



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Janne Suomalainen

# Dronekuvantamisen hyödyntämisen mahdollisuudet rakennusvalvonnassa ja -konsulttitoiminnassa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikan insinööri

Insinöörityö

6.4.2021

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Janne Suomalainen Dronekuvantamisen hyödyntämisen mahdollisuudet rakennusvalvonnassa ja -konsulttitoiminnassa 66 sivua 6.4.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikan insinööri
Ammatillinen pääaine	Infrarakentaminen
Ohjaajat	Projektipäällikkö, Hannu Virmalainen Lehtori, Timo Riikonen
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää Rakennuttajatoimisto HTJ Oy:lle dronekuvantamisen hyödyntämisen mahdollisuuksia infrarakentamisen valvonnan sekä infrarakennuttajakonsultin työssä.</p> <p>Työssä tutkittiin dronella tapahtuvaa valokuvaamista ja fotogrammetriaa sekä liittyviä kuvaustekniikoita. Kuvantamistekniikoista tutkittiin droneihin liittyvää kameratekniikkaa, objektitekniikkaa sekä ohjelmien hyödyntämistä digitaalisten materiaalien tuottamiseksi.</p> <p>Dronella taltioituja valokuvia hyödynnettiin pistepilvien, kolmiulotteisten mallien, ortokuvien ja fotogrammetristen kuvien ja niistä saatavien mittatietojen tuottamisessa, työn tutkimuksessa ja käytännön sovelluksissa. Työssä käytiin yksityiskohtaisesti läpi jokaisen osan alueen teoria sekä käytäntö niiltä osin, mitä työn aikana oli mahdollista tehdä ja työhön varatut resurssit mahdollistivat.</p> <p>Työssä selvitettiin teoria valokuvaamisen ja fotogrammetrian takana, jonka jälkeen hyödynnettiin opittua käytännön sovelluksiin. Saatujen tuloksien pohjalta voitiin vertailla teorian ja käytännön tuloksien onnistumista.</p>	
Avainsanat	drone, fotogrammetria, pistepilvet, valokuvaus, infra

Author Title Number of Pages Date	Janne Suomalainen Possibilities of Utilizing Drone Imaging in Construction Supervision and Consulting Activities 66 pages 6 April 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Infrastructure construction
Instructors	Hannu Virmalainen, Project Manager Timo Riikonen, Principal Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to study the possibilities of utilizing drone imaging in infrastructure construction supervision and in the work of an infrastructure construction consultant. The thesis was commissioned by Rakennuttajatoimisto HTJ Oy.</p> <p>Drone photography and photogrammetry as well as related imaging techniques were investigated. Of the imaging techniques, drone-related camera technology, object technology, and the utilization of programs to produce digital materials were studied.</p> <p>Photographs captured by drone were utilized in the production of point clouds, three-dimensional models, orthophotos, and photogrammetric images as well as the dimensional data obtained from them, in the study of work, and in practical applications. The thesis project covered in detail the theory and practice of each area to the extent that was possible in terms of the project scope and the resources allocated to the project.</p> <p>The theory behind photography and photogrammetry was investigated, after which the lessons learned were applied to practical applications. On the basis on the results obtained, it was possible to compare the success of the theoretical and practical results.</p>	
Keywords	drone, photogrammetry, aerial point clouds, photography

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Tutkimuksen tavoite	3
2.1	Tavoite	3
2.2	Rajaukset	3
3	Tutkimusmenetelmät	4
3.1	Ohjelmistojen käyttö ja testaus	5
3.1.1	Dronen kauko-ohjauksen ja hallinnan applikaatio	5
3.1.2	Dronen automatisoidun lennon applikaatio	6
3.1.3	Valokuvien kuvanmuokkaukseen soveltuvat ohjelmistot	7
3.1.4	360 asteen panoraamakuvien toteuttamisen ohjelmisto	8
3.1.5	Fotogrammetristen mittausten ja pistepilvien tuoton ohjelmistot	10
3.2	Lennättämisen ja kuvaamisen käytäntöjen hahmottaminen sekä hyödyntäminen käytännön harjoituksilla ja kokeiluilla	15
3.2.1	Pohdintaa kuvaamisesta dronella	17
3.2.2	Exposure value, valovoima ja kuvan valotus	18
3.2.3	Tarkennus	20
3.2.4	Etsin	23
3.2.5	Hämärällä ja vähäisessä valaistuksessa kuvaaminen	24
3.2.6	ISO-arvon merkitys kuvanlaatuun	28
3.3	Asiantuntijalausunnot ja haastattelut	30
3.4	Kirjallisuus	30
3.4.1	Digitaalisen valokuvan teoriaa	31
3.4.2	Kuvakohina digitaalisessa kuvassa	36
3.4.3	Kamerat	37
3.4.4	Fotogrammetria lyhyesti	45
3.4.5	Fotogrammetria dronella	45
3.5	Dronella lentämisen säännökset ja vaatimukset	49
4	Tutkimustulokset	51
5	Johtopäätökset ja kehitysehdotukset	55
6	Yhteenveto	56

7	Pohdinta, omat ajatukset	57
	Lähteet	58

## Lyhenteet

FOV	Field of view. Kuvaan tallentuva kuva-ala, jonka kameratekniikka mahdollistaa.
GSD	The ground sampling distance. Kahden vierekkäisen kuvaan tallentuneen pikselin välimatka maastossa ts. resoluutio.
GNSS	Global navigation system. Satelliittipaikannukseen perustuva paikanmääritys maailmanlaajuisen satelliittijärjestelmän avulla.
ISO	International organization for standardization. Tekniikka, joka mahdollistaa kameran kuvakennon valoherkkyyden suurentamisen digitaalisesti.
PPK	Post-processed kinematic. GPS-paikkatiedon korjaus jälkilaskennassa.
PX	Pixel. Kuvaan tallentuva yksittäinen pikseli, joka muodostuu kuvasensorin pikselin tallentamista mittaustiedoista.
RTK	Real-time kinematic. GPS-paikkatiedon reaaliaikainen korjaus.

## 1 Johdanto

Työssä selvitetään dronen lennättämisen säännökset ja vaatimukset sekä tutustutaan ja tutkitaan jo olemassa olevia käyttötarkoituksia infrarakentamisen saralla.

Tämän opinnäytetyön teon aikana pyritään kehittämään yritykselle uusia dronen käytännönsovelluksia ja käytön hyödyntämisen mahdollisuuksia. Lisäksi työssä testataan ja tutkitaan eri ohjelmistoja ja applikaatioita, jotka liittyivät mahdollisiin käyttömahdollisuuksiin, joissa dronea voidaan tulevaisuudessa hyödyntää tämän työn pohjalta.

Työssä selvitetään teoria sovelluksien takana, sekä teoria yleisesti liittyen dronella tapahtuvaan kuvaamiseen ja dronen avulla tuotettavien kuvien syntymiseen.

Opinnäytetyössä tutkitut, selvitettyt sekä työn aikana kehitetyt käytännönsovellukset rajataan koskemaan vain infrarakentamista, erityisesti rakennuttajakonsultin ja valvojan käytössä mahdollisesti hyödynnettäviä ratkaisuja, työkaluja ja ohjelmistoja.

Pääasiallisena ja merkittävimpänä tutkimusongelmana on, ettei lähtötietoja ole liittyen dronetekniikkaan, liittyviin ohjelmistoihin, kuvaamiseen tai dronen lentämiseen. Nämä asiat täytyi selvittää perustavasti ennen työn käytännön sovelluksien kehittämiseen pääsemistä.

Työn tavoitteena on pyrkiä löytämään keinoja tuottaa fotogrammetrisesti mittauksia dronella otettavista valokuvista sekä tuottaa näistä valokuvista pistepilviä sekä luomaan pistepilvistä 3D-malleja.

Pistepilvistä ja niistä edelleen johdetuista kolmiulotteisista malleista luodaan keino hyödyntää niitä työn etenemän ja rakenteiden tarkastelussa. Käyttää tuotettuja kolmiulotteisia malleja rakenteiden tarkastelussa. Esimerkiksi vertaamalla kuvista tuotettua 3D-mallia suunnitelmamallin kanssa päällekkäin tietomallissa. Vertaillen visuaalisesti ja ohjelmallisista mittauksista.

Tämän lisäksi työssä kehitetään puhtaasti dronevalokuvaamisen pohjautuvaa ja valokuvia hyödyntäviä innovaatioita rakennustöiden valvojan hyödynnettäväksi, valvontareporteissa kuin työmaan seurannassa.

Työllä pohjustetaan todennäköisiä, tulevaisuuden dronekuvantamisen hyödyntämisen mahdollisuuksia.



## 2 Tutkimuksen tavoite

### 2.1 Tavoite

Tutkimuksen päätavoitteena on luoda yritykselle selvitys dronekuvantamisen hyödyntämisen mahdollisuuksista.

Näiden lisäksi on tavoitteena luoda yritykselle valmis toimintamalli ja ohjeistus siitä, mitä lennättäminen, kuvantaminen ja kuvadatan hyödyntäminen edellyttää. Mitä ohjelmistoja vaaditaan saadun kuvadatan kautta tulleeseen pistepilven hyödyntämiseen, kuinka ja miten pistepilveä voidaan hyödyntää. Minkälaisella laitteistolla päästään tavoitteeseen ja mitä kustannuksia ja paneutumista edellytetään, että tulokset ovat hyödynnettävissä.

Oleellisin, ja niin sanottu punainen lanka on kuitenkin dronella otettavien valokuvien hyötykäyttö itsessään. Työn lähtökohtana on dronen pääasiallinen käyttötarkoitus, rakennustöiden valvonta ja sen käyttöön dronea hyödyntävien innovaatioiden kehitys.

### 2.2 Rajaukset

Tutkimus rajataan käsittämään dronen hyödyntämisen käytännön sovelluksia infrarakentamisen rakennustöiden valvonnassa. Työssä löytyneet ja hyödynnettävät ohjelmistot, laitteistot, säännökset yms. dronekuvantamiseen liittyvä rajataan koskemaan vain infrarakentamisessa hyödynnettäviä käyttömahdollisuuksia. Työssä ei oteta kantaa infrarakentamisen ulkopuolisiin mahdollisuuksiin dronen käytölle.

Työn aikana tavoitteita jouduttiin osaksi miettimään uusiksi ja sen takia osa tutkimuksen pääpainosta poissulki joitain alussa ajateltuja tavoitteita. Tämä johtui siitä, että työn edettyä tutkimuksen tiettyyn osaan käytettävä aika osoittautui ajateltua vaativammaksi ja aikaa vievämmäksi tai kustannukset tulokseen pääsemiseen nousivat kohtuuttomiksi ajatellusta. Näin kävi fotogrammetristen sovellusten ja pistepilvien tarkemman tutkimisen kanssa.

### 3 Tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyössä tutkitaan dronekuvantamista perehtymällä työhön asetetun budjetin mukaisesti laitteisiin ja ohjelmistoihin. Ennen työn aloitusta tehtiin alustavaa selvitystyötä laitteista ja ohjelmistoista. Tähän valmistelevaan työhön käytettiin noin kuukausi aikaa. Tässä selvitettiin eri ohjelmistoja, laitteita ja käyttäjäkokemuksia eri internet lähteistä sekä työmailta.

Laitehankinnan päätöksen ja hankinnan jälkeen työ lähti käyntiin, sillä itse drone oli edellytys tutkimuksen ja käytännön kokeilujen tekemiselle.

Työtä lähdettiin avaamaan tutkimuskysymysten avulla, jotka asetettiin työn alussa tutkimukselle, niitä olivat seuraavat:

- Lähtötiedot ja tavoitteen kohtaaminen
- Laitteisto
- Ohjelmisto
- Olemassa olevia sovelluksia ja käyttäjätietoa
- Lennättämisen vaatimukset, viranomaisten luvat jne.
- Soveltuuko lennättäminen yrityksen sisällä ns. kaikille vai vaatiiko hyödyntäminen syvempää perehtymistä
- Kustannukset ja ajankäyttö, tuoko arvoa toiminnalle
- Mahdollisia kaupallisia sovelluksia asiakkaille myytäväksi
- Jos jonkun tutkiminen osoittautuu kannattamattomaksi, miksi
- Jos jotain ei voida tutkia, miksi
- Jos joku ensin ajateltu tavoite epäonnistuu, miksi.

Tutkimukseen käytetään pääosin internetlähteitä niin teorian kuin käyttäjäkokemusten selvittämiseen.

### 3.1 Ohjelmistojen käyttö ja testaus

Käyttöön ja testaukseen valituille ohjelmistoille ja mobiiliapplikaatioille työssä asetettiin ehto, että niiden tulee soveltua ammattimaiseen käyttöön ja niistä tulee löytyä kattavasti jo todennettua käyttäjätietoa.

Ohjelmistoille tuli olla mahdollisimman hyvä ja selkeä ohjeistus saatavilla, niiden käytön opetteluun palveluntarjoajan kotisivuilta. Mahdollisten ongelmatilanteiden ratkaisemiseen täytyi olla saatavilla etätuki ohjelmiston tarjoajalta. Nämä ehdot asetettiin niin valokuvien käsittelylle kuin fotogrammetristen mittauksien, pistepilvien ja kolmiulotteisten mallien toteuttamisen ohjelmistoille.

Työssä testattiin ja käytettiin seuraavia ohjelmistoja:

- DJI GO 4, dronen kauko-ohjauksen hallinnan ohjelmisto
- Pix4dCapture, dronen autopilotoinnin mahdollistava applikaatio
- PTGui, panoraamakuvien muodostamisen ohjelmisto
- Agisoft, fotogrammetriaan, kolmiulotteisten mallien ja pistepilvien tuottamiseen keskittyvä tietokoneohjelmisto
- Pix4d, fotogrammetriaan, kolmiulotteisten mallien ja pistepilvien tuottamiseen keskittyvä tietokoneohjelmisto
- Adobe Lightroom, valokuvien jälkikäsittelyn ohjelmisto
- Windows valokuvat, kuvan katselu ja muokkaus ohjelmisto.

#### 3.1.1 Dronen kauko-ohjauksen ja hallinnan applikaatio

Työssä dronen etähallinnan ohjelmisto määräytyi sen mukaan mikä drone yrityksen käyttöön ja tämän opinnäytetyön tekemiseen oli mahdollista hankkia.

Yritykselle hankittua DJI-merkkistä ja Phantom 4 Pro v2.0 -mallista dronea on mahdollista kontrolloida kirjoitushetkellä vain DJI:n oman mobiiliapplikaation, DJI 4 GO kautta liitettynä yhteen mukana tulleeseen kauko-ohjaimeen. Sovellus on saatavilla niin Android pohjaisille mobiililaitteille kuin Applen iOS -laitteille.

Tässä työssä dronen kauko-ohjaimen kanssa pariksi valikoitui Applen tablettitietokone, (kuva 15) sen koon ja näytön ominaisuuksien (3.2.4) takia.

DJI GO 4 -ohjelmisto mahdollisti käytössä olleen dronen seuraavien lentoon vaikuttavien parametrien säädön; maksimikorkeuden, maksimietäisyyden ohjaajasta, automaattisen kotiinpaluun sijainnin tallennuksen ja päivityksen lennon aikana sekä automatisoitujen lentotilojen asetusten säätöjen muutokset esim. ”follow me” -toiminnon mahdollistavan autopilot-lentotilan lentokorkeus. Lento-ominaisuuksiin vaikuttavien asetusten lisäksi hallintaohjelmisto mahdollisti käyttäjälleen laajat kuvaamiseen vaikuttavat säädöt (3.2), asetukset ja arvojen seurannan graafein ja muutoin visuaalisesti.

Merkittävä, ellei tärkein ominaisuus sovelluksessa dronen kauko-ohjaajalle oli se, että se tarjosi mahdollisuuden seurata lennon aikana reaaliaikaisesti dronen etäisyyttä lentäjään, lentokorkeutta, akun lämpötilaa (jolla erityinen merkitys kylmällä lennettäessä, mahdollisen akun äkillisen jännitteen laskun takia, pakkasesta johtuen), akun varaustilaa, arvioitua lentoaikaa, sijaintia, varoituksia esim. moottorien nosteen laskussa tai liian kovaa tuulta. Iso tekijä lennättämisen helpottamiseksi oli lisäksi, että ohjelmisto antoi kauko-ohjaajalle näkymän dronen kamerasta, joka helpottaa lentämistä huomattavasti dronen ympäristön havainnointia ja näin ollen myös turvallisempaa käyttöä.

### 3.1.2 Dronen automatisoidun lennon applikaatio

Dronen käyttö fotogrammetristen mittausten ja kuvausten (3.4.5)] suorittamisen näkökulmasta, on mahdollista pääosin automaation ja ohjelmallisen autopilotoinnin kautta. Dronen autopilotointi ja automaattiset esimääritetyt lentoreitin seuraamiset toteutettiin työssä fotogrammetristen kuvausten edellytyksin. Näiden toteuttaminen on mahdollista myös manuaalisesti kuvat ottamalla ja dronea lentämällä, mutta tämän opinnäytetyön aikataulun rajoitusten takia, sen tarkempi tutkiminen jouduttiin jättämään pois.

Automaattisten lentojen suorittamiseen valikoitui applikaatioksi Pix4dCapture (Kuva 26), jossa pystyi määrittämään fotogrammetriseen kuvaukseen liittyvät parametrit, sekä lentoreitin ja alueen, itse lento toteutuisi täysin autopilotin avulla. Automaation tukena ohjelmisto vaati toimiakseen myös dronen varsinaiseen hallintaan tarkoitetun DJI 4 GO sovelluksen (3.1.1).

Pix4dCapture oli käyttöliittymältään selkeä ja säädettävät parametrit olivat helposti applikaatiossa saatavilla. Sovelluksen kehittäjän ohjeet ja etätuki oli hyvin saatavilla heidän kotisivuillaan, jonka avulla automaattisten lentojen suunnittelu ja toteutus oli helppoa, mukaan lukien lennot, joissa dronen täytyi laskeutua takaisin lähtöpaikkaansa akun vaihtoon ja osata palata takaisin pisteeseen, jossa kuvaukset jäivät kesken jatkaakseen lentosuunnitelmaa. Saman sovelluskehittäjän toinen ohjelmisto Pix4dMapper valikoitui myös tässä opinnäytetyössä käyttöön tietokoneelle valokuvista toteuttaviin fotogrammetrisiin mittauksiin (3.1.5).

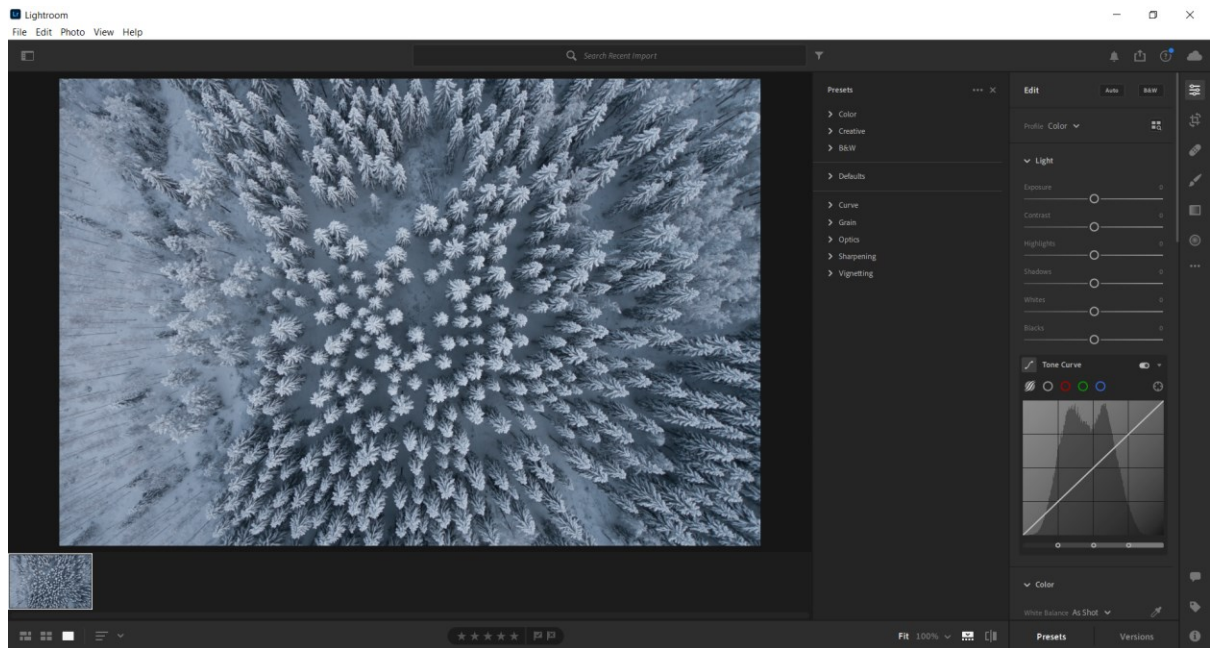
Applikaatiossa reitin suunnittelija pystyy luomaan kuvattavan alueen (Kuva 26) ohjelmassa olevalle Google Mapsin karttapohjalle, joko satelliittikuvapohjaiselle kartalle tai normaalille karttapohjalle. Käyttäjälle mahdollistetaan applikaatiossa valinta siitä, onko tarkoitus luoda kuvasta mittatarkkaa taso- eli ortokuvaa vai tarvitseeko kuvista saada muodostettua esimerkiksi 3D-malleja tai syvyyskarttoja. Näistä riippuen applikaatio antaa säädettäväksi kamerakulman sekä sen, kuinka monta prosenttia kuvat limittyvät päällekkäin. Käytännössä mitä enemmän limitystä, sen parempaan tarkkuuteen on mahdollista päästä mittatarkkoja 3D-malleja luodessa fotogrammetrisessä ohjelmassa jälkikäteen.

Tämän jälkeen käyttäjälle jää määritettäväksi vain se kuinka tarkan GSD-arvon (3.4.5) arvon hän haluaa. Tämä määräytyy dronessa olevan kameran mukaan ominaisuuksien mukaan (3.4). Haluttu GSD-arvo määrittää myös sen kuinka korkealle drone voi nousta. Näiden valittujen arvojen jälkeen applikaatio muodostaa valitulle alueelle halutuilla parametreilla lentoreitin (Kuva 26), jonka jälkeen drone pystyy suorittamaan lennon automaatiolla ja autopilotilla.

### 3.1.3 Valokuvien kuvanmuokkaukseen soveltuvat ohjelmistot

Esityön jälkeen eri lähteistä internetissä, niin ammattilaisten kuin asiaa harrastavien käyttäjien kirjoitusten ja esimerkkien pohjalta päädyin työssä kokeilemaan ja käyttämään vain yhtä kuvanmuokkausohjelmiston kokonaisuutta, Adoben tuotepaketti Lightroom ja Photoshop. Syystä, että ohjelmiston tuki ja ohjeet olivat helposti ja laajasti saatavilla sovelluksen tekijältä ja se on maailmalla hyvin yleisesti käytetty ja hyväksi todettu ohjelmisto, johon löytyy lisäksi laajalti sen käyttäjien vinkkejä ja ohjevideoita erilaisten asioiden toteuttamiseen kuviin sovelluksen avulla.

Kuvien muokkaamisen kannalta tärkeimmäksi työssä osoittautui kuvien värien, valoisuuden ja terävyyden säätö kameran tallentamasta RAW-tiedostosta, joka sisältää kaiken kuvan tallentamiseen liittyvän tiedon (3.4.1) ja, jonka avulla näitä tallennettuja arvoja voidaan soveltuvalla ohjelmistolla (tässä tapauksessa Adobe Lightroom) vielä muokata ja jossain määrin parantaa alkuperäistä tallennettua kuvanlaatua.



Kuva 1. Adobe Lightroom -kuvanmuokkauksen ikkuna.

Kuvassa 1. Adobe Lightroomin kuvakaappauksessa näkyy säätimet, jolla voidaan muokata RAW-tiedostoon tallentuneita mittaustietoja esimerkiksi valotuksen ja kontrastin osalta. Ohjelma sallii vielä laajasti kaikenlaisen muunkin mittaustietojen muuttamisen ja mahdollistaa hyvin sen, että kuvat ovat vielä niin sanotusti pelastettavissa laadullisesti, jos kameran asetukset (3.4.1) ovat olleet hiukan pielessä kuvatessa.

### 3.1.4 360 asteen panoraamakuvien toteuttamisen ohjelmisto

Toteuttaessa panoraamakuviä ohjelmiston tärkeimmäksi ominaisuudeksi osoittautui ohjelmassa oleva sisäänrakennettu tekoäly, joka yhdistelee kuvat toisiinsa saumattomasti ja niin, ettei kuviin synny vääristymiä liittyvien kuvien saumojen kohdalla ja tätä kautta kuvasta saadaan todellisuutta vastaava tarkasteltaessa. Tällaisia ohjelmistoja

löytyi sekä maksullisia että maksuttomia, maksulliset peittosivat nopeudellaan, käytettävyydellään ja muodostetun kuvanlaadullaan selkeästi ilmaisversiot.

Jos kuvat vaativat esikäsittelyä jollakin tavalla laadun parantamiseksi, esimerkiksi valoisuuden osalta toteutin sen kuvamuokkaukseen valitulla ohjelmistolla (3.1.1).

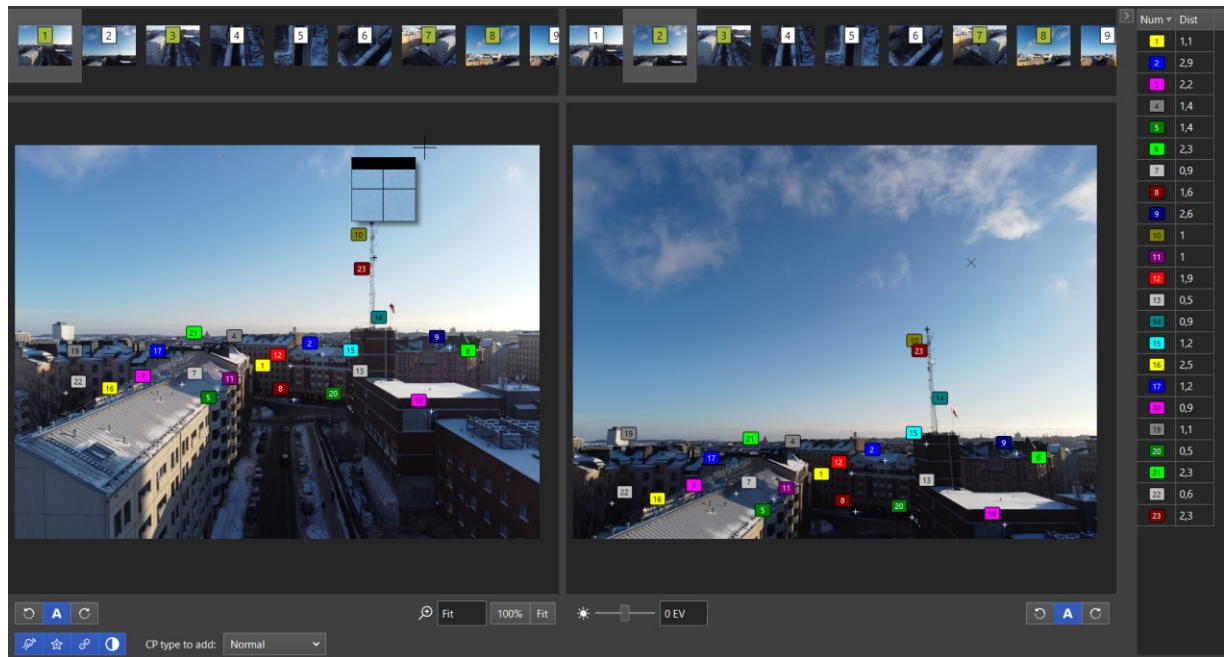
Tämän työn droneksi valittu DJI Phantom 4 Pro v2.0 tarjosi hallintaohjelmistossaan (DJI 4 GO) automaation, jonka avulla drone ottaa halutunlaiseen panoraamakuvaan tarvittavat valokuvat automaattisesti.



Kuva 2. Dronella ottamistani kuvista muodostettu pallopanoraaman osanäkymä selaimessa katseltuna.

Esimerkiksi myöhemmin infrarakentamisen rakennusvalvonnassa hyödynnettäväksi osoittautunut kuvasovellus, pallomainen pyöriteltävä 360 asteen panoraamakuva (Kuva 2). Tällaisen kuvan toteuttaminen muiden panoraamojen ohella vaati ohjelmistolta hyvän tekoälyn kuvien välisten yhdistelmäpisteiden (Kuva 3), ”control points”, löytämiseksi. Ohjelmistoissa oli suuria eroja yhdistelmäpisteiden muodostamisessa ja työssä parhaimmaksi osoittanut maksullinen PTGui-ohjelmisto jäi myös käyttöön rakennusvalvonnan työkaluna.





Kuva 3. Panoraamakuvien väliset yhdistelmäpisteet.

Kuvassa 3 on esimerkki, jossa dronen pyöriteltävän pallomaisen panoraaman valokuvat on yhdistetty ohjelmallisesti. Yhdistämisen lopputulos on se, että näkymä on saumaton ja tarkka yhdistettyjen kuvien rajoilla ja katsoja ei tiedä eikä voi erottaa saumojen paikkaa.

### 3.1.5 Fotogrammetristen mittausten ja pistepilvien tuoton ohjelmistot

Ohjelmistolle työssä asetin vaatimukseksi, että sen täytyy pystyä tuottamaan mittatarkkaa pistepilveä ja muodostamaan näin ollen myös mittatarkasti ortokuvia ja 3D-malleja, joista pystytään määrittämään haluttuja mittauksia niin tilavuuden, korkeuksien kuin välimatkojen suhteen tasokuvassa tai avaruuskoordinaatistossa. Tällaisen ohjelmiston kartoitukseen käytin muun muassa työmaakäynneillä eri infra-alan rakennusyritysten sisällä tai aliurakoitsijana työskennelleiden mittamiesten ja mittauksia tuottavien henkilöiden kokemuksia ohjelmistoista, niiden käyttöliittymistä ja saaduista tuloksista ja niiden tarkkuuksista ja puutteista. Keskustelut olivat vapaamuotoisia, eivät haastatteluja, ja keskustelujen hyödyntäminen oli lähinnä ohjelmistojen nimien kerääminen, joita on jo käytössä ja niiden edelleen tutkiminen ohjelmistovalmistajien kotisivuilta ja yleiset löytyvät käyttäjäkokemukset eri internet lähteistä.



Keskusteluissa työmaalla ja eri internetlähteissä esiin nousseiden ohjelmistojen, lähinnä fotogrammetriaan dronen avulla keskittyneiden ohjelmistojen osalta päädyin siihen, että otan tarkasteluun kaksi ohjelmistoa. Ohjelmistot olivat Pix4d Mapper ja Agisoft Metashape, kumpikin erityisesti dronella toteuttavaan fotogrammetriaan fokuoituneita ohjelmistoja.

Kumpikin valittu ohjelmisto tarjosi kokeiluversiota sovelluksesta, joka tarjosi maksullisen version täydet ominaisuudet rajoitetulle ajalle. Työssä rajoitteena ohjelmiston suhteen oli se, että kokeiltavat ja tutkittavat ohjelmistot tulivat mahdollistaa kokeilujakson ilmaiseksi ilman rajoitteita materiaalin tuottamisessa. Jotta tutkimukseni tulokset ohjelmistojen tuloksia ja materiaalia tuottaessa olisivat mahdollisimman yhdenmukaiset ja saavuttamani tulokset vertailtavissa, täytyi ensin selvittää kuvantamiseen ja fotogrammetriaan liittyvä teoria (3.4.1).

Teorian ollessa selvillä jäi ohjelmia keskenään vertailtaessa jäljelle se, tuottavatko ohjelmat samasta alkuaineistosta, tässä tapauksessa samoista dronen ottamista valokuvista identtistä aineistoa keskenään. Ja jos ei miten ne eroavat? Näitä eroavuuksien kysymyksiä olivat, kuinka nopeaa materiaalin tuottaminen on, onko ohjelmiston käyttöliittymä selkeää, löytyykö ohjelmistolle hyvät oppaat ohjelmistovalmistajalta sen käyttöön, minkälainen etätuki ja keskustelupalsta ohjelmiston käyttäjille löytyy? Keskustelupalstalla käyttäjät voivat jakaa keskenään kokemuksia, vinkkejä ja kysymyksiä niin toisille käyttäjille kuin ohjelmistokehittäjille ja näin ollen se on erityisen tärkeä tämän kaltaisen ohjelmiston käytössä, koska ei ole olemassa mitään standardisoitua ohjelmistomallia, jonka pohjalta kaikkien tämän kaltaisten sovellusten tulisi toimia.

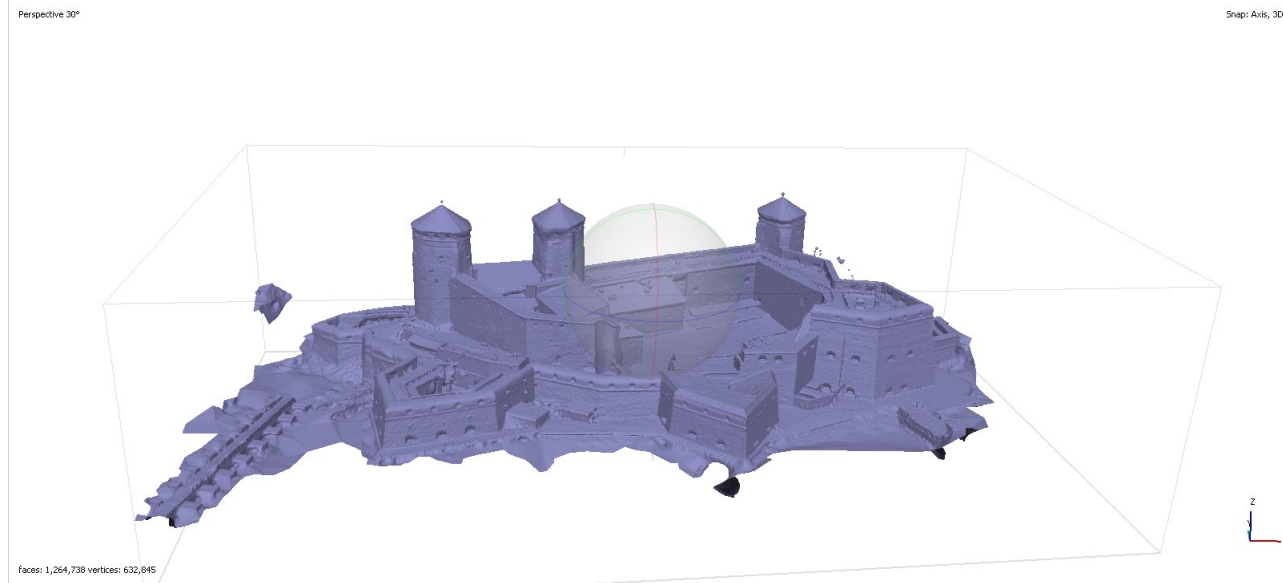
Ensimmäisenä vertailtavaksi otin sen, kuinka hyvät ja selkeät ohjeistukset käyttäjälle tarjotaan ohjelmiston käyttöön ja sen käyttöliittymään jollakin ohjelmiston kehittäjän alustalla. Kumpikin ohjelmisto tarjoaa kotisivuillaan käyttäjälleen selkeät ja kattavat tutoriaalit, joilla saa aikaseksi työssä halutut aineistot, ortokuvan, digitaalisen maastomallin (DEM), pistepilven tiheän ja harvan (dense cloud ja sparse cloud) 3D-mallin, sekä sen kuinka aineistosta saadaan aikaseksi mittauksia. Kirjallisen ohjeistuksen lisäksi Pix4d tarjoaa maksullista etäopetusta ja ilmaisia videoita ohjelmiston käyttämisestä ja sen tarjoamista sovelluksista. Agisoft Metashape ei käyttäjälleen tällaista mahdollisuutta kirjoitushetkellä tarjoa. Kummankin ohjelmiston ilmainen tarjolla oleva ohjeistus on riittävän kattava työssä haluamieni materiaalien ja mittauksien tuottamiseen.

Tämän lisäksi keskustelupalsta on erittäin kätevä erilaisten ohjelmistolla mahdollisesti eteen tulevien ongelmien ratkaisun etsimiseen. Pystyin itse tätä keskustelupalstaa hyödyntämällä ratkaisemaan esimerkiksi ongelman Agisoft Metashapen kanssa, jossa en keksinyt syytä artifaktien syntymiseen pistepilveen. Joku muu ohjelmiston käyttäjä oli jo aiemmin paininut saman ongelman kanssa ja esittänyt kysymyksen palstalla puolestani ja ohjelmistokehittäjä oli siihen vastannut. Tämän vastauksen avulla pystyin myös oman ongelmani ratkaisemaan. Tämän lisäksi kummankin ohjelmiston etätuki oli nopea, muutamaan esittämääni kysymykseen vastaus tuli aina päivän sisällä.

Ohjelmistojen käyttöliittymä oli kummassakin selkeä ja riittävän yksinkertainen, että se oli ohjelmiston tutoriaaleja noudattaessa helposti sisäistettävissä muutamalla käyttökeralla.

Digitaalisen aineiston tuottaminen ohjelmistoilla samasta lähtöaineistosta oli identtinen, kummallakin ohjelmistolla ensimmäisenä aineistona käytettävä kuvamateriaali lisätään ohjelmassa projektiksi, jota aletaan työstämään vaihe vaiheelta halutun aineiston aikaansaamiseksi. Työssä haluamani ortokuva, digitaalinen maastomalli, 3D-malli ja pistepilvi muodostettiin kaikki samalla tavalla ohjelmistojen välillä. Ensimmäisenä kuvat täytyi ohjelmiston sisällä ”linjata” ja kuvissa tuli olla tallennettuna paikkatiedot, EXIF-metadataan. Kumpikin ohjelmisto käytti kuvien linjaamiseen kuviin tallentunutta paikkatietoa yhdessä kuvapikselien yhdenmukaisuuden muodostamiseen eri kuvien välillä, kuten panoraamakuvia muodostaessa (kuva 3).

Tämän jälkeen aineisto muodostui hyvin suoraviivaisesti niin, että ensin muodostettiin pistepilvi, jota ohjelmistot hyödynsivät muodostaessaan digitaalista maastomallia (DEM) kolmioimalla pistepilviaineiston



Kuva 4. Agisoft kolmioidun pistepilven 3D-malli ilman valokuvatekstuuria.

Tästä maastomallista ohjelmat muodostivat 3D-mallit ilman tekstuuria, kuva 4., ”solid model”. Tämän jälkeen 3D-mallien päälle saadaan kuvat niin sanotusti päälle liimattua, ”build texture” ja näin ollen alkuperäiset valokuvat muuttuvat kolmiulotteiseksi, kuva 5.



Kuva 5. Agisoft 3D-malli valokuvatekstuurilla.

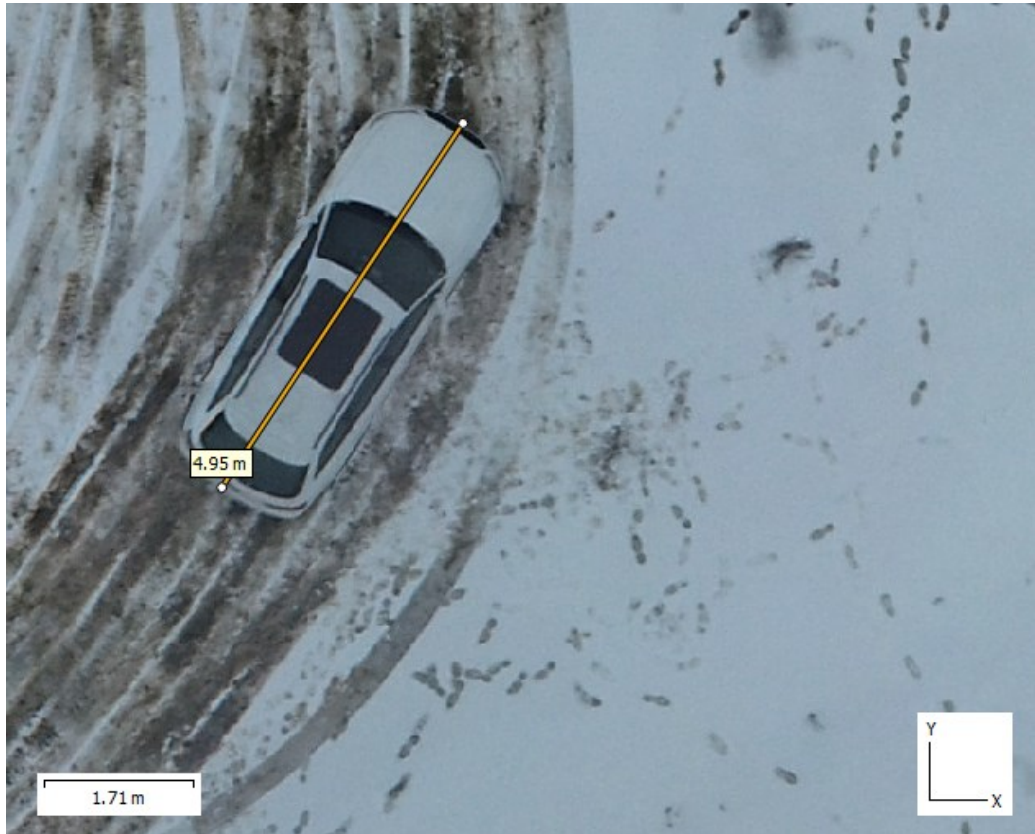
Aineiston tuottamisen nopeudessa ohjelmistojen välillä oli suuret erot, jotka työtä tehdessä johtuivat puutteellisesta laskentatehosta tietokoneessa, jolla mallit tuotin. Tämä

näkyi myös mallin lopputuloksessa ohjelmistojen välillä tarkastellessa mallin eroja jo visuaalisesti ilman mittauksia. Erot olivat vääristymiä syvyyskartoissa ja lopullisissa 3d-malleissa. Agisoft Metashape tuotti parempia malleja myös huonommalla laskentateholla, kun taas Pix4dMapper kompensoi koneen laskentatehoa yksinkertaistamalla pistepilviä ja sitä myöden mallien pisteiden välisiä kolmiointeja, josta vääristymät aiheutuivat.

Kuvan 5 malliin toteuttamiseen meni ympärivuorokautista laskentaa kuusitoista päivää Agisoft Metashapella ja vastaavasti Pix4dMapper tuotti mallin kahdessa ja puolessa vuorokaudessa. Pix4dMapperin tuottama malli olisi lähinnä visuaalisesti hyödynnettävissä, koska vääristymät olivat niin selkeitä ja suuria. Mallintamastani Olavinlinnasta puuttui Pix4dMapperin aikaansaamasta 3D-mallista kokonaan osa yhdestä linnan tornista ja useassa pinnassa oli vääristymiä ja taipumia, jotka Agisoft mallinsi todellisuutta vastaavasti.

En työssä pystynyt 3D-mallin ja pistepilven mittatarkkuutta varmistamaan, koska kuvausalueellani ei ollut vaadittavia tarkastuspisteitä, GCP, joille mallia tuottaessa merkittään ohjelmistossa sen XYZ-koordinaatit niin tarkasti kuin se on mahdollista saada mitatuksi. Yleisesti tarkastuspisteiden mittaukseen käytetään mittamiesten takymetrimittauksia. Toinen tapa varmistua mittatarkkuudesta olisi ollut hyödyntää kuvaamisen aikana dronen GPS-koordinaattien korjaavaa maatumiasemaa, joko mallia RTK tai PPK. Työssä ei kuitenkaan asetetun budjetin sisällä ollut mahdollista kumpaakaan hyödyntää ja hyödynnettävä tarkkuus oli dronen sisäinen GPS-tarkkuus. Arvio siitä, kuinka isoja heittoa dronen sisäisen GPS-tarkkuuden varaan tukeutuessa pelkästään syntyy, oli XY-tasossa noin 1–3 m ja Z-akselilla 10–35 m. Tämä arvio saatiin eräältä Järvenpäässä sijaitsevalta maatäyttöalueelta, jossa mittamies oli aiemmin suorittanut massalaskentaa takymetrimittaukseen pohjautuen ja hänen tuottamaa pisteaineistoa verrattaessa dronella aikaansaamaani.

Puhtaasti kuvasta ohjelmistoilla tasokuvassa mitattaessa etäisyyksiä mittatarkkuus (noin 1–3 cm) oli hyvä myös työssä käytössä olleella DJI Phantom 4 pro v2.0 dronella. Tämä saatiin varmistettua niin, että drone nostettiin objektin kanssa samasta tasosta 80 m korkeuteen ja mitattiin niin Agisoft kuin Pix4dMapper -ohjelmistossa tunnetun objektin pituus, tässä tapauksessa auton 4,97 m kuva 6.



Kuva 6. Ortokuvan mittatarkkuus tunnetulle objektille ja sen mitoille

Kuvassa 6. ilmenee tasokuvan mittatulos tunnetun objektin mitasta Agisoft-ohjelmistossa tuotetusta ortokuvasta. Ohjelmassa mitattu mitta poikkeaa 2 cm todellisuudesta, auton todellinen mitta valmistajan mukaan 4,97 m. Kuva on otettu 80 m lentokorkeudelta. Lentoalteen taso oli auton korkeustason kanssa identtinen.

Työssä vertailut ohjelmistot Agisoft Metashape ja Pix4dMapper olivat kumpikin selkeitä käyttää ja tulokset olivat vakuuttavia Agisoftin osalta. Ainoastaan Agisoft Metashape pystyi täyttämään kaikki asettamani vaatimukset, koska laskentatehon puute muutti Pix4dMapperin toimintaa niin, että sen laskenta muuttui puutetta kompensoivaksi ja se taas näkyi mallin tuottamisen nopeutumisenä, mutta tulosten vääristymisenä.

### 3.2 Lennättämisen ja kuvaamisen käytäntöjen hahmottaminen sekä hyödyntäminen käytännön harjoituksilla ja kokeiluilla

Ensimmäisenä työssä, otin tavoitteekseni käytännön kokeilujen hyödyntämisen valvontatyöhön dronen avulla otetuilla kuvilla. Yrityksessä, jossa toimin valvojana yksi tär-

keimmistä valvojan töistä on valvontaraporttien koostaminen tilaajalle sovitusti, yleensä viikoittain tai kuukausittain riippuen siitä, kuinka valvottavan kohteen osalta on tilaajan kanssa sovittu. Valvontaraportti koostuu työmaan seurannasta, työvaiheista, työmaatilanteesta, aikataulusta ja oleellisena osana raportissa on työmaalla valvontaraportin aikavälillä otetut valokuvat tuona aikana tehdyistä rakenteista, huomioista ja työmaan yleiskuvasta. Aiemmin ja tämän opinnäytetyön aikana yrityksessä valvojat ovat kuvat ottaneet pääasiassa mobiililaitteilla, puhelimella tai tableteilla.

Kuvien ottaminen itsessään nykyaikaisilla mobiililaitteilla on tehnyt valokuvaamisesta arkipäivää meistä jokaiselle, niin työssä kuin arjessa. Opinnäytetyössä se näkyy siinä, että raporteja koostaessa on usein kuvia otettuna paljon työmaasta sieltä täältä, oleellisista työvaiheista, yleiskuvana sekä vain siksi, että voidaan tarvittaessa tarkastella kuvien kautta mitä minäkin päivänä työmaalla on tapahtunut tai ollut tapahtumatta. Ongelmaksi itse huomasin valvontaraportteja koostaessani tämän kaltaisessa valokuvakirjossa sen, että vaikka kuvia on paljon, ovat ne usein jollain tapaa huonosti otettuja tai valottuneita tai sitten niistä ei ihan saa irti sitä, mitä haluaisi kuvalla esitettävän. Kuvia pitäisi kenties laittaa monta samasta asiasta, mutta esimerkiksi eri etäisyydeltä, jotta saavutetaan selkeä yleiskuva siitä, mitä kuvataan ja halutaan kuvilla osoittaa, esimerkiksi vaikkapa raudoituskuvat.

Työhön lähtiessä pohdin asiaa, kuinka ja miten ilmakuvia pystyisi hyödyntämään niin, ettei ilman dronea saavuteta sellaisia tuloksia tai saada sellaista kuvaa aikaiseksi muita keinoja hyödyntäen. Pohdinta oli hankala ja vaati yllättävän paljon paneutumista ilman aiempaa kokemusta itse valokuvaamisesta tällaisella tavoitteella, tai mitä vaatii hyvän valokuvan ottaminen, saati ottaa niitä dronea lentämällä. Pysin hyödyntämään mahdollisuuksien mukaan aiheeseen liittyvää kirjallisuutta. Dronemaailma lähtökohtana asiaan, jouduin turvautumaan internetissä paljon asiasta kirjoittaneiden harrastelijoiden, ammattivalokuvaajien ja -videokuvaajien kautta, sekä heidän jakamien materiaaliensa pohjalta. Näitä etsiessä tuli selkeästi esille, että kuvaaminen droneja hyödyntämällä on kovassa nosteessa niin ammattimaiseen käyttöön, kuin harrastajien ja asiasta kiinnostuneiden keskuudessa. Ammattimaisessa käytössä puhtaasti videoiden tai kuvien lisäksi drone mahdollistaa 3D-mallinnuksien toteuttamisen fotogrammetrisesti, jota tulen myös käsittelemään työssä myöhemmin.

### 3.2.1 Pohdintaa kuvaamisesta dronella

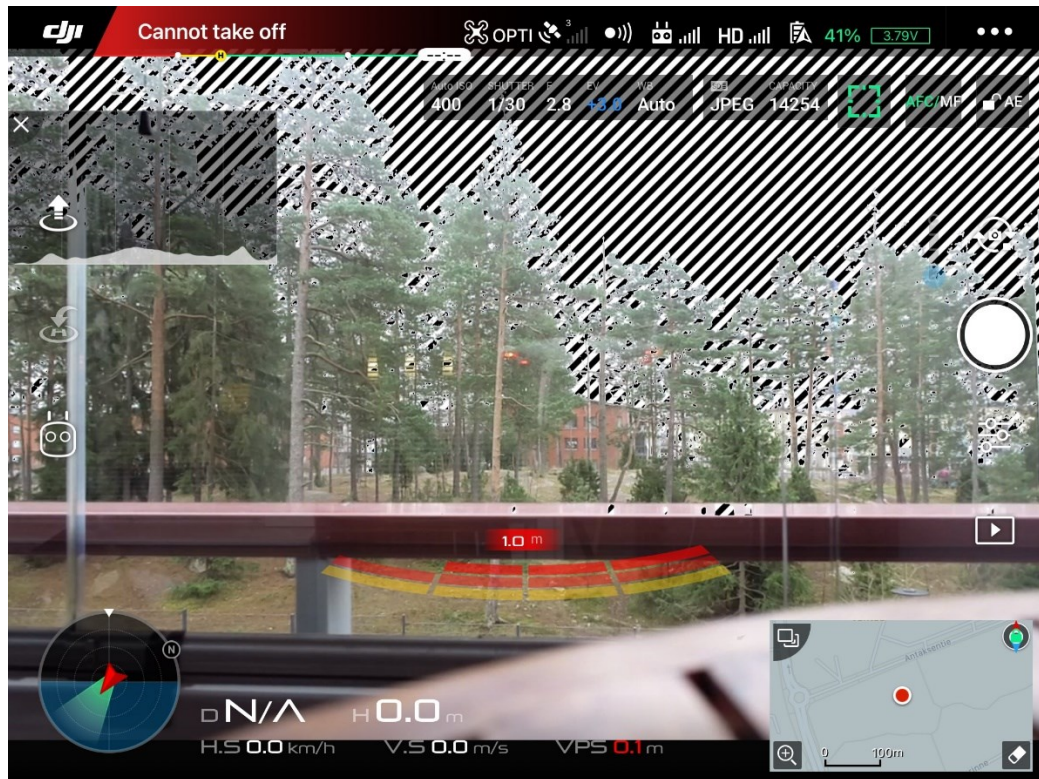
Kuinka sitten otetaan niin sanotusti hyvä valokuva ja miten tätä tietoa pystyy hyödyntämään dronella valokuvia ottaessa? Tähän ryhdyin puhtaasti kokeilemalla ja virheiden kautta asiaa tutkimalla sen jälkeen, kun olin kirjallisuudesta tutkinut kuvaamisen teoriaa kuin erilaisista harrastevalokuvaajien kanavista internetissä asiaan keskittyneistä keskustelupalstoilta ja videobloggaajilta, jossa käytiin läpi kuvaamisen liittyviä asioita. Avaan näitä työssä toteuttamani keräämäni tutkimustyön tulosten kautta käytännön esimerkeillä yhdessä asiaan liittyvällä teorialla pienimuotoisesti. Teoriaa käsittelen tarkemmin läpi erikseen työni kirjallisuusosiossa.

Käytin kuvaamiseen ja dronen hallintaan laitteenvalmistajan tarjoamaa omaa ilmaista ohjelmistoa ”DJI GO 4”, joka on tarkoitettu mobiililaitteisiin. Applikaatioon tutustumalla ja oikeat asetukset valitsemalla pääsee esimerkiksi, näkemään suoraan mobiililaitteen ruudulta helposti, mitkä kohdat aiemmin kertomani mukaan menettävät niin sanotusti värinsä. Applikaatio osaa niille kohdille kuvaa osoittaa visuaalisesti rasteroimalla kohdat, joissa alue muuttuu valkeaksi, näistä kuvat esimerkkinä tarkennuksineen.

Jo ensimmäisistä kuvista, joita otin, pystyi huomaamaan erilaisia kuvanlaatua huonontavia asioita. Kuvat olivat esimerkiksi kadottaneet ”värinsä” ja monessa kohtaa kuvaa oli alueita, jossa tuo väritön osa kuvaa oli joko täysin valkea tai osittain hyvin vaalea ja tästä kohtaa ei pystynyt saamaan selvää mitä kuvassa näkyy. Kuvissa oli lisäksi huomattavissa epätarkkuutta ja haluttu tarkka kohde sumuinen ja jokin taustalla näkyvä asia erittäin tarkka halutun sijaan.



### 3.2.2 Exposure value, valovoima ja kuvan valotus



Kuva 7. DJI GO 4 applikaation kuvakaappaus Apple iPad tablettietokoneelta 25.11.2020.

Kuvassa 7 rasteroitu osuus osoittaa applikaation etsimen näkymässä lopullisessa kuvassa valkeaksi muuttuvaa aluetta, mikäli kuvan ottaa senhetkisillä valituilla asetuksilla applikaatiossa.





Kuva 8. DJI GO 4 -applikaation kuvakaappaus Apple iPad -tablettitietokoneelta 25.11.2020

Kuvien 8 ja 7 eroista selviää, kuinka asetukset muuttavat kuvaan tallentuvia asioita. Tässä ei ole rasteroituvia alueita ollenkaan, jolloin taivas piirtyisi kokonaisuudessaan väreineen otettavaan kuvaan ja täysin valkeaksi muuttuvia alueita ei lopullisessa kuvassa tällöin esiinny.

Lähdin tutustumaan saamiini tuloksiin ja selvittämään syitä ja seurauksia kuvien 7 ja 8 mukaisista asioista.

Tuloksien pohjalta nousi kysymys, miksi jokin alue kuvissa on väritön? Ja miksi applikaatiossa esimerkiksi "EV" asetusta muuttamalla saadaan tämä rasteroitunut alue säilyttämään värinsä, mutta samaan aikaan muu osa kuvasta alkaa muuttua "valottomaksi" ja "tummaksi"?

Kyseessä on "exposure value" ts. valotusarvo [10], joka tässä tapauksessa tarkoittaa yhdessä dronen kameran sulkimen sulkeutumisen nopeuden [11] ja objektiivin aukon koon [12] yhteisvaikutuksesta säätyvää asetusta, jonka pohjalta kameran kennolle saapuva valon määrä ja aika määräytyy ja josta kamera ja drone-ohjelmiston avulla

pystyy muodostamaan valon aallonpituuksien arvojen ja saapuneen valonmäärän perusteella valokuvan.

Tuo arvo siis toisin sanoen vaikuttaa suoraan siihen, onko kuva, kuinka hyvin valottunut vai ei. Aiemmin mainitsemani ”värittömyys” kuvassa on siis valotuksen arvo, joka tässä tapauksessa on kuvan ylivalottunut osuus [13] ja jonka dronen hallinnan ja kuvaamisen oma applikaatio osaa ilmaista asetuksien kautta rasteroimalla alueen kameran etsimen [14] kuvassa 7 applikaation kuvakaappauksessa.

Tämän pohjalta voidaan todeta, että valokuvan onnistumisen kannalta valotus on erittäin, ellei oleellisen osa valokuvaamisesta. Tarkastellessa saatujen tulosten ääriarvojen kautta, jossa toinen ääripää on, että kuva on täysin ylivalottunut ja se on täysin valkea, erottamatta kuvasta mitään muuta. Toisessa ääripäässä sitten taas kuva on niin täysin alivalottunut, että kuva on täysin musta, koska kuvan muodostavalle kuvakennolle ei ole saapunut riittävää määrää valoa syystä tai toisesta. Kumpikin lopputulos on siis halutun lopputuloksen kannalta epätoivottu, kun tarkoituksena on ottaa hyvä valokuva niin valokuvaamisen kuin rakennusvalvonnan näkökulmasta.

### 3.2.3 Tarkennus

Muut asiat, joiden huomasi vaikuttavan kuvan lopputulokseen kuvia ottaessa tai kuvia jälkikäteen tarkastellessa. Merkittävimmäksi tuloksia tarkastellessa osoittautui kuvan tarkennus. Jo kuvaa ottaessa tarkennus osoittautui oleelliseksi kuvan tarkkuuden [15] tai suttuisuuden kannalta etsimen kautta kuvattavaa kohdetta tai alaa katsellessa. Dronella kuvatessa tarkennuksesta vastaa pääosin automatiikka, mutta kuitenkin tarvittaessa kuvaaja itse joutuu muuttamaan tarkennuksen asetuksia saadakseen etsimessä kuvattavan kohteen tarkaksi.



Kuva 9. DJI GO 4 -applikaation kuvakaappaus Apple iPad -tablettitietokoneelta 1.12.2020

Oheisessa kuvassa 9 tarkennukseen valittu automaattitarkennus. Ohjelmassa mobiililaitteen näytöltä koskettamalla valittu tarkennuskohta saa vihreän ruudun ja alle ilmoituksen "AF", joka kertoo tilaksi valitun automaattitarkennuksen. Tällöin valittu alue on tarkentunut automaattisen tarkennuksen kautta ohjelman mukaan parhaalla mahdollisella tavalla. Mikäli suttuisuutta ja epätarkkuutta esiintyi edelleen näytöllä tuli tarkennus toteuttaa uudestaan toistamalla tarkennusalueen valinta näytöstä tarkennettavaa aluetta koskettamalla.



Kuva 10. DJI GO 4 applikaation kuvakaappaus Apple iPad tablettietokoneelta 1.12.2020

Kuvassa 10. tarkennukseen valittiin käsivalintainen tarkennus. Ohjelmassa näytölle tulee kuvassa himmeästi näkyvä liukupalkki, jossa symbolit "ääretön" ja "kukka" ilmaisevat polttoväliä. [9.]

Polttovälin suoraa seurausta, josta toinen on tarkoitettu kuvaukseen läheltä kohdetta ja toinen kaukana olevaan kohteeseen. Tässä valittu tarkennus aiheuttaa kuvan epätarkkuuden ja "suttuisuuden".





Kuva 11. DJI GO 4 -applikaation kuvakaappaus Apple iPad tablettitietokoneelta 1.12.2020

Kuvassa 11 on tarkennukseen valittu käsivalintainen tarkennus, kuten myös aiemmassa kuvassa 10. Kuvista todettiin, että oikein valittu tarkennus saa kuvan tarkaksi tarkennuksen alueelta vastaavasti kuin kuvassa 10.

### 3.2.4 Etsin

Dronella kuvatessa etsimenä toimii joko älypuhelin tai tablettitietokone. Niiden näytön tarkkuus, kirkkaus ja värien erottelukyky vaikuttaa siihen, miten kuvaaja pystyy tulkitsemaan dronen kuvaamisen applikaation asetuksia ja sitä millaisen kuvan asetuksilla saa otettua. Työssä kokeilin kumpaakin laitetta kuvien ottamiseen etsimenä ja hallintalaitteena. Tablet tietokone, työssä Applen iPad 10" näytöllä osoittautui parhaimmaksi vaihtoehdoksi jo tarkastelua helpottavan isomman näytön koon takia. Myös tarkkuuden, värien toiston ja kirkkauden vaikutus lopputulokseen etsimessä itsessään oli merkittävä. Mitä realistisemmän kuvan etsimenä toimiva mobiililaitte antoi kuvaa otettaessa, sen parempi lopputulos kuvia tarkastellessa oli ja sitä vähemmällä kuvien jälkikäsittelyllä pystyi saamaan aikaiseksi hyvän kuvan. Jälkikäsittelyyn käytin kahta ohjelmistoa, Windows-käyttöjärjestelmän mukana tulevaa "Valokuvat" sovellusta, sekä maksullista

sovellusta Adobe Lightroom. Maksullinen sovellus tarjoaa käyttäjälleen kaikki työkalut käyttöön, jolla kuvasta pystyy saamaan jälkikäsittelyn avulla mahdollisimman hyvän, joita ilmaisissa ohjelmissa ei ole. Käsittelen kuvankäsittelyn ohjelmistot ja käytön oma-  
na aiheenaan työssä.

### 3.2.5 Hämärällä ja vähäisessä valaistuksessa kuvaaminen

Hämäräkuvaamisen käytännön testit tehtiin yrityksen asiakkaalle heidän toteuttamansa ulkovalaistuksen kuvaamisella Helsingin Kontulan Kelkkapuistossa 10.12.2020.

Ennen kuvaamisen ryhtymistä tutustuin hämäräkuvaamisesta internetistä löytyviin har-  
rastelijoiden toteuttamiin opastusvideoihin, informaatiovideoihin YouTube-  
videontoistopalvelusta sekä aiheeseen fokusoituneisiin keskustelupalstoihin liittyen  
hämärässä tai pimeässä valo- ja videokuvaamiseen dronella. Näiden lisäksi käytin ai-  
heesta löytyviä kameravälinevalmistajien ohjeita. Muun muassa Sonylla oli kattavasti  
kameran objektiivien ja asetusten teoriaa sivustollaan esim. objektiivin aukon koon teo-  
riaa ja vaikutukset käytännössä [16]. Käytin lisäksi jo muuten keräämäni tietoa aiem-  
mista vaiheista käytännön tuloksien selvitystyöni pohjalta. Aiemmin kerätyt tiedot pys-  
tyin osoittamaan oikeaksi näillä kuvauksilla ja vahvistamaan sen, mitä teoriakin kertoi  
aiheesta.



Kuva 12. Helsingin Kontulan Kelkapuiston hämäräkuvaus 10.12.2020

Kuvassa 12 hämäräkuvauksessa osoitettuna tulos, jossa valotusaika kuvalle on ollut liian lyhyt ja aiheuttanut sen, että kuva on alivalottunut ja värien erottelukyky mahdotonta sekä suuri osa kuvatuksi tarkoitettusta jäänyt tallentumatta, kuten valaistu maasto ja sen ympäristö.

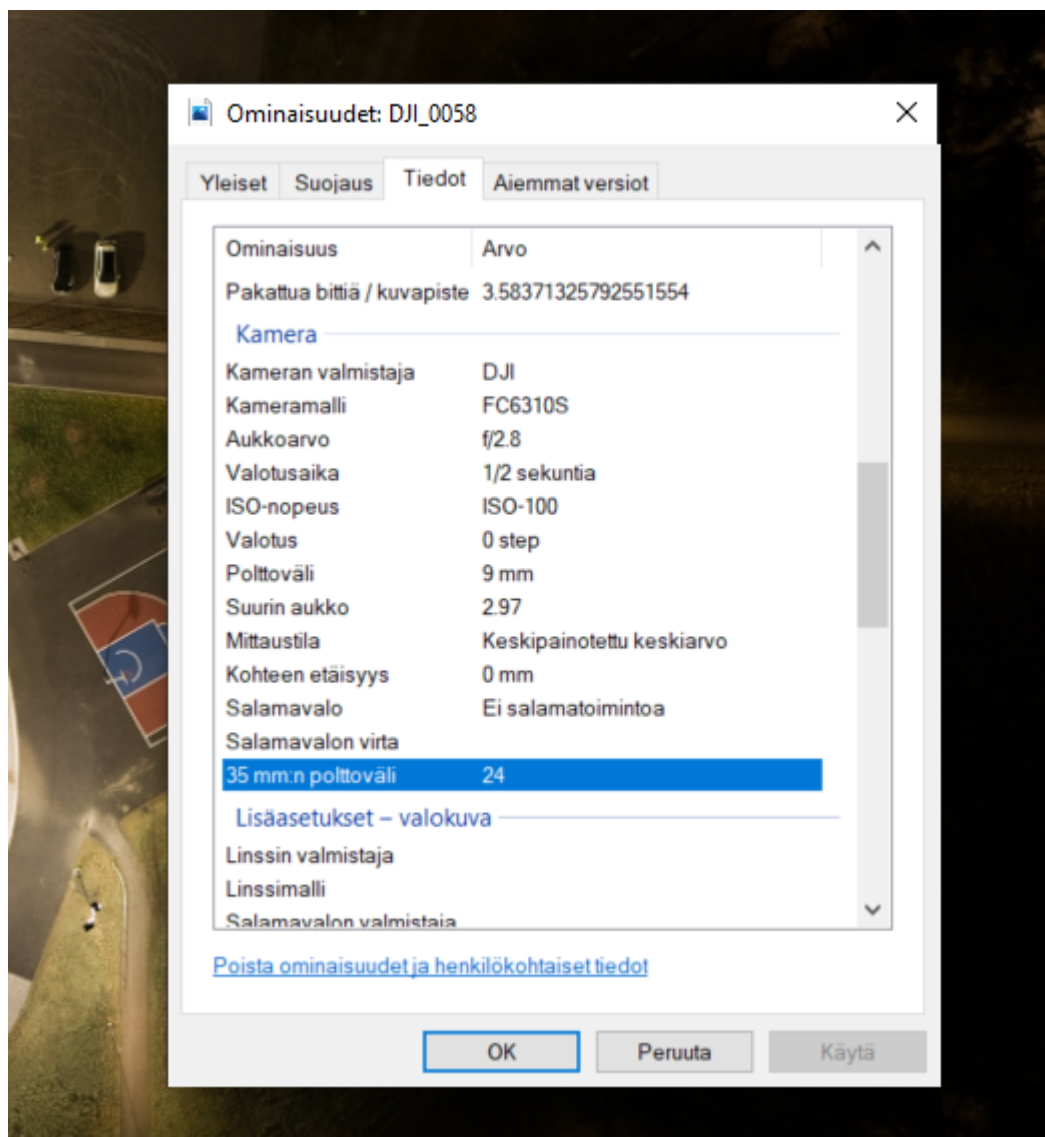


Kuva 13. Helsingin Kontulan kelkkapuistossa hämärässä otettu valokuva 10.12.2020

Kuvassa 13 tehtiin yrityksen asiakkaalle Helsingin Kontulan Kelkkapuiston hämäräkuvausta, jossa samalla testattiin hämäräkuvauksen asetuksia dronen kameralle ja selvitettyä teoriaa asiaan liittyen.

Kuvassa 13 oikein valittu aukon koko, valotusaika ja ISO-arvo tuottavat hyvän lopputuloksen. Tässä kuvassa f2.8 (aukon koko), valotusaika 0,5 sekuntia ja ISO-arvoksi valittu 100. Kuvien asetukset voi tarkistaa jälkikäteen vielä tietokoneelta .jpeg-muotoisesta kuvatiedostosta, kun kuva on ensin dronen muodostamasta RAW-tiedostosta käytössäni olleella kuvankäsittelyohjelmalla (Adobe Lightroom) tallennettu .jpeg-muotoon ja tallennuksen yhteydessä valittu, että kuvaan tallentuvat myös kaikki kuvaan tallentunut kamera-asetusten tieto ja mahdolliset sijaintitiedot.





Kuva 14. Hämäräkuvauksessa 10.12.2020 käytetyt kameran asetukset

Kuvassa 14 kuvakaappaus Windows-käyttöjärjestelmästä ja kuvaan tallentuneista kuva-asetuksista. Tiedot on saatu tallennettua jälkikäsitellyssä, jälkikäsitelyohjelmassa tietojen tallentamisen valinnalla. Eri videoita ja keskustelupalstoja katsomalla ja lukemalla kuvankäsittelyyn liittyen kävi ilmi, että monet kuvaajat eivät halua tietoja julkisesti kuvistaan löytyvän vaan pitävät tätä niin sanottuna ammattisalaisuutena.

Pimeällä tai hämärässä kuvatessa käytännössä hyvään lopputulokseen pääsemiseksi osoittautui tärkeimmäksi ja samalla vaikeimmaksi asiaksi kuvausasetusten valinta dronen käytön omasta applikaatiosta. Valitut asetukset piti tarkastella koekuvilla kuvia ottaessa hallintalaitteena ja etsimenä toimivan tablettitietokoneen ruudulta.



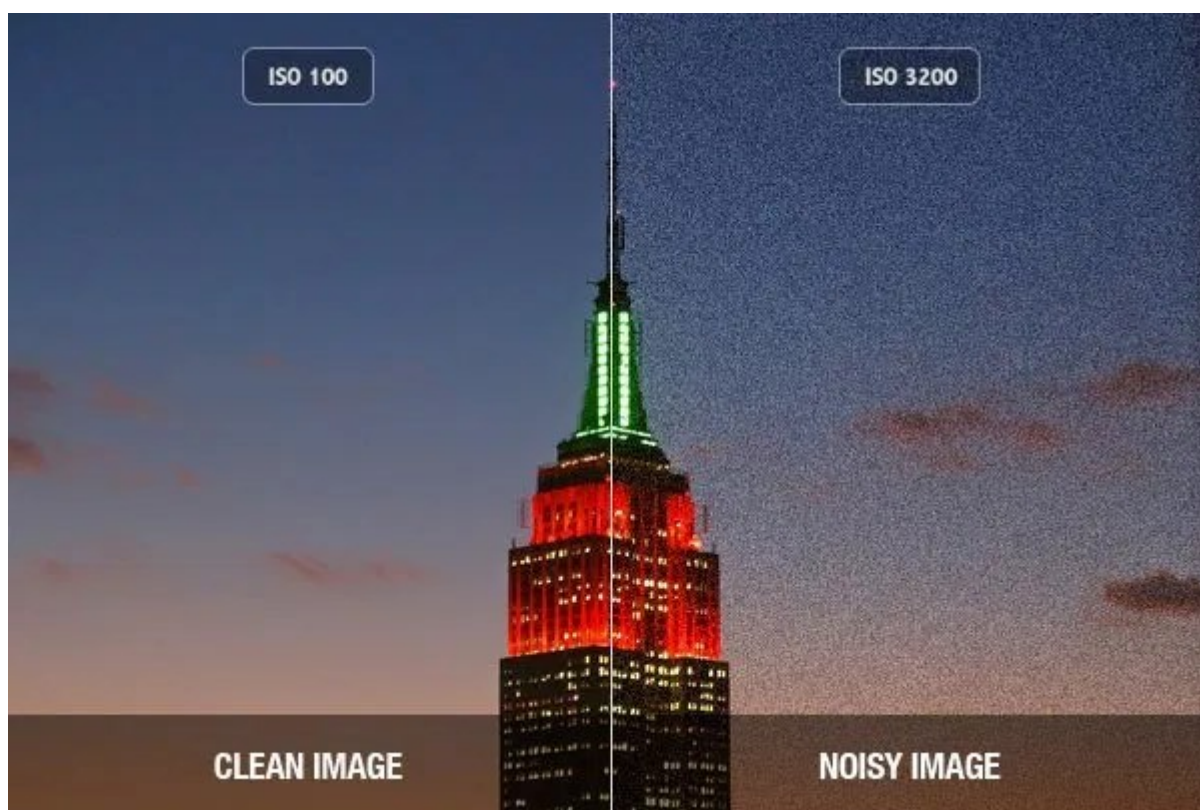
Kuva 15. Yrityksen hankkima drone ja etsimeksi valittu iPad 10”

Kuva 15 esittää sitä minkälainen käytössä ollut tablettitietokoneen ja dronen hallintaan tarkoitettun kauko-ohjaimen yhdistelmä oli. Pimeäkuvauksessa osoittautui hyvässä valossa kuvatessa verrattuna aiempaa tärkeämmäksi se, että käytössä olleen etsimen, tässä tapauksessa tablettitietokoneen näyttö on kykenevä erottelemaan värisävyjä mahdollisimman tarkasti. Testin vuoksi toisella tablettitietokoneella kokeiltaessa samalla kertaa toinen ruutu näytti lähestulkoon pelkkää mustaa, kun toinen, käytössäni ollut Apple iPad näytti kuvan lähestulkoon reaali maailmaa vastaavana silmämääräisesti tarkasteltuna.

### 3.2.6 ISO-arvon merkitys kuvanlaatuun

ISO-arvo kertoo kuvakennon valoherkkyydestä. Pieni arvo kertoo, ettei kenno ole valolle herkkä, kun taas vastaavasti suuri ISO-arvon luku kertoo herkkyyden lisääntymisestä ja kuvakennon valosignaalin vahvistumisesta. Yleensä kameroissa ISO-arvo on asetuksissa valittavissa välillä 100–25 600 [17]. Tässä työssä käyttämässäni dronessa oli mahdollisuus valita arvoksi välillä 100–12 800 manuaalisesti valikoista ja automaattisella asetuksella arvo vaihtelee välillä 100–3200 [18]. Yhdessä suljinajan ja aukon koon kanssa se on valotukseen vaikuttava tekijä. ISO-arvo on käytännössä yleensä lopullisen valotuksen säädin ja sitä käytetään esimerkiksi tilanteessa lopullisen valotuksen

säätöön, kun halutaan käyttää jotain tiettyä valotusajan ja aukon säätöä. Yleisesti pientä ISO-arvoa käytetään, kun valoa on paljon ja suurta arvoa hämärässä ja huonossa keinovalaistuksessa [19]. Käytännössä kuvassa ISO-arvon merkitys näkyy ”kohinana”, jossa ISO-arvon kasvu tuottaa kuvaan rakeisuutta ja epätarkkuutta. Milloin kohina ja rakeisuus ovat selkeästi havaittavissa on kamerakohtaista, nyrkkisääntönä voidaan todeta, että mitä suurempi kuvakenno sen suurempia kennon yksittäiset pikselit ovat ja vastaanottavat enemmän valoa ja näin ollen tuottavat kuvaan kohinaa ja rakeisuutta pieneen kennoon verrattuna, jossa pikselin valoherkyyttä nostetaan ISO-arvon kasvattamisella. [20, 21.]



Kuva 16. ISO-arvon merkityksen käytännön esimerkki valokuvassa [22.]

Kuvan 16 esimerkissä havainnollistuu käytännön sovelluksessa hyvin ISO-arvon kasvattamisen aiheuttama kuvaan tuleva ”kohina” ja ”rakeisuus”. Työn yhtenä tavoitteena oli tuottaa mahdollisimman tarkkoja, selkeitä ja laadukkaita kuvia, joten kohinan ja rakeisuuden minimoiminen oli tässä tapauksessa tärkeää ja tätä tietoa hyödyntämällä oli siihen mahdollisuus vaikuttaa.

### 3.3 Asiantuntijalausunnot ja haastattelut

Työssä ei käyty virallisia haastatteluja kenenkään toimijan kanssa erikseen vaan haastattelut ja keskustelut olivat vapaamuotoisia toimijoiden kesken, jotka hyödynsivät droneja työssään infrarakentamisen parissa. Näitä olivat muun muassa eräs suuri infrarakentamiseen keskittynyt toimija, sekä muutama mitta-aineistoa tuottava maanmittausyritys. Kaikilla dronea hyödynnettiin mitta-aineiston ja ortokuvien tuotossa pelkästään.

Yleisesti esiin noussut keskustelunaihe oli mittatarkkuus pistepilviä toteuttaessa ja yhteisesti ilmennyt asia käytännön tulosten perusteella keskusteluista tuli ilmi, että 1–3 cm todelliseen mittatarkkuuteen pääsemiseen vaaditaan dronelle GPS-signaalin korjausta, joko jälkilaskennassa tai lennon aikana. Näitä olivat RTK ja PPK -tukiasemat ja niiden välillä kommunikoivaan kykenevän dronen kanssa.

Vaihtoehtoiseksi tavaksi nousi tarkastuspisteiden, GCP:n käyttö maastossa, jota hyödynsivät maanmittausta suorittavat yritykset, sillä heidän oli mahdollista jo olemalla olevalla kalustolla ja tietotaidolla helposti määrittää maastoon kuviin helposti saatavia tarkastusmittauspisteitä, esim. puulevyn päälle kirkkaalla värillä maalattu rasti. Näitä pisteitä voitiin kuvien käsittelyssä jälkikäteen ohjelmallisesti määrittää aineistoon ja parantaa mitta-aineiston sijainti- ja mittatarkkuuksia.

### 3.4 Kirjallisuus

Työssä hyödynnettiin ohjelmistojen omia oppaita. Internetistä löytyvää tietoa. Kirjoitettuja kokemuksia muilta käyttäjiltä erilaista keskustelualustoita, kuten foorumit asiaan keskittyneiden harrastajien ryhmässä. Sekä LinkedIn palvelun droneihin ja fotogrammetriaan keskittyneet ryhmät, joissa työssään droneja hyödyntäneet ihmiset jakoivat kokemuksiaan eri ohjelmistoista, työtavoista ja tuloksista kuvantamisen saralla.

Työssä pystyttiin dronefotogrammetrian teorian selventämiseksi hyödyntämään erittäin kattavaa tutkimusta [23].

Lentämiseen liittyvät säännökset selvitettiin sähköpostitse Liikenne- ja viestintävirasto Traficomilta työtä aloittaessa, sekä työn aikana heidän Droneinfo-palvelustaan.

### 3.4.1 Digitaalisen valokuvan teoriaa

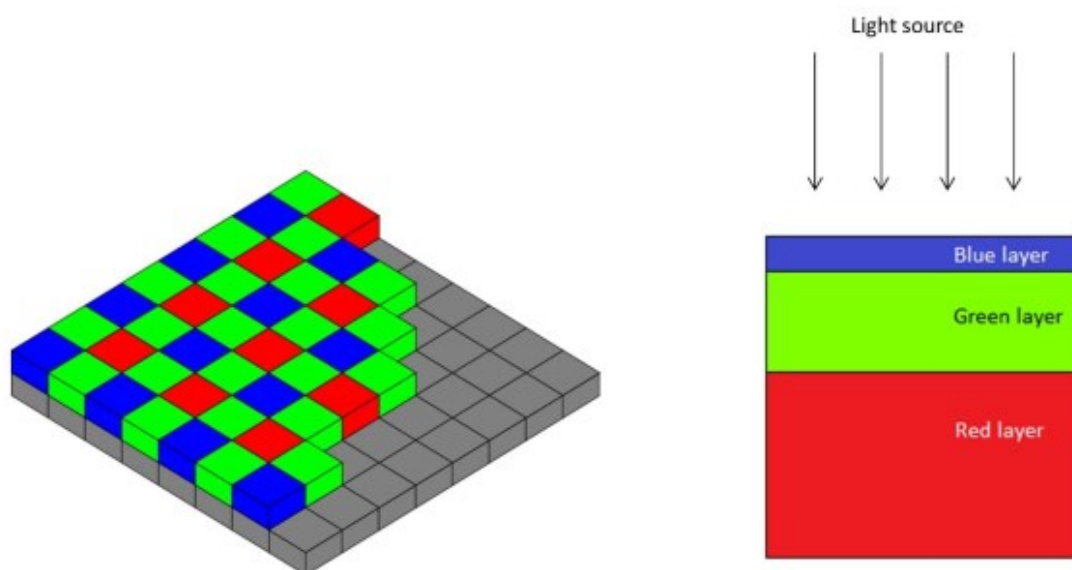
Valokuvia käytännön sovelluksissa hyödynnettäessä täytyi selvittää kuinka ylipäätään ottaa valokuva. Ryhdyin tutkimaan asiaa kysymyksillä ”mikä on valokuva?”, ”mistä se syntyy?” ja ”kuinka otetaan hyvä valokuva?” saadakseni käsityksen siitä, kuinka pystyn käytettävästä kalustosta riippumatta onnistumaan kuvien otossa mahdollisimman hyvin pois sulkien käyttäjästä tai asetuksista johtuvat vaikutukset kuvanlaatuun.

Seuraavassa käsittelen valokuvaamisen teoriaa lyhyesti esittämiäni kysymyksiä kautta. Tarkempi tarkastelu ei ole oleellinen tai palvele työn tarkoitusperää.

Valokuvauksessa tuotetaan kuva tallentamalla valonsäde ja sen sähkömagneettinen säteily [24], digitaaliset kuvat käyttämällä sensoria, joka kykenee muuttamaan tallennetun valodatan binääri-muotoon (Mäenpää Jenni, Todeksi tehty valokuva, väitöskirja, 2016) ja edelleen hyödynnettäväksi tiedostoksi katseltavaksi soveltuvin välinein, kuten tietokoneella ja valokuvankäsittelyohjelmistolla. Paperiset kuvat kemiallisesti, jossa valon sähkömagneettisen säteen aallonpituudet, saadaan taltioitua jollekin soveltuvalle herkälle materiaalille, josta kuvat voidaan kehittää käyttämällä erilaisia kemiallisia yhdisteitä oikeissa olosuhteissa ihmissilmälle näkyväksi [25].

Digitaalinen valokuvan muodostaminen perustuu pinnoilta heijastuvan valon tai jostain lähteestä säteilevään fotonien emission keräämiseen kameraan. Kamerassa tapahtuu tämän säteilysignaalin edelleen konvertointi sähköisiksi signaaleiksi ja tallentamalla näistä mitatut arvot. Nämä arvot edelleen muunnetaan kameran sisällä kuvatiedostoksi tarkasteltavaksi kamerassa tai soveltuvalle ohjelmalla esimerkiksi tietokoneella.





Kuva 17. a) CFA Bayer array-suodatin kameran kuvasensorin pinnalla b) Aallonpituuden kerrossuodatin

Kuvassa 17 esitetään CFA Bayer array-suodatin kameran kuvasensorin pinnalla, sekä aallonpituuden kerrossuodatin. Kummatkin mahdollistavat valon eri aallonpituuksien tallennuksen, mutta käytäntö näiden välillä on eri.

Kamerassa valonherkkä kuvasensorin pinta sisältää puolijohdavaa materiaalia. Sensorin pinnalla oleva puolijohde siirtää valosäteen sähköisesti kuvaprosessorille kamerassa, jossa se kuvapikseli kerrallaan mitataan ja siitä muodostuu kokonainen kuva. Värien aikaansaamiseksi kuvasensorin pinnalla on useimmissa kameroissa suodatin, CFA (Kuva 17. a) tai harvemmin kerrossuodatin (Kuva 17. b), joka erottelee saapuvat värit aallonpituuksien mukaan ja saa ne tallentamaan punaista, sinistä tai vihreää aallonpituutta. Värien aikaansaamiseksi kuvaan kameroiden tulee interpoloida kuvasensorin pikseleille tullut informaatio aallonpituuksien mukaan samanväristen pikseleiden kanssa koko kuvasensorin alalla prosessissa, jota kutsutaan demosaicing-algoritmiksi [26, s. 16].

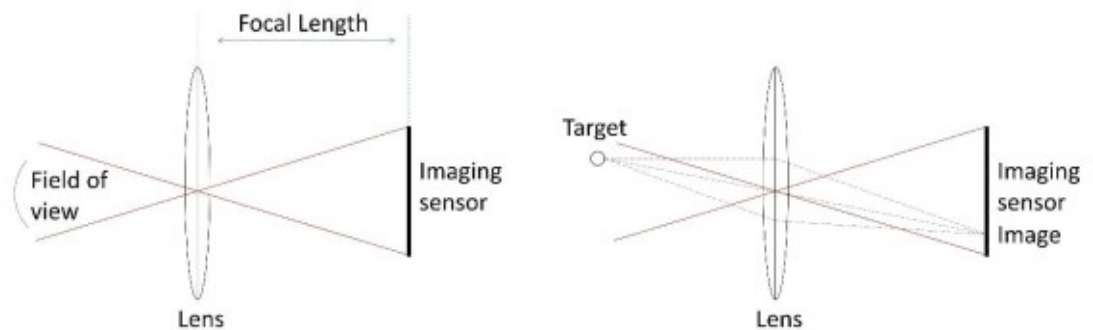
Lopputuloksena kamerat yleensä muodostavat RAW-kuvatiedoston, jossa on tallennettuna kaikki digitaalinen tieto, jonka kuvasensori on tallentanut. Lisäksi on mahdollista saada kamera muodostamaan pelkistetty ja pakattu kuvatiedostomuoto, joka tallentuu 8-bittisenä JPEG (Joint Photographic Experts Group) tiedostona. Nämä JPEG-tiedostot

ovat huomattavasti pienempiä tiedostokooltaan, johtuen tiedon pakkaamisesta ja pelkistämisestä tiedoston muodostamisen aikana kamerassa. [23.]

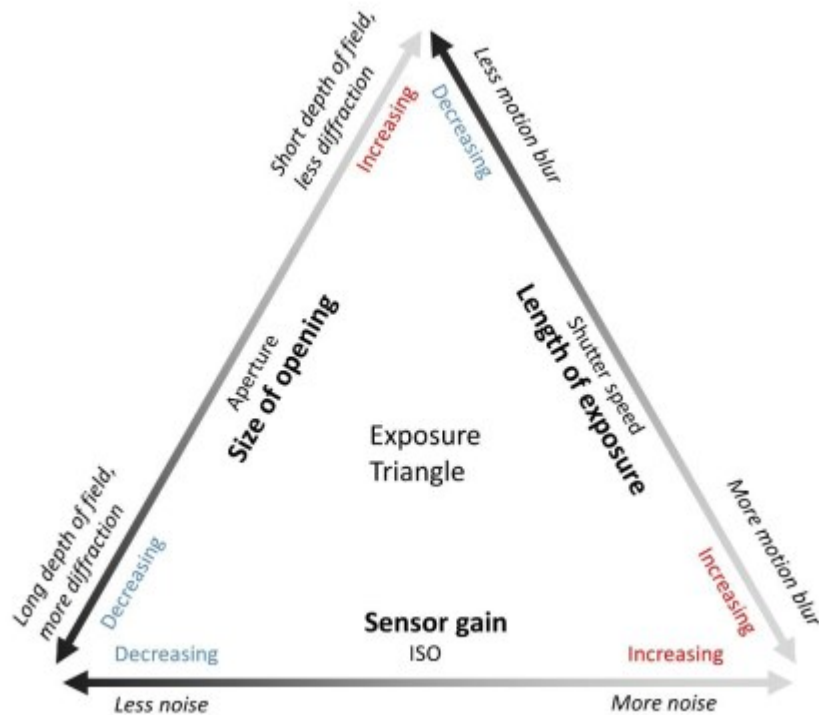
Kuvaan tallentuva alue tai niin kutsuttu näkökenttä, kuvausala, FOV (Kuva 18) (englannin kielellä yleisesti käytössä oleva termi FOV, tulee sanoista field of view, FOV; kuva 18.) tässä tapauksessa kameran näkökenttä on kameran linssin polttovälin ja kuvasensorin funktio (kaava 1),  $f$ , (kuvasensorin leveys/korkeus,  $w$ ) johon kuva projisoi-  
tuu

$$FoV = \arctan\left(\frac{w}{2f}\right) \approx \frac{w}{f} \quad (1)$$

ja, jossa polttoväli muodostuu linssin keskipisteen ja siihen kohdistuvien samansuuntaisten valonsäteiden johdosta tarkennuksen ollessa äärettömään. Piste, jossa valonsäteiden leikkauspiste kuvasensorin pinnalla on, on samalla kohta kuvasensorilla, johon tarkin kuva muodostuu (Kuva 18. b). Hyvin tarkennettu ja terävä kuva riippuu siis kuvasensorin sijainnista suhteessa linssin läpi tulevien valonsäteiden leikkauspisteeseen.



Kuva 18. Kuva 18. a) FOV, field of view, näkökenttä kamerassa b) esimerkki valonsäteistä kuvasensorille



Kuva 19. Valotuskolmio (Exposure Triangle), kuvan taltiointiin asetusten vaikutus toisiinsa.

Kuvan muodostuminen on kolmen tekijän summa, jotka voidaan jakaa kamerasäädettävään asetukseen: ISO, aukkosuhde eli f-luku ja suljinaika. Näiden kaikkien suhde ja vaikutus toisiinsa käy ilmi kuvan 19. valotuskolmiosta (Exposure Triangle).

ISO kuvaa kuvasensorin valoherkyyttä ja siihen vaikuttavat kuvasensorin fyysiset ominaisuudet ja sen vahvistus vaikuttaa lopputulokseen. "ISO" johdetaan "International Organization for Standardization", joka pyrkii luomaan standardin valmistajien keskuudessa.

Korkea ISO-arvo (esimerkiksi ISO100 arvon nostaminen arvoon ISO3200) kuvaa kuvasensorin herkyyttä vastaanottaa ja reagoida valoon, joka taas johtaa kuvassa kuvan kirkkauteen ja valoisuuteen. Haittana on kuitenkin kuvaan muodostuva kuvakohina (Kuva 16.) ISO-arvon kasvaessa, joka voi vaikuttaa kuvanlaatuun huomattavasti.

Yhdessä ISO:n kanssa kuvasensorin dynaaminen alue (valokuvauksessa määrittää kuinka paljon valo- ja varjokohtiin saadaan sävyjä mitatuksi) määrittää sen mikä on













mitattavissa oleva minimi ja maksimi valon voimakkuus. ISO-arvon kasvattaminen pienentää siis dynaamista aluetta ja toisin päin [27].

Tämän lisäksi aukko ja suljinaika ts. aukkosuhde yhdessä määräävät valon määrän, jolle kuvasensori altistuu kuvaamisen aikana [28]. Aukko määrittää reiän koon, jonka läpi linssiin tuleva valo kulkee aina kuvasensorille [28]. Tätä merkitään f-luvulla, N, josta johdetaan

$$N = \frac{f}{d} \quad (2)$$

missä D on aukon halkaisija. Tästä aiheutuu, että mitä suurempi f-arvon luku (esim. f/11) kuvastaa se pienempää aukon fyysistä kokoa ja tätä kautta pienempää kuvasensorin valolle altistusta kuin pienemmällä f-arvolla (esim. f/2.8).

Suljinaika määrä sen kuinka pitkän ajan kuvasensori vastaanottaa pinnalleen valoa. Ajan arvoa mitataan sekunneissa sekä sen murto-osissa [28].

Shutter Speed: Exposure and Subject Blur				
				
1/2s	1/15s	1/60s	1/250s	1/1000s
Only Stationary Subjects Sharp	Extremely Slow Subjects Sharp	Slow Moving Subjects Sharp	Moderately Paced Subjects Sharp	Fast Moving Subjects Sharp
Good For Blurring Water	Good For Showing Movement	Good For Blue Hour Landscapes	Good For Street Photography	Good For Sports Photography
				
Bright		Medium		Dark

Kuva 20. Kuvasensorin altistusaika valolle suljinnopeuden mukaan ja sen vaikutukset kuvaan.

Suljinnopeuden aika vaikuttaa niin kuvan terävyyteen liikkeessä tai liikkuvaa kohdetta kuvatessa (Kuva 20) kuin myös kuvan valoisuuteen (Kuva 12) tai kuvan tummuuteen (kuva 13).

Samasta paikasta, lähes samalla ajanhetkellä otettuja kuvia voidaan verrata valoisuuden puolesta helposti aukkokoon ja suljinnopeuden yhdistelmällä, josta muodostuu ”valotusarvo”, EV, josta johdetaan kaava,

$$EV = \log_2 \frac{N^2}{t} \quad (3)$$

jossa t on suljinnopeuden yksikkö sekunneissa ja N, f-luku (kaava 2) Kaikkien muiden asetusten ja ehtojen ollessa samat, kuvien, joissa on sama valotusaika, tulisi siis olla yhtäläinen valoisuus kuvassa.

#### 3.4.2 Kuvakohina digitaalisessa kuvassa

Minkä tahansa kuvasensorin pinnan valoherkän pikselin (photosite) mittaama ja siirtämä signaali on lukuarvo siitä, kuinka monta valon fonia se ehtii mitata siinä ajassa, kun sensori ja sen pikselit altistetaan valolle. Tämän takia, kuten mikä tahansa mittaus on siinä mahdollisuus mittavirheellä, kuvissa tätä kutsutaan kohinaksi (kuva 10). Kameran sisältämä elektroniikka ja sen kokonaisuudesta rakentuva mittalaitteisto on siis alttiina usealle eri kuvakohinan lähteelle (esimerkiksi, kun kuvasensorin tuottaman signaalin luku ja sen muuttaminen digitaalseksi arvoksi, josta kuva muodostuu väreineen). Tämä on yleisesti huomattavissa kuvissa, joissa valoa on vähän tai kuvan valotusaika on lyhyt. Kaikki johtuu siitä, että valo on luonnostaan osista koostuva pienhiukkanen, mistä juontuu tietyn asteinen satunnaisuus fotonien määrälle muuttumattoman valonlähteen kanssa.

Kuvassa 10 pitkä valotusaika kuvattuna ISO-arvolla 100 verrattuna lyhyellä valotusajalla ja ISO-arvolla 3200 pitkällä valotusajalla tuottaa kuvaan samankaltaisen valoisuuden kuviin. Valoisuuden samankaltaisuus johtuu ISO-arvojen eroista, jotka kompensoivat valotusaikaa ts. valotusarvoa, EV. Tästä johtuu kuitenkin se, että ISO-arvolla 3200 kuvassa esiintyy huomattavaa kuvakohinaa kuin, että arvona olisi käytetty toisen kuvan arvoa ISO100. Kuvakohina esiintyy erityisesti kuvissa alueilla, joissa on paljon tummia

kohtia kuten varjoissa, jolloin valo on heterogeenista muutoin hyvin valaistussa näky-  
mässä.

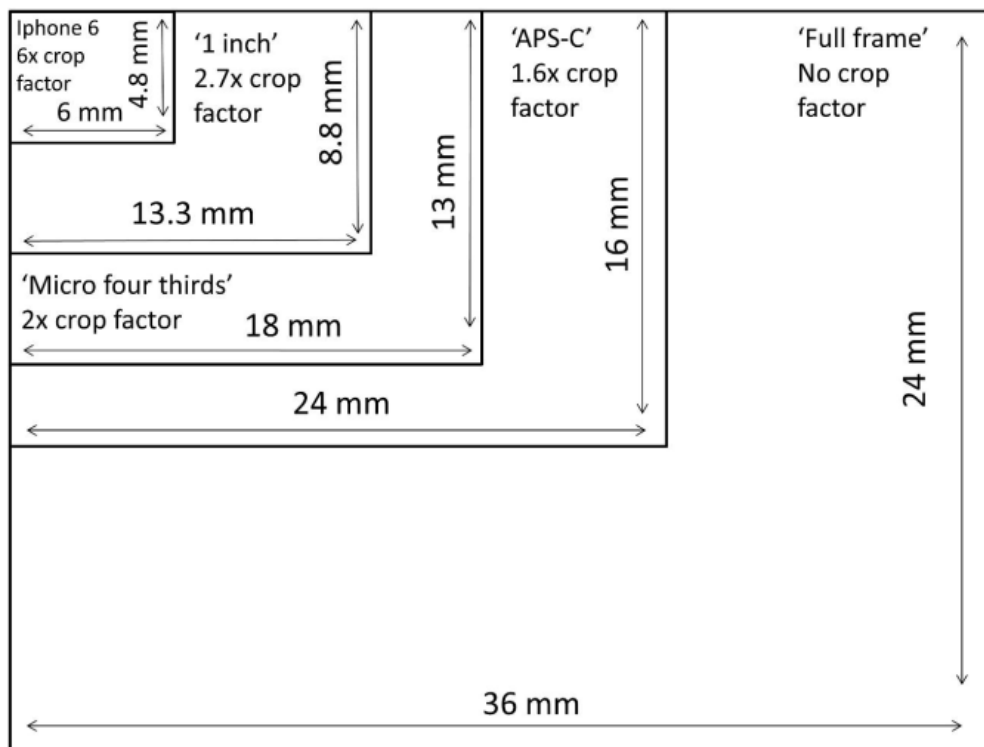
Eräs keino vähentää kuvan kohinaa (samalla nostaa kuvanlaatua) on käyttää metodia ”expose to the right” (ETTR), jossa kuvia ylivalotetaan, kuitenkin valolla kyllästämättä kuvasensoria ja jälkikäteen jälkikäsittelemällä kuvista ”hyvin valottuneet”. Jälkikäsitteily tarkoittaa tässä tapauksessa ohjelmallisesti kuvan histogrammin (valon jakautuminen valokuvassa) normalisointia, esimerkiksi Adobe Lightroom (Adobe 2021) -ohjelmistolla. Kohinaa ilmaistaan arvolla ”signal-to-noise ratio” (SNR) desibeleissä ja ETTR kasvat-  
taa sitä [23, 29].

### 3.4.3 Kamerat

Dronella kuvatessa kameran erityisen tärkeää on ottaa huomioon dronen kantokyky, mikäli kyseessä on drone, jossa kamera tulee erikseen kiinnittää droneen. Monet dro-  
net kuitenkin sisältävät integroidun kameran itsessään ja käyttäjän ei tarvitse miettiä kameran tuomaa kuormaa. Pääsääntöisesti voidaan todeta, että dronessa käytettävän kameran tulee olla kompakti, kevyt ja helppokäyttöinen.

#### 3.4.3.1 Kameran runko

Kameran runko sulkee sisäänsä kuvasensorin, joka yleisesti voidaan sanota määrittä-  
vän sen tuottaman kuvaresoluution ja rajauskertoimen (crop) toimesta. Resoluutio syn-  
tyy kuvasensorin pinnan pikseleiden (photosites) määrästä ja tämän takia kuvan reso-  
luutio on suoraan määrä pikseleitä, joista sensori pystyy taltioimaan kuvatessa valon  
signaalin. Esimerkiksi, 1024x800 pikselinen kuvasensori tallentaisi 819 200 kappaletta  
pikseliä, noin 0,8 megapikseliä. Megapikselit ovat yleisesti kameroista puhuttaessa  
kuvaamassa niiden suorituskykyä ja kuvanlaatua, tähän vaikuttaa lisäksi kuitenkin vielä  
kamerassa erikseen oleva optiikka. Rajauskertoimesta (crop) puhuttaessa päästään  
analogisen kamerafilmin aikaan ja se kuvastaa kuvasensorin fyysistä kokoa (kuva 15.),  
jota yleisesti verrataan ”täysi kennoiseen” kameraan (36x24mm). Pikselijako ”pixel  
pitch” kertoo kuvasensorin pikseleiden fyysisen koon, jonka takia se liittyy suoraan ku-  
vasensorin kokoon, että resoluutioon.



Kuva 21. Kuvasektorin rajauskertoimen fyysiset koot yleisesti käytetyissä kuluttajakameroissa

Kamerat, joissa kuvasektori on pieni (Kuva 21) ja resoluutio on suuri, on tästä syystä kuvasektorilla pienet fyysiset pikselit, jonka takia ne pystyvät vastaanottamaan ja mitaamaan pienemmän määrän valon fotonien arvoja per pikseli (pieni pikselijako, pienempi SNR, "signal-to-noise ratio"). Tämän johdosta kuvassa esiintyy usein enemmän kuvakohinaa, koska ISO-arvon täytyy olla suurempi, jotta kuvattaessa saadaan riittävä valotus.

Efektivistä polttoväliä (polttoväli kerrottuna rajauskertoimella) käytetään standardisoimaan kameroita erilaisten kuvasektorin kokojen takia (ja samoin efektiivisen aukon, joka on aukkokoko kerrottuna rajauskertoimella). Kuvasektorin pienentäminen nostaa aukon kokoa ja polttoväliä [23].

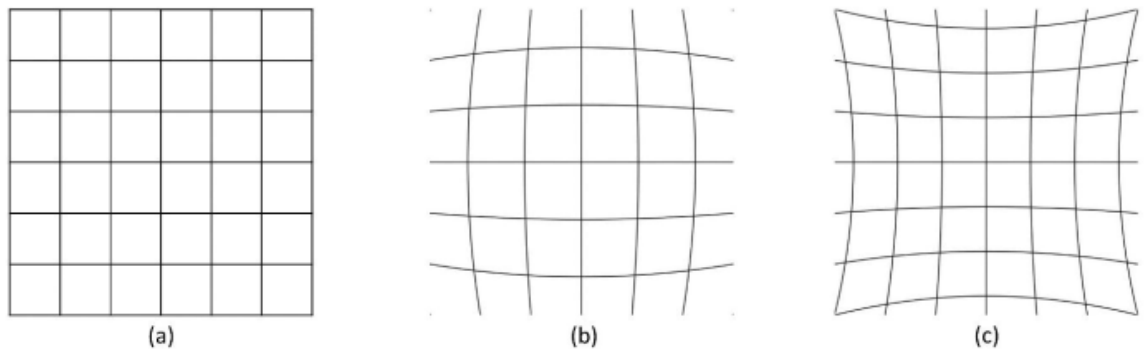
#### 3.4.3.2 Kameran linssi ts. objektiivi

Kameroissa kuvasektorin edessä käytettävä objektiivi ts. linssi sisältää valoa keskittävät elementit kuvan muodostamiseen ja yleensä säädettävän valotusaukon (aukko "aperture"), jolla voidaan rajoittaa valon määrää kuvasektorille [30]. Objektiiveissa on

joko pysyvä polttoväli ("prime" objektiivi) tai sitä voidaan erikseen säätää ("zoom" objektiivi). Kuvanlaatu käytettäessä näitä objektiiveja on yleensä parempi "prime" objektiivilla kuin "zoom", koska ensimmäiseksi mainitussa on vähemmän liikkuvia osia ja sen osat on optimoitu tiettyyn tarkoitettuun polttoväliin, kuin, että sen olisi tarkoitus toimia useilla eri polttoväleillä. Pitkä polttoväli johtaa pienempään näkymään, FOV (field of view, kuva 12), lyhyempi polttoväli taas suurempaan näkymään, jota yleisesti pyritään käyttämään erityisesti dronella suuria aloja kartoittaessa.

Täydellinen objektiivi ei tuottaisi itsessään kuviin vääristymiä ja kaikki kuvattu esiintyisi kuten kuuluu, suorat viivat suorana eikä niihin syntyisi käyritystä, kuten suurin osa objektiiveista kuvia vääristää. Näitä vääristymiä dominoi se, että siirryttäessä linssin keskeltä kohti reunoja alkaa kuvassa esiintyä muotoepäilyksiä, tästä johtuen tätä esiintyy erityisesti kuvan reunoilla.

Lyhyen polttovälin objektiivit aiheuttavat vääristymää "barrel distortion", kuva 22 (b), joka johtuu linssin aiheuttavan suurennoksen olevan suurempaa kuvan keskellä kuin reunoilla, josta johtuu suorien linjojen käyrityminen kuvan reunoilla [30.]



Kuva 22. (a) Ei vääristymää aiheuttava linssi (b) "barrel distortion" (c) "pincushion distortion"

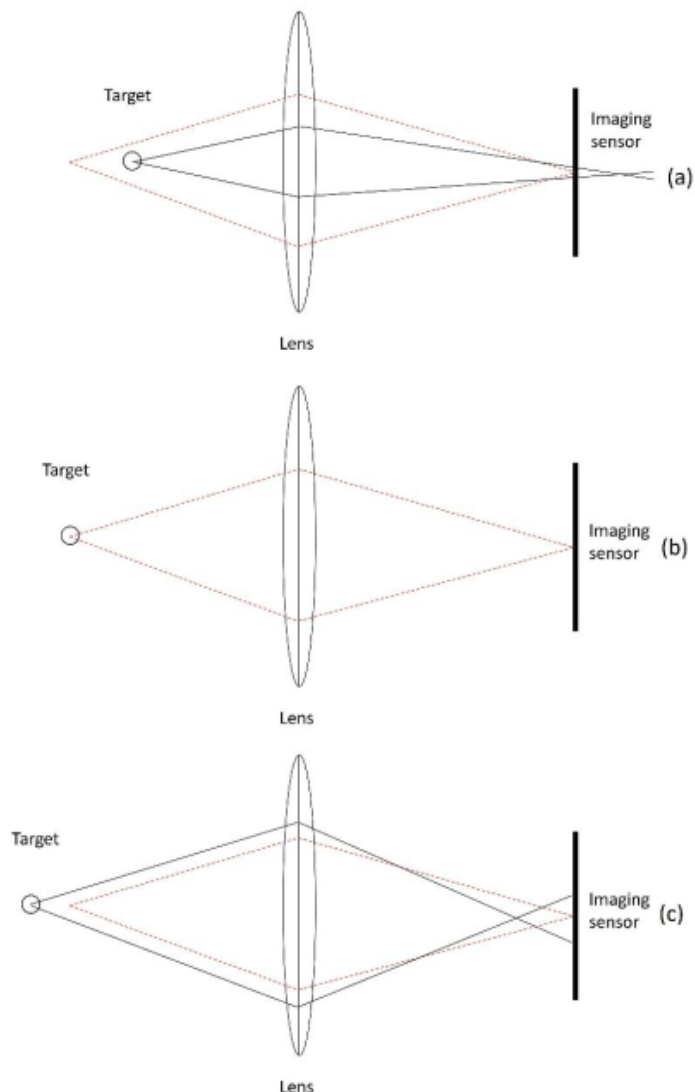
Kuvassa 22 esitetään kuvassa ilmeneviä vääristymiä. Vääristymistä puhuttaessa "pincushion distortion" on vastakohta "barrel distortion" vääristymälle ja sitä esiintyy yleisesti pitkien polttovälien objektiiveissa (teleobjektiivi). Suurennos kasvaa kuvan reunoilla, josta johtuu muotojen vääristyminen kohti optista keskipistettä.

Jos vääristymä on huomattavasti poikkeavaa valon eri aallonpituuksille, puhutaan väri-  
poikkeamasta ”chromatic aberration”, ja se voidaan todeta värien sävyeroista korkean  
kontrastin yksityiskohtien reunoilla.

Kuvan terävyyteen tai tarkkuuteen vaikuttaa aukon koko ja objektiivin tarkennus. Ideaalissa tilanteessa täysin tarkka kuva muodostuu, kun objektiivi on sellaisessa sijainnissa, että kaikki heijastuva valo kohteessa tarkentuu kuvasensorille, toisin sanoen valon säteet heijastavasta lähteestä leikkaavat toisensa täysin kuvasensorin pinnassa. Todellisessa maailmassa näin ei kuitenkaan tapahdu, koska objektiiveissa on epätarkkuutta, jonka johdosta valonsäteiden leikkauskohtaa ei voida saada täysin kuvasensorin pinnalle ja tästä syntyy käytännössä kuvasensorin pinnalle alue ”circle of confusion”, jossa valon säteet suppenevat, mutteivat leikkaa toisiaan. Niin kauan, kun alue, jota ”circle of confusion” nimellä kutsutaan ei ole havaittavan suuri kohde näyttää terävältä ja vaikuttaa olevan tarkennettu.

Jos kuvaan tarkennettavaa kohdetta liikutetaan lähemmäs tai kauemmas kamerasta muuttuu samalla valonsäteiden leikkauspiste (optimaalinen kohta kuvan muodostamiselle) kuvasensorin eteen tai taakse, josta syntyy valonsäteiden suppenema alue ”circle of confusion” kuvasensorin tasolla (Kuva 23) [23].





Kuva 23. "Circle of confusion" kuvasensorin pinnalla valonsäteiden leikkauspisteen muuttuessa

Kuvassa 23 punaisella katkoviivalla esitetään valonsäteitä kohteesta, jos ne olisivat tarkentuneet kuvassa (b). Jos kohde on joko liian lähellä (a) tai liian kaukana (c) niin valonsäteet leikkautuvat joko kuvasensorin takana tai edessä, muodostaen havaittavan sumean alueen "circle of confusion".

Etäisyydet, jolla kohteen etäisyys voi muuttua, "circle of confusion" pysyessä tuskin havaittavan kokoisena muodostaa "depth of field" (DoF) toisin sanoen, syväterävyysalueen [31], jossa haluttu kohde pysyy terävänä ja tarkentuneena, mutta muu kuvassa näkyvä on sumeaa.

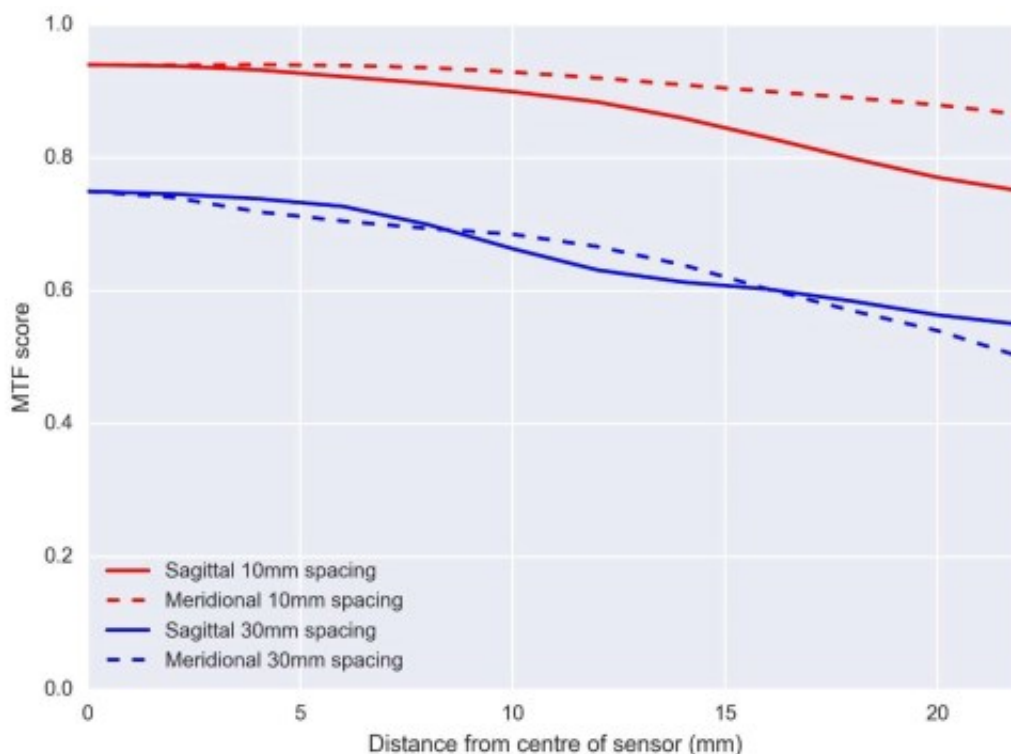


$$\frac{d}{2} = 1,22\lambda \times N \quad (4)$$

kaavassa,  $\lambda$  on valon aallonpituus ja  $N$  on aukkosuhde, esimerkiksi  $f/16$ .

Esimerkkinä voidaan käyttää linssiä, jossa aukko on  $f/8$  ja sen "Airy disk" ala on halkaisijaltaan  $10,7 \mu\text{m}$  vihreälle valolle ja, jonka valonpituus on  $0,550 \mu\text{m}$ . Kuvasensorille kooltaan  $36 \times 24 \text{ mm}$  (full frame sensori), jossa on 6 megapikseliä, pikselin koko on  $12 \mu\text{m}$  ei kuva olisi difraktioltaan rajallinen. Kuitenkin jos sama sensori sisältäisi 16 megapikseliä (pikselin koko,  $5,2 \mu\text{m}$ ) se olisi difraktioltaan rajallinen. Käytännössä pieni määrä difraktiota on hyväksyttävää syväterävyyden, DoF, aikaansaamiseksi, että terävyyden varmistamiseksi koko kuvassa.

Kameravalmistajat ilmaisevat kamerajärjestelmän laatua käyttämällä arvoa MTF, joka kertoo kuvasensorin ja käytetyn objektiivin yhdistelmän kykyä tuottaa terävyyttä ja kontrastia kuvaan [34] vaaka- ja pystysuuntaisesti kuvan keskipisteestä vaihtelevalla etäisyydellä, kuva 19. Kyky muodostaa vääristymätöntä kuvaa ilmaistaan jokaisen linjan etäisyydestä kuvan keskipisteeseen kuvan 19 mukaisesti, se tarjoaisi standardimallin mitata kuvan terävyyttä. MTF-arvo vaihtelee aukkokoon mukaan, joka tulisi ilmaista minkä tahansa MTF-kuvaajan rinnalla. Jotkin valmistajat eivät ilmoita MTF-arvoa kuin suurimmalla aukkokoolalla.



Kuva 25. MTF-kuvaaja

Kuvassa 25 käsitellään MTF-kuvaajan esimerkki, jossa piste "score" 1.0 ilmaisee täydellistä kontrastin säilymistä ja piste 0 täysin muuttunutta kontrastia ja terävyyttä alkuperäiseen verrattuna [23.]

### 3.4.3.3 Kuvanmääritys

Kuvanmääritys on oleellinen osa dronella kuvaamisessa, kun kuvista aletaan tuottaa tarkkoja mittauksia tai 3D-malleja.

Kuvanmääritys määrittää lopullisen kuvan erottelutarkkuuden, resoluution samoin kuin taltioidun kuvadatan laadun. Dronen lentokorkeus, kameran ja linssin polttoväli, kuva-sensorin pikselitiheys ovat yhdessä asiat, jotka vaikuttavat suoraan kuvista saatavaan "GSD" arvoon (Ground sample distance). GSD-arvo kertoo kuvan kahden pikselin etäisyyden toisiinsa luonnossa ja näin ollen antaa käsityksen siitä, kuinka tarkasti pikselien välit muodostuvat. GSD-arvo voidaan laskea seuraavasta kaavasta,

$$GSD = \frac{2H \times \arctan(Sdet)}{2f} \approx \frac{H \times Sdet}{f} \quad (5)$$

jossa  $H$  on lentokorkeus  $S_{det}$  on pikseleiden leveys kuvasensorilla (pikselijako). Johdattamalla tästä voidaan todeta, että GSD-arvoa voidaan nostaa, joko suurentamalla  $f$ -lukua tai laskemalla  $H$ -arvoa.

Lennonopeus aiheuttaa kuviin ”motion blur”, liike-epätarkkuutta. Tämä epätarkkuus voidaan kuvissa arvioida kaavalla,

$$b = \frac{v \times t}{GSD} \quad (6)$$

jossa  $v$ , kuvaa lentonopeutta ja  $t$ , on suljinnopeuden arvo. Muut liikkeet kuin lentonopeus, kuten värinäät tai dronen pyörimiset ovat myös asioita, jotka tulisi huomioida, kun halutaan tuottaa tarkkaa dataa. Ne ovat kuitenkin vaikeasti vältettäviä, ellei dronessa ole hyvää kolmeakselista kuvan vakainta, gimbal.

#### 3.4.4 Fotogrammetria lyhyesti

Fotogrammetria lyhyesti, se on tieteenala, jossa hyödynnetään tekniikkaa ja tiedettä, jotta voidaan tuottaa luotettavaa tietoa fyysisistä objekteista ja ympäristöstä tuottamalla tieto tallentamalla kuvia, mittaamalla ja tulkitsemalla niihin tallennettua sähkömagneettista valon säteilyä.

Fotogrammetriaa tiedetään hyödynnetyn ensimmäisen kerran samoihin aikoihin, kun valokuvat ilmestyivät maailmaan. Topografisten karttojen luomista valokuvia hyödyntämällä ehdotettiin jo noin vuonna 1840 ranskalaisen tutkimusmatkailija Dominique F. Aragon toimesta [35.].

#### 3.4.5 Fotogrammetria dronella

Dronella tehtävä fotogrammetria ei poikkea muulla tavoin toteutettavasta fotogrammetriasta, drone toimii vain välineenä kuvien ottamiseen.

Ilmasta dronella kuvia otettaessa ja kuvia kartoitukseen käytettäessä tulisi ottaa huomioon kuvantamiseen käytettävän järjestelmän konfiguraatio (pikselin koko, polttoväli, kuvasensorin koko ja lentokorkeus) valotusajan säädöt (ISO, aukkokoko, suljinnopeus,

tarkennus ja dronen lentonopeus) näiden vaikuttaessa kuvien tarkkuuteen ja sitä kautta suoraan kuvista saatavaan GSD-tarkkuuteen (3.4.3.3, sekä taulukko 1.).

Taulukko 1. Fotogrammetrisia parametreja

Kameran asetukset	Arvoja suurentamalla saadaan aikaisiksi, seuraavaa:
Kuvasensorin pikselin koko	Signaalin vahvuus kasvaa ja vähemmän kuvakohinaa (3.4.2)
Kuvasensorin fyysinen koko	Suurempi kuvausala, FOV (3.4.1, kaava 1.)
Polttoväli	Pienempi GSD-arvo (3.4.3.3 & Kaava 6.), pienempi FOV
Kuva-asetukset	
ISO	Valoisampi kuva, lisääntynyt kuvakohina (voi laskea suljinnopeutta kompensatioksi)
Aukkokoko (Pienempi f/luku)	Kuvasensorin lisääntynyt altistus valolle, DoF (3.4.3.2) pienenee, liikkeen aiheuttama epätarkkuus voi tulla ongelmaksi (Motion Blur)
Suljinnopeus (valotusaika kasvaa)	Kuvasensorin lisääntynyt altistus valolle, voi laskea ISO-arvoa, mutta samalla liikkeen aiheuttama epäterävyys (Motion Blur) kuvaan voi muodostua ongelmaksi
Lentosuunnitelma	
Lentokorkeus	Suurempi GSD-arvo (3.4.3.3 & Kaava 6.), harvempi GSD.
Lentonopeus	Mahdollistaa nopeamman tai suuremman alan kuvaamisen, nostaa liike-epäterävyyden riskiä (Motion Blur).

Kuvantamisen käytännöt lähtevät siitä, minkälaisen GSD-arvon halutaan kuvista saada aikaisiksi ja tätä kautta sen, kuinka hyvin kuvista pystytään muodostamaan halutut piirteet ja muodot. Jos halutaan tuottaa 3D-topograafista tietoa, riippuu vaadittu GSD myös topografisesta avaruudellisesta tarkkuudesta ja vaadituista mittaustarkkuuden vaatimuksista, yleensä vaaditaan pieni GSD-arvo, jotta voidaan tarkastella tarkasti asioita kolmiulotteisesti.

Tarkkuuden arviot ovat monimutkaisia määrittää, koska niitä määrittää niin suuri määrä eri tekijöitä, kuten kokonaisuus kameran asennon geometria, jossa GSD:n rooli on määrittää fotogrammetrian virheet oikean maailman koordinaattisysteemiin [23].



### 3.4.5.1 Fotogrammetrisen tutkimuksen esimerkki dronella

Esimerkiksi otetaan koelento, jossa haluttaisiin määrittää maasta erottuvaksi kohteet, joiden koko olisi vähintään 100 mm. Kuvaamiseen käytettäisiin kameraa, jossa sensorin koko olisi 23,98 mm x 16,41 mm, tarkkuus 16,2 megapikseliä ja kuvasensorin pikselijako 4,8 µm, kameran polttoväli (f) olisi 18,3 mm (efektiivinen polttoväli 28 mm). Työ aloitettaisiin laskemalla vaadittu GSD, tässä tapauksessa 0,02 m (viidennes minimiarvoista, taulukko 2) [23].

Taulukko 2. Syötettävät arvot eri parametreille

Tulokset	Arvot
<b>Eroteltavien asioiden koko (mm)</b>	100
<b>Vaadittu GSD (mm)</b>	20
<b>Kuvakennon pikselitiheys (mm)</b>	0,0048
<b>Polttoväli (mm)</b>	18,3
<b>Suljinnopeus (s)</b>	0,002
<b>Aukkokoko</b>	f/5.6

Esimerkissä tarvittava lentokorkeus (H) voidaan laskea kaavasta 5. käyttäessä 18,3 mm polttoväliä ja 4,8 mm pikselijakoa, josta saadaan 76,25 m.

$$0,02 \text{ m} \approx \frac{H \times (4,8 \times 10^{-6} \text{ m})}{0,0183 \text{ m}} \quad (4)$$

$$H = 76,25 \text{ m}$$

Näin tämä voitaisiin tehdä käytännössä itse, mutta on olemassa erilaisia applikaatioita (esimerkiksi, Pix4dMapper, kuva 26), jotka laskevat nämä automaattisesti, kun on tiedossa lentokorkeus, kuvasensorin tiedot ja linssin polttoväli.

Tästä saadaan johdettua, että kamera aukkokoolla (N) f/5.6 käytettäessä kaavaa 4. difraktioraja, d:

$$\frac{d}{z} = 1,22(5,5 \times 10^{-7}) \times 5,6$$

$$d = 7,5 \times 10^{-6} \text{ m}$$



Kuva 26. Pix4dCapture-applikaation kuvakaappaus

Kuvassa 26 Pix4dCapture ilmenee, kuinka ohjelmisto osaa automaation perusteella laskea tiedossa olevilla parametreilla, GSD-arvon, tässä tapauksessa 1,45 cm / px.

Tästä selviää, että kuvat ovat difraktioltaan rajattuja, koska d:n arvo on suurempi kuin pikselitiheys, joka johtaa pieneen kuvasta tapahtuvaan erottelukykyyyn.

Seuraavaksi tulisi selvittää, kuinka saadaan pidettyä liikkeen aiheuttama epäterävyys minimissään. Asettamalla maksimiksi 1,5 pikseliä liike-epäterävyyttä sallitaksi ja käyt-

tämällä aiemmin saatua lentokorkeutta (H) 76,25 m ja suljinnopeudeksi (s) 1/500 kavaan 6. saadaan laskettua lentonopeus (v):

$$1,5 < \frac{v \times 0,002}{0,02}$$

$$v < 15 \text{ m/s}$$

tästä päästään siihen, että lentonopeuden tulee olla pienempi kuin 15 m/s jottei haluttu liikkeen epäterävyyden raja-arvo ylity. Tätä arvoa voidaan hyödyntää lisäksi siihen, että päätetään käytettävä ISO-arvo tai vastaavasti valita voidaanko kamerassa käyttää automaattista ISO-arvon säätöä, jotta varmistutaan valituksen onnistumisesta. ISO-arvon nostaminen voisi mahdollistaa suuremmat lentonopeudet, jos ala on iso, jotta suljinnopeutta voitaisiin kasvattaa, mutta liiallinen kohotus voisi pilata kuvakohinalla kuvien laadun. Kuitenkin kohina on parempi mittauksen kannalta kuin vääristyneet kuvat liikkeen takia [23].

### 3.5 Dronella lentämisen säännökset ja vaatimukset

Dronella lentäminen tuli luvanvaraiseksi EU:n yhteisellä uudella droneja koskevalla lailla ja Suomessa se otettiin käyttöön 25.1.2021 Traficomien valvonnassa. Uudessa laissa määrättiin niin, että kaikkien dronella lentävien niin harrastajien kuin ammattilaistenkin tulee rekisteröityä yhteiseen dronetoimijarekisteriin, perehtyä siihen, kuinka droneja lennätetään turvallisesti ja hallitusti ja pääsääntöisesti myös suorittaa aiheeseen liittyvä teoriakoe. Lennätyksen käytäntöihin reformaatio toi joitain uudistuksia, mutta aiemmin vaaditut perusasiat turvallisesti dronen lennättämiseen säilyivät.

Lain käyttöönoton aikana on siirtymävaihe, jossa ennen vuodenvaihdetta 2021 rekisteröityneet käyttäjät ja kerhoissa lennättävät voivat jatkaa lentotoimintaa vanhoilla kansallisilla säädöksillä 1.1.2022 asti. Kerhotoiminnan piirissä lentävät harrastajat voivat jatkaa kansallisilla säädöksillä 1.1.2023 asti. Itsekseen dronea lennättävien täytyy noudattaa uutta dronelakia sen tultua voimaan vuoden 2021 alussa.

Yhteinen EU:n droneasetus asettaa myös itse droneille siirtymäaikoja. Uudet myytävät dronet tulee olla CE-merkittyjä 1.1.2023 mennessä ja tämän jälkeen CE-merkitsemättömien dronejen käyttö muuttuu rajatuksi.

Nyt uudistuksen myötä vaadittu rekisteröinti oli aiemmin vaadittu vain ammattimaisesti dronea lennättäviltä henkilöiltä ja yrityksiltä. Nyt rekisteröinnin vaatimus koskee kaikkia muita käyttäjiä, paitsi niitä, jotka lennättävät dronea painoltaan alle 250 g, joissa ei ole kameraa tai ne on määritelty leluksi.

Uudistuksen myötä lentämisen luvallinen suorittaminen toi vaatimuksia käyttäjille (operaattori ja kauko-ohjaaja) siihen, että heidän tulee perehtyä lennättämisen sääntöihin ja pääsääntöisesti osoittaa tietonsa suorittamalla koe hyväksytysti aiheesta.

Dronet ja dronella suoritettava lentäminen jaettiin kategorioihin dronen maksimipainon perusteella, sekä lentokorkeuden maksimi laski 150 metristä 120 metriin.

1. Avoin luokka vaatimuksena jatkuva näköyhteys droneen, ei saa lennättää lentokentän läheisyydessä (alle 1 km) tai ihmisjoukkojen yllä.
  - a. Dronen maksimipaino 25 kg.
  - b. Kolme eri alaluokkaa, joissa määräytyy dronen paino, käyttöalue ja koulutusvaatimukset.

Taulukko 3. Kategoriat droneille

<b>Avoin A1</b>	<b>Avoin A2</b>	<b>Avoin A3</b>
Maksimipaino: 0,9 kg	Maksimipaino: 4 kg	Maksimipaino 25 kg
Lentäminen sallittu yksittäisten ihmisten yli, mutta ei ihmisjoukkojen päällä  UAS-ilmatilavyöhykkeet tulee huomioida	Lentäminen sallittu turvallisella etäisyydellä ihmisistä  UAS-ilmatilavyöhykkeet tulee huomioida	Lentäminen sallittu kaukana ihmisistä ja asutuksesta  UAS-ilmatilavyöhykkeet tulee huomioida
<b>Koulutusvaatimus:</b>	<b>Koulutusvaatimus:</b>	<b>Koulutusvaatimus:</b>
Yli 250 gramman dronen kauko-ohjaajan tulee olla suorittanut verkkotentti	Verkkotentti ja valvottu lisäteoriakoe	Verkkotentti

- c. Jos lentotoimintaa ei voi suorittaa avoimessa luokassa niin toiminta vaatii erityisen tai sertifioidun luokan toimintaluvan.
2. Erityinen-luokassa tulee mm. arvioida lentotoiminnan riskejä, apuna voi käyttää Traficomien tarjoamaa ilmatilasovellusta. Toimintaluvan voi saada EASA:n julkaiseman vakioskenaarion mukaisesti ilmoituksella tai hakemalla omalle toiminnalle toimintalupa Liikenne- ja viestintävirasto Traficomilta. Lupaa varten tarvitaan riskiarviointi toiminnasta. Erityinen-kategoria on hyvin joustava ja kattaa suuren määrän vaativampia operaatioita.
3. Jos toiminta edellyttää ihmisjoukkojen päällä lentämistä, ihmisten kuljettamista tai vaarallisten aineiden kuljettamista, toiminta tulee tehdä sertifioidu-luokassa. Sertifioidu-kategoria vastaa miehitetyn ilmailun lentoyhtiöiden toimintaa. Ilmailuksilla, piloteilla ja toimijoilla tulee olla sertifiointi viranomaiselta. Näiden säännöksiä ei ole vielä tämän lopputyön kirjoittamisen aikana (10.2020–2.2021) saatavilla. Tämän takia kirjoitushetkellä sertifioidu luokassa toimiminen ei myöskään ole mahdollista [36.].

#### 4 Tutkimustulokset

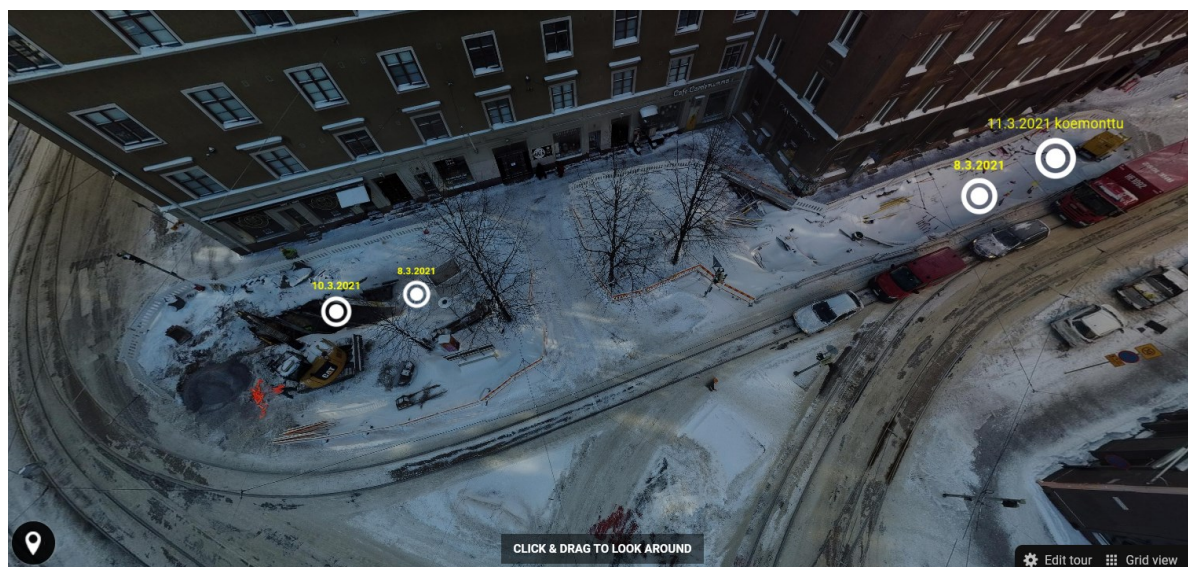
Työssä onnistuttiin pääsemään tavoitteisiin, niin puhtaasti valokuvaamiseen keskittyvän tutkimuksen ja sen innovaatioiden kanssa, kuin myös fotogrammetristen mittaus-ten, pistepilvien ja kolmiulotteisten mittatarkkojen mallien tuottamisen suhteen. Näiden lisäksi tutkimuksessa onnistuttiin käsittelemään dronen lennätysten kirjoitushetkellä vallinneita säännöksiä ja vaatimuksia, sekä käymään itse lennätykseen liittyviä ja vaadittuja applikaatioita läpi ja niiden sisältöä.

Dronella suoritettavana valokuvaaminen voidaan tässä työssä käydyn teorian ja tehtyjen käytännön kokeilujen ja niistä johdettujen tuloksien pohjalta sanoa vastaavan käytännössä täysin digitaaliservalokuvaamisen liittyvää teoriaa. Kuvan muodostamiseen liittyvien käytäntöjen, kameralaitteiston, ohjelmistojen ja laitteiston asetusten mukaan lukien.

Valokuvaamisen kannalta voidaan merkittävimpana löydöksenä pitää sitä, että dronella tehtynä se luo käyttäjälleen täysin uuden perspektiivin ottaa valokuvia infrarakennus-töiden valvontaa ajatellen. Yksittäisiin kuviin on mahdollista ylhäältä kuvattuna mahdut-taa paljon enemmän kuvattua sisältöä, sekä samalla luoda parempaa yleiskuvaa työ-maalta, esimerkiksi kuvista tarkastellessa liikennejärjestelyjä. Tämän pohjalta työssä onnistui luoda innovaatio jo tämän opinnäytetyön teon aikana yrityksen käyttöön, jossa



dronella otetuista kuvista pystyttiin luomaan pallomainen panoraamaprojektio, joka on saumattomasti ja portaattomasti tarkastelijan pyöriteltävissä, tarkennettavissa ja loitonnettavissa. Näihin kuviin pystyttiin lisäksi sisällyttämään kaikki sijaintiin, paikkaan ja aikaan liittyvä tieto, joka edelleen voitiin hyödyntää toiseen innovaatioon, jossa kuvat pystyttiin lataamaan internetiin erään palveluntarjoajan palvelimille, joista kuvat voitiin jakaa selattavaksi internetosoitteella mobiililaitteelle tai tietokoneelle. Näistä luoduista pallomaisista panoraamaprojektioista voitiin luoda ajallisesti ja sijainnilisest selattava kirjasto työmaan seurantaan ja edistymää ajatellen. Lisäksi internetiin tämän mahdollistaneen palveluntarjoajan sivustolle onnistui luoda mahdollisuus luoda interaktiivisia linkkejä panoraamakuvan sisällä edelleen tarkemmin tarkasteltavaksi. Näitä olivat muun muassa toiset valokuvat, videot, tekstitiedostot ja .pdf-tiedostot, kuten suunnittelijoiden suunnitelmakuvat, näistä esimerkki kuvissa 27 ja 28.



Kuva 27. Kuva 27. Pallopanoraamaprojektion sisäiset interaktiiviset hyperlinkit

Kuvassa 27 on kuvakaappaus web-pohjaisesta interaktiivisesta panoraamasta. Tällaisessa interaktiivisessa panoraamassa voidaan kuvaan luoda hyperlinkkejä ja tuottaa sitä kautta lisää informaatiota ja arvoa katselijalle. Kuvan valkeat pyöreät symbolit osoittavat klikattavia hyperlinkkejä. Niistä on mahdollista saada aukeamaan, esimerkiksi puhelimella otettuja valokuvia maan tasalta, suunnitelmakuvia tai vaikka työmaalla kuvattuja videoita.





Kuva 28. Kuva 28. Panoraamasta avattu hyperlinkki

Fotogrammetristen mittausten, liittyvien sovellusten kokeilujen, niiden käytön sekä yhdessä hyödynnetyn teorian pohjalta päästiin tulokseen, jonka avulla voitiin todeta, että tämän opinnäytetyön ja yrityksen käyttöön hankittu drone pystyi tuottamaan visuaaliseen tarkasteluun kelpaavia malleja [Kuva 4.] ja pistepilviä [Kuva 5.]. Massalaskentaa [3.1.5] voitiin suorittaa kohtuullisella tarkkuudella siihen liittyvän teorian huomioiden [3.4.5]. Pistepilviin pohjautuvia kolmiulotteisia malleja tuottaessa ongelmaksi muodostui paikkatiedon tarkkuus, erityisesti korkeuden tarkkuuden suhteen. Korkeussijainnin tarkkuuden vaihteluväliksi saatiin arvioitua 4–35 m verrattaessa dronemme kuvista johdettua pistepilvitietoa mittamiehen suorittamaan takymetrillä toteutettuun mitta-aineistoon samasta sijainnista ja samoista takymetrimittaukseen pohjautuvista pistepilvitiedoista. Työssä käytettiin taso- ja korkeuskoordinaattijärjestelmää, ETRS-GK25FIN N2000. Drone tallensi XY-tasokoordinaattinsa järjestelmään WGS84 ja korkeuskoordinaatit pohjautuivat kuvaan tallentuneeseen EXIF-tiedoissa olevaan korkeuteen, jonka drone tallentaa laitteen sisältämän GPS-sijainnin antaman tarkkuuden perusteella ilman korrektiota. Tästä johtuen suoraan dronen GPS-tietoihin luotettaessa ja sijaintitietojen WGS84 käänöksessä ETRS-GK25FIN N2000:n ohjelmistolla tuotettu aineisto vastaa dronen GPS-sijaintitietojen tarkkuutta [Pix4d, ”Do RTK/PPK drones give you better results than GCPs?”]. Ratkaisuna tähän ongelmaan, sijaintitietojen tarkkuuden ja tätä myöden mallien ja pistepilvien mittatarkkuuden lisäämiseksi olisi ollut ensisijaisena kustannustehokkaana vaihtoehtona lisätä kuvatulle alueelle tarkastuspisteitä, GCP, joiden tarkat sijaintitiedot olisivat tiedossa ja jälkikäteen ohjelmallisesti lisättävissä mita-aineistoa tuottaessa. Toisena olisi vaihtoehtona olisi ollut hankkia drone, jonka

GPS-sijaintia korjataan ohjelmallisesti jälkilaskennan aikana tukiaseman tallentaman sijaintitiedon perusteella sen tallentamasta lokista, GNSS PPK tai tukiasema, joka kommunikoi koko lennon ajan dronen kanssa, GNSS RTK ja tallentaa suoraan korjamaansa sijaintitietoa dronen ottamien kuvien EXIF lokiin. [Pix4d, "Do RTK/PPK drones give you better results than GCPs?"]. Työhön asetetun budjetin sisällä ei ollut mahdollista hankkia tukiasemaa tukevaa dronea tai itse tukiasemaa, joten sen osalta tuloksien tarkastelu jäi teoriasolalle muiden toteuttamien tutkimusten pohjalta. Tarkastuspisteitä ei myöskään onnistuttu saamaan maastoon alueilla, jossa kartoituslentoja tehtiin ja senkin tulosten vertailu omakohtaisesti tuotetusta aineistoista jäi selvittämättä. Tämä johtui lähinnä siitä, että aineiston epätarkkuus selvisi vasta myöhemmässä vaiheessa opinnäytetyötä eikä varsinaista tarvetta ollut enää selvittää syytä mittatarkkuuden puutokselle, kun se voitiin todentaa muiden tuottamien selvityksien pohjalta mitä sijaintitarkkuuteen tuli tuotetulle aineistolle käytettäessä tarkastuspisteitä, GCP ja ilman niitä [Agsgis, "Drone mapping with and without GCP's using DJI Drones"].

Kaiken kaikkiaan työn lopputulos oli onnistunut, kaikille kohdatuille ongelmille löytyi selitys ja korjaava ratkaisu. Käytännön kokeilujen pohjalta tuotettu aineisto ja tulokset onnistui vahvistaa myös teorian kautta ja näin ollen vahvistaa käytännön kokeilujen tulokset oikeiksi. Tuotetun aineistoin pohjalta onnistui työn aikana tuottaa yritykselle käyttöön jo käytännön innovaatioita valokuvien osalta ja mittatarkan mitta-aineiston tuottamisen edellytykset ja vaatimukset saatiin selville. Itse lentämisen säännökset ja vaatimukset saatiin kootusti työssä selville. Näiden lisäksi työssä onnistui muodostaa työn- ja laadunvarmistussuunnitelma, jonka pohjalta jokainen yrityksessä jatkossa dronea käyttävä pystyy muodostamaan lentosuunnitelman dronelle niin, että edellytetyt lainsäädännölliset vaatimukset täyttyvät, sekä itse työn suorittaminen onnistuu yrityksen vaatimalla tarkkuudella ja turvallisuudella riskeeraamatta omaisuutta tai toisten terveyttä.

## 5 Johtopäätökset ja kehitysehdotukset

Työn pohjalta johtopäätöksenä voidaan pitää sitä, että itse dronen hyödyntäminen ja sen sovellukset ovat tällä hetkellä suuresti kehittymässä Suomessa. Suoria käytännön toimintamalleja, käyttötarkoituksia tai hyödyntämisen kohteita rakennusalalla ei laajalti selvinnyt työn aikana kirjallisista materiaaleista eikä juurikaan myöhemmin mainittua julkaisua lukuun ottamatta. Työmaakäynneillä eri rakennusalan toimijoiden kanssa käydyistä keskusteluista kävi ilmi, että monella toimijalla oli tiedossa dronella tuotettavat kuvantamisen mahdollisuudet jossain muodossa, mutta juuri kukaan ei ollut asiaan perehtynyt tai asiaa alkanut selvittämään mahdollisten hyödyntämisten näkökulmasta.

Maailmalla on potentiaali huomattu ja sen käytännön sovellukset selvästi suuremmin käytössä. Ohjelmistokehittäjät, laitteistovalmistajat ja tuotettu tutkimusaineisto oli työn kirjoitushetkellä käytännössä kokonaan ulkomaista.

Suomessa droneja käytännössä hyödynsi Destia, josta oli 27.1.2021 julkaistussa Inf-rantaju-internetjulkaisussa ”Drone on tieinsinöörin oikea käsi” kerrottu.

Kehitysehdotukseksi yritykselle työn kautta muodostui oikeastaan se, miksi työhön ryhdyttiin, kehittää ja tutkia dronen käytön hyötyjä yrityksen sisäiseen käyttöön. Jatketaan käytön sovellusten kehittämistä ja pyritään hyödyntämään niitä, jotka niin valokuvaamisen kuin fotogrammetrian osalta työssä muodostuivat. Vaikka myytäviä innovaatioita ei suoraan vielä olisikaan ei se tarkoita, etteikö tulevaisuudessa opitut ja kehitetyt innovaatiot tästäkin työstä muodostu sellaisiksi ja silloin hankittu kokemus ja tehty työ on arvokasta, kun pohja mistä jatkaa.

## 6 Yhteenveto

Yhteenvetona työn tulokset voidaan kootusti summata onnistumiseksi. Työn aikana saadut tulokset, jossa syystä tai toisesta löytyi virheitä itse kerätyssä aineistossa. Ohjelmallisesti muodostetun pistepilven pisteiden sijaintitarkkuuden puutoksen suhteessa todelliseen ja valokuvien anomalian syyt voitiin kaikki todentaa saatujen tuloksien ja teorian kautta oikeiksi. Näin ollen kaikkiin syntyneisiin ongelmiin ja virheisiin löytyi samalla myös korjaavat ratkaisut ja keinot.

Lyhyesti työn tarjoamat sovellukset valokuvaamiseen voitiin ottaa jo käyttöön työn aikana, merkittävimpänä niistä voidaan pitää dronella tapahtuvaa työmaan seurantaa ja yleistä työmaakuvaamista käyttämällä dronea työkaluna rakennustöiden valvonnassa.

Dronella tuotettu fotogrammetrinen aineisto, pistepilvet ja kolmiulotteiset mallit pystytään jo hyödyntämään visuaalisesti. Massalaskennan työkaluna esimerkiksi läjitysmaiden tilavuuksien määrittämisessä dronea voidaan jatkossa hyödyntää kohtuullisella tarkkuudella ilman erillistä jälkilaskentaa maastossa kuviin tallentuvien tarkastuspisteiden, GCP, kautta tai työn aikana tapahtuvaa GPS-signaalin korrektiota.

Pistepilvien ja kolmiulotteisten mallien sijaintitarkkuuden saamiseksi kohtuulliseen 1–3 cm tarkkuuteen vaatisi joko kaluston päivitystä sellaiseen, GNSS RTK, jossa drone kommunikoi lennon aikana maatumiaseman kanssa ja tarkentaa ja tallettaa reaaliajassa GPS:n korjattua sijaintia kuvien EXIF-tietoihin. Maatumiasemalla suoritettavaan GPS sijainnin korrektoon on lisäksi olemassa vaihtoehtoinen jälkilaskennassa tapahtuva sijaintitietojen korjaus dronen ja maatumiaseman välillä, GNSS PPK. Tai vaihtoehtoisesti sisällyttää kuvausalueelle tarkastuspisteitä, joiden avulla jälkilaskennassa sijaintitiedot voidaan asettaa ohjelmallisesti paikoilleen ja ohjelma pystyy laskemaan näiden avulla muidenkin kuvien kautta muodostettavan pisteaineiston sijainnit.

## 7 Pohdinta, omat ajatukset

Työn alkuperäisenä ajateltu sisältö osoittautui työn aikana niin valtavaksi kokonaisuudeksi, että alussa tehtyjä rajoituksia jouduttiin lisäämään lähestulkoon kaikille työn osaluueille työn edetessä ja harmillisesti erityisesti työn loppumetreillä. Tämä johti siihen, että alueet, joihin olin paneutunut ja joista olisin vielä halunnut jatkaa työn tekemistä eteenpäin tarkemmin työssä opitun pohjalta, jäi sisällöltään vain pääasiat sisältäväksi asiaa havainnollistavaksi kokonaisuudeksi.

Rajoituksia jouduttiin tiukentamaan syystä, että jokainen työssä käsiteltävä asia olisi voinut olla oma opinnäytetyön aiheensa. Kaikkien aiheiden sisältä löytyi niin paljon nyansseja, uusia aspekteja ja ideoita innovatiivisille sovelluksille ja kokeiluille käytännössä, joista olisi mielenkiintoista tehdä kokeiluja ja tulosten käsittelyä.

Eritoten työssä tällaiseksi aihealueeksi jäi dronella tuotettujen mittatarkkojen pistepilvien toteutus ja hyödyntäminen tietomallimaailmassa esimerkiksi syntyneiden rakenteiden vertailussa suunniteltuun suunnitelmatietomallin kanssa päällekkäin. Tähän vaikutti osin se, että työn alussa asetettu budjetti yrityksen sisällä ei mahdollistanut kalustohankintoja työn aikana, eikä vaadittavia ohjelmistoja ollut saatu työssä vielä selville, jotka olisivat tähän käyttöön soveltuvimmat. Ohjelmistot tuovat vielä tulevaisuudessa hankintakulunsa hankittujen laitteistojen lisäksi, mikäli yrityksessä päädytään hyödyntämään dronen avulla tuotettua mittatarkkaa pistepilviaineistoa.

Käytännön kokeilut ja niistä muodostunut tutkimus oli työn mielekkäintä osuutta, kun tuloksia tarkastellessa löytyi aina jotain uutta kokeiltavaa, paranneltavaa tai paremmin toteutettavaa. Tuloksia tarkastellessa oli myös hienoa huomata, kuinka teoria tuki löydöksiä tuloksista syntyneiden havaintojen pohjalta esimerkiksi mittapoikkeamissa tai kuvien vääristymissä.

Työstä päällimmäisenä jäi toive siitä, että tulevaisuudessa voin jatkaa jo kehitettyjen asioiden jalostamista ja jatkaa dronen sovellusten kehittämistä ja innovaatioita yrityksen sisällä. Työssä saavutettujen tulosten pohjalta oma mielipiteeni on se, että tulevaisuudessa niin valvonnan kuin urakoinnin puolella fotogrammetria, pistepilvet ja kolmiulotteinen aineisto, jota dronen avulla voidaan tuottaa tulevat helpottamaan ja parantamaan työn tehokkuutta.

## Lähteet

- 1 Sony, <https://www.sony.fi/electronics/polttovali-katselukulma-perspektiivi> , Luettu 8.12.2020
- 2 Helsingin kaupunki, <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/154048> , Luettu 20.1.2021
- 3 <https://www.1hourphotography.com/your-camera/shutter-speed/> 6.2.2021
- 4 Opto-e, <https://www.opto-e.com/basics/f-and-depth-of-field> , Luettu 14.2.2021
- 5 Wayback Archive, <https://wayback.archive-it.org/all/20090227061949/http://www.ferris.edu/faculty/burtchr/sure340/notes/History.pdf> , Luettu 15.2.2021
- 6 Pix4d, <https://www.pix4d.com/blog/rtk-ppk-drones-gcp-comparison> , Luettu 13.3.2021
- 7 Agsgis, [https://www.agsgis.com/Drone-Mapping-With-and-Without-GCPs-using-DJI-Drones\\_b\\_1065.html](https://www.agsgis.com/Drone-Mapping-With-and-Without-GCPs-using-DJI-Drones_b_1065.html) , Luettu 13.3.2021
- 8 Infran taju /Destia, <https://infrantaju.destia.fi/uutinen/drone-on-tieinsinoorin-oikea-kasi.html> , Luettu 27.1.2021
- 9 Sony, <https://www.sony.fi/electronics/polttovali-katselukulma-perspektiivi> , Luettu 8.12.2020
- 10 Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Exposure\\_value](https://en.wikipedia.org/wiki/Exposure_value) , Luettu 27.11.2020
- 11 Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Shutter\\_speed](https://en.wikipedia.org/wiki/Shutter_speed) , Luettu 27.11.2020
- 12 Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/F-number> , Luettu 27.11.2020
- 13 Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Luminance> , Luettu 27.11.2020
- 14 Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Camera> , Luettu 27.11.2020
- 15 Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Focus\\_\(optics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Focus_(optics)) , Luettu 30.11.2020
- 16 Sony, <https://www.sony.fi/electronics/aukko-ja-syvateravyys> , Luettu 8.12.2020



- 17 Bonnier Publications / Digi-kuva, <https://digi-kuva.fi/valokuvaustekniikka/nain-kaytetaan-kameran-iso-asetuksia> , Luettu 13.1.2021
- 18 DJI, <https://www.dji.com/fi/phantom-4-pro-v2/specs> , Luettu 3.1.2021
- 19 Bonnier PublicationS / Digi-kuva, <https://digi-kuva.fi/valokuvaustekniikka/nain-kaytetaan-kameran-iso-asetuksia> , Luettu 13.1.2021
- 20 Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Film\\_speed](https://en.wikipedia.org/wiki/Film_speed) , Luettu 13.1.2021
- 21 Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Film\\_grain](https://en.wikipedia.org/wiki/Film_grain) , Luettu 13.1.2021
- 22 Photographytalkin.com, <https://photographytalking.com/2020/03/12/iso-in-photography/> , Luettu 13.1.2021
- 23 Cameras and settings for aerial surveys in the geosciences: optimizing image data, May 2017, O'Connor, Smith, James, Kingston University
- 24 Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Photography> , Luettu 22.11.2020
- 25 Wikipedia, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Filminkehitys> , Luettu 24.11.2020
- 26 Helander, Jenni 2015, Demosaicing - värikuvan muodostus digitaalikamerassa , Luettu 29.11.2020
- 27 Bonnier Publications / Digi-kuva, <https://digi-kuva.fi/valokuvaustekniikka/dynaaminen-alue-tata-se-tarkoittaa> , Luettu 26.1.201
- 28 Wikipedia, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Aukkosuhde> , Luettu 26.1.2021
- 29 Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Image\\_histogram](https://en.wikipedia.org/wiki/Image_histogram) , Luettu 26.1.2021
- 30 Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Diaphragm\\_\(optics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Diaphragm_(optics)) , Luettu 7.2.2021
- 31 Wikipedia, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Syv%C3%A4ter%C3%A4vyysalue> , Luettu 14.2.2021
- 32 Opto-e, <https://www.opto-e.com/basics/media/basics/optics/aperture-and-dof.png> , Luettu 14.2.2021
- 33 Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Airy\\_disk](https://en.wikipedia.org/wiki/Airy_disk) , Luettu 14.2.2021

- 34 Nikon USA, <https://www.nikonusa.com/en/learn-and-explore/a/products-and-innovation/what-is-a-lens-mtf-chart-how-do-i-read-it.html> , Luettu 14.2.2021
- 35 Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Photogrammetry> , Luettu 15.2.2021
- 36 Droneinfo, <https://www.droneinfo.fi/fi/> , Luettu 15.2.2021