

Jeremia Hokkanen

# UAV-kopterin pistepilven tarkkuus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinööriytyö

21.5.2015

Tekijä Otsikko	Jeremia Hokkanen UAV-kopterin pistepilven tarkkuus
Sivumäärä Aika	27 sivua + 2 liitettä 21.5.2015
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaajat	lehtori Jussi Laari toimitusjohtaja Stefan Hagman
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli selvittää miehittämättömällä ilma-aluksella kuvatun ja kuvausdatasta edelleen fotogrammetrisesti lasketun pistepilven tarkkuutta. Työ tehtiin Oy Esari Ab:lle.</p> <p>UAV-datasta laskettua pistepilvettä verrattiin maalaserkeilaimella toteutettuun malliin tutkimalla mitattujen pintamallien ja pistepilvien eroja. Kuvausdata saatiin AscTec Falcon 8-kopterilla, laserkeilausdata Rieglin VZ-400-laserkeilaimella. UAV-data prosessoitiin Agisoft LLC:n Photoscan Pro ohjelmalla ja pistepilvien vertailu suoritettiin Trimblen RealWorks-ohjelmistolla.</p> <p>Työssä havaittiin, että UAV-kopterilla saadaan aikaiseksi todella hyvä ja vertailukelpoinen maastomalli ja pistepilvi vastaaviin laserkeilaimella tuotettuihin aineistoihin nähden. Jatkuvasti kehittyvä tekniikka mahdollistaa yhä monipuolisemmat käyttömahdollisuudet miehittämättömien ilma-alusten käytössä maanmittauksen sovelluksissa.</p>	
Avainsanat	UAV, fotogrammetria, pistepilvi

Author Title	Jeremia Hokkanen Accuracy of a UAV generated point cloud
Number of Pages Date	27 pages + 2 appendices 9 April 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructors	Jussi Laari, Senior Lecturer Stefan Hagman, Chief Executive Officer
<p>The goal of this Bachelor's thesis was to establish the accuracy of a point cloud made from fotogrammetrical calculations based on the data received from an AscTec Falcon 8 unmanned octocopter. The UAV-created point cloud data was compared to a corresponding point cloud made with a laser scanner.</p> <p>The area of interest was an old landfill in Pietarsaari. An aerial photograph was taken with two different flights. The first flight was done at the altitude of 100 meters and the second at the altitude of 130 meters. Signal markers were laid out in the area and measured with GPS to georeference the data set in the right coordinate system.</p> <p>The comparison of the data showed that the point cloud and surface model generated from the photographs was compatible with the similar data retrieved with the laser scanner. The future of the UAV technology seems bright when it comes to the field of surveying.</p>	
Keywords	UAV, fotogrammetry, point cloud

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Oy Esari Ab	<b>Virhe. Kirjanmerkkiä ei ole määritetty.</b>
2.1	Kalusto	2
2.1.1	AscTec Falcon 8	2
3	UAV esittely	3
3.1	Toimintaperiaate	4
3.2	Historia	6
3.3	Kuvan tarkkuus	7
3.4	Lainsäädäntö	8
4	Mittaustyöt	9
4.1	Esivalmistelut	9
4.1.1	Signalointi	10
4.1.2	Lentosuunnitelma	11
4.2	UAV kuvaus	12
4.2.1	Kuvattava kohde	13
4.2.2	Olosuhteiden vaikutus	13
4.2.3	Lennonaikaiset havainnot	14
4.3	Laserkeilaus	15
5	Jälkilaskenta	16
5.1	Kuvien prosessointi	16
5.2	Lopputuotteet	17
6	Tulosten vertailu	20
6.1	Mittausmenetelmien erot	20
6.1.1	Laskentatulosten erot	21
6.2	Yhteenveto	24
	Lähteet	26
	Liitteet	
	Liite 1. Agisoft Photoscan-raportti	

Liite 2. Agisoft Photoscan-raportti 2

## Lyhenteet

DEM	Digital Elevation Model. Korkeusmalli.
GPS	Global positioning system. Yhdysvaltojen armeijan kehittämä satelliittipainausjärjestelmä.
GSD	Ground source distance. Maastopikselin koko.
UAS	Unmanned aerial system. Miehitämätön ilma-alus järjestelmä.
UAV	Unmanned aerial vehicle. Miehitämätön ilma-alus.

## 1 Johdanto

Nykyään erilaisia miehittämättömiä ilma-aluksia on runsaasti tarjolla markkinoilla. Vaihtoehtoja on aina kevyistä siivistä erilaisiin moniroottoriin koptereihin. Teknologian kehittyminen on mahdollistanut näiden järjestelmien hyödyntämisen myös erilaisissa maanmittausalan sovelluksissa aina kartoituksesta erilaisten kolmiulotteisten mallien muodostamiseen. Erilaiset UAV (unmanned aerial vehicle) -sovellukset ja -laitteet tulevat lähivuosina kehittymään entisestään luoden lisää käyttömahdollisuuksia.

Tässä työssä keskitytään saksalaisvalmisteisen AscTec Falcon 8-oktokopterin tuottamaan aineistoon ja sen hyödyntämiseen. Työn avulla selvitetään järjestelmän avulla tuotetun pistepilven tarkkuutta sekä sen soveltumista maasto- ja pintamallien luontiin. Vertailukohtana käytettiin maalaserkeilaimella tuotettua aineistoa.

## 2 Oy Esari Ab

### 2.1 Yritys

Oy Esari Ab on vuonna 1993 perustettu yritys Kaustisista. Vuoden 2014 alussa Esari yhdistyi pietarsaarelaisen maanmittausyrityksen Ab Ostromap Oy:n kanssa. Yrityksen toimialana on rakentamiseen sekä rakennus- ja yhdyskuntasuunnitteluun liittyvä mittaus- ja kartoitustoiminta, tele- ja sähköverkkojen suunnittelu ja rakentaminen sekä siihen liittyvä asennus- ja huoltotoiminta sekä räätälöityjen laitesuojien valmistus, kunnossapito ja huolto. Yrityksellä on toimipisteitä Kaustisissa, Pietarsaaressa, Vaasassa, Kokkolassa ja Vantaalla, sekä myyntitoimintaa Ruotsissa. Esarilla työskentelee noin 60 henkilöä, joista 23 mittausosastossa, ja liikevaihto vuonna 2014 oli noin 6,5 miljoonaa euroa.

Mittausosasto suorittaa UAV-kuvausta, laserkeilausta, rakennus- ja inframittauksia, kartoituksia, kaapelinäyttöjä sekä tekee koneohjausmalleja. Suurimpia inframittausasiakkaita ovat olleet muun muassa Vantaan kaupunki ja Oy Sundström Ab. Suurimpia kartoitusasiakkaita ovat Pietarsaaren Puhelin sekä Jakobstads Energiverk. [3]

## 2.2 Kalusto

Esarin mittauskalustona on 11kpl Trimblen S6-takymetreja, yksi Leica TS-15-takymetri, 4 kpl Trimblen R10 GPS-vastaanottimia sekä 5 kpl R8 GPS-vastaanottimia. Lisäksi yrityksellä on Riegl VZ-400-maalaserkeilain. [3]

### 2.2.1 AscTec Falcon 8

Esarilla on käytössään saksalaisen Ascending Technologies GmbH:n valmistama Falcon 8-multikopteri (kuva 1). AscTec on valmistanut UAV-koptereita vuodesta 2007 ja heidän laitteitaan on käytössä eri puolilla maailmaa reilu tuhat kappaletta. Kopteri on varustettu Sony Alpha-7R-kameralla, jossa on 36,4 megapikselin kenno. Kamera kiinnittyy kopteriin gimbalin avulla, joka takaa 360 asteen kuvaus-sektorin. Painoa akun ja kamerasen kanssa kopterille tulee 2,2 kilogrammaa. Akku on 6 250 mA:n litiumpolymeeriakku ja runko hiilikuitua. [11]



Kuva 1. AscTec Falcon 8-oktokopteri.

Lentonopeus on 16 m/s (57,6 km/h) ja kopteri kestää tuulta 15 m/s, tosin yli 12 m/s tuulella voidaan lentää vain manuaalisella ohjauksella. Kopterin V-rakenne ja kahdeksan roottoria antavat sille enemmän vakautta tuulessa verrattuna perinteisiin siipi-lennokkeihin. Lentoaika yhdellä akulla on noin vartti, tosin lämpötilan laskiessa alle 5 celsiusasteen alkaa akun kesto heikentyä nopeasti. Yhdellä lennolla voidaan kattaa jopa 25 hehtaarin alue. [11]



### 3 UAV-esittely

Nykyisin käytössä on paljon erilaisia lennokkeja sekä koptereita. Lennokkeja on pääasiassa kahta eri mallia: perinteinen lennokki sekä fixed wing-siipi. Perinteinen lennokki on kuin lentokone pienoiskoossa, lentävä siipi taas käytännössä vain yksiosainen siipi. Perinteisen lennokin haittana on sen roottorin sijainti keulassa, mikä rajoittaa kuvaussektoria. Lentävissä siivissä on vain vähän liikkuvia osia, ja roottori sijaitsee yleensä takana mahdollistaen paremman kuvaussektorin. Lentävät siivet laskeutuvat yleensä maahan mahalleen, ja laskeutuessa ne ovatkin alttiita vahingoittumiselle. Sekä lennokki että siipi tarvitsevat ainakin lyhyen tyhjän tilan noustakseen ilmaan ja laskeutuakseen. [9]

UAV-koptereissa roottoreiden määrä vaihtelee yhdestä multikoptereihin, joissa voi olla kaksi (bikopteri), kolme (trikopteri), neljä (quadkopteri), kuusi (heksakopteri) tai kahdeksan (oktokopteri) roottoria. Kopterin etuna voidaan pitää sen pystysuoraa nousua ja laskeutumista, se ei tarvitse samalla lailla tilaa kuin lennokit. Koptereilla pystytään toimimaan myös kovemmissa tuuliolosuhteissa kuin lennokeilla, mutta vastaavasti akunkesto on lyhyempi ja lentonopeus hitaampi. Tästä johtuen kopterilla vaaditaan useampia lentoja saman lopputuloksen saavuttamiseksi. [9] Suomen Ilmailulaissa miehittämättömän ilma-aluksen rajaksi määrätään enintään 150 kg:n toimintamassa.

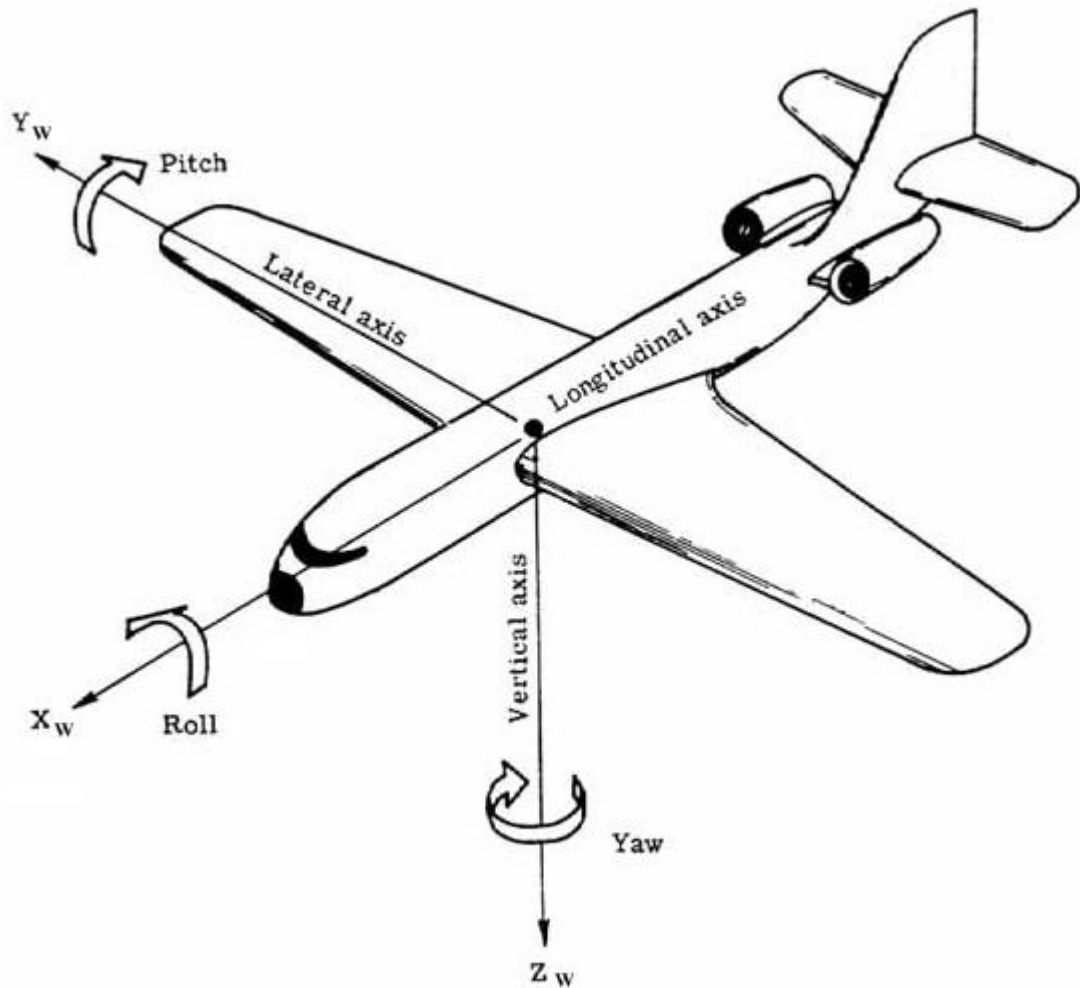


Kuva 2. Asctec Mobile Ground Station-ohjainyksikkö erillisellä kameran ohjaimella varustettuna.

UAS, eli unmanned aerial system, tarkoittaa koko järjestelmää, jonka osana lennokki on. Järjestelmään kuuluu itse lennokin lisäksi ohjainyksikkö (ground station, kuva 2) sekä ohjausjärjestelmä (autopilot). Lennokille voidaan tehdä lentosuunnitelma, jota se seuraa oman GPS-vastaanottimensa avulla. Lennättäjällä täytyy kuitenkin olla myös mahdollisuus ja tarvittava taito ottaa ohjaus haltuunsa kesken lennon esimerkiksi vaaratilanteissa ja muuta lentoliikennettä väistettäessä. Falcon 8 saa reittitiedot Mobile ground stationiin USB-kaapelilla yhdistetystä tablettitietokoneesta. [9]

### 3.1 Toimintaperiaate

UAV-lennokkien toimintaperiaate on hyvin samankaltainen kuin normaalissa lentokoneesta tai helikopterista tapahtuvassa ilmakuvauksessa. Kuvattavan alueen yli lennetään useita lentojonoja siten, että kuvat peittävät toisiaan. Näitä peittoja kutsutaan sivu- ja pituuspeitoiksi. Perinteisessä lentokoneella tehtävässä ilmakuvauksessa käytetään yleensä 60 %:n pituuspeittoa ja 30 %:n sivupeittoa. UAV-kopterilla käytetään suurempia peittolukemia, jotta kuvien yhdistämisessä saatava ortokuva ja pistepilvi olisivat tarkempia. Agisoft Photoscan vaatii vähintään 80 %:n pituuspeiton ja 60 %:n sivupeiton, jotta se voi laskea pistepilven ja maastomallin oikein.



Kuva 3. Ilma-aluksen kiertymiskulmat yaw, pitch & roll [13].

Alukseen ladataan valmis reittisuunnitelma, jota se seuraa sisäänrakennetun GPS-vastaanottimen avulla. Lentosuunnitelma mahdollistaa sen, että kaikki kuvat otetaan samalta korkeudelta, oikeaan suuntaan ja oikein väliajoin, jotta pituus- ja sivupeitot täyttyvät. Kopteri tallentaa kuvat kameran muistikortille ja lentotiedot omalle muistikortille. Lentotiedoista selviää myös jokaisen kuvan ottohetki, kopterin suurpiirteinen sijainti sekä kopterin kallistustiedot (kuva 3). Kallistustiedot ovat yaw, pitch ja roll. Yaw kertoo aluksen kompassisuunnan, pitch aluksen kallistuksen ylös ja alaspäin ja roll kertoo aluksen kiertymän oman runkonsa ympäri. Kallistustietoja käytetään myöhemmin aineiston prosessoinnissa.

### 3.2 Historia

Lennoikkien ja miehittämättömien ilma-alusten historia ja kehitys on ollut viime vuosiin asti vahvasti sidoksissa sotimiseen. Ensimmäiset miehittämättömät ilma-alukset olivat ilmapalloja, joilla muun muassa Yhdysvaltojen sisällissodassa pyrittiin sytyttämään metsäpaloja kuljettamalla sytytysainetta ilmassa. Ensimmäisen lentävän siiven rakensivat englantilaiset John Stringfellow ja William Henson vuonna 1848. Lenkokissa oli höyrykone, sen siipiväli oli noin kolme metriä ja sitä ohjattiin vaijerilla maasta [5]. Ensimmäiset valokuvat miehittämättömällä aluksella otettiin vuonna 1883 kiinnittämällä leijaan kamera, joka laukaistiin pitkän vaijerin avulla. [7]

Ensimmäisen maailmansodan aikoihin aloitettiin risteilyohjusten kehitys. Gyroskooppi mahdollisti ohjusten vakauden ja suuntauksen, mutta heikko radioyhteys esti kunnollisen ohjauksen kehittämisen. Sodan jälkeen yleinen ilmailuteollisuus sekä radioyhteyden käyttö kehittyi ja lennokkeja alettiin käyttää lentokoneiden ja ilmatorjunnan harjoitusmaaleina. Toisen maailmansodan lopulla sekä Saksalla että Yhdysvalloilla oli käytössään radio-ohjauksella varustettuja risteilyohjuksia, joita voidaan pitää lennokkeihin verrattavina, erona ainoastaan niiden varustaminen pommeilla kuvausvälineistön sijaan. [6]

1950-luvulla Yhdysvallat kehitti lennokin 147A "Fireflyn" harjoitusmaaliksi. Samoihin aikoihin kehitettiin QH-50-kopteri (kuva 4), jota käytettiin kuljetuksiin, kohteiden valaisuun, savuverhon tekoon sekä valvontaan. Kopteri oli käytössä Vietnamin sodassa. Yhdysvallat otti silloin lennokit käyttöönsä kunnolla, ja sodan aikana UAV tehtäviä kertyikin yhteensä 3435, joista suurin osa ilmakeuhkustiedustelua. [6]



Kuva 4. QH-50-kopteri laskeutumassa USS Hazelwoodin kannelle [8].

Seuraavat kehitysaskleet otti Israel 1970- ja 80-luvuilla Yhdysvaltojen keskittyessä muuhun sotatekniikkaan. Scout- ja Pioneer-lennokit olivat nykyaikaisia lentäviä siipiä jotka pystyivät tuottamaan suoraa videokuvaa 360-asteen näkymällä. Lennokit olivat kevyitä ja pienikokoisia, joten niiden valmistuskustannukset olivat melko pieniä ja niiden alas ampuminen vaikeampaa. Yhdysvallat osti Pioneer lennokkeja ja käytti niitä Persianlahden sodassa. Tästä eteenpäin lennokit ovat olleet käytössä käytännössä jokaisessa konfliktissa eri puolilla maailmaa. [6;7.]

Viimeisten 15 vuoden aikana kopterityyppiset lennokit ovat kehittyneet valtavasti. Aiemmin niiden ohjaamiseen vaadittiin lähes helikopterilentäjän taitoja, mutta viime aikoina niiden ohjaus- ja vakaustekniikka ovat mahdollistaneet helpomman ja jopa täysin itsenäisen toiminnan. GPS-tarkkuus on parantunut, ja kamerateknologian kehittyessä myös kuvien laatu on noussut aivan uudelle tasolle. [5]

### 3.3 Kuvan tarkkuus

Lennokilla otettujen kuvien tarkkuuteen ja maastopikselin kokoon (Ground sample distance, GSD) vaikuttaa monta asiaa. Lentokorkeus on tärkein tekijä pikseleiden koon kannalta. Mitä korkeammalla lennetään, sitä suurempia ovat maastopikselit. Vastaavasti

matalammalla lentokorkeudella pikselikoko pienenee. Tasotarkkuus on puolet maastopikselin koosta, ja korkeustarkkuus vastaa maastopikselin kokoa. UAV-kuvauksella voidaan normaalioloissa päästä noin 2 cm pikselikokoon maastossa. Tätä pienemmän koon saavuttamiseksi lentokorkeus on jo niin matala, että työn tekemiseen kuluu todella paljon aikaa johtuen lentojen määrästä. [1;2.]

Kameran ominaisuuksilla on merkitystä kuvan pikselimäärässä, sekä valovoimaisuudessa. Mikäli kameraa ei ole optimoitu oikein lennokin lentokorkeutta varten, se aiheuttaa kuvaan epätarkkuutta, sillä kameral tulisi tarkentua mahdollisimman hyvin haluttuun kohteeseen, esimerkiksi maanpintaan. Kameran kuvasensorin koko vaikuttaa kuvien värimaailmaan ja dynamiikkaan. [1]

Ennen kuvausta tehtävien signaalimerkkien tarkkuus vaikuttaa lopputuotteesta saatavien koordinaattien tarkkuuteen. Ilmakuvien sitominen kiinni koordinaatistoon tapahtuu näiden tukipisteiden avulla. Mitä parempia lähtöpisteitä tai pidempää RTK-mittausta on käytetty, sitä tarkempia ovat signaalien koordinaatit ja näin ollen lopullinen ilmakekuva. [1]

Sää ja maasto tuovat omat muuttujansa yhtälöön. Tuuli on kevyiden lennokkien pahin ongelma, sillä puuskat saattavat helposti heiluttaa etenkin fixed wing-tyyppisiä lennokkeja. Nykyaikaisen tuulen sietokyky on reilu 10 m/s. Vesi- ja lumisade aiheuttavat kuviin häiriöitä, eivätkä laitteet ole tarkoitettuja käytettäväksi sateessa. Suomen oloissa haasteen tuo myös maassa oleva lumi. Jos lennokkia halutaan käyttää esimerkiksi tilavuuk-sien laskentaan ja maassa on lunta, ei tietokone välttämättä osaa yhdistää erikuvia tarpeeksi, sillä liitoshavainnot jäävät liian vähäisiksi. [1]

Varsinaisten kuvien ottamisen jälkeen jäljellä on vielä kuvien prosessointi. Eri ohjelmat käyttävät erilaisia laskenta-algoritmeja kolmiulotteisten pistepilvien ja maastomallien laskemiseen, ja tästä syystä eri ohjelmilla saatetaan saada hieman eriäviä tuloksia. [1]

### 3.4 Lainsäädäntö

Miehittämättömien ilma-alusten nopea kehitys on aiheuttanut lain jälkeen jäämisen. Uusi ilmailulaki tuli voimaan 7.11.2014, ja sitä ollaan täydentämässä uudella ilmailumääräyksellä, jolla luodaan minimisääntely, joka mahdollistaa miehittämättömien ilma-alusten käytön. Ilmailumääräyksen on tarkoitus tulla voimaan syksyllä 2015. [14]

Lähtökohtaisesti alle 20 kilogrammaa painavien alusten käyttö valvomattomassa ilmatilassa on sallittua ilman erillistä lupaa. Ilmailulaissa todetaan, että miehittämättömän ilma-aluksen asiakirjoja täytyy säilyttää kauko-ohjauspaikalla. Trafín tehtävä on määrittää mitä nämä asiakirjat ovat. Muilta osin uusi ilmailulaki ei juurikaan ota kantaa miehittämättömiin ilma-aluksiin. [4]

Liikenteen turvallisuusvirasto Trafín uutta määräystä koskevassa tiedotteessa todetaan, että uudesta ohjeistuksesta on tulossa kevyesti säädeltyä, eikä UAV-työskentelyä haluta rajoittaa liikaa. Tärkein uudistus liittyy lennokin lennättäjän jatkuvaan näköyhteyteen, se ei enää olisi pakollista, vaan tähystäjän käyttö riittää. Toki lennättäjän täytyy pystyä ohjaamaan ja hallitsemaan lennokkiaan kaikissa olosuhteissa. [10]

Nykyisissä ohjeissa lennokin maksimietäisyys lennättäjältä saa olla enintään 500 metriä ja näköyhteyden on säilyttävä. Maksimilentokorkeus on 150 metriä, mutta uusissa ohjeissa tämä tulee todennäköisesti laskemaan 120 metriin. Kuvaaminen Suomessa on yleisesti ottaen sallittua, mutta Puolustusvoimien alueita, rakennuksia ja muita kohteita ei saa kuvata, ei myöskään erityiskohteita kuten ydinvoimaloita. [9]

## **4 Mittaustyöt**

Lento- ja laserkeilaustyöt suoritettiin 11.-12.3.2015 Pietarsaaren vanhalla kaatopaikalla Lilla Mörvikenillä. Mittaustyössä avusti Esarin mittauspäällikkö Kristoffer Blomqvist ja laserkeilauksen suorittivat Esarin laserkeilausryhmä Jukka Hautaniemen johdolla, apunaan Kim Tuorila ja Fredrik Herrgård.

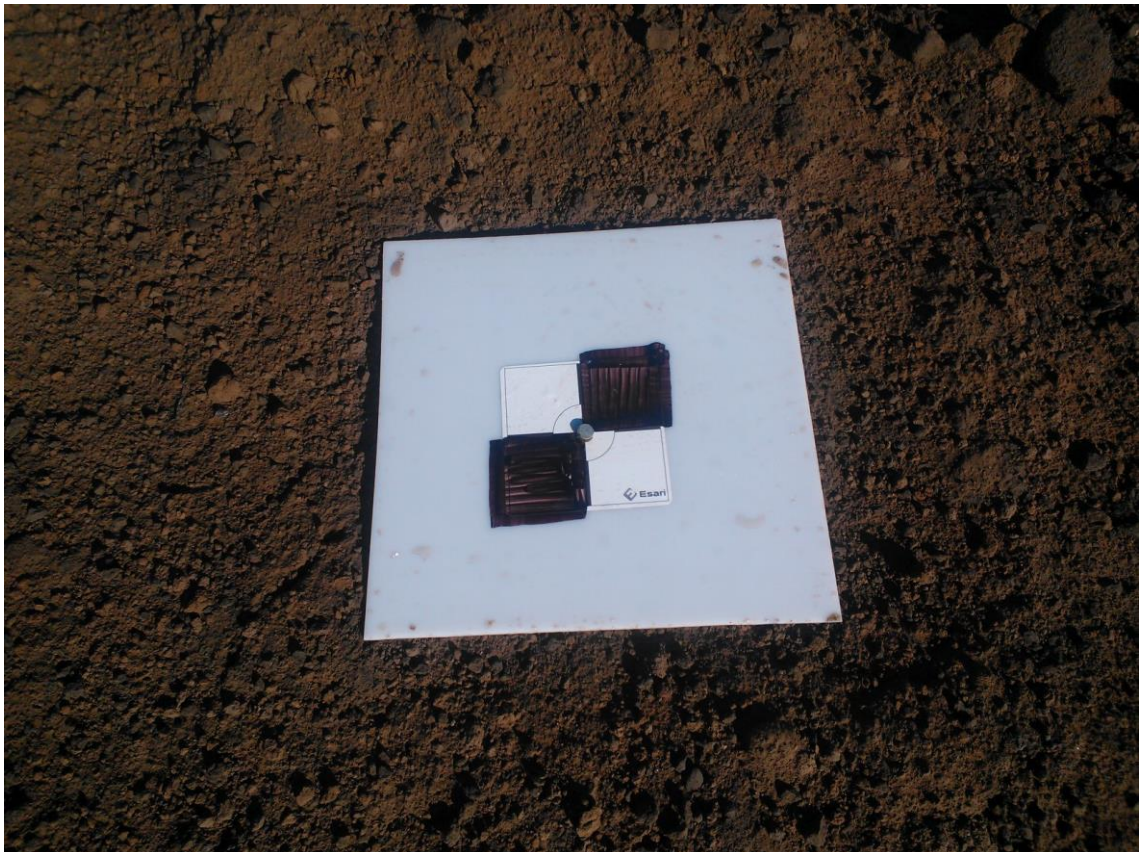
Ensimmäinen vaihe mittaustyössä oli signaalien rakentaminen ja niiden GPS-mittaus. Tämän jälkeen lentoja tehtiin kaksi, ensimmäinen 100 metrin ja toinen 130 metrin korkeudesta. Lopuksi suoritettiin laserkeilaus, jotta keilain ja työntekijät eivät näkyisi UAV:lla otetuissa kuvissa.

### **4.1 Esivalmistelut**

Ennen lentoa UAV-kopterin, ohjaimen, videolähettimen sekä navigointiin käytetyn tabletin akut oli ladattu. Kopteri tarkistettiin ulkoisten vaurioiden varalta ja yhteydet tarkistettiin

harjoituslennon avulla. Nousu- ja laskeutumipaikaksi valittiin avoin ja tasainen alue kaatopaikan nurkasta, josta oli näkyvyys koko kuvattavalle alueelle, sekä kaatopaikalle johtavalle tielle. Kopterin asetuksissa säädettiin varotoimenpide asetukset. Lentorajoitukseksi asetettiin enintään 500 metrin etäisyys lennättäjästä, sekä suurimmaksi lentokorkeudeksi 140 metriä. Ohjainyhteyden katkeamisen varalle asetettiin ”palaa kotiin”-toiminto. Jos yhteys katkeaisi, kopteri pitäisi lentokorkeutensa palaten suoraan lähtöpaikkaan ja jos yhteys ei vielä kukaan palaisi, se laskeutuisi hallitusti 1m/s nopeudella lähtöpaikkaansa.

#### 4.1.1 Signaointi



Kuva 5. Ilmakuvauksessa käytetty signaalilevy.

Signaaleina käytettiin muovisia 20x20 cm:n kokoisia levyjä (kuva 5), joihin oli liimattu tähystarra. Levyn keskelle porattiin reikä, jotta levy saatiin kiinnitettyä tukevasti maahan naulan avulla. Signaaleita sijoitettiin kuvattavalle alueella yhteensä 16 kappaletta (kuva 6), jotka kaikki kartoitettiin Trimblen R8 GPS -vastaanottimella. Osa signaaleista tultaisiin myöhemmin käyttämään ilmakuvien sitomisessa koordinaatistoon.

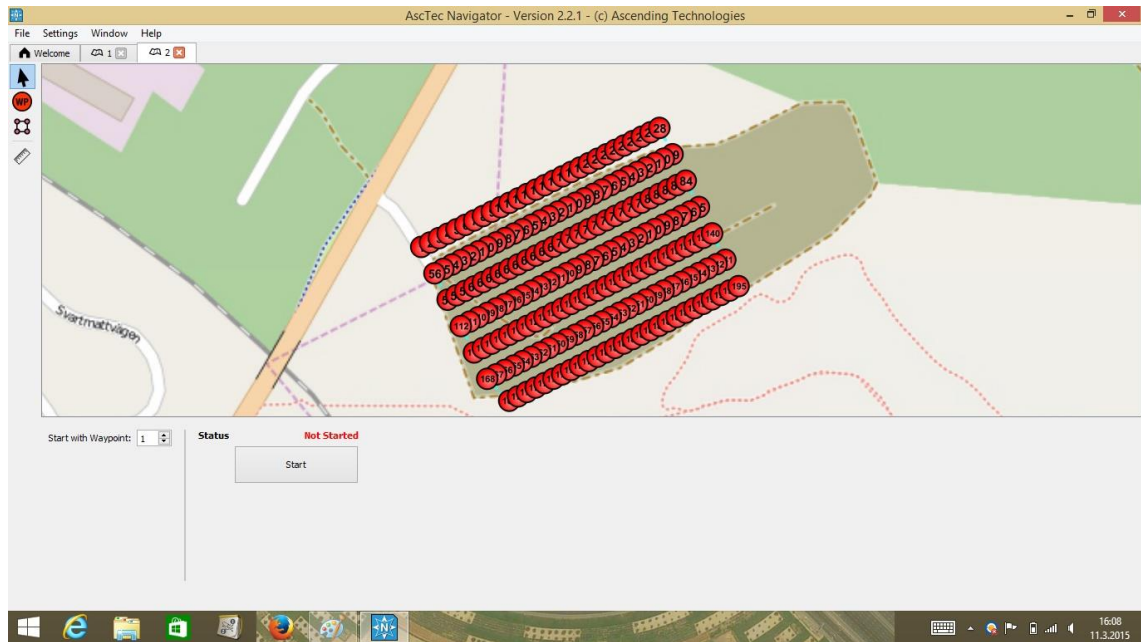




Kuva 6. Rakennettujen signaalien sijoittuminen ja numerointi kuvauskohteessa.

#### 4.1.2 Lentosuunnitelma

Lentosuunnitelma (kuva 7) tehtiin Asctec Navigator-sovelluksella, joka on tarkoitettu Asctecin koptereiden lentosuunnitelmien tekoon. Ohjelmassa pystytään säätämään reittisuunnitelman teossa lentokorkeutta, maastopikselin kokoa sekä sivu- ja pituuspeittoja. Lentokorkeus ja maastopikselin koko ovat toisiaan määrittäviä tekijöitä, joten valitsemalla tietyn korkeuden, määräytyy pikselikoko automaattisesti. Vastaavasti jos halutaan tietty pikselikoko, syöttämällä se saadaan automaattisesti oikea lentokorkeus. Ohjelma laskee sen jälkeen kuvien tarvittavan määrän ja kameran sijainnit, eli kuvanotto-paikat.



Kuva 7. AscTec Navigatorilla tehty lentosuunnitelma.

Työssä käytettiin 80 %:n pituuspeittoa ja 75 %:n sivupeittoa. Kuvia 100 metrin korkeudesta tehdylle kuvaukselle tuli 354 kappaletta ja 130 metrin korkeudesta 195 kappaletta. Kuvattavan alueen nurkkiin sijoitetaan pisteet, jonka jälkeen ohjelma laskee käytettävän reitin. Navigatorilla on myös mahdollista luoda linja- ja pistetyyppisiä lentosuunnitelmia esimerkiksi teiden tai savupiippujen kuvausta varten.

Navigatorilla pystytään myös seuraamaan lennonaikaisia tapahtumia ja sen avulla pystytään seuraamaan kopterin nopeutta, suuntaa, korkeutta, lentoaikaa, GPS-signaalin vahvuutta sekä akun tilaa (kuva 8). Lentonäkymä näyttää myös kopterin keinohorisontin.

## 4.2 UAV-kuvaus

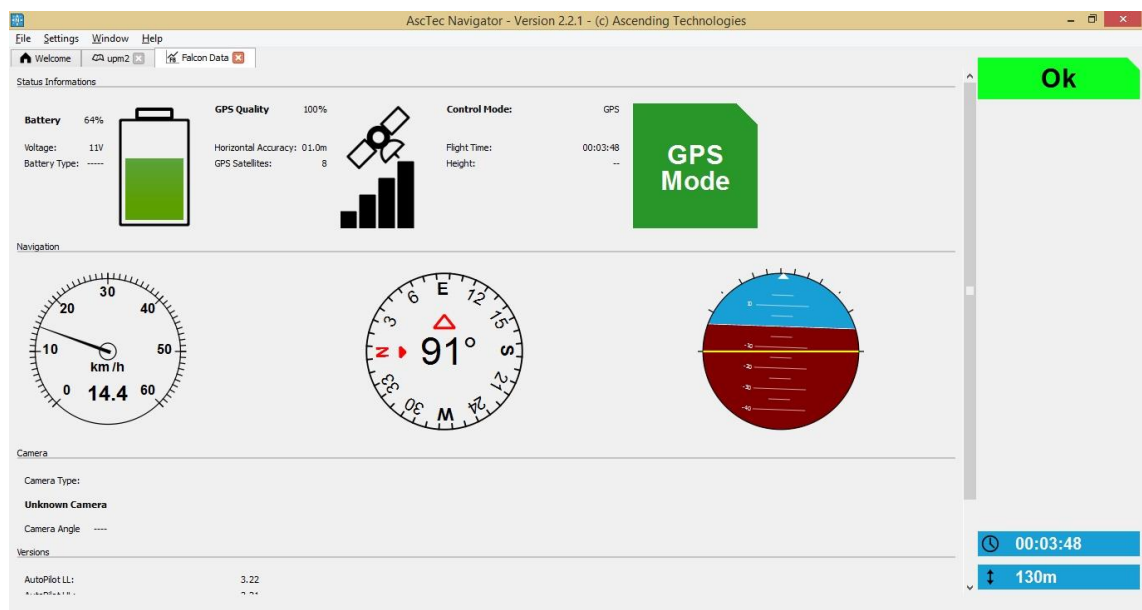
Kun esivalmistelut oli saatu suoritettua, oli aika aloittaa varsinainen kuvaus kopterilla. Kopteri piti nostaa lentäjän toimesta ilmaan, mutta jo muutaman kymmenen metrin korkeudessa pystyttiin kytkemään lentosuunnitelma päälle ja kopteri otti itse ohjat. Nousussa on tärkeää nousta ympäröiviä esteitä korkeammalle, jotta automaattiohjaukseen siirtyminen ei aiheuta törmäystä.

#### 4.2.1 Kuvattava kohde

Kuvauskohde oli Pietarsaaren vanha kaatopaikka, Lilla Mörviken. Se valittiin kohteeksi sen sijainnin, avaruuden sekä selkeiden maastonmuotojensa vuoksi. Kohde oli myös laserkeilaukseen hyvin soveltuva. Kohde sijaitsee Pietarsaaren ja Pedersören kunnan rajalla Pietarsaaren ohitustien varressa. Kaatopaikka on ollut käytössä vuodesta 1958 vuoteen 1993, jonka jälkeen se on vielä vastaanottanut lietteitä ja maa-ainesta vuoden 2001 loppuun asti. Nykyään jätteiden päällä on maakerros, ja liikkuminen sen päällä turvallista, tosin yleisöltä kiellettyä. [12]

#### 4.2.2 Olosuhteiden vaikutus

Kuvausolosuhteet olivat hyvät, aurinko paistoi pilvettömältä taivaalta lämpötilan ollessa noin 3 astetta plussan puolella ja tuuli oli aluksi 7 m/s, mutta se laantui työn edetessä hiukan. Ilman suhteellinen kosteus oli noin 60 % ja ilmanpaine 1 025 hPa.



Kuva 8. Kopterin lennonaikainen ohjausnäkyminen tietokoneella.

Lämpötilan ollessa melko alhainen jäi yhden akun lentoaika tavoiteltua lyhyemmäksi. Yhden akun lentoaika oli keskimäärin 10 minuuttia, josta nousuun ja laskuun meni yhteensä noin kaksi minuuttia riippuen kuvausjonon alku- ja loppupisteestä. Parin tunnin aikana tuuli yltyi ainoastaan hetkellisesti ja kopterin ohjain antoi kerran High wind-varoituksen. Se ei kuitenkaan haitannut kuvausta, sillä kyseessä oli yksittäinen puuska.

#### 4.2.3 Lennonaikaiset havainnot

Lentäminen sujui ilman suurempia ongelmia. 100 metrin korkeudesta erillisiä lentoja tuli seitsemän ja 130 metrin korkeudesta neljä. Yhdellä lennolla kopteri ehti ottaa noin 50 kuvaa. Kuvien määrään vaikutti kauko-ohjauspaikan sijainti alueen nurkassa, jolloin matkaa tuli kaukaisimmalle pisteelle hieman yli 400 metriä. Mikäli ohjauspaikka (kuva 9) olisi sijainnut alueen keskellä, olisivat lentomatkat olleet tasaisempia ja kuvia olisi mahdollisesti saanut otettua enemmän per lento.



Kuva 9. Kirjoittaja valvomassa kopterin lentoa.

Kopterin ohjaimen akun kesto oli noin kaksi tuntia, ja yhdeksän lennon jälkeen jouduimme lataamaan sitä auton tupakansytyttimestä noin vartin verran. Kopteri seurasi reittisuunnitelmaa, ja aina ohjaimen alkaessa varoittamaan akun tyhjentymisestä (vajaa

kolmannes akusta jäljellä) lopetimme reitin seurannan ja ohjasimme kopterin takaisin lähtöpaikalle akunvaihtoon.

#### 4.3 Laserkeilaus

Laserkeilaus on laserkeilaimen lähettämien lasersäteiden vaihe-eroon perustuva mitaustapa. Keilain lähettää tiheästi lasersäteitä ja säteet kimpoavat takaisin keilaimeen osuttuaan johonkin pintaan. Tähän kuluneesta ajasta (sekunnin murto-osia) laserkeilain tietää suunnan ja etäisyyden mitattuun pisteeseen. Keilain pyörähtää itsensä ympäri ja mittaa miljoonia pisteitä yhdeltä kojeasemalla. Jokaiselta kojeasemalta muodostuu oma pistepilvi, jotka yhdistetään tietokoneella toisiinsa. Keilausasemilta täytyy näkyä muille asemille, jotta pistepilviin muodostuu tarpeeksi peittoa, jotta ne voidaan yhdistää. Aineisto sidotaan koordinaatistoon joko sijoittamalla laserkeilain tunnetulle pisteelle tai käyttämällä keilausalueella signaaleja jotka kartoitetaan esimerkiksi takymetrillä.



Kuva 10. Riegl VZ-400-laserkeilain varustettuna järjestelmäkameralla. [15]

Kaatopaikan laserkeilauksessa käytettiin Esarin Riegl VZ-400-laserkeilainta (kuva 10). Keilaus suoritettiin kohteessa 12.3.2015. Keilaukseen kului aikaa tunti 15 minuuttia, ja kojeasemia oli yhteensä 15 kappaletta, yhden keilauksen kestäessä 45 sekuntia. Keilain

asemoitiin pisteelle, joka kartoitettiin GPS-vastaanottimella. Laserkeilatun aineiston rekisteröinti suoritettiin RiScan Pro -ohjelmalla. Pistepilven jatkokäsittely tehtiin Trimblen RealWorks-ohjelmistolla.

## 5 Jälkilaskenta

UAV:lla otettujen ilmakuvien käsittelyssä käytettiin AscTec Navigator-ohjelmaa, jolla yhdistettiin kopterin kuvat ja sen GPS-vastaanottimesta saadut lokitiedot. Varsinaiseen kuvien yhdistämiseen, oikaisuun ja georeferointiin käytettiin Agisoft Photoscan Prota, jolla myös muodostettiin fotogrammetrisesti laskettu pistepilviaineisto sekä ortokuva.

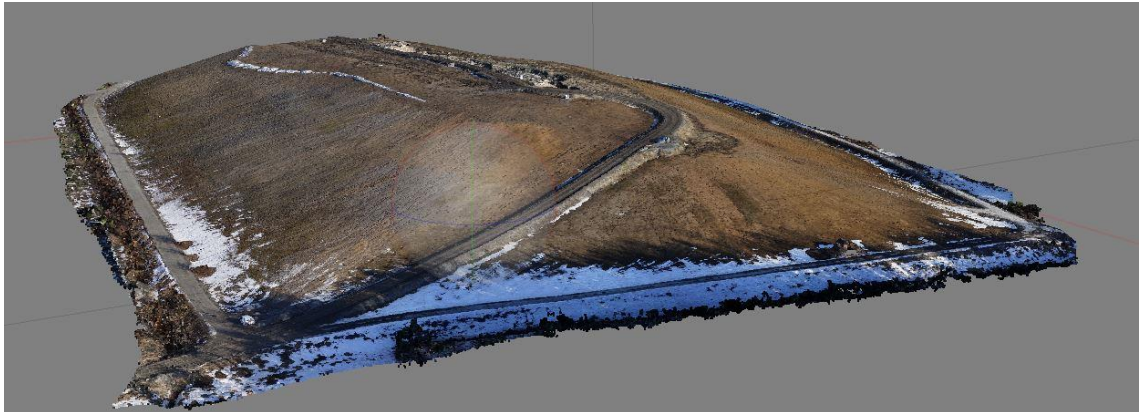
### 5.1 Kuvien prosessointi

Kuvat siirrettiin kameran muistikortilta tietokoneelle ja ne tarkastettiin virheiden varalta. Kuvauspäivänä paistanut aurinko ja kaatopaikan laidalla sijainneet puut muodostivat varjoja alueen lounaissivulle, mutta lopputulokseen sillä ei ollut juurikaan väliä, ainoastaan osa pisteistä sai nyt todellisuutta tummemman RGB-arvon. Muutamassa kuvassa näkyi tiellä ajanut kuorma-auto, mutta sekin jäi pois lopullisesta aineistosta. Kaikki kuvat olivat hyviä, joten ne siirrettiin Photoscaniin. Ohjelma etsi aluksi kuvilta yhteneviä pisteitä ja muodosti noin 30 000 pisteen karkean mallin kohteesta.

Seuraava työvaihe oli signaalipisteiden etsiminen kuvista. Ohjelma osaa etsiä vastaavan pisteen kaikista kuvista, kunhan se on ensin manuaalisesti etsitty ja merkattu kahdesta eri kuvasta. Ohjelman ehdotukset ovat kuitenkin karkeita muutaman sentin tarkkuudella annettuja arvioita, joten signaalien keskikohdat täytyi etsiä vielä manuaalisesti. Kun kaikki signaalit oli merkitty kuviin, niille syötettiin GPS:llä mitatut koordinaatit. Tässä työssä käytimme ETRS-GK23-koordinaattijärjestelmää.

Koordinaattien syöttämisen jälkeen tarkasteltiin mitattujen pisteiden keskinäisiä virheitä, jotka olivat 100 metrin lentokorkeudelta kuvatussa aineistossa  $X = 0,8$  cm,  $Y = 1$  cm ja korkeus = 1 cm. 130 metrin lentokorkeudesta jotkut signaaleista näkyivät heikommin, ja sen vuoksi lennon laskennassa käytettiin ainoastaan osaa pisteistä. Virheet olivat  $X = 1$  cm,  $Y = 1,4$  cm ja korkeus = 1,4 cm. Tuloksia voidaan pitää todella hyvinä. Parempaan sisäiseen tarkkuuteen olisi päästy mittaamalla signaalit joko takymetrillä tai käyttämällä

GPS:n kanssa tukea ja mittaamalla pisteitä pidemmän aikaa. Ohjelma laski tarkan pistepilven (kuva 11) aineistosta hyödyntäen signaalipisteiden koordinaatteja. Signaalipisteiden tarkkuuden pystyi määrittämään asetuksista, ja tässä työssä signaaleiden virheeksi asetettiin 0. Näin ollen Photoscan teki mallin siten, että signaalien koordinaatit muodostavat tarkan rungon pistepilvelle. 100 metrin korkeudesta kuvatulle pistepilvelle pistetiheydeksi tuli 3,9 cm (642 pistettä/m<sup>2</sup>), kun taas 130 metristä pistetiheys oli 5,3 cm (349 pistettä/m<sup>2</sup>).

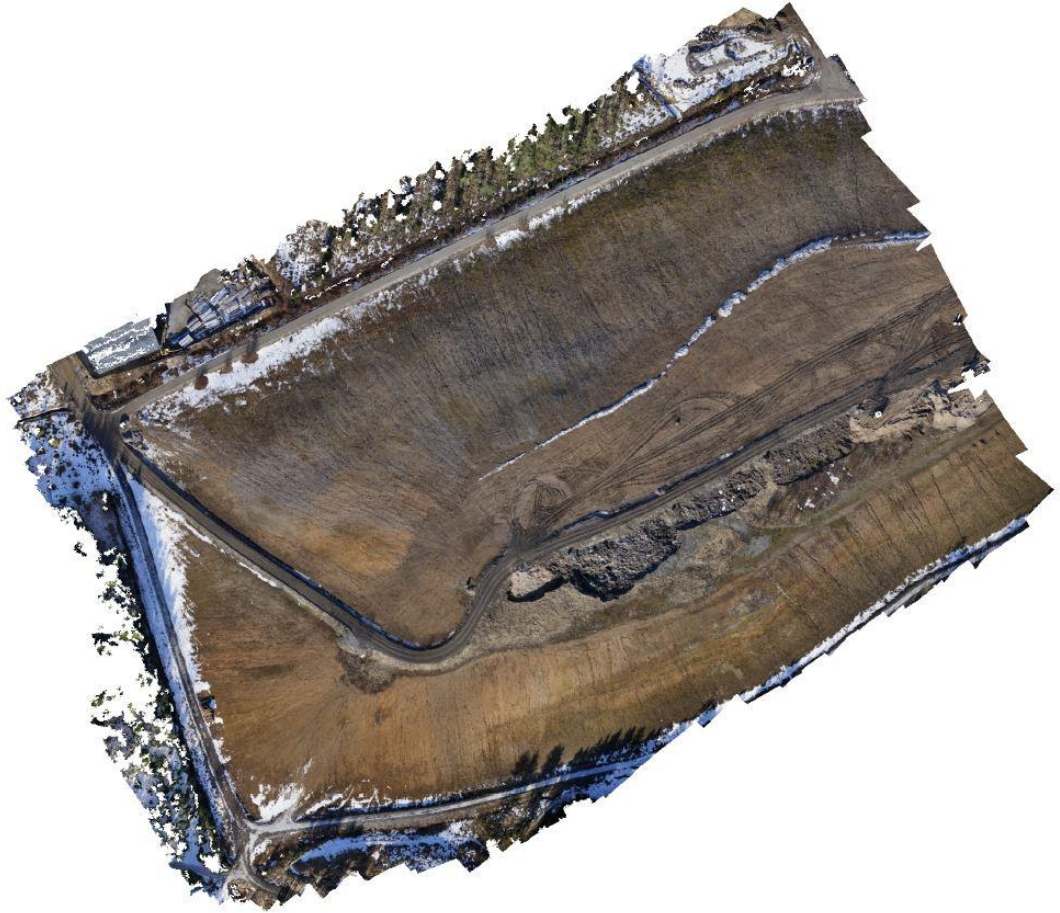


Kuva 11. Teksturoitu pistepilviaineisto kaatopaikasta.

Tarkasta pistepilvestä tuotettiin kolmioverkkomalli, eli "mesh". Kolmiomallista saa teksturoidun tai yksivärisen. Myös pistepilvien pisteille muodostuu automaattisesti väriarvo valokuvan mukaan. Nämä valmiit teksturoinnit helpottavat ja nopeuttavat aineiston analysointia ja jatkokäsittelyä.

## 5.2 Lopputuotteet

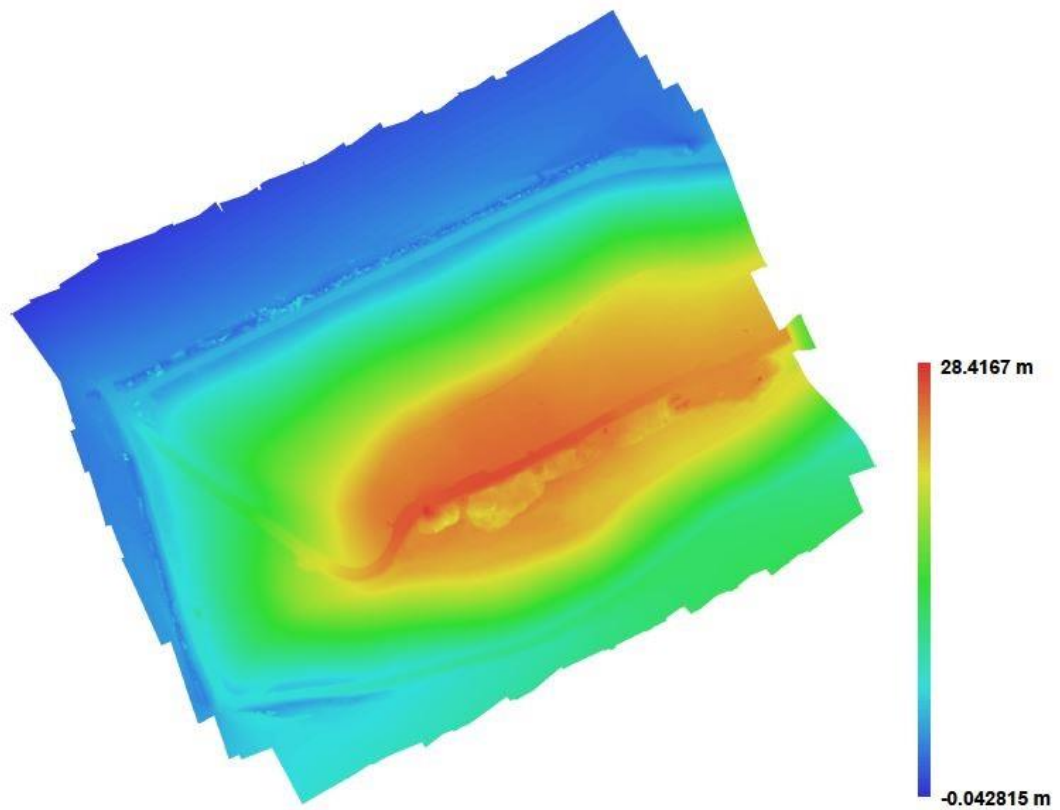
UAV-kuvauksella saadaan aikaiseksi monia eri lopputuotteita. Lennokin ottamat sadat kuvat voidaan yhdistää yhdeksi suureksi ortokuvaksi (kuva 12). Jos kuvan alueelta on mitattu signaaleja tai kuvassa näkyy kohteita, joiden koordinaatit ovat selvillä, saadaan ortokuva georeferoitua, eli sidottua se kokonaisuudessaan koordinaatistoon. Georeferoidulta kovalta voidaan suorittaa mittauksia ja sitä voidaan käyttää suunnittelun lähtöaineistona, esimerkiksi asemakaavan pohjakarttana. 100 metrin korkeudelta kuvatun ortokuvan pikselikooksi tuli 1 cm ja 130 metristä saavutettiin 1,3 cm:n pikselikoko.



Kuva 12. Georeferoitu ortokuva.

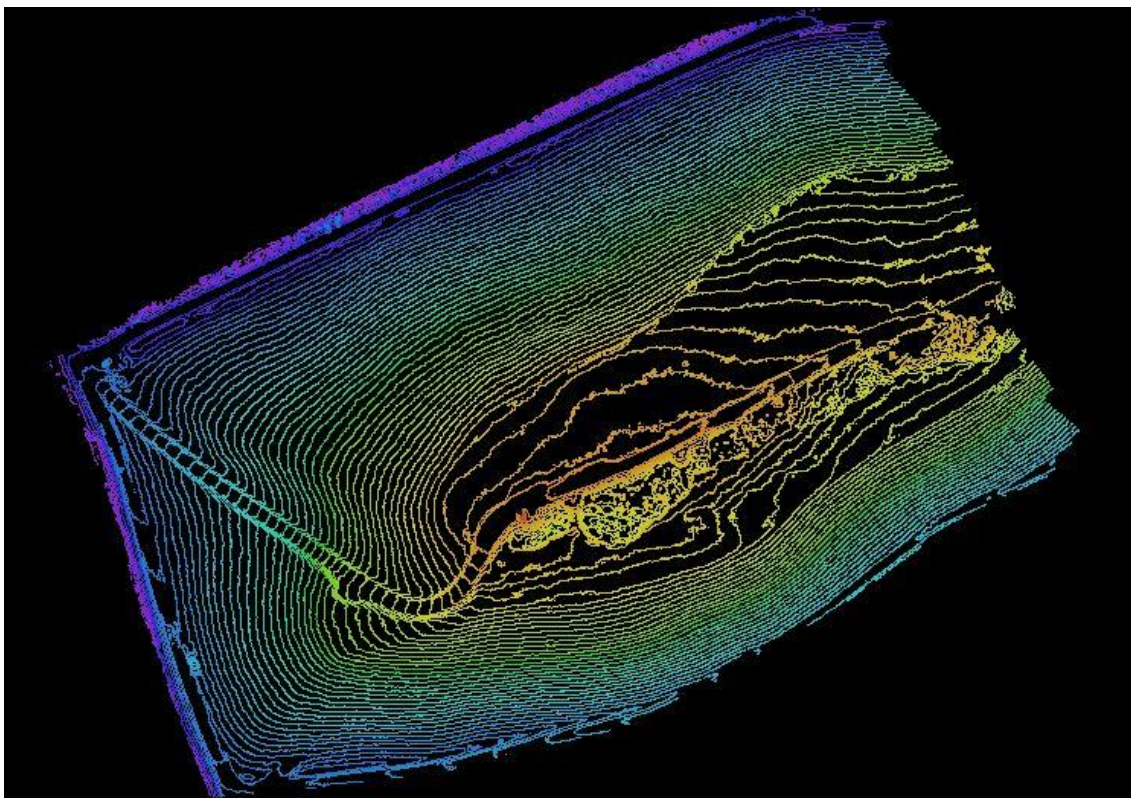
Kuvista muodostetusta pistepilviaineistosta saadaan edelleen jalostettua todella paljon erilaista tietoa. Pistepilven jokaiselle pisteelle voidaan määrittää oma luokka, tätä prosessia kutsutaan pistepilven luokitteluksi. Luokkia voivat olla esimerkiksi maanpinta, rakennuksen katto, puut, aluskasvillisuus ja asfaltti/tien pinta. Luokitellusta pistepilvestä saadaan kulloinkin haluttu tieto nopeasti ja helposti. Pistepilven perusteella voidaan myös tuottaa 3D-malleja esimerkiksi silloista ja muista rakennelmista, rakennuksista, torneista tai tuulivoimaloista.





Kuva 13. Digital Elevation Model, korkeusmalli.

Agisoft Photoscan pystyy tuottamaan kuvista myös korkeusmalleja (kuva 13), engl. Digital Elevation Model, DEM. Korkeusmallin avulla korkeuserot on helppo hahmottaa, ja se toimii pohjana myös korkeuskäyräaineistojen (kuva 14) tekemiselle. Korkeusmallin avulla selviävät myös maastonmuodot sekä kaltevuudet, ja niistä on apua esimerkiksi tulvavaara-alueiden selvittämisessä. Korkeutta voidaan verrata joko todelliseen koordinaatistokorkeuteen tai mihin tahansa haluttuun pintaan, esimerkiksi kaatopaikan pohjan tasoon. Kuvassa 13 näkyvän korkeusmallin korkeusvertailu on tehty kauko-ohjauspaikan korkeuteen nähden.



Kuva 14. Korkeuskäyrämalli 0,5 metrin väleillä.

## 6 Tulosten vertailu

Rekisteröityä laserkeilausaineistoa verrattiin kopterin ottamien kuvien perusteella laskettuun maastomalliin. Tätä varten molemmat pistepilvet oli kolmioitu ”mesh”-verkoksi. Aineistot olivat samassa koordinaatistossa ja korkeusjärjestelmässä. Laserkeilatun ja fotogrammetrisesti laskettujen pistepilvien erojen vertailuun käytettiin Trimblen RealWorks-ohjelmistoa. Vertailussa auttoi Esarin laserkeilauspäällikkö Patrik Hagman.

### 6.1 Mittausmenetelmien erot

Laserkeilaus ja UAV-kuvaus ovat toinen hyvin erilaisia. Laserkeilaus on maastossa hidasta, ja se vaatii käytännössä aina signaalien rakentamisen ja mittauksen. Keilausaineiston rekisteröintiin ja siivoukseenkin kuluu aikaa, mutta hyvän aineiston aikaansa-

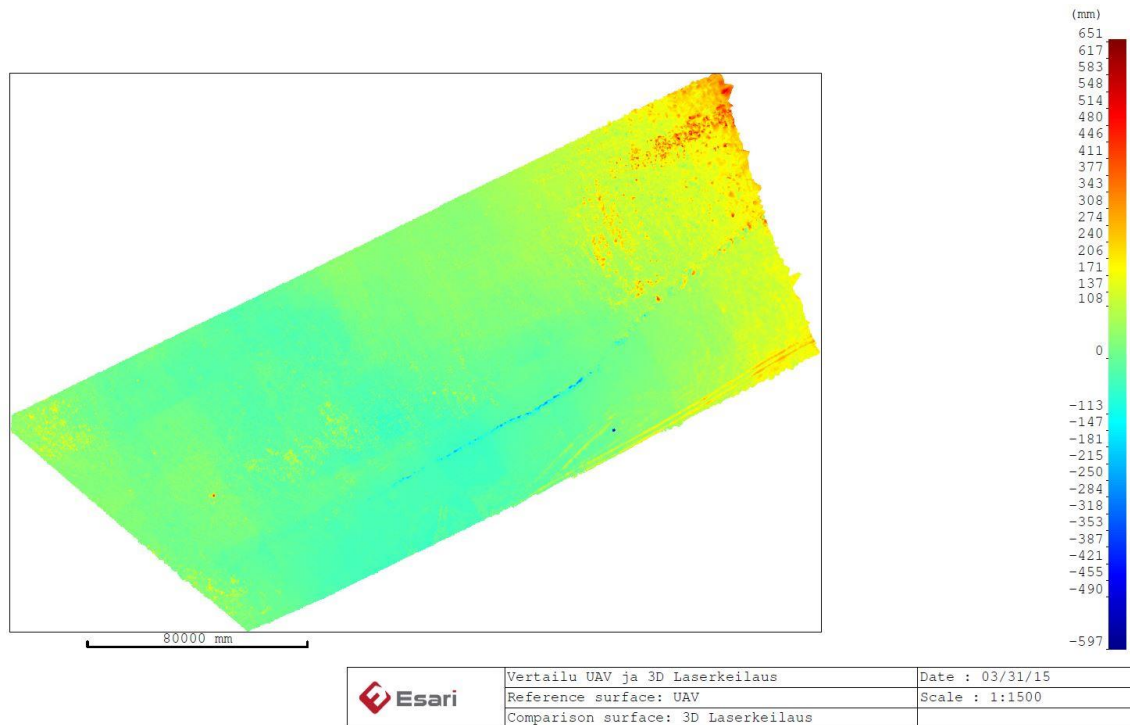
miseksi se on välttämätöntä. Laserkeilaus ei ole niin altis sääoloille kuin lennokilla lentäminen, mutta keilaimen kanssa on päästävä liikkumaan kohdealueella ja esimerkiksi kaatopaikalla tai avolouhoksessa se voi olla jokseenkin vaarallista.

Lopputuotteena laserkeilaimesta saadaan pistepilvi ja jos keilaimessa on ollut kiinni kamera, myös panoraamakuvat, joiden avulla pistepilvi voidaan teksturoida. Kopterin ottamista kuvista pystytään myös muodostamaan pistepilvi, mutta sen lisäksi valokuvista saadaan yhdistettyä suuri ortokuva. Laserkeilaimella mitattu pistepilvi on konkreettisesti mitattua dataa, kun taas UAV:n kuvista laskettu pistepilvi perustuu erilasiin laskenta-algoritmeihin.

Nyky aikaisten lennokkien käyttö on suhteellisen helppoa jopa aloittelijalle. Modernit autopilot-avusteet tekevät lennättämisestä vaivatonta ja lentosuunnitelmaa käyttämällä saadaan varmistetuksi tarvittavat sivu- ja pituuspeitot. Lennokki on nopea, ja sillä voidaan kuvata kohteita, jonne ei muuten ole mahdollista päästä mittaamaan. Operointiin riittää yleensä yksi henkilö, mutta laserkeilauksen tehokkain suorittaminen vaatii yleensä kaksi henkilöä.

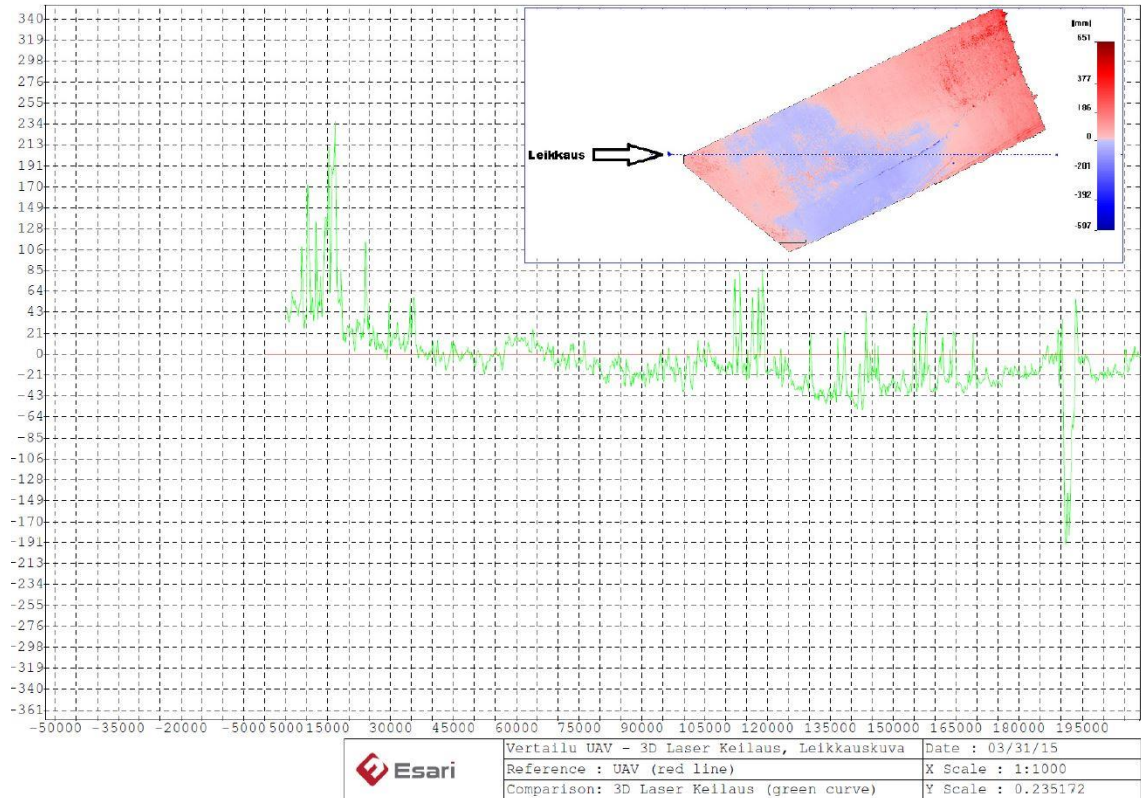
#### 6.1.1 Laskentatulosten erot

Aineistoja verrattaessa havaittiin heti, että osa pistepilvien yhteneväisyys oli todella hyvä, mutta Photoscanilla laskettu pistepilvi oli alueen reunoilla jopa yli puoli metriä eri tasossa. Aineistojen lähemmässä tarkastelussa huomattiin, että reuna-alueiden eroavaisuudet johtuivat laserkeilatun pistepilviaineiston sisältämisestä pusvista ja risuista, joita Photoscan ei ollut mallintanut pistepilveen. Pusikoiden sijainti näkyy selvimmin kuvassa 15, jossa puskat näkyvät oikeassa yläreunassa punaisena. Samassa kuvassa näkyy alueella menevä tie, joka on rakennettu penkan päälle. Penkan takia laserkeilausaineistoon on jäänyt pieni katve, joten ilmakehuaineisto näyttäisi olevan alempana (sininen viiva kuvan 15 keskellä).



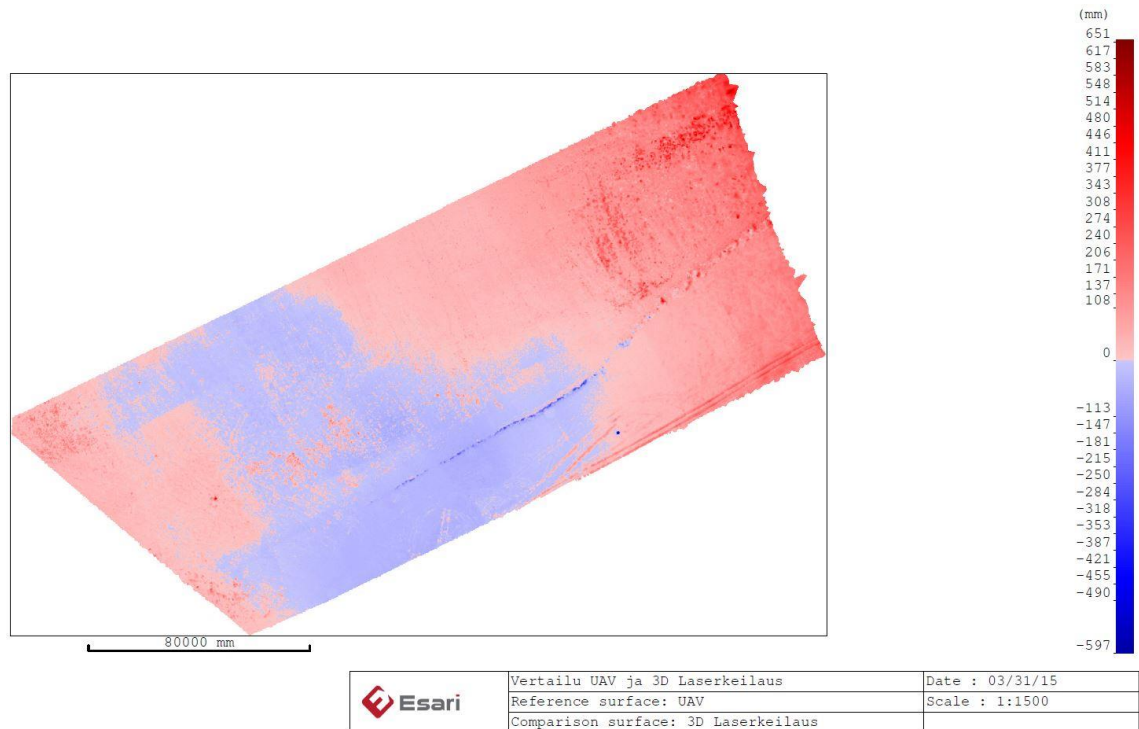
Kuva 15. UAV:lla ja laserkeilaimella tuotettujen pistepilvien ero liukuväreillä kuvattuna.

Poikkileikkausta (kuva 16) tarkasteltaessa huomattiin, että suurin osa pistepilvistä on 2 cm:n etäisyydellä toisistaan. Laserkeilain on ollut noin 1,5 metrin korkeudella maanpinnasta, joten se ei ole saanut kaikkia pienimpiä maastonmuotoja yhtä hyvin kiinni kuin suoraan ilmasta alaspäin kuvattu UAV-aineisto. Laserkeilaimelle on jäänyt lukemattomia pieniä katveja maanpintaan, joita ei voida välttää ilman että keilausasetemien lukumäärä kasvaisi kohtuuttoman suureksi.



Kuva 16. Poikkileikkaus kaatopaikasta. Punainen 0-linja kuvaa UAV:n maastomallia, vihreä käyrä laserkeilattua mallia.

Aineistojen välille ei suoranaista paremmuusjärjestystä voi laittaa. Kuva 17 osoittaa hyvin kuinka samankaltaisia molemmat pistepilviaineistot ovat. Kuvassa laserkeilattu pistepilvi on punaisella alueella korkeammalla ja sinisellä alueella matalammalla kuin UAV:lla kuvattu pistepilvi. Värien vaihtelu tiuhaan ja värisävyn vaaleus ovat merkkejä yhteneväisistä muodoista.



Kuva 17. UAV:lla ja laserkeilaimella tuotettujen pistepilvien erot.

## 6.2 Yhteenveto

UAV:lla tuotetun pistepilven tarkkuus on jo niin korkealla tasolla, että se pystyy helposti haastamaan laserkeilauksen, kun puhutaan maastomallin tekemisestä ja siitä edelleen tuotettavista tiedoista, kuten tilavuuksien laskennassa. Lennokkikuvauksen lopputuotteet ovat kilpailukykyisiä myös ilmasta tapahtuvaan laserkeilaukseen ja ortokuvaukseen nähden. Etenkin asemakaavoja tehdessä UAV:lla kuvattu ilmakuvausaineisto olisi todella käyttökelpoista kaavan pohjakartan laatimista ajatellen, mutta nykyiset julkishallinnon suositukset rajaavat ilmakuvauksessa käytännössä kaikki lennokit pois, sillä suositusten lentokorkeudet on tarkoitettu vain lentokoneille ja helikoptereille.

UAV-kopterilla pystytään kuvaamaan rakennuksia ja aineistojen yhdistäminen laserkeilausaineiston kanssa sujuu vaivatta. Kopteri mahdollistaa hankalimpienkin katto- ja savupiippurakennelmien mallintamisen, ja sen työskentelynopeus on laserkeilainta nopeampi.

Tulevaisuus tulee näyttämään millaiseksi lainsäädäntö Suomessa muuttuu miehittämättömien ilma-alusten osalta, mutta uskon, että seuraavien viiden-kymmenen vuoden aikana UAV-tekniikan käyttö yleistyy ja siitä tulee maanmittauksen työskentelymenetelmänä yhtä yleinen kuin laserkeilaus nykyään. Myös kameratekniikan kehitys on merkittävästi apuna käyttömahdollisuuksien suhteen ja lämpökamerat yms. yleistyvät ja niiden käyttö esimerkiksi sähkölinjojen osittaispurkaus tarkistuksissa tulee yleistymään.

## Lähteet

- 1 Mäenpää, Sakari. 2014. Tuotepäällikkö, Geotrim Oy, Vantaa. Trimblen UX-5 esitely 18.12.2014.
- 2 Sippo, Mikko. 2013. Lennokkikartoitus – uusia näkymiä ilmasta. Maankäyttö 2/2013 s.33-35.
- 3 Hagman, Stefan. 2015. Toimitusjohtaja, Oy Esari Ab, Kaustinen. Puhelinhaastattelu 8.1.2015.
- 4 Ilmailulaki 7.11.2014/864.
- 5 Tetrault, Cam. A short history of unmanned aerial vehicles (UAVs). 2009. Verkkodokumentti. Draganfly Innovations Inc. <<http://www.draganfly.com/news/2009/03/04/a-short-history-of-unmanned-aerial-vehicles-uavs/>> Luettu 5.2.2015.
- 6 Keane, John & Carr, Stephen. A brief history of early unmanned aircraft. 2013. Verkkodokumentti. Johns Hopkins APL Technical Digest. <[http://www.jhuapl.edu/techdigest/TD/td3203/32\\_03-Keane.pdf](http://www.jhuapl.edu/techdigest/TD/td3203/32_03-Keane.pdf)> Luettu 5.2.2015.
- 7 Scheve, Tom. 2015. Verkkodokumentti. <<http://science.howstuffworks.com/reeper1.htm>> Luettu 5.2.2015.
- 8 QH-50C departing. 2013. Verkkodokumentti. <<http://www.gyrodynehelicopters.com/>> Luettu 5.2.2015.
- 9 Hassinen, Alpo. 2013. UAV-lennokit, kokemuksia UAV-laitteista. PDF. Itä-Suomen Yliopisto.
- 10 2015. Miehitämättömille ilma-aluksille erittäin liberaalia sääntelyä. Verkkodokumentti. Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi. <[http://www.trafi.fi/tietoa\\_trafista/ajankohtaista/3174/miehitamattomille\\_ilma-aluksille\\_erittain\\_liberaalia\\_saantelya](http://www.trafi.fi/tietoa_trafista/ajankohtaista/3174/miehitamattomille_ilma-aluksille_erittain_liberaalia_saantelya)> Luettu 20.2.2015.
- 11 Asctec Falcon 8, käyttöohje.
- 12 Virtanen, Joni. 2014. Pietarsaari. Pietarsaaren kaatopaikan veloitettarkkailuraportti, vuosi 2013 s.2. PDF. Pohjanmaan vesi ja ympäristö ry.
- 13 Orientation: pitch, roll, yaw. 2012. Verkkodokumentti. <<http://blog.tkjelectronics.dk/2012/03/quadcopters-how-to-get-started/>> Luettu 8.4.2015.



- 14 2015. Verkkodokumentti. Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi. <[http://www.trafi.fi/filebank/a/1423742072/3eb96c37ec9abd66db6c8101974dc54d/16818-RPAS OPS\\_2015.pdf](http://www.trafi.fi/filebank/a/1423742072/3eb96c37ec9abd66db6c8101974dc54d/16818-RPAS OPS_2015.pdf)> Luettu 8.4.2015.
- 15 Riegl VZ-400. 2012. Verkkodokumentti. <[http://www.gpslands.com.my/v2/components/com\\_virtuemart/shop\\_image/product/RIEGL\\_VZ\\_400\\_4f656f91792be.jpg](http://www.gpslands.com.my/v2/components/com_virtuemart/shop_image/product/RIEGL_VZ_400_4f656f91792be.jpg)> Luettu 9.4.2015.

## Agisoft Photoscan raportti

100 metrin korkeudesta lennetyn lennon prosessointiraportti.

# Agisoft PhotoScan

Processing Report  
17 March 2015



## Survey Data

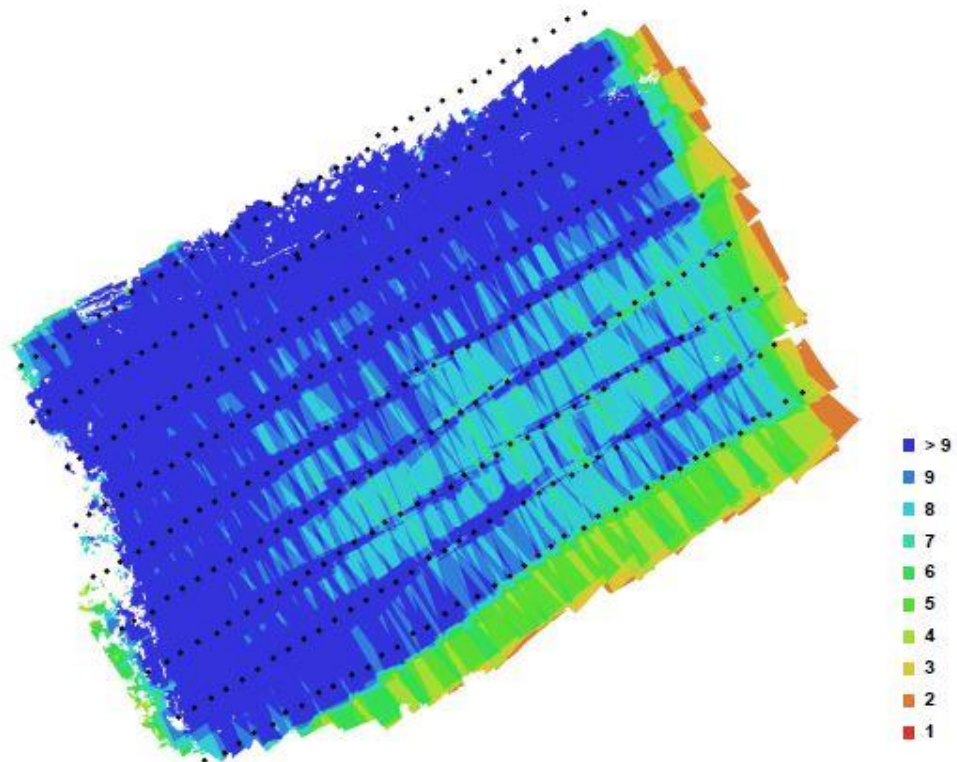


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	357	Camera stations:	353
Flying altitude:	78.3394 m	Tie-points:	30265
Ground resolution:	0.00986667 m/pix	Projections:	264326
Coverage area:	0.113467 sq km	Error:	0.918556 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
ILCE-7R (35 mm)	7360 x 4912	35 mm	4.88967 x 4.88967 um	No

Table. 1. Cameras.

## Camera Calibration

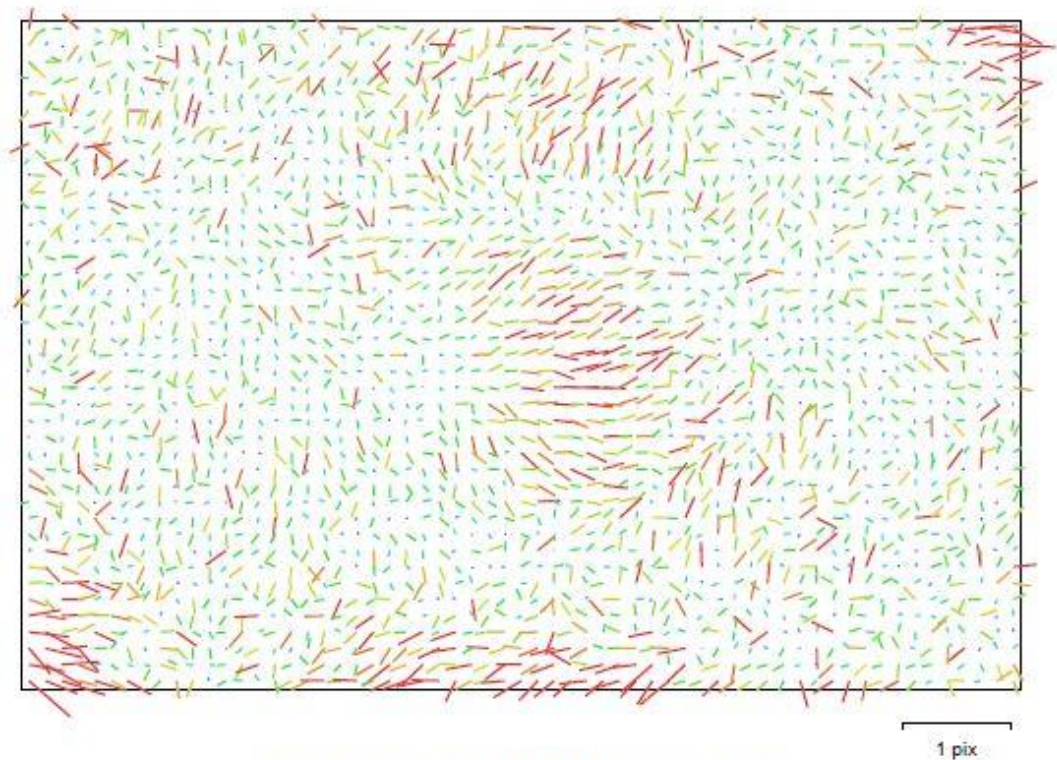


Fig. 2. Image residuals for ILCE-7R (35 mm).

### ILCE-7R (35 mm)

Type:	Frame	K1:	0.0517182
Fx:	7436.1	K2:	-0.223208
Fy:	7435.18	K3:	-0.00516931
Cx:	3713.51	K4:	0
Cy:	2477.28	P1:	0.000681507
Skew:	0.92986	P2:	0.00111866

## Ground Control Points

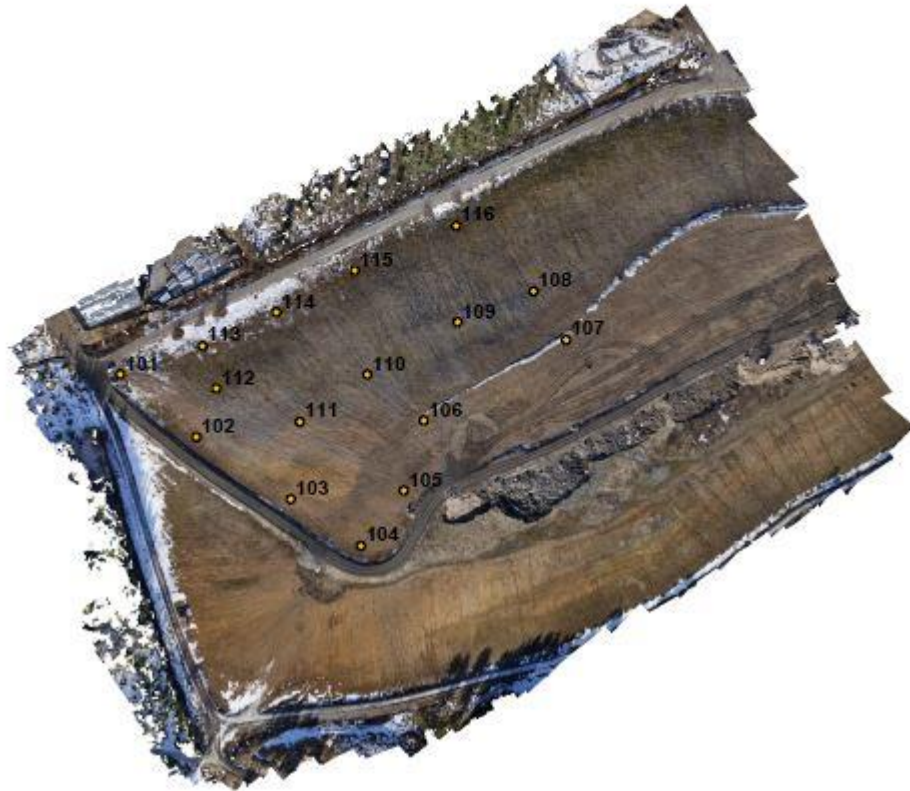


Fig. 3. GCP locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
101	-0.002109	-0.011348	0.009949	0.015238	17	0.083522
113	0.003293	-0.006588	-0.004016	0.008388	10	0.151619
114	0.001631	-0.010051	-0.006593	0.012131	10	0.097095
115	0.001725	-0.011798	-0.000644	0.011941	15	0.079922
116	0.013077	-0.014108	-0.010044	0.021701	16	0.101378
102	-0.004822	0.004651	0.003345	0.007488	12	0.158829
112	0.007868	-0.002238	0.005807	0.010031	16	0.112380
108	0.008893	0.012875	-0.000006	0.015648	9	0.082507
110	-0.004230	0.008925	0.006922	0.012061	11	0.123310
111	-0.008754	-0.002976	0.010261	0.013812	9	0.157649

<b>Label</b>	<b>X error (m)</b>	<b>Y error (m)</b>	<b>Z error (m)</b>	<b>Error (m)</b>	<b>Projections</b>	<b>Error (pix)</b>
109	0.010430	-0.007597	0.011860	0.017526	10	0.078778
103	-0.010831	0.014493	-0.023417	0.029592	9	0.118207
107	0.008876	0.021301	0.006065	0.023860	9	0.075944
104	-0.004737	0.002257	-0.006515	0.008365	8	0.114912
105	-0.006584	0.002811	0.010426	0.012647	8	0.097098
106	-0.013748	-0.000612	-0.013630	0.019369	8	0.094983
<b>Total</b>	<b>0.007947</b>	<b>0.010085</b>	<b>0.009749</b>	<b>0.016121</b>	<b>177</b>	<b>0.110289</b>

Table. 2. Control points.

## Digital Elevation Model

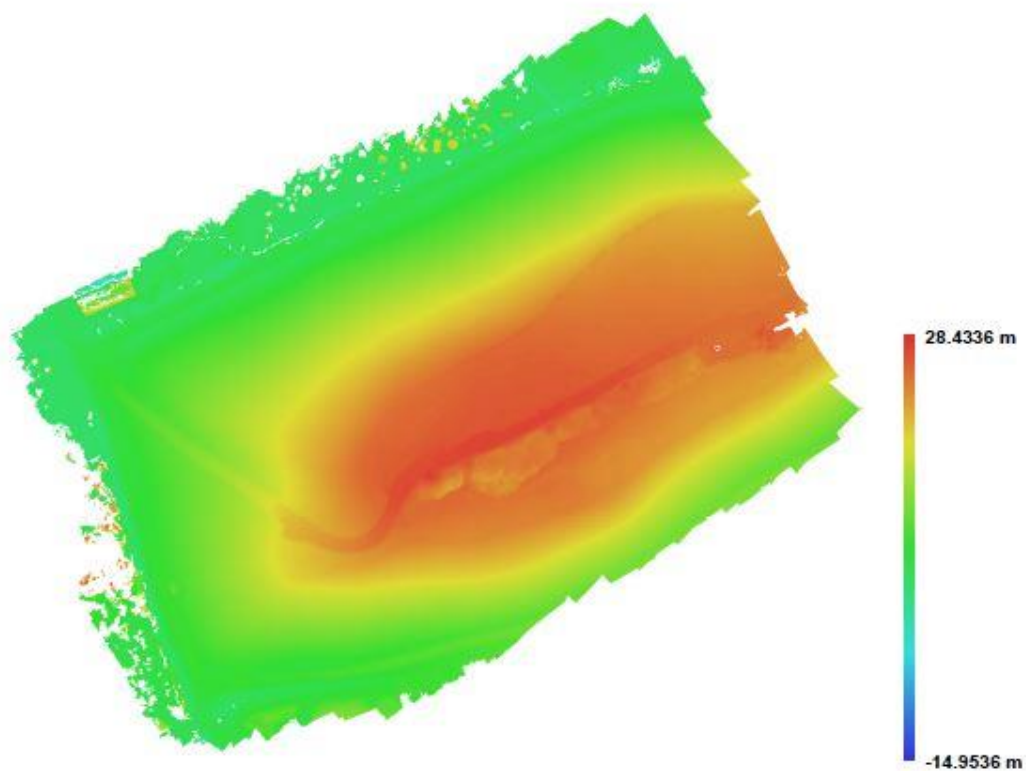


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.0394667 m/pix  
Point density: 642.006 points per sq m

## Agisoft Photoscan raportti 2

130 metrin korkeudesta lennetyn lennon prosessointiraportti.

# Agisoft PhotoScan

Processing Report  
26 March 2015





## Survey Data

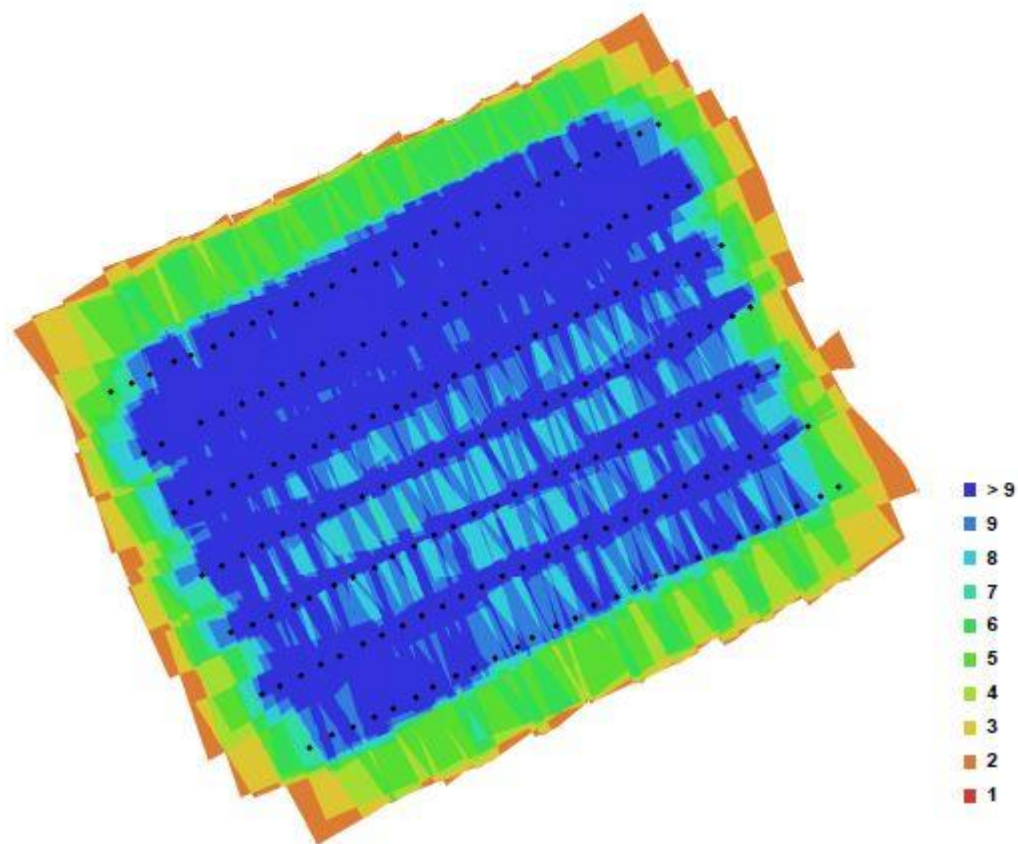


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	193	Camera stations:	193
Flying altitude:	104.303 m	Tie-points:	15282
Ground resolution:	0.0133729 m/pix	Projections:	149400
Coverage area:	0.152776 sq km	Error:	0.828133 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
SONY (35 mm)	7360 x 4912	35 mm	4.88967 x 4.88967 um	No
SONY (35 mm)	7360 x 4912	35 mm	4.88967 x 4.88967 um	No
SONY (35 mm)	7360 x 4912	35 mm	4.88967 x 4.88967 um	No
SONY (35 mm)	7360 x 4912	35 mm	4.88967 x 4.88967 um	No

Table. 1. Cameras.

## Camera Calibration

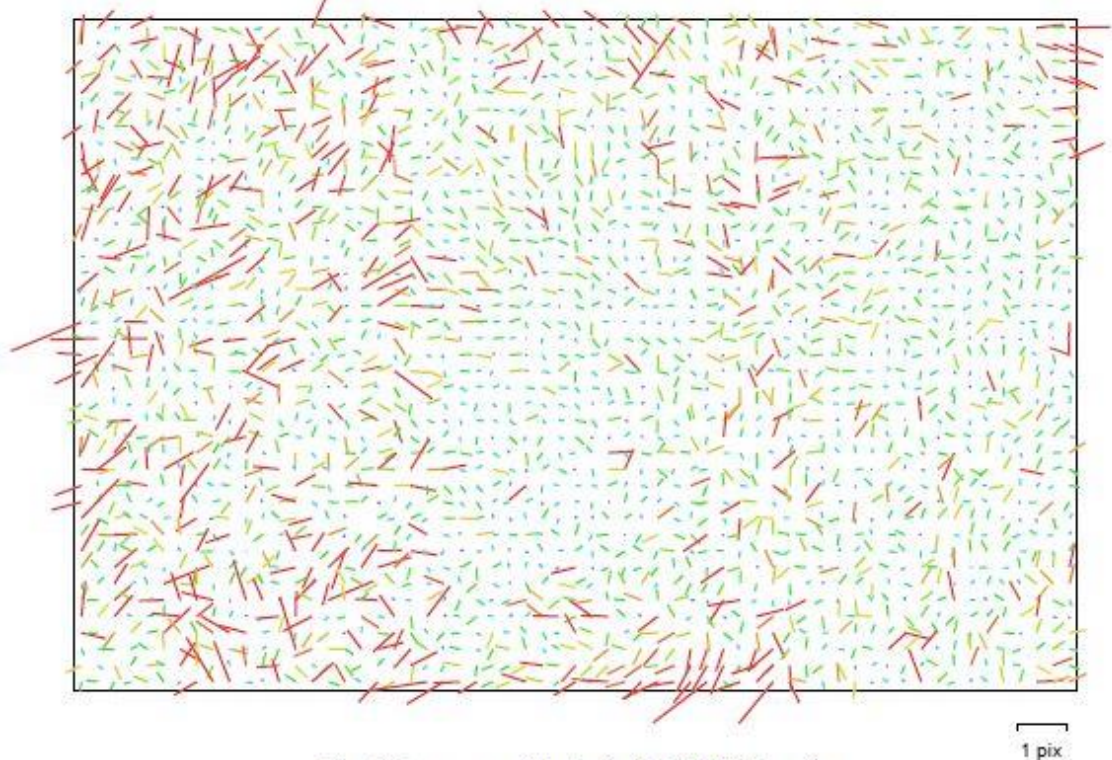


Fig. 2. Image residuals for SONY (35 mm).

### SONY (35 mm)

Type:	Frame	K1:	0.0528613
Fx:	7375.69	K2:	-0.233137
Fy:	7372.36	K3:	0.023599
Cx:	3710.99	K4:	0
Cy:	2481.51	P1:	0.000743811
Skew:	1.90867	P2:	0.00124067

## Camera Calibration

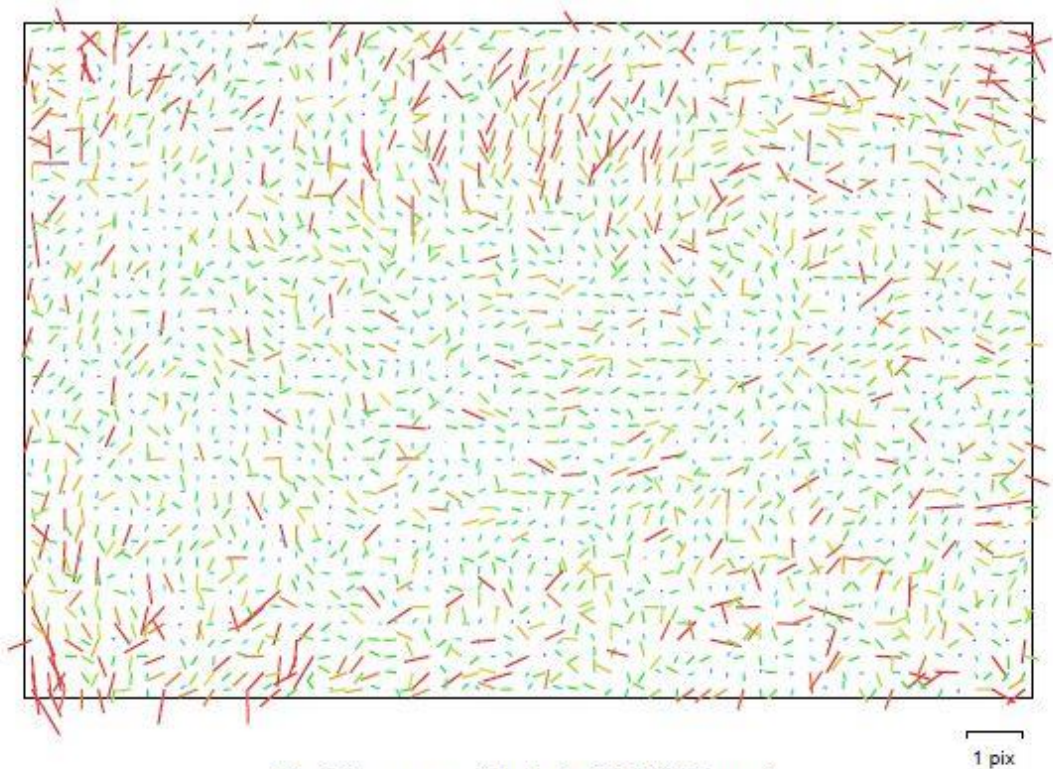


Fig. 3. Image residuals for SONY (35 mm).

### SONY (35 mm)

Type:	Frame	K1:	0.051655
Fx:	7398.72	K2:	-0.220408
Fy:	7396.47	K3:	-0.00384752
Cx:	3711.56	K4:	0
Cy:	2480.11	P1:	0.000713596
Skew:	2.10789	P2:	0.00104638

## Camera Calibration

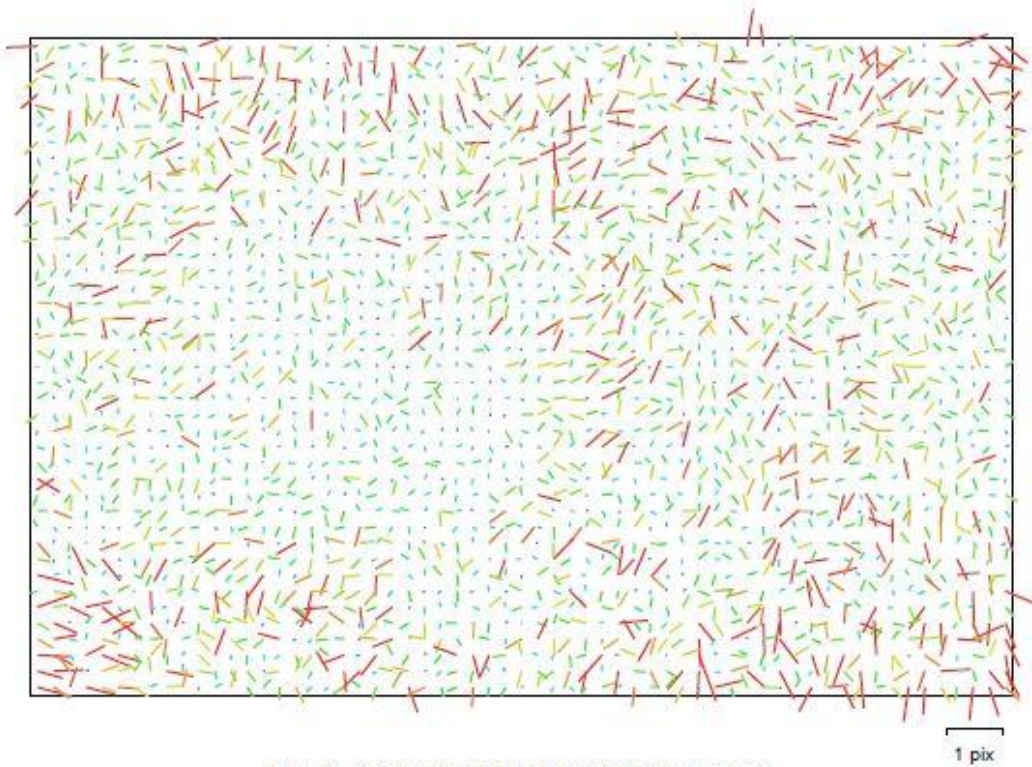


Fig. 4. Image residuals for SONY (35 mm).

### SONY (35 mm)

Type:	Frame	K1:	0.0533279
Fx:	7410.95	K2:	-0.229598
Fy:	7409.31	K3:	0.00850582
Cx:	3707.75	K4:	0
Cy:	2478.48	P1:	0.000759342
Skew:	1.53943	P2:	0.00114411

## Camera Calibration

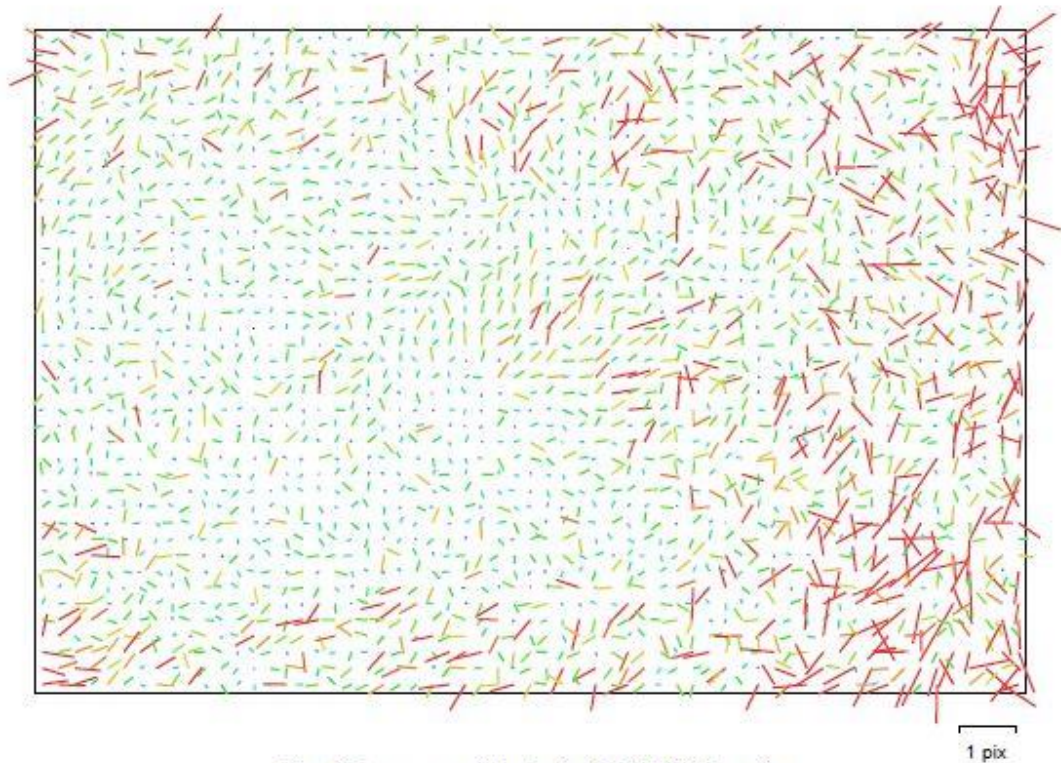


Fig. 5. Image residuals for SONY (35 mm).

### SONY (35 mm)

Type:	Frame	K1:	0.0518275
Fx:	7381.06	K2:	-0.217147
Fy:	7377.64	K3:	-0.0070864
Cx:	3711.94	K4:	0
Cy:	2473.83	P1:	0.000768311
Skew:	1.74837	P2:	0.000917596

## Ground Control Points

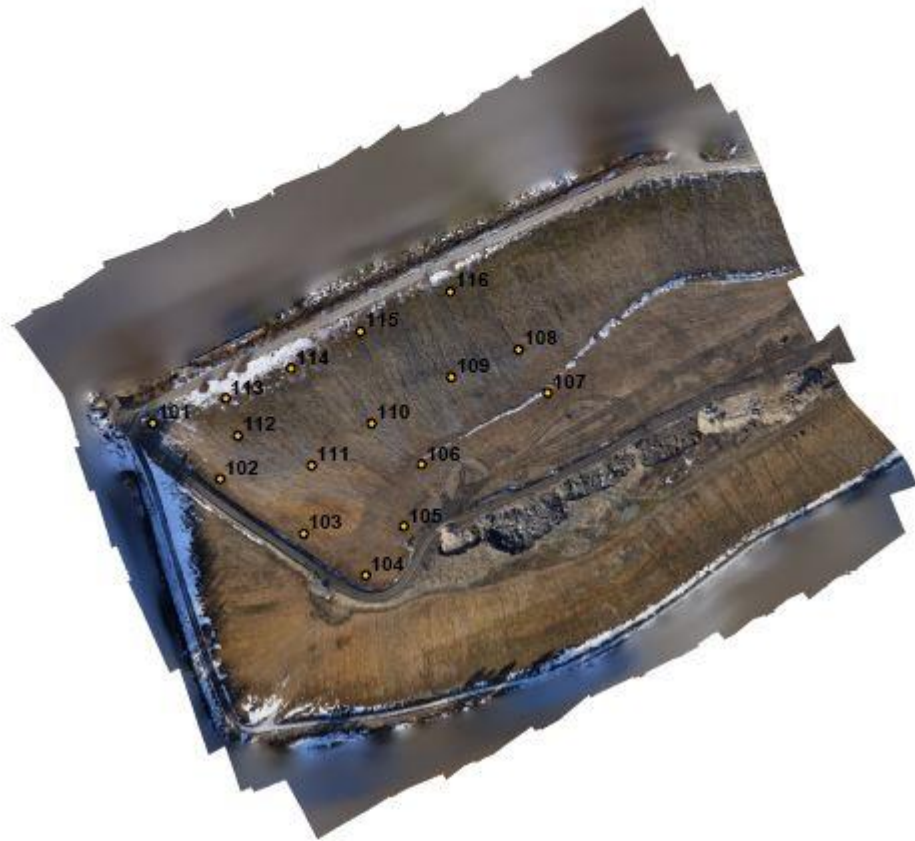


Fig. 6. GCP locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
102	-0.010001	-0.001128	0.015565	0.018535	15	0.185634
103	-0.005876	0.015226	-0.017445	0.023889	10	0.176878
105	-0.009174	0.006639	-0.011335	0.016023	10	0.122751
107	0.014712	0.018721	0.011481	0.026433	13	0.093044
109	0.012592	-0.003354	-0.011336	0.017272	10	0.125704
110	-0.003778	0.007060	-0.006586	0.010368	9	0.160500
111	-0.002035	0.012241	0.028141	0.030755	10	0.286448
112	0.002024	-0.000587	-0.002931	0.003609	12	0.253635
113	-0.017312	-0.003531	-0.015825	0.023719	15	0.241190
114	0.011552	-0.018683	0.005058	0.022541	15	0.277965

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
115	0.007266	-0.032555	0.005091	0.033743	17	0.122715
<b>Total</b>	<b>0.010010</b>	<b>0.014335</b>	<b>0.013755</b>	<b>0.022246</b>	<b>136</b>	<b>0.198577</b>

Table. 2. Control points.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
101	-0.012468	-0.023198	0.064913	0.070052	11	0.211775
104	-0.012030	0.019528	0.029436	0.037316	8	0.071400
106	-0.017870	-0.007833	-0.055131	0.058482	11	0.162542
108	0.018249	0.016788	-0.973284	0.973600	9	0.120911
116	0.018736	-0.027841	0.026038	0.042475	16	0.108081
<b>Total</b>	<b>0.016147</b>	<b>0.020188</b>	<b>0.437283</b>	<b>0.438046</b>	<b>55</b>	<b>0.144173</b>

Table. 3. Check points.

## Digital Elevation Model

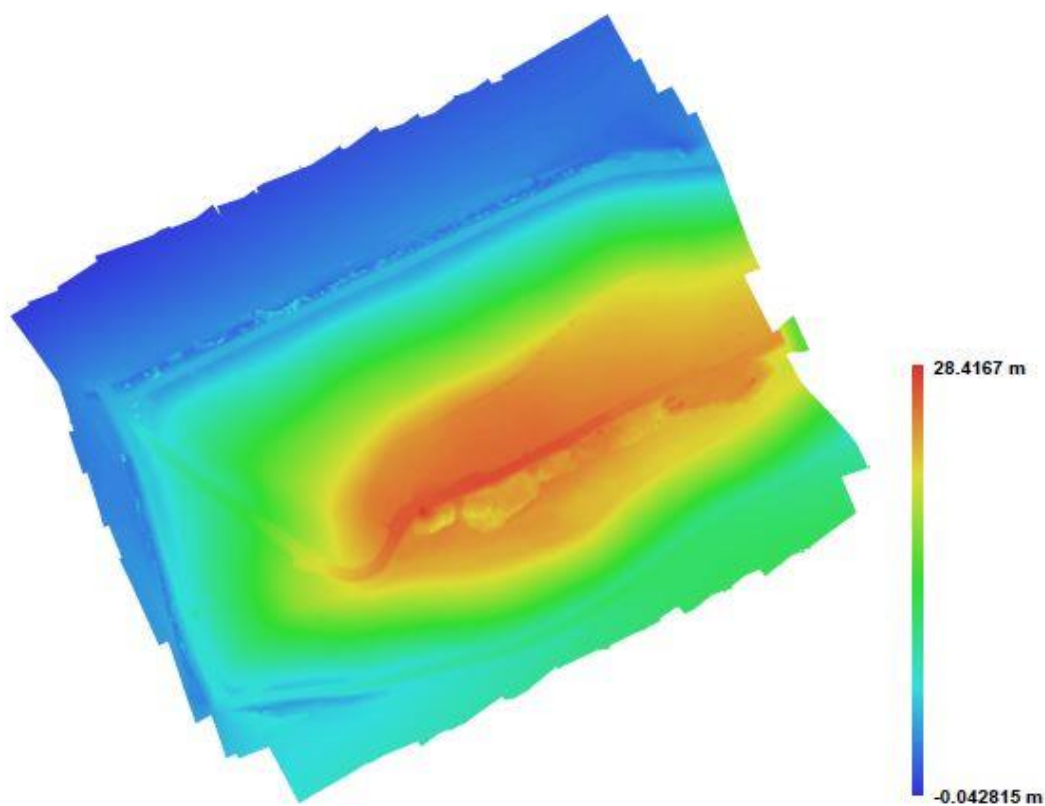


Fig. 7. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.0534917 m/pix  
Point density: 349.484 points per sq m