



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Isto Vainio

UAV-kaluston soveltuvuus, käytännöllisyys ja kustannustehokkuus turva-aunojen ja maastomallien mittauksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinöörityö

23.11.2018

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Isto Vainio UAV-kaluston soveltuvuus, käytännöllisyys ja kustannustehokkuus turveaumojen ja maastomallien mittauksessa 43 sivua 23.11.2018
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaajat	lehtori Ilkka Partonen
<p>Tämän insinöörityön tarkoituksena oli selvittää UAV-mittausmenetelmän kustannustehokkuutta ja käytännöllisyyttä suhteessa perinteiseen GPS-mittausmenetelmään tai takymetrikartoitukseen. Lopputulokseksi pyrittiin saamaan tutkimus UAV-laitteiston käyttökelpoisuudesta turveaumojen sekä maastomalleja mitatessa.</p> <p>Koemittauksia tehtiin kolmessa kohteessa. Mittaukset suoritettiin sekä UAV-kartoituksena että GPS- tai takymetrikartoituksena. Ilmakuvauksia tehtiin eri korkeuksilta, jotta laitteiston soveltuvuudesta kyseisiin mittauskohteisiin saatiin useampia vertailuaineistoja. Aumojen mitaustuloksien yhteneväisyyttä sekä mittauksiin kulunutta aikaa verrattiin eri mittausmenetelmien välillä. Taajamassa kuvatusa aineistosta luotiin pistepilvi sekä ortokuva, jonka avulla digitoitiin uusi maastomalli 3D-Win-ohjelmalla. Digitoitua aineistoa verrattiin samalla alueella takymetrillä mitattuun aineistoon tasokoordinaatistossa. Korkeuskoordinaattien vertailu suoritettiin vertaamalla takymetrikartoituksien korkeuskoordinaatteja UAV-kartoituksien perusteella muodostettuun pistepilveen. Korkeuserot luokiteltiin ja niiden jakaantuminen maastossa havainnollistettiin ortokuvan avulla. Aineistojen editointiin kuluva aika on olennainen osa kustannustehokkuutta, joten se otettiin huomioon kustannustehokkuusvertailussa.</p> <p>Aumojen kuutiotilavuudet eri mittausmenetelmien välillä havaittiin olevan lähellä toisiaan riippumatta lentokorkeudesta tai muista lentoasetuksista. Taajamassa takymetrillä kartoitetun maastomallin korkeuskoordinaatit sopivat UAV-aineistosta luodun pistepilven kanssa yhteen niiltä osin kuin ne oli kartoitettu alueilla, jossa kopterin ja kartoituskohteen välillä ei ollut esteitä. Rakennusten, autojen ja puuston läheisyydessä pistepilven pisteiden virhe kasvoi korkeuden osalta.</p> <p>Koemittauksien perusteella UAV-kartoitus todetaan käyttökelpoiseksi menetelmäksi aumojen mittauksiin tarkkuutensa osalta. Menetelmän kustannustehokkuus riippuu yhdellä mitaustalueella olevien aumojen lukumäärästä, koska pistepilvien prosessointi tapahtuu yksi mittausaineisto kerrallaan. Maastomallien kartoituksiin menetelmä tarvitsee tuekseen täydennyskartoituksia jollain muulla mittausmenetelmällä, mutta on kuitenkin tehokas tapa kartoittaa ja editoida uusia maastomalleja.</p>	
Avainsanat	UAV, turveauma, maastomalli, digitointi, pistepilvi

Author Title Number of Pages Date	Isto Vainio Suitability and cost-efficiency of UAVs in peat stack and terrain model measurements 43 pages 23 November 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructors	Ilkka Partonen, Senior Lecturer
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to determine the suitability and cost-efficiency of UAVs in peat stack and terrain model measurements. The study was done to compare the capability of a UAV to other, traditional measuring devices.</p> <p>The study was conducted by measuring three areas, two with peat stacks, and a city centre with both a UAV and a GPS. The total cubic volume of the peat stacks was calculated and compared to the volume measured with the GPS method. The photos captured above the city centre were processed and turned into an orthophoto. The orthophoto was later turned into a terrain model with 3D-Win.</p> <p>The comparison of the calculated and measured volumes revealed that they match relatively well. Furthermore, the terrain model was of good quality except in areas where the UAV was unable to capture, such as under trees and close to buildings.</p> <p>The study concluded that a UAV is a suitable tool for measuring peat stacks. In some cases it might not be the fastest but it is adequately accurate compared to other measuring devices. Using a UAV to create terrain models is fast but requires the use of other devices to produce a terrain model of good quality.</p>	
Keywords	UAV, GPS, terrain model, peat stack

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Yrityksen esittely	2
3	Miehittämätön ilmailu	3
3.1	Yleisesti	3
3.2	Tutkimuksissa käytettävä DJI Phantom 4 -alus	3
4	Turveauman mittaus	5
4.1	Mitä ovat turveaumat?	5
4.2	Aumojen GPS-mittaus	5
4.3	GPS-mittausten editointi	6
4.4	Auman mittaus UAV-kopterilla	7
4.4.1	Yksittäisen auman mittaus	8
4.4.2	Viiden auman mittaus yhdellä lennolla	8
4.5	UAV-mittausten editointi	9
4.5.1	Agisoft-editointi	9
4.5.2	3D-Win-editointi	10
4.5.3	Signaaliton editointi	11
4.6	UAV-kaluston soveltuminen auman mittauksiin	11
4.7	Mittausmenetelmien vertailu aumanmittauksen osalta	12
5	Taajama-alueen maastomallin mittaus	14
5.1	Maastomallimittauksen menettely ja sisältö	14
5.2	Taajamamaastomallin takymetrimittaus	14
5.3	GPS-mittausten editointi	15
5.4	Taajamamaastomallin UAV-mittaus	17
5.5	UAV-mittausten editointi	18
5.5.1	Agisoft-editointi	18
5.5.2	3D-Win-editointi	18
5.6	UAV-kaluston soveltuminen taajamamaastomallien mittaukseen	19

5.7	Mittausmenetelmien vertailu taajamamittausten suhteen	20
6	Luotettavan editointituloksen aikaansaamisen edellytykset	21
7	Kopteriaineistojen ja GPS-aineistojen keskinäinen vertailu	23
7.1	Editointikortti	23
7.2	Aumat	23
7.2.1	Sievin yksittäinen auma lennätyskorkeudesta 45 metriä	23
7.2.2	5 aumaa lennätyskorkeudesta 50 metriä	25
7.2.3	5 aumaa lennätyskorkeudesta 70 metriä	26
7.2.4	Tulosvertailujen pohdinta	28
7.3	Taajama	29
7.3.1	Taajama lennätyskorkeudesta 50	30
7.3.2	Taajama lennätyskorkeudesta 80 metriä	33
7.3.3	Tulosvertailujen pohdinta	35
8	Kalusto- ja kustannusvertailu	37
8.1	UAV-mittauksissa käytettävän kaluston kustannukset	37
8.2	Vaihtoehtoinen kopteri	37
9	Kustannus- ja kannattavuuslaskelmat	38
9.1	Kustannustehokkuus aumanmittauksissa	38
9.2	Kustannustehokkuus taajamamaastomalleissa	40
10	Yhteenveto	42
	Lähteet	43

Lyhenteet

UAV Unmanned aerial vehicle. Kartoitusmittauksiin tarkoitettu miehittämätön ilma-alus

1 Johdanto

Projekti tehtiin yhteistyössä Mittauspalvelu M Vainion kanssa, ja sen tarkoituksena oli selvittää UAV-mittausmenetelmän eli miehittämättömän ilmailualuksen käytännöllisyyttä, tarkkuutta ja edullisuutta verrattuna perinteiseen GPS-mittaukseen tai takymetrimittaukseen. UAV-mittalaitteella mitattiin sekä turveaumoja että taajamamaastomalli ja niiden tarkkuutta verrattiin samoista kohteista muilla mittausmenetelmillä kartoitettuihin mittausaineistoihin. Vertailuissa kiinnitettiin huomiota erityisesti UAV-kopterin soveltuvuuteen kyseisiin mittaustoimenpiteisiin sekä sen tuottaman aineiston tarkkuuteen suhteessa aineistoihin, jotka oli tuotettu GPS-paikantimella tai takymetrillä. Auman mittauksien osalta ratkaisevana tutkimuskohteena olivat aumojen kuutiotilavuudet ja maastomallin osalta korkeuserovirheiden määrä ja suuruusluokka.

Ennen maastotöitä valittiin koekäyttöön lennokki, jonka ominaisuudet vastaavat yrityksen tarpeita. Koelentoihin oli tärkeää valita sekä laatu- että hintatekijöiltään sellainen mittalaite, jonka yrittäjä voisi yritykselleen hankkia siinä tapauksessa, että tutkimukset osoittavat UAV-menetelmän olevan kannattava sen toiminnalle.

Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi on säätänyt määräyksen koskien miehittämätöntä ilmailua. Tämä määräyksen olennaisimmat pykälät oli sisäistettävä ennen lennätyksiä. Mittaukset tehtiin kahden päivän aikana, jonka jälkeen aineistot olivat käsiteltävissä Agisoft PhotoScan -ohjelmistolla. Turveaumamittauksista muodostettiin pistepilviä, jotka 3D-Win-ohjelmassa kolmioitiin massalaskentaa varten. Taajamassa mitatusta kopteriaineistosta muodostettiin ortokuva, jonka avulla oli mahdollista vertailla kopteriaineistoa ja takymetrimittauksia keskenään.

2 Yrityksen esittely

Tutkimus tehdään Mittauspalvelu M Vainio -nimiselle yritykselle, jonka toimipaikka on Pohjois-Pohjanmaan maakunnassa sijaitseva Haapajärvi. Yrityksen johtajan mukaan sen pääsääntöisenä toimialueena on oman maakunnan lisäksi Etelä- ja Keski-Pohjanmaan maakunnat. Yritys on toiminut vuodesta 2013 lähtien, ja se työllistää 2 maanmittausinsinööriä. Työn tilaajina ovat valtio, kunnat sekä yritykset.

Käytössä oleva mittauskalusto käsittää Trimblen 5600- ja S6-robottitakymetrit sekä Trimblen R8-2 GNSS- ja R8-3 GNSS -mittalaitteet. 3D-Win 6 on yrityksen pääsääntöinen mittaustietojen editointiohjelma.

Yrityksen yleisimpiä työtehtäviä ovat suunnittelupalvelut, joista tärkeimpinä soranottolupien laatiminen, turvetuotantoalueiden suunnitteleminen ja merkitseminen, yleiset massa- ja määrälaskennat sekä suunnitelmien maastoon merkintä. Rakennusmittauksien osalta yritys on erikoistunut perustusrakentamiseen sekä sisätila- ja julkisivuihin liittyviin mittauksiin.

Yhteistyö kuntien kanssa on pitänyt sisällään pohjakartan täydennykset, kaavojen laskennan sekä maastoon merkinnän, rakennusten maastoon merkinnän sekä lohkomisten maastotyöt kuten pyykitykset. Lisäksi toimintaa on vesihuoltolinjojen maastosuunnittelussa, merkinnässä ja mittauksessa sekä jo olemassa olevien verkostojen kartoituksissa.

3 Miehittämätön ilmailu

3.1 Yleisesti

Valokuvaamista tai mittaamista varten suunnitellut joko automaattipilotin tai kauko-ohjauksen turvin lentävät alukset ovat nimensä mukaisesti ilman kyydissä olevaa ohjaajaa toimivia laitteita [1]. Koostaan ja ominaisuuksistaan riippuen ne soveltuvat erilaisiin käyttökohteisiin. Tässä työssä tutkitaan maastomallin ja massalaskennan onnistumista ja suoritusnopeutta miehittämättömän ilmailun avulla. Teoksessa miehittämättömästä ilmailualuksesta käytetään termejä kopteri, UAV-kopteri ja lennokki.

Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi on säätänyt miehittämättömän ilmailualuksen koskeva määräyksestä. Yrityksen tai muun laitteen käyttäjän on rekisteröitävä aluksensa Trafille. Rekisteröinnissä ilmoitetaan perustietoja kuten laitteen tuleva käyttötarkoitus, käyttäjän omat tiedot sekä laitteen tekniset ominaisuudet. Kauko-ohjatun ilmailualuksen käyttöön ei vaadita lentotölupaa. [2]

3.2 Tutkimuksissa käytettävä DJI Phantom 4 -alus

Kuvauksissa käytettiin DJI Phantom 4 -kopteria (kuva 1). Laitteen lentoaika on 28 minuuttia, minkä vuoksi isojen alueiden mittaus on yhdellä lennolla haastavaa. Akkujen vaihtoon on syytä kiinnittää huomiota, jos on tarkoitus saada ehjiä kuvausaineistoja. Videolaatu on Full HD 4K 30fps. Aluksessa on törmäyksen estoa varten suunniteltu anturit, jotka estävät laitteen törmäämisen edessä oleviin kohteisiin. Laitteen huippunopeus on peräti 72 km/h, ja laite painaa 1380 grammaa. Kone sisältää myös 2 kompassia ja IMU-järjestelmän. [3]



Kuva 1. Tutkimuksissa käytetty kopteri [3].

4 Turveauman mittaus

4.1 Mitä ovat turveaumat?

Turveaumat ovat turvetuotantoalueilla sijaitsevia pala-, jyrsin- tai kuiviketurvekasoja, jotka turpeentuottaja kerää turvesoilta kesäaikana. Palaturvetta ja jyrshinturvetta käytetään energiantuotantolaitoksilla lämmön- ja sähköntuotantoon. Lisäksi palaturvetta voidaan käyttää myös kotitalouksissa lämmöntuotantoon. [4; 5.] Kuiviketurvetta käytetään karjatalouksissa lietteiden imeytyksen nopeuttamisessa sekä pehmikkeenä karjan makoilualustoilla [6]. Turveaumoja mitataan, koska tuottajan sekä ostajan on oltava tietoisia kaupan kohteena olevan hyödykkeen määrästä.

4.2 Aumojen GPS-mittaus

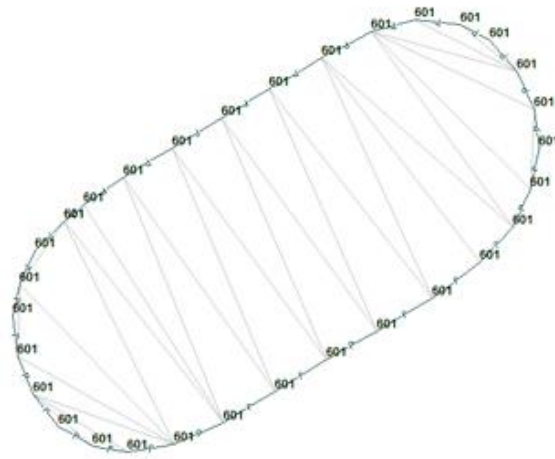
Kun turveaumoja mitataan GPS-mittalaitteella, on huolehdittava maastomallimittauksen peruseräilyistä. Jokainen mitattu piste piirtyy suorinta mahdollista reittiä lähimpiin mitattuihin pisteisiin. Maastonmuotoihin eli tässä tapauksessa aumojen taitteisiin on kiinnitettävä huomiota, jotta ylimääräisiä massoja ei pääsisi leikkautumaan mittausten eli maastomallin ulkopuolelle.

Mittaus on hyvä aloittaa mittaamalla auman alareuna eli pohja. Alareunan mittaus antaa mallille ulkoreunat sekä pohjalle korkeuskoordinaatit. Alareunaa kiertäessä on hyvä mitata myös noin 1,5 metrin korkeudelta auman alareunan yläpuolelta rinteestä pisteitä, jotta huippua kohti lähtevä kulma on mukana maastomallissa. Mikäli matka auman pohjan ja huipun välillä on useita metrejä, kannattaa mitata myös rinteiden keskikohdasta auman ympäri ulottuva pisterivi.

Aumojen vaippojen eli pohjan ja huipun välisien alueiden yläosia on yleisesti kahdenlaisia, terävähuippuisia sekä tasahuippuisia. Tasahuippuisten aumojen päällä on mitattava taitekohtien lisäksi hajapisteitä myös keskeltä aumaa tarkkuuden pitämiseksi hyvänä. Terävähuippuisissa aumoissa riittää huipun mittaaminen viivatoiminnon kanssa. Mittaukset tulee suorittaa siten, että pohjalla ja vaipalla on käytössä eri koodit. Taitekohdat mitataan aina viivatoiminnon kanssa.

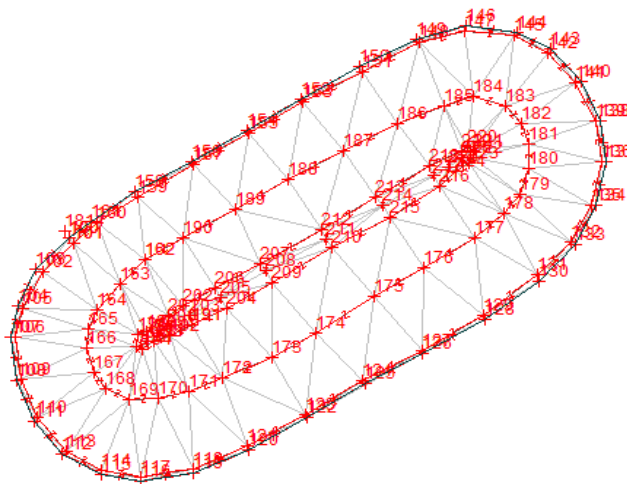
4.3 GPS-mittausten editointi

Pistetiedot kirjoitetaan 3D-Winiin GT-formaatissa. Aluksi yhdistetään viivamaisten koodien pääte ja alkupisteet, jolloin saadaan yhtenäiset viivat. Koodit tarkastetaan oikeiksi ja poistetaan vahingossa mitatut pisteet, mikäli sellaisia on tullut. Editointi aloitetaan kolmioimalla auman pohja (kuva 2). Pohja poimitaan taiteviiva komennolla uuteen elementtiin, jolloin sen itsenäinen muokkaus mahdollistuu. Kolmiointi suoritetaan siten, että jokainen pohjan pisteistä yhdistyisi viivalla johonkin toiseen pohjan pisteeseen. Viivojen on yhdyttävä myös leveyssuunnassa auman poikki, jolloin saadaan pohjan keskikohdan korkeustiedot massalaskentoja varten. Pohjan kolmioinnissa voidaan säätää pisintä mahdollista viivan pituutta, eli maksimisivua, ja pienintä mahdollista kulmaa, jos ne ovat tarpeen kolmioinnin selkeyttämiseksi tai aineiston tarkkuuden parantamiseksi.



Kuva 2. 3D-Win-otos auman pohjan kolmioinnista.

Vaipan kolmioinnissa (kuva 3) on myös tärkeää tarkastella automaattisen kolmioinnin tulosta ja korjailla viivojen sijoittumista, mikäli sille on tarve. Kolmiointiviivat ovat monesti joko liian pitkiä tai lyhyitä, ja niitä muokkaamalla pyritään varmistamaan mahdollisimman todenperäisen maastomallin syntyminen.



Kuva 3. 3D-Win-otos auman vaipan kolmioinnista.

Kun selkeä kolmiointi on saavutettu, voidaan aumalle laskea niin sanotut massat eli kuutiotilavuus. Massalaskennassa pohjan ja vaipan mallit yhdistetään ja asetetaan rajauspinnaksi aikaisemmin pohjasta luotu rajauselementti. Kuutioiden laskemisen jälkeen yrittäjä valmistaa turpeen tuottajalle aumakortit, joista käy ilmi, kuinka paljon turvetta aumassa on mittauksien perusteella.

4.4 Auman mittaus UAV-kopterilla

Pyhäjoen ja Sievin alueella tehtiin yhteensä kolme koelentoa. Kohteita tutkimuksissa oli kaksi, joista toinen mitattiin kahteen kertaan erilaisilla lento-ominaisuuksilla. Sievin turvesuolla sijaitseva yksittäinen auma mitattiin huonojen tuuliolosuhteiden vuoksi vain kerran. Ensimmäinen tarkasteltava mittauskohde on yksittäinen auma Sievissä. Aumojen lisäksi mitattiin kaksi taajamamaastomallia Reisjärven keskustasta. Näitä mittauksia tarkastellaan omassa luvussaan.

4.4.1 Yksittäisen auman mittaus

Aluksi mitattavan kohteen ympärille sekä auman päälle asetettiin yhteensä 6 signaalia. Signaalin tarkoitus on tarkentaa kopterin ottamien kuvien tarkkuutta jälkilaskentavaiheessa. Kun signaalit oli asetettu tukevasti maahan paikalleen, oli vuorossa niiden mittaus GPS-paikantimella. Kukin signaali mitattiin kahdesti ilman statiivia ja laskettiin niiden keskiarvo. Kahden mittauksen keskiarvo katsottiin riittäväksi. Myöhemmin mitattujen signaalien koordinaatit yhdistetään kopterin kuvaamaan aineistoon, mikä mahdollistaa mahdollisimman tarkkaan lopputulokseen pääsemisen.

Lennoikin ohjausta varten asennettiin iPhone 5s -matkapuhelimeen Pix4Dcapture-ohjelma. Sovelluksen avulla mahdollistui kopterin automaattinen lennättäminen, jota hyväksikäyttäen kaikki lennätykset suoritettiin. Käytännössä kaikki kopterin ohjaukseen eli mittaustyöhön liittyvä tehtiin matkapuhelimelta käsin. Aluksi valittiin sovelluksesta oikea kopterityyppi sekä lennettävän kuvion muoto. Sovelluksessa oli mahdollista valita polygoninen tai suorakulmainen muoto. Mittaus suoritettiin suorakulmaisella alueella. Lisäksi valittiin kuvaavan kameran kulma sekä kuvien pituus- ja sivupeitto. Kun koneelle valitaan lentokorkeus, asettaa se automaattisesti pikselikoon. Koneen lentonopeus valittiin keskinopealle ja lentosuunta tuulen sivusuuntaisesti. Napakan tuulen vuoksi lentokorkeudeksi valittiin 45 metriä.

Lennätyksen kesto signaalien asennuksien kanssa eli työmaalla vietetty kokonaisaika oli 40 minuuttia. Auman mittaaminen perinteisellä GPS-mittauksella kesti 30 minuuttia. Kopterin aika ilmassa oli 8 minuuttia.

4.4.2 Viiden auman mittaus yhdellä lennolla

Tässä mittauksessa asetettiin myös aluksi signaalit, minkä jälkeen ne mitattiin GPS-paikantimella kahden mittauksen keskiarvona. Kopterilla mittaaminen toistaa samoja ruutiineja riippumatta siitä, mitataanko sillä tarkkaa vai suurpiirteistä maastomallia. Erona yksittäisen auman mittaukseen oli oikeastaan vain alueen suurempi pinta-ala. Käytännössä se tarkoitti sitä, että signaalien asentaminen ja kerääminen kesti hieman kauemmin pidempien etäisyyksien johdosta.

Jotta tutkimuksiin saataisiin enemmän hajontaa ja näkökulmia, päätettiin kohteesta ottaa kaksi mittausta, toinen 50 metrin korkeudesta 85 %:n pituuspeitolla ja 60 %:n sivuttaispeitolla. Toinen mittaus otettiin 70 metrin korkeudesta samalla pituuspeitolla, mutta sivuttaispeitoksi asetettiin 70 %.

50 metrin korkeudesta mitatun lennon kesto aika oli 8 minuuttia ja 21 sekuntia. 70 metrin korkeudelta mitattu lento kesti lähes yhtä kauan aikaa. Tässä kohteessa kopterin käytöstä oli selvää ajallista säästöä. Signaalien asennuksineen ja kopterin lennätyksineen kohteessa meni karkeasti 50 minuuttia kahdelta mieheltä. Yhdeltä työmieheltä yhdellä lennolla kohteessa olisi mennyt arviolta reilu tunti. Perinteisellä GPS-mittauksella viiden kyseisen kokoisen auman mittauksessa aikaa kuluu yli 2 tuntia.

4.5 UAV-mittausten editointi

4.5.1 Agisoft-editointi

Tässä työssä pistepilvien laskenta suoritettiin Agisoft PhotoScan Professional -ohjelmalla. Kopterin ottamat valokuvat siirretään muistikortilta tai matkapuhelimen muistista tietokoneen kovalevylle, minkä jälkeen ne ladataan ohjelmalle. Aineisto tarvitsee usean käsittelyn, joista ensimmäinen on kuvien asettaminen riviin, jonka seurauksena valokuvista syntyy ensimmäinen pistepilvi. Tässä työvaiheessa valitaan pistepilven laaduksi *high*, *medium* tai *low*. Tutkimuksissa kaikki pistepilvet käsiteltiin tässä vaiheessa *medium* toiminnolla.

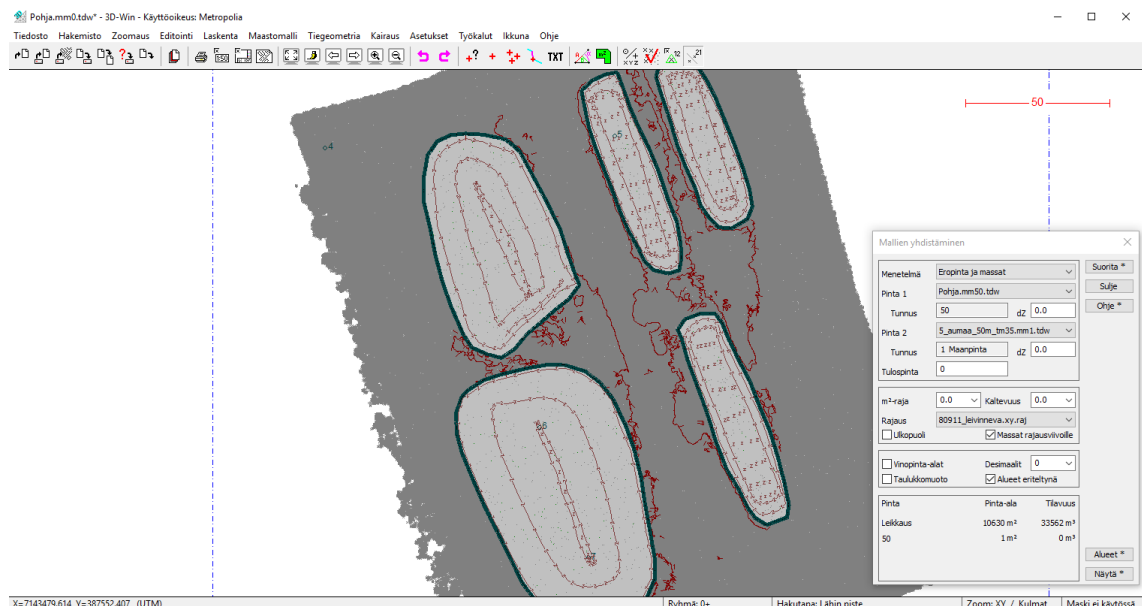
Seuraavaksi aineistolle tehdään mesh-toiminto, minkä jälkeen valokuvista täytyy paikallistaa signaalit. Käytännössä tämä tapahtuu etsimällä jostain valokuvasta jokin signaali ja painamalla hiiren oikeaa näppäintä signaalin keskellä ja luomalla keskikohtaan uusi markkeri, joka toimii signaalin keskikohdan osoittajana. Filter photos by markers -toiminnolla sovellus näyttää vain ne signaalit, joista kyseinen markkeri löytyy. Jokainen markkeri kohdistetaan mahdollisimman keskelle signaalia. Tämä työvaihe tehdään kaikille signaaleille. Asetuksista säädetään tarkkuus, joilla signaalien keskikohdat on mitattu 25 millimetriin.

Seuraavaksi tuodaan signaalien koordinaatit Agisoft-ohjelmaan. Tiedosto, jossa koordinaatit ovat, on ensin muutettava txt-muotoon. Koordinaattien tuontivaiheessa on tärkeä tarkistaa, että signaalipisteiden koodaus on yhtenevä sekä mittaustiedostossa että ohjelmassa. Ennen koordinaattien tuontia on vaihdettava ohjelman asetuksiin sama koordinaattijärjestelmä, mitä mittauksissa on käytetty.

Nyt pistepilvi voidaan optimoida ja sen jälkeen tehdä tiheä pistepilvi toiminnolla rakenna tiheä pistepilvi. Tiheään pilveen voi tekijä myös itse määrittää pistetiheydeksi *ultra-high*, *high*, *medium* tai *low*. Latauksen jälkeen pisteet ovat valmiit siirrettäväksi toiseen formaattiin massalaskentoja varten. 3D-Win lukee las-formaattia, joten pistepilvi kirjoitetaan tähän muotoon.

4.5.2 3D-Win-editointi

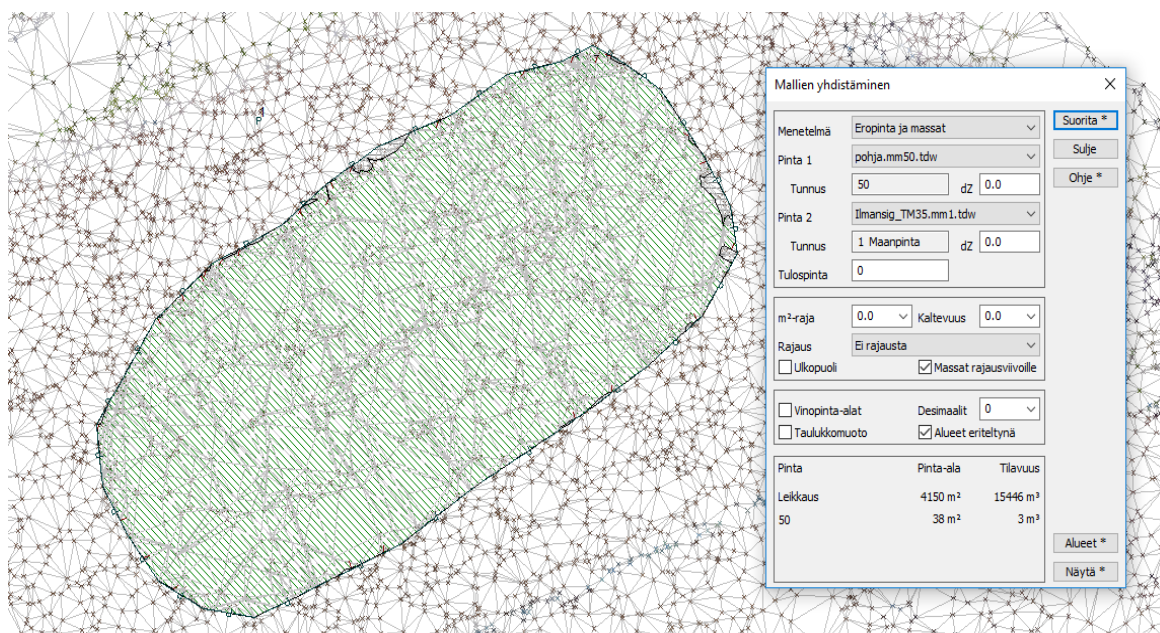
Massalaskennat eivät poikkea juurikaan GPS-mittauksien editoinnista. Signaalitiedoston avulla on selkeää tarkastella kolmioidun pistepilviverkon ja GPS-mittauksen keskinäistä virhettä. Hyväksi havaittu tapa laskea aumojen massat on liittää GPS-paikantimella mitattu auman pohja pistepilven tueksi. Pohjalle tehdään rajaustiedosto ja yhdistetään kolmioitu pohja sekä kolmioitu pistepilvi (kuva 4). Massat voidaan laskea rajaustoimintoa hyväksikäyttäen myös usealle aumalle yhdellä prosessoinnilla.



Kuva 4. 3D-Win-otos, jossa on laskettuna viiden auman kuutiotilavuus.

4.5.3 Signaaliton editointi

Kuutiotilavuudet voidaan laskea myös ilman signaaleja tehdyllä prosessoinnilla. Agisoft-ohjelmassa pistepilvi prosessoidaan vain kuvien tasaus- ja sijoitus-toiminnolla ja kirjoitetaan pistetiedot las-formaattiin. 3D-Win-ohjelmalla luodaan uusi viiva kuvaamaan auman alareunaa. Tämän jälkeen kolmioitu pohja ja kolmioitu pistepilvi yhdistetään (kuva 5). Tekniikan ongelmana ovat epätarkat koordinaatit, jotka johtuvat signaalien puutteesta sekä hieman totuudesta poikkeavasta alareunan sijainnista.



Kuva 5. 3D-Win-otos, jossa pohja on poimittu pistepilvestä ja mallit yhdistetty.

4.6 UAV-kaluston soveltuminen auman mittauksiin

Riippumatta siitä, onko mitattavalla alueella yksi vai useampi aumaa, on signaalien levittäminen ja asentaminen nopeaa ja yksinkertaista, koska niiden etäisyydet toisistaan eivät kasva kovin suuriksi. Tutkimuksissa tehdyissä mittauksissa suurin signaalien välinen etäisyys oli noin 250 metriä. Turvetuotantoalueet ovat tasaista turvesuota, minkä johdosta signaalien levittämisen vuoksi ei tarvitse kiertää esteitä kuten järviä tai isoja kalliota.

Alueet ovat aavoilla, joissa ei juuri koskaan ole puita tai rakennuksia peittämässä näkyvyyttä esimerkiksi signaaleihin tai aumoihin. Myöskään vaaraa lennokin törmäämiselle erilaisiin esineisiin tai rakennuksiin nousun tai laskun aikana ei ole, koska maan pinnalla on runsaasti aavaa maaperää nousua ja laskua varten. Sähkölinjat auma-alueilla ovat myös harvinaisia, joten lennättäminen suoalueilla on turvallista.

Vähäpuustoisilla aavoilla on myös omat huonot puolensa. Vaikka kopteria on turvallista lennättää matalilla korkeuksilla, vähäpuustoiset aavat ovat usein tuulisia paikkoja. Tuuli aiheuttaa ongelmia kopterin lentämiseen. Mikäli lennetään sivusuunnassa tuuleen nähden, on vaarana, että kopteri kallistuu tuulen vaikutuksesta. Jos taas lennetään tuulta vastaan, joutuu pienehköjen koptereiden suorituskyky äärirajoille. Lisäksi tuulta vastaan lentäminen kuluttaa laitteiston akkua huomattavasti enemmän kuin tyynessä lennättäessä.

DJI Phantom 4 -kopteri yhdistettiin iPhone 5s -matkapuhelimeen mittauksia tehdessä. Yhdellä täydellä kopterin akulla lennättää hyvissä olosuhteissa kaksi kappaletta 10 minuuttia kestäviä mittauksia. Tässä ajassa tutkimuksissa käyttämämme matkapuhelimen akku oli laskenut täydestä sadasta prosentista kymmeneen prosenttiin. Muiden matkapuhelimien akun kesto jäi tutkimuksissa testaamatta, mutta mittauskokemusten perusteella on hyvä ottaa työmaalle virtapankki tai autolaturi matkapuhelimen latausta varten.

4.7 Mittausmenetelmien vertailu aumanmittauksen osalta

Aumanmittaus GPS-paikantimella ja UAV-kalustolla ovat hyvin erilaisia toimenpiteitä. Mikäli auman alareuna on selkeä, on lennätys ja kuutiotilavuuden laskenta mahdollista tehdä ilman pohjan erillistä mittausta. Tällöin tarkkuus heikkenee jonkin verran, mutta sekä editointi että mittaus ovat nopeammin suoritettu. Tarkempi menetelmä on kuitenkin mitata auman pohja ja liittää se pistepilven tueksi massalaskentaan.

UAV-laitteella mitatun aineiston editointi on kaikissa tapauksissa huomattavasti hitaampaa kuin GPS-paikantimella mitattu aineisto. GPS-aineiston voi suoraan käsitellä esimerkiksi 3D-Win-maastokartoitusohjelmalla, kun taas UAV-aineisto on ensin käsiteltävä

Agisoft-ohjelmalla, ennen massalaskentaa. Pienehköjen maastotöiden vuoksi ei kannata käyttää kopteria, koska editointi on huomattavan työlästä ja pitkäkestoista.

Yhden auman mittaaminen GPS-paikantimella kestää koosta riippuen noin 20–50 minuuttia. Mitä suurempi on auma, sen kauemmin aikaa mittaaminen vie. UAV-kopterilla yhden auman mittaukseen menee signaalien asennuksineen ja keräyksineen sekä pohjan mittauksineen aikaa noin 35–50 minuuttia. Kun tähän aikaan lisätään vielä pistepilven käsittelyyn kuluva aika, voidaan todeta, että yksittäisen auman mittaus on kannattavampi suorittaa perinteisellä GPS-paikantimella.

Samalla läjitysalueilla sijaitsevien aumojen määrän kasvaessa kolmeen tai siitä useampaan kasvaa myös kopterilla mittaamisen hyötyarvo. Signaalien asentamiseen, mittaukseen ja editoimiseen käytettävä aika on suurin piirtein sama kuin yhtä aumaa mitattaessa. Editoisella tässä tarkoitetaan markkereiden liittämistä valokuvissa näkyviin signaaleihin. Vaikka alueella on useampi auma, signaalien keskikohdat osoitetaan markkereilla vain kerran. Usean auman editointi ei siis vie markkereiden asentamisen osalta enempää aikaa kuin yhden auman editointi. Jokainen aineistossa oleva kuva toki kasvattaa pistepilven prosessointiaikaa, mutta ei ratkaisevasti. Myöhemmin tässä työssä tarkastellaan enemmän editointiin liittyviä muuttujia ja aikatekijöitä.

Tilanteissa, joissa työmaat sijaitsevat kaukana yrityksen toimipisteeltä, on kannattavaa käyttää mahdollisimman paljon kopteria. Tällöin yrittäjä ehtii yhden työpäivän aikana mitata enemmän maastotöitä, mikä tarkoittaa vuositasolla huomattavaa työpäivien ja kilometrien säästöä.

UAV-mittaustapa on riskialttiimpi sääolosuhteille kuin GPS-mittaus. Tuuli ja sade eivät normaalisti estä työmiestä mittaamasta turveaumoja, mutta ne voivat pilata kopterien tuottaman valokuvamateriaalin käyttökelvottomaksi tai olla kokonaan esteenä koneen lennättämiselle.

5 Taajama-alueen maastomallin mittaus

5.1 Maastomallimittauksen menettely ja sisältö

Maastomallin tarkoitus on muodostaa maanpinnan pintamalli. Se muodostuu maastossa mitatuista viivamaisista kohteista, jotka on mitattu luokitetulla taiteviivalla, sekä pistemäisistä kohteista, jotka on mitattu ilman viivatoimintoa. Maastomalli sisältää myös pintamallin ulkopuolelle tarkoituksella jätettyjä kohteita, jotka on mitattu eri pintatunnuksella. Yleensä maastomalli tuotetaan tie-, rata- tai rakennussuunnittelua varten. Lisäksi kaupungit tai kunnat voivat tilata maastomalleja pohjakarttojen luontia tai päivittämistä varten.

Tuotettavan maastomallin tarkkuusmääräykset ovat tilaajasta riippuvaisia. Jokin tilaaja ei tarvitse dokumentoitua todistusta mittausaineiston tarkkuudesta, kun taas toinen tilaaja voi olla hyvinkin vaativa aineiston maantieteellisen paikkansapitävyyden suhteen. Elinkeino- ja liikenneviraston omien ohjeistuksien mukaan yksittäisten kohteiden välinen keskivirhe saa olla enintään 50 mm. [7].

5.2 Taajamamaastomallin takymetrimittaus

Tässä tutkimuksessa esiteltävä kohde on Reisjärven keskustassa sijaitseva alue. Mittaus suoritettiin takymetrillä laajemmin kuin UAV-menetelmällä. Tämä mahdollistaa signaalien ulkopuolisten kartoitustietojen vertailun. Toisin sanottuna voidaan tarkastella, onko keskimääräinen pisteiden välinen virhe suurempi signaalialueen ulkopuolella kuin sen sisällä.

Pintamalliin sisältyviä kohteita olivat asfaltin reunat, kuviorajat, pientareet, luiskan ylä- ja alareunat, ojanreunat sekä ojanpohjat. Lisäksi yhteneväisen elementin, kuten nurmikon, maastonmuotojen muutoksia mitattiin myös hajapisteinä. Hajapisteitä lukuun ottamatta muu pintamalliin tuleva aineisto mitattiin viivatoiminnolla. Kaikki pintamalliin tulevat kohteet saivat mitatessa pintatunnuksen 1.

Pintamallin ulkopuolelle jäävät kohteet mitattiin pintatunnuksella 9. Maastokartoitusohjelmisto 3D-Win tunnistaa pintatunnuksen 9 ja sulkee sillä mitatut kohteet kolmioinnin

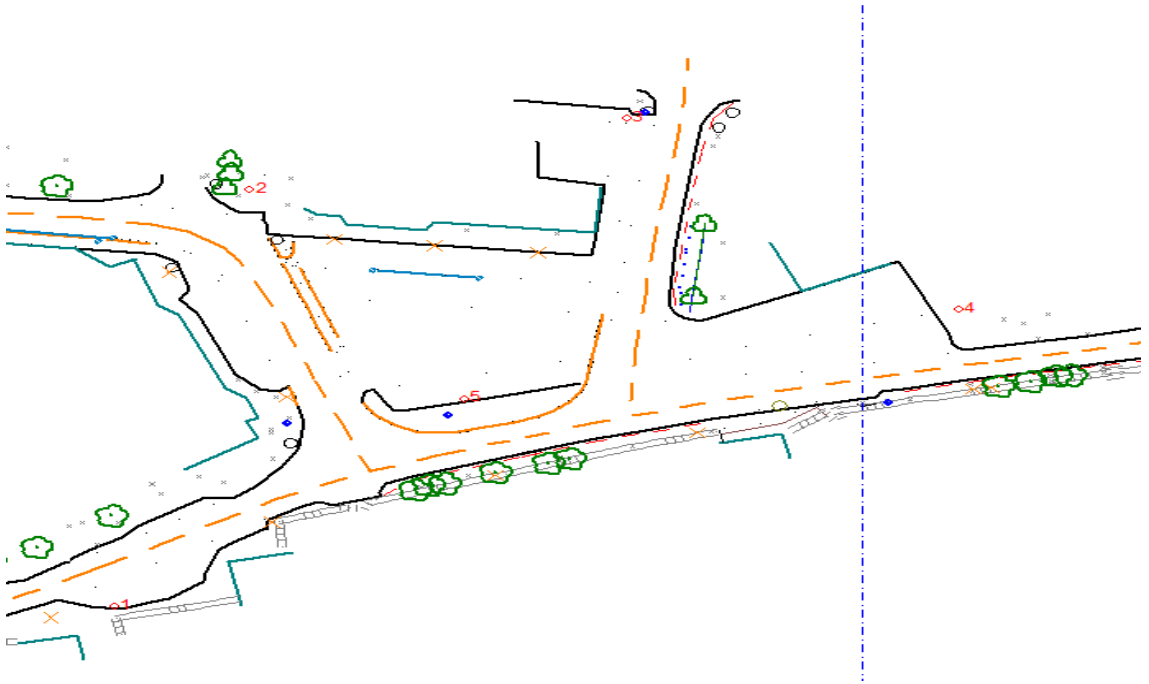
ulkopuolelle. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi jätevesi- ja hulevesikaivon kannet, rummut, purku- ja imuputket, sähkökaapit, puistomuuntajat, postilaatikot, liikennemerkit ja puut. Jokaiselle kohteelle on sille ominainen koodi. Esimerkiksi kaikki asfaltinreunat saavat koodin 122. Niiden viivanumerot kuitenkin vaihtuvat uuden asfaltinreunan alkaessa.

Maastomallin mittaaminen olisi sujuvaa myös Trimblen GPS-paikantimessa olevan pikapistemittaustoiminnon avulla. Mittausnäytölle saa ohjelmoitua useita eri mittaustapoja, joille voi kaikille ohjelmoida oman koodin sekä pinta- ja viivatunnuksen. Tällä toiminnolla säästytään usealta ylimääräiseltä koodaustoimenpiteeltä. Lisäksi eri kohteiden välinen mittaaminen sekalaisessa järjestyksessä on nopeaa, koska viiva- ja pintatunnuksia tai koo-deja ei tarvitse vaihtaa mittauksien välissä sen jälkeen, kun ne on kerran tallennettu mit-talaitteelle.

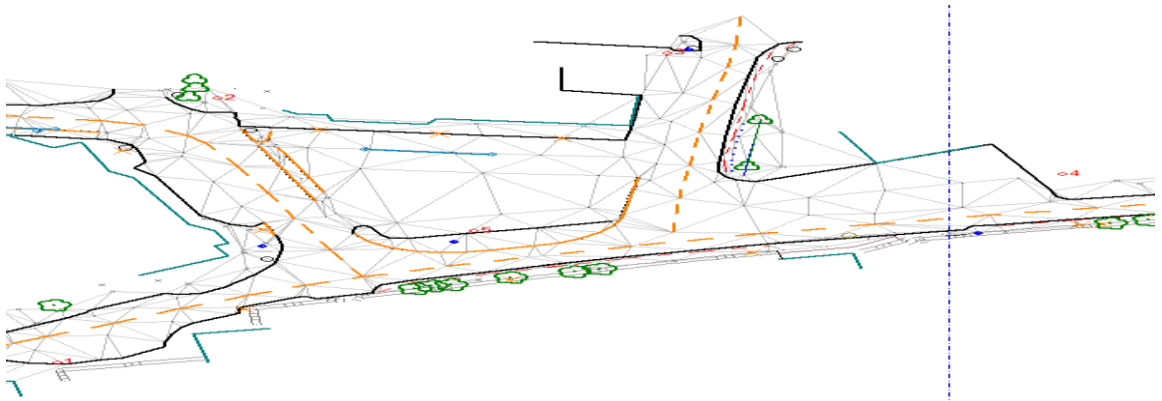
5.3 GPS-mittausten editointi

Koska Mittauspalvelu M Vainion rutiiniluontoiset työmaat eivät aina sisällä GPS-paikantimella mitattujen maastomallien kolmiointia, käsitellään sitä tässä tutkimuksessa vain pintapuolisesti. Kuitenkin on hyvä saada kolmioitujen maastomallien osalta vertausaineisto GPS-mittausten ja UAV-mittausten välille.

Maastomallin editointi koostuu kahdesta osasta: tiedoston siistimisestä (kuva 6) sekä kolmioinnista (kuva 7). Tiedoston siistimisellä tarkoitetaan mitattujen kohteiden koodien ja pintatunnusten tarkistamista sekä nollakorkojen tai vahingossa väärästä paikasta mitattujen pisteiden poistamista ja lisäksi taiteviivojen oikean sijainnin tarkistamista. Kolmioitavaksi tulisi jättää vain maanpinnan kiinteät rakenteet, eli ennen kolmiointia on muille kohteille annettava pintatunnus 9. Kolmioitaessa pinta 9 määrätään poistettavaksi. Kolmiointi voidaan tehdä myös määrittämällä kolmiointiin mukaan tulevat pintatunnukset erikseen. Maastomallin lopullinen tarkkuus riippuu eniten maastomittaajan huolellisuudesta. Mikäli halutaan saada aikaan todenperäinen maastomalli, on maastonmuodot hyvä mitata niiden taitekohdista ja olosuhteisiin nähden riittävällä pistevälillä.



Kuva 6. Maastokartoitusaineisto, josta on poistettu kartoitusvirheet ja yhdistetty viivat.



Kuva 7. Kolmioitu maastokartoitusaineisto.

Kolmioinnin jälkeen voidaan ylimääräisiä viivoja sekä pisteitä muokata. Pääasiassa kolmioiden kokoja muokataan sopivimmiksi sekä poistetaan liiallisia kolmioita ja lisätään uusia kolmiointeja. Kolmioiden koko ja ulottuvuus riippuu usein siitä, miten paljon

muutoksia mitattavan kohteen muodoissa on. Joka tapauksessa selkeyteen on aina pyrittävä.

5.4 Taajamamaastomallin UAV-mittaus

Reisjärven keskusta-alueella suoritettiin kaksi lentoa. Sääolosuhteet lentojen välillä kerkesivät muuttua pilvipoudasta auringonpaisteeseen. Ensimmäinen lento päätettiin ottaa matalalta pienillä pituus- ja sivupeittoisuuksilla. Ratkaisuun päädyttiin, koska kyseinen mittaus oli koko projektin ensimmäinen ja sillä pyrittiin samalla tutustumaan kuvamateriaalin laatuun ja koneen käyttäytymiseen. Signaaleja alueelle asennettiin viisi kappaletta ja ne kaikki mitattiin GPS-paikantimella neljän mittauksen keskiarvona statiivin kanssa. Signaalien sisäisestä alueesta ei haluttu isoa editoinnin selkeyttämisen vuoksi. Kopterin lentämän alueen pinta-ala oli molemmissa mittauksissa sama: 201 x 159 metriä.

Ensimmäinen mittaus mitattiin 50 metrin korkeudelta 80 %:n pituuspeitolla ja 60 %:n sivuttaispeitolla (kuva 8). Laite asetti yhden pikselin kooksi tällä korkeudella 2,19 senttimetriä, jonka katsottiin olevan riittävä kyseisen tarkkuusluokan mittaukseen. Kameran kulma asetettiin suoraan alaspäin eli 90 asteeseen. Tuuliolosuhteet olivat mittaushetkellä noin 2–3 metriä sekunnissa. Kopterin aika ilmassa oli 6 minuuttia 31 sekuntia. Materiaaliksi lennätyksestä saatiin 96 valokuvaa.

Toista lennätystä ennen tarkasteltiin ensimmäisen lennätyksen kuvia ja erityisesti signaalien näkyvyyttä ja selkeyttä. Koska alueella olevan puuston ja kirkontornin vuoksi lentokorkeutta ei ollut mahdollista laskea, päätettiin seuraava koelento tehdä 80 metrin korkeudesta. Lisäksi pituuspeitoksi muutettiin 90 % ja sivuttaispeitoksi 70 %. Lennätyskorkeuden muutoksen johdosta pikselikoko kasvoi 3,5 senttimetriin. Lentoaika pysyi muutaman sekunnin tarkkuudella samana. Tuuliolosuhteet olivat hieman voimakkaammat kuin ensimmäisen lennätyksen aikana. Toisen lennätyksen aikana kopteri otti 100 valokuvaa.



Kuva 8. Näyttökaappaus Pix4Dcapture-sovelluksesta lentosuunnitelmaa tehtäessä.

5.5 UAV-mittausten editointi

Editointi tehdään aivan kuten aumojen massalaskennoissa Agisoft PhotoScan -ohjelmalla sekä 3D-Win-maastokartoitusohjelmalla. Poikkeuksena aumojen editointiin on Agisoftilla prosessoitava ortokuva, josta myöhemmin digitoidaan maaston elementit vektorimuotoon.

5.5.1 Agisoft-editointi

Tiheään pistepilveen asti editointi Agisoftilla tapahtuu samoilla periaatteilla kuin aumojen editointi. Tämän jälkeen pistepilvestä luodaan ortokuva valitsemalla workflow valikosta Build DEM, jonka jälkeen Build Orthomosaic. Nyt ortokuva kirjoitetaan ulos toiminnolla Export Orthomosaic. Kirjoitusmuotona käytetään JPEG2000.

5.5.2 3D-Win-editointi

Ortokuva voidaan liittää ecw-kuvana 3D-Win-ohjelmaan. Kuvasta voidaan hiirellä osoittamalla kartoittaa maastonmuodot omaan elementtiin *luo uusi viiva*- tai *luo uusi piste*-toiminnoilla. Ennen digitointia pisteille annetaan niille ominainen koodi sekä pintatun-

nus. Digitoinnin jälkeen poimituille pistetiedoille on mahdollista saada korkeuskoordinaatit, jotka poimitaan kolmioidusta pistepilvestä. Valitaan taso, jossa poimitut pisteet sijaitsevat, aktiiviseksi ja avataan maastomallit valikosta korkeus mallista -työkalu. Työkalusta asetetaan valituiksi pisteet-osiosta *aktiivinen tiedosto*, laskenta-osiosta *mallin z* ja tallennus-osiosta *z-koordinaatti*. Toiminto asettaa digitoidut pisteet mallin tasolle, ja näin ollen pisteillä on samat korkeuskoordinaatit kun pistepilvellä. Tasokoordinaatit tallentuvat ortokuvan päälle digitoidusta vektoriaineistosta.

Seuraavaksi vertaillaan aikaisemmin takymetrillä mitattuja korkoja mallin korkeuskoordinaatteihin. Vertailu tapahtuu samalla tavoin kuin signaalien korkoerojen vertailu kolmioidun pistepilveen. Tulostustiedosto korkeuseroista mahdollistaa korkeuserojen järjestelmällisen tarkastelun.

5.6 UAV-kaluston soveltuminen taajamamaastomallien mittaukseen

Kopterin avulla maastotyöt voidaan suorittaa nopeasti. Tietokoneet pystyivät kaatumatta käsittelemään mitattuja aineistoja, koska ne sisälsivät vain noin sadasta valokuvasta muodostetun pistepilven. Kaupunki- tai taajamamittauksissa on kuitenkin enemmän ongelmakohtia kuin aumanmittauksissa kartoituskohteiden näkyvyyden puutteen vuoksi.

Tienreunan ja ojanreunan kartoitus on hankalaa edessä olevien puiden vuoksi. Aineiston perusteella voidaan kuitenkin tehdä johtopäätöksiä siitä, että juuri kyseisten kohteiden läheisyydestä tulisi täydennysmittauksia GPS-paikantimella tai takymetrillä ottaa. Myös kivetysten ylä- ja alareunat on läheisen sijaintinsa vuoksi hyvä kartoittaa jollain muulla kuin UAV-menetelmällä.

Aavalla alueella, jossa puusto tai rakennukset eivät häiritse kopterin näköyhteyttä kartoitettavaan alueeseen, on parempi mahdollisuus saada laadukasta mittaust materiaalia aikaiseksi kuin peittoisilla alueilla. Käytännössä kaikki takymetrillä kartoitettut kohteet, joiden välittömässä läheisyydessä ei ole rakennusta tai puustoa, ovat z-koordinaatiltaan 10 senttimetrin etäisyydellä pistepilven z-koordinaatista.

5.7 Mittausmenetelmien vertailu taajamamittausten suhteen

Käytännössä taajama-alueen mittaaminen GPS-paikantimella tai takymetrillä on enemmän kävelystä sekä huomiointikykyä vaativaa kuin aumanmittaus. Aumoista ei tarvitse etsiä nurmikon peitossa olevia kaivon kansia tai savisessa ojanpohjassa olevia rumpuputkia. UAV-laitteistolla mittauksen kestoon ei niinkään vaikuta se, mitä kuvataan, vaan enemmänkin signaalien asennuksessa olevat maantieteelliset haasteet siirtymien suhteen sekä alueen koko.

Tässä työssä signaalit päätettiin laittaa vain pienehkölle alueelle, jotta mittausaineisto pysyisi pienenä. Niiden asentamiseen kohteessa meni noin 45 minuuttia. Jos koko takymetrillä kartoitettu alue olisi haluttu saada kopterin kuvattavaksi, tämä olisi vaatinut usemman lennätyksen.

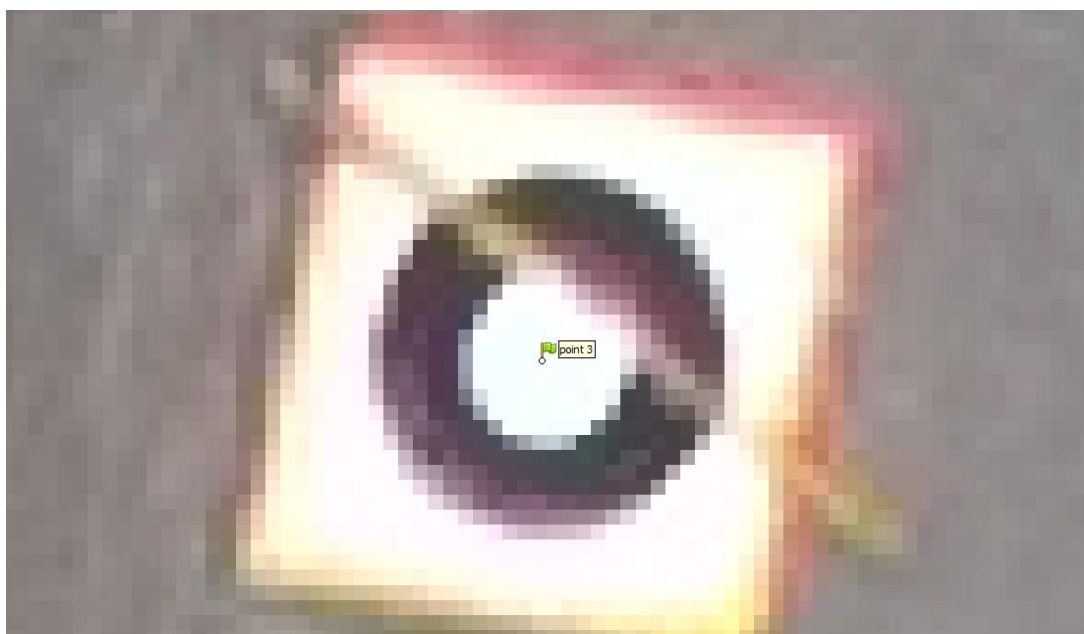
Todennäköisin riskitekijä GPS- tai takymetrikartoituksessa on kohteiden huomioimatta jättäminen. Muutoin se on luotettava tapa saada laadukas maastomalliaineisto. UAV-menetelmä puolestaan on nopeampi maastotöiden osalta kuin GPS-menetelmä, mutta aineiston prosessointi on hidasta. Lisäksi kopterin aineistossa saattaa kohteita jäädä kameran laadun heikkouden vuoksi kokonaan löytymättä, tai osa kohteista voi olla puuston peitossa. UAV-menetelmän tueksi on siis lähes aina käytettävä muitakin mittausmenetelmiä taajamamaastomallien mittauksessa.

Kuten aumanmittauksessa myös muissa maastomalleissa on GPS- tai takymetriaineisto suoraan mittauksen jälkeen käsiteltävissä 3D-Win-ohjelmalla. UAV-aineisto on taajamamallissa paitsi prosessoitava Agisoft-ohjelmalla myös digitoitava esimerkiksi 3D-Win-ohjelman avulla. Kohteet, jotka GPS-mittauksella saavat automaattisesti koordinaatit x, y ja z, on kopterin aineistosta prosessoidusta ortokuvasta nyt digitoitava, mikäli tilaaja haluaa niistä vektorimuotoisen aineiston. GPS-aineiston käsittelyyn riittää koodien, viivojen sekä pintatunnusten tarkistaminen ja kolmiointi.

6 Luotettavan editointituloksen aikaansaamisen edellytykset

Lennätysajankohdan sääolosuhteilla on merkitystä luotettavan tarkkuuden saavuttamisessa. Vähätuulinen pilvipouta on paras mittausajankohta. Silloin vältetään varjot sekä sumut tai sadetihkut kuvamateriaalissa.

Signaalien koordinaatti on hyvä muodostaa yhden mittauksen sijaan usean mittauksen keskiarvosta. Mittalaitteeseen voidaan asettaa mittausrajaksi kolmen senttimetrin tarkkuusvaatimus, joka estää laitetta tallentamasta tarkkuudeltaan tätä huonompia pisteitä. Signaalit on tuettava hyvin maahan siten, että ne eivät pääse tuulen mukana liikkumaan. Myös signaalien mallilla on merkitystä myöhemmässä vaiheessa suoritettavaan signaalien keskikohdan osoitusvaiheen selkeyteen (kuva 9). Mittauksissa olisi hyvä käyttää signaaleja, joiden keskikohta on ilmakuvista helposti havaittavissa. Mikäli signaalin keskikohta ei ole ilmakuvasta paikannettavissa, on kyseinen markkeri jätettävä laskennan ulkopuolelle. Markkereilla ja niitä vastaavilla mittaustiedoston koordinaateilla on oltava keskenään samat pistenumerot. Muuten pistepilven luominen ei onnistu.



Kuva 9. Kuvakaappaus markkereiden asettamisvaiheesta Agisoft-ohjelmassa.

3D-Win-ohjelmassa on ensiksi tarkastettava signaalien ja pistepilven välinen korkeusero. Mitä lähempänä signaalien ja pistepilven välinen ero on lukemaa 0, sitä tarkempi malli on kyseessä.

Taajamamaastomallin digitoinnissa on varottava pisteiden kartoitusta läheltä rakennuksia tai puustoa. Myös kivetyksen reunojen kanssa korkeusvirhettä tulee. Mikäli maastomallin tilaajalle riittävät pelkät tasokoordinaatit, on digitointi siinä tapauksessa työprosessina helpompi.

7 Kopteriaineistojen ja GPS-aineistojen keskinäinen vertailu

7.1 Editointikortti

Tässä työssä prosessoidut pistepilvet luotiin Agisoft-ohjelmalla. Pistepilvien prosessoinnissa olisi ollut useita eri vaihtoehtoja pilven käsittelytavan valitsemiseksi. Kuitenkin käsittelyt tehtiin samoilla arvoilla, jotta aineistojen muiden muuttujien, kuten lentokorkeuden ja päällekkäispeittoisuuksien keskinäinen vertailu olisi todenmukaisempaa (taulukko 1).

Taulukko 1. Agisoft-ohjelmassa tehtävien pistepilvien tarkkuusluokat sekä kestoajat tunteina.

Vaihe	Tiheys	Kesto (h)
Kuvien tasaus ja sijoitus	Medium	0.25
Tiheä pistepilvi	Medium	1

7.2 Aumat

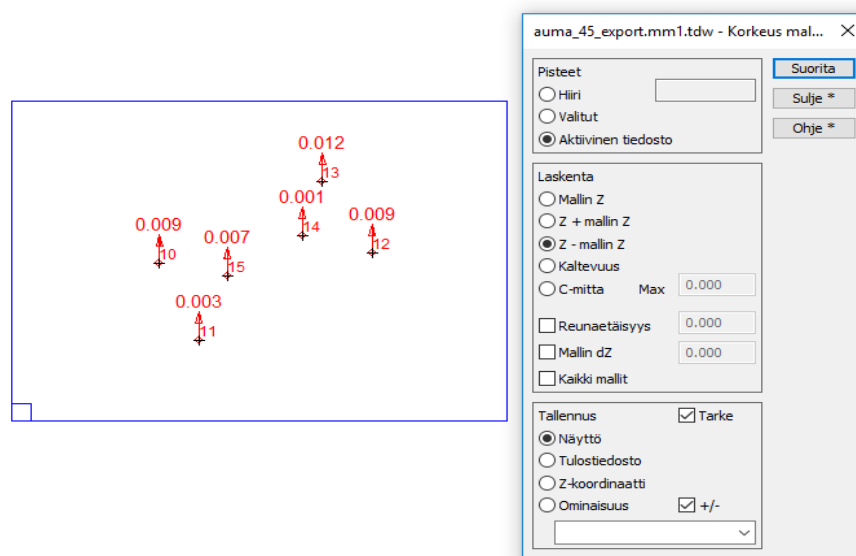
Vertailuissa esitellään jokaiseen mittaukseen liittyvät lennätystiedot (taulukot 2, 5 ja 8), GPS-mittausten ja kolmioidun pistepilven välinen korkeusero signaaleista mitattuna (kuvat 10, 11 ja 12) sekä kuutiotilavuuslaskelmat kummallakin menetelmällä selvitettyinä (taulukot 3, 6 ja 9). Lisäksi selvitetään prosentuaaliset erot massalaskentojen välillä (taulukot 4, 7 ja 10). Lopuksi pohditaan laskentojen yhtenevyyttä.

7.2.1 Sievin yksittäinen auma lennätyskorkeudesta 45 metriä

Ensimmäisenä suoritettun mittauksen lentokortista käyvät ilmi lennätyksessä käytetyt lentoasetukset (taulukko 2). Kuutiotilavuuslaskelmat (taulukko 3) kuvastavat eri menetelmillä aikaansaadut tilavuudet. Mittaustulosten prosentuaalinen ero havainnollistaa lentoasetusten sopivuutta tämän kokoisten aumojen mittauksessa (taulukko 4). Signaalien GPS-mittausten ja kolmioidun pistepilven ero esitetään kuvakaappauksena (kuva 10).

Taulukko 2. Lentokortti lennätyksessä käytetyistä asetuksista.

Kuvien määrä	Kameran kulma	Pituuspeitto	Sivupeitto
133 kpl	90 astetta	80 %	70 %
Lentokorkeus	GSD	Lennon kesto	Alueen koko
45 metriä	1,97 cm/px	8 m 2 s	141 m x 219 m



Kuva 10. Signaalien GPS-mittausten ja kolmioidun pistepilven välinen korkeusero metreissä sekä eron laskenta-asetukset.

Taulukko 3. Auman tilavuudet kuutiometreinä molemmilla mittausmenetelmillä laskettuna.

Auman nimi	Tilavuus (GPS)	Tilavuus (UAV)
Sievin auma	18 571	18 295

Taulukko 4. Menetelmien välisen kuutiotilavuuden ero prosentteina.

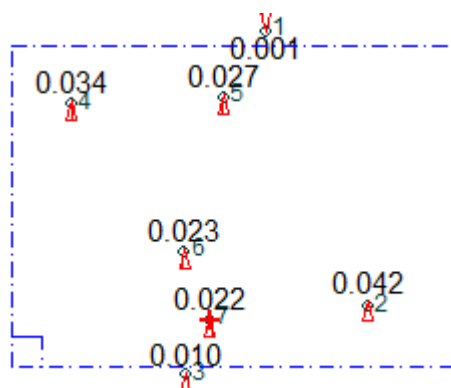
Auman nimi	Mittaustulosten ero
Sievin auma	1,51 %

7.2.2 5 aumaa lennätyskorkeudesta 50 metriä

Pyhäjoen viisi aumaa kattavan alueen lentokortit (taulukko 5), tilavuuslaskelmat (taulukko 6) sekä tilavuuslaskelmien prosenttieroitukset (taulukko 7) havainnollistavat sekä lennätyksen että editoinnin yksityiskohtia. Signaalien GPS-mittausten ja kolmioidun pistepilven välinen korkeusero (kuva 11) kuvastaa aineistojen keskinäistä virhettä signaalien läheisyydessä.

Taulukko 5. Lentokortti lennätyksessä käytetyistä asetuksista.

Kuvien määrä	Kameran kulma	Pituuspeitto	Sivupeitto
168 kpl	90 astetta	85 %	59 %
Lentokorkeus	GSD	Lennon kesto	Alueen koko
50 metriä	2,19 cm/px	8 m 21 s	248 m x 197 m



Kuva 11. Signaalien GPS-mittausten ja kolmioidun pistepilven välinen korkeusero metreissä.

Taulukko 6. Aumojen tilavuudet kuutiometreinä molemmilla mittausmenetelmillä laskettuna.

Auman nimi	Tilavuus (GPS)	Tilavuus (UAV)
Poltto 1	17 537	17 656
Poltto 1S	9 100	9 157
YT 1 A	2 178	2 223
YT 1 B	1 890	1 954
YT 1 C	2 472	2 572

Taulukko 7. Mittausmenetelmien välisien kuutiotilavuuksien ero prosentteina.

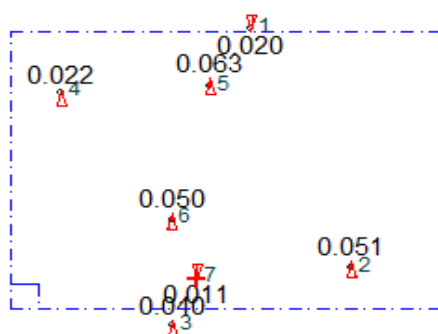
Auman nimi	Mittaustulosten ero
Poltto 1	0,68 %
Poltto 1S	0,63 %
YT 1 A	2,1 %
YT 1 B	3,4 %
YT 1 C	4,0 %

7.2.3 5 aumaa lennätyskorkeudesta 70 metriä

Pyhäjoella tehty toinen lento päätettiin suorittaa korkeammalta kuin ensimmäinen. Myös pituus- ja sivuttaispeittoisuutta muutettiin (taulukko 8). Kuutiotilavuudet muuttuivat hie-
man (taulukko 9), joten myös prosentuaaliset erot suhteessa GPS-mittauksiin muuttuivat
(taulukko 10). Vaikka prosentuaaliset erot pienenivät, kasvoivat korkeuserot signaalien
kohdalla (kuva 12).

Taulukko 8. Lentokortti lennätyksessä käytetyistä asetuksista.

Kuvien määrä	Kameran kulma	Pituuspeitto	Sivupeitto
120 kpl	90 astetta	85 %	70 %
Lentokorkeus	GSD	Lennon kesto	Alueen koko
70 metriä	3,06 cm/px	8 m 20 s	248 m x 197 m



Kuva 12. Signaalien GPS-mittausten ja kolmioidun pistepilven välinen korkeusero metreissä.

Taulukko 9. Aumojen tilavuudet kuutiometreinä molemmilla mittausmenetelmillä laskettuna

Auman nimi	Tilavuus (GPS)	Tilavuus (UAV)
Poltto 1	17 537	17 490
Poltto 1S	9 100	9 082
YT 1 A	2 178	2 152
YT 1 B	1 890	1 899
YT 1 C	2 472	2 465

Taulukko 10. Mittausmenetelmien välisien kuutiotilavuuksien ero prosentteina

Auman nimi	Mittaustulosten ero
Poltto 1	0,3 %
Poltto 1S	0,2 %
YT 1 A	1,2 %
YT 1 B	0,5 %
YT 1 C	0,3 %

7.2.4 Tulosvertailujen pohdinta

Kaikki UAV-aineistojen massalaskennat ovat hyvin lähellä GPS-aineistojen kuutiotilavuuksia. Menetelmien keskinäisen eron perusteella voidaan päätellä molempien mittausmenetelmien olevan kykeneviä auman tilavuuden selvittämiseksi.

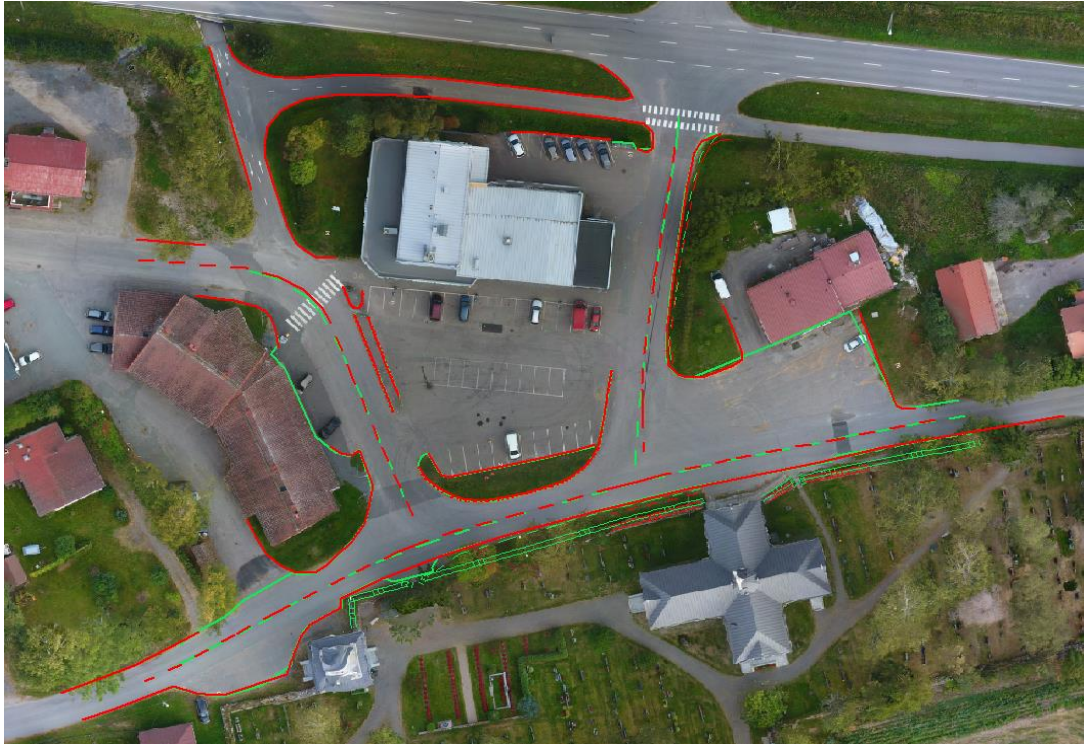
Kun verrataan viiden auman mittauksien eroja, huomataan, että korkeammalta lennätetty aineisto saavuttaa lähes samanlaiset tilavuusarvot kuin GPS-paikantimella mitattaessa. Myös korkeammalta lennättäessä yhtä lukuun ottamatta jokainen UAV-menetelmällä laskettu auma sai pienemmän arvon kuin GPS-mittauksen perusteella laskettu arvo. Vastaavasti 50 metrin korkeudesta tehty lennätys tuotti UAV-laskentojen jälkeen suuremman arvon kuin GPS-mittauksien jälkeen.

Koelentojen vähäisyyden vuoksi ei ole tarkoituksenmukaista selvittää sopivinta lentokorkeutta tai optimaalisimpia lentoasetuksia, mutta voidaan todeta, että koelentoissa käytetyillä asetuksilla päästään liki samoihin arvoihin kuin GPS-paikantimella mitattaessa.

7.3 Taajama

Vertailuissa on eritelty molempien taajamalennätyksien tiedot omiin kappaleisiin. Lentokorttien (taulukot 11 ja 13) sekä signaalien korkeuserojen (kuvat 14 ja 18) lisäksi esitetään kolmioidun pistepilviverkon sekä takymetrimittauksien korkeuseroja eriteltynä niiden suuruusluokan mukaan (taulukot 12 ja 14). Tämän tarkoituksena on havainnollistaa sitä, miltä alueilta digitointi voidaan suorittaa siten, että korkeusvirheitä ei tulisi tai tulisi mahdollisimman vähän. Lopuksi pohditaan UAV-aineistosta digitoinnin ongelmakohtia ja mahdollisuuksia. Tasokoordinaatistossa digitointien ja takymetrimittauksien vertailu onnistuu kätevästi tasojen väriä vaihtamalla (kuva 13).

Korkeuserojen maantieteellistä jakautumista havainnollistetaan luokittain. Yli yhden metrin korkeuserot (kuvat 15 ja 19) visualisoivat karkeiden virhekohtien sijaintia. 0,5–1 metrin korkeuserot (kuvat 16 ja 20) olivat vähäisiä, mutta olennainen osa kokonaisuutta. Eniten esiintyi virheluokkaa 0,2–0,5 metriä (kuvat 17 ja 21).



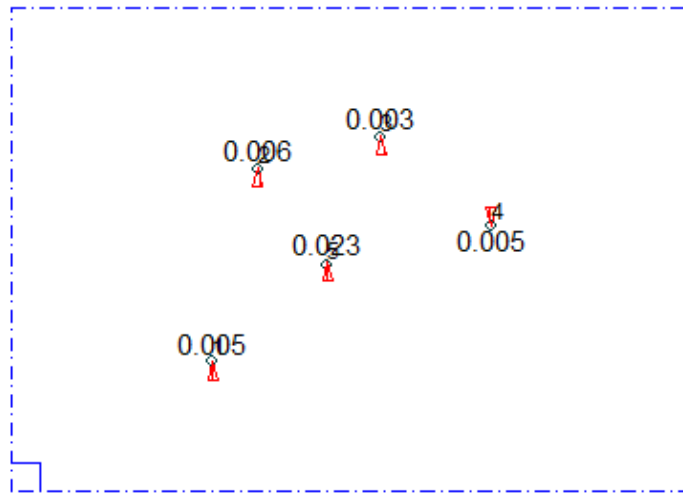
Kuva 13. GPS-kartoitukset ja UAV-digitoinnit samassa kuvassa.

7.3.1 Taajama lennätyskorkeudesta 50

Ensimmäinen taajamalennätys suoritettiin matalammalta kuin jälkimmäinen, mutta pienemmillä pituus- ja sivuttaispeittoisuuksilla (taulukko 11). Alueelta aiemmin takymetrillä mitattuja pistetietoja verrattiin UAV-menetelmällä mitattuun pistepilveen. Mittaustietojen väliset erot kategorisoitiin (taulukko 12), (kuvat 15, 16 ja 17). UAV-mittauksen pohjana toimii signaalit, joiden mittausmenetelmien välinen korkeuserojen suhde oli verrattain pieni tässä mittauksessa (kuva 14).

Taulukko 11. Lentokortti lennätyksessä käytetyistä asetuksista

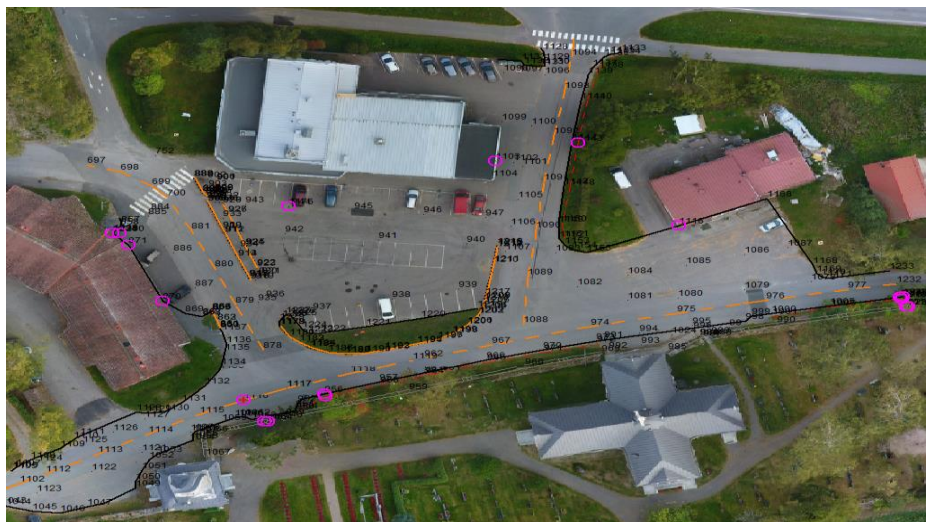
Kuvien määrä	Kameran kulma	Pituuspeitto	Sivupeitto
96 kpl	90 astetta	80 %	60 %
Lentokorkeus	GSD	Lennon kesto	Alueen koko
50 metriä	2,19 cm/px	6 m 31 s	159 m x 201 m



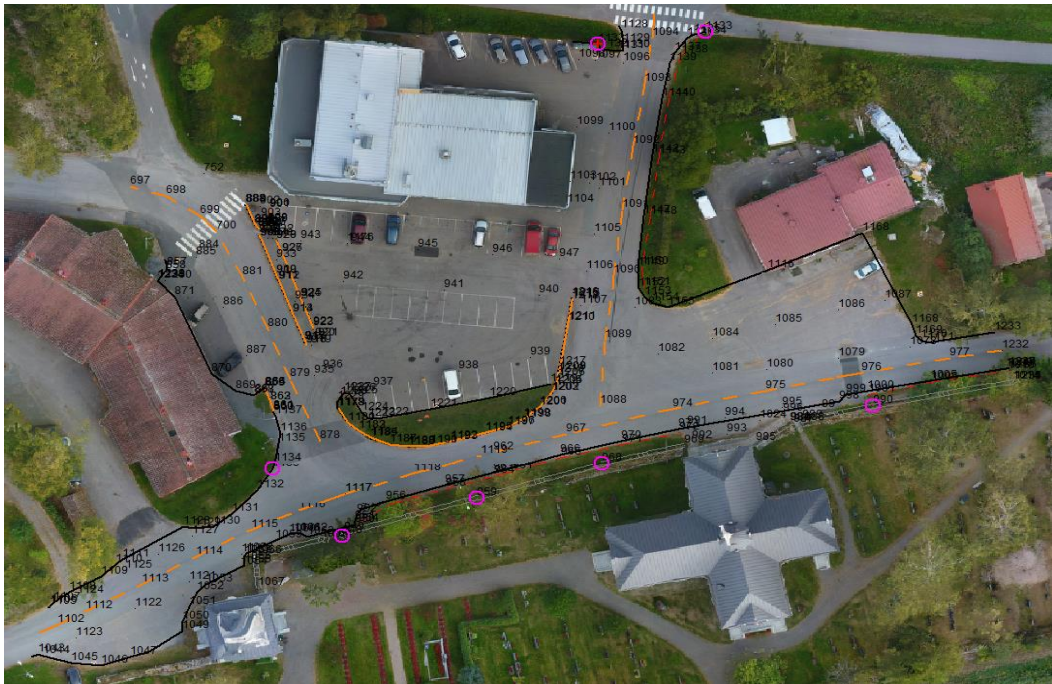
Kuva 14. Signaalien GPS-mittausten ja kolmioidun pistepilven välinen korkeusero metreissä.

Taulukko 12. GPS-kartoitusten ja kolmioidun pistepilviverkon korkeuserot luokiteltuina ja lasketuina.

Virheet metreissä	Määrä
>1,0 m	18 kpl
0,5–1 m	7 kpl
0,2–0,5 m	7 kpl
0,1–0,2 m	38 kpl
<0,1 m	264 kpl



Kuva 15. Yli 1 metrin virheet violetilla ympyröitynä.



Kuva 16. 0,5–1 metrin virheet violetilla ympyröitynä.



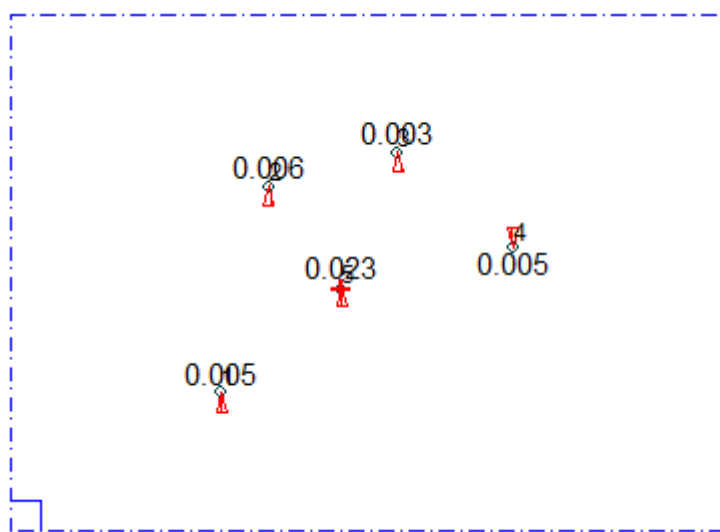
Kuva 17. 0,2–0,5 metrin virheet violetilla ympyröitynä.

7.3.2 Taajama lennätyskorkeudesta 80 metriä

Toista taajamamittausta koskevat lennätys ja editointitiedot esitetään samalla tyylillä kuin ensimmäisessä tapauksessa (taulukot 13 ja 14) (kuvat 18, 19, 20 ja 21).

Taulukko 13. Lentokortti lennätyksessä käytetyistä asetuksista

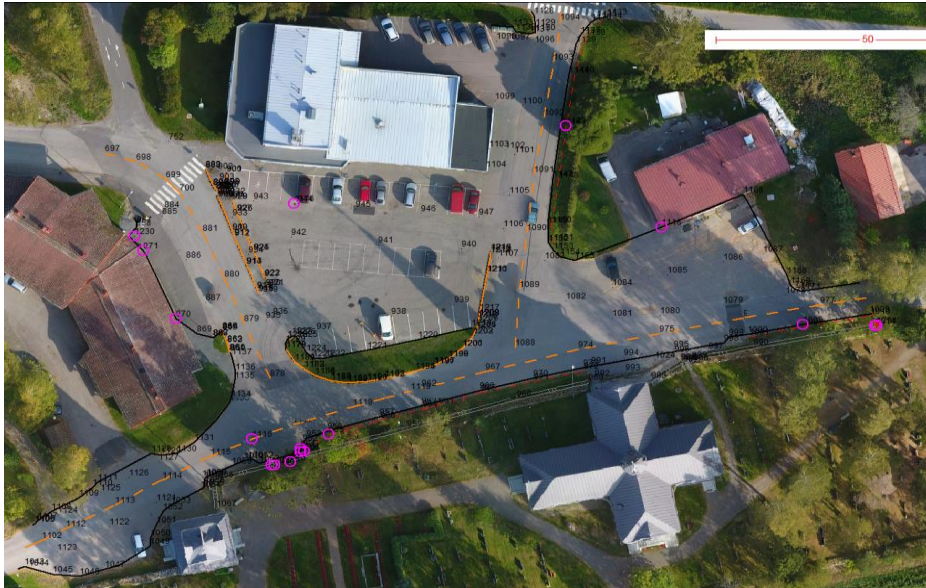
Kuvien määrä	Kameran kulma	Pituuspeitto	Sivupeitto
100 kpl	90 astetta	90 %	70 %
Lentokorkeus	GSD	Lennon kesto	Alueen koko
80 metriä	3,5 cm/px	6 m 34 s	159 m x 201 m



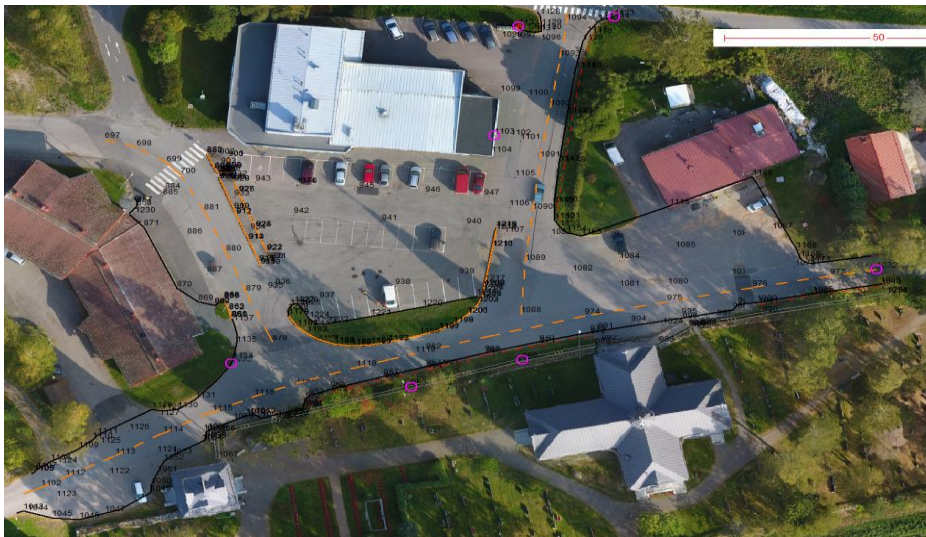
Kuva 18. Signaalien GPS-mittausten ja kolmioidun pistepilven välinen korkeusero metreissä.

Taulukko 14. GPS-kartoitusten ja kolmioidun pistepilviverkon korkeuserot luokiteltuina ja lasketuina.

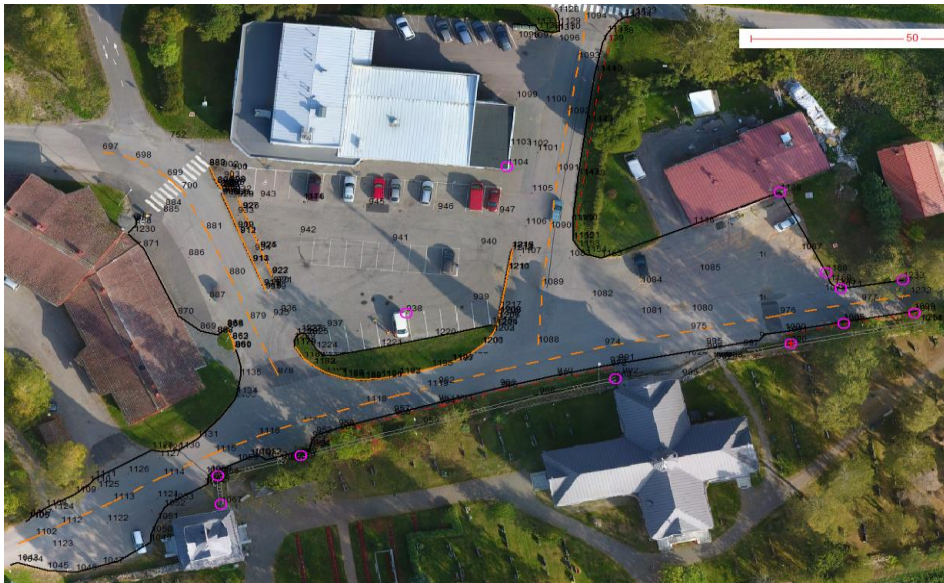
Virheet metreissä	Määrä
>1,0 m	16 kpl
0,5–1 m	7 kpl
0,2–0,5 m	12 kpl
0,1–0,2 m	62 kpl
<0,1 m	237 kpl



Kuva 19. Yli 1 metrin virheet violetilla ympyröitynä.



Kuva 20. 0,5–1 metrin virheet violetilla ympyröitynä.



Kuva 21. 0,2–0,5 metrin virheet violetilla ympyröitynä.

7.3.3 Tulokset vertailujen pohdinta

Kuvista, joissa virheiden sijoittumista kuvataan violeteilla ympyröillä, on selkeästi havaittavissa kohdat, joissa pistepilvestä poimittu korko on eri kuin takymetrillä mitatun aineiston korko. Niiden perusteella todetaan, että rakennusten ja puuston välittömässä läheisyydessä olevat kohteet on kartoitettava jollakin muulla kuin digitointimenetelmällä, jos on tarkoitus saada kohteen korkeus mukaan mittaustietoihin. Mikäli on kysymyksessä maastokartoitus, johon tilaaja ei vaadi z-koordinaattia mukaan, on koelentojen perusteella luoduista ortokuvista mahdollista luoda maastomalli tasokoordinaatistoon. Eromitat digitointien ja takymetrikartoituksien välillä olivat keskimäärin 2–3 senttimetriä tasokoordinaatistossa.

Kun vertaillaan eri lentokorkeuksilta kuvattujen aineistojen virheiden jakautumista, nähdään, että suurin ero korkeusvirheiden ilmentymisessä kohdistuu 0,1–0,2 metrin sarakkeeseen. Korkeammalta kuvatussa aineistossa on enemmän tällaista virhettä. Lisäksi korkeammalta kuvattu aineisto sisältää vähemmän pisteitä, joiden ero takymetrikartoituksiin on alle kymmenen senttimetriä. Lennätyksien keskinäisessä virheluokkien alueellisessa jakautumisessa on huomattavissa selkeä yhteneväisyys. Tämän perusteella lentokorkeuden tai peittoisuuksien muutoksella ei ole ratkaisevaa vaikutusta kyseisen ongelman ratkaisemiseksi. Avarat kartoitusalueet on yhteen suuntaan lentämiselläkin mah-

dollista kartoittaa noin 10 senttimetrin tarkkuuteen korkeustasossa. Kuten kuvista havaitaan, alueen keskellä on vain satunnaisia autojen vieressä olevia viemärin kansia, joiden virhe on yli 20 senttimetriä.

8 Kalusto- ja kustannusvertailu

8.1 UAV-mittauksissa käytettävän kaluston kustannukset

Tutkimuksia varten käytettiin automaattilennätykseen soveltuvaa Pix4Dcapture-matkapuhelinsovellusta. Se soveltuu sekä Android- että iOS-käyttöjärjestelmille [7]. Sovellus on ilmaiseksi ladattavissa.

Kopteri DJI Phantom 4 on jälleenmyyjästä sekä toimitustavasta riippuen verolliselta hinnaltaan 999–1 285 euroa [8]. Laitteiden mukana tuleva varustelu vaihtelee jälleenmyyjäkohtaisesti.

Kopterin kuvausaineiston käsittelyohjelmana käytettiin Agisoft PhotoScan Professional -ohjelmistoa, jonka hinta on 3 499 euroa. Ohjelman lisenssi on pysyvä, joten ohjelmasta ei koidu lisäkustannuksia. [9]

8.2 Vaihtoehtoinen kopteri

Koelennoissa käytetyn lennokin lisäksi tarkastellaan saman hintaluokan, mutta hieman eri toiminnoilla varustetun kopterin ominaisuuksia. DJI Phantom 4 -laitteesta on kehitelty paremmin varustettu versio Phantom PRO. Lisäksi Phantom 4 on vanhenevaa tekniikkaa ja myynnistä hiljalleen poistuva tuote.

Päivitetystä versiossa uutuuksina on törmäyksenestotunnistin eteen, taakse, vasemmalle ja oikealle. Aikaisemmassa versiossa tunnistin on vain yhteen suuntaan. Kamera on kuvataajuudeltaan PRO-kopterissa 60 fps, kun se edeltäjässään on 30 fps. Stillkuvien megapikselimäärä on jopa 20. Kamerassa on myös mekaaninen suljin, jonka ansiosta kuvien selkeys on parempi. Myös akun kesto aika on pidentynyt, mikä mahdollistaa 30 minuutin yhtäjaksoisen lennätyksen. [10; 11.]

9 Kustannus- ja kannattavuuslaskelmat

9.1 Kustannustehokkuus aumanmittauksissa

UAV-kaluston kustannustehokkuutta tutkiessa on huomioitava työmaalla vietetyn ajan lisäksi myös pistepilven valmistukseen kuluva työaika. Tehokkuuden laskemista monimutkaistavat kuitenkin erilaiset muuttujat kuten tietokoneiden prosessointiteho sekä prosessoinnin aikana käytettävän työajan hyödyntäminen muihin työtehtäviin. Tässä tehokkuuslaskelmassa jätetään kokonaan pistepilven prosessointiaika ottamatta huomioon ja vertaillaan pelkästään mittausmenetelmien välisiä työaikojen kestoja sekä massalaskentaan kuluvia aikoja.

Koska 3D-Win-ohjelmassa massalaskennat kestävät mittausmenetelmien välillä yhtä kauan, työmaa-aikoihin lisätään vain Agisoft-ohjelmassa käytettävä editointiaika. 3D-Win-editointiajat siis kumoavat toisensa, joten niiden erillinen vertailu ei ole enää tarpeen. Laskelmissa käytetään signaalien määrästä tai mittausalueen koosta riippumattomasti 30 minuutin työaikamenekkiä Agisoft-ohjelmassa. Arviot työaikojen kestoista (taulukot 15 ja 16) on mitoitettu yhdelle työntekijälle ja perustuvat tutkimuksissa kuluneisiin mittaus- ja editointiaikoihin.

Taulukko 15. Erikokoisten aumojen mittausajan kesto GPS-paikantimella mitattuna.

Tilavuus (kuutiometrit)	Kesto (min)
1 000–2 000	20
2 000–5 000	25
5 000–10 000	30
10 000–20 000	40
20 000–40 000	50

Taulukko 16. Erikokoisten aumojen mittaustajan kesto kopterilla kuvattuna.

Tilavuus (kuutiometrit)	Signaalit kesto (min)	Pohja kesto (min)	Lento kesto (min)	Agisoft kesto (min)	Yhteensä kesto (min)
1 000–2 000	15	5	15	30	65
2 000–5 000	15	5	15	30	65
5 000–10 000	15	5	15	30	65
10 000–20 000	20	5	15	30	70
20 000–40 000	25	10	15	30	80

Taulukoista voidaan tulkita, että suurenkaan auman yksittäinen lennättäminen UAV-kopterilla ei ole kustannustehokasta. Kuitenkin jos samalla lennätysalueella on esimerkiksi kaksi 20 000:n kuution aumaa, kasvaa niiden mittaustyöaika vain signaalien asennuksen ja pohjanmittauksen osalta. Tällöin signaalien asennukseen menisi noin 5 minuuttia kauemmin ja pohjien mittaukseen kaksinkertainen aika. Yhteensä kesto aika pitenisi siis 15 minuutilla eli yhteisaika olisi 95 minuuttia. GPS-paikantimella mitattaessa kesto aika kaksinkertaistuisi 100 minuuttiin. UAV-menetelmä olisi siis nopeampi kahta isoa aumaa mitattaessa. Kannattavuusyhtälön (taulukko 17) tarkoitus on auttaa mittaajaa selvittämään mittaustavan valinta matemaattisesti.

Taulukko 17. Yhtälö, jota voidaan käyttää hyväksi mittausmenetelmän valinnassa.

Kannattavuusyhtälö	Tekijät
$a + 5 \cdot (x-1) + b \cdot x + c + d = \text{yhteiskesto}$	$a = \text{signaalin mittausaika}$
	$b = \text{pohjanmittauksen aika}$
Esimerkki	$c = \text{lentoaika (vakio) (15 min)}$
$25 + 5 \cdot (2-1) + 10 \cdot 2 + 15 + 30 = 95 \text{ minuuttia}$	$d = \text{Agisoft-editointiaika (vakio) (30 min)}$
	$x = \text{aumojen määrä (kpl)}$

Lasketaan yhtälön avulla, onko mittausalue, jossa sijaitsee kaksi 1 000–2 000:n kuution ja kaksi 5 000–10 000:n kuution aumaa, kannattava mitata UAV-mittausmenetelmällä. Laskuissa signaalien oletusarvona käytetään aina alueella sijaitsevista aumoista pienimmän auman aikatekijää eli tässä esimerkissä 15 minuuttia. $15 + 5 \cdot (4-1) + 5 \cdot 4 + 15 + 30 = 95$ minuuttia. GPS-menetelmällä aikaa olisi mennyt $2 \cdot 20 + 2 \cdot 30 = 100$ minuuttia.

Sovelletaan yhtälöä koelennätyksissä mitattuun viiden auman rykelmään. Aumojen koluokat olivat 1*1 000–2 000 kuutioita, 2*2 000–5 000 kuutiota, 1*5 000–10 000 kuutiota ja 1*10 000–20 000 kuutiota. Lasketaan ensiksi aikamenekki UAV-menetelmällä. $15 + 5 \cdot (5-1) + (5 \cdot 5) + 15 + 30 = 105$ minuuttia. GPS-menetelmällä aikamenekki olisi ollut $20 + 25 + 25 + 30 + 40 = 140$ minuuttia.

Kun 105 minuutista otetaan pois Agisoft-editointiaika 30 minuuttia, saadaan ajaksi 75 minuuttia, mikä vastaa työmaalla vietettyä aikaa. Koelennätyksissä työmaalla kesti kahdelta mieheltä noin 50 minuuttia toisen lennättäessä kopteria ja toisen mitatessa pohjia ja asentaessa signaaleja. Kun lennättäjän työ 15 minuuttia siirretään pohjanmittaajalle, saadaan tulokseksi 65 minuuttia. Kaaviota voidaan toisin sanottuna käyttää ainakin karkeaan kannattavuuslaskelmointiin.

9.2 Kustannustehokkuus taajamamaastomalleissa

Käytetään laskelmissa koedigitoinnissa käsiteltävissä olleen alueen kokoista maastomallia. Verrataan takymetrimenetelmän (taulukko 18) ja UAV-menetelmän (taulukko 19) aikatekijöitä kyseisen projektin kesken. Jätetään jälleen pistepilven prosessointiaika huo-

mioimatta. Tämä maastomalli olisi vaatinut täytepisteinä eli takymetrillä mitattuna rakennuksien seinälinjat, puustojen alustat sekä kivetyksen reunat siinä tapauksessa, että korkeustarkkuuden täytyisi olla alle 10 senttimetrissä. Tässä maastomallissa se tarkoittaa noin 100 GPS-pisteen mittausta.

Taulukko 18. Tutkimuksissa takymetrillä mitatun taajamamaastomallin kesto eriteltynä.

Takymetri	Maastotyöt (h)	Editointi (h)	Yhteensä (h)
	8	1	9

Taulukko 19. Tutkimuksissa UAV-menetelmällä mitatun taajamamaastomallin kesto eriteltynä.

UAV	Signaalit ja lennätys (h)	Täydennys- mittaukset (h)	Editointi (h)	Yhteensä (h)
	1	1.5	2	4.5

Alueen kasvaessa täydennysmittausten määrä kasvaa, mutta samalla kokonaisaikasäästö kasvaa takymetrimittaukseen verrattuna. Mitattavan pinta-alan koko on lähes suoraan verrannollinen aikasäästöihin. Muuttujana on puuston sekä rakennuksien määrä.

Mikäli tulokset halutaan esittää vain taso- eli 2D-koordinaatistossa, on digitointi mahdollista tehdä kokonaan ilman täydennysmittauksia. Tämän onnistuminen on myös riippuvainen alueen maastonmuodoista ja puuston suuruudesta. Myös tasokoordinaatistoon digitoidessa on tärkeä etukäteen tarkastella maastoa ja miettiä, mitkä maaston elementit eivät näy kopterin tallentamista kuvista, jotta tasomallinnukseen saataisiin samalla maastokäynnillä sille kaikki tarvittavat taitepisteet.

Mikäli maastomallin tilaajalla on vaatimus, että korkeustarkkuuden on oltava +/- 5 senttimetriä jonkin lähistöllä olevan korkeuskiintopisteen korkeudesta, on työtehtävä UAV-mittauksella kannattamaton lukemattomien tarkistusmittauksien vuoksi.

10 Yhteenveto

UAV-laitteiston hankkiminen yritykselle on pitkällä aikavälillä kannattavaa. Yrityksellä on mitattavanaan yrittäjän mukaan isoja maastomalleja sekä useiden turveaumojen ryp-päitä suhteellisen useita vuositasona. Kaluston kohtalainen huoltovapaus sekä ohjelmis-tojen pysyvä lisenssi takaavat kustannuksien pysymisen suhteellisen alhaalla alkuinves-toinnin jälkeen. Mittauskohteiden tarkalla analysoimisella sekä mittalaitteiden yhteiskäy-töllä UAV-kalustoa voidaan hyödyntää useissa kohteissa. Se toimisi myös niin sanottuna lähtölaukauksena yrityksen toiminnan kasvulle mahdollistaen isompien työmaiden suo-rittamisen lyhyemmässä ajassa. Eräänä näkökulmana voisi olla asiakaskunnan kasva-minen uuden laitealuevaltauksen myötä. Nykyinen kilpailutilanne saattaa ajan kuluessa tiukentua, jolloin aikaisessa vaiheessa tehdystä kalustoinvestoinnista saattaisi olla tuol-loin jo voitettun asiakaskunnan muodossa hyötyä. Lisäksi laite avaisi mahdollisuuksia uusiin mittauskohteisiin, mikä saattaisi luoda tarpeen myös yrityksen työvoiman lisäämi-selle.

Rajoittavina tekijöinä UAV-kaluston käytettävyydelle on sääolosuhteiden lisäksi vuoden-aikojen vaihtelu Suomessa. Talviaikaan maastomallien mittaaminen ei ole isossa mitta-kaavassa mahdollista kopterilla. Toisaalta sekä turveaumat että maastomallit ovat useimmiten muutoinkin lumettomaan aikaan kohdistuvia tilaustöitä. Kesäaikana UAV-menetelmän soveltuminen vaikeisiin kohteisiin on enemmän mittamiehen editointikär-sivällisyydestä ja aineistojen yhdistelystä kiinni kuin laitteen ominaisuuksista. Tutkimuk-sissa jäivät koemittaukset tekemättä hyödyntäen laitteen zig-zag-lentosuunnitelmaa. Ky-seisellä toiminnolla mitattuna kolmioitu pistepilvi olisi todennäköisesti tarkempi, mikä jät-täisi editoinnille vähemmän tarvetta. Tämän tutkimuksen osalta se jäi arvoitukseksi, mutta jo tutkittujenkin aineistojen perusteella voidaan todeta laitteen olevan enemmän mahdollisuus kuin uhka yrityksen toiminnalle.

Lähteet

- 1 Miehittämätön ilmailu. 2018. Verkkoaineisto. Trafi. < https://www.trafi.fi/ilmailu/miehittamaton_ilmailu>. Päivitetty 14.05.2018. Luettu 24.09.2018.
- 2 Määräys. 2016. Verkkoaineisto. Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi. TRAFI/90924/03.04.00.00/2016 OPS M1-32
- 3 DJI Phantom 4 RTF täynnä älykästä teknologiaa. Verkkoaineisto. Power. < <https://www.power.fi/product/p-255931/>>. Luettu 24.09.2018.
- 4 Palaturve on tasalaatuinen ja kotimainen polttoaine moneen kattilaan. 2017. Verkkoaineisto. Vapo. < <https://kauppa.vapo.fi/tuotteet/palaturve>>. Luettu 24.09.2018.
- 5 Vaihtoehtoina palaturve tai jysinturve. 2018. Verkkoaineisto. Bioenergian Pikku-jättiläinen. < <http://www.bioenergianeuvoja.fi/biopolttoaineet/turve/kaytto/>>. Luettu 24.09.2018.
- 6 Kuiviketurve. Verkkoaineisto. Heinäpojat. < <http://www.heinapojat.fi/category/70-kuiviketurve>>. Luettu 24.09.2018.
- 7 Liikenneviraston ohjeita. 18/2017. Verkkoaineisto. Liikennevirasto.
- 8 Products. Verkkoaineisto. Pix4D. < <https://pix4d.com/product/pix4dcapture/>>. Luettu 24.09.2018.
- 9 Drone-lennokit. Verkkoaineisto. Hintapöytä. < <https://hintaopas.fi/product.php?p=3579878>>. Luettu 24.09.2018
- 10 Online Store. 2018. Verkkoaineisto. Agisoft. < <http://www.agisoft.com/buy/online-store/>>. Luettu 24.09.2018.
- 11 DJI Phantom 4 Pro -kuvauskopteri. Verkkoaineisto. Rajala Pro Shop. < https://www.rajalacamera.fi/dji-phantom-4-pro-kuvauskopteri.html?gclid=EAlal-QobChMlifL0tsPT3QIVTOWaCh1OgAi4EAAYASAAEgImOvD_BwE>. Luettu 24.09.2018.
- 12 Phantom comparison. 2018. Verkkoaineisto. DJI. < <https://www.dji.com/phantom-4-pro?site=brandsite&from=nav>>. Luettu 24.09.2018.