

VIISTOKUVAUKSEN JA KALANSILMÄOBJEKTIIVIN SOVELTUVUUS UAV-KUVAUKSIIN

Maailmasta Oy

Mäcklin Kimmo
Pahtaja Henrik

Opinnäytetyö
Tekniikka ja liikenne
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

2018

Tekniikka ja liikenne
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijät	Kimmo Mäcklin Henrik Pahtaja	Vuosi	2018
Ohjaaja	Timo Karppinen		
Toimeksiantaja	Maailmasta Oy		
Työn nimi	Viistokuvauksen ja kalansilmäobjektiivin soveltuvuus UAV-kuvauksiin		
Sivu- ja liitesivumäärä	43 + 8		

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, kuinka hyvin kalansilmäobjektiivi ja viistokuvaus soveltuvat UAV-kuvauksiin. Tätä soveltuvuutta lähdettiin tutkimaan kustannustehokkuuden sekä korkeustarkkuuden osalta. Tavoitteena oli myös tutustua UAV-ilmakuvauksen prosessiin kokonaisuutena.

Tutkimus koostui kahdesta osasta, joista ensimmäisessä tehtiin kirjallisuuskatsaus aiheeseen. Toisessa osassa tehtiin tutkimusta kvantitatiivisen menetelmän avulla. Tutkimusta varten etsittiin rauhallinen alue, jossa pystyttiin tekemään huolellista tutkimustyötä. Tällä tutkimusalueella suoritettiin ilmakuvaukset sekä mitattiin referenssiaineisto. Ilmakuvausaineistot käsiteltiin fotogrammetrisiksi pistepilviksi Agisoft PhotoScanin avulla. Näitä pistepilviä vertailtiin mitattuun referenssiaineistoon 3D-Win-ohjelmalla. Vertailussa tarkasteltiin pistepilvien korkeustarkkuuksia.

Tutkimustuloksista selvisi, että viistokuvauksella on mahdollista päästä JHS 185:n ensimmäisen luokan mukaisiin korkeustarkkuusvaatimuksiin suuria kuva-keittoja käyttämällä. Kalansilmäobjektiivilla kuvaaminen sen sijaan osoittautui haastavaksi toteuttaa. Korkeustarkkuudet vaihtelivat todella paljon pienilläkin matkoilla, ja aineiston käsittelyyn tuhlautui todella paljon aikaa. Tätä menetelmää ei näin ollen vielä suositella käytettäväksi, ja lisätutkimuksia sen soveltuvuudesta UAV-kuvauksiin kaivataan.

Technology, Communication and Transport
Land Surveying
Bachelor of Engineering

Authors	Kimmo Mäcklin Henrik Pahtaja	Year	2018
Supervisor	Timo Karppinen		
Commissioned by	Maailmasta Oy		
Subject of thesis	Suitability of Oblique Aerial Photography and the Fisheye Lens for UAV Surveying		
Number of pages	43 + 8		

The objective of this Bachelor's thesis was to research the suitability of oblique aerial photography and the fisheye lens for UAV surveying. The subject was studied more precisely from the point of view of cost efficiency and accuracy of elevation. This thesis was commissioned by Maailmasta Oy.

The study consisted of two main parts. The first part dealt with the literature research about the subject. The second part was about the research itself. The UAV surveys and the surveying for reference points were conducted in a peaceful area. The photogrammetric point cloud data from the UAV surveys was produced by using the Agisoft PhotoScan software. The comparison of the accuracy of elevation between the photogrammetric point cloud and the reference points were done by using 3D-Win, a programme by 3D-System.

The study results indicate that oblique aerial photography is accurate enough for the UAV surveying. The fisheye lens is not suitable for the UAV surveying, because the accuracy of elevation varied a lot. The picture covering, the number of the signal dots and their location affect the accuracy of the photogrammetric point cloud considerably. There is, however, some development to be made for the cost efficiency.

Key words

photogrammetry, UAS, UAV

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	UAS JA FOTOGRAMMETRIA	8
2.1	Miehittämättömät ilma-alukset	8
2.2	UAS:ään kuuluvat komponentit	9
2.3	Fotogrammetrinen mittaus	11
2.4	Viistokuvaus	13
2.5	Kalansilmäobjektiivi	15
2.6	JHS-suositukset	17
3	SATELLIITTI- JA TAKYMETRIMITTAUKSET	19
3.1	Satelliittipaikannus	19
3.2	Mittaustavat	20
3.3	Satelliittimittauksien virhelähteet	22
3.4	Takymetrimittaukset	22
4	TUTKIMUSPROSESSI	25
4.1	Tutkimusalue	25
4.2	Referenssiaineiston ja lähtöpisteiden mittaus	26
4.3	Signalointi	29
4.4	Ilmakuvauksissa käytetty kalusto	30
4.5	Lentovalmistelut ja lennot	30
4.6	Aineistojen käsittely	31
4.7	Aineistojen vertailu	33
5	TUTKIMUSTULOKSET	37
5.1	Tulosten vertaaminen JHS-suositukseen	37
5.2	Kustannustehokkuus	38
6	POHDINTA	39
	LÄHTEET	41

ALKUSANAT

Haluamme kiittää Maailmasta Oy:tä siitä, että saimme mahdollisuuden tämän opinnäytetyön tekemiseen. Erityiskiitokset Jukka Tienhaaralle, joka opasti meitä paljon opinnäytetyön tekemisessä. Lisäksi haluamme kiittää työn ohjaavana opettajana toiminutta Timo Karppista.

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

ETRS-GK26	Tasokoordinaatisto, jonka keskimeridiaani on 26° itäistä pituutta (Juhta 2014a).
GNSS	Global Navigation Satellite System on maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä, jonka osajärjestelmiä ovat mm. GPS ja Glonass (Laurila 2012).
GPS	Global Positioning System on Yhdysvaltain puolustusministeriön ylläpitämä maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä (Joensuu 2017).
IMU	Inertial Measurement Unit on laite, joka mittaa sijainnin ja asennon muutoksia gyroskooppien ja kiihtyvyysantureiden avulla (Laurila 2012).
N2000	Suomessa käytössä oleva korkeusjärjestelmä, joka perustuu vuosina 1978-2004 suoritettuun tarkka-vaaitukseen (Maanmittauslaitos).
UAS	Unmanned Aircraft System eli miehittämätön ilma-alusjärjestelmä, joka käsittää miehittämättömän ilma-aluksen, ja sen käyttämiseen tarvittavat järjestelmän eri osat (Trafii).
UAV	Unmanned Aerial Vehicle tarkoittaa miehittämätöntä ilma-alusta (Viljanen 2017).

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, kuinka hyvin kalansilmäobjektiivi ja viistokuvaus soveltuvat UAV-kuvauksiin (Unmanned Aerial Vehicle). Tätä soveltuvuutta tutkittiin arvioimalla näiden kahden menetelmän kustannustehokkuutta ja korkeustarkkuutta. Korkeustarkkuutta tutkittiin vertaamalla ilmakuvauksista tuotettujen fotogrammetristen pistepilvien korkeuksia mitattuun referenssiaineistoon. Kustannustehokkuutta sen sijaan arvioitiin ilmakuvauksen prosessiin käytetyn kokonaisajan perusteella.

Aiheen valinnan taustalla oli molempien tekijöiden mielenkiinto miehittämättömiä ilma-alusjärjestelmiä kohtaan. Näiden järjestelmien käyttö maanmittauksessa on jatkanut kasvamistaan viime vuosina. Useimmiten miehittämättömillä ilma-aluksilla tehtävät ilmakuvaukset on suoritettu pystykuvauksena. Pystykuvauksen lisäksi UAV-kuvauksia on alettu viime aikoina tekemään viistokuvaamalla ja kalansilmäobjektiivin avulla. Toimeksiantajana toimineella Maailmasta Oy:llä oli tarvetta saada tutkimustietoa näiden kahden menetelmän avulla suoritettavista ilmakuvauksista. Tutkimme aihetta näistä lähtökohdista.

Tämä opinnäytetyö jakaantuu kahteen osaan, joista ensimmäisessä tehdään kirjallisuuskatsaus käsiteltäviin aiheisiin. Katsauksessa käydään esimerkiksi läpi miehittämättömän ilma-alusjärjestelmän toimintaperiaate, perinteiset mittausmenetelmät, viistokuvaus ja kalansilmäobjektiivi yleisesti sekä niiden käyttö UAV-kuvauksissa. Toisessa osiossa käydään läpi, kuinka tutkimus suoritettiin, ja minkälaisia tuloksia tutkimuksesta kävi ilmi.

Tutkimukseen liittyneet UAV-kuvaukset viistokuvauksen ja kalansilmäobjektiivin osalta suoritettiin Yli-lin ja Kiimingin välisellä tieosuudella. UAV-kuvaukset ja kuvausaineiston käsittelyn fotogrammetrisiksi pistepilviksi suoritti toimeksiantaja Maailmasta Oy. Näitä pistepilviä verrattiin 3D-Win-ohjelmalla referenssiaineistoon, jonka mittasimme tutkimusalueella takymetrillä.

2 UAS JA FOTOGRAMMETRIA

2.1 Miehittämättömät ilma-alukset

Seuraavissa luvuissa käydään läpi mm. miehittämättömän ilma-aluksen ja ilma-alusjärjestelmän erot, sekä mitä nimityksiä ja lyhenteitä niistä käytetään. Lisäksi käydään läpi säädökset, jotka rajoittavat miehittämättömien ilma-alusten käyttöä Suomessa sekä kerrotaan, mitä komponentteja miehittämättömiin ilma-aluksiin voi kuulua. Miehittämättömien ilma-alusten jälkeen käydään läpi, mitä fotogrammetrinen mittaus tarkoittaa, miten sitä sovelletaan ilmakuvauksiin ja mitä tärkeitä vaiheita siihen kuuluu. Fotogrammetrian jälkeen tehdään katsaus viistokuvauksen sekä kalansilmäobjektiivin käytöstä ilmakuvauksissa. Niiden jälkeen kerrotaan vielä ilmakuvausten korkeustarkkuuksiin liittyvistä JHS-suosituksista. Nyt siirrytään miehittämättömien ilma-alusten pariin.

Miehittämätön ilma-alus (UAV) on yleisesti määritelty ilma-alukseksi, joka lentää ilman kyydissä olevaa ohjaajaa. Tätä ilma-alusta ohjataan maasta käsin radio-ohjaimen tai autopilotin avulla. Lyhennettä UAS (Unmanned Aerial System) sen sijaan käytetään, kun puhutaan järjestelmästä, joka sisältää ilma-aluksen lisäksi mm. navigointijärjestelmän ja maatukiaseman. Näiden kahden termin lisäksi miehittämättömille ilma-aluksille on olemassa myös monia muita eri nimityksiä. Näitä nimityksiä ovat mm. UA (Unmanned Aircraft), RPA (Remotely Piloted Aircraft), RPAS (Remotely Piloted Aircraft System), drone ja lennokki. (Teittinen 2017, 2; Trafi.)

Käytettävät nimitykset vaihtelevat laitteiden erityispiirteiden, kuten koon ja käyttötarkoituksen mukaan. Esimerkiksi lennokiksi kutsutaan lentolaitetta, jota käytetään harraste- tai urheilutoimintaan. Lentotyöhön käytettävää kauko-ohjattua ilma-alusta sen sijaan kutsutaan nimityksellä RPA. Tässä opinnäytetyössä tullaan jatkossa käyttämään miehittämättömistä ilma-aluksista ja järjestelmistä nimityksiä UAV ja UAS. (Teittinen 2017, 2; Trafi.)

Miehittämättömien ilma-alusten luokittelutapoja on lähes yhtä paljon kuin niille on eri nimityksiäkin. UAV:t voidaan määritellä eri luokkiin esimerkiksi lentoalustan ominaisuuksien, kuten painon, kantokyvyn ja lentoajan mukaan. Yleensä UAV:t painavat noin 1-15 kg ja ne jaksavat nostaa enimmillään noin 10 kg:n kuorman.

Lentoajat vaihtelevat kopterityyppisillä UAV:llä 10:stä minuutista 30:n minuuttiin. Kiinteäsiipisillä ilma-aluksilla lentoaika sen sijaan voi olla puolesta tunnista useaan tuntiin. Lentoaikaan vaikuttavia tekijöitä ovat erityisesti moottoreiden ja roottoreiden määrät, lentoalustan paino, sekä akkujen tehot ja kapasiteetit. (Viljanen 2017, 5–6.)

UAV:den käyttöä rajoittavat ilmailuviranomaisten määrittämät säädökset, jotka vaihtelevat eri valtioiden alueilla. Suomessa näitä säädöksiä laatii ja valvoo liikenteen turvallisuusvirasto Trafi. Tällä hetkellä kauko-ohjattavia ilma-aluksia ja lennokkeja koskee ilmailumääräys OPS M1-32, joka astui voimaan 1.1.2017. Tätä määräystä sovelletaan yli 250 grammaa painaviin kauko-ohjattaviin ilma-aluksiin ja lennokkeihin. (Trafi 2016, 1.)

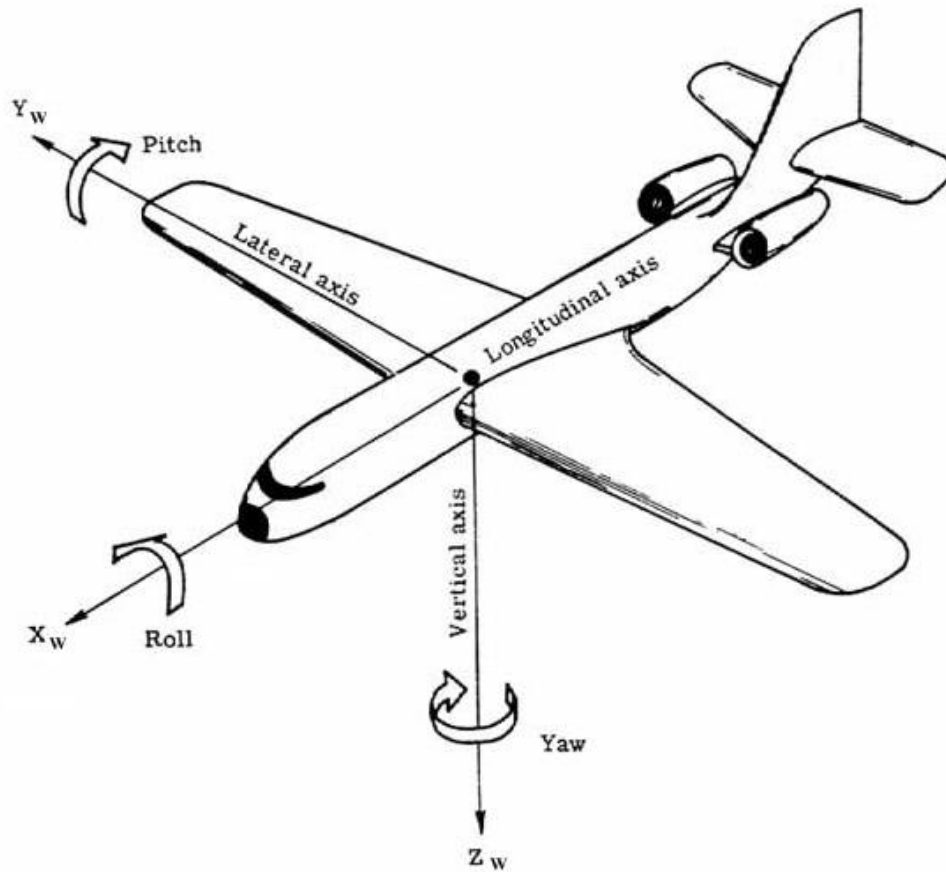
Määräyksen mukaan kauko-ohjattavan ilma-aluksen käyttäjän tulee tehdä Trafille ilmoitus ennen ensimmäistä lentokertaa. Tähän ilmoitukseen täytyy liittää tiedot käyttäjästä, toiminnan laadusta ja laajuudesta, laitteen teknisistä perustiedoista, sekä tiedot siitä lennätetäänkö laitetta asuinalueella tai väkijoukon yllä. Mikäli ilmoitettaviin tietoihin tulee myöhemmin muutoksia, täytyy ilmoitus tehdä uudelleen. (Trafi 2016, 3.)

Lentojen aikana tulee koko ajan säilyttää näköyhteys ilma-alukseen. Tarvittaessa on hyvä olla apuna kauko-ohjaustähystäjä, joka on jatkuvassa yhteydenpidossa kauko-ohjaajaan. Näkyvyyden säilyttämisen lisäksi ilmailumääräys rajoittaa lentokorkeuden 150 metriin. Jos lento kuitenkin tapahtuu alle viiden kilometrin etäisyydellä kiitotiestä, saa lentokorkeus maksimissaan olla 50 metriä. Ottamalla yhteyden lentoaseman lennonjohtoon, on mahdollista sopia korkeammasta lentokorkeudesta kuin 50 metriä. (Trafi 2016, 4.)

2.2 UAS:ään kuuluvat komponentit

Kuten aiemmin jo todettiin, koostuu UAS yleensä ilma-aluksen ja navigointijärjestelmän lisäksi mm. maatumiasemasta. Nämä komponentit toimivat monesti keskenään UAV:ssä olevan autopilotin ja pienen tietokoneen avustuksella. Paikannus- eli navigointijärjestelmään kuuluu yleensä aina kompassi, autopilotti, sekä UAV:n sijaintitietoja mittaava GPS-vastaanotin ja -antenni. Näiden komponenttien lisäksi järjestelmään kuuluu monesti inertianmittausyksikkö eli IMU

(Inertial Measurement Unit). IMU koostuu gyroskoopeista sekä kiihtyvyyssantureista, ja se mittaa ilma-aluksen asentoa ja kallistuksia kolmen akselin suhteen (Kuvio 1). IMU ei ole välttämätön komponentti, mutta sen avulla voidaan päästä paljon tarkempiin tuloksiin kuin pelkän GPS:n avulla. (Viljanen 2017, 5.)



Kuvio 1. Ilma-aluksen akselit (Tkj Electronics 2012)

Kun ilma-aluksen sijainti- ja asentotiedot ovat jatkuvasti tiedossa, pystytään konetta ohjaamaan helposti. Yleensä kartoituslennoilla käytetään autopilottia, jonka avulla ilma-alus lentää ennalta suunnitellun reitin navigointijärjestelmän tietojen avulla. Tällöin aluksen lennättäjä seuraa maatumiaseman avulla, kuinka lento sujuu. Jos lennossa ilmenee ongelmia, hän voi ottaa autopilotin pois päältä, ja lennättää UAV:tä manuaalisesti kauko-ohjaimen avulla. (Teittinen 2017, 9.)

Maan päällä olevaa tietokonetta, jolla suunnitellaan ja tarkkaillaan lentoja, kutsutaan maatumiasemaksi (GCS, Ground Control Station). Tämä tukiasema on jatkuvassa kommunikointiyhteydessä UAV:n komponenttien kanssa. Komponentit kuten GPS, IMU ja autopilotti lähettävät maatumiasemalle tietoja lennon tilanteesta. Näitä tietoja ovat mm. mainitut UAV:n sijainti- ja asentotiedot. Lisäksi

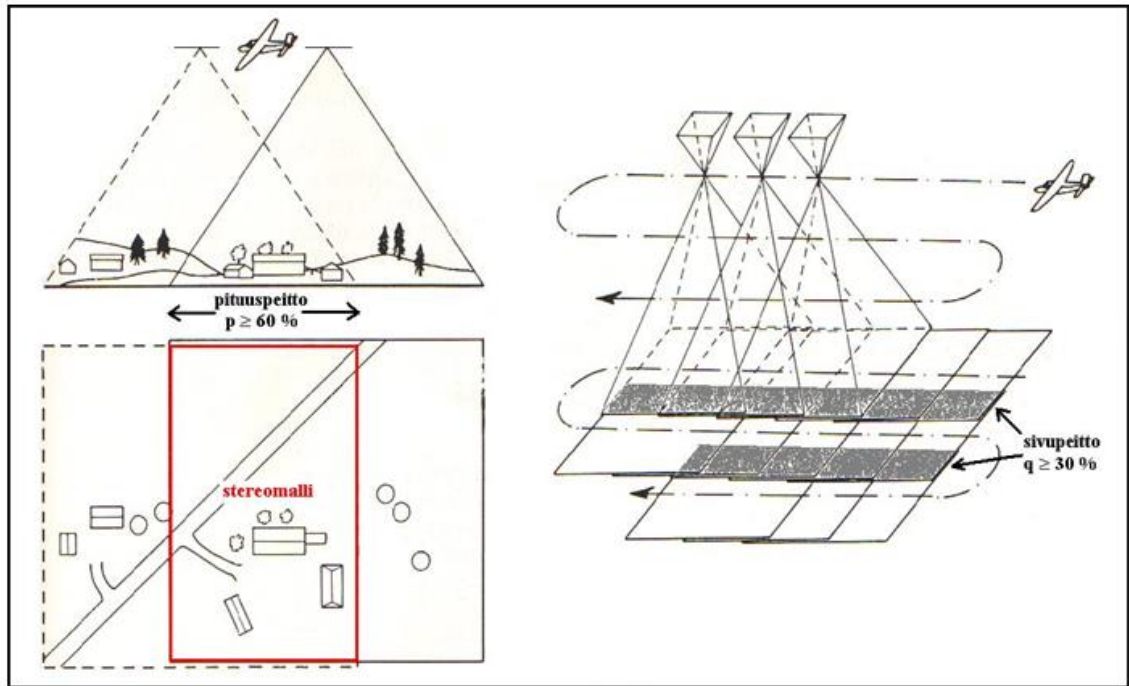
maatukiasema näyttää aluksen lennättäjälle jatkuvasti tietoja mm. lentonopeudesta ja -korkeudesta, sekä akkujen varaustilasta. (Teittinen 2017, 10.)

Navigointijärjestelmän ja maatukiaseman lisäksi UAS:ään kuuluu olennaisesti kuvausinstrumentti. Miehittämättömien ilma-alusten fotogrammetrisissa kartoitust prosesseissa tämä kuvausinstrumentti on yleensä pieniformaattinen digitaalinen järjestelmäkamera. Kameran ympärillä on yleensä gimbal, joka eliminoi lentojen aikana heilahteluja ja värähtelyjä. Muita tärkeitä UAS:ään kuuluvia peruskomponentteja ovat mm. moottorit, akut, roottorit, radiosignaalin lähetinvastaanotin, sekä lentoonlähtö- ja laskeutumisjärjestelmät. (Tienhaara 2017c; Viljanen 2017, 10.)

2.3 Fotogrammetrinen mittaus

Fotogrammetrinen mittaus tarkoittaa valokuvien avulla tehtävää kolmiulotteista mittauksia. Tätä kolmiulotteista mittauksia kutsutaan monesti myös stereomitaukseksi tai -digitoinniksi. Fotogrammetrisessä mittauksessa on tärkeää, että mitattavat kohteet näkyvät kahdella vierekkäisellä kuvalla. Kun näin tapahtuu, saadaan muodostettua stereomalli. Muodostuneen stereomallin avulla voidaan ratkaista mitattavan kohteen kolmiulotteiset koordinaatit. (Laurila 2017.)

Fotogrammetrista mittauksia sovelletaan tunnetusti ilmakuvauksessa. Ilmakuvauksessa lennetään mitattavan alueen yläpuolella kuvausjonoja (Kuvio 2). Jotta stereomalli saadaan muodostettua, käytetään kuvauksessa pituus- ja sivupeittoja. Pituuspeitto tarkoittaa, että kuvausjonon peräkkäiset kuvat peittävät toisiaan, mieluiten vähintään 60 %. Sivupeitto sen sijaan tarkoittaa, että vierekkäiset kuvausjonot peittävät toisiaan. Yleensä sivupeitto on lentokoneella tehtävissä ilmakuvauksissa vähintään 30 %. Mitä luotettavampia ja laadukkaampia mittauksia tehdään, sitä suurempia kuvapeittoja käytetään. (Laurila 2017; Rantanen 2014, 13.)



Kuvio 2. Kuvausjonot (Laurila 2017)

Kuvausjonojen avulla saadaan tuotettua kuvajoukko, jota kutsutaan kuvablokiksi. Jotta kuvablokilta voidaan tehdä mittauksia, täytyy sisäinen ja ulkoinen orientointi ratkaista (Ranta 2015, 11). Sisäisen orientoinnin ratkaiseminen tarkoittaa kameran kalibrointiparametrien määrittämistä. Näitä parametreja ovat muun muassa kameravakio, sekä kuvaa vääristävät optiset virheet. Sisäinen orientointi saadaan ratkaistua kameran kalibroinnilla. Kalibrointi suoritetaan automaattisella menetelmällä yleensä juuri ennen tai jälkeen lennon. (Rantanen 2014, 5; Teittinen 2017, 16.)

Kun sisäinen orientointi on ratkaistu, voidaan siirtyä ulkoisen orientoinnin pariin. Ulkoisen orientoinnin ratkaiseminen tarkoittaa kuvanottoapaikkojen ja kuvaus-suuntien määrittämistä mitattavan kohteen suhteen (Haggren 2011, 13). Ulkoisessa orientoinnissa käytetään apuna GPS:n, IMU:n tai näiden molempien avulla kerättyjä tietoja ilma-aluksen asennoista ja kallistuksista kuvausottohetkillä. Ulkoinen orientointi on sisäisen orientoinnin tapaan automaattinen prosessi. Se voidaan määrittää esimerkiksi suoralla sensorientoinnilla tai ilmakolmioinnilla. (Geodesian ja fotogrammetrian seura 2005, 28.)

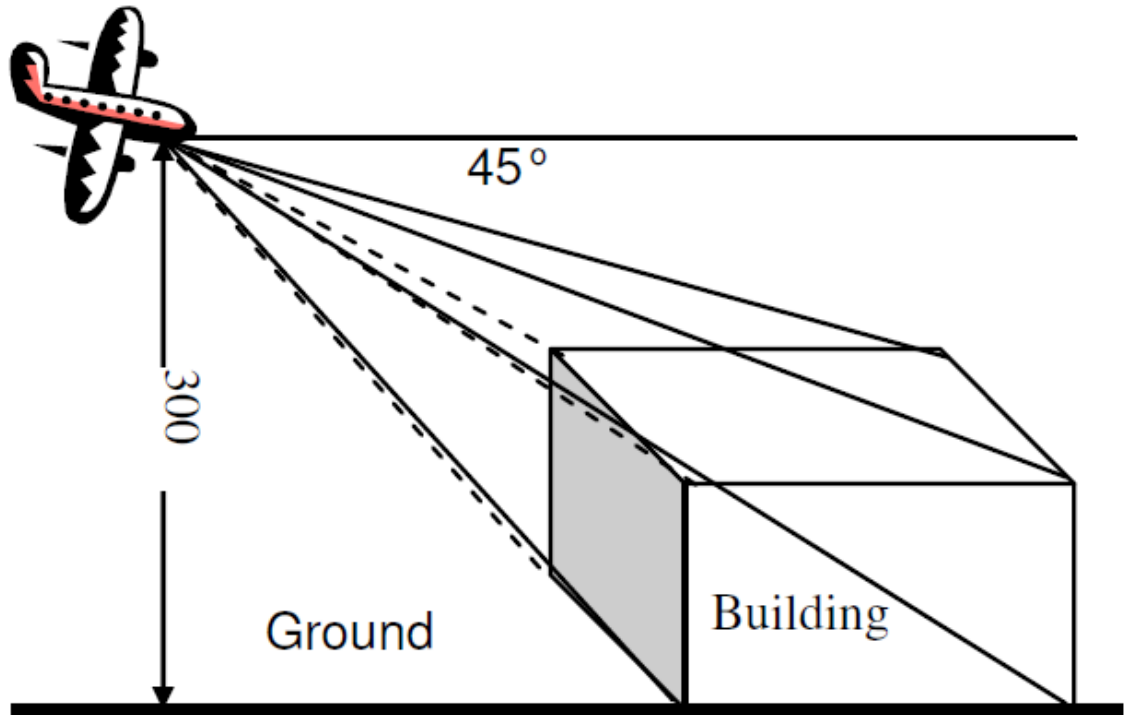
Orientointien ratkaisemisen jälkeen syntyneet tuotokset saadaan käännettyä mitattavan kohteen koordinaatistoon georeferoinnin avulla. Georeferointi voidaan

suorittaa kahdella eri tavalla: suoralla- tai epäsuoralla menetelmällä. Tarkkoja mittauksia tehtäessä käytetään yleisesti epäsuoraa menetelmää, koska siinä on vähemmän mahdollisia virhelähteitä kuin suoraa menetelmää käytettäessä. Suorassa menetelmässä käännös tehdään GPS:n ja IMU:n avulla kerätyillä tiedoilla. Tämä menetelmä on laskennallisesti hankala. Sillä ei päästä kovin hyviin tarkkuuksiin, jos esimerkiksi kameran ja GPS:n kelloissa on synkronointivirhettä. Epäsuorassa menetelmässä käännös taas tehdään mitattavan kohteen alueella sijaitsevien tukipisteiden (GCP, Ground Control Points) avulla. Nämä pisteet on yleensä rakennettu ja mitattu ennen lentoa satelliittipaikantimella ja takymetrillä. (Viljanen 2017, 17, 39.)

Ilmakuvausten tarkkuuteen vaikuttaa moni tekijä, joista tärkein on otettujen ilmakuvien laatu. Ilmakuvien laatu on suoraan verrannollinen kuvausinstrumentin ja ilma-alusjärjestelmän väliseen suorituskyykyyn. Toinen tärkeä tekijä ilmakuvausten onnistumisen kannalta on tukipisteiden tarkkuus ja niiden sijainti kuvattavalla alueella. Ilmakuvat georeferoidaan eli sidotaan kiinni käytettävään koordinaatistoon tukipisteiden avulla. Mitä tarkempia nämä pisteet ovat, sitä tarkempia ovat otetut ilmakuvat. Kuvien prosessoinnissa käytettävä ohjelma vaikuttaa myös jonkin verran tarkkuuksiin. Eri ohjelmat käyttävät laskennoissa eri algoritmeja, ja sen takia lopputulokset eroavat hieman toisistaan. (Sippo 2013, 35.)

2.4 Viistokuvaus

Viistokuvaus on kehittynyt 1800-luvun puolivälistä tähän päivään, ja kehittyy koko ajan enemmän automatisoituun ympäristöön. Viistokuvauksessa kuvat otetaan kallistuskulman alta, joten kulma on suurempi ja alue laajempi kuin esimerkiksi pysty kuvauksessa. Viistokuvaus tehdään perinteisesti koneen lentosuuntaan katsottuna sivulle päin. Kallistus on kulma pystysuoraan alhaalla olevan suuntapisteen ja optisen akselin välillä. Nadiiri on pystysuoraan alhaalla oleva suuntapiste. Kallistuskulman ollessa nadiirista 10 astetta tai suurempi, on kyseessä viistokuva. Yleisin kulma viistokuvaukselle on noin 30-45 astetta. Optimaalinen kuvauskorkeus on 300 metriä ja kuvauskulma 45 astetta (Kuvio 3). Näin tehokkuus säilyy ja resoluutio on hyvä. (GIM international 2014; Haggren 2002; Teittinen 2017, 34–35.)



Kuvio 3. Optimaalinen viistokuvaus (Teittinen 2017, 35)

Viistokuvausta käytetään erilaisiin kaupallisiin ja yhteiskunnallisiin tarkoituksiin. Viistokuvien käyttökohteita ovat esimerkiksi postikortit, raportit, lehdet, opaskirjat, messukuvat, Powerpoint-esitykset, mainokset sekä internetsivut. Lisäksi viistokuvauksia käytetään kaavoituksen sekä yhdyskuntasuunnittelun apuna. Yleisimpiä viistokuvauksen tilaajia ovat rakennusliikkeet, suunnittelu-, arkkitehti- ja konsulttitoimistot, teollisuus, kaupungit ja kunnat, ELY-keskukset sekä Liikennevirasto. Kaupunkialueen viistokuvaus helpottaa huomattavasti 3D-kaupunkimallin tekemistä. Viistokuvauksen erillinen etu on se, että sillä saadaan kuvattua rakennusten julkisivut sekä katot. Alla on esimerkkikuva tutkimuksessa otetusta viistokuvasta (Kuvio 4). (GIM international 2014; Lehtonen 2015, 13; Lentokuva Vallas 2017; Teittinen 2017, 34–35.)



Kuvio 4. Viistokuvaamalla otettu kuva

2.5 Kalansilmäobjektiivi

Kalansilmä on kameran objektiivi, jonka polttoväli on erittäin lyhyt ja kuvakulma todella laaja. Kuvakulma voi olla lähes 180 astetta tai jopa sitä enemmän. Laajan kuvakulman ansiosta kalansilmäobjektiivilla voidaan ottaa kuvia, joihin saadaan taltioitua paljon asioita ympäröivästä alueesta. (Schneider, Schwalbe & Maas 2009, 1.)

Kalansilmäobjektiivin yksi ominaisuus on, että otettuihin kuviin syntyy tynnyri-vääristymää. Tämä vääristymä tarkoittaa, että linjat, jotka eivät kulje kuvan keskipisteen läpi kaareutuvat voimakkaasti (Schneider ym. 2009, 1). Alla olevasta kuvasta tämä kaareutuminen käy hyvin selville (Kuvio 5). Kuvassa oleva tien keskilinja on vielä suora viiva. Tien ulkoreunoissa on kuitenkin jo havaittavissa kaareutumista. Mitä lähemmäksi kuvan ulkoreunoja mennään, sitä voimakkaammaksi kaareutuminen muuttuu. (Hughes, Denny, Jones & Glavin 2010, 2.)



Kuvio 5. Kalansilmäobjektiivilla otettu kuva

Linjojen kaareutumisen takia, kuvien pisteet eivät ole todellisuutta vastaavilla paikoillaan. Tämän takia kalansilmäobjektiiveilla otettuihin kuviin syntyy epätarkkuutta. Epätarkkuuden lisäksi kuvissa esiintyy myös epäyhtenäistä resoluutiota. Resoluutio on suurimmillaan kuvien keskivaiheilla, ja pienimmillään kuvien ulkoreunoilla. (Hughes ym. 2010, 2.)

Kalansilmäobjektiivien hyvänä puolena on niiden suuri näkökenttä. Yhteen kuvaan saadaan mahdutettua iso osa ympäristöstä. Tämän ansiosta kuvia ei välttämättä tarvitse ottaa kohteesta läheskään niin paljon kuin pienemmän näkökentän omaavilla objektiiveilla. Kun otettavien kuvien määrä vähenee, saadaan lyhennettyä kuvausaikaa. Kuvauksiin käytettävän ajan lyhentyessä kuvausten kustannustehokkuus paranee. (Fiorillo, Limongiello & Fernandez-Palacios 2016, 1.)

Kalansilmäobjektiivien soveltuvuudesta fotogrammetrisiin mittaustehtäviin on tehty muutamia tutkimuksia. Strecha (2015) teki esimerkiksi tutkimuksen, jossa hän vertaili eri kamera- ja objektiiviyhdistelmillä tuotettujen pistepilvien tarkkuuksia. Tuloksista selvisi, että alle 180 asteen kuvakulman omaavilla kalansil-

mäobjektiiveilla voidaan päästä lähes yhtä tarkkoihin tuloksiin kuin muiden tutkimuksessa mukana olleiden objektiivien avulla. Tämä kuitenkin edellyttää, että objektiiveja käytetään suorituskkykyisissä kameroissa. Schneiderin (2009) teke-
mässä tutkimuksessa sen sijaan arvioitiin kalansilmäobjektiivien eri geometristen mallien soveltumista fotogrammetrisiin mittauksiin. Tämän tutkimuksen tuloksista selvisi, että kalansilmäobjektiiveja voidaan käyttää fotogrammetrisissa mittaustehtävissä, vaikka niillä otettuja kuvia vaivaavatkin epätarkkuudet. (Schneider ym. 2009, 1,7; Strecha ym. 2015, 1,8.)

Tällä hetkellä kalansilmäobjektiivien yleisimmät käyttökohteet eivät kuitenkaan liity fotogrammetrisiin mittaustehtäviin. Pääasiassa niitä käytetään esimerkiksi kulkuneuvojen ja julkisten rakennusten valvontaan. Lisäksi niiden avulla otetaan yleiskuvia sisätiloista ja katukuvista sekä niitä käytetään tehosteena valokuvauksessa. (Schneider ym. 2009, 1.)

Tähän tutkimukseen kalansilmäobjektiivi valittiin sen suuren näkökentän takia. Tämän ansiosta kalansilmäobjektiivilla on mahdollista tehdä todella kustannustehokkaita mittauksia. Yksi erityisen mielenkiintoinen tapaus olisi kuvata tieosuus vain yhden kuvausjonon avulla. Tämän tapauksen onnistuessa ja tarkkuuksien ollessa kohdillaan, saataisiin erittäin nopea kuvaamistapa luotua. Suuren näkökentän ansiosta kalansilmäobjektiivilla voitaisiin myös tutkia esimerkiksi, kuinka tarkasti puiden runkojen ja rakennusten julkisivujen sijaintitarkkuudet saataisiin kerättyä. Tässä tutkimuksessa kuitenkin keskitytään kalansilmäobjektiivin osalta vain sen tarkkuuteen sekä kustannustehokkuuteen tienpinnan osalta. Näin ollen puut ja muut maastonkohteet jätetään tutkimuksen ulkopuolelle.

2.6 JHS-suositukset

Tutkimuksessa tutkittiin julkisen hallinnon suositusten osalta korkeustarkkuutta. Kyseinen suositus on JHS 185. Tämä suositus antaa vaatimukset asemakaavan pohjakartan laatimiselle ja sen kuvaustekniikalle, kaavoitusmittauksille sekä ohjeet kaavoitusmittauksen ja asemakaavan pohjakartan tarkastamisesta. Tämän kyseisen suosituksen kohderyhmiä ovat kaavoitusmittauksia, kaavoitusta ja asemakaavan pohjakarttoja tekevät yritykset, kaavoitusta ohjaavat valtion

yritykset sekä kunnat. Tärkeimpänä asiakirjana opinnäytetyön tutkimuksen osalta on liite 4, joka antaa kohteiden kartoituksen laatuvaatimukset. (Juhta 2014a, 2.)

Korkeuskäyrällä olevan pisteen tai numeerisesta korkeusmallista interpoloidun pisteen korkeusvaatimus on:

- mittausluokka 1: ≤ 0.12 m
- mittausluokka 2: ≤ 0.20 m
- mittausluokka 3: ≤ 0.40 m.

Kuvaus- ja mittaustarkkuuden määrää mittausluokka. Ensimmäiseen mittausluokkaan kuuluu taajama-alueet, joiden alueella maa on todella arvokasta, ja joilla on voimassa sitovan tonttijaon asemakaava tai rakennuskielto tällaisen asemakaavan laatimista varten. Kartoituksissa, joita on tarkoitus käyttää osana kunnan paikkatietojärjestelmää ja hyödyntää suurta tarkkuutta edellyttävässä teknisessä suunnittelussa, voidaan käyttää tarkempaa vaatimustasoa nimeltä mittausluokka 1e. Ensimmäisen mittausluokan tarkkuusvaatimukset on tarkoitettu paikkatietojärjestelmästä tulostettaville kartoille, joiden mittakaava on 1:1000. Ensimmäisen mittausluokan kartan mittakaava voi myös olla 1:500. (Juhta 2014a, 18; Juhta 2014b, 4–5.)

Toiseen mittausluokkaan kuuluvat taajama-alueet, joille laadittavassa asemakaavassa ei edellytetä asemakaavaa. Toisessa mittausluokassa karttatietokannalta edellytetään taulukossa esitettyjä tarkkuuksia riippumatta kartan mittakaavasta. Toisen mittausluokan mittakaava on 1:1000 tai 1:2000. (Juhta 2014a, 4–5.)

Kolmanteen mittausluokkaan kuuluvat esimerkiksi ranta-asemakaavan alueet sekä muut ranta-alueet. Lisäksi alueet, joilla maa on maa- ja metsätalousmaata huomattavasti arvokkaampaa kuuluvat myös kolmanteen mittausluokkaan. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi haja-asutusalueet. Kolmannessa mittausluokassa esitetyt tarkkuudet ovat tarkoitettu kartoille, joiden mittakaava on 1:2000. (Juhta 2014a, 4–5.)

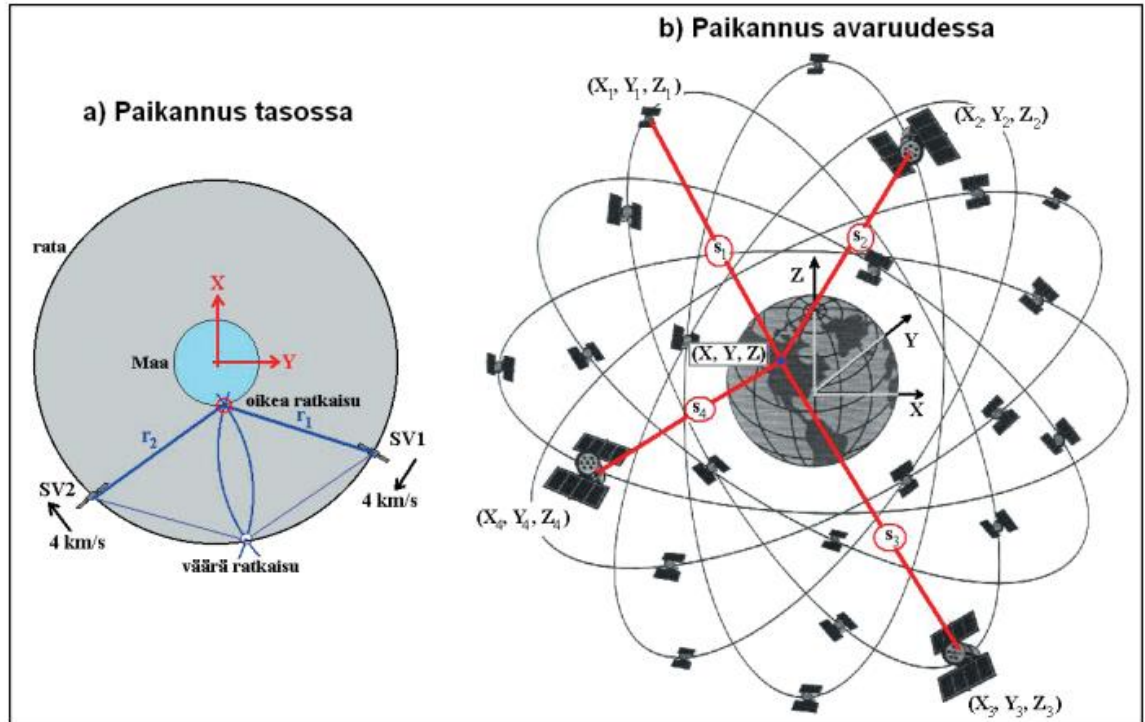
3 SATELLIITTI- JA TAKYMETRIMITTAUKSET

3.1 Satelliittipaikannus

Tutkimuksen luotettavuuden kannalta oli tärkeää, että mitattu referenssiaineisto olisi laadukasta ja tarkkaa. Ilmakuvauksista tuotettiin fotogrammetriset pistepilviaineistot, joita vertailtiin tähän mitattuun referenssiaineistoon. Tämä korkeusvertailussa käytetty referenssiaineisto mitattiin satelliittipaikantimen ja takymetrin avulla. Seuraavissa kappaleissa esitetään satelliittipaikannuksen ja takymetrin toimintaperiaatteet. Lisäksi kappaleissa pureudutaan mahdollisiin virhelähteisiin, joita näitä mittausmenetelmiä käyttämällä syntyy.

Satelliittipaikannus perustuu satelliittipaikannusjärjestelmään, josta käytetään lyhennettä GNSS (Global Navigation Satellite System). Tämä järjestelmä kattaa koko maapallon, ja se hyödyntää usean eri maan paikannusjärjestelmiä. Tunnetuin ja kattavin näistä paikannusjärjestelmistä on Yhdysvaltain puolustusministeriön ylläpitämä GPS. Toinen suuri paikannusjärjestelmä GLONASS on Venäjän ylläpitämä. Muut suuret kehitteillä olevat globaalit paikannusjärjestelmät ovat Kiinan BeiDou, joka tunnetaan myös nimellä COMPASS sekä eurooppalainen Galileo. (Joensuu 2017, 4.)

Itse satelliittipaikannus tarkoittaa paikan määrittämistä maata kiertävien satelliittien avulla. Satelliitit lähettävät radiosignaalia, joka sisältää tietoa mm. signaalin lähtö- ja saapumisajasta. Kun signaalien kulkuajat tiedetään, voidaan vastaanottimen etäisyys satelliitteihin määrittää. Maapallon kolmiulotteisen muodon takia on tärkeää mitata etäisyydet vähintään kolmeen satelliittiin (Kuvio 6). Mitä suurempaan määrään satelliitteja saadaan etäisyydet mitattua, sitä pienemmät ovat virheiden mahdollisuudet (Laurila 2012, 291; Poutanen 1998, 11.)



Kuvio 6. Satelliittipaikannus (Laurila 2012, 291)

Satelliittipaikannuksessa on olemassa useita eri mittaustapoja eli mittausmoodeja. Yleisimmät näistä mittausmoodeista ovat absoluuttinen paikannus, differentiaalinen paikannus sekä suhteellinen mittaus. Muut mittaustavat ovat näiden kolmen yhdistelmiä. Mittaustavat eroavat toisistaan esimerkiksi havaintolaitteiden lukumäärän, käytettävien havaintosuureiden ja virheiden korjaamistekniikoiden osalta. (Laurila 2012, 293; Poutanen 1998, 197.)

3.2 Mittaustavat

Absoluuttisessa paikannuksessa tarvitaan vain yksi havaintolaite keräämään satelliittien lähettämiä signaaleja. Havaintolaite määrittää sijaintinsa signaalien sisältämien paikannuskoodien eli C/A-koodien avulla. Signaalihavainnot täytyy mitata samanaikaisesti vähintään neljään satelliittiin, jotta satelliittien ja vastaanottimen välinen kellovirhe saadaan korjattua. Parhaimmillaan absoluuttisella paikannuksella voidaan päästä muutaman metrin koordinaattitarkkuuteen. Tämä tarkkuus on heikoin kolmesta yleisimmästä mittaustavasta. Siitä huolimatta absoluuttinen paikannus on yksinkertaisuutensa ja halpuutensa vuoksi yleisin

käytössä oleva paikannusmenetelmä. Esimerkiksi älypuhelimien ja urheilukellojen GPS-paikantimet perustuvat absoluuttiseen paikannukseen. (Laurila 2012, 295; Poutanen 1998, 199.)

Differentiaalisessa paikannuksessa riittää absoluuttisen paikannuksen tapaan vain yksi vastaanotin. Lisäksi tämä paikannus perustuu absoluuttisen paikannuksen tavoin C/A-koodiin ja tarkkaan ajanmäärittelyyn. Erona absoluuttiseen paikannukseen on, että differentiaalisessa paikannuksessa hyödynnetään tunnetulla pisteellä olevaa tukiasemaa. Tukiasema lähettää vastaanottimelle sijainnin korjausviestiä, jonka avulla paikannus tarkentuu. Tukiaseman lähettämän korjausviestin ansiosta differentiaalisella paikannuksella päästään parhaimmillaan puolen metrin tarkkuuteen. Tätä paikannusmenetelmää käytetään esimerkiksi laivaliikenteen navigoinnissa. (Laurila 2012, 299–301; Poutanen 1998, 11–12.)

Tarkin kolmesta yleisimmästä mittausmoodista on vaihehavaintoihin perustuva suhteellinen mittaus. Se eroaa absoluuttisesta ja differentiaalisesta paikannuksesta kahdella tavalla. Ensimmäinen eroavuus liittyy havaintosuureeseen. Absoluuttisessa ja differentiaalisessa paikannuksessa käytetään satelliittien radiosignaalien C/A-koodia. Suhteellisessa mittauksessa sen sijaan käytetään radiosignaalien kantaaltoa. Toinen eroavuus on siinä, että suhteellisessa mittauksessa käytetään kahta havaintolaitetta, joista toinen sijaitsee tunnetulla pisteellä. Paikantavan vastaanottimen sijainti mitataan tämän tunnetulla pisteellä olevan vastaanottimen suhteen. Tällä mittaustavalla päästään parhaimmillaan muutaman millimetrin tarkkuuteen tukiaseman suhteen. Satelliittien kiertoratoja ei kuitenkaan tunneta näin tarkasti, jolloin todellinen tarkkuus jää muutama senttimetriin. Suhteellista mittausta käytetään esimerkiksi koneohjauksessa. (Laurila 2012, 301–302; Poutanen 1998, 197–198.)

Suhteellisesta mittauksesta on olemassa useita eri mittaustekniikoita. Näitä tekniikoita ovat esimerkiksi RTK (Real Time Kinematic) sekä verkko-RTK. RTK-mittaus perustuu tunnetulla pisteellä olevan vertailuvastaanottimen lähettämiin vaihehavaintoihin. Tämä tukiasemana toimiva vertailuvastaanotin lähettää vaihehavainnot liikkeessä olevalle paikantavalle vastaanottimelle. Vaihehavaintojen avulla paikantava vastaanotin pystyy laskemaan sijaintinsa tukiaseman suhteen.

Verkko-RTK-mittaus taas perustuu yksittäisen tukiaseman sijasta laajempaan tukiasemaverkkoon. Tukiasemaverkkoon kuuluva laskentakeskus lähettää paikannuksen korjausdatan mittalaitteelle mobiiliverkon avulla. Suomessa näitä tukiasemaverkkoja ovat Geotrimin ylläpitämä Trimnet sekä Leica Geosystemsillä ylläpitämä SmartNet. (Laurila 2012, 319–322.)

3.3 Satelliittimittausten virhelähteet

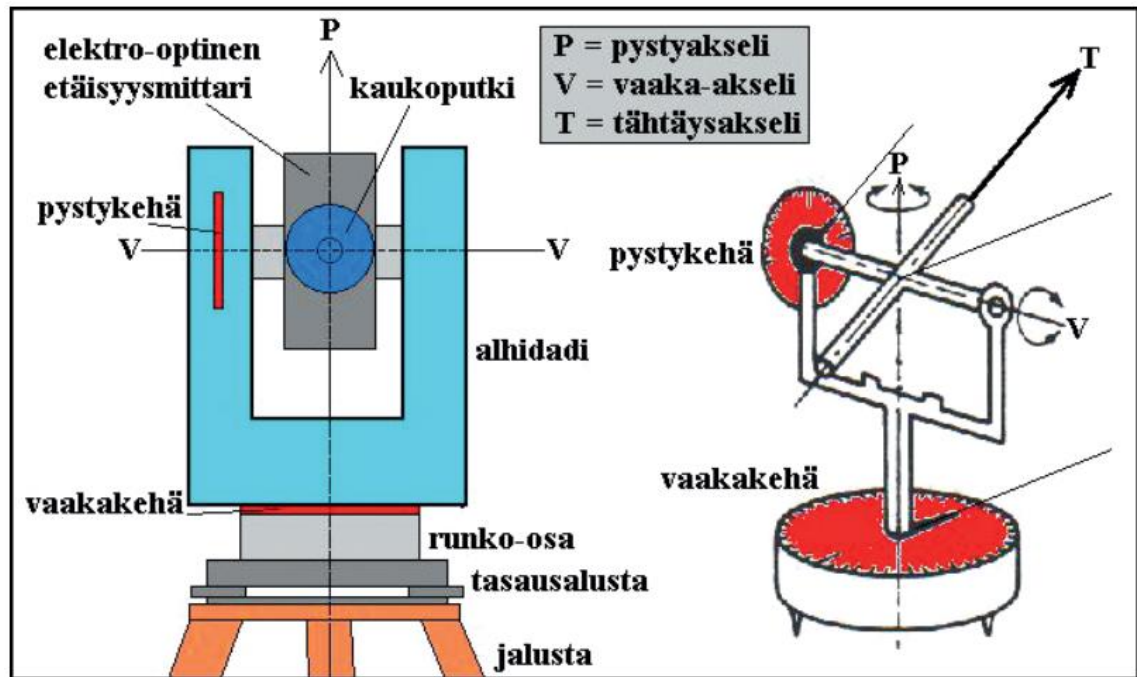
Satelliittimittausten tarkkuuksia voi heikentää useat eri asiat. Yksi näistä on ionosfäärin aiheuttamat häiriöt. Satelliittien paikannussignaalit kulkevat ionosfäärin läpi, joka on altis auringon aktiivisuuden muutoksille. Avaruusmyrskyjen aikana ionosfäärin elektronitiheys vaihtelee nopeasti, jonka seurauksena ionosfääriin syntyy pyörteitä. Nämä pyörteet aiheuttavat häilyntää signaaleihin, minkä takia paikannuksen tarkkuus voi hetkellisesti heikentyä jopa useilla metreillä. (Ilmatieteenlaitos 2017.)

Ionosfäärin lisäksi usean metrin virheet voivat johtua monitieheijastuksista. Monitieheijastuksia aiheuttavat esimerkiksi vesi ja rakennukset. Heijastusten takia signaali ei kulje suoraan satelliitilta vastaanottimelle, jolloin suuretkin epätarkkuudet ovat mahdollisia. Kolmas tarkkuutta heikentävä asia liittyy satelliittigeometriaan. Se tarkoittaa satelliittien lukumäärää ja sijaintia havaitsijan suhteen (DOP). Mitä vähemmän satelliitteja on tavoitettavissa ja mitä suurempi DOP-luku on, sitä suuremmat ovat mittausten virhemahdollisuudet. Muut mahdolliset virhelähteet liittyvät esimerkiksi kello- ja ratavirheisiin, vastaanottoon sekä käyttäjän inhimillisiin virheisiin. (Laurila 2012, 306–310.)

3.4 Takymetrimittaukset

Takymetri on mittauskoje, jolla mitataan kulmia ja etäisyyksiä. Näiden havaintojen avulla pystytään laskemaan mitattaville kohteille mm. koordinaatteja ja korkeuksia. Takymetrimittausten peruslähtökohtana on kojeen orientoiminen käytettävään koordinaatistoon. Kun takymetri saadaan orientoitua hyvien lähtöpis-
teiden avulla koordinaatistoon, voidaan alkaa määrittää mitattavan kohteen koordinaatteja. (Laurila 2012, 238, 252.)

Takymetrillä tehtäviä kulmahavaintoja kutsutaan joko pysty- tai vaakakulmiksi. Vaakakulma on kahden tähtäys suunnan erotus, ja sitä käytetään kojeen tasosijainnin ja pohjoissunnaan määrittämiseen. Vaakakulmia voidaan lukea kojeen vaakakehältä (Kuvio 7). Pystykulmia sen sijaan hyödynnetään, kun halutaan tietää mitattavien kohteiden korkeuksia. Pystykulmalukemat luetaan kojeen pystykehältä. (Laurila 2012, 59.)



Kuvio 7. Takymetrin pääosat ja akselit (Laurila 2012, 239)

Takymetrillä mitattava etäisyys perustuu elektro-optiseen etäisyyden mittaukseen. Tässä mittaustavassa takymetri lähettää signaalin kohti mitattavaa kohdetta. Kohteesta palaavaa signaalia verrataan lähetettyyn signaaliin, ja tämän vertailun avulla määritetään kohteen etäisyys. Etäisyys voidaan määrittää joko amplitudimoduloitun tai pulssimoduloitun signaalin avulla. Amplitudimoduloitua signaalia käytetään, kun tehdään mittauksia prisman kanssa. Se perustuu vaihe-eromittaukseen, jossa lasketaan edestakaisin kulkevan signaalin sisältämien kokonaisten aallonpituuksien lukumäärä ja osa-aallonpituus eli vaihe-ero. Pulssimoduloitua signaalia sen sijaan käytetään, kun tehdään mittauksia ilman prismaa. Pulssimodulointi perustuu mittaussignaalin kulkuajan määrittämiseen. Tarkkuus elektro-optisella etäisyyden mittauksella on yleensä noin 1-3 mm. (Laurila 2012, 249–251.)

Tutkimuksen mittauskalustona käytettiin Trimblen mittauslaitteita. Tarkemmin eriteltynä Trimblen S6 -takymetriä ja Trimblen R10 -satelliittipaikanninta. Laadun-tarkkailun kannalta oli tärkeää valita hyvän tarkkuuden omaava mittauskalusto. Trimble S6 -takymetrin kulmatarkkuus on 1 milligooni ja sen etäisyyden mittauksen tarkkuus alle 300 metrin matkalla on 3 mm. Trimble R10 satelliittipaikantimen sijaintitarkkuus on 8 millimetriä ja korkeustarkkuus 15 millimetriä. (Inland GPS 2007; Trimble 2017.)

4 TUTKIMUSPROSESSI

4.1 Tutkimusalue

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, kuinka hyvin viistokuvaus ja kalansilmäobjektiivi soveltuvat UAV:llä suoritettaviin ilmakuvauksiin. Tätä soveltuvuutta selvitettiin keskittymällä ilmakuvausten tarkkuuden ja kustannustehokkuuden tutkimiseen. Tutkimusprosessiin kuului useita eri vaiheita, joita käydään seuraavissa luvuissa läpi. Luvussa 4.2 kerrotaan, kuinka ilmakuvausten lähtöpisteet ja vertailuun tarvittava referenssiaineisto mitattiin. Kolmannessa luvussa 4.3 esitellään ilmakuvauksissa käytetty lentokalusto. Sen jälkeen kerrotaan, kuinka ilmakuvaukset suoritettiin (luku 4.4). Lopuksi kerrotaan, kuinka aineisto käsiteltiin pistepilviksi (luku 4.5), ja kuinka aineistoja vertailtiin toisiinsa (luku 4.6). Ennen näitä vaiheita esitellään kuitenkin tutkimusalue ja sen valintaan johtaneet syyt.

Tutkimusalueen ja aiheeseen liittyvän teorian tiedon suunnittelu ja etsintä aloitettiin hyvissä ajoin kesällä 2017. Aluetta valittaessa oli tarkoituksena hyödyntää jo mahdollisesti aiemmin lentämällä kartoitettua aluetta. Tämän alueen olisi hyvä sijaita mieluiten Rovaniemen ja Oulun välisellä alueella.

Syksyn saavuttua kävi kuitenkin ilmi, ettei tällaista kohdetta ollut saatavilla. Tutkittavan alueen sijainnissa päädyttiin molemmille osapuolille sopivaan ratkaisuun. Sijaintina oli rauhallinen tienpätkä välillä Yli-Ii – Kiiminki. Tutkittavana alueena toimi noin 300 metrin pituinen suora tieosuus (Kuvio 8). Alue sijaitsi noin kahden ja puolen tunnin ajomatkan päässä Rovaniemeltä. Paikka sopi hyvin myös toimeksiantajalle, koska hänen työpaikkansa sijaitsee Haukiputaalla. Alueen hyvä puoli oli myös, että sen ympärillä kasvoi matalaa ja harvaa mäntymetsää. Tämän ansiosta alueella olisi todennäköisesti hyvät satelliittiyhteydet, ja tarkkuuksien osalta päästäisiin hyviin tuloksiin. Myös näkyvyys oli molempiin suuntiin hyvä, jonka ansiosta mittaukset ja ilmakuvaukset päästäisiin tekemään turvallisesti. Aikaa mahdollisiin liikenteen aiheuttamiin väistötilanteisiin riittäisi hyvin. Mittausajankohdaksi valikoitui lokakuun loppupuoli molempien osapuolien työkiireiden vuoksi.



Kuvio 8. Mitattava tieosuus

4.2 Referenssiaineiston ja lähtöpisteiden mittaus

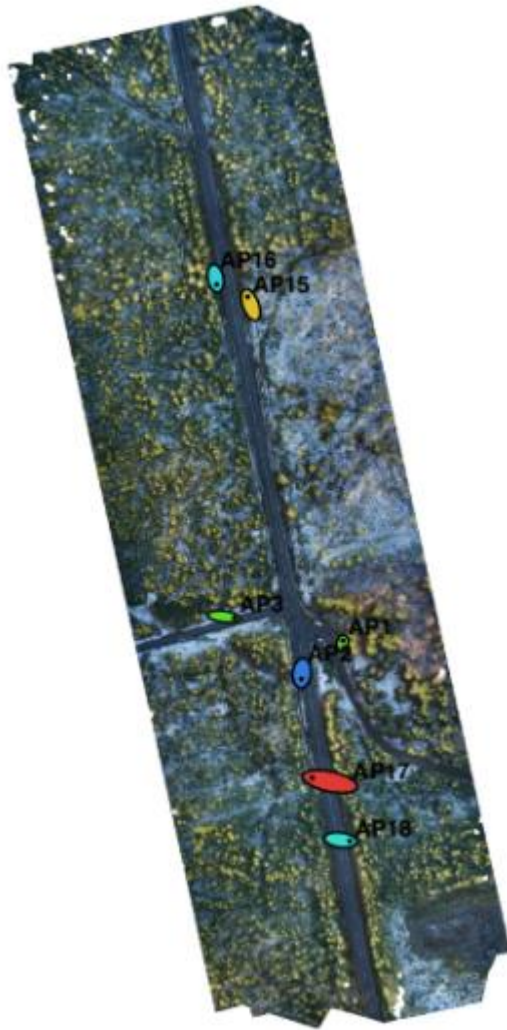
Referenssimittausten valmistelu aloitettiin mitaussuunnitelman tekemisellä. Mitaussuunnitelma sisälsi koordinaatti- ja korkeusjärjestelmän, lähtöpisteiden tekotavan, kohteen, mittaamiseen tarvittavan kaluston, mittaustyön suorituksen, ajan ja paikan sekä tiedot mittausten dokumentoinnista. Koordinaattijärjestelmänä mittauksissa käytettiin ETRS-GK26 -koordinaattijärjestelmää ja korkeusjärjestelmänä N2000 -korkeusjärjestelmää.

Tutkittavalle alueelle saavuttiin valittuna mittauspäivänä hyvissä ajoin aamupäivästä. Tällöin sää oli puolipilvinen ja lämpötila oli hieman alle nolla astetta. Referenssimittaukset aloitettiin lähtö- ja tukipisteiden rakentamisella. Rakentamisen jälkeen 3 lähtöpistettä mitattiin Trimblen R10 -satelliittipaikantimella käyttäen kiintopistemittausasetuksia (Kuvio 9). Lähtöpisteiden mittaamisen aikana taivaalla oli runsaasti satelliitteja, ja vallinnut satelliittigeometria oli suotuisa mittauksille.



Kuvio 9. Lähtöpisteiden tekemistä

Jokainen lähtöpiste mitattiin kolmesta eri suunnasta, ja näiden kolmen suunnan mittaustulokset keskiarvoistettiin. Lähtöpisteet ovat alla olevassa kuvassa (Kuvio 10) pisteet AP1, AP2 ja AP3. Kuvassa näkyy myös myöhemmin rakennettujen signalointipisteiden sijainnit.



Kuvio 10. Lähtö- ja signalointipisteiden sijainnit tutkimusalueella (Tienhaara 2017a)

Keskipäivällä mittauksia jatkettiin Trimblen S6 -takymetrillä. Takymetri orientoitiin tehtyjen lähtöpisteiden perusteella keskeiselle sijainnille, tien viereen. Orientoinnin jälkeen takymetrillä mitattiin referenssiaineisto. Takymetrillä mitattiin tien pinnasta pisteitä viiden metrin välein 300:n metrin alueelta. Nämä takymetrillä mitatut referenssiaineiston pisteet mitattiin tien oikeasta ja vasemmasta laidasta sekä keskeltä tietä. Pisteiden mittauksissa käytettiin apuna Trimblen 360 -prismaa.

4.3 Signalointi

Referenssimittausten jälkeen takymetrillä mitattiin myös lentojen laskennassa käytettävien signalointipisteiden sijainnit. Nämä pisteet näkyvöitettiin valkoisilla ristisignaaleilla (Kuvio 11). Signalointipisteet sijaitsivat mitattavan tienpätkän ulkopuolella jokaisessa nurkassa. Signalointi tehtiin laittamalla signalointiristi edellä mainituille paikoille. Signaloinnissa huomioitiin pisteiden näkyvyys jokaiseen UAV-lennokilla lennettävään lentosuuntaan. Signalointipisteitä tehtiin alueelle neljä. Lentojen jälkeisessä laskennassa käytettiin mukana myös lähtöpisteitä, jotka tehtiin referenssimittauksia varten. Nämä pisteet näkyvöitettiin valkoisilla maaliristeillä.



Kuvio 11. Signalointiristi.

4.4 Ilmakuvauksissa käytetty kalusto

Molemmissa ilmakuvauksissa Maailmasta Oy käytti kuvauskalustona Vector7-lentoalustaa (Kuvio 12). Molemmissa kuvauksissa käytettiin myös kuvausinstrumenttina Sonyn peilitöntä järjestelmäkameraa NEX5:sta. Viistokuvauksissa käytettiin Sony 16 mm f/2.8 objektiivia ja kalansilmäobjektiivilla kuvattaessa Samyang 8 mm f/2.8 objektiivia.



Kuvio 12. Tutkimuksessa käytetty miehittämätön ilma-alus (Vectorheli 2013)

4.5 Lentovalmistelut ja lennot

Lentojen ajankohtaa suunniteltaessa täytyi ottaa huomioon ilmatilavaraukset sekä ennustetut sääolosuhteet. Syksyn aikana suunnittelua häiritsi erityisesti vaihtelevat sääolosuhteet ja pitkään taivaalla leijunut sumupilvi. Sääennusteet myös vaihtelivat jonkin verran, eikä valittuina lentopäivinä ollutkaan niin hyvä keli kuin oli ennustettu. Myös kehitysvaiheessa olevan lentokaluston kanssa oli pieniä ongelmia. Lopulta kuitenkin lennot päästiin suorittamaan marraskuun puolessa välissä. Kuvaushetkillä olosuhteet olivat hyvät valaistuksen ja tuulen osalta. Tuuli oli lähes täysin tyyni niin maanpinnalla kuin lentokorkeuksissakin.

Lentosuunnitelmat tehtiin Mission Planner -ohjelmalla. Ohjelman avulla rajattiin ensiksi kuvausalue ja määritettiin lentosuunnaksi alueen pituussuunta, jotta

saadaan pienin jono- ja kuvamäärä. Tämän jälkeen määriteltiin lentokorkeus ja käytettävät kuvapeitot. Näiden tietojen avulla ohjelma laski mm. käytettävän maastopikselin koon, sekä kuvanottoaikat ja kuvausjonojen lukumäärän. Lentoasetusten määrittämisen jälkeen, ohjelman avulla määriteltiin vielä kameran asetukset kuntoon.

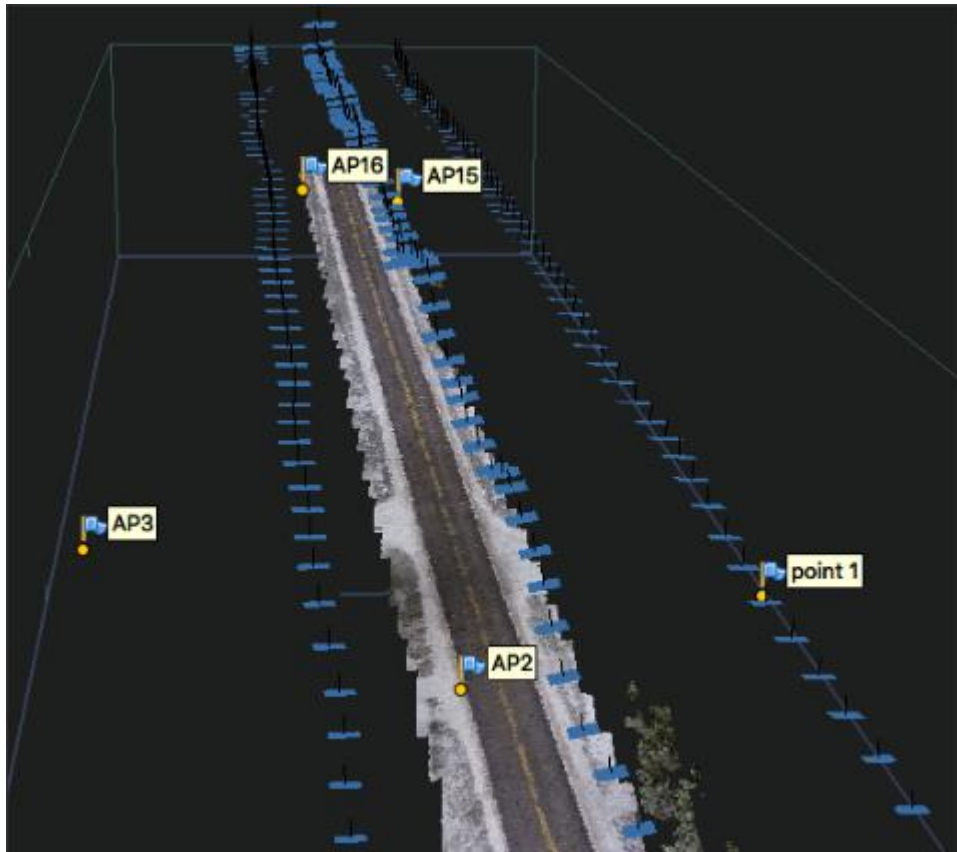
Ennen lento-ohjelmalla tarkistettiin vielä, että ilma-aluksessa kaikki toimii normaalisti. Tämän tarkistuksen jälkeen ilma-alus ohjattiin manuaalisesti suunniteltuun lentokorkeuteen. Seuraavaksi laitettiin autopilotti päälle, jolloin ilma-alus lähti toteuttamaan suunniteltua lentoa. Kalansilmäobjektiivilla kuvattaessa käytettiin 30:n metrin lentokorkeutta, sekä 90 %:n pituuspeittoa ja 80 %:n sivupeittoa. Kuvausjonoja oli 3 kappaletta. Lento sujui suunnitelmien mukaisesti, ja kone ohjattiin manuaalisesti takaisin maanpinnalle, kun kuvausjonot oli lennetty läpi.

Viistokuvauksessa käytettiin 90 %:n pituus- ja sivupeittoa. Lentokorkeus oli 50 metriä, ja kuvausjonoja oli suunnitelmassa 4. Lento sujui ensimmäiset 3 kuvausjonoa aivan suunnitelmien mukaisesti. Viimeistä kuvausjonoa lennettäessä tapahtui kuitenkin ”GPS glitchejä” eli GPS-paikannin menetti sijaintinsa. Tästä johtuen automaattiohjaus piti ottaa pois päältä, ettei kone pääse karkaamaan omille teilleen. Viimeisestä kuvausjonosta jäi tästä johtuen eteläpääty kuvaamatta.

4.6 Aineistojen käsittely

Aineistojen käsittely alkoi lataamalla kuvat kameran muistikortilta tietokoneelle. Tämän jälkeen kuvat käytiin läpi ja niiden laatu tarkastettiin. Molempien lentojen aikana otetut kuvat olivat laadultaan hyviä. Viistokuvauksen aikana tapahtuneen GPS-sijainnin kadottamisen takia viimeisestä jonosta jouduttiin poistamaan ”GPS glitchin” jälkeiset kuvat. Tämä ei kuitenkaan vaikuttanut tutkimustuloksiin, sillä viimeinen kuvausjono kulki jo kaukana tien ulkopuolella.

Kuvien tarkastamisen ja tarpeettomien kuvien poistamisen jälkeen kuvat ladattiin Agisoftin PhotoScan -ohjelmaan. Ohjelmassa kuville suoritettiin ensimmäisenä Align Photos -toiminto (Kuvio 13). Tämä toiminto etsi automaattisesti kuvien paikat ja niiden suunnat, sekä määritteli kameran kalibroinnin parametrit. Align Photos -toiminnon avulla saatiin luotua sparse pistepilvi.



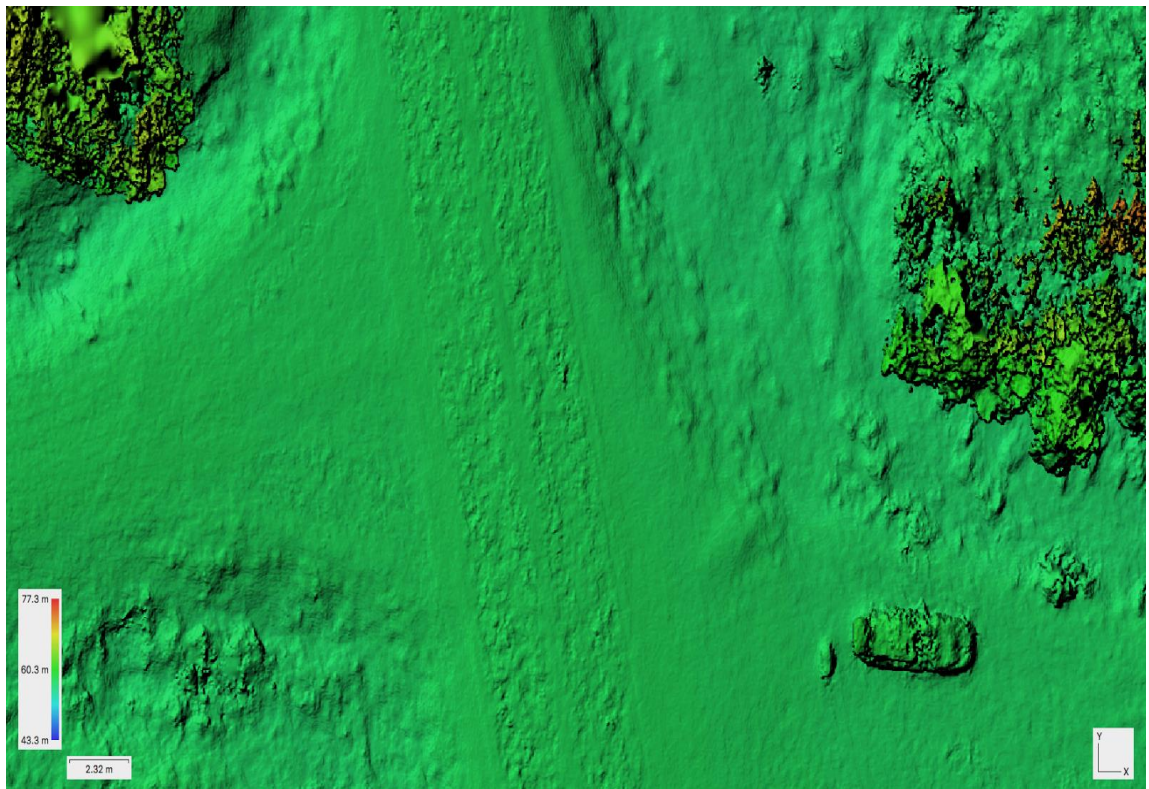
Kuvio 13. Align Photos- toiminnon käyttöä (Tienhaara 2017b)

Seuraavassa vaiheessa ohjelmaan ladattiin tukipisteiden koordinaattitiedot. Nämä tukipisteiden koordinaatit merkittiin manuaalisesti tiedostoon oikeille kohdilleen. Merkitsemisen jälkeen pistepilvi saatiin georeferoitua eli käännettyä se mitattavan alueen koordinaatistoon. Georeferoinnin jälkeen suoritettiin viimeinen automaattinen prosessi, jonka avulla laskettiin korkeusvertailussa käytettävät dense pistepilvet.

Laskennassa tuotettiin kolme pistepilviaineistoa. Viistokuvauksesta tuotettiin pistepilvet 80%:n ja 90%:n kuvapeitoilla. Kalansilmäobjektiivilla kuvatusta aineistosta saatiin pistepilvi, jonka kuvapeitto oli 90 %. Kalansilmälinssillä kuvatusta aineistosta yritettiin vielä tuottaa kustannustehokkuuden kannalta mielenkiintoista yhden kuvausjonon pistepilveä. Tämä kuitenkin osoittautui aineiston käsittelyn osalta niin haastavaksi tehtäväksi, ettei sitä saatu tuotettua. Näin ollen vertailuun jäi mainitut 3 pistepilviaineistoa.

Aineistojen käsittelyvaiheessa kävi ilmi, että musta tie on vaikea mallinnuskohde, koska ajourille jää hieman epätasainen pinta mallinnuksen jälkeen. Alla olevasta

korkeusmallista käy hyvin ilmi tämä ns. röpelöisyys (Kuvio 14). Kuvassa tien reuna- ja keskiviiva ovat mallintuneet hyvin, kuten myös kuvan vasemmassa laidassa oleva soratie. Tutkittavan tien pinnassa sen sijaan näyttää olevan paljon röpelöä. Tätä samaa röpelöisyyttä ilmenee mallinnettaessa kirkkaita peilimäisiä kohteita, kuten esimerkiksi vettä. Epätasaisuus tuottaa pientä virhettä vertailuihin. Totesimme virheen kuitenkin olevan niin pieni, ettei tätä syntynyttä röpelöä tarvitse poistaa.

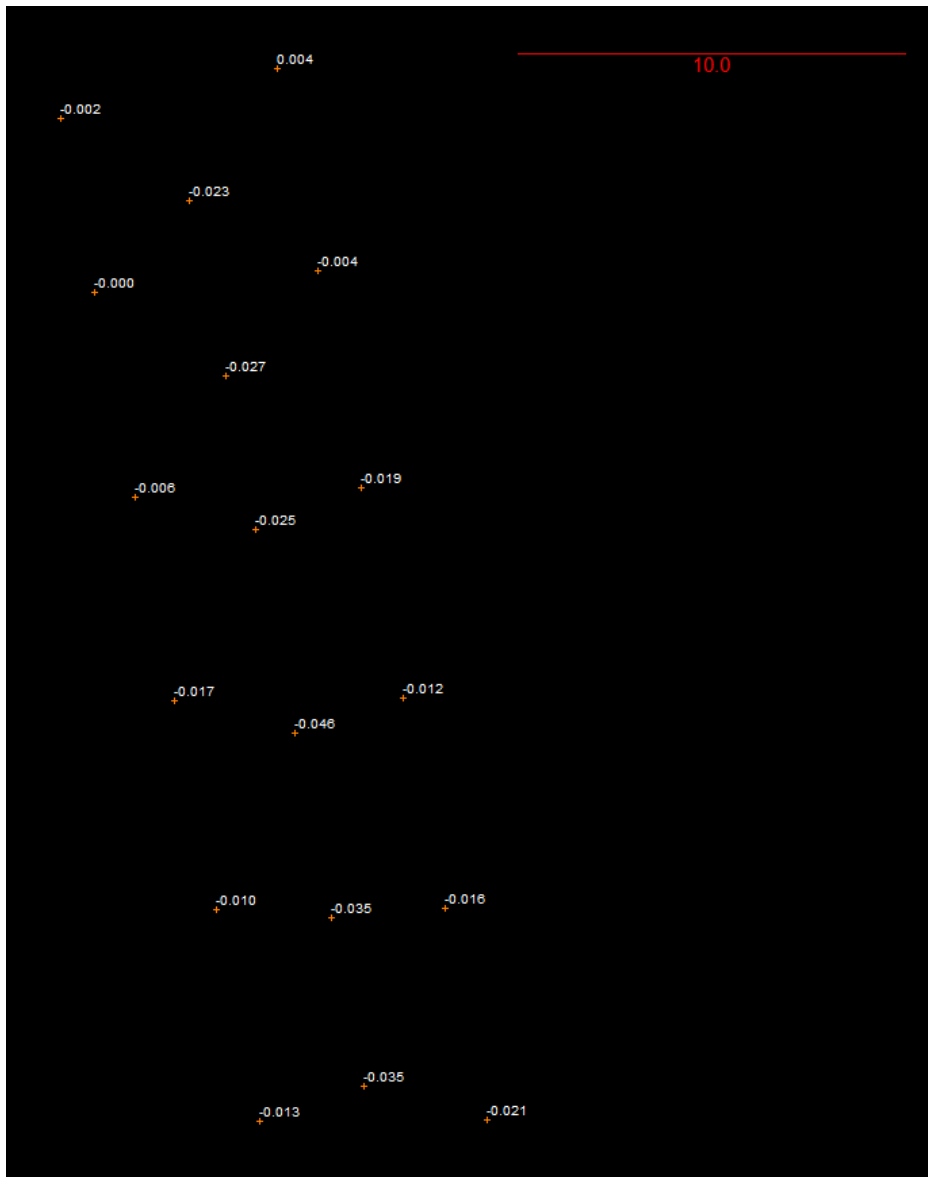


Kuvio 14. Korkeusmallissa ilmenevä epätasaisuus (Tienhaara 2017b)

4.7 Aineistojen vertailu

Aineistojen vertailut aloitettiin lataamalla koordinaatistoissa olevat fotogrammetriset pistepilviaineistot palvelimelta muistitikulle. Näistä aineistoista oli karsittu tutkimuksen kannalta epäoleelliset asiat pois. Tällaisia asioita olivat kaikki tien pinnan ulkopuolelle jääneet kohteet. Kohteet karsittiin pois, jotta tiedostokoot pienenisivät ja aineistoja pystyttäisiin käsittelemään käytössä olleilla tietokoneilla. Muistitikulle lataamisen jälkeen, aineistot siirrettiin 3D-Win ohjelmaan, jossa itse vertailut tapahtuivat.

Kalansilmäobjektiivilla ja viistokuvauksella tuotettuja pistepilviaineistoja verrattiin takymetrillä mitattuun vertailuaineistoon. Koordinaattijärjestelmänä oli ETRS-GK26 ja korkeusjärjestelmänä N2000. Vertailu tapahtui kolmioimalla fotogrammetrinen pistepilviaineisto, jonka jälkeen sitä verrattiin tien pinnasta mitattuihin referenssipisteisiin toiminnolla korkeus mallista z- mallin z. Tämän toiminnon avulla nähtiin, kuinka suuria korkeuserot olivat pistepilvien ja referenssiaineiston välillä (Kuvio 15).



Kuvio 15. Viistokuvauksella tuotetun pistepilven vertaaminen referenssiaineistoon

Viistokuvauksen 90 %:n pituus- ja sivupeiton osalta tulokset olivat odotettua parempia. Suurin ero referenssiaineistoon oli vain noin 4,5 senttimetriä. Keskimääräinen korkeusero verrattuna referenssipisteisiin oli noin 1,5 senttimetriä. Tarkkuutta paransi signaalipisteiden määrä ja niiden hyvä sijainti. Vertailun tuloksia löytyy liitteestä 1.

Kuvapeiton ollessa 80% tulokset pysyivät yhä hyvinä. Suurin ero referenssiaineistoon oli noin 12,3 senttimetriä. Tämä suuri ero johtuu mallinnuksessa ajouran kohdalle tulevasta röpelöstä. Keskimääräinen ero referenssiaineistoon oli vain noin 3 senttimetriä. Vertailtaessa 90 ja 80 %:n kuvapeiton pistepilviaineistoja keskenään kävi ilmi, etteivät tulokset eroa paljoa toisistaan. Erot olivat pienimmillään vain yhden millimetrin suuruisia ja suurimmillaan noin 4 senttimetriä. Viistokuvaustulosten vertailu 80 %:n kuvapeiton osalta näkyy liitteessä 1.

Kalansilmäobjektiivilla tuotetun 90 %:n pituuspeiton ja 80 %:n sivupeiton omaavan pistepilven vertailutuloksissa näkyi hyvin signaalipisteiden merkitys. Koordinaatistoon sitomisessa käytettyjen signaalipisteiden lukumäärät ja sijainnit vaikuttivat oleellisesti kuvausten tarkkuuteen. Mitä enemmän signaalipisteitä oli, sitä paremmat olivat tarkkuudet. Tutkimusalueen eteläpäädyssä olevan signaalipisteryppään läheisyydessä fotogrammetrisen pistepilven korkeuserot referenssiaineistoon olivat 4-5 senttimetriä. Kun pisteryppästä siirryttiin kauemmas, korkeuserot kasvoivat tasaisesti. 80:n metrin päässä signaalipisteryppästä korkeusero referenssiaineistoon oli jopa 70 cm. Nämä suuret erot näkyvät liitteessä 2.

Pystykuvausten korkeustarkkuuden vertailu suoritettiin lisätutkimuksena. Tutkimuksen pääasiallinen tarkoitus oli selvittää pystykuvauksen ja viistokuvauksen välinen korkeustarkkuus. Pystykuvauksesta saatua fotogrammetrista pistepilveä verrattiin korkeuden osalta takymetrillä mitattuihin referenssipisteisiin. Vertailussa todettiin, että tutkimusalueen pohjoispäädyssä korkeusero oli keskimäärin noin 2 senttimetriä. Tutkimusalueen keskivaiheilla korkeusero oli keskimäärin noin 3,5 senttimetriä ja eteläpäädyssä noin 4 senttimetriä.

Pisteiden korkeuksissa ei ollut myöskään suuria vaihteluita. Suurin korkeusero referenssiaineiston ja pystykuvauksesta saadun fotogrammetrisen pistepilven välillä oli 5,9 senttimetriä ja pienin ero 5 millimetriä. Pienimmät erot löytyivät

signaalipisteiden läheisyydestä. Pystykuvaustuloksien vertailu referenssiaineistoon löytyy liitteestä 3. Keskimääräiset korkeuserot pysty- ja viistokuvaamalla tuotettujen pistepilvien välillä olivat näin ollen vain 1-2 senttimetriä.

5 TUTKIMUSTULOKSET

5.1 Tulosten vertaaminen JHS-suositukseen

Aineistojen vertailuissa selvisi, että viistokuvaamalla tuotettujen pistepilvien korkeustarkkuudet olivat hyvin lähellä pystykuvauksen tarkkuuksia. Näillä menetelmillä tuotettujen pistepilvien korkeustarkkuudet olivat 1–2 cm:n välillä toisiinsa. Viistokuvausaineistojen keskimääräiset korkeuserot referenssiaineistoon verrattuna olivat n. 1,5–4 cm. Suurimmillaankin pistepilven yhden pisteen välinen korkeusero oli referenssiaineistoon verrattuna 12,3 cm. Kalansilmäobjektiivilla tuotetun pistepilven korkeuserot referenssiaineistoon sen sijaan olivat suuret. Korkeusero oli pienimmillään tutkimusalueella 4–5 cm ja suurimmillaan jopa 70 cm.

Kun näitä tuloksia verrattiin JHS-suositukseen, todettiin viistokuvauksen täyttävän ensimmäisen mittausluokan vaatimukset. Viistokuvausaineistot olivat hyvin tasalaatuisia, ja niiden keskimääräiset korkeuserot referenssiaineistoon verrattuna olivat reilusti alle 12 cm. Kalansilmäobjektiivilla tuotetun pistepilven korkeustarkkuus oli sen sijaan niin huono, ettei se täyttänyt edes mittausluokan 3 tarkkuusvaatimuksia. Jos pistepilven tarkkuus olisi ollut tasaisesti eteläpäädyn 4–5 cm:n luokkaa, olisi se täyttänyt jopa ensimmäisen mittausluokan kriteerit. Eteläpäädyistä kuljettaessa pohjoispäätä kohti tarkkuudet kuitenkin vaihtelivat paljon, ja aivan tutkimusalueen toisessa päässä tarkkuudet olivat jo kaukana kolmannen mittausluokan vaatimasta 40:stä senttimetristä.

Syitä kalansilmäobjektiivilla tuotetun pistepilven huonolle tarkkuudelle on mahdollisesti monia. Yleisesti ottaen suurin ilmakehävaihtelun vaikuttava tekijä on otettujen ilmakuvien laatu. Tutkimuksessa otettujen ilmakuvien laatu todettiin hyväksi, vaikkakin niissä esiintyi kalansilmäobjektiiville tyypillisiä pieniä piirtovirheitä. Toinen tärkeä tarkkuuteen vaikuttava tekijä on tukipisteiden tarkkuus ja niiden sijainti kuvattavalla alueella. Tukipisteet mitattiin huolellisesti hyvillä mittausvälineillä, joten niiden tarkkuudet olivat kohdillaan. Tukipisteiden sijoittamista tutkimusalueelle olisi sen sijaan voinut miettiä tarkemmin. Niiden pienestä määrästä tai huonosta sijoittelusta johtuen ei mm. saatu tuotettua pistepilveä etukäteen mielenkiintoisesta yhdestä kuvausjonosta.

5.2 Kustannustehokkuus

Viistokuvauksen ja kalansilmäobjektiivin käyttö UAV-kuvauksissa ei ole vielä tällä hetkellä riittävän kustannustehokasta. Laitteistojen epävarma toimivuus sekä lentoihin ja laskentaan menevä aika ovat kaksi isoa ongelmaa. Korkeuserovertailua tehdessä kuitenkin huomattiin, että viistokuvaus on hyvä vaihtoehto. Se on tarkka, sekä sillä saadaan mahdollisesti myös esimerkiksi talojen seinät kuvattua. Jotta hyviin tarkkuuksiin päästään, täytyy alueella olla riittävän paljon signalointipisteitä tasaisin välimatkoin. Myös käytettävän kuvapeiton olisi hyvä olla vähintään 80 %.

Miehittämättömällä ilma-aluksella viistokuvaamalla lennettävän alueen koon tulisi olla hehtaarista kymmeneen hehtaariin, jotta kuvaaminen olisi kustannustehokasta (Tienhaara 2017c). Isompia alueita lennettäessä ei käytettäisi yhtä suuria kuvapeittoja kuin mitä tässä tutkimuksessa käytettiin. Syynä tähän olisi ajan lisääntyminen ja siitä johtuva kustannustehokkuuden heikkeneminen.

6 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, kuinka hyvin kalansilmäobjektiivi ja viistokuvaus soveltuvat UAV-kuvauksiin. Tätä soveltuvuutta lähdettiin tutkimaan kustannustehokkuuden sekä korkeustarkkuuden osalta. Tavoitteena oli myös tutustua UAV-ilmakuvauksen prosessiin kokonaisuutena.

Tutkimus koostui kahdesta osasta, joista ensimmäisessä tehtiin kirjallisuuskatsaus aiheeseen. Toisessa osassa lähdettiin suorittamaan tutkimusta kvantitatiivisen menetelmän avulla. Tutkimusta varten etsittiin rauhallinen alue, jossa pystyttiin tekemään huolellista tutkimustyötä. Tällä tutkimusalueella suoritettiin ilmakuvaukset sekä mitattiin referenssiaineisto. Ilmakuvausaineistot käsiteltiin fotogrammetrisiksi pistepilviksi Agisoft PhotoScanin avulla. Näitä pistepilviä vertailtiin mitattuun referenssiaineistoon 3D-Win-ohjelmalla. Vertailussa tarkasteltiin pistepilvien korkeustarkkuuksia. Lisäksi tutkimuksessa arvioitiin kustannustehokkuutta ilmakuvausprosesseihin käytetyn ajan perusteella.

Tutkimuksen luotettavuuden kannalta tärkein asia oli, että mitattu referenssiaineisto olisi mahdollisimman laadukasta. Mitä laadukkaampaa aineisto olisi, sitä parempia johtopäätöksiä voisi ilmakuvauksista tuotettujen pistepilviaineistojen korkeustarkkuuksista tehdä. Jos aineisto olisi huonosti mitattu, eivät tutkimustulokset välttämättä vastaisi ollenkaan todellisuutta. Tämän takia käytimme reilusti aikaa referenssiaineiston mittaamiseen. Rauhallisella tutkimusalueella oli hyvä satelliittigeometria mittausten aikana. Satelliittipaikantimella mitattiin samaan tasoon vain 3 lähtöpistettä, jonka jälkeen mittasimme lopun aineiston takymetrillä. Tuloksena saatiin laadukas vertailuaineisto, joka paljasti tutkittavien menetelmien todelliset korkeustarkkuudet.

Tutkimusprosessin aikana koetut haasteet vaikeuttivat tutkimuksen tekemistä. Tutkimusalueen valinnassa kestänyt aika pakotti tekemään mittaukset vasta myöhään syksyllä. Loppusyksyllä vallinneet sääolosuhteet olivat haastavat ilmakuvauksia varten, ja niiden takia lentoja jouduttiin useaan kertaan lykkäämään. Kun sääolosuhteet vihdoinkin sallivat lentämisen, ilmeni kehitysvaiheessa olevaan lentokalustoon pieniä ongelmia, ja lentoja jouduttiin edelleen siirtämään. Onneksi lennot saatiin kuitenkin suoritettua ennen pysyvän lumipeitteen

saapumista alueelle. Näiden lukuisten tutkimuksessa koettujen pienien ongelmien takia tutkimuksesta tuli hieman alkuperäistä suunnitelmaa suppeampi. Esimerkiksi kustannustehokkuuden näkökulmasta merkittävä yhden kuvausjonon lento kalansilmäobjektiivilla jäi tutkimatta. Itse lento onnistui, mutta aineiston käsittelyssä ei saatu fotogrammetrista pistepilveä tuotettua, koska tukipisteet oli sijoitettu väärin tämän lennon näkökulmasta.

Tutkimustuloksista selvisi, että viistokuvauksella on mahdollista päästä JHS 185:n ensimmäisen luokan mukaisiin korkeustarkkuusvaatimuksiin suuria kuvapeittoja käyttämällä. Tämä edellyttää kuitenkin useiden tukipisteiden huolellista sijoittamista ja rakentamista mitattavalle alueelle. Näiden johdosta ilmakuvauksiin käytettävä aika kasvaa huomattavasti ja samalla kustannustehokkuus kärsii. Viistokuvaus on kuitenkin hyvä vaihtoehto tavallisen pystykuvauksen rinnalle. Tässä tutkimuksessa viistokuvausta tutkittiin vain suoralla tieosuudella, joten jatkotutkimuksissa voisi selvittää kuinka hyvin viistokuvaus soveltuu rakennetun ympäristön kuvaamiseen. Lisäksi jatkotutkimuksissa voisi etsiä viistokuvaukseen optimaalisia lentokorkeuksia, käytettäviä kuvapeittoja ja rakennettavien tukipisteiden lukumäärää. Tavoitteena olisi etsiä mahdollisimman kustannustehokas tapa suorittaa viistokuvaus niin, että pysyttäisiin JHS 185:n ensimmäisen luokan mukaisissa korkeustarkkuusvaatimuksissa.

Kalansilmäobjektiivilla suoritettava ilmakuvaukseen osoittautui haastavaksi toteuttaa. Korkeustarkkuudet vaihtelivat todella paljon pienilläkin matkoilla, ja aineiston käsittelyyn tuhrautui todella paljon aikaa. Tätä menetelmää ei näin ollen vielä suositella käytettäväksi. Potentiaalia kalansilmäobjektiivilla kuitenkin on. Jos mainitut ongelmat saadaan ratkaistua, voidaan jatkotutkimuksia kalansilmäobjektiivin soveltuvuudesta UAV-kuvauksiin jatkaa.

LÄHTEET

Fiorillo, F., Limongiello, M. & Fernandez-Palacios, B.J. 2016. Testing GoPro 3D model reconstruction in narrow spaces. Viitattu 5.1.2018 <https://goo.gl/fLmts2>.

Geodesian ja fotogrammetrian seura ry 2005. Ohjeita ortokuvien tuotannolle ja käytölle Suomessa. Viitattu 13.11.2017 <https://www.fksry.fi/18>.

GIM international 2014. Oblique airborne photogrammetry. Viitattu 17.11.2017 <https://www.gim-international.com/content/article/oblique-airborne-photogrammetry>.

Haggren, H. 2002. Luento 8: Ilmakuvaus. Viitattu 17.11.2017 https://foto.aalto.fi/opetus/300/luennot/8/8_print.htm.

Haggren, H. 2011. 200 vuotta fotogrammetrian ja kaukokartoituksen historiaa. Viitattu 10.11.2017 https://foto.aalto.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/pjf_e.html.

Hughes, C., Denny, P., Jones, E. & Glavin, M. 2010. Accuracy of fish-eye lens models. Viitattu 4.1.2018 <https://goo.gl/Xqc2PN>.

Ilmatieteenlaitos 2017. Avaruussään vaikutus satelliittipaikannukseen. Viitattu 15.12.2017 <http://ilmatieteenlaitos.fi/satelliittipaikannus>.

Inland GPS 2007. Trimble S6 total station datasheet. Viitattu 18.12.2017 <http://www.inlandgps.com/Products/S6%20Datasheet%2000707.pdf>.

Joensuu, V. 2017. Real Time Kinematic positioning aiding with 3D surface model and fisheye camera. Viitattu 4.12.2017 <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/24731>.

JUHTA 2014a. JHS 185 Asemakaavan pohjakartan laatiminen. Viitattu 20.11.2017 <http://docs.jhs-suositukset.fi/jhs-suositukset/JHS185/JHS185.pdf>.

JUHTA 2014b. JHS 185 Asemakaavan pohjakartan laatiminen. Liite 4 Kohteiden kartoituksen laatuvaatimukset. Viitattu 21.11.2017 http://docs.jhs-suositukset.fi/jhs-suositukset/JHS185_liite4/JHS185_liite4.pdf.

Laurila, P. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemen AMK julkaisusarja D nro 3.

Laurila, P. 2017. Remote Sensingin luennot Lapin ammattikorkeakoulussa keväällä 2017.

Lehtonen, P. 2015. Ilmakuvia viistoon ja pystyyn. Viitattu 17.11.2017 http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk115/mk115_1800_lehtonen.pdf.

Lentokuva Vallas Oy 2017. Viistokuvaus. Viitattu 17.11.2017 <http://www.lentokuva.fi/ilmakuvauspalvelut/viistokuvaus>.

Maanmittauslaitos. N2000 Valtakunnallinen korkeusjärjestelmä. Viitattu 8.1.2018 goo.gl/VC4iJu.

Poutanen, M. 1998. GPS-paikanmääritys. Helsinki: Tähtitieteellinen yhdistys Ursa.

Ranta, I. 2015. Deformoituvan metallikappaleen fotogrammetrinen muodonmuutosmittaus. Viitattu 7.11.2017 <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/15984>.

Rantanen, J. 2014. Ilmakolmioinnin laadunvalvonta fotogrammetristen pintamallien ja laserkeilausaineiston avulla. Viitattu 6.11.2017 <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/13519>.

Schneider, D., Schwalbe, E. & Maas, H-G. 2009. Validation of geometric models for fisheye lenses. Viitattu 3.1.2018 <https://goo.gl/ky9LYZ>.

Sippo, M. 2013. Lennokkikartoitus – uusia näkymiä ilmasta. Viitattu 15.11.2017 http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk213/mk213_1647_sippo.pdf.

Strecha, C., Zoller, R., Rutishauser, S., Brot, B., Schneider-Zapp, K., Chovancova, V., Krull, M. & Glassey, L. 2015. Quality assessment of 3D reconstruction using fisheye and perspective sensors. Viitattu 5.1.2018 goo.gl/bsjCRe.

Teittinen, H. 2017. Georeferoidun pistepilven tuottaminen miehittämättömällä lentoaluksella kerätystä kuva-aineistosta. Viitattu 23.10.2017 <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/25161>.

Tienhaara, J. 2017a. Apupisteet. Sähköposti kimmo.macklin2@edu.lapinamk.fi 22.10.2017. Tulostettu 27.10.2017.

Tienhaara, J. 2017b. Viistokuvauksen harvennettu laskenta. Sähköposti kimmo.macklin2@edu.lapinamk.fi 13.12.2017. Tulostettu 18.12.2017.

Tienhaara, J. 2017c. Puhelinhaastattelu. 19.12.2017.

Tkj Electronics 2012. QuadCopters – How to get started. Viitattu 30.10.2017 <http://blog.tkjelectronics.dk/2012/03/quadcopters-how-to-get-started/>.

Trafi. Usein kysyttyä. Viitattu 25.10.2017 goo.gl/og5iUe.

Trafi 2016. Määräys OPS M1-32: Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lentäminen. Viitattu 25.10.2017 goo.gl/Y5ZqKa.

Trimble 2017. Integrated GNSS System R10. Viitattu 18.12.2017 <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/r10>.

Vectorheli 2013. Vector7 X8 complete airframe. Viitattu 9.1.2018 goo.gl/1NAmRT.

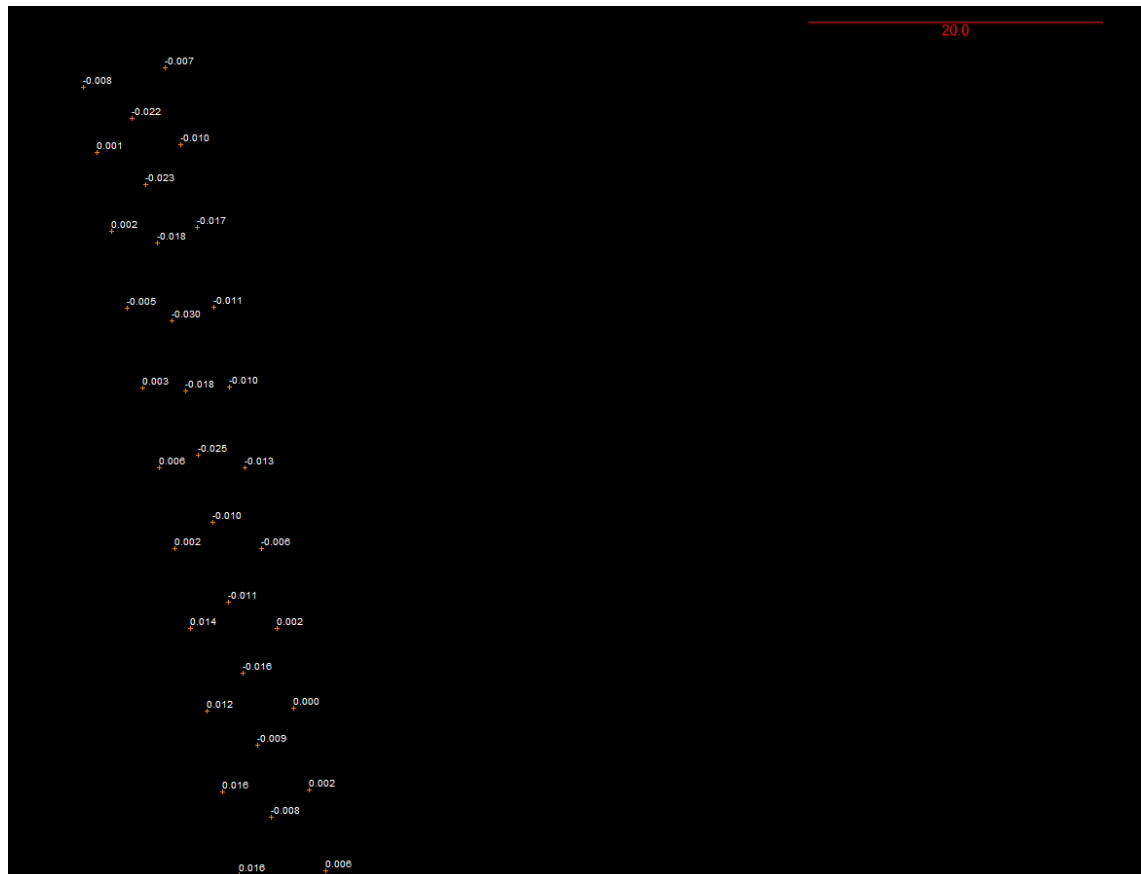
Viljanen, N. 2017. Ympäristön 3D fotogrammetriset hyperspektri- ja RGB-mittaukset keveillä kauko-ohjattavilla ilma-alusjärjestelmillä. Viitattu 30.10.2017 <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/24744>.

LIITTEET

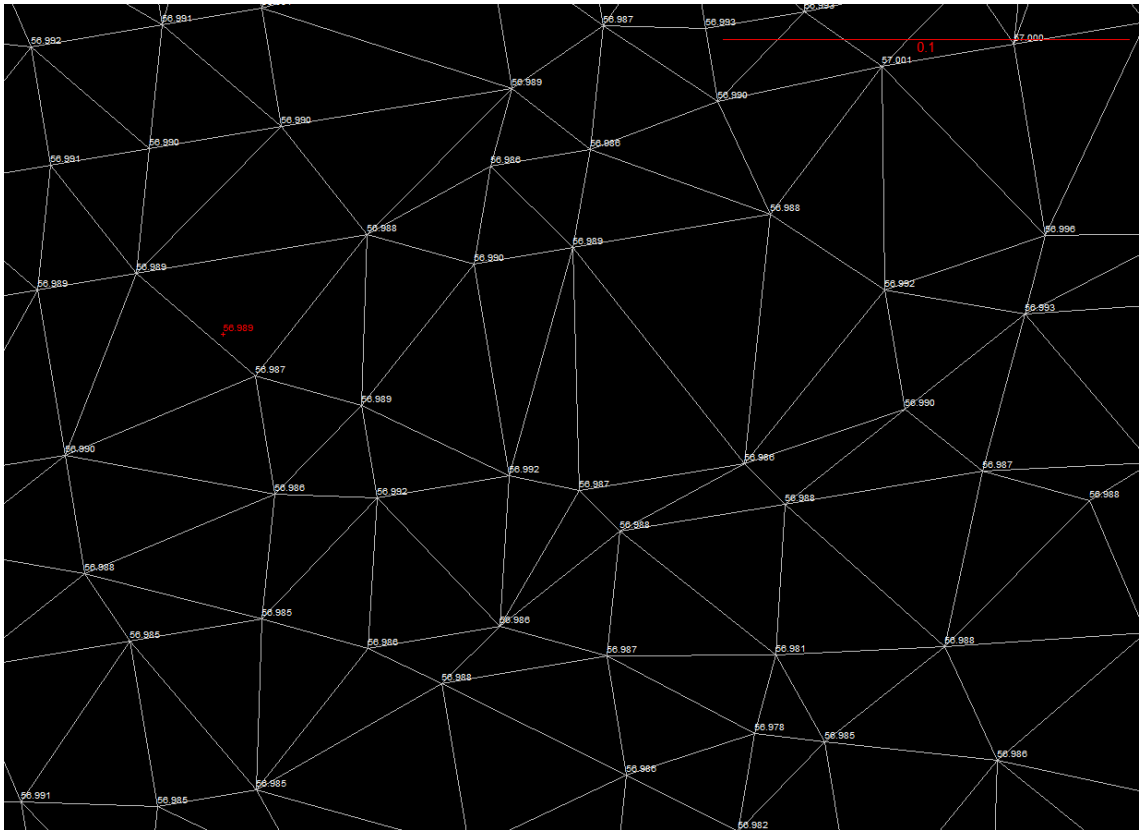
Liite 1. Viistokuvausaineistojen korkeustarkkuudet

Liite 2. Kalansilmäobjektiivaineistojen korkeustarkkuudet

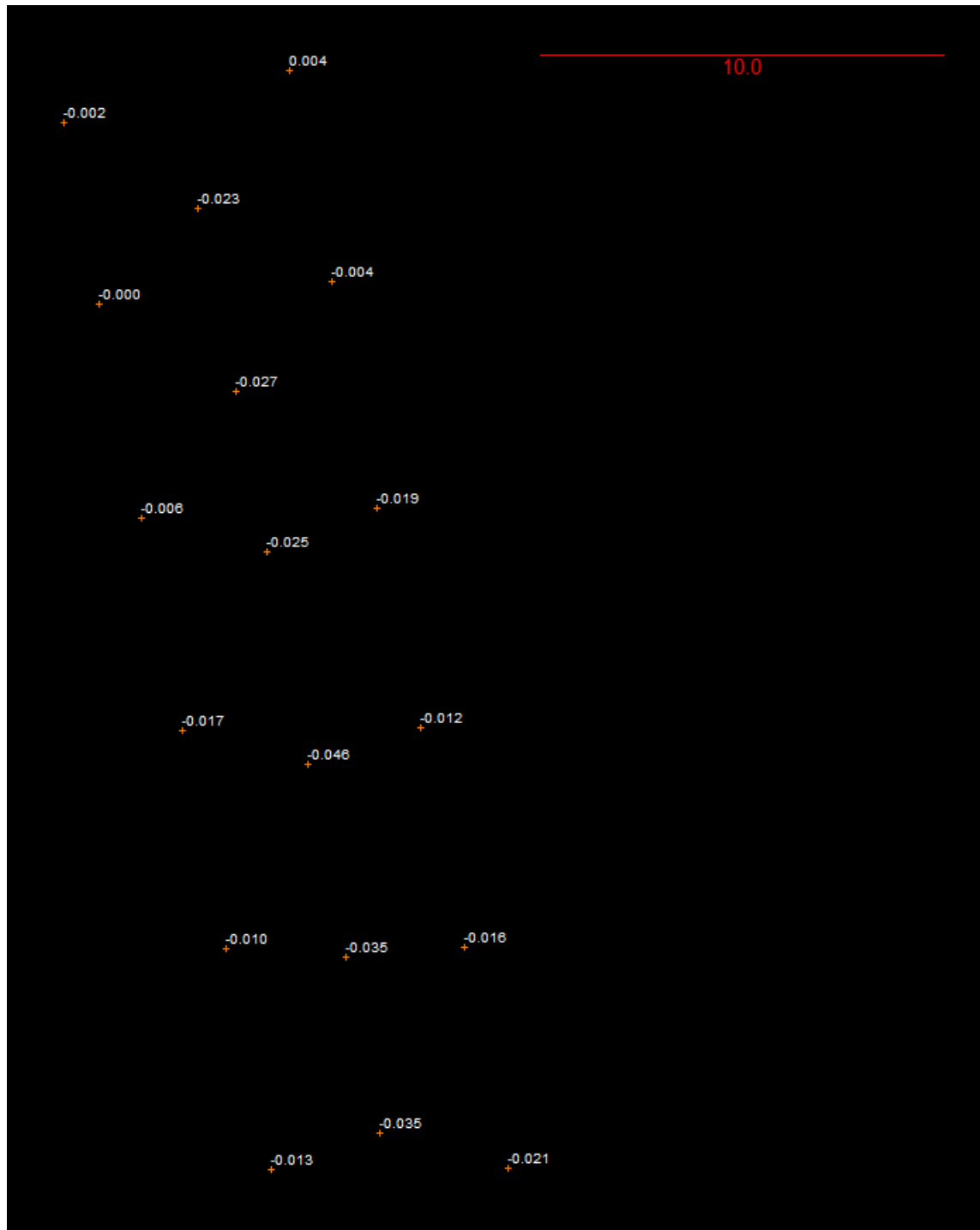
Liite 3. Pystykuvausaineistojen korkeustarkkuudet



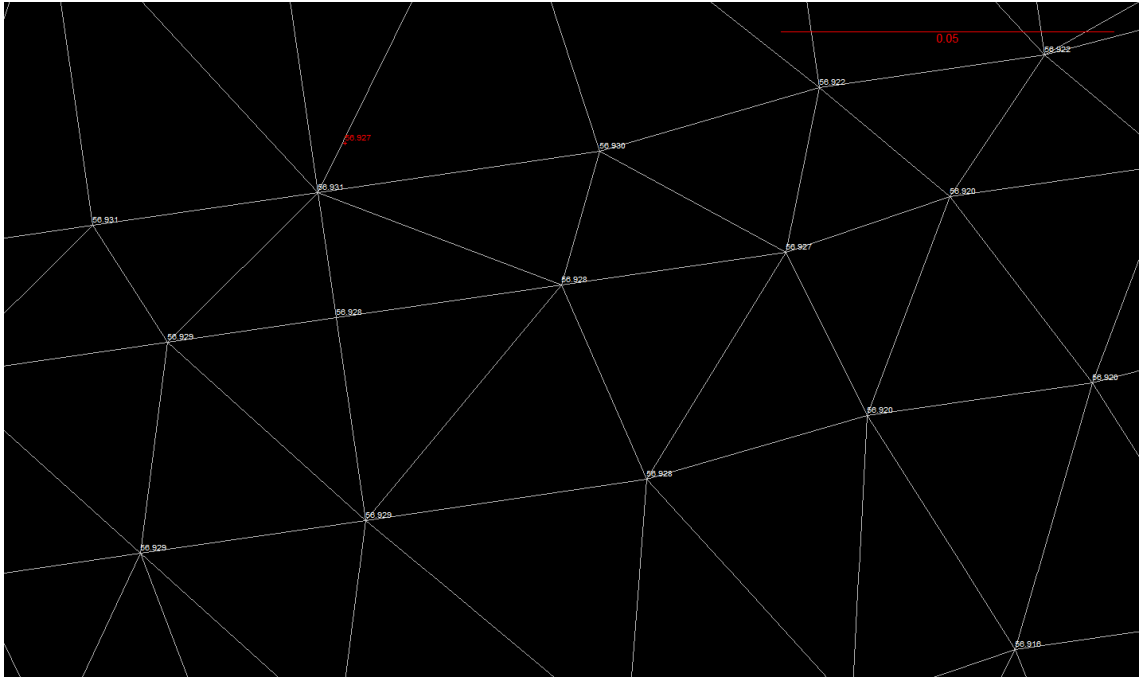
Liite 1 1(4). Viistokuvaus- ja (90% sivupeitto ja 80% pituuspeitto) referenssiaineiston pisteiden väliset korkeuserot. Kuva on tutkimusalueen pohjoispäästä.



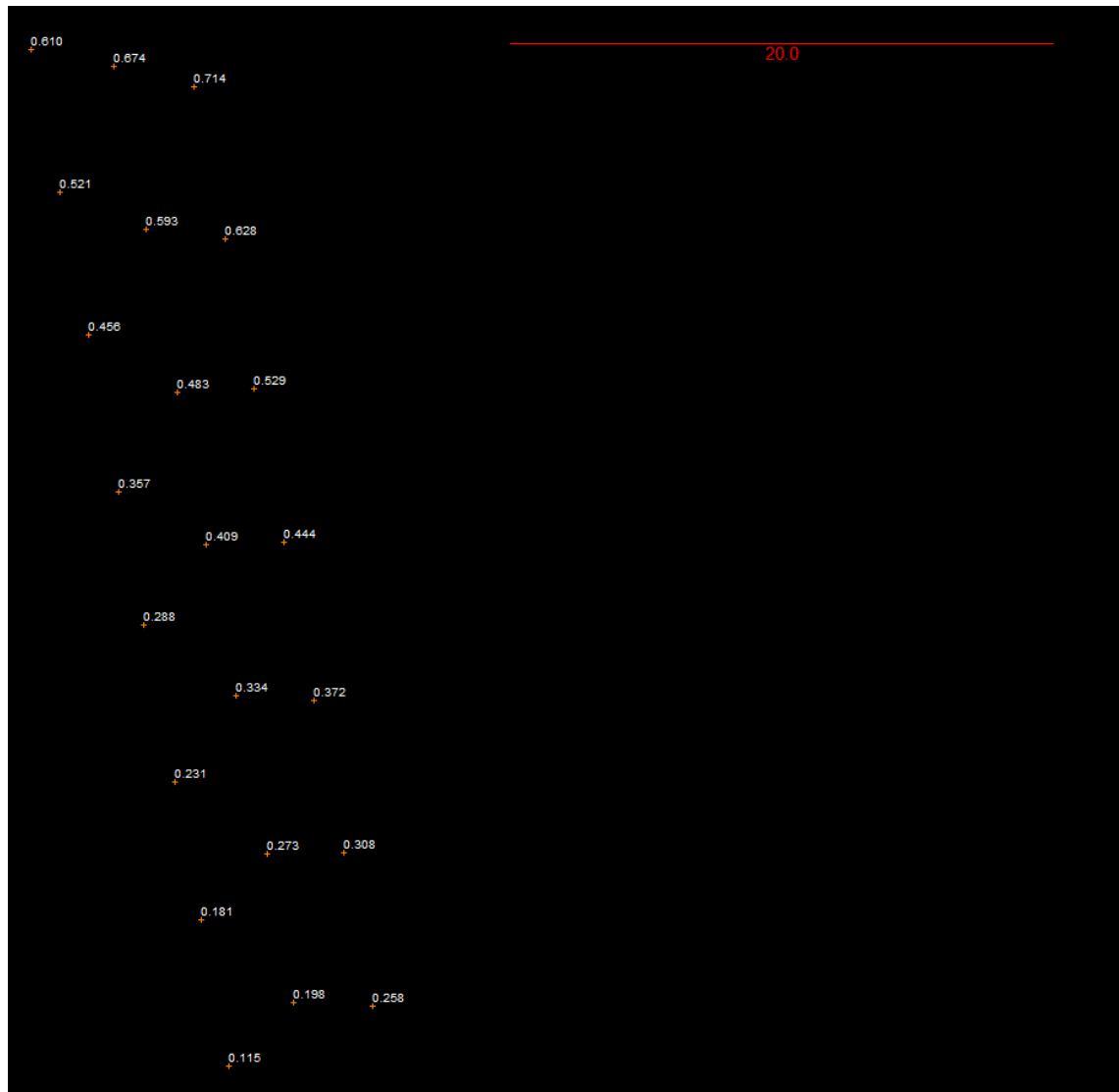
Liite 1 2(4). Viistokuvaus- ja (90% sivupeitto ja 80% pituuspeitto) referenssiaineiston pisteiden väliset korkeuserot. Kuvassa oleva punainen piste on takymetrillä mitattu referenssipiste ja kuvan valkoiset pisteet ovat viistokuvaamalla tuotettuja pisteitä.



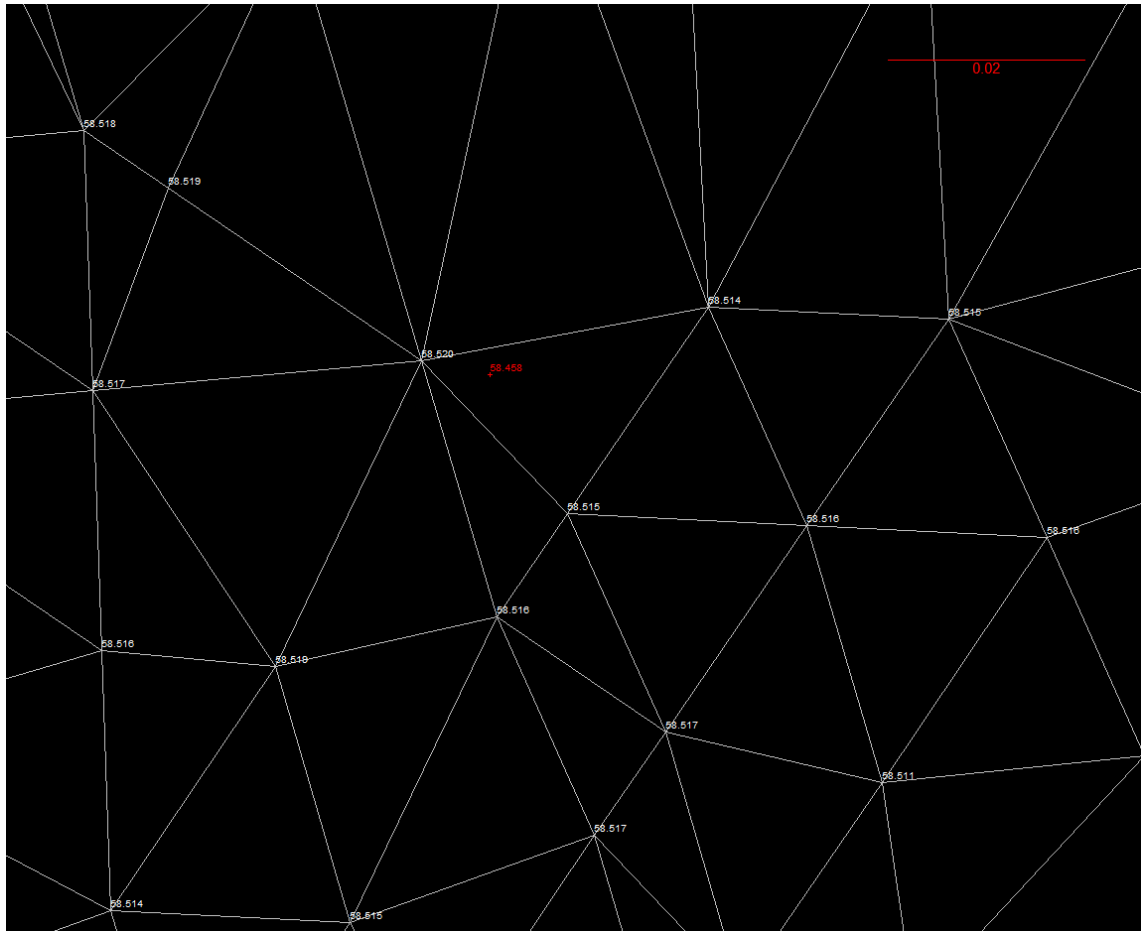
Liite 1 3(4). Viistokuvaus- ja (80% kuvapeitto) referenssiaineiston pisteiden väliset korkeuserot. Kuva on tutkimusalueen pohjoispäädystä.



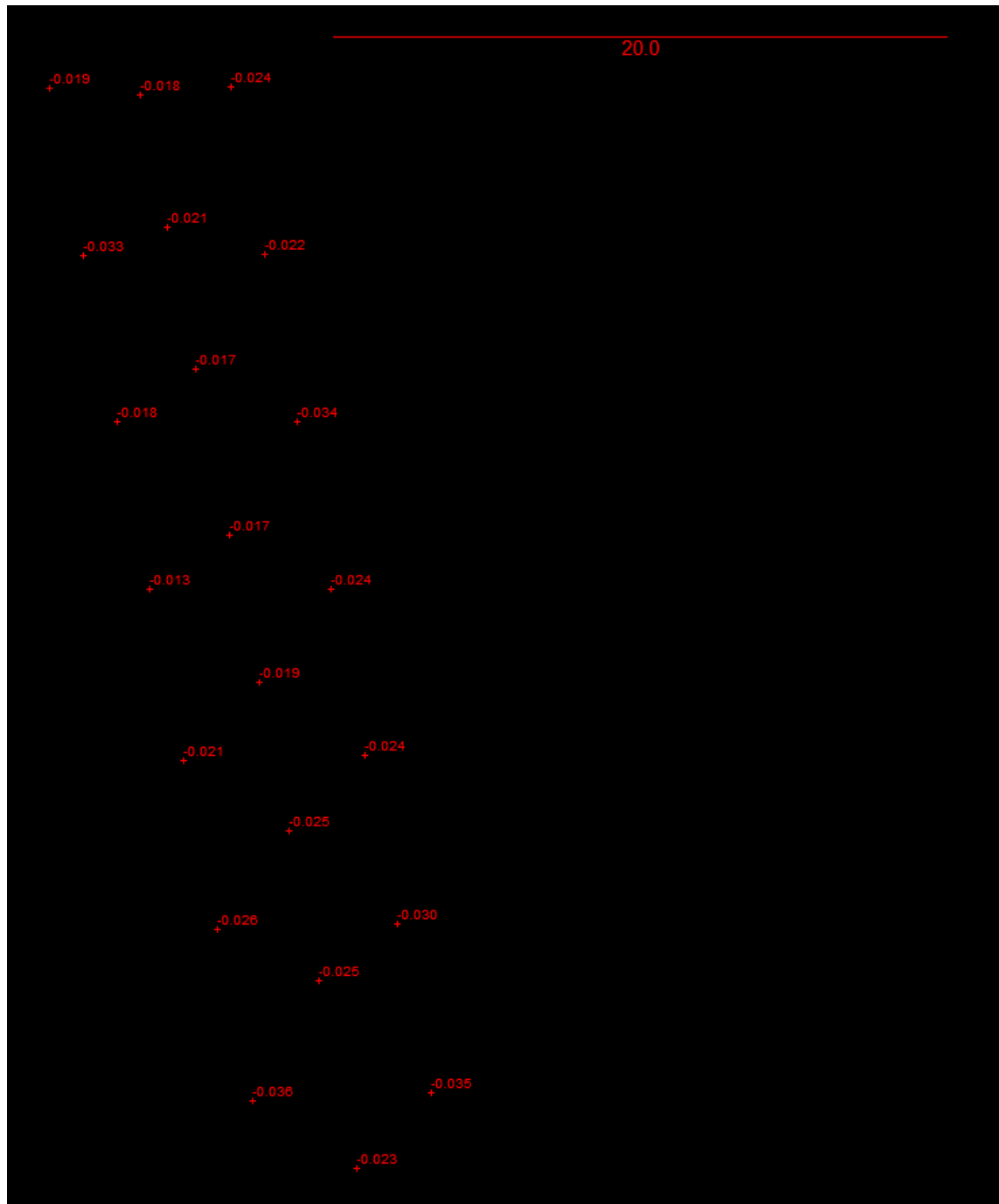
Liite 1 4(4). Viistokuvaus- ja (80% kuvapeitto) referenssiaineiston pisteiden väli-
set korkeuserot. Kuvassa oleva punainen piste on takymetrillä mitattu referens-
sipiste ja kuvan valkoiset pisteet ovat viistokuvaamalla tuotettuja pisteitä.



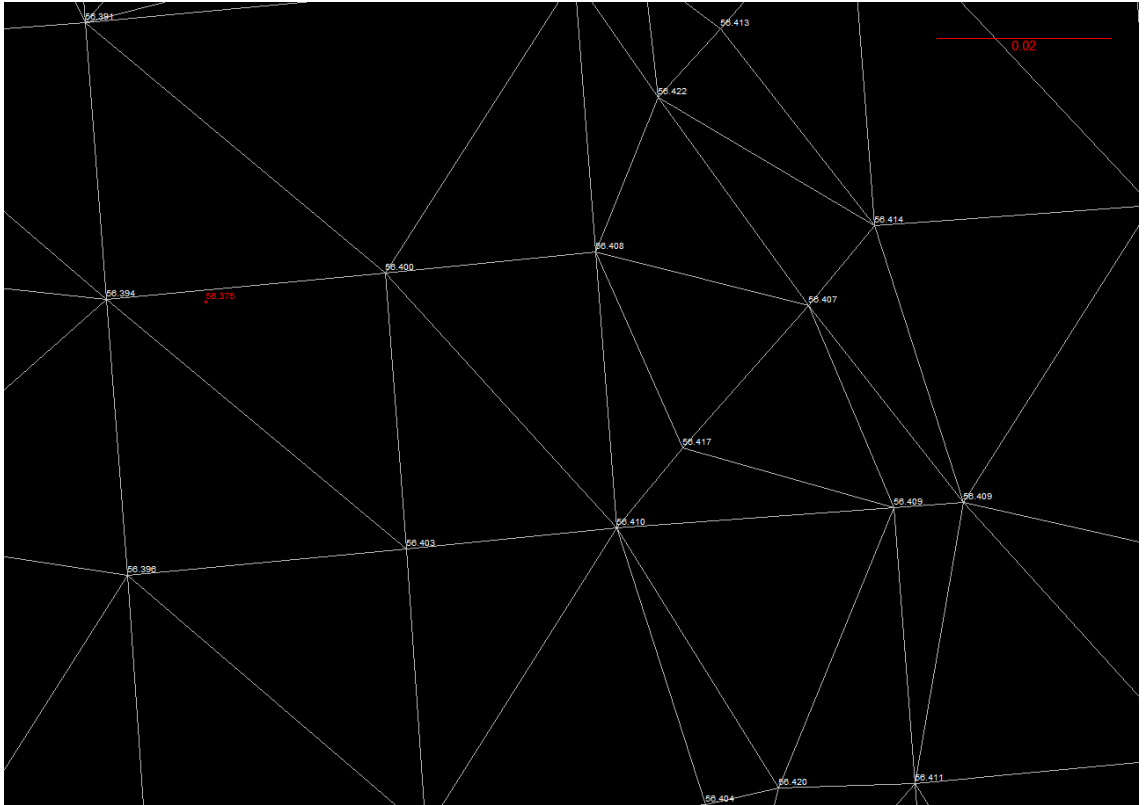
Liite 2 1(2). Kalansilmäobjektiiv- ja (90% pituuspeitto ja 80% sivupeitto) referenssiaineiston pisteiden väliset korkeuserot. Kuva on otettu tutkimusalueen pohjoispäädystä.



Liite 2 2(2). Kalansilmäobjektiiv- ja (90% kuvapeitto) referenssiaineiston pisteiden väliset korkeuserot. Kuvassa oleva punainen piste on takymetrillä mitattu referenssipiste ja kuvan valkoiset pisteet ovat kalansilmäobjektiivilla tuotettuja pisteitä.



Liite 3 1(2). Pystykuvaus- ja (90% sivupeitto ja 70% pituuspeitto) referenssiaineiston pisteiden väliset korkeuserot. Kuva on otettu tutkimusalueen pohjoispäädystä.



Liite 3 2(2). Pystykuvaus- ja (90% sivupeitto ja 70% pituuspeitto) referenssiai-
neiston pisteiden väliset korkeuserot. Kuvassa oleva punainen piste on taky-
metrillä mitattu referenssipiste ja kuvan valkoiset pisteet ovat pystykuvaamalla
tuotettuja pisteitä.