisäksi varmistutaan tässä kohdin lennon turvallisuustekijöistä kuten vallitsevasta säästä. Ihanteellinen sää on kirkas pilvipouta mahdollisimman tyynen tuulen kanssa. Näin ei tule auringosta häiritseviä kontrasti ongelmia. Seu-

raavaksi on suoritettava maastotukipisteverkoston luominen, johon on käytettävissä 10kpl 40*40cm kokoisia vanerilevyjä, joissa on ristikkäismaalaus mustavalkoisena 20*20cm maalauksena. Lisäksi voidaan käyttää maastossa olevia kohteita, kuten katumaalauksia. Maastotukipisteet mitataan GNSS-mittauksena useamman havainnon sarjoina. Maastotukipisteiden välissä laite alustetaan uudelleen paremman orientoinnin saavuttamiseksi, sekä mikäli yhdessä alustuksessa olisi virhettä niin kyseisen virheen minimoimista koko maastotukipisteverkkoon.

Seuraavana vaiheena on RPAS-järjestelmän kasaus ja lentoonlähtövalmistelut. Turussa olevan RPAS-järjestelmän kasaus pitää sisällään UA-laitteen kasaamisen, kuten jalkojen kiinnityksen, akkujen asentamisen, kameran kiinnittämisen, propelleiden kiinnityksen sekä muistikortin asentamisen. Lisäksi tarvitsee kiinnittää Cendence ohjain ja siihen liitettävä CrystalSky näyttö toisiinsa. Ennen lentoa tulee täyttää lentopäiväkirja sekä tarvittaessa lennon turvallisuusarviointilomake. Tämän jälkeen laitteisto käynnistetään ja varmistetaan, että laitteen alussa tekevät tarkistukset menevät läpi, eikä laitteelta tule virheilmoituksia. Tässä kohtaa on vielä hyvä tarkistaa lentosuunnitelma, sen parametrit ja varmistua esimerkiksi akkujen varaustasosta.

Lentoon lähtö tehdään Pix4DCapture ohjelmalla automaattisesti. Ohjelma käynnistää moottorit, sekä suorittaa ilma-aluksen noston haluttuun lentokorkeuteen. Tämän jälkeen ilma-alus suunnistaa autopilot-järjestelmälle ennalta määrättyyn lähtöpisteeseen ja alkaa suorittaa lentoreittiä hyödyntäen autopilot-järjestelmään tallennettua reittiä. Autopilot järjestelmä myös laukaisee kameran sille laskeutuisissa kohdissa, jotta haluttu pituuspeitto saavutetaan.

Kaikki RPAS-lentotoiminta tapahtuu VLOS-lentoina. Tämä pakottaa lentoalueiden pitämisen kohtuullisen kokoisina sekä ilma-aluksen jatkuvaa seuraamista taivaalla ilman apuvälineitä. Ilma-alusta voi toki seurata reaaliaikaisesti myös ohjaimen näytöstä, mutta on parempi pitää katse taivaalla, jolloin mahdolliset vaaratilanteet havaitaan välittömästi niiden synnyttyä tai jopa ennakoita pystytään estämään niiden syntyminen. Lennon aikana pyritään pitämään yhteys mahdollisimman hyvänä ohjaimen ja ilma-aluksen välissä, jotta ilma-alus reagoi tarvittaessa välittömästi sekä ohjaimessa pysyy reaaliaikainen telemetriatieto. Lentoon on mahdollista puuttua ohjaimen ohjaussauvoilla milloin vain lennon aikana, mikä

on äärettömän tärkeää turvallisen lentotoiminnan takaamiseksi. Kun ennalta määritelty reitti on lennetty, lentää ilma-alus autopilottia hyödyntäen lentoonläh-
töpisteeseen sekä aloittaa laskeutumisen. Koska lähes kaikki ohjaus tapahtuu
automaattisesti, on myös äärimmäisen tärkeää välillä totutella ohjaamaan ilma-
alusta käsin. Tästä johtuen on ollut tapana, että ilma-alus otetaan käsiohjauksen
avulla taivaalta alas. Tällä tavalla myös varmistutaan turvallisesta paikasta, johon
ilma-alus on laskeutumassa. Lisäksi on ollut tapana välillä lentää ilma-alusta täy-
sin vapaalennolla ja tämä toteutuukin esimerkiksi kaavoitukseen otettavien viis-
tokuvauksien suorittamisen yhteydessä loistavasti.

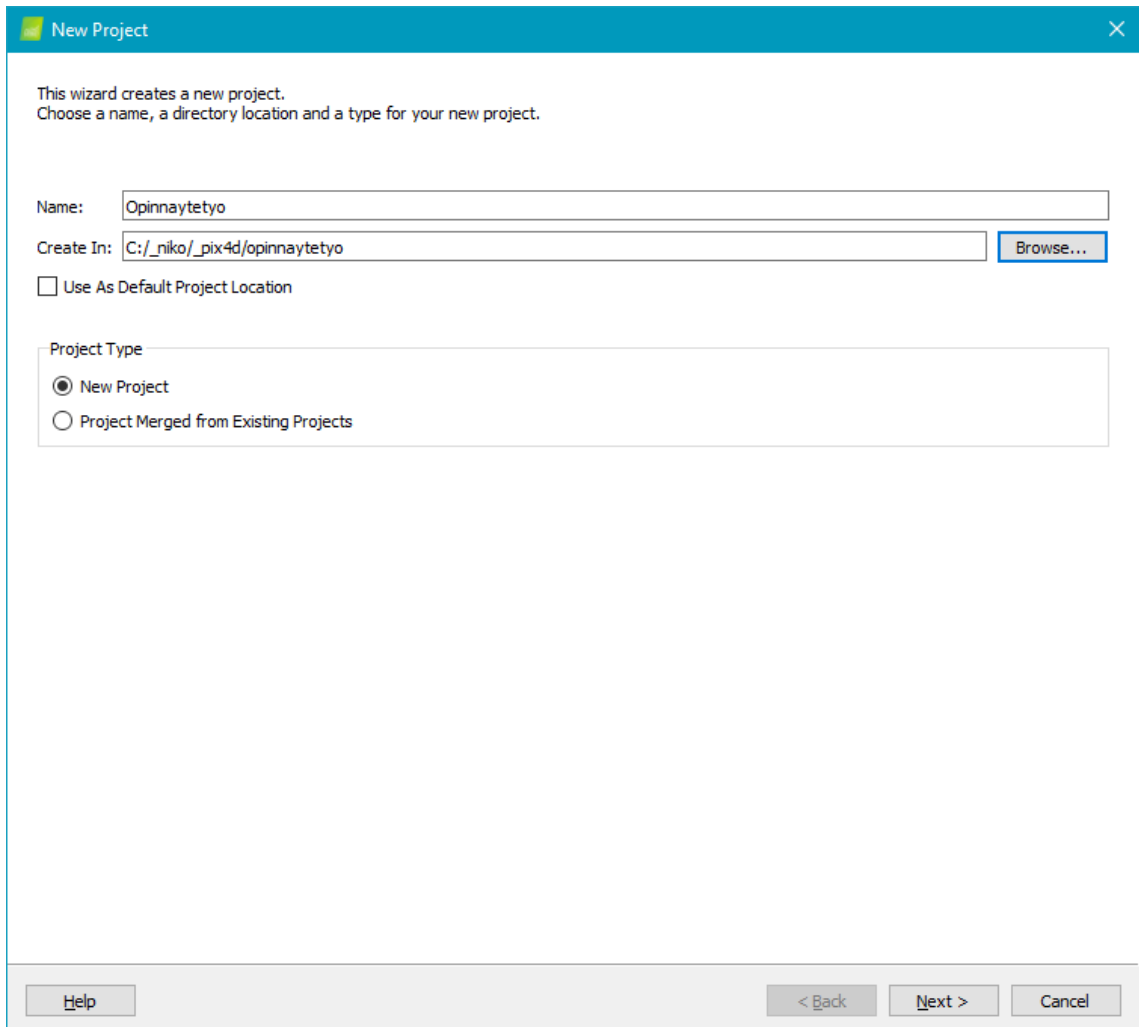
Kun ilma-alus on palautunut turvallisesti maanpinnalle, voidaan tarvittaessa suo-
rittava seuraava lento. On myös hyvä tarkistaa kuvattu aineisto karkeasti, että ai-
neiston laatu riittää prosessointiin. Mikäli uutta lentoa ei tarvita eikä alue ole laaja,
pakataan ilma-alus takaisin kuljetuslaukkuun ja kerätään maastosta tukipistever-
kon vanerilevyt pois, mikäli niitä on maastossa.

3.3.3 Aineistokäsittely

Kuten aiemmin todettu käytetään aineiston prosessoinnissa Pix4DMapper ohjel-
mistoa. Aineiston käsittely alkaa tiedostorakenteen rakentamisella käsittelyko-
neelle. Tämä on tärkeää, jotta prosessoitavat aineistot pysyvät järjestyksessä.
Tämän jälkeen kopioidaan muistikortilta lennon kuvat tiedostorakenteen
RAW_DATA-kansioon. Samoin tehdään tukipisteverkon mittausdatalle: se tallen-
netaan samaiseen kansioon nimellä GCP.csv, joka on puolipiste-eroteltu teksti-
tiedosto, joka sisältää pisteen numeron ja X-, Y- sekä Z-koordinaatit. Tämän jäl-
keen kuvat käydään yksitellen läpi ja poistetaan tärähtäneet sekä kiertyneet tai
muuten pilalle menneet kuvat aineistosta. Yleisesti kuvamäärä on niin suuri peit-
toprosenteista johtuen, että aineiston prosessointi ei kärsi vaikka kaikkia kuvia ei
olisi saatu täydellisesti. Nämä kuvat on parempi poistaa kuin jättää prosessointiin,
sillä ne saattavat taas tuottaa virhettä prosessoinnissa tai hidastaa sitä merkittä-
västi.

Tämän jälkeen aloitetaan varsinainen prosessointi Pix4DMapper ohjelmistolla.
Pix4DMapperissa luodaan projekti, jossa yksittäisen tai useamman lennon kuvat

samalta alueelta prosessoidaan. Toisaalta voidaan myös perustaa useampia projekteja ja yhdistää ne samojen pisteiden avulla toisiinsa jälkikäteen. Ensimmäinen tapa on ollut toistaiseksi ainakin Turussa käytetympi. Projektin luonnissa annetaan projektille nimi sekä kansio, jonka sisälle ohjelma luo tarvitsemansa kansiorakenteen prosessoinnin tueksi sekä valmiiden aineistojen tallentamiseksi. Lisäksi ohjelma tässä vaiheessa kysyy, yhdistetäänkö olemassa olevia projekteja vai luodaanko kokonaan uusi projekti (Kuva 4).



Kuva 4. Projektin luonti

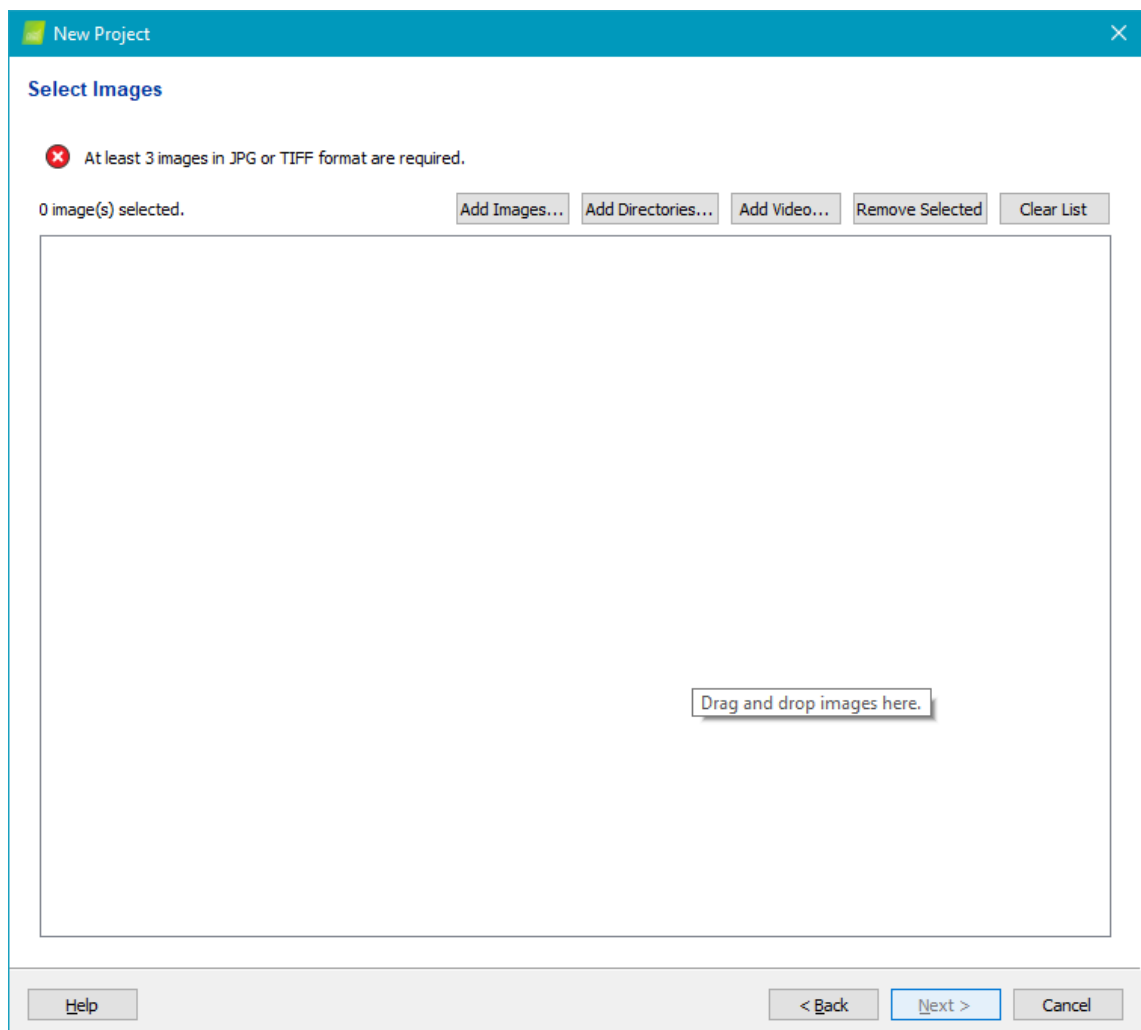
Kansiorakenne (Kuva 5) sisältää seuraavanlaiset kansiot: 1_initial, 2_densification, 3_dsm_ortho, temp ja tiedoston projektinimi.log. Kansio 1_initial sisältää prosessoinnissa tulevat kameraparametrit sekä kuvaorientoinnit ja hyvin kattavan raportin prosessoinnista. Kansioon 2_densification syntyy prosessoinnin tuloksena pistepilvi sekä ohjelman sisäisiä tiedostoja. Kansioon 3_dsm_ortho tulee

prosessoinnista syntyvä dsm-malli sekä ortokuva. Kansioon temp kasataan ohjelmiston tarvitsemia työtiedostoja.

Nimi	Muokkauspäivä	Tyyppi	Koko
1_initial	20.11.2019 17:16	Tiedostokansio	
2_densification	20.11.2019 19:34	Tiedostokansio	
3_dsm_ortho	20.11.2019 19:35	Tiedostokansio	
temp	21.11.2019 8:34	Tiedostokansio	
happilannotko_oja.log	1.12.2019 13:31	Tekstitiedosto	4 384 kt

Kuva 5. Kansiorakenne

Projektin luomisen jälkeen ohjelma pyytää siihen liittyviä kuvia (Kuva 6). Ohjelmalle voi antaa kuvat joko tiedostoina osoittamalla tai kokonaisena kansiona. Lisäksi ohjelma kykenee irrottamaan tietyistä videoformaateista kuvat projektiin, mikäli aineisto on kerätty videona.



Kuva 6. Kuvien lisäys ohjelmaan

Seuraavaksi kun kuvat on ladattu ohjelmaan päästään kuville antamaan parametrejä ennen niiden lisäämistä lopullisesti projektiin (Kuva 7). Mikäli kuvissa on sijaintitieto esimerkiksi exif-metatietona kuvaan sisäisesti upotettuna, lukee ohjelma sijaintitiedon automaattisesti. Mikäli näin ei ole, vaan kuvien sijaintitiedot ovat esimerkiksi erillisessä tiedostossa tekstinä, voidaan ne tuoda ohjelman tietoon tässä vaiheessa. Turussa käytössä oleva RPAS-järjestelmä tallentaa kuviin WGS84-koordinaatit, joiden tarkkuus on samaa luokkaa kuin esimerkiksi nykyisten matkapuhelimien. Tämän koordinaatiston ohjelma kykenee automaattisesti tunnistamaan. Ohjelmalle voidaan kertoa, kuinka tarkkoja arvoja kuvien sijainnit ovat. Turussa on erilaisten testilentojen ja prosessointien lopputuloksena tultu siihen, että tasosijaintitarkkuuden arvoksi annetaan 2.0 metriä ja korkeustasossa käytetään arvoa 4.0 metriä. Näillä arvoilla ohjelmaa autetaan päättämään, että kuva ei voi annetusta sijainnista olla tuon kauempana, eikä sitä siten aleta sovittamaan työalueen toisessa päässä olevaan kuvaan. Tämä nopeuttaa ja tehostaa prosessointia ja sen nopeutta. Turun RPAS-järjestelmän ongelma, jota tois- taiseksi ei ole kyetty ratkaisemaan, on juuri kuviin tulevan koordinaattitiedon korkeuden tallentuminen. Jostain syystä kuviin tallentuu korkeus, joka ei ole todellinen korkeus mihinkään tiettyyn tai tunnettuun järjestelmään tai geoidiin. Tämä arvo joudutaan käsin korjaamaan jokaiseen projektiin. Korjaus suoritetaan katso- malla likimääräinen korkeus lentoon lähtöpaikalta, esimerkiksi kaupunkimallista ja lisäämällä tähän arvoon käytetty lentokorkeus. Tämän jälkeen kuvien vertikaal- isena korkeutena käytetään vaihtoehtoa arbitrary. Lopullinen korkeus kuitenkin projektissa määritellään maastotukipisteiden kautta, joten tämä toimenpide ei heikennä lopputuotteen korkeustarkkuutta. Lisäksi kuvien exif-metatietoihin on tallennettu Omega, Phi ja Kappa arvot, jotka kertovat kuvan kierron/kääntynei- syyden koneen runkoon nähden. Omega-arvo kertoo kuvan kääntyneisyyden x- akselin suhteen, Phi arvo Y-akselin suhteen ja Kappa Z-akselin suhteen. Arvot annetaan asteina. Nämä arvot eivät ole pakollisia prosessoinnin kannalta, mutta nopeuttavat ja helpottavat ohjelmaa hahmottamaan kuvien sijainteja prosessoin- nin alkuvaiheessa.

Image Properties Editor

Image Geolocation

Coordinate System
 Datum: World Geodetic System 1984; Coordinate System: WGS 84 (2D) Edit...

Geolocation and Orientation
 Geolocated Images: 308 out of 308 Clear From EXIF From File... To File...

Geolocation Accuracy: Standard Low Custom

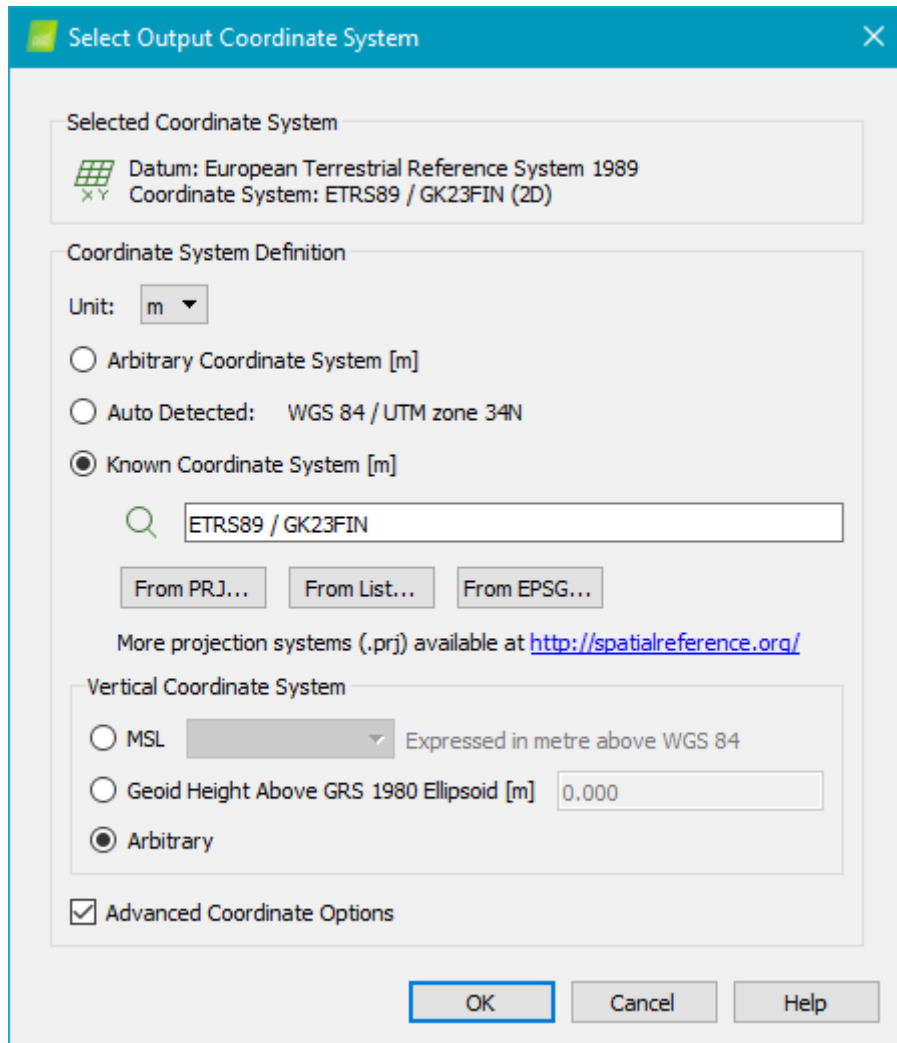
Selected Camera Model
 FC6510_8.8_5472x3648 (RGB) Edit...

Enabled	Image	Group	Latitude [degree]	Longitude [degree]	Altitude [m]	Accuracy Horz [m]	Accuracy Vert [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0730.JPG	group1	60.40501128	22.20483131	51.230	2.000	4.000	0.00000	0.00000	153.90857
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0731.JPG	group1	60.40497986	22.20480247	51.230	2.000	4.000	0.00000	0.00000	155.90854
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0732.JPG	group1	60.40498058	22.20480553	51.230	2.000	4.000	0.00000	0.00000	-165.39146
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0733.JPG	group1	60.40492911	22.20487417	51.230	2.000	4.000	0.00000	0.00000	-153.49141
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0734.JPG	group1	60.40486344	22.20495461	51.230	2.000	4.000	0.00000	0.00000	-151.19133
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0735.JPG	group1	60.40480033	22.20503561	51.230	2.000	4.000	0.00000	0.00000	-150.29127
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0737.JPG	group1	60.40481028	22.20505217	51.230	2.000	4.000	0.00000	0.00000	-30.39125
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0738.JPG	group1	60.40488378	22.20510833	51.230	2.000	4.000	0.00000	0.00000	-24.99120
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0739.JPG	group1	60.40495428	22.20516381	51.230	2.000	4.000	0.00000	0.00000	-23.49115
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0740.JPG	group1	60.40502344	22.20521639	51.230	2.000	4.000	0.00000	0.00000	-22.69111
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0741.JPG	group1	60.40508003	22.20525889	51.230	2.000	4.000	0.00000	0.00000	-22.29107
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0742.JPG	group1	60.40507603	22.20526358	51.230	2.000	4.000	0.00000	0.00000	-61.89107
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0743.JPG	group1	60.40509753	22.20541083	51.230	2.000	4.000	0.00000	0.00000	-68.99094
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0744.JPG	group1	60.40511950	22.20555728	51.230	2.000	4.000	0.00000	0.00000	-70.79081
<input checked="" type="checkbox"/>	DJI_0745.JPG	group1	60.40514047	22.20569397	51.230	2.000	4.000	0.00000	0.00000	-71.59069

OK Cancel Help

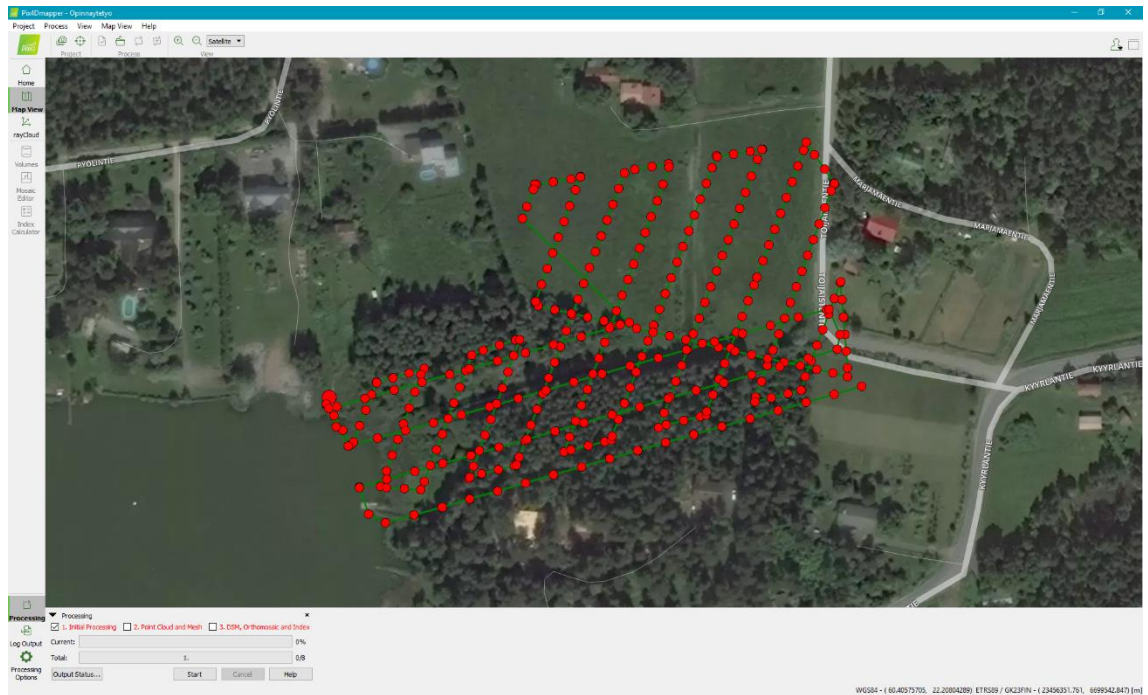
Kuva 7. Kuvien ominaisuuksien tuonnin yhteydessä

Seuraavana ohjelmassa annetaan koordinaatisto, jossa lopputuotteet halutaan ohjelmasta ulos (Kuva 8). Tämä vaikuttaa ohjelman prosessointiin, sillä annettujen kuvien koordinaatit muutetaan heti ennen prosessoinnin aloittamista haluttuun lopulliseen koordinaatistoon ja prosessointi suoritetaan kyseisessä koordinaatistossa (Strecha 2018). Turussa on käytössä tasokoordinaatistojärjestelmä ETRS89/GK23FIN, joka saadaan ohjelmaan antamalla ohjelmalle EPSG koodi 3877. Tällöin ohjelma osaa hakea siihen sisäisesti tallennetuista EPSG Geodetic Parameter Datasetistä oikean tasokoordinaatiston. Korkeusjärjestelmänä Turussa on käytössä N2000-korkeusjärjestelmä. Järjestelmä ei tunne N2000 korkeusjärjestelmää, joten tähän annetaan arvoksi arbitrary, jolloin korkeudelle ei tehdä mitään muutostoimenpiteitä.



Kuva 8. Tulos koordinaatiston asettaminen

Tämän jälkeen avautuu ohjelman perusnäkyä Map View, (Kuva 9) jossa näytetään karkeat kuvilta saadut kuvienottopaikat sekä lentojärjestys, joka ilmeisesti päätellään kuvien nimestä tai aikaleimasta. Taustakartaksi voidaan valita satelliittikuva tai karttakuva. Perusnäkyästä voidaan heti arvioida, onhan lennolta saadut koordinaatit tallentunut kuviin ja aineisto lukeutunut ohjelmistoon oikein.

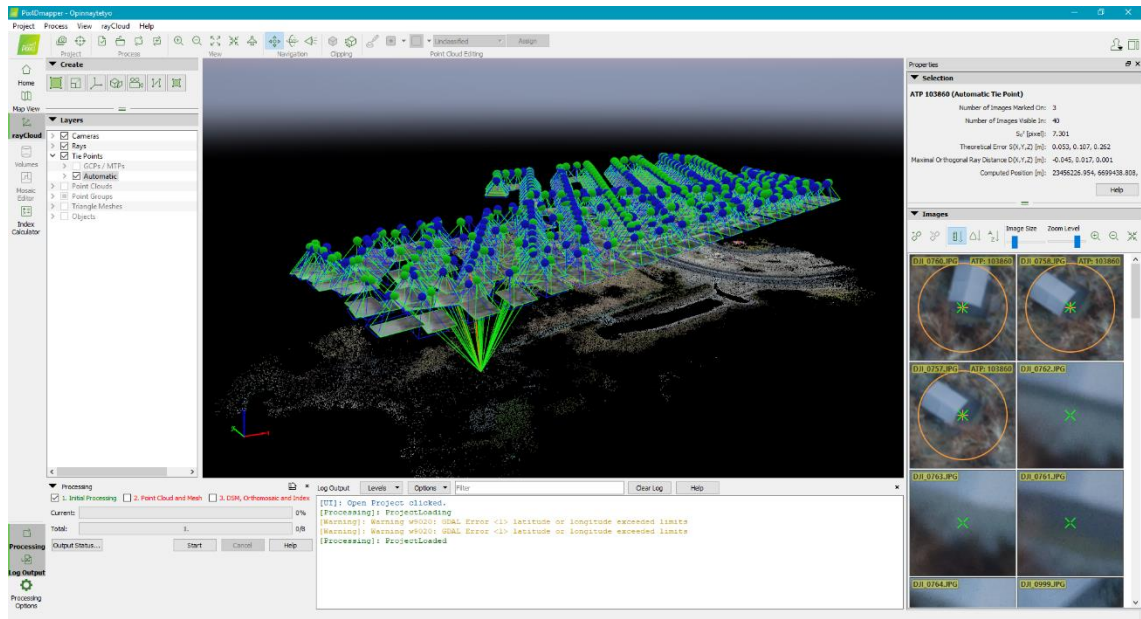


Kuva 9. Projekti-ikkuna "MapView"

Seuraavana vaiheena on aloittaa aineiston prosessointi. Prosessointi on kokonaisuudessaan jaettu kolmeen osaan. Nämä ovat: 1. Initial Processing, 2. Point Cloud and Mesh sekä 3. DSM, Orthomosaic and Index. Prosessointiin on Turussa haettu paljon erilaisia tapoja menetellä, jotta ohjelma toimisi mahdollisimman tehokkaasti ja nopeasti. Ensimmäisenä prosessoinnissa keskitytään kohdan 1. Initial Processing vaiheeseen, joka määrittelee koko projektin loppujen vaiheiden onnistumisen. Aineiston kuvien orientointitiedot sekä kameraparametrit on saatava ensin mahdollisimman hyväiksi ja tarkkoiksi, että lopun aineiston tuottaminen on mahdollista laadukkaasti ja tarkasti.

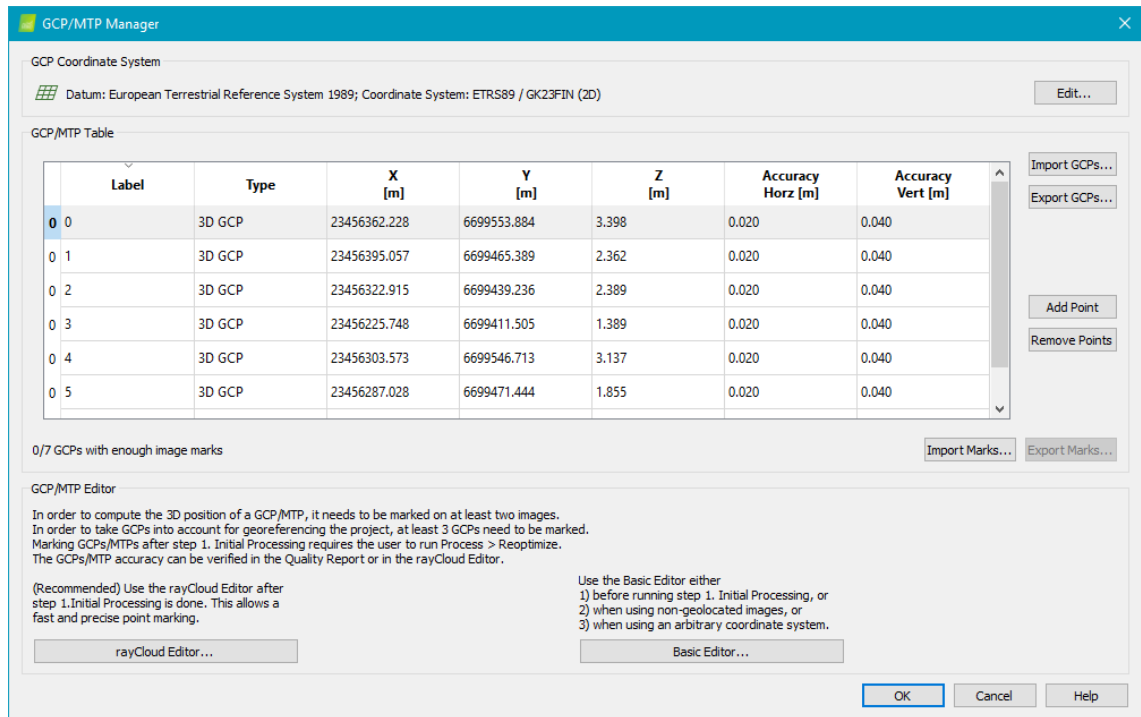
Näiden parametritietojen laskeminen kuvamateriaalista perustuu nykyaikaiseen digitaaliseen fotogrammetriaan ja niin kutsuttuun SfM-menetelmään. Aiemmin fotogrammetriaan olennaisesti kuulunut tarkkatieto siitä missä valokuva on otettu, eli sijaintitieto kuvauspaikasta, ei enää SfM-menetelmän takia ole niin oleellista. SfM-menetelmään pohjautuvat ohjelmat tekevät asian käytännössä hieman päinvastoin, eli menetelmällä on kyky laskea kameran sijainti ja tuottaa 3D-malli pelkän kuvasarjan perusteella. Näin kuvien sijaintitietojen ei tarvitse olla niin tarkkoja. Tässä opinnäytetyössä ei ole perusteltua eikä tarpeellista lähteä avaamaan SfM-menetelmää tai fotogrammetriaa tarkemmin. (Lahelma 2014, 4.)

Ensimmäisenä prosessoidaan kaikki kuvat, siten että etsittävien ns. avainpisteiden määrää lasketaan kuvan kokoon nähden, eli ei haeta kuvan jokaista pikseliä vaan kuvan koon $\frac{1}{4}$ osa, kutsumme tätä ensimmäistä kevyttä ajoa "Rapid" prosessoinniksi. Tällä tavalla saadaan tehtyä nopeasti alustava prosessointi, josta nähdään miten aineisto alkaa käyttäytyä. Pix4D-ohjelmisto laskee kuville avainpisteet eli hakee kuvilta merkitseviä piirteitä. Tämän jälkeen ohjelma alkaa sovittaa näitä piirteitä yhteen. Näiden yhteensopivien avainpisteiden perusteella ohjelma ajaa ATT-prosessin (Automatic Aerial Triangulation) sekä BBA-prosessin (Bundle Block Adjustment) ja saa lopputuloksena kuvien yhteensopivuuden suhteessa toisiinsa selville. Lisäksi ohjelma saa näiden prosessien lopputuloksena kameraparametrit sekä kuvienottosijainnit eli kuvien orientointitiedot. Lopputuotteena Initial Processing vaiheesta saadaan harva pistepilvi eli ns. rayCloud (Kuva 10), jossa nämä avainpisteiden 3D-sijainnit ovat osoitettuna. Lisäksi ikkunassa näkyy annetut kuvanottosijainnit sekä ohjelman laskemat korjatut kuvanottosijainnit. Ohjelma tuottaa varsin hyvin toteutetun ja selkeän raportin, jokaisen prosessointivaiheen jälkeen. Raporttiin perehtymiseen käytettiin aluksi aikaa reilusti, jotta päästiin selville, mitä mikin raportin kohta kertoo mistäkin prosessoinnin vaiheesta ja miten siihen voidaan vaikuttaa. Nyt osataan jo katsoa tarpeelliset kohdat hyvin nopeasti sekä raportin avulla tarvittaessa reagoida prosessoinnissa annettaviin parametreihin. Tässä vaiheessa ei kuitenkaan kannata liikaa vielä tutkia raporttia, sillä onhan prosessista vasta ajettu ensimmäinen vaihe ja siitäkin oikeastaan hyvin nopeasti ja myös jonkin verran virheitä aiheuttava "Rapid" prosessointi.



Kuva 10. rayCloud, jossa osoitettuna yksi avainpiste

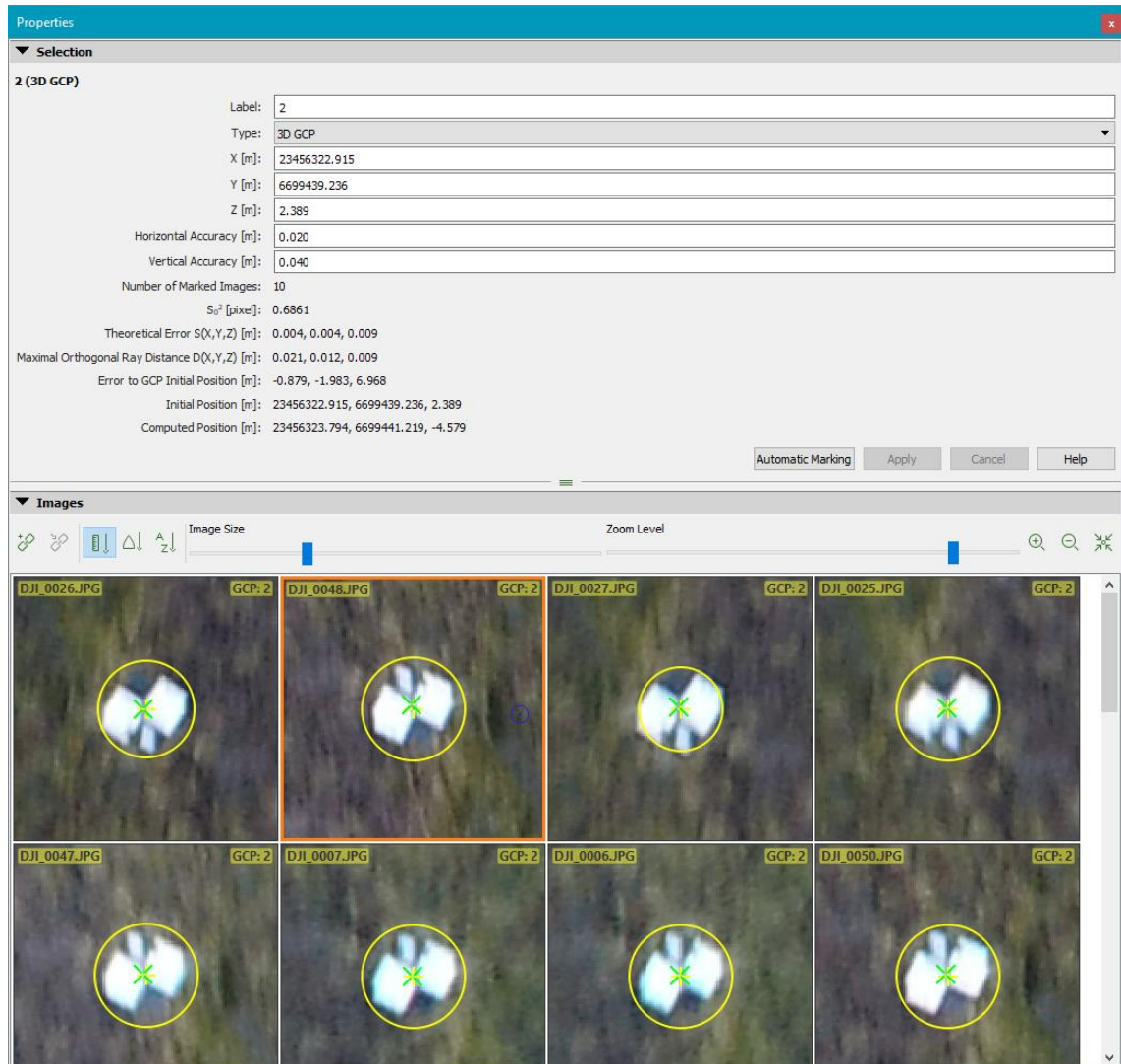
Seuraava vaihe on tuoda projektiin sen tarvitsemat maastotukipisteet. Näitä kutsutaan yleisesti Suomessa ilmakekusignaaleiksi mutta ulkomailla ne on saanut vakiinnutettua nimen Ground Control Points eli GCPs. Ohjelmaan voidaan samalla antaa myös Check Points eli tarkistuspisteitä, joilta lopuksi voidaan tarkistaa aineiston tarkkuutta. Nämä tarkistuspisteet eivät vaikuta prosessointiin. Maastotukipisteet tuodaan ohjelmaan tekstitiedostona, joka usein saadaan tuotettua maastotallentimesta joko suoraan tai vaikka editoimalla aineisto 3D-Win ohjelmistolla. Tuotavassa tekstitiedostossa ei tarvitse olla muuta kuin pisteen numero ID sekä X, Y ja Z-koordinaatit. Ohjelmassa on erillinen maastotuki- sekä tarkastuspisteiden tuonti-ikkuna (Kuva 11). Tässä ikkunassa valitaan tuotavien pisteiden koordinaatisto niin taso- kuin korkeusjärjestelmänkin osalta. Lisäksi samassa ikkunassa määritellään pisteiden tarkkuus taso- ja korkeussuunnassa. Turussa valinnoiksi siis otetaan ETRS89/GK23 tasokoordinaatisto sekä kuten aiemmin on todettu korkeusjärjestelmäksi arbitrary, sillä Pix4D ei tunnista N2000 korkeusjärjestelmää. Maastotukipisteiden sijaintitarkkuuteen laitetaan tasosijainnissa 2cm ja korkeussijainnissa 4cm, joka kuvastaa nykyaikaisen GNSS-mittauksen keskimääräisiä virheitä.



Kuva 11. GCP-manager Pix4D ohjelmistossa

Maastotukipisteiden tuonnin jälkeen alkaa prosessoinnin lähes ainoa manuaalinen, joskin hyvin tärkeä työvaihe. Maastotukipisteiden osoitus kuvilta. Tämä työvaihe vaikuttaa aineiston lopulliseen sijainti- ja korkeustarkkuuteen merkittävästi. Se pitää tehdä huolella sekä ajatuksella, jotta havainnoista tulee hyvät ja tasa-laatuiset jokaisen maastotukipisteen osalta. Ohjelmissa kuten myös Pix4D on olemassa automaattisia toimintoja maastotukipisteiden hakemiseen ja merkitsemiseen kuvilta. Tässä kohdin kuitenkin piilee vaara, sillä automatiikka yrittää tietenkin hakea kuvilta optimaalisimman paikan, jolla se saa laskennasta parhaimman tuloksen. Me emme kuitenkaan halua laskennasta optimaalisinta vaan mahdollisimman oikean tuloksen. Tästä johtuen on tärkeää tehdä maastotukipisteiden osoitus käsin (Kuva 12). RPAS-järjestelmällä tehtävien kuvausten pituus ja sivu-keittojen sekä mahdollisesti myös kamerakulmien ja lentosuunnitelmien takia maastotukipiste saattaa näkyä aina kymmenestä jopa useampaan kymmeneen kuvasta per piste. Tärkeää on myös huomioida, mikäli piste kuten katumaalaus ei kunnolla näy kuvilta tai se on esimerkiksi aivan kuvan reunalla ei näitä havainnoita tulisi tehdä. Kun kaikki maastotukipisteet on käyty läpi ja havaittu kuvilta joilta ne näkyvät päästään seuraavaan vaiheeseen. Tässä vaiheessa myös nähdään

miten hyvin aineisto "Rapid" ajossa on saatu kohdalleen, sillä jos maastotukipisteiden sijainti oli heti varsin lähellä osoitettavaa sijaintia, ovat kameran parametrit sekä kuvan orientointitiedot jo kohtalaisen hyvin paikallaan.



Kuva 12. GCP-pisteiden osoittamista Pix4D-ohjelmistossa

Seuraavaksi aineisto prosessoidaan kokonaisuudessaan täydellä kuvakoolla. Aloittaen vaiheesta 1 Initial Processing ja tarkastetaan prosessoinnin valmistuttua raportti. Raportista tärkeintä on tarkistaa tässä kohtaa, miten maastotukipisteiden sovittaminen onnistui ja mitkä ovat niiden virhekertymät (Kuva 13). Mikäli raportista ei tule ilmi esimerkiksi tarvetta tarkastaa jotain maastotukipisteen osoitusta parantaakseen prosessia, voidaan prosessoinnissa jatkaa eteenpäin vaiheeseen 2 Point Cloud and Mesh sekä sen jälkeen vaiheeseen 3 DSM, Ortho-

mosaic and Index. Mikäli virheitä havaitaan eikä vaihetta 1 saada riittävällä tarkkuudella läpi, tulee ottaa selvää onko kuva-aineistossa tai esimerkiksi maastotukipisteissä jotain virhettä.

 **Ground Control Points** 

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
0 (3D)	0.020/ 0.040	-0.011	-0.005	-0.008	0.590	24 / 24
1 (3D)	0.020/ 0.040	0.003	-0.010	0.015	0.725	39 / 39
2 (3D)	0.020/ 0.040	-0.002	0.003	-0.013	0.662	28 / 28
3 (3D)	0.020/ 0.040	-0.004	0.004	-0.030	0.736	28 / 28
4 (3D)	0.020/ 0.040	-0.004	0.010	-0.013	0.882	27 / 27
5 (3D)	0.020/ 0.040	0.022	0.006	0.018	0.790	23 / 23
6 (3D)	0.020/ 0.040	-0.003	-0.008	0.029	0.751	42 / 42
Mean [m]		0.000093	-0.000044	-0.000096		
Sigma [m]		0.009582	0.007100	0.019808		
RMS Error [m]		0.009583	0.007101	0.019808		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Kuva 13. Otos Pix4D ohjelman raportista maastotukipisteiden osalta

Ohjelman prosessointivaiheissa 2 tai 3 ei ole oikeastaan muita asetuksia, kuin miten lopputuotteiden halutaan muodostuvan. Ohjelmalle voidaan antaa asetukseen esimerkiksi pistepilven laskennan tiheyteen liittyviä parametrejä sekä missä muodossa pistepilvi tallennetaan. Mesh-mallista voidaan myös päättää, kuinka tarkasti se tuotetaan ja missä tiedostomuodossa se halutaan muodostettavan. Ortokuvasta oikeastaan on samat mahdollisuudet, eli miten tarkka ortokuvasta halutaan ja yhdistetäänkö se yhdeksi suureksi kuvablokiksi. Lisäksi ohjelma voidaan parametroida tuottamaan esimerkiksi DTM malli tai vaikka korkeuskäyrät SHP tai DXF-muodossa. Peruslopputuotteina käyttöön tulee pistepilvi, ortokuva sekä mesh-malli.

3.4 RPAS-aineiston hyödyntäminen lopputuotteeksi

3.4.1 Kaupunkimallin päivitys

Turun kaupungissa on siirrytty käyttämään sanaa kaupunkimalli vanhan kantakartan sijasta, näin ollen tässä työssä useasti esiintynyt kaupunkimalli pääasiallisesti tarkoittaa entistä kantakarttaa. Turussa tosin kantakarttaan on myös sidottu katu- ja viheraluekisteri, joka tuo oman lisänsä kantakartan mittaamiseen niin maastossa kuin sitten RPAS-järjestelmällä tuotetuilta aineistoilta.

Turun kaupunkimallin periaate on, että se päivittyy prosessissa. Tällä tavoin ylläpidosta tulee lähes automaattista, eikä sen päivitystarpeen kartoittamiseen tarvitse kiinnittää niin paljon resurssia. Tämä prosessi alkaa siitä, kun kaupungissa rakennetaan jotain joko kaupungin toimesta tai toimeksiannosta. Turussa ylläpidosta vastaava henkilö on mukana, kun työmaa otetaan vastaan ja sitä kautta kaupungin ylläpitoon. Kun esimerkiksi kadunrakennustyömaa on valmistunut, tilaa ylläpidosta vastaava henkilö mittauksen alueesta. Kohde mitataan sovittujen sääntöjen mukaisesti, jonka jälkeen ylläpitovastaava voi kytkeä mittaukseen rekisteritiedon, kuten esimerkiksi kadun materiaalin.

Lisäksi kaupunkimallissa on myös muuta tietoa huomattavan paljon, esimerkiksi rakennukset kaupunkimalliin tulee rakennusvalvonnan tilaamista, sijaintikatselmuksista. Iso osa kaupunkimallia on maanpinta, joka on tuotettu laserskannauksen pohjata pintamalliksi ja näin tuotu osaksi kaupunkimallia. Johtotietoja tuodaan johtotietorekistereistä sekä muuta kaupungin paikkatietoa, joka on tallennettu kaupungin paikkatietorekistereihin, on yhdistettävissä kaupunkimalliin tai oikeastaan on jo valmiiksi osa sitä.

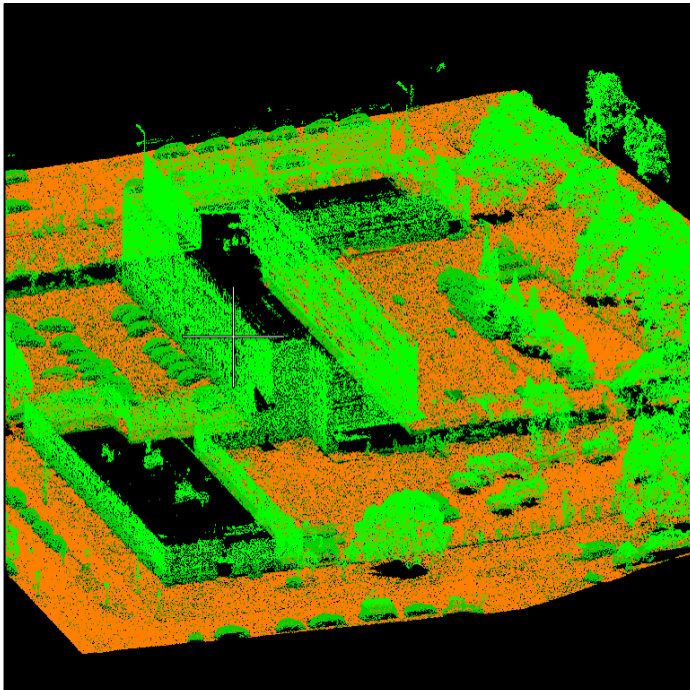
RPAS-järjestelmällä tuotetaan kaupunkimalliin paljon tietoa. Yhtenä merkittävänä osana on entisen kantakartan osuus kaupunkimallista, toisena merkittävänä osana on kaupunkimallissa olevien rakennusten mallintamiseen tarvittavan korkeustiedon kerääminen rakennuksista sekä niihin liitettävien pintatekstuurien ottaminen.

RPAS-järjestelmällä tuotettu pistepilvi on ns. raaka dataa (Kuva 14), jota on hyvä käsitellä pistepilvien käsittelyyn soveltuvilla ohjelmilla ennen sen hyödyntämistä. Fotogrammetrinen pistepilvi sisältää usein esimerkiksi jonkin verran ns. kohinaa. Tämä kohina on käytännössä kokonaan poistettavissa, jolloin pistepilven laatu paranee huomattavasti. Raaka pistepilvi tuodaan MicroStation sovellukseen, jonka päälle on tehty TerraSolidin ohjelmistoja, kuten tässä tapauksessa käytettävä TerraScan-pistepilvien muokkaus sovellus. TerraScan sovelluksella pistepilveen tehdään luokittelua ajamalla siihen erilaisia macroja, eli komentojonoja. Ensimmäisenä aineistosta luokitellaan kovapinta, jota myös pakataan tiiviimmäksi, jolloin aineistosta saadaan poistettua kohinaa. Kovan pinnan haun jälkeen oh-

jelma etsii aineistosta maanpinnan ja tekee tästä maanpintaluokan. Tämän jälkeen jäljelle jäävää aineistoa aletaan luokitella kasvillisuusluokkiin niiden korkeuden suhteen jo luokiteltuun maanpintaan nähden, näin saadaan low, medium ja high vegetation luokat (Kuva 15). Usein tämä riittää pistepilven luokittelun osalta, jotta siitä voidaan luotettavasti alkaa vektoroimaan kaupunkimallin kohteita.

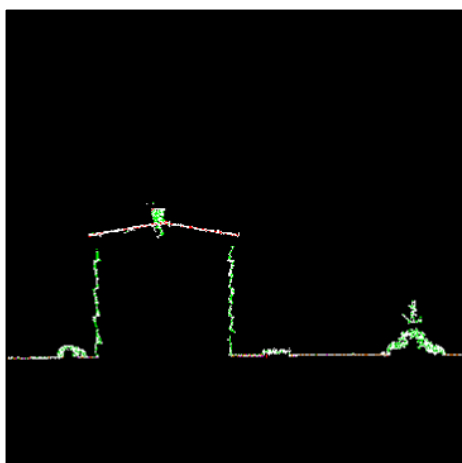


Kuva 14. Raaka pistepilvi aineisto



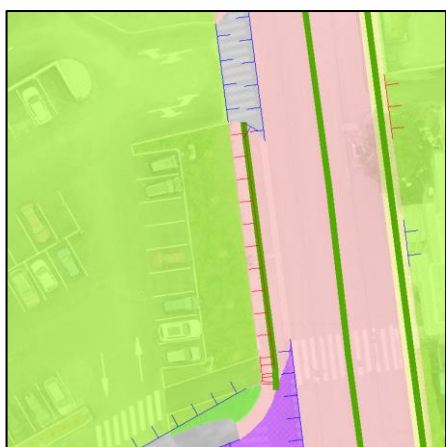
Kuva 15. Luokiteltu pistepilvi aineisto

Pistepilven luokittelun jälkeen pistepilveä aletaan vektoroimaan maaston taiteviivojen kohdilta kuten samaa työtä tehtäisiin maastossa. Apuna tässä kohtaa on erilaisia poikkileikkauksia (Kuva 16) sekä pituusleikkauksia, kuin myös pystyleikkauksia pistepilvestä. Myös työkalut, jotka sitovat piirrettävän viivan maanpinnanluokkaan on paljon käytössä. Lopputuloksena pistepilvestä on saatu vektoroitua viiva- sekä pistekohteet, kuten ne olisi maastossa mitattu.



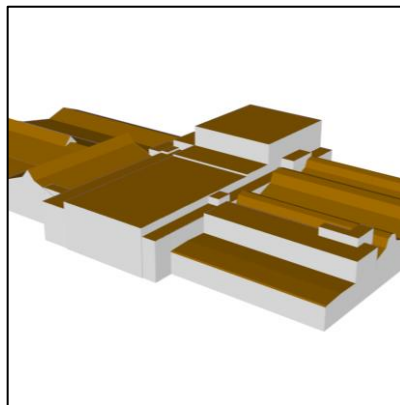
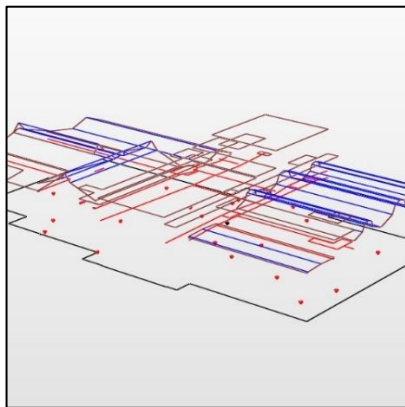
Kuva 16. Poikkileikkaus pistepilviaineistosta

Seuraavaksi aineisto viedään Turun kaupungin Trimble Locus paikkatietojärjestelmään, jossa aineistoon tehdään viimeistelyjä sekä alueiden kytkentöjä katu- viheraluekisteriä varten (Kuva 17).



Kuva 17. Katu- viheraluekisterin ylläpitoalueet

Toinen kaupunkimallin ylläpitotehtävä RPAS-järjestelmällä on uusien rakennusten mallintaminen. Turun kaupunkimalli sisältää tällä hetkellä noin 23 000kpl lod 2 tasolle mallinnettua rakennusta, joissa on tekstuurit. Näitä rakennuksia ylläpidetään Trimble Locus järjestelmässä. Rakennukset ovat osittain tehty manuaalisesti käsin ja osittain automaattisesti TerraSolidin ohjelmistolla. Aineistona on käytetty vuoden 2017 ilmalaserskannausta sekä vuoden 2018 viistoilmakuvia. Vuoden 2018 ja 2019 rakennettujen talojen osalta on alettu hyödyntämään RPAS-järjestelmää, jolla on saatu samalla lennolla aikaiseksi rakennuksen mallintamiseen tarvittava pistepilvi sekä seinä ja kattotekstuureja varten viisto- sekä ortokuva. Turussa rakennuksen kivijalka käydään mittaamassa sijaintikatselmuksessa, jonka lopputuotteena kartalle saadaan rakennuksen pohjan muoto. Mikäli rakennuksesta on olemassa riittävän hyvät suunnitelmakuvat, joista saadaan selville esimerkiksi rakennuksen korkeus ja harjan muoto. Voidaan rakennuksesta tehdä mallinnus näiden tietojen perusteella ilman maastotöitä. Kun rakennus valmistuu, tehdään rakennuksen ympäristöön RPAS-järjestelmällä lento. Lennon jälkeen tarkistetaan, onko suunnitelmakuvista mallinnettu rakennus oikein ja korjataan tarvittaessa. Lopuksi rakennukseen lisätään tekstuurit (Kuva 18).



Kuva 18. Rakennuksen mallintaminen ja tekstuuriin liittäminen

Lisäksi RPAS-järjestelmällä tuotetut tosiortokuvat tallennetaan ja viedään osaksi kaupunkin paikkatietojärjestelmää sekä kaupunkimallia, josta ne on kaikkien käytettävissä. Näitä tarkkoja tosiortokuvia on käytettävissä jo huomattava määrä. Ongelmaksi on kuitenkin muodostunut, että niiden käyttäjillä ei ole tietoa tarkasta kuvauspäivämäärästä, sillä tällähetkellä se ei mitenkään käy ilmi karttapalvelusta joissa näitä näytetään.

3.4.2 Viistoilmakuvat

Yhtenä RPAS-järjestelmän tuotteena on ollut tuottaa kaupungin eri organisaatioille, kuten kaavoitukselle, erilaisia viistokuvia. Viistokuvia on esimerkiksi käytetty arkkitehtikilpailujen lähtömateriaalina esilaisten visualisointien ja upotusten alla (Kuva 19). Ongelmalliseksi on ehkä hieman tullut mahdottomiksi käyneet toiveet esimerkiksi yhden kuvan peittämästä alasta, jolloin on jouduttu tekemään pano-raamakuvia useammasta kuvasta yhdistämällä.



Kuva 19. Viistokuvaan upotettu arkkitehtikilpailun tuotos (Arkkitehdit MY 2018).

3.4.3 Mesh-mallit

RPAS-järjestelmällä on myös tehty ns. mesh-malleja (Kuva 20). Mesh-malli eli kolmioverkkomalli on kolmioverkosta sekä siihen liimatusta kuvasta syntyvä malli maastonmuodosta sekä mallin alueella olevista muista maanpinnan päällä olevista kohteista. Malli on mittatarkka pienennös mallin alueesta ja sitä voidaan usein pyöritellä sekä suurentaa esimerkiksi tietokoneella. Lisäksi malliin voidaan upottaa vaikka alueelle suunnitteilla oleva uusi rakennus. Turussa näitä on hyödynnetty esimerkiksi aluesuunnittelussa.



Kuva 20. Mesh-malli Turun kakolan mäestä

3.4.4 Videot

Edellisten tuotteiden lisäksi RPAS-järjestelmällä on tehty raakavideomateriaalia kaupungin muiden organisaatioiden käyttöön sekä yksi hanke yhdessä Varsinais-Suomen ELY-keskuksen kanssa. Tässä hankkeessa kuvattiin useampi kilometri Turussa sijaitsevaa jokea, jossa epäiltiin olevan epämääräinen päästölähde, joka huononsi joen veden laatua. Samalla kerralla lennettiin myös muutama huleveden viivytykseen käytetty allas, jossa epäiltiin olevan nokeutunutta sammutusvettä lähistöllä tapahtuneen jätekanan palamisen sammutukseen käytetyn veden seurauksena.

4 RPAS-JÄRJESTELMÄN TARKKUUSTARKASTELU

4.1 Määrittely

Uusien mittausmenetelmien tullessa markkinoille tai uusien menetelmien käyttöönottamisessa väistämättä tulee aina mietittyä, mikä laitteiden tarkkuus on. Usein laitevalmistajat antavat jonkin tarkkuuslupauksen, mutta voiko siihen aina sokeasti luottaa? Mittauksen tarkkuuteen kuitenkin on myös muita tekijöitä kuin vain laitteisto. RPAS-järjestelmien tarkkuuksista on ollut keskustelua jonkin verran viimeisten vuosien aikana.

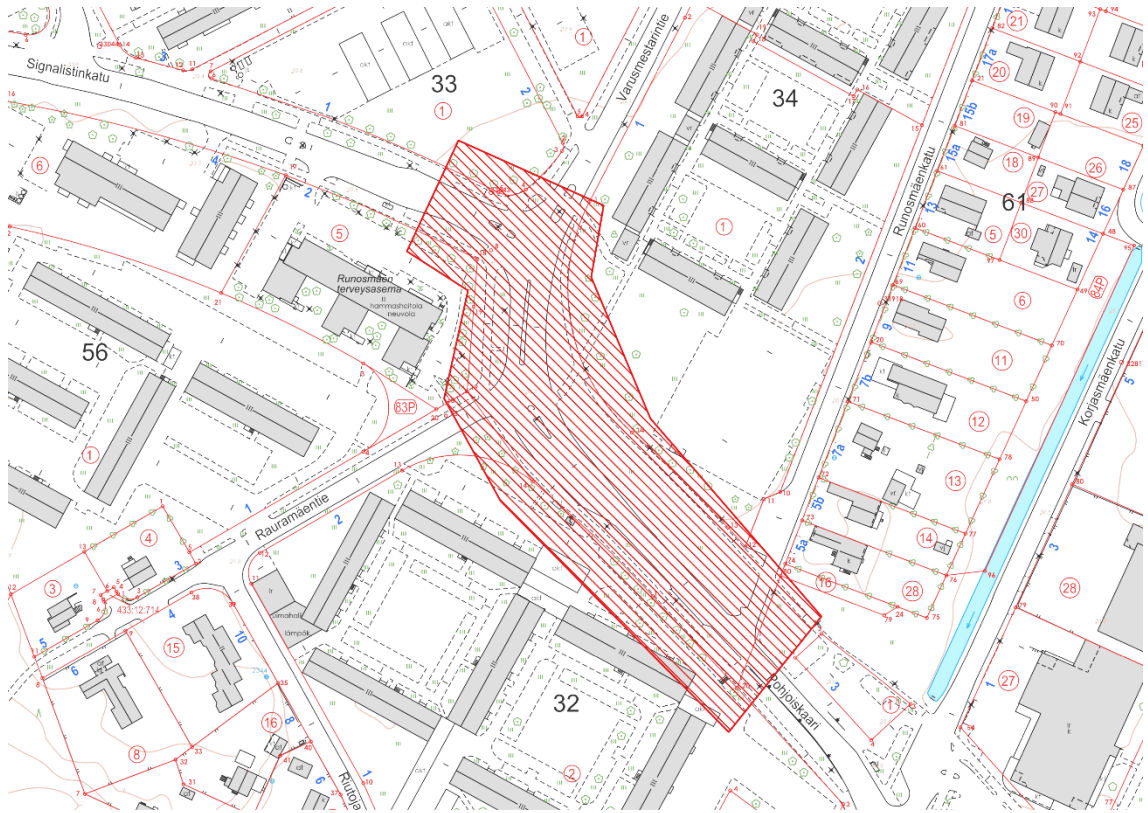
RPAS-järjestelmän käyttöönottoaiheessa ensimmäisenä tehtiin huomattava määrä työtä ja testejä tarkkuuden toteutukseksi. Lopputuloksena tuolloin päätettiin siihen, että RPAS-järjestelmän tarkkuus riittää JHS185 mittausluokan 1e tarkkuuteen. Mittausluokassa 1e vaadittava tarkkuusvaatimus on puolet tiukempi kuin mittausluokassa 1. Esimerkiksi rakennuksen seinälinjan tarkkuusvaatimus on 0,1m. Tuolloin kuitenkin ei tarkkuustarkastelusta tehty erikseen dokumentointia, jota nyt ajateltiin paikata tämän osion kanssa.

Tarkkuustarkastelussa on tarkoituksena tehdä RPAS-järjestelmällä tuotantoprosessin mukainen kartoituslento, jonka aineisto prosessoidaan. Prosessoitua aineistoa verrataan pistevertailuna sekä pintavertailuna muihin alueelta saatavilla oleviin mittauksiin sekä pistepilveen. Alueelta on mitattu samanaikaisesti kartoituslennon kanssa tarkka suunnittelun pohja-aineistoksi tehty maastomalli sekä syyskuussa 2019 tehty mobiililaserskannaus.

4.2 RPAS-aineisto

Vertailun RPAS-järjestelmällä suoritettu kartoituslento tehtiin 16.10.2019 klo 15.30-16.30. Keli lennon aikana oli pilvinen, valoisuus riittävä mutta varsin hämärä johtuen vuoden ajasta. Hämäryys ei kuitenkaan näkynyt lopullisissa kuvissa häiritsevästi. Lentoa ei suunniteltu kovinkaan suurimittakaavaisesti vaan se suoritettiin samalla tavalla rutiinomaisesti kuin RPAS-järjestelmän muukin käyttö jo tapahtuu. Maastossa tehtiin maastomallimittausta ennen kartoituslennon suorittamista. Kartoituslennon materiaali kuten ortokuva toimitettiin myös suunnittelijan

käyttöön yhdessä maastomallin kanssa. Mittausalueen muoto sekä koko hahmotuvat kartalla (Kuva 21).



Kuva 21. Kartoituslennon sekä maastomallin rajaus

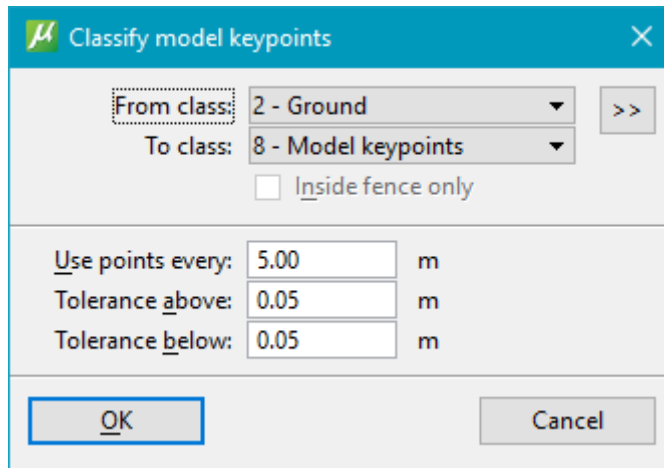
Maastotukipisteinä käytettiin kaupungilla olevia vanerista valmistettuja 40*40cm levyjä (Kuva 22), joita mitattiin GNSS-mittauksella tasaisesti alueen reunoille. Tukipisteitä mitattiin yhteensä 6kpl. Kartoituslennon alue määriteltiin kattamaan koko maastomallimittaus alue. Lentokorkeudeksi määriteltiin alueella olevan rajoituksen takia maksimiin 50m, jonka seurauksena ortokuvan maastoresoluutioksi tuli 1,4cm/pikseli. Kamerakulma säädettiin suoraan alas, sillä tarkoituksena oli kerätä aineisto pelkästään pistepilven luontiin sekä ortokuvan valmistamiseen. Kun maastotukipisteet oli mitattu, lentosuunnitelma tehty, huomioitu turvallisuusnäkökulmat, täytetty lentopäiväkirja, RPAS-järjestelmä (Kuva 22) kasattu sekä tarkastettu voitiin aloittaa kartoituslento. Kylmän sään aiheuttamana lentoon lähtö kesti normaalia kauemmin, sillä järjestelmän piti suorittaa akkujen lämmitysoperaatio ennen kuin moottorit voitiin käynnistää. Tämä on normaalia, eikä tästä pidä olla lennon aikana huolissaan. Kartoituslento kesti 15 minuuttia ja sillä kuvattiin

n.170 kuvaa, joista prosessointiin päätyi 161 kuvaa. Kartoituslennon jälkeen tarkistettiin aineiston onnistuminen karkeasti selaamalla kartoituslennolla kerättyjä kuvia ohjaimesta. Kun lento todettiin onnistuneeksi, kasattiin RPAS-järjestelmä sekä kerättiin maastotukipisteinä toimineet vanerilevyt maastosta.



Kuva 22. Käytössä ollut RPAS-järjestelmä sekä maastotukipisteinä käytetyt vanerilevyt

Kartoituslennolta kuvatusta kuvamateriaalista tehtiin tämän opinnäytetyön luvun 3.3.3 mukainen aineiston prosessointi, jonka lopputuotteena saatiin ortokuva sekä fotogrammetrisesti tuotettu pistepilvi. Prosessoinnin lisäksi aineistoon tehtiin kappaleessa 3.4.1 esitelty pistepilven luokittelu TerraScan-ohjelmistolla. Tämän jälkeen aineiston käsiteltävyyden parantamiseksi 3D-Win ohjelmistossa tehtiin aineistosta niin sanotut model key point-pisteiden erottelu. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikista maanpintaluokan pisteistä etsitään maanpintamallin muodostamisen näkökulmasta merkitsevät pisteet. Tässä käytettiin varsin tiukkoja parametrejä (Kuva 23), jotta pisteitä tulisi kuitenkin tarkkuustarkastelun näkökulmasta riittävästi. Piste valittiin mukaan aina 5 metrin välein, sekä mikäli pisteen korkeus muuttui yli 5 senttimetriä 5 senttimetrin sisällä olevien pisteiden kesken valittiin nämä myös mukaan. Tätä pistepilveä sekä tuotettua ortoilmakuvaa käytettiin vertailussa. Ortoilmakuvasta pääasiallisesti tehtiin silmämääräinen tasosijaintitarkkuuden määrittäminen ja pistepilveä käytettiin aineiston korkeustarkkuuden määrittämiseen.



Kuva 23. Model key point tuottamisen parametrit

4.3 Vertailuaineisto

Vertailuaineistona käytettiin maastossa takymetrimittauksena tehtyä maastomalimittausta, joka on tehty Liikenne viraston (Väylän), Tie ja Ratahankkeiden maastotiedot 18/2017 ohjeiden sekä koodien mukaisesti. Mittauksen on suorittanut opinnäytetyöntekijä itse. Mittauksen lähtöpisteinä on käytetty kaupungin taso- sekä korkeuspiste verkkoa, jotka ovat sijainneet lähellä mittausaluetta. Mittausperustan luominen on suoritettu huolellisesti sekä mittauksen laatukontrolli on ollut tiukka mittauksen luonteen takia.

Toinen vertailuun otettu aineisto on Turussa syksyllä 2019 tehty katukuvaus, jonka lisäksi kerättiin mobiiliskannerilla aineisto samanaikaisesti kaikilta Turun asemakaavoitetuilta kaduilta sekä yleisiltä teiltä. Kuvauksen ja skannauksen suoritti Blom Kartta Oy ja tuotteen nimi on BlomSTREET. Aineisto on kerätty GNSS/IMU perusteisesti ja siihen on tehty korkeustarkkuutta parantava korjaus Turun kaupungin toimesta.

4.4 Tulosten vertailu

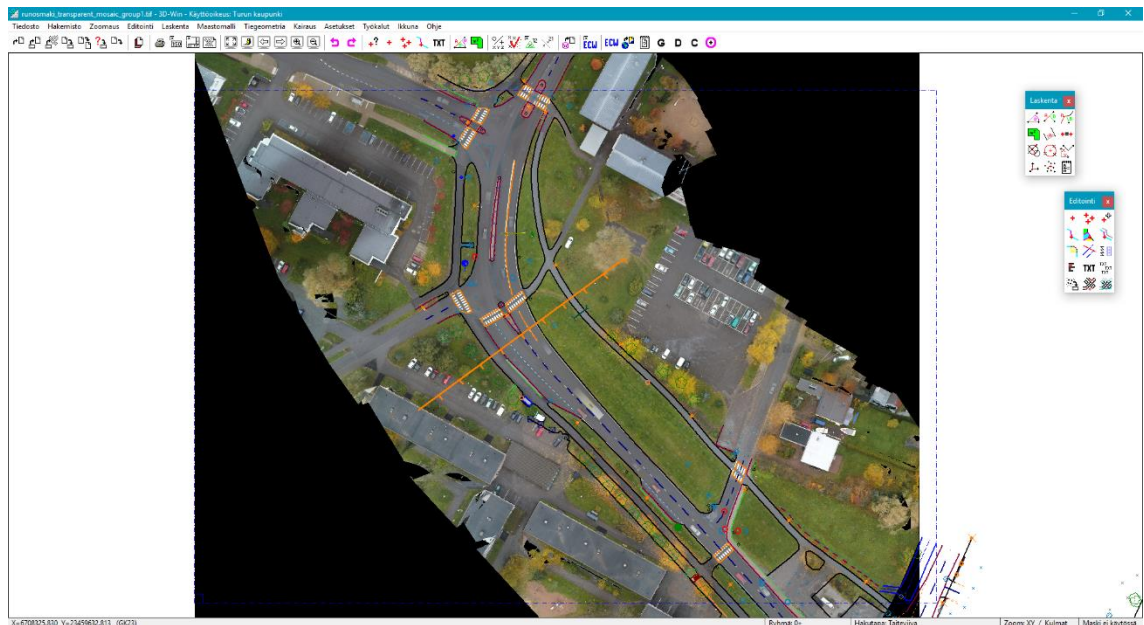
4.4.1 Käytetyt sovellukset ja tavat

Aineiston vertailu suoritettiin hyödyntäen 3D-Win ohjelmistoa sekä MicroStation ohjelmistossa toimivalla TerraSolidin TerraScan ohjelmaa. 3D-Win ohjelmistolla

suoritettiin ortoilmakuvan tasosijainnin tarkkuuden määrittys sekä korkeustarkastelua tarkastelemalla aineistoista tehtyjä pintamalleja toisiinsa. TerraScan ohjelmistolla tehtiin aineistoon pistemäisten kohteiden tasosijainti sekä korkeustarkkuusmäärittelyä. Tasosijainnin tarkkuusmäärittely tehtiin silmämääräisesti tekemällä aineistosta erilaisia leikkauksia pistepilviaineistoon ja korkeustarkkuusmäärittely automaattisen raportoinnin avulla mitattuja pisteitä hyödyntäen ja vertaamalla niitä fotogrammetriseen pistepilveen. Lisäksi TerraScan sovelluksella tehtiin mobiiliskannauksen sekä fotogrammetrisen pistepilven silmämääräinen tarkastelu eroavaisuuksista aineistossa poikkileikkausten perusteella.

4.4.2 Tasosijaintitarkkuuden määrittely

3D-Win ohjelmistolla tehty tasosijainnin tarkastelu perustui silmämääräiseen arviointiin ortokuvalla olevien kohteiden vertaamisesta maastossa mitattuihin kohteisiin. Tämä koski piste- sekä viivamaisia kohteita. Tässä vertailussa pitää huomioida myös ortokuvan pikselitarkkuus 1,4cm/pikseli. Aineisto avattiin 3D-Win ohjelmistoon tasoina ja sitä alettiin vertailemaan (Kuva 24).



Kuva 24. Aineisto avattuna 3D-Win ohjelmistoon

Ortokuvan sijaintitarkkuuden toteamiseksi aluksi aineistosta etsittiin sekä maastomallissa, että ortoilmakuvalta havaittavia pistemäisiä kohteita. Tässä tarkaste-

lussa esimerkiksi kaivot toimivat yleisesti varsin hyvin (Kuva 25). Aineiston todettiin olevan tasosijainti tarkkuudeltaan hyvä, lähes erinomainen, sillä eroa mitatun ja kovalta havaitun kohteen välille oli vaikea määrittellä.



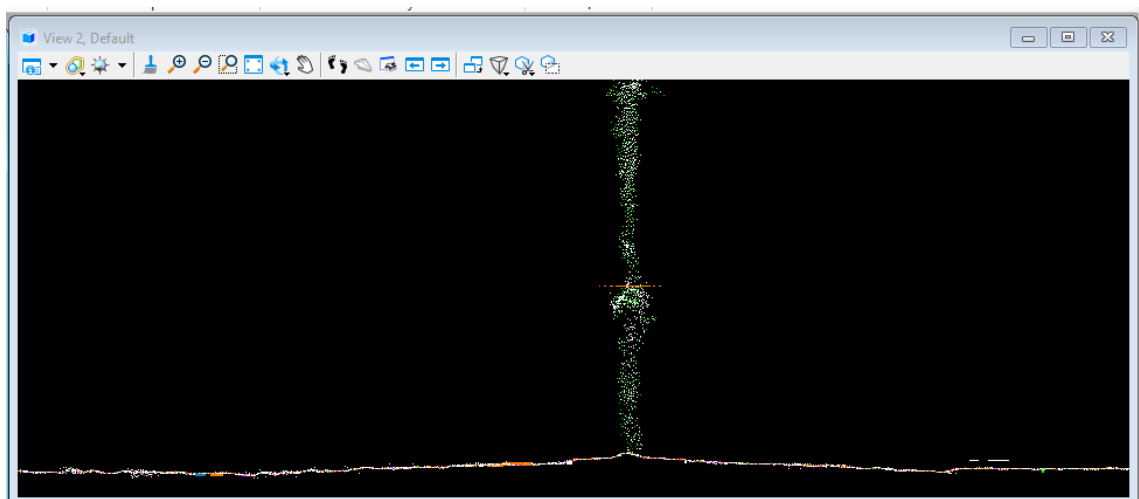
Kuva 25. Aineistossa olevia mitattuja sekä ortoilma kovalta havaittuja kaivoja

Vaikka pistemäisten kohteiden avulla jo aineiston tarkkuus todettiin hyväksi haluttiin aineiston tasosijaintitarkkuutta lisäksi tarkastella viivamaistein kohteiden osalta. Tällä tavalla voitiin todeta aineiston tarkkuuden olevan hyvä koko käsiteltävänä olevan alueen osalla. Aineistosta tutkittiin samalla menetelmällä kuin pistemäisiä kohteita aiemmin nyt, myös viivamaisia kohteita kuten ajoradan reunoja, kanttikivien alareunoja ja ajorata- sekä suojatiemaalauksia. (Kuva 26) Kuten pistemäisten myös viivamaisten kohteiden osalta voitiin aineiston tasosijainti tarkkuus todeta hyväksi tai erinomaiseksi. On lähes mahdotonta osoittaa kuvan perusteella, että maastossa mitatun viivan pitäisi kulkea eri kohdassa kuin mitä se ortoilmakuvassa oli.



Kuva 26. Ajoratamaalaukset, kanttikivet sekä suojatiet ovat paikoillaan

TerraScan-sovelluksella tasosijaintitarkkuutta tarkasteltiin lähinnä pistepilvessä ei-maanpinnassa olevien kohteiden osalta, kuten lyhtypylväiden, liikennemerkkien ja esimerkiksi bussikatoksen osalta. Maastomittausaineisto tuotiin dwg-kuvana pistepilven kanssa samaan ikkunaan. Tästä ikkunasta voitiin tehdä vertikaalisia ja horisonttaalisia, kuin myös leikkaus-leikkaus tyyppisiä valintoja sellaisista kohdista pistepilveä, jossa oli maastossa havaittu kohde. Lopputuloksena nähtiin, miten hyvin havaittu piste osuu esimerkiksi lyhtypylvääseen (Kuva 27).



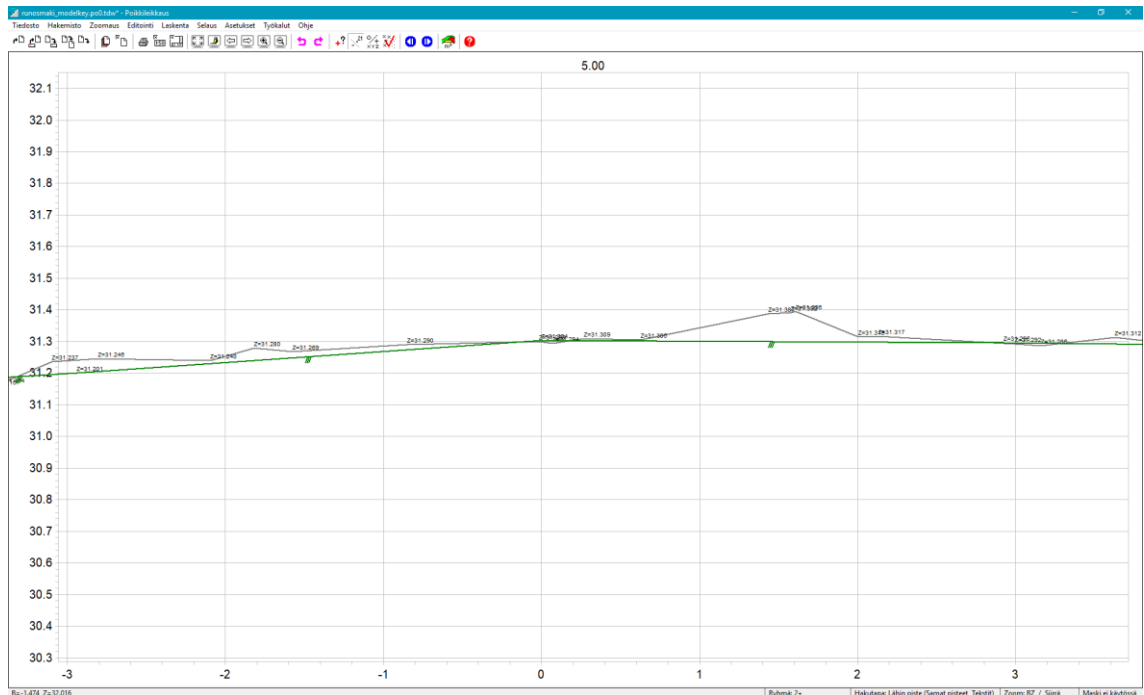
Kuva 27. Kuvassa maanpinta sekä lyhtypylväs ja siihen mitattu piste oranssilla viivalla

Aineiston todettiin olevan tälläkin tarkastelutavalla tarkkaa. Arviointia hieman hankaloitti dwg-kuvan käyttäytyminen ohjelmistossa, mikäli symbolissa oli tyhjä sisusta. Tuolloin kuvaan piti piirtää ensin esimerkiksi ristikkäiset viivat symbolin sisään, jotta hahmotti symbolin keskikohdan.

4.4.3 Korkeussijaintitarkkuuden määrittely

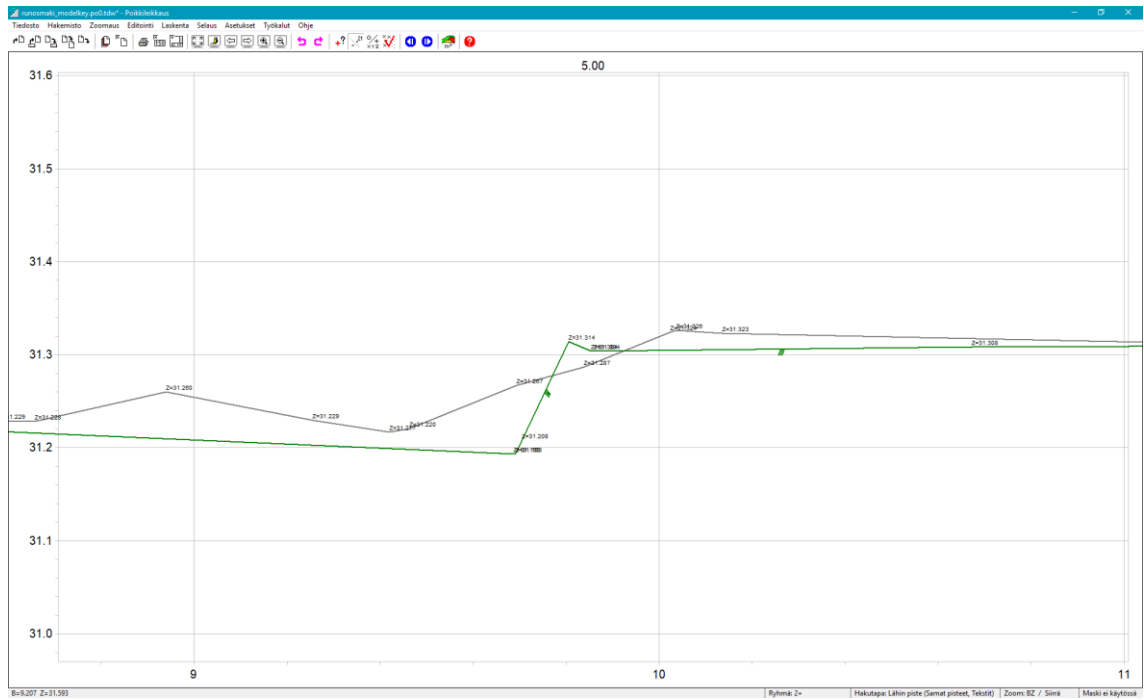
Kokemuksena on ollut, että RPAS-järjestelmällä tehdyn fotogrammetrisen piste-pilven heikkoudet ovat sen korkeustarkkuus. Aineiston korkeuden ongelmat yleisesti kohdistuvat pieniin nopeisiin ja teräviin maanpinnan muotojen vaihteluihin kuten teiden reunatukiin, eli kanttikiviin. Seuraavaksi on esitetty erilaisia kohteita poikkileikkausperusteisesti hyvistä sekä ongelmallisista kohteista.

Aineiston korkeussijaintitarkkuuden määrittely aloitettiin 3D-Win ohjelmistolla. Aineistoista tuotettiin pintamallit, maastomallimittauksesta sekä modelkeypoint pisteistä. Maastomallimittauksesta irrotettiin alueen halki menevän tien mitattu keskilinja, tästä aineistosta tehtiin mittalinja. Mittalinja jaettiin 5 metrin välein paalutaen. Tätä mittalinjaa apuna käyttäen aineistosta tuotettiin poikkileikkaukset paalulukujen mukaisesti 50 metriä paalun molemmin puolin ja näin ollen saatiin 100 metriä leveät poikkileikkaukset. Poikkileikkauksissa (Kuva 28) näkyy tuotetut maanpinnat omina viivoinaan.

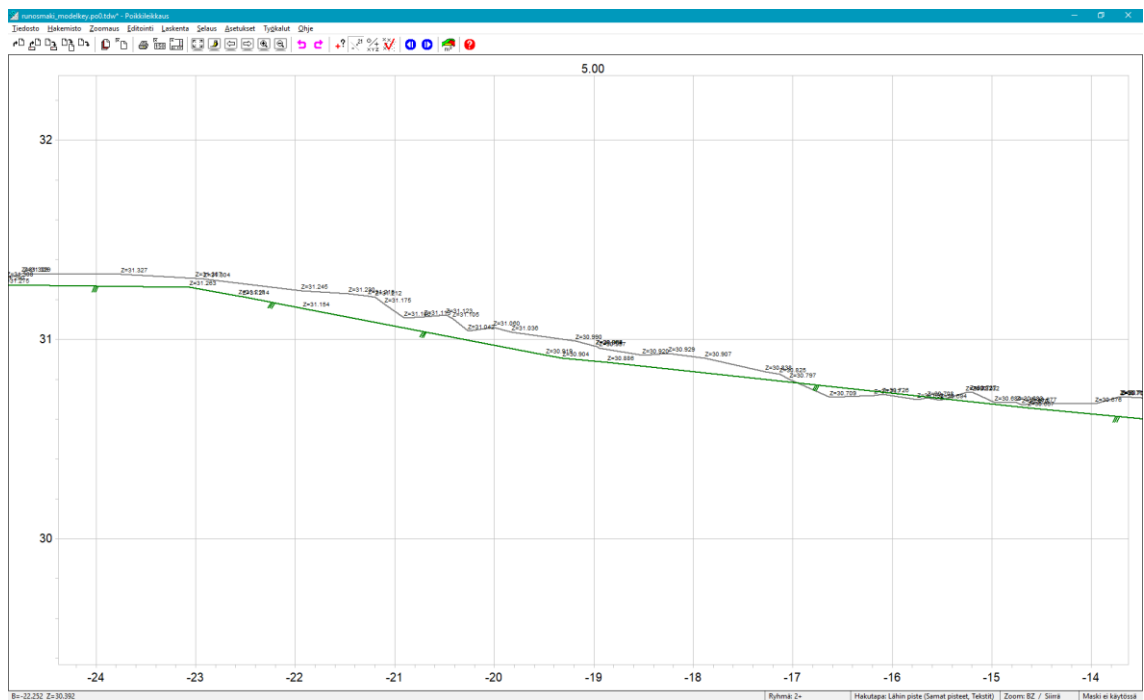


Kuva 28. Poikkileikkaus, jossa näkyy kahden pinnan korkeudet paaluluvulla 5.00

Poikkileikkaukset käytiin läpi paalulukujen perusteella ja tutkittiin poikkileikkauksissa mahdollisia huomattavia virheitä. Kuten kappaleen alussa todettiin, ovat kanttikivet varsin hankalia fotogrammetrisessä pistepilvessä. Tälläkin kertaa kanttikivien osalta löytyi virhettä juuri pinnan kulmikkouden kanssa (Kuva 29). Samoin ongelmaa yleisesti tuottavat pehmeät maat ja ruoho, kuten korkea nurmi, pelto tai niitty. Tarkastettavalla alueella oli varsin suuri nurmialue, jonka hoitaminen oli jo tältä kesältä lopetettu. Tästä johtuen nurmi oli varsin korkea ja maa sen alla kostea sekä pehmeä. Näissä kohdin oli huomattavissa, että pistepilven perusteella tehty pintamalli oli hieman korkeammalla kuin mitatusta maastomallista tehty pintamalli (Kuva 30). Osittain varmasti johtuen siitä, että tuolloisessa kohdassa saattaa mitattu malli olla myös maan pehmeydestä johtuen hieman alhaalla, sillä prismasauvan kärki on voinut systemaattisesti hieman upota maahan.



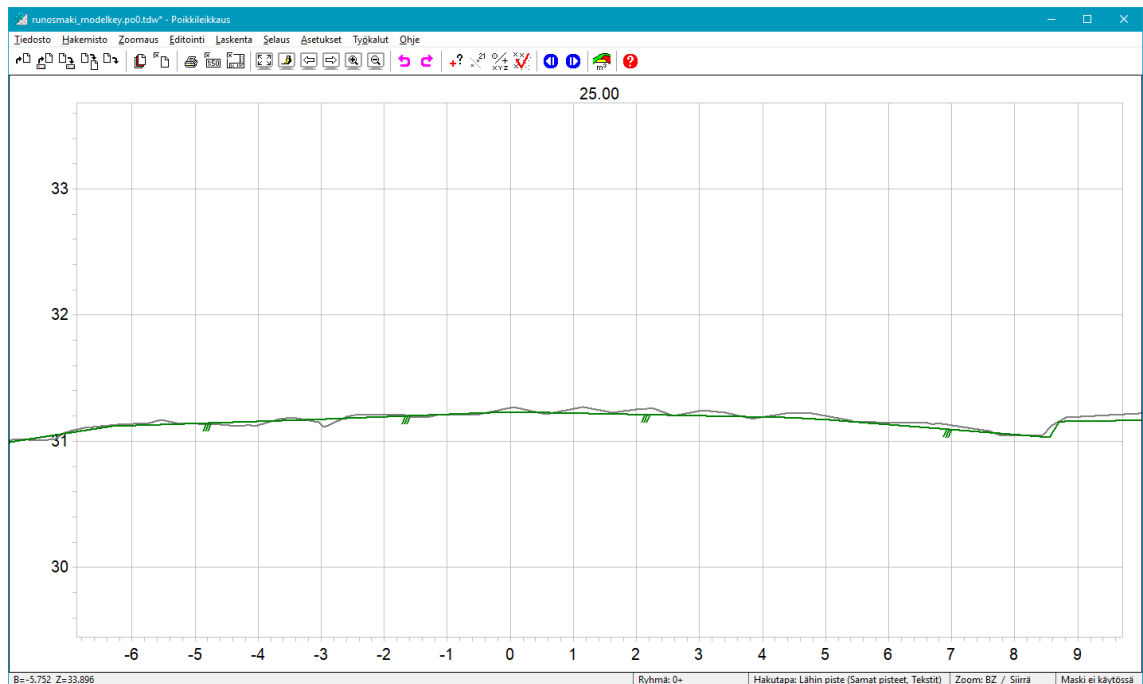
Kuva 29. Kanttikivi on mitatussa pintamallissa jyrkkä ja tarkka. Pistepilvestä tehdyssä pintamallissa pinta ”oikaisee” kanttikiven yli tasaisesti



Kuva 30 Pehmeä pinta aiheuttaa fotogrammetrisen pilven ”leijuntaa”

Tarkasteltaessa poikkileikkauksia voi varsin nopeasti huomata, että mikäli kohta on tasainen tai loivasti laskeva kuten tieprofiili on aineisto varsin hyvää (Kuva 31). Usein nämä hyvät alueet ovat kovia pintoja kuten asfaltti, rakennusten katot ja

erilaiset kentät. Tuolloin prosessointiohjelmalla on ollut helpompaa muodostaa tarkempi ja tasalaatuisempi pistepilvi, sillä aineisto on mahdollistanut sen.



Kuva 31 Tieprofiilin pinnat poikkileikkauksessa paalulla 25.00. Myös kanttikivi on lähes onnistunut pistepilvessä

Korkeustarkkuuden tarkastelussa pintamallien avulla ei huomattu mitään hälyttävää. Pintojen erot olivat pääasiallisesti hyvin maltilliset 0-5 senttimetrin luokkaa, mutta myös lähes 10 senttimetrin poikkeamia havaittiin. Kuvausolosuhteiden sekä materiaalien todettiin vaikuttavan pintamallien välisiin eroihin.

Korkeustarkkuuden toinen tarkastelutapa oli tarkastella maanpinnassa olevien pisteiden sekä viivojen suoraa eroa samaisessa pisteessä olevaan pistepilveen. Vertailtaviksi pisteiksi mukaan otettiin maastomallissa mitatut maanpinnan hajapisteet, tien keskilinjat, katujen- ja suojateiden maaliviivat. Näistä tehtiin tekstitiedosto joka sisälsi identifioivan numeron sekä X,Y ja Z-koordinaatit. Tätä tiedosta käytettiin vertailupisteiden tuonnissa TerraScan-sovellukseen. Lopputuotteena saatiin raportti, jossa on kaikkien tiedostossa olevien pisteiden erot samaisessa sijainnissa olevaan pistepilven maanpintapisteisiin. Sekä näistä arvoista laskettuihin keski-, minimi- sekä maksimiarvoihin. Vertailtuja pisteitä oli aineistossa yhteensä 577 pistettä, joiden korkeuden virhekeskiarvo oli +0.030 metriä (Kuva 32).

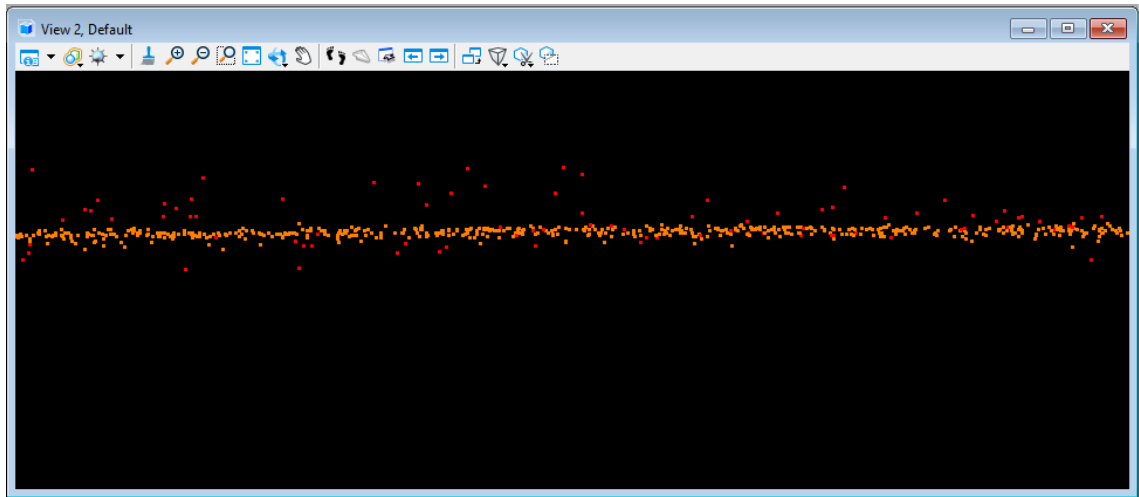
Average dz	+0.030
Minimum dz	-0.054
Maximum dz	+0.114
Average magnitude	0.032
Root mean square	0.042
Std deviation	0.030

Kuva 32. Vertailun tulokset, keskiarvovirhe korkeudessa +0.03 metriä

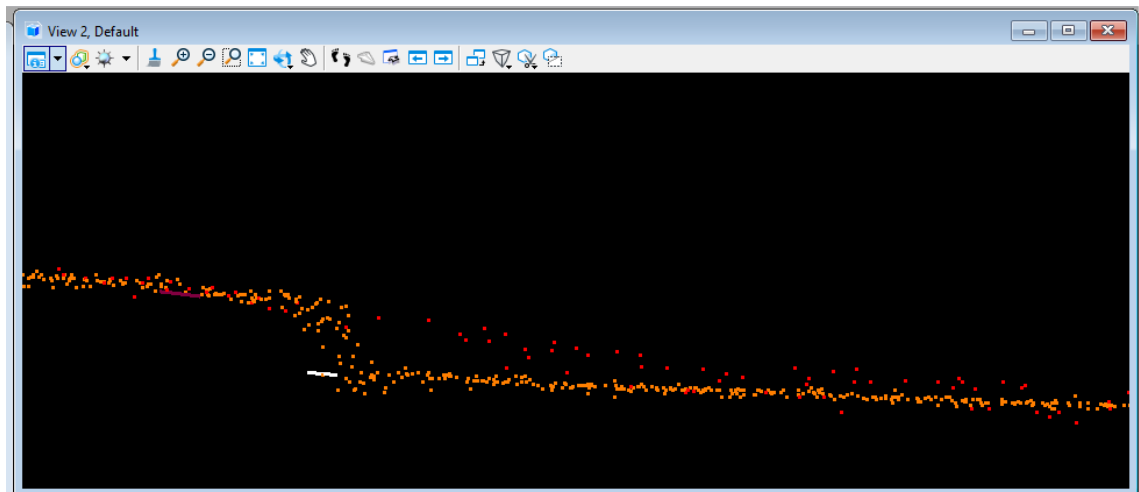
4.4.4 Pistepilvien erot, mobiiliskannaus vs. fotogrammetrinen

Lopuksi vertailtiin fotogrammetrisesti tuotettua pistepilveä, mobiiliskannauksella tuotettuun pistepilveen. Pistepilvien keräystapahan on täysin eri. Mobiiliskannauksessa pistepilvi tuotetaan laserskannerilla, joka useimmiten on asennettua ajoneuvon, kuten auton katolle. Ja fotogrammetrinen pistepilvi, kuten aiemmin on selitetty, saadaan taas laskennallisesti laskettua olemassa olevasta kuvamateriaalista. Kuvamateriaali tässä tapauksessa on RPAS-järjestelmällä kerätty. Mobiiliskannauksella on omat hyvät ja huonot puolensa. Yksi huomattava etu on skannerin etäisyys skannattavaan kohteeseen. Skanneri ehtii kerätä huomattavan määrän pisteitä, koska skannattava kohde sijaitsee varsin lähellä. Huonona puolelta todettakoon ohiajavat autot, parkkeeratut autot, aidat yms. kiinteät esteet, joiden taakse ei laserpulssia saada menemään. Ilmasta käsin tämäntapaisia ongelmia on vähemmän.

Oheisessa kuvassa (Kuva 33) nähdään, miten pilvet eroavat toisistaan pistetiheyden sekä -tasaisuuden osalta. Ruskea mobiiliskannaus pysyy aineistona paremmin ja tiheimmin kasassa, kuin fotogrammetrinen, jolla on taipumuksena saada aikaan värinäefektiä. Alla olevassa kuvassa (Kuva 34) on myös huomattavissa, että mobiiliskannaus kykenee erottelemaan esimerkiksi kanttikivet huomattavasti selvemmin kuin mitä fotogrammetrinen pistepilvi.



Kuva 33. Punainen fotogrammetrinen pistepilvi ei ole yhtä laadukas kuin ruskea mobiiliskannattu aineisto



Kuva 34. Mobiiliskannauksesta on erotettavissa kadun reunatuki ”kanttikivi”

4.5 Lopputulos

Taso- sekä korkeustarkkuustarkastelun lopputuloksena voidaan todeta aineiston olevan tarkkaa. Sen tarkkuus riittää mittausluokan 1e tarkkuusvaatimukseen, joka on määritelty JHS 185 Asemakaavan pohjakartan laatiminen liitteessä 4. Näin voidaan myös todeta, että tarkkuus riittää hyvin myös kaupunkimallin päivittämiseen sekä 3D-rakennusten tuottamiseen. Huomioiden kuitenkin kaikki mahdolliset virhelähteet yksittäiseen mittaukseen aineistolta, ei voida sanoa aineiston olevan taso- sekä korkeustarkkuudessa kuitenkaan 3 senttimetrin luokkaa vaikka

tulokset näin osoittavatkin. Yleisesti kysyttäessä useamman tehdyn aineiston perusteella käytämme aineistosta tarkkuusluokkana tasosijainnissa 5 senttimetriä sekä korkeudessa 10 senttimetriä.

Aineistoa käyttävien ihmisten pitää kuitenkin olla tietoisia aineistossa mahdollisesti olevista virheistä, sekä aineiston käyttäytymisestä erilaisten materiaalien sekä muiden kohteiden, kuten rakennelmien osalta. Pitää huomioida, että tarkka aineisto ei ole automaattista. Koko RPAS-järjestelmällä tuotetun aineiston tuotantoketjun pitää olla laadukas. Mukana olevien henkilöiden pitää tunnistaa ne tekijät, jotka tekevät aineistosta tarkan ja luotettavan. Mikäli prosessissa on tehokkaat ja asiansa osaavat henkilöt, on aineisto laadukasta ja käyttökelpoista hyvin moneen.

Tarkkuustarkastelun viimeisenä tarkasteluna ollut mobiiliskannauksen ja fotogrammetrisen pistepilven erot tulevat aineistojen keräystavasta johtuvista syistä. Mobiiliskannauksen aineistoa voidaan käyttää myös pienempien asioiden havaitsemiseen kuten kadun reunatuet. Lisäksi tästä johtuen tätä aineistoa voidaan käyttää myös tarkempien aineistojen kuten suunnittelun pohjaksi mitattavien maastomallien vektorointiin, johon fotogrammetrisesti tuotettu pistepilvi käy huonosti. Kuitenkin ilmakehä on tasosijainniltaan riittävän tarkka tämän tapaisten tarkempien suunnitelmien pohjamateriaaliksi ja sinne niitä on Turun kaupungissakin toimitettu, kuten tarkastelun alla ollut ortoilmakuva.

5 POHDINTA

Opinnäytetyön tekeminen oli kokonaisuudessaan opettavaista. RPAS-järjestelmien räjähdysmäinen kasvu sekä sitä seuraava tekninen kehitys on nopeaa. On hankalaa pysyä perässä, mitä kaikkea jopa yhden vuoden aikana ohjelmistojen sekä laitteistojen kehityksessä tapahtuu. Oman lisänsä tähän tuo laitteisiin kiinnitettävien instrumenttien kehittyminen, niin koon kuin hinnankin osalta. Laitteiden edullisuus sekä yksinkertaisuus tuo ne lähes kaikkien mittausalalla olevien saataville. Onko se uhka vai mahdollisuus, jää nähtäväksi.

Oli mukava sukeltaa fotogrammetrian maailmaan vähän syvemmälle, tähän opinnäytetyöhön tuli murto-osa siitä kaikesta mitä tämän opinnäytetyö matkan aikana tuli opittua. Opinnäytetyö antoi myös uusia eväitä omaan arkipäiväiseen työhön RPAS-järjestelmien sekä fotogrammetrian parissa.

RPAS-järjestelmän hankinta Turun kaupungille on ollut järkevää. Uskon että RPAS-järjestelmän hankinta on järkevää mille tahansa kuntaorganisaatiolle. Onhan Suomessa tehty jopa yhteishankintoja laitteistoihin, mikäli ja kun välttämättä omat resurssit ja taidot ei ole riittäneet, mikä on mielestäni hyvin järkevää ajattelua. Mutta saadakseen laitteistosta tuleva hyöty täysimääräisesti irti, pitää organisaatiossa olla ymmärrys mitä laitteistolta halutaan ja mitkä ovat realiteetit laadukkaan toiminnan ylläpitämiseen, kuten tarvittavat resurssit työvoimassa.

RPAS-järjestelmällä saadaan tuotettua tuoretta mittausdataa sekä muita lopputuotteita tehokkaasti ja varsin pienillä kustannuksilla. Uskoisin, että kaikkea sitä potentiaalia, mitä laitteistolla on ei olla vielä saatu täyteen käyttöön. Laitteiston elinkaari tähän asti on lähinnä ollut tässäkin opinnäytetyössä huomattavassa roolissa olleiden prosessien hiomista. Sitä miten laitteen tuottamasta kuva aineistosta saadaan ulos hyvää ja laadukasta raaka-ainetta prosessointiin. Josta taas saadaan hyvää ja laadukasta dataa jatkohyödynnettäväksi ja jalostettavaksi lopputuotteeksi.

Olemme myös mielestäni onnistuneet RPAS-järjestelmän käyttöönotossa, siitä on osoituksena lopputyön lopussa oleva tarkastelu laitteen tarkkuudesta. Tarkkuus ei pelkästään tule laitteen ominaisuuksista, vaan ymmärryksestä mitä ollaan

tekemässä. Tähän meillä on Turun kaupungissa panostettu. RPAS-järjestelmän alkutaipaleella teimme todella paljon töitä sen eteen, että ymmärtäisimme mistä asioista tarkkuus koostuu. Miten aineistoa pitää kerätä, että se tuottaa parhaan mahdollisen raaka-aineiston, miten sää vaikuttaa, miten kameran kulma vaikuttaa ja monta muuta kohtaa pohdittiin. Näiden kaikkien asioiden keskeltä tärkeimmäksi huomioksi nousi kartoituslennon suunnittelu sekä maastotukipisteiden huolellinen sijoittelu ja mittaus. Olen keskustellut aiheesta jonkin verran myös muiden RPAS-järjestelmiä käyttävien henkilöiden kanssa ja olen saanut myös näille ajatuksilleni vastakaikua. En usko, että useampi ihminen voi olla väärässä.

Nykyaikainen fotogrammetrinen prosessointi algoritmeineen on siis huikeaa, koneiden laskentatehot yhdistettynä uusiin esimerkiksi konenäköön osittain perustuviin menetelmiin on mullistanut alaa. Ennen aineistojen käsittelyihin meni päiviä, jopa viikkoja. Nykyään varsin suuretkin aineistot saadaan käsiteltyä yhdessä päivässä aloittaen siitä, että raakadata kerätään saman päivän aikana. Hienoa tässä on myös se, että tämä tekniikka on tehty kuitenkin hyvin käyttäjäystävälliseksi ja helposti lähestyttäväksi.

Mitä seuraavaksi? Itse näen, että seuraava isompi askel tulee olemaan jonkinlainen parviäly tai sitten ylipäättään robotiikka ja automatisointi. Myös laitteiden koot tulevat varmasti jollain aikavälillä kasvamaan, tosin voi käydä myös päinvastoin. Ehkä jonain päivänä parviäly ja automatiikka hoitaa aamulla työpäivän alkaessa taivaalle riittävän määrän ilma-aluksia tai robotteja, jotka käyvät hoitamassa päivän mittaukset ja merkinnät. Mene ja tiedä.

6 LÄHTEET

COLOMINA, I. and MOLINA, P. 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 92, 79-97. Viitattu 30.11.2019 <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.

DJI. Products. Viitattu 1.12.2019 <https://www.dji.com/fi/products/compare-m200-series>.

GIM International. News. DJI's Metric Camera for Aerial Surveying. Viitattu 1.12.2019 <https://www.gim-international.com/content/news/dji-s-metric-camera-for-aerial-surveying>.

Hassinen, A. 2016. UAV-lennokit ja -kopterit : Kokemuksia UAV- ja RPAS-laitteista. Viitattu 30.11.2019 http://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-952-61-2244-1/urn_isbn_978-952-61-2244-1.pdf.

Honkavaara, E., Hakala, T. & Nevalainen, O. 2018. Ilma-alus kohteen mukaan. Positio 1/2018, 8–11.

Kansallinen maastotietokanta-hanke (KMTK) 2016-2017. Kuntien tuotantoprosessit - projekti. Viitattu 30.12.2019 <http://kmtk.paikkatietoalusta.fi/projektit-ja-tyopaketit/kmtk-kuntapro>.

Lahelman, A. 2014. Digitaalinen fotogrammetria - uusi menetelmä suomalaisen arkeologian kentälle? Luento. Proseminaari 18.3.2014. Helsingin yliopisto. Helsinki.

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom 2019a. Droneinfo. Viitattu 30.11.2019 https://www.droneinfo.fi/fi/usein_kysyttya/ilmailu_-_miehittamattomat_ilma-alukset_ja_lennokit.

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom 2019b. Droneinfo. Viitattu 30.11.2019 <https://www.droneinfo.fi/fi/lentotyö>.

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom 2019c. Ajankohtaista. Viitattu 30.11.2019 <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/koko-eun-kattavat-drone-asetukset-julkistettu>.

Mansikkaniemi, M. 2019. Miehittämättömän ilmailun nykytila ja tulevaisuuden näkymät Suomessa. Hämeen ammattikorkeakoulu. Tulevaisuuden liikennejärjestelmät. Ylemmän ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö.

Pix4D 2019a. About. Viitattu 1.12.2019 <https://www.pix4d.com/about-us>.

Pix4D 2019b. Advanced knowledge - Scientific papers. Viitattu 2.12.2019 <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360000235026-Advanced-knowledge-Scientific-papers#label1>.

Shaw, Ian G. R. 2014. The Rise of the Predator Empire: Tracing the History of U.S. Drones, Understanding Empire. Viitattu 30.12.2019 <https://understandingempire.wordpress.com/2-0-a-brief-history-of-u-s-drones/>.

Syväjärvi, J. 2017. Miehittämättömän ilma-aluksen käyttö toimitustuotannon kartoitustyössä. Luento. Maanmittauspäivät 2017.

Sippo, M. 2013. Lennokkikartoitus – uusia näkymiä ilmasta. Maankäyttö 2/2013, 33–35.

Strecha, C. 2018. Pix4D. Toimitusjohtajan haastattelu InterGeo 2018 Frankfurt am Main.

Teittinen, H. 2017. Georeferoidun pistepilven tuottaminen miehittämättömällä lentoaluksella kerätystä kuva-aineistosta. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Fotogrammetria ja kaukokartoitus.