

Aaro Nurmiainen

Mobiilikartoituslaitteiden ja UAV-kopterin tarkkuusarvio

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinöörityö

25.5.2017

Tekijä Otsikko	Aaro Nurmiainen Mobiilikartoituslaitteiden ja UAV-kopterin tarkkuusarvio
Sivumäärä Aika	30 sivua + 3 liitettä 25.5.2017
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaajat	mittauspäällikkö Ilkka Määttä yliopettaja Jussi Laari
<p>Tämän insinööriyön tavoitteena oli selvittää, minkälaisiin tarkkuuksiin mobiilikartoituslaitteilla ja miehittämättömällä ilma-aluksella päästään verrattuna perinteisiin maanmittauksen menetelmiin. Helsingin kaupungin rakentamispalvelu Staralla on tarvetta selvitykselle tarkkuuksista ja käytettävyyksistä, ennen kuin laitteita otetaan suuremmin käyttöön.</p> <p>Mittausalueena toimi Talin ulkoilupuiston vieressä olevan pysäköintialueen ympäristö. Mittausalue oli Staralle tyypillinen maastomittauskohde. Mobiilikartoituslaitteiksi valittiin kaksi Leican mobiilikartoitusratkaisua: Leica Pegasus:Backpack ja Leica Pegasus:Two. UAV-kopteriksi valittiin suomalaisen VideoDronen GeoDrone X4L.</p> <p>Mittausalueelle tuotiin kaupungin kiintopisteiltä runkopisteverkko, jota käytettiin laitteiden rekisteröinnissä samaan koordinaatistoon. Mittausalueelle maalattiin maahan kontrollipisteitä, jotka kartoitettiin takymetrillä. Takymetrillä kartoitettuja kontrollipisteitä vertailtiin pistepilvestä saatuihin koordinaatteihin. Mobiilikartoituslaitteilla vertailu tehtiin sekä ennen että jälkeen rekisteröinnin.</p> <p>Tulosten perusteella laitteiden tarkkuudet ovat hyviä ja vertailukelpoisia takymetrillä mitattuihin koordinaatteihin nähden. Tutkimuksessa olevien laitteiden tiedonkeruu on nopeampaa ja kattavampaa kuin perinteisillä kartoitusmenetelmillä.</p>	
Avainsanat	pistepilvi, mobiilikartoitus, UAV

Author Title Number of Pages Date	Aaro Nurmiainen Accuracy evaluation of mobile mapping systems and Aerial Mapping Drone 30 pages + 3 appendices 25 May 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructors	Ilkka Määttä, Surveying Supervisor Jussi Laari, Principal Lecturer
<p>The goal of this Bachelor's thesis was to establish the accuracy of two mobile mapping solutions and one unmanned aerial vehicle. An analysis about the accuracy and usability of each solution was necessary before the devices are put in greater use.</p> <p>The test field was the surroundings of a parking lot next to the Tali Leisure Park, a typical field surveying area for the company. The tested mobile mapping solutions were Leica Pegasus:Two and Leica Pegasus:Backpack and the UAV was GeoDrone X4L.</p> <p>Control points were painted on the ground of the test field and surveyed with the total station. Point clouds produced by the devices were registered from the same points as the total station was oriented. The control point coordinates were compared to the coordinates derived from the point clouds. With the mobile mapping solutions, a comparison was made both before and after the registration.</p> <p>The results showed that the tested devices offer an accuracy close to that of a total station. Furthermore, the tested devices offer faster data acquisition and scaling of the measurements than the traditional surveying methods.</p>	
Keywords	point cloud, mobile mapping, UAV

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Helsingin rakentamispalvelu Stara	1
2.1	Esittely	1
2.2	Mittauspalvelut	3
3	Mobiilikartoitus	3
3.1	Laserkeilaus	4
3.2	Paikannusjärjestelmä	4
3.3	SLAM	5
4	Ilmakuvaus	6
4.1	Kaukokartoitus	6
4.2	Ilmakuvaus	6
4.3	UAV	7
5	Tutkimukseen valitut laitteet	8
5.1	Leica Pegasus:Backpack	8
5.2	Leica Pegasus:Two	9
5.3	GeoDrone X4L	10
6	Mittaustyöt	10
6.1	Esivalmistelut	11
6.2	Leica Pegasus:Backpack	13
6.3	Leica Pegasus:Two	15
6.4	GeoDrone X4L	16
7	Koordinaattijärjestelmä	18
8	Aineiston rekisteröinti	19
9	Visuaalinen tarkastelu	20
9.1	Poikkileikkaus	20
9.2	Pintamalli	22

10	Tulokset	24
10.1	Tulosten laskenta	24
10.2	Tulosten esittely	26
10.2.1	Leica Pegasus:Backpack	26
10.2.2	Leica Pegasus:Two.	26
10.2.3	GeoDrone X4L	27
11	Pohdinta	28
	Lähteet	29
	Liitteet	
	Liite 1. Tulokset Pegasus:Backpack	
	Liite 2. Tulokset Pegasus:Two	
	Liite 3. Tulokset GeoDrone X4L	

Lyhenteet

GNSS	Global Navigation Satellite System. Maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä.
IMU	Inertial Measurement Unit. Inertiamittausjärjestelmä. Mittaa laitteen sisäistä liikettä kiihtyvyyssanturien ja gyroskooppien avulla.
SLAM	Simultaneous Location and Mapping. Tekniikka, jota käytetään paikantamiseen satelliittikatvealueella.
UAV	Unmanned Aerial Vehicle. Miehittämätön ilma-alus.

1 Johdanto

Mobiilikartoitusjärjestelmien ja miehittämättömien ilma-aluksien käyttö ovat yleistyneet maanmittauksen menetelmänä kovaa vauhtia. Markkinoille tulee koko ajan myös uusia menetelmiä sisältäviä laitteita.

Helsingin rakentamispalvelu Staran mittausosastolla on tarvetta mobiilikartoituslaitteiden tarkkuus- ja käytettävyysselvitykselle ennen kuin laitteita otetaan laajemmin käyttöön. Tähän työhön valittiin kolme erilaista laitetta. Kaksi laitteista ovat mobiilikartoituslaitteita, ja yksi on ortokuvauskopteri.

Tämän työn tarkoitus on selvittää, millaisiin tarkkuuksiin laitteilla päästään ja arvioida laitteiden käytettävyyttä. Tutkimus suoritettiin vertailemalla pistepilvestä saatuja koordinaatteja takymetrillä mitattuihin pisteisiin. Mobiilikartoituslaitteiden osalta vertailu tehtiin ennen ja jälkeen rekisteröinnin. Laitteita ei vertailla keskenään laitteiden erilaisuuden takia. Työssä ei perehdytä syvemmin aineistojen jälkilaskentaan, sillä laitevalmistajat toimittivat testiin tarvittavat aineistot.

2 Helsingin rakentamispalvelu Stara

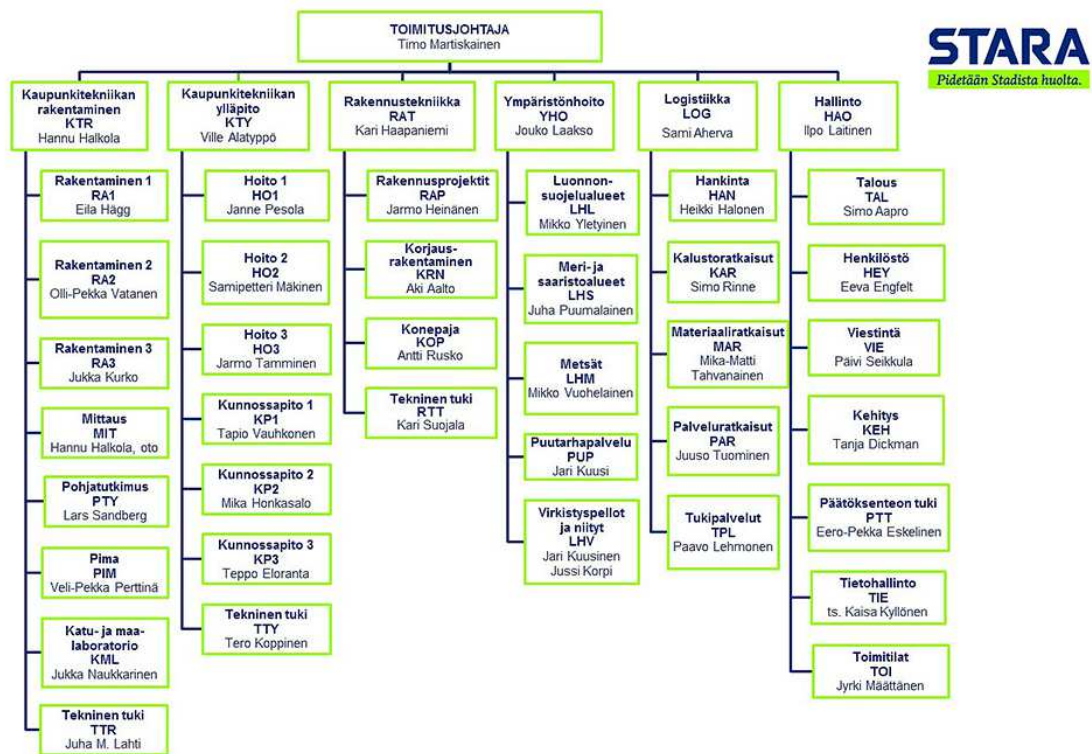
2.1 Esittely

Stara on Helsingin kaupungin rakentamispalvelu. Staran palvelut ja päätuotteet ovat kiinteistöjen korjaus ja kunnossapito, kuljetukset ja korjaamopalvelut, luonnonmukaisien alueiden hoito (metsät, pellot, niityt, merialueet), maa- ja kallioperän tutkimukset, kartoitukset ja kunnostus, katujen ja viheralueiden hoito ja kunnossapito sekä katujen ja puistojen rakentaminen. [1]

Staralla oli vuoden 2015 lopussa henkilökuntaa 1 468 työntekijää. Staralla on kuitenkin paljon kausiluontoista työtä, ja kesällä henkilöstömäärä nousee miltei kahteen tuhanteen. Staran liikevaihto vuonna 2015 oli 207 miljoonaa euroa. Tilikauden toimintakate oli 8,89 miljoonaa ja tulos poistojen jälkeen 4,9 miljoonaa euroa ylijäämäinen. [1]

Stara tuottaa palvelut kuudessa tuotantoyksikössä:

- Kaupunkitekniikan rakentamisen vastuulla on iso osa kaikesta kuntateknisestä tuotannosta Helsingissä.
- Kaupunkitekniikan ylläpito hoitaa kaupungin katuja, puistoja ja yleisiä alueita ja kunnostaa kaikkea mitä kaupunkiympäristöön kuuluu.
- Rakennustekniikka vastaa kaupungin omistamien rakennusten, kuten sairaaloiden ja koulujen korjauksista.
- Ympäristöhoito hoitaa kaupunkimetsiä ja kaupungin viljelysmaita sekä luonnonmukaisia alueita.
- Logistiikka tuottaa kaupungin tarvitsemia auto-, kone ja kuljetuspalveluja. [1]



Kuva 1. Staran organisaatio [1].

Stara myy palveluja ensisijaisesti julkiselle sektorille. Pääosa liikevaihdosta (96,5 prosenttia vuonna 2015) koostuu kaupungin virastojen ja liikelaitosten tilauksista. Staraa voi siis pitää Helsingin kaupungin sisäisenä palveluntuottajana. Staran suurimmat asi-

akkaat ovat rakennusviraston katu- ja puisto-osasto, kiinteistöviraston Tilakeskus ja HSY:n vesihuolto. [1]

2.2 Mittauspalvelut

Staran mittauspalvelut kuuluvat Kaupunkitekniikan rakentamiseen. Mittauspalvelut on jaettu toimialueittain Helsingin alueella neljään alueeseen: läntiseen, itäiseen ja pohjoiseen mittausosastoon sekä projektimittaukseen. Mittauspalveluihin kuuluvat kartoitusmittaukset, suunnitelmien maastoon merkintä ja tarkemittaukset, määrälaskennat sekä maisemasuunnitteluun ja viherrakentamiseen kuuluvat mittauspalvelut.

Tällä hetkellä mittauskalustoon kuuluu pääasiassa Trimblen takymetrejä, GNSS-mittalaitteita sekä Rieglin VZ-400i-laserkeilain. Mittausaineiston käsittelyssä käytetään pääasiassa Microstation-ohjelmaa sekä Terrasolidin sovelluksia.

3 Mobiilikartoitus

Mobiilikartoitus tarkoittaa liikkeessä tehtävää kartoitusta. Mobiilikartoitusjärjestelmään kuuluu kolme osaa: kartoituslaite, paikannusjärjestelmä sekä ohjausyksikkö. Ohjausyksikkö synkronoi ja yhdistää kerättyä geometristä tietoa sekä sijaintitietoa. Kaikki sensorit ovat asennettu samalle liikkuvalla alustalle, jonka liikerata on laskettu. Lopulta se tuottaa georeferoitua eli sijaintiin sidottua 2D- ja 3D-dataa. Mahdollisia alustoja käytettäväksi ovat esimerkiksi auto, juna, vene, moottorikelkka tai ihminen. Mobiilikartoitusjärjestelmässä tekniikkana voidaan käyttää laserkeilausta ja/tai kuvausta. [12]

Mobiilikartoitusta voidaan tehdä käyttämällä signaloituna tai signaloimattomana mittauksena. Signaloinnilla aineisto sidotaan haluttuun koordinaatistoon ja parannetaan aineiston tarkkuutta. Signaalit sijoitetaan maastoon niin, että ne voidaan havaita pistepilvestä. Signaaleille kartoitetaan koordinaatit esimerkiksi GNSS-mittauksella tai takymetrillä. Signaloimattomassa mittauksessa sijainnin määrittäminen perustuu laitteen omaan paikannusjärjestelmään. Signaloimattomassa mittauksessa säästetään signaalien kartoitus.

3.1 Laserkeilaus

Laserkeilauksessa mittausta pystytään suorittamaan koskematta kohteeseen. Laserkeilaus toimii laitteen lähettämän lasersignaalin avulla. Laite mittaa etäisyyttä kohteeseen ja laskee lasersäteiden lähtökulmien (vaaka- ja pystykulmien) avulla jokaiselle havaitulle pisteelle koordinaatit. Laserkeilain tallentaa koordinaattien lisäksi intensiteettiarvon, joka perustuu paluusignaalin voimakkuuteen. Jos laserkeilaimen on liitetty kamera, pisteille voidaan saada myös väriarvo. Laserkeilain tuottaa pistepilven, jossa voi olla kohteesta riippuen jopa miljoonia pisteitä. [3]

Laserkeilaimet voidaan luokitella neljään luokkaan käyttötarkoituksensa mukaan:

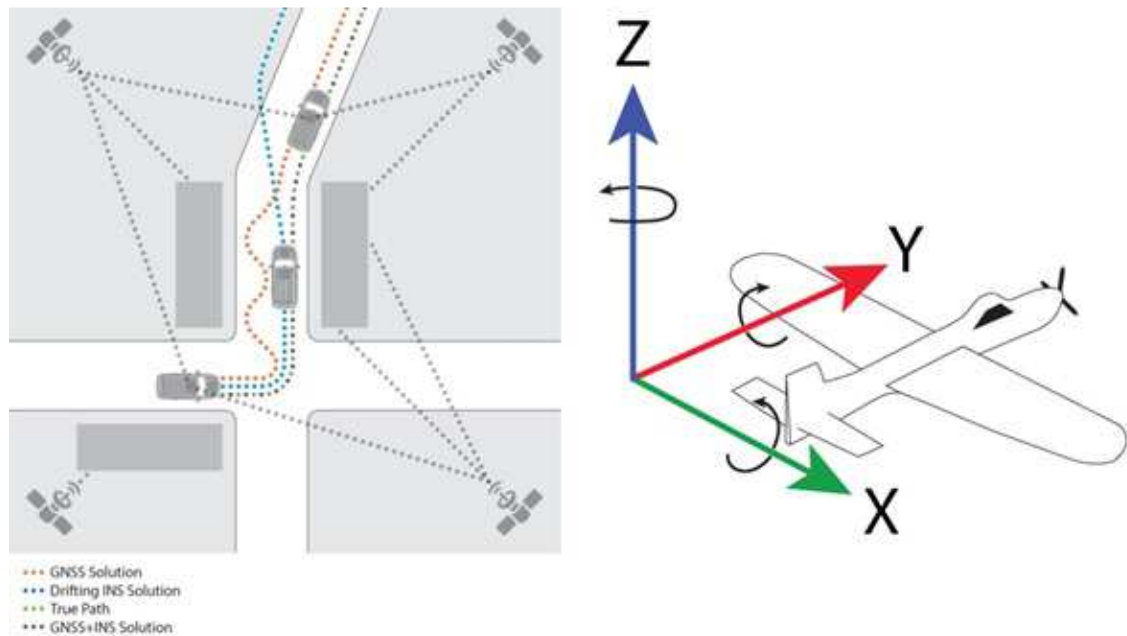
- Kaukokartoitus-laserkeilaimet. Käytetään lentokoneista, helikoptereista tai avaruusaluksista. Mittausetäisyys on tyypillisesti 100 metristä 100 kilometriin tarkkuuden ollessa alle 10 senttimetriä.
- Maalaserkeilaimet. Käytetään sisä- ja ulkotilamittauksissa. Mittausetäisyys on 1-300 metriä ja mittaustarkkuus alle 2 senttimetriä.
- Teollisuuslaserkeilaimet. Näitä käytetään pienien kohteiden mittaamiseen. Mittausetäisyys on alle 30 metriä ja mittaustarkkuus alle millimetrin.
- Mobiililaserkeilaimet, joita käytetään liikkuvalla alustalla. Mittausetäisyys on 1-300 metriä ja mittaustarkkuus alle 10 senttimetriä. [3]

Tässä työssä keskityttiin mobiiliin laserkeilaukseen.

3.2 Paikannusjärjestelmä

Mobiilikartoitusjärjestelmän yksi osa on paikannusjärjestelmä, jonka avulla saadaan mitatut pisteet koordinaatistoon. Paikannusjärjestelmä koostuu satelliittipaikannuksesta (GNSS) sekä inertiamittausjärjestelmästä. Satelliittipaikannusjärjestelmä käyttää satelliiteista saatuja signaaleja, joista lasketaan paikka, aika ja nopeus. Inertiamittausjärjestelmä laskee inertiamittausjärjestelmästä (IMU) saatua informaatiota saadakseen laitteen kiertokulmat ja kiihtyvyyden. GNSS+IMU ratkaisun avulla pystytään määrittämään

mobiilikartoituslaitteen tarkka sijainti satelliittikatvealueillakin. Kuva 2 havainnollistaa paikannusjärjestelmän toiminnan. [4]



Kuva 2. Vasemmalla GNSS+IMU ratkaisu. IMUn mittaamat kiertokulmat ja kiihtyvyyys havainnollistettuna oikealla [4].

3.3 SLAM

SLAM-tekniikkaa käytetään Pegasus:Backpackissä sijainnin määrittämiseen sisätiloissa. SLAM tulee sanoista Simultaneous Location and Mapping. Suomeksi tarkoittaa samanaikaista paikantamista ja kartoittamista. Tätä tekniikkaa käyttämällä saadaan määritettyä sijainti ilman satelliittipaikannusta esimerkiksi sisätiloissa samalla kun kartoitetaan ympäristöä. SLAM käyttää paikannukseen joko kuvausta tai laserkeilausta. Samalla kun ympäristöä laserkeilataan, SLAM pystyy päättämään laitteen sijainnin ja asennon tasaisista pinnoista kuten seinistä. Paras tulos paikannukselle saadaan, kun kartoitettavalla alueella kuljetaan samasta kohdasta uudestaan eli reitti suljetaan. Tällä tavoin laite tunnistaa ja osaa yhdistää datan aiemmin mitattuun ja koko aineiston paikannustarkkuus paranee. Kartoitus SLAM-tekniikkaa käyttäen aloitetaan ja lopetetaan satelliittialustuksella samassa paikassa ennen ja jälkeen mittauksen. [2] Kuva 3 havainnollistaa SLAM-tekniikan avulla tehtävässä kartoituksessa reitin sulkemisen.

toitettavan alueen. Perinteisessä lentokoneella tehtävässä ilmakuvauksessa lentosuunnassa olevan peiton eli pituuspeiton tulee olla vähintään 60 prosenttia. Sivusuunnassa olevan peiton eli sivupeiton tulee olla vähintään 30 prosenttia. Kuvien peitoilla varmistetaan, että koko alue tullaan näkemään stereona. [13]

4.3 UAV

UAV tulee sanoista Unmanned Aerial Vehicle eli miehittämätön ilma-alus. Miehittämättömillä ilma-aluksilla tarkoitetaan joko radio-ohjattavia tai itsenäisesti lentäviä koptereita tai lennokkeja. Tässä tutkimuksessa käytettiin ilmakuvaukseen UAV-kopteria.

Ilmakuvaukseen UAV-koptereilla on toimintaperiaatteiltaan hyvin samanlaista kuin perinteisessä ilmakuvauksessa. Lentokoneella tehtävään ilmakuvaukseen verrattuna pituus- ja sivupeittojen tulee olla suuremmat, jotta pistepilvi ja ortokuvat saadaan tarkemmaksi. Ilmakuvat on mahdollista saada haluttuun koordinaatistoon käyttämällä signaaleja, joiden koordinaatit tiedetään.

5 Tutkimukseen valitut laitteet

5.1 Leica Pegasus:Backpack



Kuva 4. Pegasus:Backpack [8].

Yksi tutkittavista tekniikoista oli Leican Pegasus:Backpack. Pegasus:Backpack [kuva 4] on mobiilikartoitusjärjestelmä, jota käytetään reppuna. Laite sisältää satelliittipaikannusjärjestelmän, IMU:n, 5 kameraa ja 2 Velodyn VLP-16 laserkeilainta. Molempien keilaimien teoreettinen mittaussnopeus on 300 000 pistettä sekunnissa. Laite painaa noin 12kg. Laitteen käyttölämpötila on 0...+40°C:een ja laitteen IP-luokka on IP 52. Järjestelmään kuuluu langaton näyttö, jossa näkyy reaaliaikaisesti tuotettu aineisto. Järjestelmään on mahdollista asentaa liitännäisiä, kuten esimerkiksi lämpökamera tai salama. Salama mahdollistaa kuvien ottamisen myös pimeissä olosuhteissa. [8]

Laitteen valmistajan lupaama suhteellinen tarkkuus on 2-3 senttimetriä sekä ulkotiloissa että sisätiloissa. Luvattu paikannustarkkuus ulkona on 5 senttimetriä ja sisätiloissa käyttäen SLAM-tekniikkaa ilman tähyypisteitä on 5 senttimetrinä 50 senttimetriin. [2;8.]

5.2 Leica Pegasus:Two



Kuva 5. Pegasus:Two [9].

Toinen tutkittava tekniikka oli Leican mobiilikeilausjärjestelmä Pegasus:Two [kuva 5]. Tässä työssä mobiilikeilaus tehtiin autolla, mutta mobiilikeilausjärjestelmää voidaan käyttää muillakin alustoilla, kuten veneessä, mönkijässä tai junassa. Laite ei tarvitse erillistä kalibroitua, joten laitetta voi käyttää useammalla alustalla päivän aikana. Järjestelmään kuuluu 8 kameraa, laserkeilain ja GNSS/IMU-paikannusjärjestelmä. [5;9.]

Laitevalmistaja ilmoittaa tyypilliseksi tarkkuudeksi tarkkuustestin perusteella vaakasuunnassa 0.020 m RMS ja korkeussuunnassa 0.015m RMS. Testissä ajettiin 40 km/h nopeudella eikä signalointia käytetty. [9]

Järjestelmässä on mahdollista käyttää eri valmistajien laserkeilaimia tai suorittaa kartointus vain kuvantamalla. Tässä tutkimuksessa käytössä oli Zoller+Fröhlichin ZF9012-laserkeilain.

5.3 GeoDrone X4L



Kuva 6. GeoDrone X4L [11].

Kolmas tutkittava laite oli suomalaisen VideoDronen valmistama GeoDrone X4L UAV-kopteri [kuva 6]. Kopteri painaa 4 kg ja sen mitat ovat 58 cm x 58 cm ja korkeus 37 cm. Kopterilla voi yhden lennon aikana kuvata jopa 50 ha:n alueen 38 minuutissa. Tuulirajoitus kopterin lentämiselle on 8 m/s. Kopterissa on Sonyn valmistama kamera, joka ottaa 24 megapikselin taseisia kuvia. 150 metrin lentokorkeudesta kameran maastoresoluutio on 3,5 senttimetriä. [11]

6 Mittaustyöt

Mittaustyöt suoritettiin Helsingin Pitäjänmäessä Talin urheilupuiston vieressä. Mittausalueeksi [kuva 7] valittiin Staran mittaukselle tyypillinen kohde eli alue, jossa on katua, parkkialuetta, reunakiveä ja puistoa. Leican järjestämät laitteet olivat käytössä vain tiettyinä aikana, sillä laitteet olivat Suomessa vain kyseisen viikon Leican järjestämässä laserkeilausseminaarissa 23.3.2016.



Kuva 7. Mittausalue.

6.1 Esivalmistelut

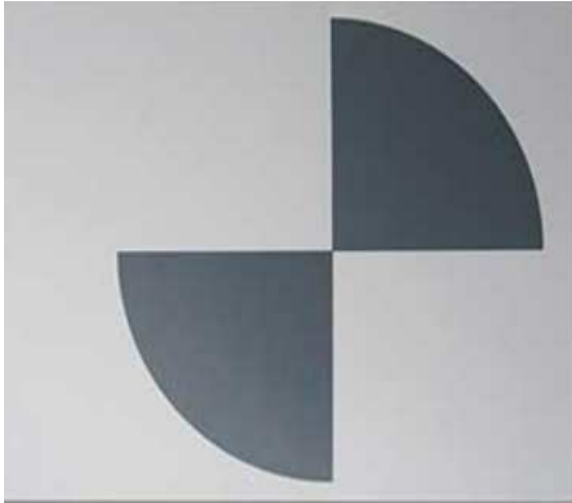
Mittausalueelle tuotiin lähtöpisteet jonomittauksella Helsingin kaupunkimittausosaston kiintopisteistä ja yhdestä korkeuskiintopisteestä. Jonomittauksessa käytettiin Trimblen takymetriä prisma-sauvalla. Jono suljettiin myös kaupungin kiintopisteelle. Alueelle tehtiin runkopisteverkko käyttäen Staran tarratähyksiä.



Kuva 8. Staran tarratähys takymetrin orientointia varten vasemmalla, maalattu kontrollipiste oikealla.

Mittausalueelle maalattiin testejä varten asvalttiin kontrollipisteitä, jotka kartoitettiin takymetrillä käyttäen lähtöpisteinä Staran tarratähyksiä [kuva 8]. Maalaukset olivat muodoltaan kaksi vastakkaista ympyrän segmenttiä halkasijaltaan noin 15 senttimetriä. Kontrollipisteitä tehtiin yhteensä 21 kappaletta. Alue kartoitettiin kokonaisuudessaan takymetrillä sisältäen maapisteitä, reunakivet, asvaltinreunat ja kaivonkansia. Kontrollipisteitä ei ole tarkoitus käyttää pistepilvien rekisteröintiin.

Alueelle sijoitettiin keilausta varten Leican omia paperitähyksiä [kuva 9], joita käytettäisiin aineiston rekisteröinnissä. Tähyksiä sijoitettiin ympäri testialuetta, jotta varmistuttiin siitä, että tähyksiä on riittävästi rekisteröintiä varten. Kaikki tähykset kartoitettiin takymetrillä käyttäen samoja lähtöpisteitä kuin kontrollipisteiden mittaamisessa. Tähyksiä sijoitettiin yhteensä 7 kappaletta.



Kuva 9. Leican paperitähys A4 kokoisena.

6.2 Leica Pegasus:Backpack

Reppuskannerilla mittaus suoritettiin 22.3.2016. Mittauksen suoritti Leican Pohjois-Euroopan Mobile Mapping Business Development Manager Antonio Mendes. Olosuhteet olivat hieman talviset, sillä lunta oli satanut uudestaan vain muutamaa päivää ennen mittauksia. Lumi oli kuitenkin sulanut lähes kokonaan pois asfalttikentältä, mutta nurmi- ja hiekka-alueilla oli edelleen lunta [Kuva 10]. Päädyttiin ratkaisuun, että kartoitetaan vain tien ja parkkipaikan alue eikä oteta mukaan ollenkaan Talin ulkoilualuetta.

Backpack vaatii ennen mittausta noin viisi minuuttia kestävän järjestelmän käynnistykseen ja satelliittien alustuksen. Mittausalue käveltiin kertaalleen ajorataa, jalkakäytävää ja pysäköintialuetta pitkin [kuva 11]. Mittaus kesti noin 10 minuuttia.



Kuva 10. Pegasus:Backpack Talissa.



Kuva 11. Kävelyreitti ilmakuvan pohjalla.

6.3 Leica Pegasus:Two

Pegasus:Two-mobiilikartoitusjärjestelmällä mittaus suoritettiin 24.3.2016. Mittauksen suoritti Leican Pohjois-Euroopan Mobile Mapping Business Development Manager Antonio Mendes. Olosuhteet olivat lumiset ja lämpötila oli nollan asteen tuntumassa.

Pegasus:Two:n järjestelmä vaatii samanlaiset alustukset kuin Pegasus:Backpack. Laitteisto käynnistettiin ennen mittausalueelle saapumista, joten järjestelmä oli heti käyttövalmis. Mittausalue ajettiin kahteen kertaan niin, että skanneri oli suunnattu eri suuntiin molemmilla ajokerroilla. Autolla ajaessa täytyi huomioida se, missä autolla saa ajaa, joten ajoreitti kulki vain ajorataa ja parkkipaikkaa pitkin [kuva 12]. Mittaus oli nopeasti ohi, sillä koko mittaus kesti noin 10 minuuttia.



Kuva 12. Ajoreitti ilmakuvan pohjalla. Reitti ajettiin kahteen kertaan eri suuntiin.



Kuva 13. Leica Pegasus:Two auton katolla.

6.4 GeoDrone X4L

Ortokuvauskopterilla mittaukset suoritettiin 6.5.2016. Mittaukset suoritti Geotrim Oy ja Ulf Fransman. Olosuhteet olivat kesäiset aiempiin mittauksiin nähden. Lumesta ei ollut enää haittaa eikä puissa ollut vielä lehtiä. Ennen kohteeseen saapumista laadittiin lentosuunnitelma DJI Ground Station -ohjelmalla. Lentosuunnitelma tehtiin niin, että lento-reitti kattoi koko mittausalueen, sekä hieman sen yli. Näin saatiin koko haluttu alue mitatuksi. Lentosuunnitelmassa määritettiin lentokorkeus, kuvauksen pituus- ja sivupeitot sekä lentonopeus. Lentokorkeudeksi määritettiin 100 metriä ja pituus- ja sivupeitoksi 80 prosenttia.

GeoDrone vaatii mittaukseen oman signalointinsa, jotta pistepilvi voidaan orientoida keskenään sekä saada haluttuun koordinaatistoon. Näitä signaaleja [kuva 14] sijoitettiin maastoon 5 kappaletta ympäri mittausaluetta. Signaalit kartoitettiin takymetrillä käyttäen samoja lähtöpisteitä kuin kontrollipisteiden kartoitukseen sekä Leican mittauksessa käytettyihin tähyksiin.

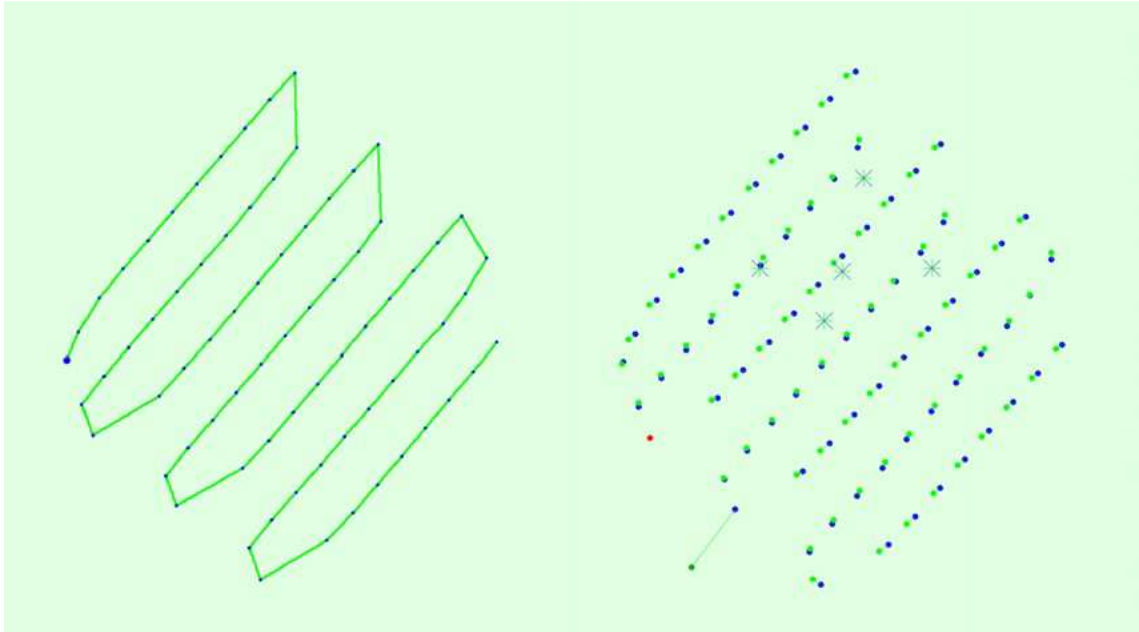


Kuva 14. GeoDronen signaaleja.



Kuva 15. GeoDrone X4L lähtövalmiina.

Ennen lentoon lähtöä testataan kameran toiminta ottamalla yksi kuva. Ilmakuvaus kopterilla on hyvin automaattista. Kopteriin [kuva 15] ladataan valmiiksi tehty lentosuunnitelma, jossa on määritelty lähtö- ja laskeutumispaiikka. Kopteri nostetaan ilmaan manuaalisesti radio-ohjelmalla, minkä jälkeen kopteri lähtee valmiiksi suunnitellulle lentoreitille. Kopteri ottaa kuvat automatiikan avulla. Kuvat, kuvien ottopaikat sekä lennetyn reitin tiedot tallentuvat muistikortille. Kuvauksen päätyttyä, kopteri palasi samaan paikkaan mistä lähti ja kopteri laskettiin manuaalisesti maahan. Muuten kuvauslento on täysin automaattinen. Kuvauksen kesto oli noin 10 minuuttia. [14]



Kuva 16. Vasemmalla lentoreitti, jossa näkyy kuvien ottopaikat. Oikealla kuvien ottopaikat pisteillä ja signaalit rukseilla.

7 Koordinaattijärjestelmä

Helsingin kaupunki käyttää koordinaattijärjestelmänä ETRS-GK25-tasokoordinaatistoa ja N2000-korkeusjärjestelmää. Kaikki lähtöpisteet ja kontrollipisteet on mitattu kaupungin järjestelmään. ETRS-GK25-koordinaatisto perustuu eurooppalaisen ETRS89-koordinaattijärjestelmän suomalaiseseen realisaatioon EUREF-FIN. [15]

Leican Pegasus:Two ja Pegasus:Backpack eivät olleet vielä mittausajankohtana yhteensopivia suomalaisten koordinaattijärjestelmien kanssa. Tästä syystä mittaukset tehtiin satelliittipaikannusjärjestelmän koordinaattijärjestelmään WGS84 ja ellipsoidiseen korkeuteen GRS80. WGS84-järjestelmälle ei ole realisaatiota Suomessa, mutta käytännössä ETRS89-järjestelmä on identtinen WGS84-järjestelmän kanssa. WGS84-koordinaatiston tasokoordinaatit TM35 ovat yhteneviä ETRS-TM35FIN koordinaattien kanssa, joten muunnokset tehtiin Geodeettisen laitoksen koordinaattimuunnospalvelulla TM35 -> ETRS-GK25. [16]

Ennen rekisteröintiä aineisto oli eri koordinaattijärjestelmässä, joten kontrollipisteiden koordinaatit muunnettiin aineistoon sopivaksi Geodeettisen laitoksen koordinaattimuunnospalvelulla. Koordinaattimuunnoksen virheet xy-tasolla eivät vaikuta niin paljon,

että sitä pystyisi havaitsemaan mittauslaiteilla. Sen sijaan muunnoksen tarkkuus ellipsoidisesta korkeudesta N2000-korkeusjärjestelmään on noin 2 cm (RMS). N2000-korkeusjärjestelmä perustuu FIN2005N00-geoidimalliin. [17]

8 Aineiston rekisteröinti

Pistepilvet rekisteröitiin eli sidottiin haluttuun koordinaatistoon. Rekisteröinnissä käytetään tähyksiä, joiden koordinaatit tiedetään. Rekisteröinnillä kaikki pistepilvet saatiin testiä varten samaan koordinaatistoon. Pistepilvien rekisteröinnit suoritettiin Leican aineistoilla Cyclone-ohjelmalla ja GeoDronen X4L:n aineisto Pix4d:llä.

Leican aineistojen osalta laitevalmistaja toimitti esiprosessoidut pistepilvet ilman rekisteröintiä. Backpackin osalta ongelmia pistepilven rekisteröinnissä tuotti tähyksien tunnistamattomuus pistepilveltä. Rekisteröinnissä jouduttiin käyttämään maalattuja kontrollipisteitä, sillä ne oli mahdollista tunnistaa ja käyttää rekisteröintiin. Tämä aiheutti sen, että testiin saatiin vähemmän kontrollipisteitä. Backpackin osalta pistepilven laadusta ei saatu toivottua tulosta. Laite on erittäin uusi ja vasta markkinoille tullut, joten järjestelmä ja ohjelmisto kehittyvät edelleen. Leicalla havaittiin testirepusta syksyllä 2016 ongelmia kalibroitiedostossa, joka aiheutti osaltaan ongelmia aineistolle. Laitteen ohjelmistokin päivitettiin uuteen. Tiedoston korjaamisen jälkeen aineisto prosessoitiin uudelleen päivitetyllä ohjelmistolla sekä käyttämällä suodattimia, jotka rajasivat osan aineistosta pois. Rajauksella poistettiin 0–1,5 metrin väliset ja yli 35 metrin päässä olevat pisteet. Uudelleen prosessoidusta aineistosta tuli selkeämpi ja pistepilven kohina eli mitatun pisteen hajonta väheni huomattavasti. [7]

Pegasus:Twon osalta rekisteröinti onnistuttiin tekemään Leican paperitähysten avulla.

GeoDrone X4L:n datan jälkilaskennan suoritti Geotrim ja Ulf Fransman. Aineiston käsittely suoritettiin Pix4d-ohjelmalla. Pistepilven laskennassa käytettiin maastoon sijoitettuja signaaleja ja niille takymetrillä kartoitettuja koordinaatteja. Aineistosta toimitettiin teksturoitu pistepilvi sekä ortokuva.

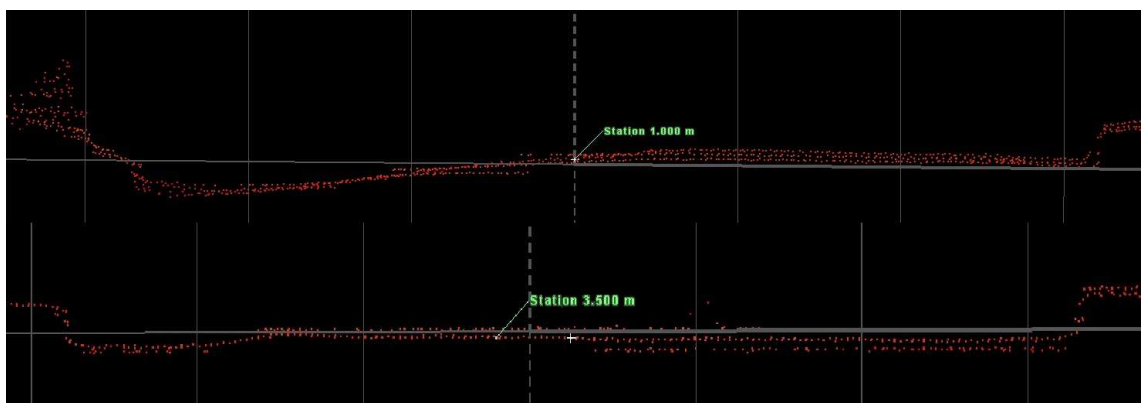
9 Visuaalinen tarkastelu

Työn pääasiallinen tarkoitus oli tarkkuuksien selvittäminen, mutta lisäksi työhön otettiin mukaan visuaalista tarkastelua. Pistepilven tarkkuus ei kerro kaikkea pistepilven laadusta, joka vaihtelee jonkin verran kaikkien laitteiden kesken. Tarkastelu tehtiin kahden poikkileikkauksen ja yhden pintamallin avulla. Kaikkien kolmen laitteen tarkastelu tehtiin samoista kohdista. Pistepilvestä muodostetut poikkileikkaukset ja pintamallit tehtiin Cyclonella.

9.1 Poikkileikkaus

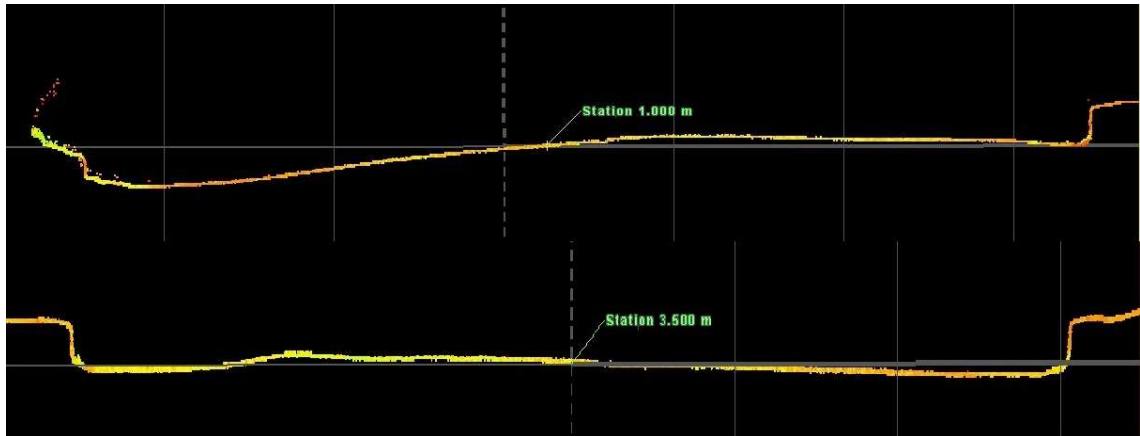
Poikkileikkaukset tehtiin ajoradasta kahdesta eri paikasta. Kaikkien aineistojen kesken kohta, josta poikkileikkaus tehtiin, oli sama. Tarkoituksena oli selvittää, kuinka reunakivi saadaan näkyviin. Poikkileikkauksen korkeussuhde on kaksinkertainen todellisuuteen nähden, jotta korkeusvaihtelu erottuu selvemmin. Poikkileikkauksen paksuus on 20 senttimetriä.

Pegasus:Backpackin aineistosta tuotetut poikkileikkaukset esitetään kuvassa 17. Poikkileikkauksesta nähdään reunakivet selkeästi lukuun ottamatta ylemmän poikkileikkauksen vasempaa reunaa. Pistepilvessä on hieman epätasaisuutta. Tiellä oli reunakiven juuressa monin paikoin vielä hieman lunta ja roskia, joka osaltaan vaikuttaa lopputulokseen.



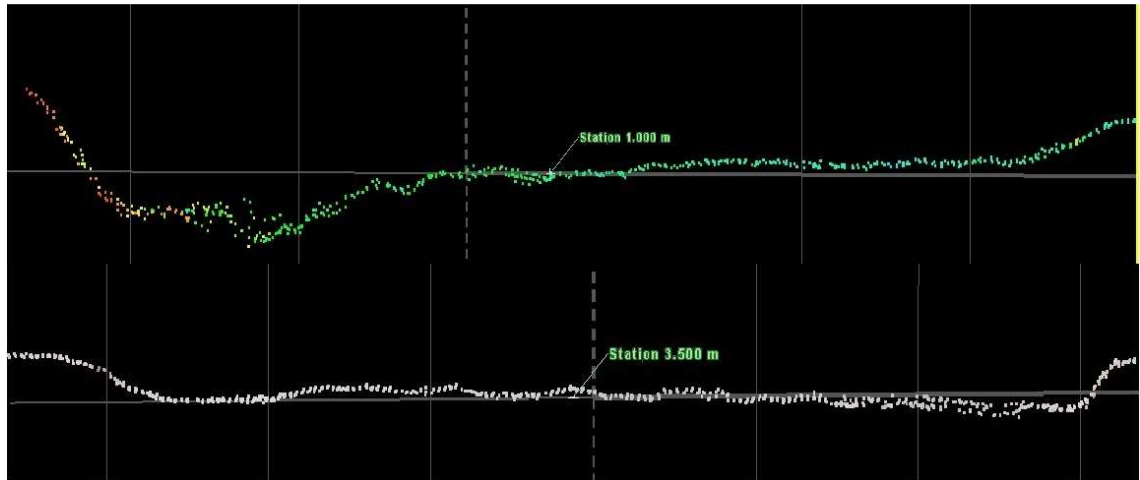
Kuva 17. Poikkileikkaukset Pegasus:Backpack.

Kuvassa 18. nähdään Pegasus:Two:n aineistosta tehty poikkileikkaus. Poikkileikkaukset ovat selvästi parhaat ja reunakivet tulevat erittäin hyvin esille. Pistepilven pinta on tasaista. Ylemmän poikkileikkauksen vasemman reunan reunakiven alla on sama ongelma kuin Pegasus:Backpackin osalta eli lumi ja roskat hieman estävät reunakiveä kokonaan näkymästä.



Kuva 18. Poikkileikkaukset Pegasus:Two.

GeoDrone X4L:n aineistosta tehdyt poikkileikkaukset esitetään kuvassa 19. Näissä on selvästi eniten ongelmia. Ajoradan vieressä oli puita, jotka ovat aiheuttaneet alueelle varjoja. Varjot tuottivat ongelmia pistepilven laskemiselle. Ylemmän poikkileikkauksen kohdalla tilanne on vaikeampi, sillä koko alue oli varjoisassa paikassa. Alemmassa poikkileikkauksessa ei varjoja ollut, joten poikkileikkauksikin on parempi. Reunakivien erottaminen on kuitenkin hankalaa. Korkeussuhde on kaksinkertaistettu, joten epätasaisuuskin näkyy liioiteltuna. Pysäköintialueella, jossa ei estevaikutuksia ole, pinta on tasaisempi.

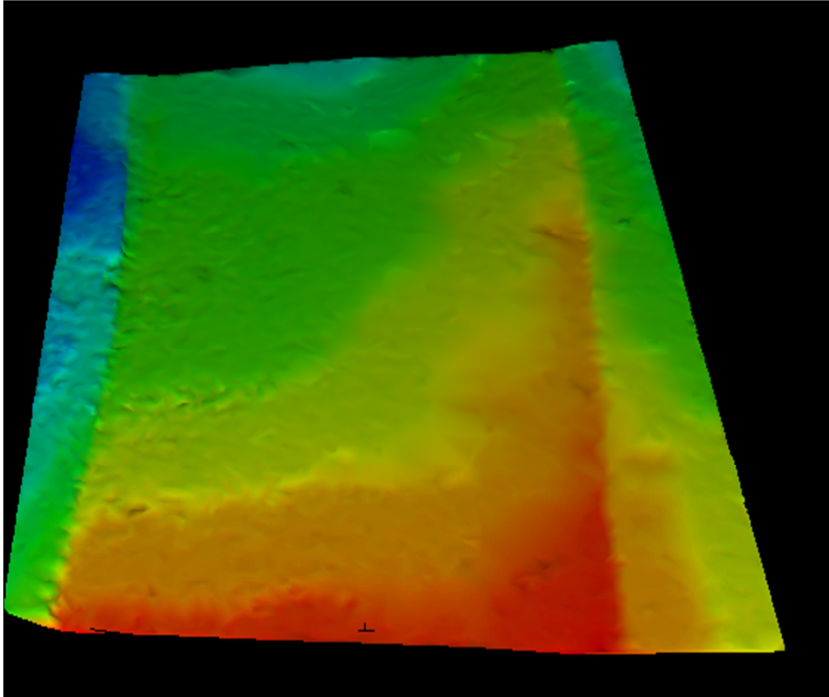


Kuva 19. Poikkileikkaukset GeoDrone X4L.

9.2 Pintamalli

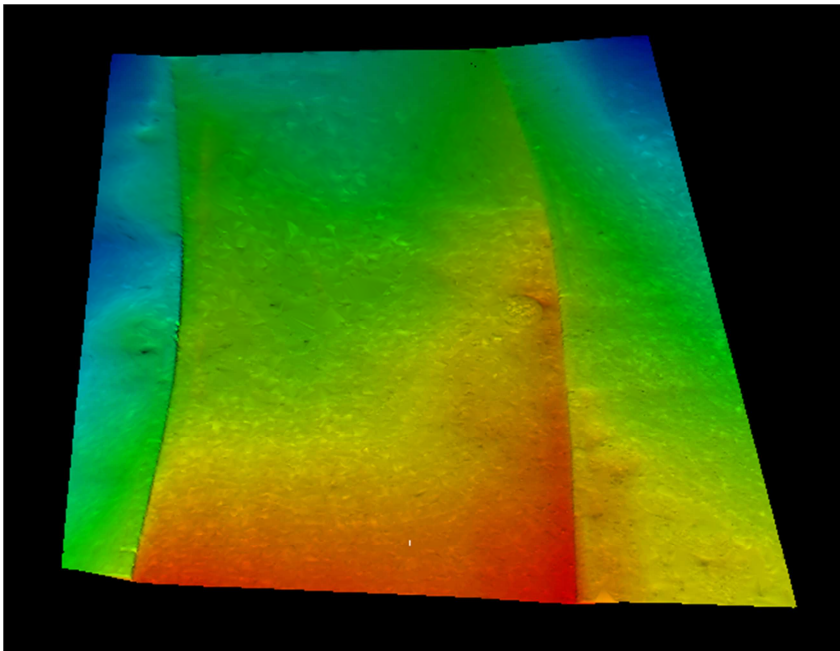
Pintamallit on tehty kuvaamaan maanpintaa. Kaikista aineistoista tehdyt pintamallit on tehty samasta kohdasta. Värit ovat korkeusvaihtelun mukaan. Alueen alhaalla oikealla alkaa reunakiven madallus. Pintamallien kolmiointia on harvennettu, sillä pistetiheys aineistoilla on niin suuri.

Kuvassa 20 esitetään Pegasus:Backpackin aineistosta tuotettu pintamalli. Pintamallissa on hieman epätasaisuutta, mutta mallista on hyvin erotettavissa reunakivet sekä myös reunakiven madalluksen alku.



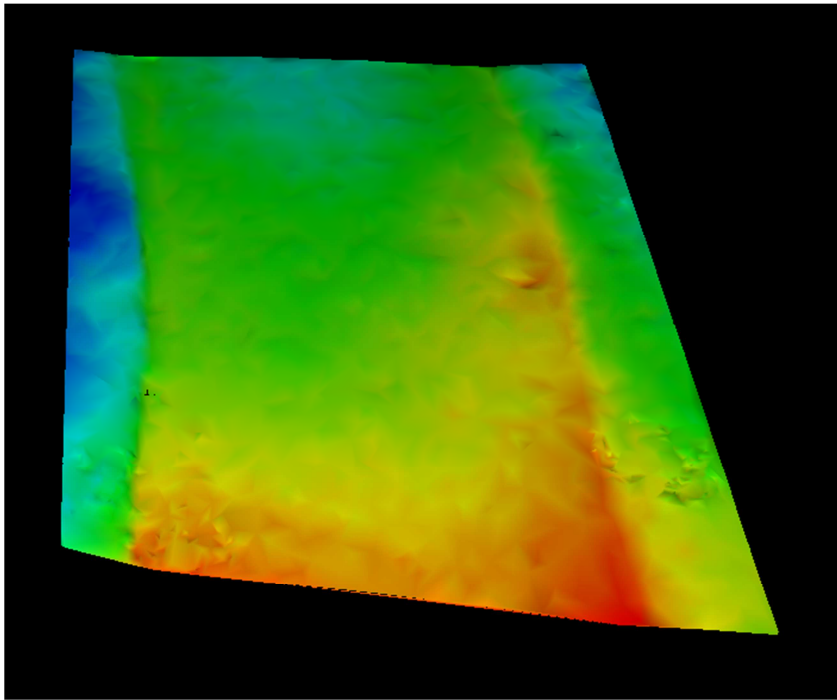
Kuva 20. Pintamalli Pegasus:Backpack.

Kuvassa 21 esitetään Pegasus:Twoon aineistosta tuotettu pintamalli. Korkeusvaihtelu on tasaista ja reunakivet erottuvat terävästi. Pintamallista on helppo havaita madalluksen alku sekä yksi kaivo ajoradan oikeassa reunassa.



Kuva 21. Pintamalli Pegasus:Two.

Kuvassa 22 esitetään GeoDrone X4L:n aineistosta tuotettu pintamalli. Pintamalli on hyvin tasaista. Pistepilvi ei ole yhtä tiheää kuin muilla laitteilla, josta syystä pintamallin pinta on tasaisempi. Pintamallista on hyvin havaittavissa reunakivet. Alueen alalaidassa on havaittavissa epätasaisuutta ja rosoisuutta.



Kuva 22. Pintamalli GeoDrone X4L.

10 Tulokset

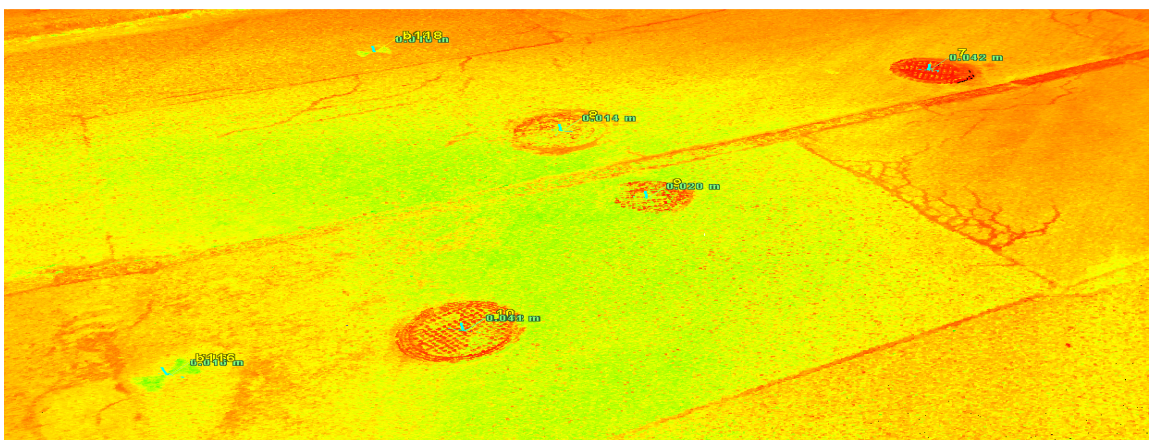
10.1 Tulosten laskenta

Testissä vertailtiin takymetrillä mitattuja kontrollipisteitä sekä muita selviä kohteita mitausalueelta. Tässä vertailussa takymetrin antamaa tulosta pidetään vertailukohtana. Leican laitteiden osalta vertailu tehtiin ennen ja jälkeen rekisteröinnin. Rekisteröimätön aineisto vastaa signaloimatonta mittausta.

Tulosten saamiseksi ohjelmistona käytettiin Leican Cyclonea. Cyclonessa mittaustulokset kontrollipisteistä tuotiin pistepilven päälle samassa koordinaatistossa. Sen jäl-

keen käytettiin Cyclonen mittaustyökalua laskemaan eromitat takymetrillä mitattujen koordinaattien ja pistepilvestä tunnistettavien kontrollipisteiden välille. Cyclone pystyy tunnistamaan automaattisesti kontrollipisteiden keskikohtaan, jolloin pistepilvelle saadaan luotua erillinen kolmiulotteinen risti, joiden välillä mittaukset tehdään.

Kontrollipisteiden lisäksi käytettiin pistepilvestä erotettavia kaivonkansien keskikohtia. Tuloksiin epävarmuutta tuo keskipisteen määrittäminen kaivonkansien kohdalla niin takymetrillä kartoitettaessa, että pistepilvestä tunnistettaessa. Pistepilvestä kaivonkansien keskipiste määritettiin visuaalisesti käyttäen apuna taite- ja apuviivoja. Kuvassa 23 nähdään pistepilvestä erotettavia kontrollipisteitä sekä kaivonkansia.



Kuva 23. Pistepilvestä tunnistettavia kontrollipisteitä ja kaivonkansia.

Eri laitteiden tuottamien pistepilvien välillä oli eroja siinä, kuinka paljon kontrollipisteitä saatiin näkyviin pistepilvestä. Jokaisella laitteella oli omat katvealueensa, jolloin samoja kontrollipisteitä ei saatu kovinkaan montaa. Kopterin mittauksessa ongelmia tuottivat puiden tuomat katvealueet, minkä vuoksi kontrollipisteet jäivät tunnistamatta osassa mittausaluetta. Pegasus:Twon katvealueet johtuivat pysähdyksissä olleista autoista sekä siitä, että autolla ei voinut poistua ajoradalta.

Tulokset tuotiin Cyclonesta Excel-taulukoihin. Taulukoista nähdään jokaiselle kontrollipisteelle mitatut etäisyydet takymetrillä mitattuihin koordinaatteihin. Taulukossa on eroteltuna X- ja Y-koordinaatit, korkeus Z sekä vaakasuora etäisyys eli horisontaalinen H. Viimeinen sarake kertoo etäisyyksien keskiarvon. Tulokset on esitetty kokonaisuudessaan liitteissä.

10.2 Tulosten esittely

Tulokset esitetään seuraavassa laitteittain. Leican osalta ennen rekisteröintiä esitettäviiin tuloksiin epävarmuutta tuo koordinaattimuunnoksen tuomat virheet sekä runkopis-
teverkon tarkkuus, joista kontrollipisteet ovat kartoitettu.

10.2.1 Leica Pegasus:Backpack

Taulukossa 1 nähdään tulokset ennen kuin pistepilvi on rekisteröity. Vertailtuja kontrol-
lipisteitä on yhteensä 21 kappaletta. Ennen rekisteröintiä saadut tulokset kertovat kuin-
ka aineisto sijoittuu koordinaatistoon perustuen laitteen omaan paikannusjärjestel-
mään. Tuloksista voidaan havaita, että korkeudessa Z päästään 3,4 senttimetrin pää-
hän takymetrillä mitattuihin koordinaatteihin. Vaakasuorassa etäisyydessä H havaitaan,
että arvot ovat samaa luokkaa eli 3,8 senttimetriä

Taulukko 1. Tulokset ennen rekisteröintiä Pegasus:Backpack.

	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dH (m)
keskiarvo	0,0274	0,0207	0,0342	0,038

Taulukossa 2 esitetään tulokset rekisteröinnin jälkeen. Vertailtuja kontrollipisteitä on
yhteensä 18 kappaletta. Tässä kohdassa vertailusta on poistettu ne kontrollipisteet,
joita on käytetty pistepilven rekisteröintiin. Rekisteröinnin jälkeen päästään testin sisäi-
seen tarkkuuteen, kun aineisto on sidottu haluttuun koordinaatistoon. Tuloksista näh-
dään, että arvot ovat pienentyneet. Tämä kertoo paremmin, mihin tarkkuuksiin laitteella
päästään.

Taulukko 2. Tulokset rekisteröinnin jälkeen Pegasus:Backpack.

	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dH (m)
keskiarvo	0,0187	0,0257	0,0153	0,0338

10.2.2 Leica Pegasus:Two.

Taulukossa 3 esitetään tulokset ennen rekisteröintiä. Vertailtavia kontrollipisteitä on
yhteensä 31 kappaletta. Tuloksista voidaan havaita, että korkeuden suhteen etäisyys

vertailuarvoon on erittäin pieni, kun laitteella päästään jo noin 1,6 senttimetrin päähän vertailuarvosta. Vaakaetäisyydessä H, laitteella on päästy 3,5 senttimetrin päähän.

Taulukko 3. Tulokset ennen rekisteröintiä Pegasus:Two.

	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dH (m)
keskiarvo	0,0305	0,0137	0,0158	0,0345

Taulukossa 4 esitetään tulokset rekisteröinnin jälkeen. Rekisteröinnin jälkeen käytössä oli edelleen kaikki samat kontrollipisteet, sillä rekisteröintiin ei käytetty yhtään kontrollipistettä. Tuloksista voidaan havaita, kuinka etäisyydet ovat jo erittäin lähellä vertailuarvoja. Korkeudessa päästään jo alle senttimetrin päähän vertailuarvosta. Vaakaetäisyyteen H päästään jo alle kahden senttimetriin. Tuloksia voidaan pitää jo erittäin hyvänä.

Taulukko 4. Tulokset rekisteröinnin jälkeen Pegasus:Two.

	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dH (m)
keskiarvo	0,0117	0,0133	0,0097	0,0197

10.2.3 GeoDrone X4L

Taulukossa 5 esitetään tulokset rekisteröinnin jälkeen. Vertailtavia kontrollipisteitä oli yhteensä 27 kappaletta. Kopterin tuloksista voidaan havaita, että korkeudessa päästään noin 1,3 senttimetrin päähän vertailuarvosta. Vaakaetäisyydessä H päästään alle kahden senttimetrin päähän.

Taulukko 5. Tulokset GeoDrone X4L.

	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dH (m)
keskiarvo	0,0133	0,0117	0,0131	0,0199

11 Pohdinta

Työn tarkoituksena oli tarkastella, millaisiin tarkkuuksiin erilaista tekniikkaa sisältävillä laitteilla pääsee. Tarkastelun perustana oli vertailu pistepilvestä saatujen kontrollipisteiden koordinaattien ja takymetrillä mitattujen koordinaattien eroja. Tulokset olivat jokaisella laitteella hyvät.

Pegasus:Backpackin osalta tarkkuusvertailua vaikeutti rekisteröintiin tarkoitettujen tähyksien käytön epäonnistuminen. Pistepilvestä ei saatu tunnistettua tähyksiä, jolloin rekisteröinnissä jouduttiin käyttämään osaa vertailuun tarkoitetuista kontrollipisteistä. Vertailuun ei otettu mukaan rekisteröintiin käytettyjä kontrollipisteitä. Katvealueita ei kuitenkaan ollut, sillä laitetta on mahdollista käyttää siellä, missä ihmisen on mahdollista liikkua. Backpackin hyöty on erittäin nopea tiedonkeruu, jolloin voidaan pohtia, onko tähypisteitä tarkoituksenmukaista käyttää.

Pegasus:Two on osalta tulokset olivat erittäin hyviä. Jo ennen rekisteröintiä laitteella päästiin muutaman senttimetrin päähän vertailuavaruudesta. Rekisteröinnin jälkeen laitteen erot kontrollipisteisiin olivat jo noin senttimetrin päässä. Myös pistepilven laatu oli laitteista paras. Pegasus:Two on alustavapaa mobiilikartoitusjärjestelmä, jolloin laitteen mahdolliset käyttöalueet ovat laajat jopa saman päivän aikana.

GeoDrone X4L:n osalta vertailuarvot kontrollipisteisiin olivat erittäin hyvät. Laitteella päästiin alle kahden senttimetrin päähän takymetrillä mitattuihin koordinaatteihin. Kaikkia kontrollipisteitä ei kuitenkaan ollut mahdollista käyttää, sillä osa pisteistä ei ollut näkyvillä pistepilvestä johtuen katvealueista kuten esimerkiksi puiden aiheuttamat katveet. Pistepilven laatu oli aukeilla alueilla erittäin hyvä ja tasainen, mutta puista johtuvat katveet aiheuttivat pistepilven epätasaisuutta. Kuvauskooperi on parhaimmillaan aukeilla alueilla.

Mittauslaitetta valittaessa pelkät millimetrit eivät ole ratkaisevassa osassa. Jokaisella laitteella on omat vahvuutensa ja rajoitteensa. Laitteen valintaan vaikuttavat muun muassa mittauskohde, haluttu mittaustarkkuus ja olosuhteet.

Lähteet

- 1 Staran esittely. Verkkodokumentti <<http://www.hel.fi/www/stara/fi/staran-esittely/>> Luettu 3.4.2016
- 2 Nuzzo Alessandro. 2016. Product line Manager Mobile Mapping. Webinar: Mapping Technology in a Backpack 9.11.2016
- 3 Joala Vahur. 2006. Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu. Verkkodokumentti <<https://docs.google.com/file/d/0B3MfAq-wXowIN2Q4MzJIYjktZTA5Ni00ZGMxLTlkOWUtNTQzMdlwZTI3NDVm/edit?hl=en&pli=1>> Luettu 28.02.2017
- 4 An introduction to GNSS, 2017. Verkkodokumentti <<http://www.novatel.com/an-introduction-to-gnss/>> Luettu 15.3.2017
- 5 Mendes Antonio. 2016. Mobile Mapping Business Development Manager North Europe. Laserkeilausseminaari 23.3.2016
- 6 Mendes Antonio. 2016. Mobile Mapping Business Development Manager North Europe. Keskustelu 24.3.2016
- 7 Mendes Antonio, 2016, Mobile Mapping Business Development Manager North Europe. Sähköpostikeskustelu 7.11.2016
- 8 Pegasus:Backpack Datasheet. 2016. Leica.
- 9 Pegasus:Two Datasheet. 2016. Leica.
- 10 Z+F Profiler 9012 Datasheet. 2016. Zoller + Fröhlich.
- 11 GeoDrone X4L. 2016. Verkkodokumentti. Geotrim. <<http://shop.geotrim.fi/geodrone-x4l.html>> Luettu 17.11.2016
- 12 Accuracy evaluation of mobile mapping system with advanced statistical methods. 2015. Verkkojulkaisu <<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5-W4/245/2015/isprsarchives-XL-5-W4-245-2015.pdf>> Luettu 13.10.2016
- 13 Heikkinen Jussi. 2016. Kaukokartoituksen perusteet- luentomateriaali. Metropolia ammattikorkeakoulu.
- 14 Fransman Ulf. 2016. Geotrim Oy. Vantaa. Kokous 17.10.2016

- 15 Koordinaatti- ja korkeusjärjestelmät. 2016. Verkkodokumentti. Helsingin kaupunkimittausosasto.
<http://www.hel.fi/www/kv/fi/organisaatio/kaupunkimittausosasto/koordinaatistot_ja+_korkeudet/koordinaatti_ja_korkeusjarjestelmat> Luettu 1.10.2016
- 16 Koordinaatti ja korkeusjärjestelmät. 2016. Verkkodokumentti. Maanmittauslaitos. <<http://www.maanmittauslaitos.fi/ammattilaisille/maastotiedot/koordinaatti-korkeusjarjestelmat/wgs84>> luettu 3.10.2016
- 17 Kovanen Janne. 2016. Vanhempi tutkija, Maanmittauslaitos. Sähköpostikeskustelu 5.10.2016

Tulokset Pegasus:Backpack

Taulukko 6. Tulokset ennen rekisteröintiä.

Name	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dH (m)
90	0,045	0,006	0,042	0,045
91	0,008	0,029	0,045	0,03
102	0,014	0,032	0,052	0,035
103	0,011	0,001	0,014	0,011
104	0,018	0,027	0,031	0,032
105	0,077	0,026	0,026	0,081
106	0,022	0,013	0,024	0,026
107	0,06	0,025	0,012	0,065
108	0,029	0,024	0,01	0,038
110	0,036	0,003	0,056	0,036
111	0,014	0,015	0,048	0,021
112	0,038	0,035	0,024	0,052
113	0,037	0,028	0,028	0,046
114	0,019	0,019	0,034	0,026
115	0,018	0,002	0,044	0,018
116	0,05	0,022	0,055	0,055
118	0,028	0,002	0,048	0,028
119	0,004	0,023	0,043	0,023
5174	0,008	0,072	0,004	0,072
ap1	0,025	0,001	0,041	0,025
ap2	0,014	0,03	0,038	0,033
Keskiarvo	0,027381	0,020714	0,034238	0,038

Taulukko 7. Tulokset rekisteröinnin jälkeen.

Name	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dH (m)
90	0,031	0,032	0,018	0,045
91	0,008	0,012	0,004	0,014
102	0,018	0,043	0,019	0,047
103	0,011	0,004	0,006	0,012
104	0,015	0,012	0,007	0,019
105	0,034	0,025	0,006	0,042
107	0,032	0,038	0,022	0,05
108	0,015	0,04	0,031	0,042
110	0,001	0,007	0,037	0,008
111	0,014	0	0,008	0,014
112	0,025	0,051	0,021	0,057
113	0,022	0,05	0,023	0,055
114	0,003	0,002	0,014	0,003
115	0,003	0,024	0	0,024
116	0,037	0,044	0,003	0,058
118	0,036	0,004	0,012	0,036
119	0,012	0,012	0,013	0,017
5174	0,02	0,062	0,032	0,065
Keskiarvo	0,018722	0,025667	0,015333	0,033778

Tulokset Pegasus:Two

Taulukko 8. Tulokset ennen rekisteröintiä.

Name	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dH (m)
90	0,032	0,004	0,009	0,032
91	0,039	0,002	0,012	0,039
92	0,025	0,024	0,013	0,035
100	0,011	0,023	0,025	0,025
101	0,021	0,01	0,031	0,023
103	0,048	0,012	0,008	0,049
104	0,029	0,018	0,013	0,034
105	0,025	0,012	0,014	0,028
106	0,019	0,008	0,023	0,021
107	0,035	0,001	0,021	0,035
109	0,031	0,013	0,022	0,033
110	0,032	0,017	0,029	0,036
111	0,01	0,015	0,025	0,018
112	0,021	0,017	0,015	0,027
113	0,017	0,025	0,018	0,03
114	0,024	0,008	0,011	0,025
115	0,027	0,016	0,019	0,032
116	0,033	0,012	0,013	0,035
117	0,049	0,017	0,011	0,052
118	0,031	0,01	0,017	0,032
119	0,041	0,006	0,024	0,042
120	0,022	0,006	0,022	0,022
ap1	0,027	0,011	0,021	0,029
ap2	0,041	0,002	0,016	0,041
k10	0,059	0,031	0,006	0,067
k135	0,047	0,041	0,003	0,063
k3138	0,028	0,014	0,002	0,031
k7	0,034	0,029	0,009	0,044
k73	0,025	0,006	0,025	0,026
k8	0,041	0,004	0,01	0,041
k9	0,021	0,011	0,003	0,024
Keskiarvo	0,030484	0,01371	0,015806	0,034548

Taulukko 9. Tulokset rekisteröinnin jälkeen.

Name	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dH (m)
90	0,004	0,005	0,014	0,007
91	0,016	0,008	0,011	0,017
92	0,001	0,025	0,01	0,025
100	0,024	0,009	0,003	0,026
101	0,022	0	0,002	0,022
103	0,01	0,009	0,018	0,014
104	0,004	0,015	0,011	0,015
105	0,003	0,012	0,006	0,012
106	0,022	0,005	0,002	0,023
107	0,016	0,012	0,004	0,02
109	0,003	0,011	0,003	0,012
110	0,003	0,017	0,007	0,017
111	0,015	0,016	0,001	0,022
112	0,014	0,01	0,009	0,017
113	0,001	0,017	0,005	0,017
115	0,009	0,018	0,004	0,021
116	0,012	0,008	0,007	0,014
117	0,024	0,018	0,008	0,03
118	0,002	0,009	0,005	0,009
119	0,019	0,009	0,002	0,021
119	0,002	0,005	0,012	0,006
120	0,003	0,016	0	0,016
ap1	0,013	0,002	0,005	0,013
ap2	0,018	0,006	0,002	0,019
k10	0,019	0,021	0,015	0,028
k135	0,01	0,054	0,022	0,055
k3183	0,01	0,009	0,023	0,013
k7	0,016	0,037	0,012	0,041
k73	0,039	0,017	0,05	0,042
k8	0,009	0,002	0,011	0,009
k9	0,001	0,009	0,018	0,009
Keskiarvo	0,011742	0,013258	0,009742	0,019742

Tulokset GeoDrone X4L

Taulukko 10. Tulokset GeoDrone X4L

Name	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dH (m)
90	0,017	0,01	0,007	0,02
91	0	0,011	0,004	0,011
103	0,014	0,002	0,028	0,014
104	0,029	0,005	0,013	0,029
105	0,02	0,018	0,003	0,027
106	0,004	0,004	0,009	0,006
107	0,004	0,003	0,006	0,004
108	0,004	0,002	0,009	0,005
109	0,008	0,021	0	0,022
110	0,014	0,008	0,003	0,016
111	0,015	0,004	0,004	0,015
112	0,003	0,023	0,012	0,024
113	0,009	0,011	0,003	0,014
114	0,024	0,016	0,004	0,029
115	0,002	0,003	0,021	0,004
116	0,012	0,012	0,026	0,017
117	0,023	0,012	0,024	0,026
118	0,014	0,003	0,033	0,014
119	0,017	0,001	0,005	0,017
120	0,008	0,019	0	0,021
ap1	0,001	0,01	0,007	0,01
ap2	0,015	0,007	0	0,016
k10	0,02	0,017	0,018	0,026
k7	0	0,052	0,041	0,052
k73	0,041	0,007	0,044	0,042
k8	0,029	0,018	0,029	0,034
k9	0,013	0,016	0,001	0,021
Keskiarvo	0,013333	0,011667	0,013111	0,019852