

# KÄSISKANNERIN TARKKUUDEN ARVIOINTI

Koivula Ilkka

Opinnäytetyö

Maanmittaustekniikka  
Insinööri (AMK)

2024

Maanmittaustekniikka  
Insinööri (AMK)

---

<b>Tekijä</b>	Ilkka Koivula	<b>Vuosi</b>	2024
<b>Ohjaaja</b>	Janne W Matilainen		
<b>Toimeksiantaja</b>	Maailmasta Oy Jukka Tienhaara		
<b>Työn nimi</b>	Käsiskannerin tarkkuuden arviointi		
<b>Sivu- ja liitesivumäärä</b>	57 (1)		

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, kuinka käsiskannerin tuottaman aineiston tarkkuus soveltuu perusmittauksiin. Tavoitteena oli myös tutkia, miten käsiskanneri toimii maasto-olosuhteissa. Mittaukset suoritettiin kesällä 2020.

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten käsiskanneri mittausta voi hyödyntää maanmittauksessa. Käsiskannerin mittauksesta tehtiin pistepilvi. Syntyneitä pistepilveä verrattiin RTK- ja takymetrimittauksella mitattuihin vertailupisteisiin. Ensin testialue mitattiin satelliittimittauksella ja sen jälkeen alue laserkeilattiin. Lopuksi alue mitattiin takymetrillä. Eri tavalla mitattuja mittauksia verrattiin lopuksi keskenään.

Mittauksen tuloksena saatiin tehtyä pistepilvi ja takymetrimittauksella tehdyt pisteet. Takymetrillä mitatuille pisteille tehtiin Helmertin muunnos. Helmertin muunnoksella lasketut pisteet liitettiin pistepilveen, jonka avulla mittauksien tarkkuudet voitiin arvioida ja laskea. Käsiskanneri osoittautui nopeaksi ja tarkaksi tavaksi mitata kohteita. Tarkkuuden puolesta se sopii tarkkoihinkin mittauksiin. Käsiskanneri soveltuu pistepilven muodostamiseen ja pistepilveä voi hyödyntää monella keinoin.

School of Technology,  
Communication and Transport  
Degree Programme of Land  
Surveying

---

<b>Author</b>	Ilkka Koivula	Year	2024
<b>Supervisor</b>	Janne W Matilainen		
<b>Commissioned by</b>	Maailmasta Oy Jukka Tienhaara		
<b>Subject of thesis</b>	Estimating the accuracy of a hand laser		
<b>Number of pages</b>	57 (1)		

---

The purpose of this thesis study was to investigate how the accuracy of the data produced by a handheld scanner is suitable for basic measurements. The goal was also to examine how the handheld scanner operates in field conditions.

The purpose of the study was to investigate how the handheld scanner measurement can be utilized in land surveying. The measurements were conducted in the summer of 2020. A point cloud was generated from the handheld scanner measurement. The generated point cloud was compared to reference points measured with RTK and total station surveying methods. First, the test area was measured using satellite surveying, and then the area was scanned with laser scanning. Finally, the area was surveyed with a total station. The measurements taken using different methods were finally compared to each other.

As a result of the measurement, a point cloud was created along with points measured by a total station. The points measured with the total station were then subjected to a Helmert transformation. The points calculated by the Helmert transformation were added to the point cloud, which enabled the assessment and calculation of the accuracies of the measurements. The handheld scanner proved to be a fast and accurate way to measure objects. In terms of accuracy, it is suitable even for precise measurements. The handheld scanner is suitable for creating a point cloud, which can be utilized in many ways.

Key words

laser scanning, LiDAR, 3D modeling

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO .....	7
2 PAIKANNUSMITTAUSMENETELMISTÄ .....	8
2.1    Satelliittimittaus.....	8
2.1.1    Perusteet .....	8
2.1.2    Verkko-RTK-mittaus .....	10
2.2    Takymetrimittaus .....	12
2.3    Käsiskannaus .....	13
2.3.1    Perusteet .....	13
2.3.2    LiDAR-tekniikka .....	14
2.3.3    SLAM-tekniikka.....	19
2.3.4    Pistepilvi .....	21
2.3.5    GeoSLAM ZEB-Horizon käsiskanneri.....	24
2.4    Tavoitteet.....	24
3 AINEISTO JA MENETELMÄT .....	26
3.1    Tutkimus- ja testausalue.....	26
3.2    Verkko-RTK-mittaus .....	28
3.3    Takymetriaineisto .....	28
3.4    Skannauslaitteisto .....	30
4 AINEISTON KÄSITTELY .....	32
4.1    Pisteiden vertailu .....	32
4.2    Pistepilven käsittely .....	32
4.3    Helmertin muunnos .....	33
4.3.1    Helmertin muunnos teoria .....	33
4.3.2    Helmertin muunnos käytäntö .....	39
5 TULOKSET .....	42
LÄHTEET .....	56
LIITTEET .....	58

## ALKUSANAT

Kiitos Maailmasta OY:n toimitusjohtajalle Jukka Tienhaaralle opinnäytetyön mahdollistamisesta. Kiitän myös työn ohjaajana toiminutta Janne Matilaista. Kiitos myös isälleni, joka toimi takymetrimittauksissa apulaisena.

## KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

3D CAD	kolmiulotteinen tietokoneavusteinen suunnittelu
C/A-koodi	satelliittipaikannuksesta käytetty tietynmittainen koodi
DEM	Digital Elevational Model. Digitaalinen korkeusmalli
DGNSS	Differential GNSS. Differentiaalinen GNSS-paikannus
DGPS	Differential GPS. Differentiaalinen GPS-paikannus
DTM	Digital Terrain Model. Digitaalinen maastomalli
GNSS	Global Navigation Satellite Systems. Maailmanlaajuinen satelliittinavigointijärjestelmä.
GPS	Global Positioning System. Maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä.
IMU	Inertial Measurement Unit. Kiihtyvyyttä ja kallistusta mittaava laite, jonka käytetään paikannuksessa apuna.
LAS	LAS-tiedosto on tiedostoformaatti, jota käytetään tallentamaan ja jakamaan 3D-pisteiden pistepilvien tietoja.
LiDAR	Light Detection And Ranging. Optinen laite, joka toimii tutkan lailla. Toimii näkyvän valon, lähi-infran ja ultraviolettin alueella.
RGB	Red-Green-Blue-System. Värijärjestelmä, jossa sekoitetaan keskenään punaista, vihreää ja sinistä valoa.
RTK	Real Time Kinematic. GPS-paikannuksen mittausmenetelmä, jossa hyödynnetään paikannussatelliitin kanta-aallon vaihetta ja mittaustukiaseman paikkaa apuna käyttäen.
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping. Samanaikainen paikoitus ja kartoitus.
VRS	Virtual Reference Station. Virtuaalitukiasema. Käytetään apuna GPS-mittauksissa.

## 1 JOHDANTO

Kädessä pidettävät skannerit ovat yleistyneet mittaustapana. Tämän opinnäytetyön aiheena ja tavoitteena on tutkia käsiskannerin tarkkuutta maasto-olosuhteissa. Työssä käytettyjä käsiskannerin synonyymejä ovat käsilaser, keilain, laser ja SLAM. Opinnäytetyö on tehty Maailmasta Oy:n toimeksiannosta. Aineiston käytettävyyttä vertailtiin kolmella eri tavalla tuotetulla mittausdatalla. Työhön liittyvä maaston mittaus suoritettiin Oulun Haukiputaalla.

Testausalue mitattiin ensin satelliittipaikantimella RTK-mittauksella ja käsiskannerilla ja sen jälkeen takymetrimittauksella. Takymetrilla mitatut pisteet muutettiin Helmertin muunnoksella pistepilvidatan kanssa samaan koordinaattiin. Mittauksia verrattiin pistepilvessä Cloud Compare -ohjelmalla viemällä takymetrimittausdatan pistepilveen. Tuloksena oli pistepilvi, jossa on mukana takymetrilla mitattuja pisteitä. Mittausten vertailu käsitellään luvussa 4.3. Opinnäytetyössä käsitellään satelliittipaikannuksen, takymetrimittauksen ja käsiskannerimittauksen perusteet ja tekniikka. Syntynyt mittausdata käsitellään Cloud Compare- ja Excel-ohjelmilla ja tulokset määritellään lopuksi.

## 2 PAIKANNUSMITTAUSMENETELMISTÄ

### 2.1 Satelliittimittaus

#### 2.1.1 Perusteet

Opinnäytetyön mittauksien testialueelle oli mitattu satelliittimittauksella kolme vertailupistettä. Mittaustapa, jota käytettiin, oli verkko-RTK-mittaus. Tästä mitaustavasta lisää luvussa 2.1.2.

Satelliittipaikannus on satelliittien avulla tapahtuvaa paikannusta. Paikannin havaitsee satelliittien lähettämiä signaaleja. Mittaamisen havaitsemiseen tarvitaan vähintään kolme satelliittia. Kun satelliittien sijainti tunnetaan havaintohetkellä, voidaan havaitsijan paikka laskea. Satelliittien paikat lasketaan navigointiviestin tietojen perusteella. Satelliittipaikannus perustuu siis etäisyyksien tai etäisyyserojen mittaukseen. Paikannuksen geometrian kannalta on riittävä mitata etäisyydet kolmeen satelliittiin, mutta mitausten virheiden hallinnan vuoksi mitataan etäisyydet useampaan satelliittiin. (Laurila 2012, 291.)

Satelliittipaikannusmittauksissa etäisyyksien mittauksessa hyödynnetään joko satelliitin lähettämän signaalin paikannuskoodeja tai kantoaaltoja. Siviilikäytössä käytetään L1-taajuudelle moduloitua C/A-koodia tai kantoaaltoja L1 ja L2. Uuden polven satelliitit lähettävät C/A-koodin myös L2-taajudella ja käytössä on myös kantoaalto L5. Havaintosuureiksi kutsutaan paikannuskoodeja ja niistä johdettuja suureita. Havaintosuure on tärkeä paikannuksen tarkkuuteen vaikuttava tekijä, sillä etäisyys satelliittiin tai toiseen satelliittipaikantimeen on teknisesti mahdollista mitata paremmin kuin 1 % tarkkuudella aallonpituudesta tai koodijakson pituudesta, jotka ovat:

- P-koodijakson pituus on 29,3 m
- C/A-koodijakson pituus on 293 m
- L1-kantoaallon pituus on 1,19 m
- L2-kantoaallon pituus on 0,24 m.

Satelliittipaikannuksen perushavainnot ovat koodihavainnot tai vaihehavainnot. Myös näiden perushavaintojen yhdistelmät ovat mahdollisia. Lisäksi vaativimmissa mittauksissa saatetaan käyttää Doppler-havainnot, jotka perustuvat kantoaaltoon ja kuvaavat satelliitin lähestymis- tai loittonemisnopeutta vastaanottimen suhteen. (Laurila 2012, 292–293.)

Koodihavainnosta puhutaan, kun etäisyys mitataan paikannuskoodin avulla. Paikannuskoodi muodostaa signaalin tavallaan numeroidun, mutta karkeajakoisen mitta-asteikon. Sen avulla etäisyydenmittaus on teknisesti suhteellisen helppoa. Vaihehavainnoista puhutaan, kun etäisyydenmittaus perustuu satelliitin lähettämän signaalin kantaallon aallonpituuteen. Kantaallon aallonpituus on oleellisesti lyhyempi kuin paikannuskoodin jakson pituus. Vaihehavaintojen avulla päästään oleellisesti tarkempaan paikannukseen kuin paikannuskoodin avulla, mutta samalla mittaus tulee teknisesti paljon monimutkaisemmaksi. (Laurila 2012, 293.)

Satelliittipaikannuksessa on käytössä useita mittaustapoja eli mittaamoodeja. Mittaustavan valintaan vaikuttaa muun muassa mittauksissa käytettävät havaintosuureet, systemaattisten virheiden korjaamistekniikat ja havaintolaitteiden lukumäärät. Absoluuttinen paikannus, differentiaalinen paikannus ja vaihehavaintoihin perustuva suhteellinen mittaus ovat satelliittipaikannuksen perusmittaustapoja. (Laurila 2012, 293.)

Differentiaalikorjaus tarkoittaa etäisyyksiin tehtävää korjausta. Menettelyllä voidaan korjata systemaattisia virheitä, joita ovat tukiaseman ja paikantavan vastaanottimen yhteiset virheet. Näitä virheitä aiheuttavat lähinnä valvontalohko, satelliittilohko ja ilmakehä. Paikantavan vastaanottimen sijainti lasketaan korjattujen etäisyyksien avulla huomattavasti tarkemmin kuin absoluuttisella paikannuksella. Differentiaalisessa paikannuksessa tarvitaan vain yksi oma vastaanotin, koska erilaisia yleisiä tukiasemapaalveluja on tarjolla sekä Suomessa että maailmalla. Differentiaaliseen paikannukseen valmiin satelliittipaikantimen lisäksi havaitsija tarvitsee tietoliikenneyhteyden korjauspalvelun tarjoajaan ja mahdollisesti korjaussignaalin vastaanoton edellyttämän lisälaitteen. (Laurila 2012, 300.)

### 2.1.2 Verkko-RTK-mittaus

Työssä käytetään verkko/VRS-RTK-mittausta. Testialueelle oli mitattu kolme vertailupisteitä verkko-RTK-mittauksella. Se on tarkka, mutta hidas tapa tehdä maanmittausalan mittauksia. Verkko-RTK-mittauksilla pääsee 1–10 senttimetrin absoluuttiseen tarkkuuteen. Absoluuttinen virhe tarkoittaa mittaustuloksen ja todellisen arvon eroa. Suhteellinen virhe, jota käytetään myöhemmin työssä, tarkoittaa absoluuttisen virheen suhdetta mittaustuloksen arvoon. (Geotrim 2024.)

Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus eli RTK-mittaus (Real Time Kinematic) on mittaus- ja kartoitustekniikan perusmenetelmä, joka tapahtuu satelliittivastaanotimella. Se toimii hyvänä mittaustapana kartoitus- ja maastomallimittauksissa. RTK-mittausta käytetään myös merkintämittauksissa, kuten myös koneohjauksessa. Perinteisessä RTK-mittauksessa tarvitaan yksi tukiasema. Tukiasema on tunnetulla pisteellä sijaitseva vertailuvastaanotin. Tukiasemalla oleva vastaanotin mittaa ja lähettää vaihehavainnot paikantavalle vastaanottimelle. Tämän ansiosta paikantava vastaanotin laskee ja ratkaisee alkutuntemattomat ja muut mittaauksessa tarvittavat suureet reaaliajassa. (Laurila 2012, 319.)

Vastaanottimien välillä tulee olla tiedonsiirtoyhteys. Yhteys otetaan radiomodeemin tai matkapuhelinverkon välityksellä. Toimintasäde on muutamasta kilometristä enintään kymmeneen kilometriin. Toimintasäde riippuu maastosta. Matkapuhelinverkkoa käytettäessä välimatkalla ei ole merkitystä, mutta itse mittaustavan rajoitukset estävät pitkien yli 20 km etäisyyksien käytön. (Laurila 2012, 319.)

RTK-mittausta pystyy tekemään vain melko rajallisella alueella ilmakehään liittyvien virheiden ja häiriöiden vuoksi. Ilmakehään liittyviä virheitä voidaan korjata, kun käytetään tukiasemien verkostoa yhden tukiaseman sijasta. Yhden tukiaseman RTK-mittauksia ei maastomittauksissa Suomessa juuri harrasteta, paitsi esimerkiksi koneohjauksen apuna rajatuilla työmaa-alueilla. Kun RTK-mittausta tehdään tukiasemaverkossa, puhutaan verkko-RTK-mittauksesta. Verkko-RTK-mittauksesta puhutaan, kun RTK-mittausta tehdään tukiasemaverkossa. Tämän takia on mahdollista entistä pidemmät etäisyydet tukiasemiin, Myös mittausten luotettavuus ja nopeus paranee. (Laurila 2012, 320.)

Virtuaalitukiasemajärjestelmää kutsutaan VRS-järjestelmäksi (Virtual Reference Station System). Järjestelmä laskee mittaajille oman virtuaaliseen tukiaseman lähelle mittauspaikkaa. VRS-järjestelmä on kokonaisuus, joka koostuu vastaanotimesta varusteineen, ohjelmiston ja tiedonsiirtotekniikan. Järjestelmän toimintaperiaate on seuraava:

- Kiinteät tukiasemat lähettävät satelliittidatan laskentakeskukseen.
- Mittaaja lähettää matkapuhelinverkossa likimääräisen sijaintinsa laskentakeskukselle.
- Laskentakeskus prosessoi kiinteiden tukiasemien lähettämää dataa, käyttää mittaajan likimääräistä sijaintia virtuaalitukiaseman muodostamiseen mittaajan lähelle ja lähettää korjausdatan mittaajalle.
- Virtuaalitukiasema on kuvitteellinen tukiasemapiste, joka lasketaan erikseen jokaiselle mittaajalle. Pisteeseen suhteen lasketaan mittaajan saama korjausdata.
- Mittaaja vastaanottaa korjausdatan laskentakeskukselta. Keskuksen korjausdata simuloi paikallisen tukiaseman lähettämää dataa. (Laurila 2012, 320.)

Tällä hetkellä (16.3.2023) Geotrim Oy:n ylläpitämään VRS-verkkoon kuuluu noin 130 tukiasemaa. Pohjois-Suomessa on joitain alueita, joilla verkon toiminnassa voi ilmetä ongelmia. VRS-verkon käyttö RTK-mittauksissa on yleistynyt Suomessa nopeasti. VRS-verkkoa hyödyntävät esimerkiksi Maanmittauslaitos. Muita käyttäjiä ovat valtion organisaatiot, kunnat ja mittausalan yritykset. VRS-verkon käyttäjälle riittää pelkkä paikantava vastaanotin. Oma tukiasemaa ei tarvitse ostaa, kuten perinteistä RTK-mittausta tehtäessä. Näin mittauskustannukset pienevät perinteiseen RTK-mittaukseen verrattuna. VRS-verkon avulla voidaan tulevaisuudessa tehdä myös runkomittauksia nykyistä tehokkaammin, sillä verkon tukiaseman muodostavat tarkan runkoverkon, jonka jokaisella pisteellä on jatkuvasti toimiva satelliittivastaanotin. (Laurila 2012, 320.)

Verkko-RTK-palvelua tarjoaa moni yritys. Esimerkiksi vuodesta 2012 on verkko-RTK-mittauksia voitu tehdä Leica Geosystems Oy:n ylläpitämässä SmartNet-verkossa. Tähän palveluun kuuluu yli 100 tukiasemaa. (Laurila 2012, 321.)

## 2.2 Takymetrimittaus

Takymetria käytetään nykyisin yleisesti maanmittauksen yleistyökaluna. Se on kulman- ja etäisyydenmittauskoje ja sillä voidaan tehdä mittauksia monipuolisesti. Nykyaikaisilla takymetreilla pääsee tarkkuudessa alle yhden senttimetrin tarkkuuteen. Kehittyneillä takymetreilla mitataan kulmia ja etäisyyksiä sekä sillä voidaan skannata ja valokuvata mittauskohdetta. Nykyaikaisilla takymetreilla voi yksi mittaaja tehdä useimmat työt, niin ettei apumiestä tarvita. Takymetri valittiin tähän työhön mittaustavaksi sen tarkkuuden takia ja koska sillä sai mitattua nopeasti runkopisteverkoston pisteiden vertailua varten. (Laurila 2012, 259.)

Takymetrimittauksissa tarvitaan takymetrin lisäksi kojejalusta, prisma, prisma-sauva ja maastotallennin. Kolmijalkoja käytetään kojeiden ja tähysten jalustoina. Prismaa käytetään kartoitus- ja merkintämittauksissa. Prisma on kiinnitetty kartoitussauvaan. Maastotallennin on säänkestävä, maastokelpoinen tietokone. Maastotallentimella säädetään mittausohjelmistot ja mittausdata. Aina maastotallenninta ei tarvita, sillä takymetri saattaa sisältää samat toiminnot kuin maastotallentimella on. (Laurila 2012, 242–244.)

Takymetri on elektro-optinen koje, joka sisältää tietokoneen tai siihen voidaan liittää maastotallentimeksi kutsuttu maastotietokone. Sillä voidaan käsitellä sijaintitietoja jo maasto-olosuhteissa. Takymetri on monipuolinen mittauskoje, jolla suoritetaan pääosa maasto- ja rakennusmittauksista. (Laurila 2012, 16–17.)

Takymetrillä tehdään neljää erilaista mittausta. Piiloviiva ja luoksepääsemättömän kohteen mittaus on yksi niistä. Piiloviivan mittauksessa etäisyys ja korkeusero mitataan kohdepisteiden välisen yhdysjanan ulkopuolelta. Kun tällaisen mittauksen kohde ei ole näköyhteyden päässä, kutsutaan mittausta piiloviivamittaukseksi. Luoksepääsemättömän kohteen korkeuden mittaamista on, kun mitataan prisman kanssa samalla pystysuoralla olevia kohteiden korkeuksia, joihin prismalla ei pääse. Kartoitusmittauksia tehdessä käytetään menetelminä tasosijainnin osalta säteittäistä mittausta ja korkeuden osalta trigonometrinen korkeudenmittaamista. Maastomallimittaukset tarkoittavat maaston ja rakennetun

ympäristön kolmiulotteisen mallin mittaamista. Rakentamisen mittauksia on muutamaa eri tyyppiä. Rakennusmittauksia mitataan, jotta rakennusteknillinen suunnittelu sujuisi ja onnistuisi. Rakentamisen yhteydessä mitataan merkintä- ja asennusmittauksia. Merkintämittauksella on aina suunnitelma, jossa on kuvattu rakennuskohteen sijainti. Takymetri soveltuu ominaisuuksiensa takia hyvin merkintämittauksiin. (Laurila 2012, 262–266.)

Ennen varsinaista sijaintimittausta takymetri on orientoitava. Se koskee kojeen ja tähysten keskittämistä ja tasausta mittauspisteelle. Lisäksi kojekorkeus mitataan. Orientoinnin lopuksi koje orientoidaan koordinaatistoon ja korkeusjärjestelmään. Orientointi voidaan tehdä tunnetulle pisteelle tai vapaalle asemapisteelle. (Laurila 2012, 252–261.)

Takymetrillä mitataan vaaka- ja pystykulmia. Vaakakulma on kojeen vaakatasossa olevan vaakakehän mitattu erotus. Pystykulma on kojeen luotiviivan ja tähtäysakselin kulma. Säteittäisessä mittauksessa mitataan tunnetun lähtösivun suhteen kulma ja etäisyys mitattavaan pisteeseen. Trigonometrisessä mittauksessa mitataan mittauspisteen korkeus pystykulman ja etäisyyden avulla. (Laurila 2012, 59, 61.)

## 2.3 Käsiskannaus

### 2.3.1 Perusteet

Laserkeilain on mittalaite, jolla mitataan kohteita koskettamatta niihin. Sillä voidaan kerätä tietoa ympäröivästä maailmasta monipuolisesti ja nopeasti. Laserkeilaimella mitataan kohteesta kolmiulotteinen pistepilvi. Mittalaitteessa on alkuanturi, josta lähtee lasersäde, jonka apua käyttäen mitataan kohteen etäisyys mittalaitteesta. Keilaimella mitataan etäisyys, minkä valosignaali ehtii kulkea mittalaitteesta kohteeseen ja takaisin. Kun tiedetään valosignaalin lähtökulmat ja matka, voidaan joka signaalille laskea koordinaatit. (Joala 2006, 1.)

Laserkeilaimet luokitellaan pääsääntöisesti kahteen eri tyyppiin: a) stationääriin eli paikalla pysyvään keilaimen ja b) liikkuvaan eli mobiilikeilaimen. Laserkeilaimet voidaan jakaa myös kolmeen tyyppiin mittausetäisyyden mukaan: a) kaukokeilaimet, joiden mittausetäisyys on 100 metristä 100 kilometriin ja b) maalaserkeilaimet, joiden mittausetäisyys on 1 – 300 metriä ja c) teollisuuslaserkeilaimet, joiden mittausetäisyys on alle 30 metriä. Tässä työssä käytetty keilaintyyppi on kädessä kuljetettava maalaser- ja mobiilikeilain. Auton katolla kuljetettava mobiilikeilain on nykyisin suosittu tapa mitata maastoa. (Joala 2006, 1–2; Lanu 2023, 10.)

Keilaimet jaetaan toimintaperiaatteeltaan neljään eri tyyppiin:

- a) kupolimainen mittaustapa
- b) panoraaminen mittaustapa
- c) keilamainen mittaustapa
- d) optinen kolmiomittaus.

Kupolimaisessa mittaustavalla etuna on se, että mittaamatta jää vain pieni alue laitteen yläpuolelta. Nykyisin myös tarkkuus kupolimaisessa mittaustavassa on riittävä myös kauempana mittalaitteesta. Panoraamisesti mittaavien laitteiden rajoitus on mittarajoitus ylöspäin. Optinen kolmiomittaus on tarkka, mutta puutteena on isot katvealueet ja lyhyt mittausetäisyys. Etäisyysmittausmenetelmän perusteella keilaimet voi luokitella kahteen isoimpaan ryhmään: a) valon kulkuaikaan perustuvat keilaimet, b) vaihe-ero-keilaimet. Keilaimet, jotka perustuvat valon kulkuaikaan, ovat hitaampia, mutta ovat tarkkoja pidemmillekin matkoille ja pitkiltäkin matkoilta saadaan tarkkoja ja tiheitä pistepilviä. Vaihe-erokeilaimet ovat nopeita. Nopeimmat vaihe-erokeilaimet mittaavat parhaimmillaan 500 000 pistettä sekunnissa. Näissä keilaimissa etäisyysmittauksen maksimi jää alle 100 metrin. Vaihe-erokeilaimien mitattavaa pistepilveä ei voida paljoa säätää ja kohteiden reunoissa kulkuaikaan perustuviin laitteisiin verrattuna vaihe-erokeilain ei ole yhtä laadukas. (Joala 2006, 1–2.)

### 2.3.2 LiDAR-tekniikka

LiDAR (Light Detection and Ranging) on etäisyydenmittausmenetelmä, joka perustuu laserkeilaamiseen. LiDAR-järjestelmä lähettää laserpulsseja kohteeseen

ja rekisteröi niistä heijastuvan säteilyn aikaeron avulla etäisyyden ja pinnan muodon. Tämä tekniikka mahdollistaa tarkkojen 3-ulotteisten karttojen ja pistepilvien luomisen esimerkiksi maastosta, rakennuksesta tai muista kohteista. (GeoSLAM 2023a.)

Keilaimen antureista riippuen LiDAR-yksiköt voivat laukaista jopa satoja tuhansia pulsseja sekunnissa. Nämä valoaalot heijastuvat ja palaavat kohteesta LiDAR-anturiin. Anturi mittaa aikaa, joka kuluu kunkin pulssin palaamiseen kohteesta ja laskee etäisyyden tarkasti. Heijastunut mittausdata voidaan prosessoida 3D-visualisoinniksi. 3D-visualisointi tunnetaan nimellä pistepilvi. Pistepilvestä lisää kohdassa 4.2.

LiDAR toimii samalla tavalla kuin tutka, mutta käyttää radio- ja ääniaaltojen sijaan valoaaltoja. Tämän kaukokartoitustekniikan avulla LiDAR-järjestelmä voi kerätä valtavia määriä dataa lyhyessä ajassa. LiDAR-kartoitustekniikka käyttää kahta eri laserskannausjärjestelmää. Toiseen on integroitu inertiamittausyksikkö (IMU) ja GNSS-vastaanotin. GeoSLAMin tapauksessa taas mittalaite käyttää SLAM-algoritmia IMUn ja GNSS sijaan, jonka avulla jokainen mittaus voidaan referoida. Kun jokainen piste yhdistetään, josta muodostuu 3D-esitys kohdeobjektista tai -alueesta. (GeoSLAM 2023a.)

LiDAR-järjestelmällä luodaan kohdemaisemasta digitaalisia maasto- (DTM) ja digitaalisia korkeusmalleja (DEM). Digitaalinen korkeusmalli on kolmiulotteinen esitys maastosta ja kaikista siinä tilassa olevista kohteista. LiDAR-skannauksessa kerätyt säännölliset korkeusarvot luovat koordinaattijärjestelmän, joka mahdollistaa maan heijastuksen ja mallintamisen tarkasti. Digitaaliset maastomallit ovat kuin DEM-mallit, mutta ilman mukana olevia esineitä ja muita kohteita. Digitaaliset maastomallit käyttävät LiDARia vain maaston kartoittamiseen. (GeoSLAM 2023a.)

LiDAR-järjestelmä on erinomainen myös monissa ei sovellutuksissa. Näitä ovat maa- ja vesirakentaminen ja maanmittaus moottoriteistä ja tietöistä siltojen rakentamiseen ja suurten vähittäiskaupan kehityskohteiden kartoittamiseen. Itse asiassa LiDAR on monipuolinen, minkä ansiosta maanmittausyritykset voivat olla

kustannustehokkaampia säilyttäen samalla korkeimman ammattitaidon. Tästä hyviä esimerkkejä ovat:

1. Arviointi: LiDAR-tekniikka on täydellinen digitaalisen mallin luomiseen, jota voidaan havaita ja korjata epäsäännöllisyydet ennen rakennustöiden aloittamista sekä seurata skannausten välisiä muutoksia edistymisen näyttämiseksi.
2. Maanmittaus: Maanmittaajat suosivat LiDAR-järjestelmiä, jotka auttavat heitä luomaan yksityiskohtaisia 3D-kuvia, tarkkoja digitaalisia maastomalleja (DTM) ja digitaalisia korkeusmalleja (DEM) tietyistä alueista.
3. Rakennusten mittaus: LiDAR tulee todella hyvin esille, kun kartoitetaan historiallisia kohteita, miehitettyjä tiloja, maanalaisia ympäristöjä ja dynaamisia kaupunkeja. (GeoSLAM 2023a.)

LiDAR-kartat voivat antaa absoluuttisen ja suhteellisen paikannustarkkuuden. Absoluuttinen tarkkuus on jopa muutamia millimetrejä ja suhteellinen tarkkuus muutamia senttimetrejä. Absoluuttinen virhe tarkoittaa mittaustuloksen ja todellisen arvon eroa. Suhteellinen virhe tarkoittaa absoluuttisen virheen suhdetta mittaustuloksen arvoon. (GeoSLAM 2023a; Keuda 2024.)

LiDAR-tekniikalla voi kartoittaa kokonaisia kaupunkeja. Muodostuneesta pistepilvidatasta voi paikantaa rakenteita tai kiinnostavia alueita millimetrien tarkkuuksilla yksityiskohtaisesti. Pistepilvidatasta voi luokitella ja poimia erilaisia ominaisuuksia, kuten tieverkkoja, siltoja, katuhuonekaluja ja kasvillisuutta. LiDAR-kartat voivat myös korostaa muutoksia ja poikkeavuuksia, kuten pinnan huononemista, kaltevuuden muutoksia ja kasvillisuuden kasvua. (GeoSLAM 2023a.)

LiDAR-tekniikalla mitatut pistepilvet ovat yksityiskohtaisempia ja tarkempia kuin mikään muu tutkimusmenetelmä, mikä tekee 3D-mallinuksesta ja -kartoituksesta paljon tärkeämpää kuin aikaisemmin. Koska pistepilvitiedot ovat niin laajoja ja yksityiskohtaisia, tiedostokoot voivat olla erittäin suuria. Teollisuudessa standardi on tallentaa se binäärimuodossa nimeltä LAS. Myös opinnäytetyössä käytetty tallennusmuoto on LAS. (GeoSLAM 2023a.)

LiDARia on kahta päätyyppiä: topografinen ja syvyysolosuhteinen LiDAR. Topografinen LiDAR käyttää tyypillisesti lähi-infrapunalaseria maan kartoittamiseen. Syvyysolosuhteinen LiDAR käyttää vettä läpäisevää vihreää valoa myös meren-

pohjan ja joenpohjan korkeuksien mittaamiseen. Laserpohjaiset skannerit käyttävät trigonometriseksi kolmiomittamiseksi kutsuttua prosessia kootakseen tarkasti 3D-muodon miljoonina pisteinä. LiDAR-instrumentti toimii projisoimalla laserserviivan tai useita viivoja esineeseen. Sitten se vangitsee heijastukset yhdellä tai useammalla anturilla. Anturit sijaitsevat tunnetun etäisyyden päässä laserin lähteestä. Tämän seurauksena tarkat pistemittaukset voidaan tehdä laskemalla laservalon heijastuskulma. (GeoSLAM 2023a.)

LiDAR-tekniikan edut tulevat esille monella tapaa verrattuna perinteisiin menetelmiin. LiDAR on nopeampi, tarkempi, joustavampi ja turvallisempi kuin perinteiset menetelmät. Rakennusten sisätilojen skannaus kestää vain minuutteja ja suuretkin kartoitukset saadaan valmiiksi alle tunnissa, eikä mittauksiin tarvita GPS:n apua. LiDAR-tekniikka on tarkka. LiDAR-järjestelmät keräävät erittäin tiheää dataa, ja pisteiden välillä on vain vähän tilaa. Tämä tarkoittaa, että tulokset ovat erittäin tarkkoja. Näiden tarkkojen tietojen avulla voidaan piirtää ja mallintaa luonnollisia ja ihmisen luomia maantieteellisiä alueita niin tarkasti, kuin he tarvitsevat yksityiskohtaisten hankkeiden suunnittelussa. LiDAR on myös joustava. Kun on kyse maanmittauksesta, LiDARilla on monia vaihtoehtoja, joista valita. Kädessä pidettävät laitteet sopivat ihanteellisesti laserskannaukseen, ja ne voidaan asentaa autoihin, tolppiin tai droneihin. LiDAR-tietoja voidaan jopa kerätä mihin aikaan tahansa vuorokaudesta, koska se käyttää valoa mittaustyökaluna. LiDAR on myös turvallinen. LiDAR-järjestelmät toimivat suhteellisen nopeasti ja niitä voidaan käyttää etänä, joten ne ovat hyvä valinta paikkoihin, joissa ihmisen toiminta tai oleskelu voi olla vaarallista pitkiä aikoja. (GeoSLAM 2023a.)

Ilmassa kulkevalla LiDAR (Airborne LiDAR) poistaa mittauksen käsityön ja toimittaa tietoja paikoista, joihin ihmiset eivät pääse, kuten tiheästä viidakosta tai maanalaista luolista. Ilmassa kulkevassa LiDARissa on neljä pääosaa, jotka tuottavat pystysuoran tarkkuuden 15 senttimetrin pystysuunnassa ja 40 senttimetriä vaakasuunnassa. Se lähettää yli 160 000 pulssia sekunnissa. Tästä syystä LiDAR-pistepilvet luovat miljoonia pisteitä. Ilmassa kulkevan LiDARin 4 pääosaa ovat:

1. LiDAR-anturit: Droonin liikkuessa sensorit skannaavat maata puolelta toiselle. Pulssit ovat yleensä vihreillä tai lähi-infrapunakaistoilla.

2. GPS-vastaanottimet: Ne mittaavat droonin korkeuden ja sijainnin. Nämä reitit ovat tärkeitä maasto- ja korkeusarvojen kannalta.
3. Inertiaaliset mittayksiköt (IMU): Kun drooni kulkee, IMU seuraa sen kallistusta. LiDAR-järjestelmät käyttävät kallistusta mittaamaan tarkasti pulssin tulokulman.
4. Tiedontallentimet: Kun LiDAR skannaa pintaa, tietokone tallentaa kaikki pulssipalautteet. Tämän seurauksena nämä tallenteet käännetään korkeudeksi. (GeoSLAM 2023a.)

LiDAR-mittaukseen tarvitaan sen mittauksia analysoivaa ohjelmaa. GeoSLAM Connect on GeoSLAM Technologiesin kehittämä ohjelmisto, joka tarjoaa työkaluja 3D-skannausdatan visualisointiin, käsittelyyn ja analysointiin. Ohjelmisto mahdollistaa nopean ja helpon tavan luoda pistepilviä ja 3D-malleja erilaisista ympäristöistä, kuten sisätiloista tai ulkotiloista. GeoSLAM Connectin kaltaiset ohjelmistot tekevät LiDAR-tietojen käsittelystä helppoa. Tuloksia voidaan käsitellä automaattisesti käyttämällä ennalta määritettyjä työkaluja. Kokeneet käyttäjät voivat myös kirjoittaa omia mukautettuja käsittelyohjeitaan. Kun tiedot on kerätty, ne käsitellään SLAM-algoritmin avulla. SLAMista kerrotaan lisää kohdassa 2.3.3. GeoSLAM Connect voidaan integroida eri ohjelmistoihin, jotka auttavat tulkitsemaan, visualisoimaan ja tarkastamaan sitä yksityiskohtaisemmin. LiDAR-tiedot voidaan yhdistää muihin tietotyyppeihin, kuten vektoritietoihin, CAD-tietoihin, GIS-tietoihin ja muihin tietotyyppeihin, jotta voidaan luoda jotain, joka on helppo tunnistaa ja tarkastella. Toinen erikoisohjelma, jota tässä opinnäytetyössä on käytetty LiDAR-tietojen lukemiseen, on Cloud Compare -ohjelma. LiDAR-tietoja voi myös tarkastella reaaliajassa ZEB Revo RT:n avulla, jota ei tässä opinnäytetyössä käytetty. Tämä laite pystyy käsittelemään tietoja nopeasti, joten pistepilvi on katseltavissa mittauksista tehtäessä. (GeoSLAM 2023a; GeoSLAM 2023a.)

Todellinen arvo syntyy raakadatan ja LiDAR-tutkimustietojen muuttamisesta käyttökelpoiseksi tiedoksi. Tähän liittyy myös mahdollisuus georeferoida pistepilveä. Nykyaikaisilla ohjelmistoilla kerätyt tiedot voidaan poimia useimmista skanneriyksiköistä joko liittämällä laite tietokoneeseen tai lataamalla tiedot USB-muistitikulle. Nämä LiDAR-skannaus tiedot voidaan sitten kalibroida analysoinnin ja mallintamisen mahdollistamiseksi. Lisäksi LiDAR-tietojen käsittely on erittäin nopeaa. Raakadata vaatii vain muutaman minuutin kalibroinnin (5–30 min) lopputuotteen luomiseksi. (GeoSLAM 2023a.)

### 2.3.3 SLAM-tekniikka

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) on tekniikka, jota käytetään autonomisissa järjestelmissä, kuten roboteissa tai droneissa, jotta ne voivat luoda kartan ympäristöstään samalla kun paikantavat itsensä siinä. SLAM tarkoittaa samanaikaista lokalisointia ja kartoitusta, jota joskus kutsutaan synkronoiduksi lokalisoinniksi ja kartoitukseksi. Se on prosessi alueen kartoittamisesta, samalla kuin seurataan laitteen sijaintia kyseisellä alueella. Tämä tekee mobiilikartoituksen mahdolliseksi. Tämä tapahtuu reaaliajassa yhdistämällä sensoridataa algoritmien avulla. SLAM-tekniikka on tärkeä monissa sovelluksissa, kuten teollisuusautomaatiossa ja autonomisissa ajoneuvoissa. SLAM mahdollistaa mobiilikartoituksen ja auttaa kartoittamaan paikkoja, joihin on perinteisesti vaikea päästä GPS:llä. (GeoSLAM 2023a.)

Tämä mahdollistaa suurten alueiden kartoituksen lyhyemmässä ajassa, koska alueita voidaan mitata mobiilirobottien, dronien tai ajoneuvojen avulla. SLAM-järjestelmät yksinkertaistavat tiedonkeruuta ja niitä voidaan käyttää ulko- tai sisäympäristöissä. (GeoSLAM 2023a.)

SLAM-tekniikan rinnalla toimii yleensä LiDAR-tekniikka. SLAM-laitteet ottavat tietoja antureilta luodakseen kuvan niitä ympäröivästä ympäristöstä ja niiden sijainnista kyseisessä ympäristössä. Laite käyttää näitä tietoja laskeakseen tarkimman arvon sen sijainnista ympäristöstä. Siirtämällä laitteen sijaintia ympäristössä, kaikki ympäristöominaisuudet (eli seinät, lattiat, pilarit) liikkuvat suhteessa laitteeseen ja SLAM-algoritmi voi parantaa arvioitaan uusilla paikkatiedoilla. SLAM on iteratiivinen prosessi – mitä enemmän iteraatioita laite tekee, sitä tarkemmin se voi sijoittaa itsensä kyseiseen tilaan. (GeoSLAM 2023a.)

Samanaikainen lokalisointi ja kartoitus on pohjimmiltaan monimutkaisia algoritmeja, jotka kartoittavat tuntemattoman ympäristön. SLAM-ohjelmistoa käyttämällä laite voi samanaikaisesti lokalisoida (paikantaa itsensä kartalla) ja kartoittaa (luoda sijainnista virtuaalisen kartan) SLAM-algoritmeilla. Anturit voivat käyttää visuaalista tietoa tai ei-näkyviä tietolähteitä ja perussijaintitietoja käyttämällä

inertiamittausyksikköä (IMU). Näiden anturitietojen avulla laite laskee ”parhaimman arvion” sijainnistaan. Kun uusia sijaintitietoja kerätään muutaman sekunnin välein, ominaisuudet kohdistuvat ja arvio paranee. (GeoSLAM 2023a.)

SLAM-algoritmeja ja -lähestymistapoja on monia erilaisia. On EFK, nopea, topologinen ja visuaalinen SLAM. Visuaalinen SLAM, joka tunnetaan myös nimellä vSLAM, laskee laitteen sijainnin ja suunnan suhteessa sen ympäristöön ja kartoittaa samalla ympäristöä käyttämällä vain kameran visuaalisia tuloja. Ominaisuuksiin perustuva visuaalinen SLAM seuraa tyypillisesti kiinnostavia kohteita peräkkäisten kamerakehysten kautta ja kolmiomittaa kameran 3D-sijainnin. Näitä tietoja käytetään sitten 3D-kartan luomiseen. (GeoSLAM 2023a.)

SLAM on tärkeä teknologia geospaatialisen tiedon hankintaan. SLAMissa mitattaessa ei tarvitse pystyttää staattisia asetuksia. SLAMin avulla pääsee mittaamaan lähes minne tahansa. Tarvitsee vain kävellä mitattavan ympäristön läpi ja SLAM luo digitaalisen kartan matkan aikana. SLAMilla voidaan jopa kartoittaa tuntemattomia ympäristöjä, mikä auttaa oppimaan lisää ympäröivästä maailmasta. (GeoSLAM 2023a.)

SLAM on monipuolinen. Jos haluaa luoda erittäin tarkan 3D-kartan maanalaisesta kaivoksesta, rakennuksen sisältä tai UAV:sta, niin saa parhaat tulokset LiDAR SLAMilla. Jos haluaa SLAMin tietokonenäköön (AR) tai miehittämättömiin robotteihin, Visuaalinen SLAM on oiva valinta. SLAM-algoritmi on jatkuvasti kehittyvää. Sitä on kehitetty vaikeissa olosuhteissa, kuten toistuvissa käytävissä, tasasivuissa tunneleissa ja tiloissa. Tuloksena on jatkuvasti kehittyvä SLAM-algoritmi, joka on niin vankka, että se toimii hyvin avoimissa ulkoympäristöissä kuin sisätiloissa. (GeoSLAM 2023a.)

SLAMin historia alkaa vuodesta 2008. Silloin Australian kansallinen tiedevirasto kehitti tehokkaan ja vankan SLAM-algoritmin, joka keskittyi ensisijaisesti tarkkaan 3D-mittaukseen ja ympäristön kartoitukseen autonomisen navigoinnin sijaan. Vuonna 2012 Australian kansallisen tiedeviraston innovaatio-osasto teki yhteis-

työtä Ison-Britannian geospaatialisen markkinajohtajien kanssa kaupallistaakseen uuden SLAM-tuotteensa. Tuloksena on GeoSLAM, ja tämä palkittu tekniikka on nykyisin GeoSLAM tuotteiden ydin. (GeoSLAM 2023a.)

GeoSLAM Beam on SLAM-tekniikan uusin innovaatio. Pyyhkäisyä vastaavan GeoSLAM Beam-keilan avulla skannausviivat projisoidaan kaikkiin suuntiin, jolloin voi toimittaa erittäin tarkan ja luotettavan digitaalisen kartan. Optimoitu SLAM on optimoitu sopimaan sieppausympäristöön. GeoSLAM on kestävä ja luotettava eri ympäristöissä, GeoSLAM Beam toimii hyvin käveltäessä, roboteissa, autoissa, skoottereissa, polkupyörissä ja jopa veneissä. GeoSLAM Beamissa on työkalut ja suodattimet puhtaiden ja tarkkojen pistepilvien luomiseen automaattisesti. Tällä laitteella tietojen georeferenssi on helppoa. GeoSLAM Beam -laite on tarkkuudeltaan korkea ja täyttää kartoitusvaatimukset. (GeoSLAM 2023a.)

#### 2.3.4 Pistepilvi

Pistepilvi on valtava kokoelma yksittäisiä pisteitä, jotka on piirretty 3D-avaruuteen. Se koostuu useista pisteistä, jotka on tallennettu laserskannerilla. Esimerkiksi rakennusta skannattaessa jokainen virtuaalinen piste edustaisi todellista pistettä seinällä, ikkunassa, portaissa tai missä tahansa pinnassa, johon lasersäde osuu ja heijastuu. Skanneri yhdistää automaattisesti lasersäteen luomat pysty- ja vaakakulmat laskeakseen 3D X-, Y-, Z-koordinaattisijainnin jokaiselle mitatulle pisteelle ja tuottaakseen joukon 3D-koordinaattimittauksia, jotka usein sisältävät sen RGB:ssä tallennetun väriarvon. Nämä yksityiskohtat voidaan siten muuntaa digitaalseksi 3D-malliksi, joka antaa tarkan yksityiskohtaisen kuvan kohteesta. Mitä tiheämmät pisteet, sitä yksityiskohtaisempi esitys, mikä mahdollistaa pienempien ominaisuuksien ja pintakuvioiden yksityiskohtien selkeämmän ja täsmällisen määrittelyn. (GeoSLAM 2023a; Joala 2006, 3.)

Pistepilviskannaus on prosessi, jossa käytetään laserskanneria eri pisteiden tallentamiseen ja alueen mittaamiseen. Pistepilvidata on termi, jota käytetään viittaamaan tietystä maantieteellisestä alueesta, maastosta, rakennuksesta tai tilasta kerättyihin tietopisteisiin. LiDAR-pistepilvitietojoukko luodaan, kun aluetta skannataan käyttämällä valontunnistusta ja etäisyyttä. Pistepilvikäsittely on tapa

muuttaa pistepilvidata 3D-malleiksi kyseisestä avaruudesta. Tämä tietojenkäsittely on mahdollista soveltuvalla ohjelmistolla. (GeoSLAM 2023a; Joala 2006, 4.)

Pistepilvestä on tullut uusi standardi kaikille suunnittelutoimialoille, koska se tarjoaa välittömän virtuaalisen mallin ideoiden testaamiseen. Niitä käytetään myös 3D CAD (tietokoneavusteinen suunnittelu) mallien luomiseen valmistetuille osille, metrologiaan ja laaduntarkastuksiin sekä lukuisiin visualisointi-, animaatio-, renderöinti- ja massaräätälöintisovelluksiin. (GeoSLAM 2023a.)

Pistepilveä mitattaessa täytyy huomioida, että jotkin kohteet tarvitsevat useita skannauksia eri näkökulmista, jotka sitten yhdistetään ohjelmistossa myöhemmin. Näin pistepilveen ei jää tietoaukkoja. Tiedot siirretään mittalaitteelta tietokoneelle, jossa sopivalla ohjelmistolla renderöidään pisteet raakatiedoista täydelliseksi pistepilveksi, joka edustaa kohdetta 3D-tilassa. (GeoSLAM 2023a; Joala 2006, 4.)

Pistepilven luomiseen on kaksi eri tapaa, LiDAR ja fotogrammetria. LiDAR-laserskannauksen tarkkuus on parempi. Fotogrammetria on tekniikka, joka käyttää valokuvia kohteiden kolmiulotteiseen mittaukseen. (Terttula 2019, 1.) Laserkeilauksen nopeus riippuu siitä, montako skannausta tarvitaan ja mikä tarkalleen tarvitsee skannausta. Lisäksi se vaikuttaa, käyttääkö perinteisiä kiinteitä skannauslaitteita tai kannettavaa laserskannaustekniikkaa, joka lyhentää skannausaikaa huomattavasti. Näiden skannausten kerääminen voi kestää vain päivän, mutta manuaalinen osallistuminen käsittelyyn tarkoittaa, että kyseisen pistepilvi-tietojoukon rekisteröinti voi kestää noin kolme päivää. Pienemmät tietojoukot voidaan käsitellä tunneissa. ZEB Revo RT:n kaltaisella laitteella luodaan SLAM pistepilvi reaaliajassa ja samalla voi nähdä visualisoinnin edistymisen liveinä liitetyn tabletin tai puhelimen avulla. Se ei vaadi muuta käsittelyä kuin tietojen purkamista laitteesta, joten saadaan täysi pistepilvi muutamassa minuutissa riippuen siitä, mitä skannataan. (GeoSLAM 2023a; Joala 2006, 4.)

Koska pistepilvi on täysin 3D-muotoinen, voidaan sitä tarkastella mistä tahansa näkökulmasta riippumatta siitä, millä laitteella se on kuvattu. Pistepilvi voidaan

kaapata kävellen kannettavalla 3D-laserskannerilla, kuten ZEB Horizonilla, ja katsoa sitä sitten ylhäältä alas ikään kuin näkisi ympäristön kuvatun dronista. Pistepilveä voi tarkastella mistä tahansa kulmasta tarpeen mukaan. (GeoSLAM 2023a.)

Pistepilven saa myös värillisenä. Kun katsotaan huoneen värillisintä pistepilveä, nähdään sekä mittamitat että RGB-arvon. Nämä tiedot otetaan jokaisesta skannerin mittaamasta pisteestä. Käyttäjä tajuaa nopeasti, mitä katsoo, koska pistepilvi näyttää enemmän 3D-valokuvalta. GeoSLAM ZEB Horizonia käytettäessä värillisiä pilstepilviä voidaan luoda käyttämällä ZEB Vision -lisävarustetta ja työnkulkua GeoSLAM Connect -ohjelmistolla. (GeoSLAM 2023a.)

Kädessä pidettävät 3D-laserskannerit ovat riittävän tehokkaita, jotta monet tilat voidaan skannata yhdellä skannauksella. Isot projektit voivat kuitenkin vaatia enemmän skannauksia täydellisen kattavuuden saavuttamiseksi, mikä tarkoittaa, että projektissa on useita pistepilviä, jotka yhdistetään yhdeksi lopulliseksi pistepilveksi. Erilaiset ohjelmistosovellukset mahdollistavan tämän tekemisen. GeoSLAM-laserskannetta käytettäessä on järkevä käyttää GeoSLAM:n ilmaista Connect-ohjelmistoa. GeoSLAM Connectissa on stop-and-go -kohdistusominaisuus, jossa yhteiset staattiset pisteet tallennetaan useiden skannausten aikana, mikä tarkoittaa, että nämä tietojoukot voidaan kohdistaa automaattisesti. Yksittäinen pistepilvi viedään sitten ikään kuin tiedot olisi kerätty yhdellä skannauksella. (GeoSLAM 2023a.)

Eri skannerit tuottavat raakadataa useissa muodoissa, ja jokaisella ohjelmistolla on erilaiset vientiominaisuudet. Tulostusmuodot määräytyvät myös sen mukaan, mitä tietoja tarvitaan ja kuka niitä tarvitsee. Suosituimmat formaatit ovat ASCII, LAS, PTS, FTX, XYZ ja Fast Binary. GeoSLAM-tiedot ovat yhteensopivia ohjelmistojen kanssa, jotka toimivat yleisillä tiedostomuodoilla (LAZ/LAS/PLY/TXT/e57), ja ne voidaan tuoda useisiin eri kolmannen osapuolen ohjelmistoihin, kuten Deswick, Esri, Micromine ja Floorplanner. (GeoSLAM 2023a.)

### 2.3.5 GeoSLAM ZEB-Horizon käsiskanneri

Testialue keilattiin GeoSLAM ZEB HORIZON käsiskannerilla. Tällä skannerilla käytetään LiDAR tekniikkaa. Mittalaitteelle luvataan 0,002–0,197 metrin tarkkuutta riippuen ympäristöstä, jossa skannaus suoritetaan, ja 3D-laserskannerin ominaisuuksista. Tämä korkea tarkkuustaso auttaa varmistamaan, että mittaukset ovat oikein ensimmäisellä kerralla, jolloin suunnittelun ja tuotannon myöhempien vaiheiden suorittamiseen tarvitaan vähemmän työtä. Lisäksi LiDAR poistaa inhimillisen elementin prosessista tehden tiedoista entistä tarkempia. (GeoSLAM 2023a.)

ZEB Horizon -keilain on monipuolinen ja joustava laite. Tehokkaan SLAM-tekniikan avulla voidaan mitata alueilla, joissa GPS-signaali on heikko kuten sisällä, maan alla tai ulkona. ZEB Horizon on 3D-skannausratkaisu tarkkoja, korkealaatuisia ja ammattimaisia tuloksia varten. Se on kestävä, helppokäyttöinen ja helppo käsitellä. ZEB Horizon antaa tarkimmat tiedot, joita tarvitaan päätösten tekemiseen. ZEB Horizonin voi yhdistää yhteen UAV:hen tai telineeseen tai sauvaan. ZEB Horizoniin on saatavilla ZEB Vision -lisävaruste. Yksinkertaisen ja helpon käyttöönoton ansiosta ZEB Vision kiinnittyy nopeasti ZEB Horizoniin ja tallentaa värillisiä tietoja ja 360 asteisia panoraamakuvia minuuteissa. (GeoSLAM 2023a; GeoSLAM 2023b.)

ZEB Horizon-laitteella mittaaminen siirtyy sujuvasti eri ympäristöjen välillä. Tahtuipa se ulkoa sisälle, huoneesta toiseen, maan yläpuolelta maan alle. Laite luo puhtaita, georeferoituja pistepilviä automaattisesti GeoSLAM Connectin avulla. Connect käsittelee tiedot yhdellä painikkeen painalluksella. Connect tulee vakiona kaikkiin ZEB 3D-laserskannereihin. GeoSLAM-tiedot ovat yhteensopivia ohjelmistojen kanssa, jotka toimivat yleisillä tiedostomuodoilla. Näitä muotoja ovat LAZ, LAS, PLY, TXT ja e57. (GeoSLAM 2023a; GeoSLAM 2023b.)

## 2.4 Tavoitteet

Tässä opinnäytetyössä arvioidaan kädessä pidettävän laserkeilaimen tarkkuutta. Tavoitteena on saada tieto, minkä verran kädessä pidettävän laserin mitattujen

pisteet eroavat verkko-RTK- ja takymetrimittauksella mitatuista pisteistä. Käytännön työ tehtiin verkko-RTK- ja takymetrimittauksen avulla tekemällä testausalueelle vertailupisteitä. Mittausalue mitattiin verkko-RTK:lla, takymetrilla ja kädessä pidettävän laserskannerin kanssa. Skannerilla mitatusta pistepilvestä otetaan vertailupisteitä, joita verrataan verkko-RTK-mittauksella ja takymetrilla mitattuihin pisteisiin.

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia, miten käsiskanneri toimii mittalaitena maanmittauksen perusmittauksissa ja myös vaativimmissa mittauksissa. Tavoitetta tarkastellaan monella eri menetelmällä. Ensimmäinen keino on Helmertin muunnoksen teko eli eri tavalla mitattujen koordinaattien vertaaminen keskenään. Myös pistepilvessä tutkitaan pistepilven omaa rakennetta.

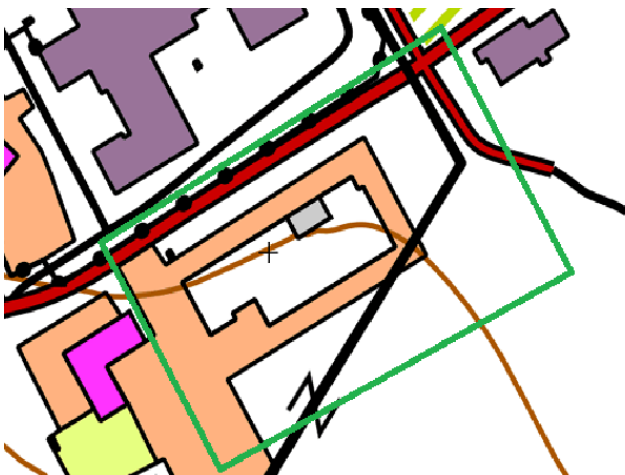
### 3 AINEISTO JA MENETELMÄT

#### 3.1 Tutkimus- ja testausalue

Tutkimus- ja testausalue (kuvio 1) sijaitsee Haukiputaalla Ukonkaivoksen alueella. Paikan postiosoite on Teollisuustie 2. Mitattu alue on noin 1,5 hehtaarin kokoinen ja koostuu asfaltti-, betoni- ja metsäalueesta. Mittausalue sopii hyvin tällaiseen testaamiseen. Alueella on vanhan tehtaan rauniopohja, johon nuoret ovat rakentaneet skeittipaikan. Alueella on myös lehti- ja mäntymetsää ja asfalttialueita eli teitä ja parkkialueita. Alueelle merkittävää on tasainen betonipohjainen raunio, joka kattaa suuren osan aluetta.



Kuvio 1. Testialue ilmakuvasta (Maanmittauslaitos 2023)



Kuvio 2. Testialueen pohjakartta (Maanmittauslaitos 2023)



Kuvio 3. Testialueen panoraamakuva



Kuvio 4. Kuva testialueelta



Kuvio 5. Kuva testialueelta



Kuvio 6. Kuva testialueelta

### 3.2 Verkko-RTK-mittaus

Alueelle mitattiin verkko-RTK-mittauksella kolme mittauspistettä. Mittausten suhteellinen tarkkuus on alle 5 senttimetriä. Mittavirheeseen liittyvät absoluuttinen ja suhteellinen tarkkuus on esitetty aikaisemmin kohdassa 2.1.2.

RTK-mittaus oli mitattu jo aikaisemmin, ennen kuin opinnäytetyö aloitettiin. RTK-mittaukset on merkitty maastoon signaaliristeillä, joiden koko oli noin 37 senttimetriä suuntaansa.

### 3.3 Takymetriaineisto

Takymetrilla tuotettiin mittapisteitä ympäri koealuetta. Näitä pisteitä käytettiin vertailupisteiksi pistepilvidataan. Tärkein mitattava asia oli korkeus, jota on kätevää verrata pistepilvessä. Takymetrimittauksista tehdään Cloud Compare -ohjelmassa kolmiointi, johon pistepilven pisteitä voi verrata.

Takymetri orientoitiin verkko-RTK-mittauksella mitattujen pisteiden avulla. Testialue mitattiin yhdeltä ja samalta mittauspisteeltä. Kaikkiaan mitattuja pisteitä tuli 170 kappaletta. Takymetrimittauksen suhteellinen tarkkuus on muutamia senttejä. Tarkkuus riippuu paljon prisma-auvan heilunnasta. Korkeuden mittauksen suhteellinen tarkkuus on myös muutamia senttejä. Takymetrimittaus on tarkin tapa verrata pisteitä käsiskannerin mitattuihin pisteisiin. (Leica-Geosystems 2023.)

Opinnäytetyön takymetrimittaus suoritettiin Leica TS16 takymetrilla. TS16 on robottitakymetri. Siinä on kätevä ja helppokäyttöinen Leica Captivate field -kenttäohjelmisto. Takymetrissa on automaattisesti kohteen tunnistava itseoppiva AT-Rplus -toiminto. Leica TS16 mahdollistaa kojeen käyttämisen yhden tai kahden henkilön toimesta. Takymetrissa on tehokkaat koodaus- ja linjaustoiminnot. Se mahdollistaa pistemittausten, säätöjen, laskentojen ja tiedonkeruun tehokkaan hallinnan. Takymetri on nopea maastomerkintään ja rakennusalan mittauksiin. Takymetrilla tehdään sujuvasti suunnittelutietojen merkinnät, toteumatarkastukset, BIM- ja etäisyystarkastukset. Leica TS16 soveltuu hyvin raskaisiin rakennushankkeisiin. Koneella voi hallita työmaata eli siltä sujuu mittaus, suunnittelutietojen asettelu, toteumatarkistukset, koneenohjaus sekä tie-, rautatie- ja tunnelikeskeiset työkulut. Leica TS16 sopii luotettavaan sijaintien, rakennusten ja kohteiden seurantaan kaikissa olosuhteissa. TS16-takymetrin yksi toiminto on AutoHeight-toiminto. Sillä saadaan kojeen korkeus tarkastettua yhdellä painikkeen painalluksessa. (Leica-geosystems 2023.)

Takymetrimittauksessa käytettiin maastotallenninta. Leica CS20 -maastotallennin mahdollistaa liikkumavapauden. CS20-tallennin mahdollistaa kaikkien toimintojen käyttämisen etäkohteesta. Tallentimella voi suorittaa tarkkaa elektronista etäisyydenmittausta. Tallentimessa on radio ja antenni robottitakymetrin suurta kantamaa varten. Leica CS20 sisältää Leica Captivate -kenttäohjelmiston, jonka avulla voi kuvata ja hallita monimutkaisia tietoja helposti. Leica Captivate -ohjelmisto voi olla käytössä helposti GNSS-laitteessa, takymetrissa tai molemmissa yhtä aikaa. (Leica-geosystems 2023.)



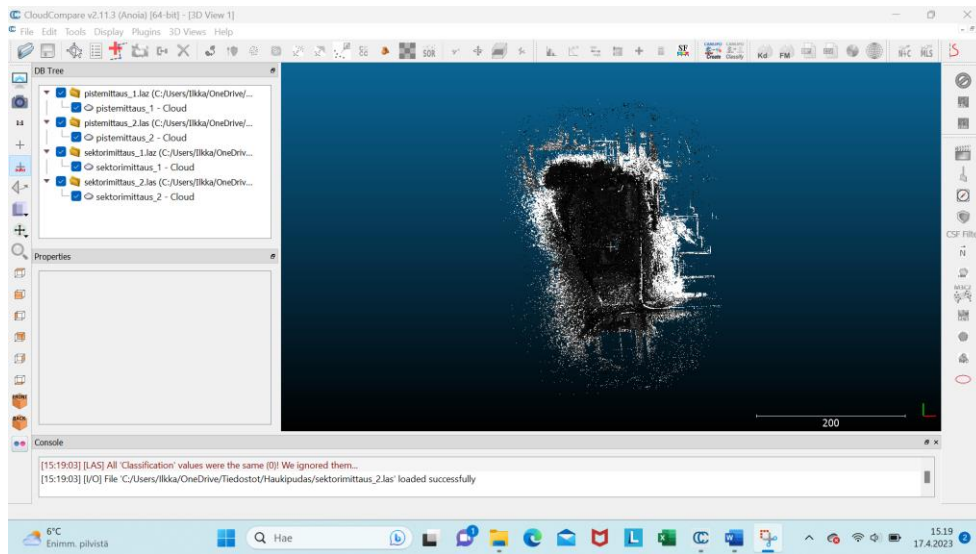
Kuvio 7. Leica CS60 -takymetri (Leica-geosystems 2023)

### 3.4 Skannauslaitteisto

Testialue keilattiin GeoSLAM ZEB HORIZON käsiskannerilla. Mittauksia käytetään 3D-mallien ja -karttojen luomiseen kohteista ja ympäristöstä. (GeoSLAM 2023a.)

Skannaus tuotti 421 772 095 pistettä. Mittaaja latsasi ne neljään eri tiedostoon datan käsittelyn helpottamiseksi. Skannausdata aukeaa helposti Cloud Compare -ohjelmaan. Pistepilvessä on helppo kierrellä ja tutkia eri pisteitä. Pistepilvestä löytyy verkko-RTK-mittauksella mitatut kolmet signaalipisteet, joiden avulla saadaan takymetrimittauksen mittaustulokset yhdistettyä pistepilveen.

Mitattua pistepilveä pystyy käsitellä eri tavoin. Sitä voi mitata, värittää ja siirrellä sekä käännellä Cloud Compare -ohjelmassa. Opinnäytetyössä hyödynnettiin erilaista vertailua värittämällä pistepilveä ja takymetrimittausta, jolle on tehty Helmertin muunnos.



Kuvio 8. Kuva skannatusta pistepilvestä Cloud Compare -ohjelmassa

## 4 AINEISTON KÄSITTELY

### 4.1 Pisteiden vertailu

Opinnäytetyössä on tavoite saada eri mittaukset samaan koordinaattiin, jotta mittauksen tarkkuus saadaan määritettyä. Helmertin muunnos on ainoa ja siten tärkein mittaustulokset yhdistävä toiminto. Helmertin muunnos käsitellään kohdassa 4.3.1. Muunnos tehtiin muuttamalla takymetrilla mitatut pisteet samaan koordinaattiin pistepilven kanssa. Mittausten tarkkuus on keskeinen mittaustuloksen tarkkuuden arvioimisessa. Helmertin muunnos laskettiin 3D-Win -ohjelmalla. 3D-Win -ohjelman manuaalissa ei esitetä tarkemmin siihen, miten Helmertin muunnos ohjelmassa tehdään, mutta asia on esitetty Pasi Laurilan ohjeiden mukaan. Helmertin muunnoksessa olevat koodinaattipisteet on muutettu 3D-Win -ohjelmassa las-muotoon, jotta pisteryhmä toimisi oikein Cloud Compare -ohjelmalla. Tulosten analyysi on toteutettu Cloud Compare -ohjelmalla. Helmertin muunnos on tehty normaalisti ja korkoa tarkennettu ja vertailtu myöhemmin Cloud Compare -ohjelmalla.

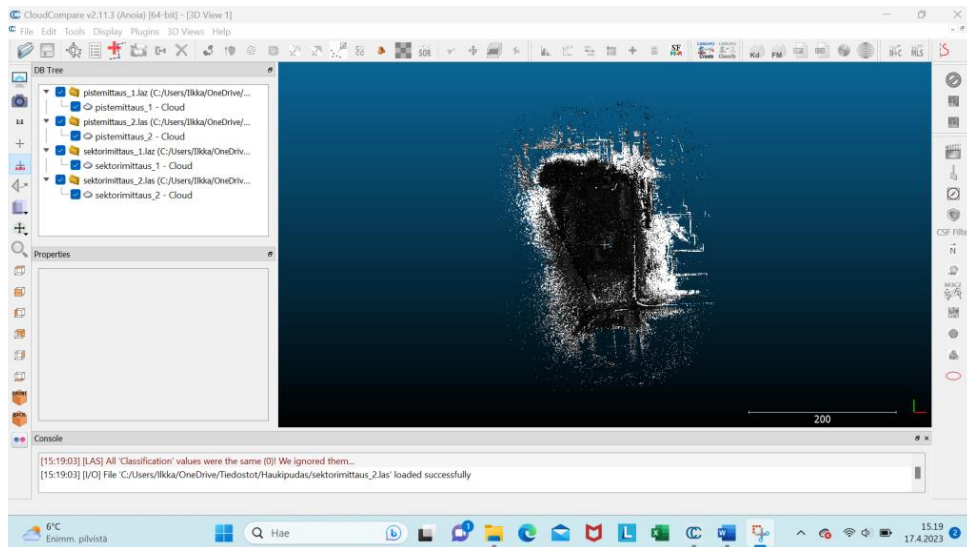
### 4.2 Pistepilven käsittely

Mitattu pistepilvi avataan Cloud Compare -ohjelmalla. Cloud Compare -ohjelma on avoimeen lähdekoodiin perustuva pistepilvien visualisointi- ja analysointiohjelma. Se tarjoaa monipuolisia työkaluja 3D-pistepilvien käsittelyyn ja vertailuun. Ohjelma tukee useita eri tiedostomuotoja, kuten LASia, jota opinnäytetyössä käytetään.

Cloud Compare -ohjelman avulla voi ladata pistepilvitiedostoja eri lähteistä, kuten kaukokartoitussensoreista, 3D-skannereista, fotogrammetriasta tai LiDAR-laitteista. Ohjelmalla voi visualisoida pistepilvet 3D-muodossa ja tarkastella niitä eri näkökulmista. Ohjelmalla voi vertailla eri mittaustavalla mitattuja pisteitä.

Opinnäytetyössä pistepilven lisäksi ohjelmaan avataan takymetriaineisto. Takymetriaineisto on muokattu aikaisemmin samaan koordinaatistoon Helmertin muunnoksella. Cloud Compare -ohjelmalla voi suorittaa erilaisia mittauksia suu-  
relle määrälle tietoa. Pistepilvi on jaettu neljään tiedostoon, jotta sen käsittely olisi

helpompaa. Takymetriaineistoon on mitattu 170 eri pistettä, josta ohjelmassa muodostetaan mesh, eräänlainen verkko. Tätä verkkoa verrataan pistepilveen ja tästä saatua tulosta esitellään kohdassa Tulokset 5. (Cloud Compare 2020.)

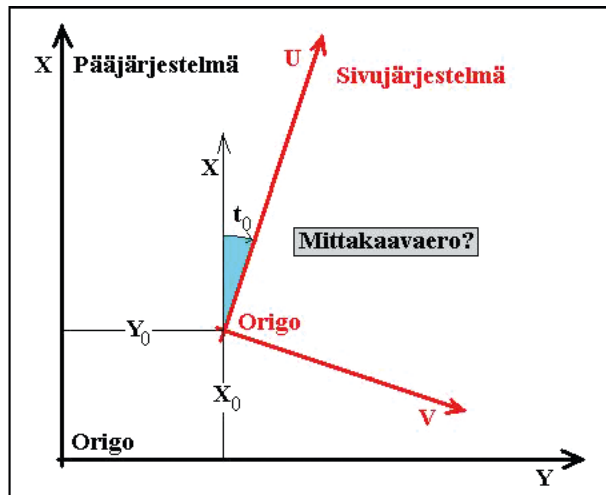


Kuvio 9. Kuvakaappaus Cloud Compare -ohjelmasta. Kuvassa on pistepilvi, jossa mukana kaikki neljä mitattua tiedostoa.

### 4.3 Helmertin muunnos

#### 4.3.1 Helmertin muunnos teoria

Paljon käytetty suorakulmaisten koordinaatistojen välinen muunnos on lineaarinen yhdenmuotoisuusmuunnos, joka maanmittaustekniikassa tunnetaan Helmertin muunnoksena. Se on koordinaatistomuunnos, jossa kohteita tarkastellaan kahdessa suorakulmaisessa koordinaatistossa. Helmertin muunnos tehdään, kun syntyy tarve yhdistää kaksi eri mittausta samaan koordinaatistoon. Yhdistäminen voidaan tehdä yhteisten pisteiden avulla jotain sopivaa koordinaatistomuunnosta käyttäen. Toisesta koordinaatistosta tulee pääjärjestelmä (XY-koordinaatisto) ja toisesta sivujärjestelmä (UV-koordinaatisto). Pääjärjestelmä on ensisijainen koordinaatisto, jossa asiat halutaan esittää. (Laurila 2012, 80–81.)

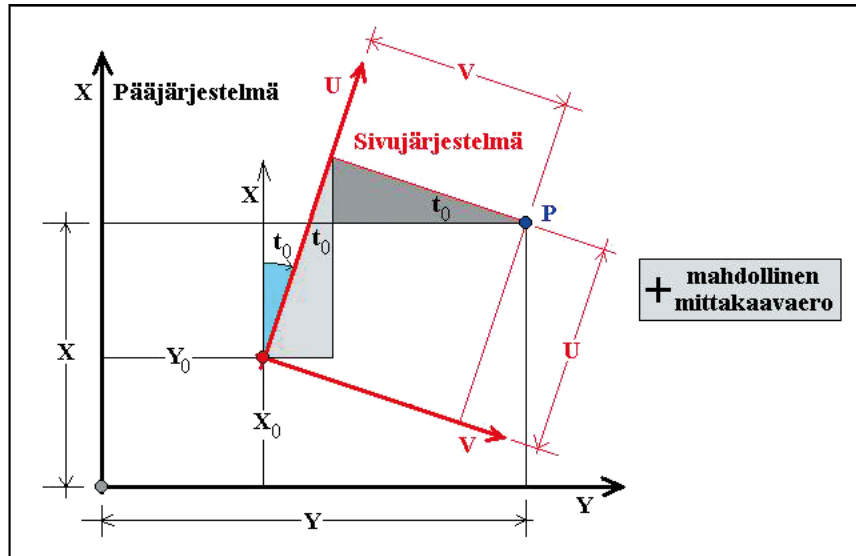


Kuvio 10. Pää- ja sivujärjestelmien koordinaatistot (Laurila 2012, 81)

Helmertin muunnoksessa huomioidaan koordinaatistojen origon erot, akselien kierto sekä mittakaavaero. Mittakaavaero oletetaan samaksi kaikissa suunnissa, jolloin muunnettavien kuvioiden muoto säilyy. Siksi puhutaan yhdenmuotoisuusmuunnoksesta. Helmertin muunnosta käytetään monenlaisissa laskennoissa. Sitä voidaan käyttää varsinaisten koordinaattimuunnosten lisäksi esimerkiksi vapaan asemapisteen ja epätäydellisesti sulkeutuvien jonojen laskennassa ja mittaessa tietoja kartoilta ja piirustuksista. Myös kaukokartoituskuvioiden mittauksissa käytetään Helmertin muunnosta. (Laurila 2012, 81–82.)

Helmertin muunnoksen muunnosyhtälöt muodostetaan, niin että seuraavat ehdot toteutuvat:

- Kumpikin koordinaatisto on suorakulmainen koordinaatisto.
- Sivujärjestelmän origon paikka pääjärjestelmässä on  $(X_0, Y_0)$ .
- Sivujärjestelmän koordinaattiakselit ovat kiertyneet pääjärjestelmän akselien ympäri kulman  $t_0$  verran. Positiivinen kiertosuunta on myötäpäivään.
- Sivujärjestelmän koordinaatit on kerrottava mittakaavalluvulla  $m$ , ennen kuin ne vastaavat pääjärjestelmän koordinaatteja. (Laurila 2012, 82.)



Kuvio 11. Helmertin muunnoksen muunnosyhtälöiden johtamisessa tarpeellinen apukuvio (Laurila 2012, 82.)

Muunnosyhtälöt sivujärjestelmästä pääjärjestelmään voidaan kirjoittaa kuvio 10 perusteella muotoon:

$$X = X_0 + mU \cos t_0 - mV \sin t_0 \quad (1)$$

$$Y = Y_0 + mU \sin t_0 + mV \cos t_0 \quad (2)$$

$X, Y$  ovat pisteen tasokoordinaatit pääjärjestelmässä

$U, V$  ovat pisteen tasokoordinaatit sivujärjestelmässä

$k_1, k_2, X_0, Y_0$  ovat muunnosparametrit sivujärjestelmästä pääjärjestelmään

$t_0$  on sivujärjestelmän kiertymä pääjärjestelmän suhteen

$m$  on muunnoksen mittakaavaluku (Laurila 2012, 82–83.)

Yleisesti käytetään alla olevaa esitysmuotoa.

$$k_1 = m \cos t_0 \quad (3)$$

$$k_2 = m \sin t_0 \quad (4)$$

Joskus kertoimien  $k_1$  ja  $k_2$  sijasta käytetään merkintöjä A ja B, kuten esimerkiksi 3D-Win -ohjelma käyttää.

Kaavat (1), (2), (3) ja (4) yhdistämällä Helmertin muunnos sivujärjestelmästä pääjärjestelmään voidaan esittää kaavoilla

$$X = k_1U - k_2V + X_0 \quad (5)$$

$$Y = k_2U + k_1V + Y_0 \quad (6)$$

Muunnosparametrien  $k_1$  ja  $k_2$  sekä mittakaavaluvun  $m$  ja kiertokulman  $t_0$  välillä ovat lisäksi voimassa seuraavat yhtälöt, jotka perustuvat trigonometrinen funktioiden määrittelyyn ja ominaisuuksiin:

$$t_0 = \tan^{-1} \left( \frac{k_2}{k_1} \right) \quad (7)$$

$$m = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \quad (8)$$

Kaavoissa (1) – (8)  $U$  ja  $V$  ovat pisteen sivujärjestelmän koordinaatit,  $X$  ja  $Y$  ovat sen pääjärjestelmän koordinaatit,  $m$  on mittakaavaluku,  $t_0$  on sivujärjestelmän  $U$ -akselin suuntakulma pääjärjestelmässä,  $k_1$  ja  $k_2$  ovat koordinaatiston kierron ja mittakaavaeron välittävät muunnosparametrit  $X_0$  ja  $Y_0$  ovat sivujärjestelmän origon koordinaatit pääjärjestelmässä. Suureita  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $X_0$  ja  $Y_0$  kutsutaan muunnosparametreiksi. Koska niitä on neljä kappaletta, Helmertin muunnosta kutsutaan 4-parametriseksi muunnokseksi. (Laurila 2012, 83.)

Muunnosyhtälöiden (kaavat 5–6) neljä muunnosparametria voidaan ratkaista, kun tunnetaan vähintään kahden yhteisen pisteen koordinaatit sekä sivujärjestelmässä että pääjärjestelmässä. Kahden yhteisen pisteen (seuraavissa kaavoissa pisteet 1 ja 2) avulla voidaan kirjoittaa neljä yhtälöä:

$$X_1 = k_1U_1 - k_2V_1 + X_0 \quad (9)$$

$$Y_1 = k_2U_1 + k_1V_1 + Y_0 \quad (10)$$

$$X_2 = k_1U_2 - k_2V_2 + X_0 \quad (11)$$

$$Y_2 = k_2U_2 + k_1V_2 + Y_0 \quad (12)$$

Kun merkitään

$$\Delta X = X_2 - X_1 \quad (13)$$

$$\Delta Y = Y_2 - Y_1 \quad (14)$$

$$\Delta U = U_2 - U_1 \quad (15)$$

$$\Delta V = V_2 - V_1 \quad (16)$$

muunnosparametrien ratkaisu on

$$k_1 = \frac{\Delta Y \Delta V + \Delta X \Delta U}{\Delta U^2 + \Delta V^2} \quad (17)$$

$$k_2 = \frac{k_1 \Delta U - \Delta X}{\Delta V} \quad (18)$$

$$X_0 = X_1 - k_1 U_1 + k_2 V_1 \quad (19)$$

$$Y_0 = Y_1 - k_2 U_1 - k_1 V_1 \quad (20)$$

Kaavoissa (9) – (20)  $X_1$  ja  $Y_1$  ovat pisteen 1 pääjärjestelmän koordinaatit,  $U_1$  ja  $V_1$  sen sivujärjestelmän koordinaatit,  $X_2$  ja  $Y_2$  ovat pisteen 2 pääjärjestelmän koordinaatit,  $U_2$  ja  $V_2$  sen sivujärjestelmän koordinaatit,  $k_1$  ja  $k_2$  ovat koordinaatiston kierron ja mittakaavaeron välittämät muunnosparametrit ja  $X_0$  ja  $Y_0$  ovat sivujärjestelmän origon koordinaatit pääjärjestelmässä. (Laurila 2012, 84.)

Jos Helmertin muunnoksessa on käytettävissä useampi kuin kaksi yhteistä pistettä, on kyseessä ylimääritetty mittaus. Tällöin muunnosparametrien laskenta perustuu pienimmän neliösumman periaatteeseen. Mittauksissa pyritään ylimääritettyyn tilanteeseen, koska tällöin voidaan laskentatulosten perusteella arvioida luotettavasti mahdollisia karkeita virheitä ja mittauksen tarkkuutta. Seuraavaksi esitetään muunnosparametrien laskenta ylimääritetyssä tapauksessa. (Laurila 2012, 84.)

Aluksi lasketaan tarkasteltavien pisteiden, joita on  $k$  kappaletta, sivujärjestelmän koordinaattien keskiarvot:

$$U_k = (\sum_{i=1}^k U_i) / k \quad (21)$$

$$V_k = (\sum_{i=1}^k V_i) / k \quad (22)$$

Seuraavaksi lasketaan sivujärjestelmän siirretyt koordinaatit:

$$u_i = U_i - U_k \quad (23)$$

$$v_i = V_i - V_k \quad (24)$$

Muunnosparametrit lasketaan seuraavasti:

$$k_1 = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i u_i + Y_i v_i)}{\sum_{i=1}^k (u_i^2 + v_i^2)} \quad (25)$$

$$k_2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i u_i - X_i v_i)}{\sum_{i=1}^k (u_i^2 + v_i^2)} \quad (26)$$

$$X_0 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k X_i \quad (27)$$

$$Y_0 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Y_i \quad (28)$$

Kaavoissa (21) – (28) yhteisiä pisteitä on  $k$  kappaletta.  $X_i$  ja  $Y_i$  ovat tarkasteltavien pisteiden pääjärjestelmän koordinaatit,  $U_i$  ja  $V_i$  ovat sivujärjestelmän koordinaatit,  $U_k$  ja  $V_k$  on sivujärjestelmän keskiarvokoordinaatit,  $u_i$  ja  $v_i$  ovat keskiarvojen suhteen lasketut sivujärjestelmän siirretyt koordinaatit,  $k_1$  ja  $k_2$  ovat koordinaatiston kierron ja mittakaavaeron välittävät muunnosparametrit ja  $X_0$  ja  $Y_0$  ovat sivujärjestelmän siirretyn origon koordinaatit pääjärjestelmässä. (Laurila 12, 85.)

Kun edellä lasketuilla parametreilla (kaavat (25) – (28)) halutaan muuntaa pisteitä sivujärjestelmästä pääjärjestelmään, ensiksi tulee laskea siirretyt sivujärjestelmän koordinaatit (kaavat (23) – (24)). Vasta tämän jälkeen lasketaan pääjärjestelmän koordinaatit (kaavat (5) – (6)). Kaavat (25) – (28) ja (5) – (6) voidaan myös yhdistää muotoon

$$X_i = k_1(U_i - U_k) - k_2(V_i - V_k) + X_0 \quad (29)$$

$$Y_i = k_2(U_i - U_k) + k_1(V_i - V_k) + Y_0 \quad (30)$$

jossa  $U_i$  ja  $V_i$  ovat muunnettavan pisteen sivujärjestelmän koordinaatit,  $U_k$  ja  $V_k$  ovat sivujärjestelmän keskiarvokoordinaatit ja  $X_i$  ja  $Y_i$  ovat pääjärjestelmään muunnetut koordinaatit. (Laurila 12, 85–86.)

Ylimääritettyssä mittauksessa muunnoksen tarkkuutta voidaan arvioida jäännösvirheiden avulla. Jäännösvirheet pääjärjestelmässä (XY) lasketaan muuntamalla muunnosparametrien laskennassa käytetyt pisteet pääjärjestelmään ja laskeamalla tunnettujen ja muunnettujen arvojen erot. Jäännösvirheet sivujärjestelmässä ovat:

$$v_{u,i} = -\frac{k_1 X_i + k_2 Y_i - (k_1^2 + k_2^2) u_i - k_1 X_0 - k_2 Y_0}{k_1^2 + k_2^2} \quad (31)$$

$$v_{v,i} = -\frac{-k_2 X_i + k_1 Y_i - (k_1^2 + k_2^2) v_i + k_2 X_0 - k_1 Y_0}{k_1^2 + k_2^2} \quad (32)$$

Jäännösvirhe eli residuaali tai näennäinen virhe määritellään kaavassa ( $v_i = l_i - \hat{x}_i$ ), jossa  $v_i$  on jäännösvirhe,  $l_i$  on havaintoarvo ja  $\hat{x}_i$  on suureen laskettu arvo.

Pää- tai sivujärjestelmässä laskettujen jäännösvirheiden perusteella voidaan edelleen laskea painoyksikön keskivirhe ja muunnosparametrien keskihajonnat:

$$r = 2k - 4 \quad (33)$$

$$s_0 = \sqrt{\frac{\sum(v_{u,i}^2 + v_{v,i}^2)}{r}} \quad (34)$$

$$s_{k_1} = s_{k_2} = \frac{s_0}{\sqrt{\sum(u_i^2 + v_i^2)}} \quad (35)$$

$$s_{X_0} = s_{Y_0} = \frac{s_0}{\sqrt{k}} \quad (36)$$

Kaavoissa (31 – 36)  $k$  on muunnosparametrien laskennassa käytettyjen pisteiden lukumäärä,  $r$  on havaintojen ylimäärä,  $v_{u,i}$  ja  $v_{v,i}$  ovat pää- tai sivujärjestelmän jäännösvirheet,  $s_0$  on painoyksikön keskivirhe,  $u_i$  ja  $v_i$  ovat sivujärjestelmän siirretyt koordinaatit (kaava 23 – 24, s. 34) ja  $s_{k_1}$ ,  $s_{k_2}$ ,  $s_{X_0}$  ja  $s_{Y_0}$  ovat muunnosparametrien keskihajonnat. (Laurila 12, 86.)

Laskennan jälkeen jäännösvirheet tutkitaan ja katsotaan, onko joukossa muista poikkeavia arvoja. Jos poikkeavia arvoja löytyy, ne voivat johtua esimerkiksi yksittäisten muunnospisteiden karkeista virheistä. Poikkeavien arvojen syyt pitää aina selvittää. (Laurila 12, 87.)

#### 4.3.2 Helmertin muunnos käytäntö

Helmertin muunnos 3D-Win -ohjelmalla tehdään syöttämällä ohjelmaan sivujärjestelmän x-, y- ja z-koordinaattien tiedot ja sen jälkeen pääjärjestelmän vastavien pisteiden tiedot. Seuraavaksi sama tehdään toiselle kiinnityspisteelle. Jos vertailupisteitä on enemmän, syötetään pisteet ohjelmaan. Pisteiden syöttämisen jälkeen ohjelma laskee tuloksen. Tuloksena on Helmertin muunnoksen tulokset ja parametrit. Tämän jälkeen takymetri- ja lasermittaukset ovat yhdistettävissä keskenään. Kuviossa 12 esitetään, miten vertailupisteiden syötetään 3D-Win -ohjelmassa. Kuviossa 13 tuloksista näkyy, miten Helmertin muunnos on onnistunut. Helmertin muunnoksen tulosten avulla lasketaan sivujärjestelmän (takymetrimittaukset) koordinaatit pääjärjestelmään (pistepilvi). Kun Helmertin muunnos

on valmis, muutetaan tulokset 3D-Win -ohjelmalla takymetrimittauksen muunneltut koordinaatit las-tiedostoksi, jotta jatkossa pisteiden vertaileminen Cloud Compare -ohjelmalla onnistuu. (3D-Win 2023.)

The image shows three instances of the 'Helmert-määrittely' (Helmert adjustment) dialog box. Each dialog is for a different point (Piste 1, 2, and 3). The settings are as follows:

Piste	X vanha	Y vanha	Z vanha	X uusi	Y uusi	Z uusi
1	471237.435	7230989.934	10.683	-9.515	-42.560	-1.233
2	471199.221	7231017.147	10.607	9.991	0.119	-1.294
3	471303.433	7230990.340	8.941	3.125	-107.363	-2.950

Additional settings in each dialog include:  Helmert muunnos,  Affiinen muunnos,  Tallenna tarke, and checkboxes for 'Auto', 'Edellinen', and 'Seuraava'. The 'Käytössä' (In use) section has checkboxes for XY and Z, which are checked in all three dialogs.

Kuvio 12. Ensimmäinen, toinen ja kolmas vertailupiste Helmertin muunnoksessa (3D-Win)

The 'Helmert tulokset' dialog box displays the following results:

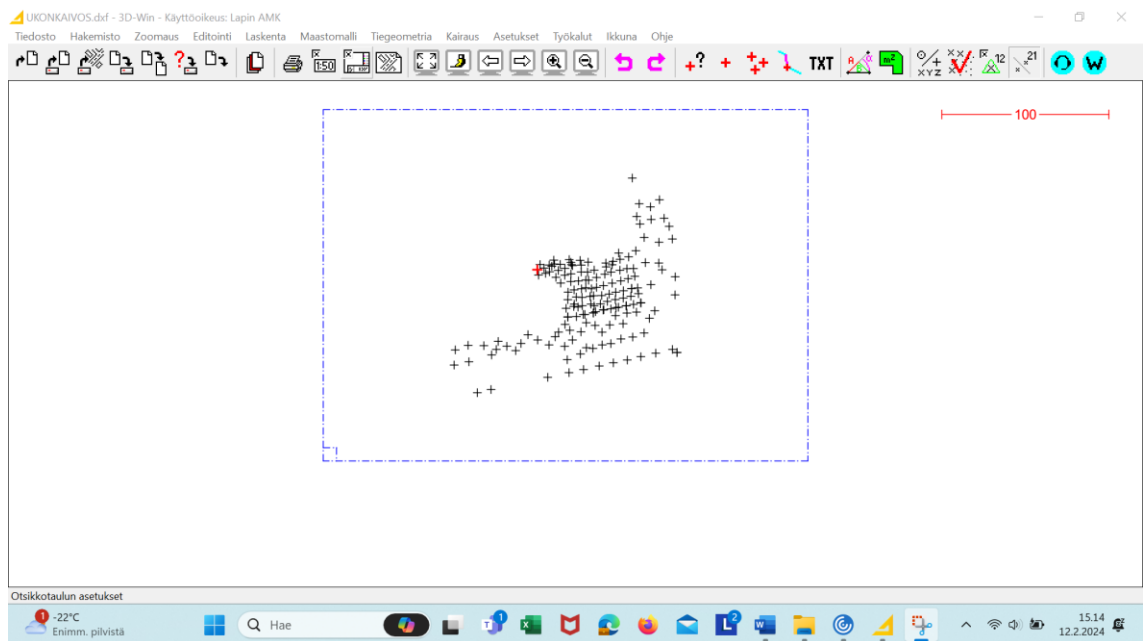
Pisteitä	3		
Keskivirhe	XY	0.070	(0.060)
	Z	0.013	(0.013)
Kertoimet	A	0.186779	
	B	-0.982402	
	dX	1.200	
	dY	-49.935	
	dZ	-11.903	
Mittakaava	1.000000	PPM	
Kiertokulma	-88.039056	gon	

Buttons on the right side of the dialog include: OK, Peruuta, Ohje, Näytä, Editoi, and Tallenna.

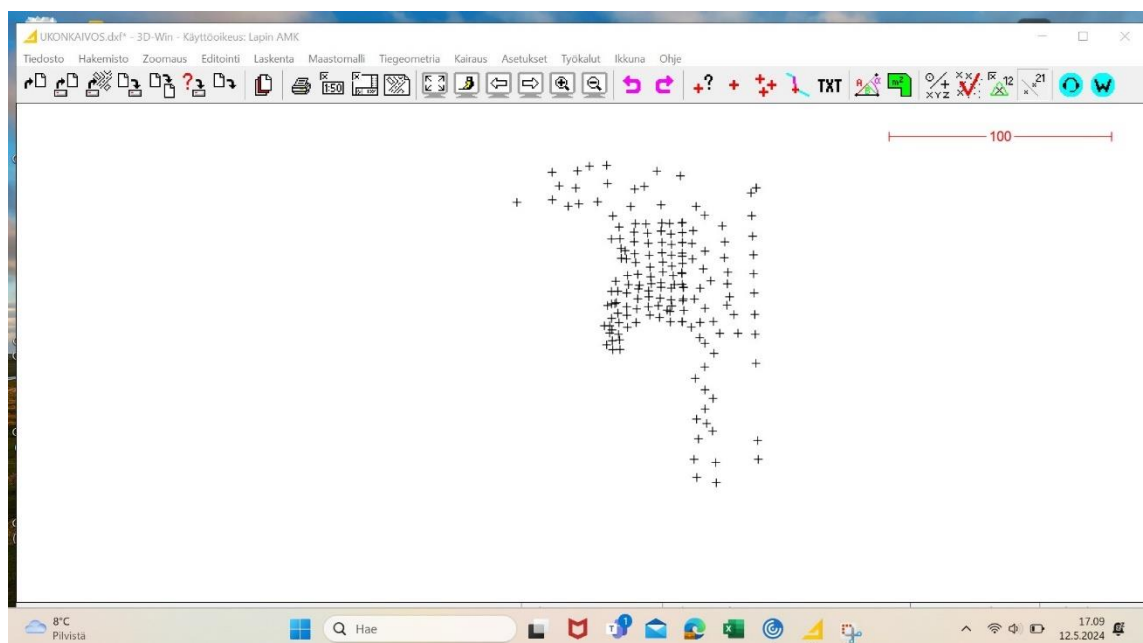
Kuvio 13. Helmert-muunnoksen tulokset 3D-Win -ohjelmalla.

3D-Win-ohjelma laskee keskivirheen x- ja y-akselin sekä z-akselin suhteen (kuvio 13.). Nyt lasketuissa pisteissä XY-akselin tasossa on keskivirhettä 0,070 metriä, ja Z-akselin tasossa on keskivirhettä 0,013 metriä. Virheet selitetään tulokset osiossa 5. Kertoimet A ja B ovat muunnosparametrejä, jotka lasketaan mittakaavan

ja kiertokulman avulla. Kertoimet  $dX$ ,  $dY$  ja  $dZ$  kertovat kuinka paljon sivujärjestelmän origoa pitää siirtää pääjärjestelmän suhteen. Mittakaavan luku tarkoittaa, että sitä yhteensopivampi Helmertin muunnos on, mitä lähempänä se on ykköstä. Mittakaavaero oli tässä muunnoksessa niin pieni, että mittakaavaluvuksi annettiin tasan yksi. Kiertokulma on sivujärjestelmän (takymetrimittaus) U-akselin t(x-akselin) suuntakulma pääjärjestelmässä (lasermittaus). Tässä mittauksessa kiertokulma on melko iso. (3D-Win 2023.)



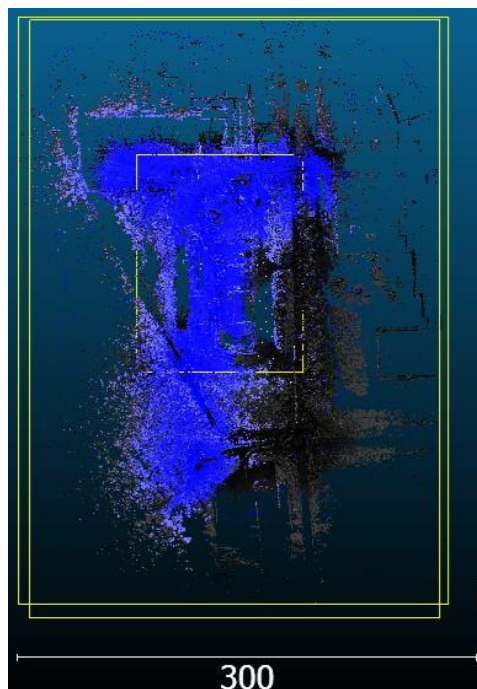
Kuvio 14. Takymetripisteet ennen Helmertin muunnosta 3D-Win -ohjelmassa



Kuvio 15. Helmertin muunnos tehtynä pisteille 3D-Win -ohjelmalla.

## 5 TULOKSET

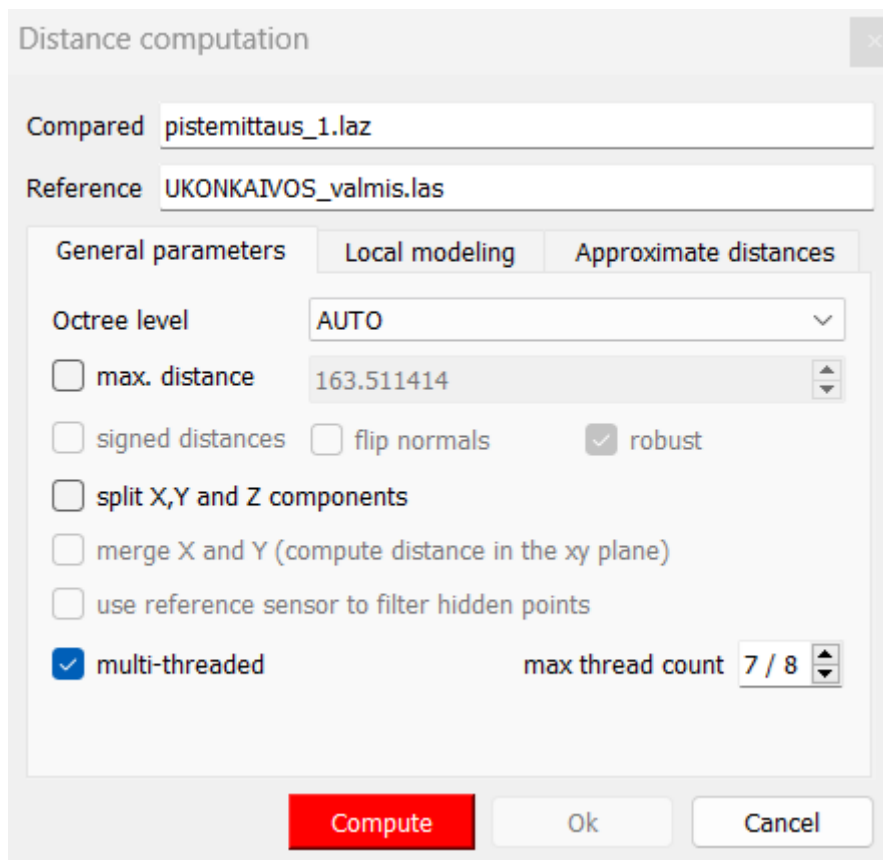
Pistepilven ja takymetrilla mitattujen pisteiden yhdistäminen antavat keinon ratkaista laserkeilauksen tarkkuuden arvion. Keilausdata ja takymetrimittaukset avataan samaan tiedostoon. Sivujärjestelmän (takymetrimittaus) pisteistä tehdään ensin *mesh* (kolmiointi). *Meshin* avulla mittaus liitetään pistepilveen siten, että sen käsittely ja vertailu olisi mahdollista. Sitten sivu- ja pääjärjestelmät liitetään yhteen *tools/Distances/Cloud/Mesh Dist* -komennoilla ja sitten suoritetaan laskenta, jonka jälkeen on mahdollista suorittaa erilaisia vertailuja mittausten välillä. *Mesh* kolmioi takymetrilla lasketut pisteet, jolloin vertaileminen on mahdollista. *Mesh* tuotti tässä tapauksessa 170 pisteestä 327 kolmiota, josta muodostuu verkko. Mittausten eroja voidaan laskea *Distance computation* toiminnolla. Siihen voidaan valita pistepilvi ja vertailutiedosto, johon korkeuksia voi verrata. Ohjelma laskee tiedoston ja tuloksena on yhtenäinen pistepilvi, josta voidaan mitata takymetrilla mitattuja pisteitä ja tehdä mittausten korkeuseroista värillisiä pistepilviä, joista erottuvat muun muassa puut selvästi. (Cloud Compare 2020.)



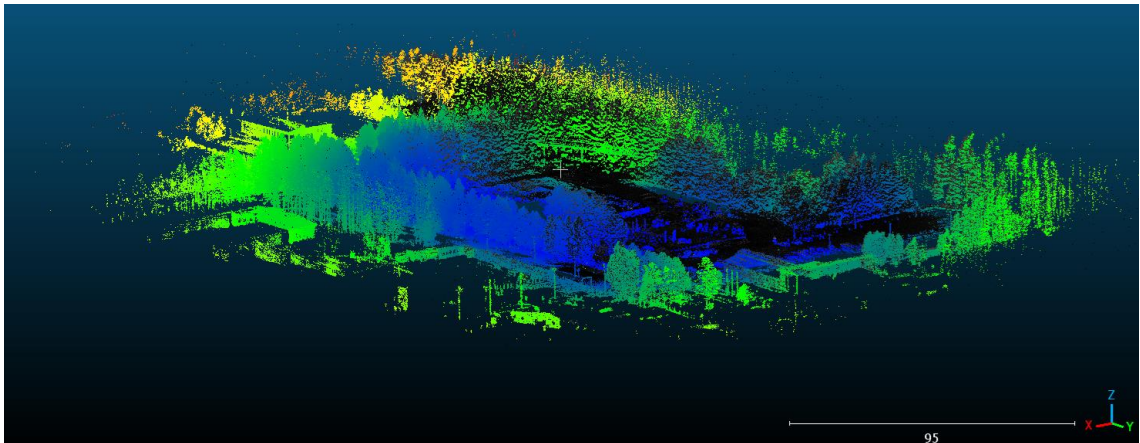
Kuvio 16. Pistepilvestä rajattu vaatuspisteitä vastaava alue sisimmällä keltaisella kehyksellä. Siellä sijaitsevat valkoiset pisteet ovat takymetrilla mitattuja pisteitä. Uloimmat kehikot rajaavat pistepilvien rajaaman alueen. Sininen väri on pistepilveä.



Kuvio 17. Takymetrilla mitattujen vaatuspisteiden laskettu mesh Cloud Compare -ohjelmalla. Kaikkiaan 327 kolmiota.

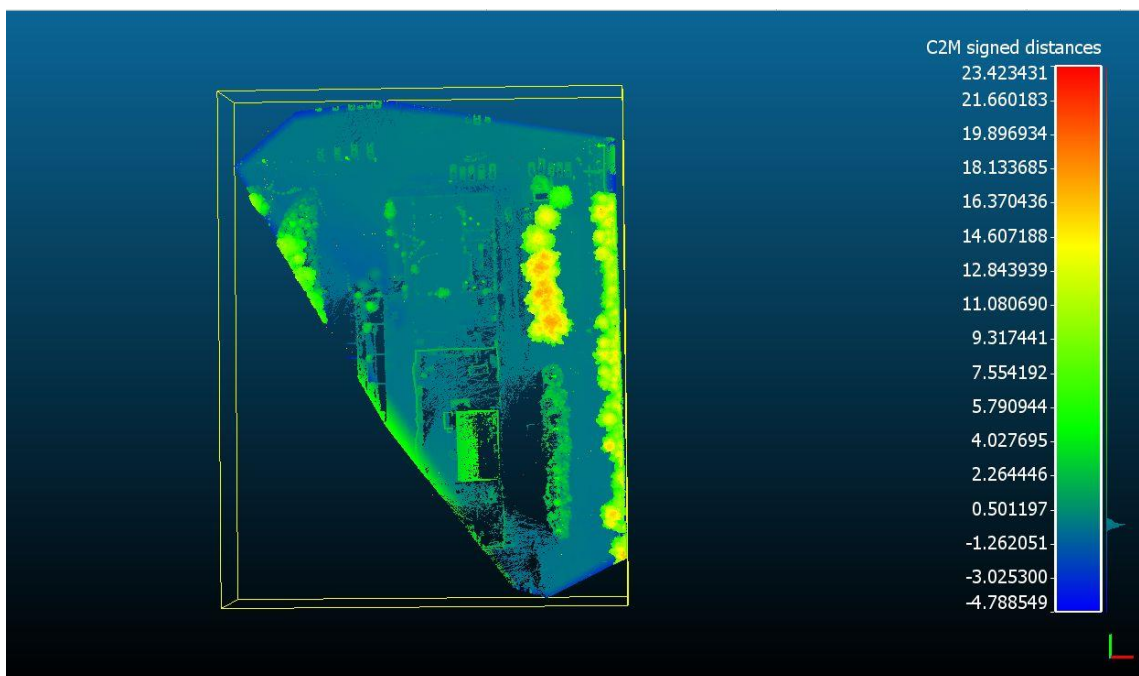


Kuvio 18. Mittausten yhdistävää laskentaa Cloud Compare -ohjelmalla



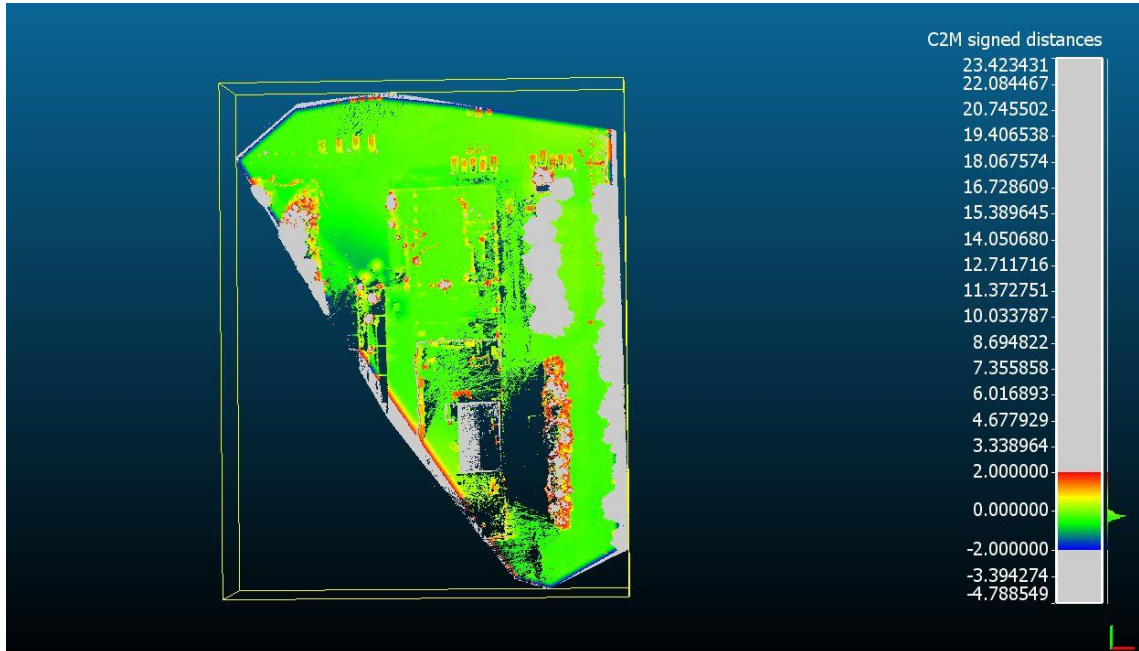
Kuvio 19. Avaruuskuva. Mitatun verkon ja pistepilven korkeuspisteiden erotuksen välillä olevaa vaihtelua väreissä.

Mitatun verkon ja pistepilven välisiä korkeuseroja voidaan hahmotella värityksellä niitä eri väreillä (Kuviot 20–25). Kuviossa 20 ikkuna on rajattu siten, että koko takymetrin mittausalueen korkeuserot pistepilven verrattuna näkyvät eri väreissä. Kuviossa erottuu selvästi puusto, autoja ja iso betonialue, joka sijaitsee kuvassa keskellä. Alue analysoidaan jatkossa tarkemmin.



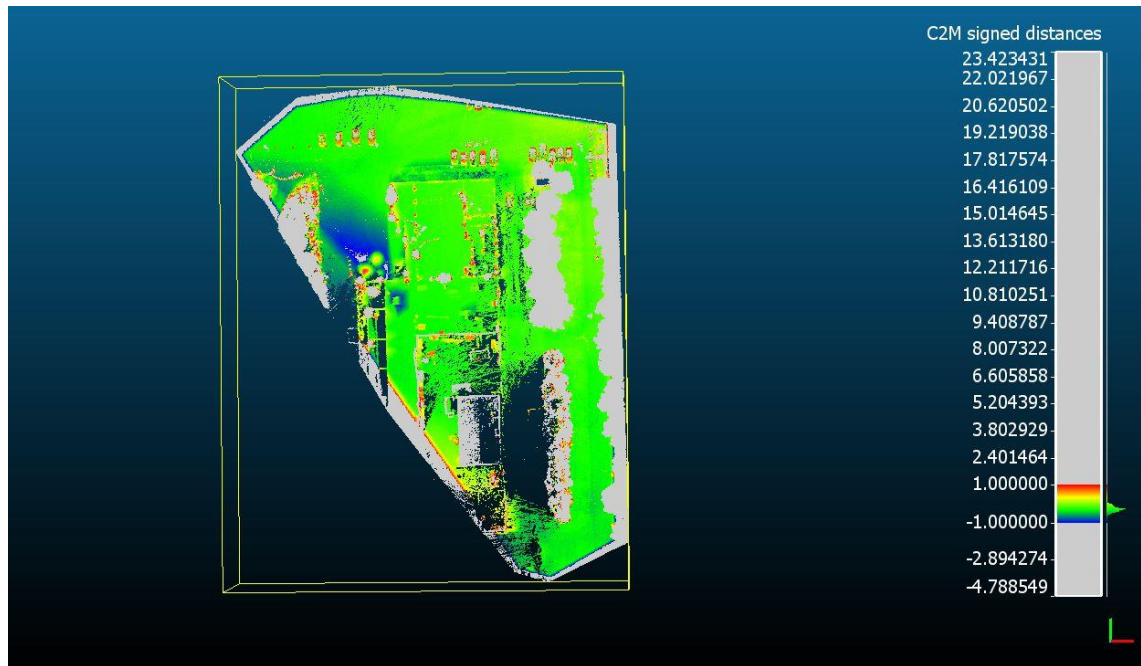
Kuvio 20. Alla mittausdatojen korkeuksien väliset erot väreillä.

Kuviossa 21 takymetrin mittausalueen yli miinus kahden ja alle kahden metrin korkeuserot pistepilveen verrattuna näkyvät kuvassa väreissä. Alue kattaa lähes kaikki alueet puustoaluetta lukuun ottamatta.



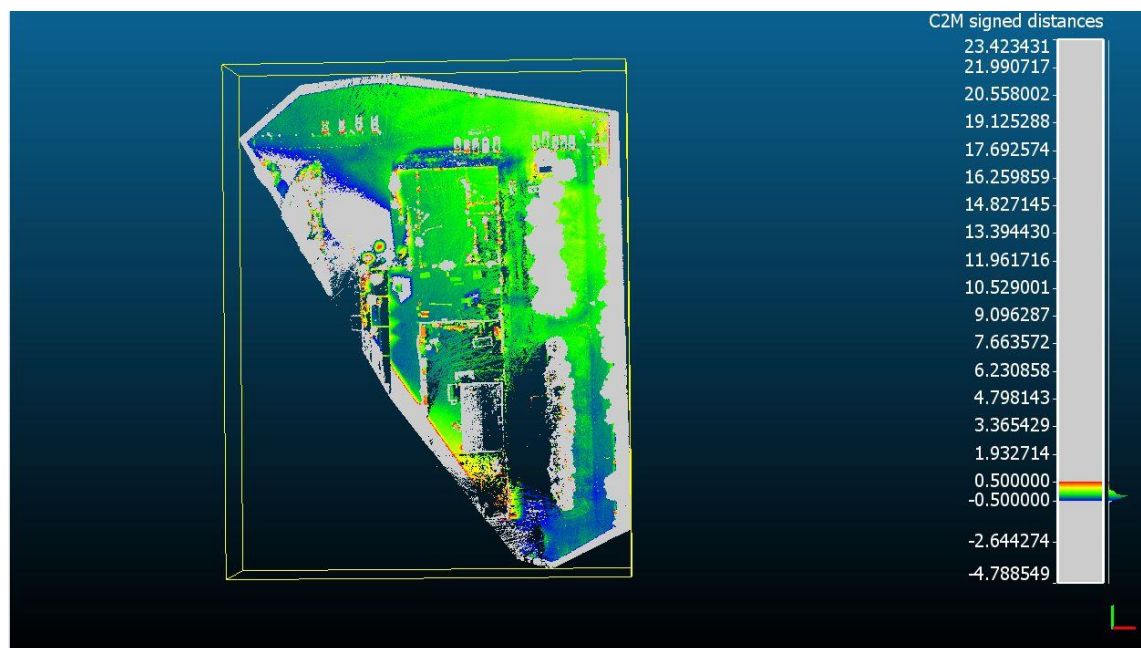
Kuvio 21. Alueet väreissä, jossa takymetri- ja keilausmittausten ero on välillä -2 m ... +2 m

Kuviossa 22 takymetrillä mitattu mittausalueen yli miinus ja alle metrin korkeuserot pistepilveen verrattuna näkyvät kuvassa väreissä. Väreissä oleva alue kattaa lähes koko alueen. Vain puusto ja betonialueella oleva rakennelma menevät yli annettujen rajojen.



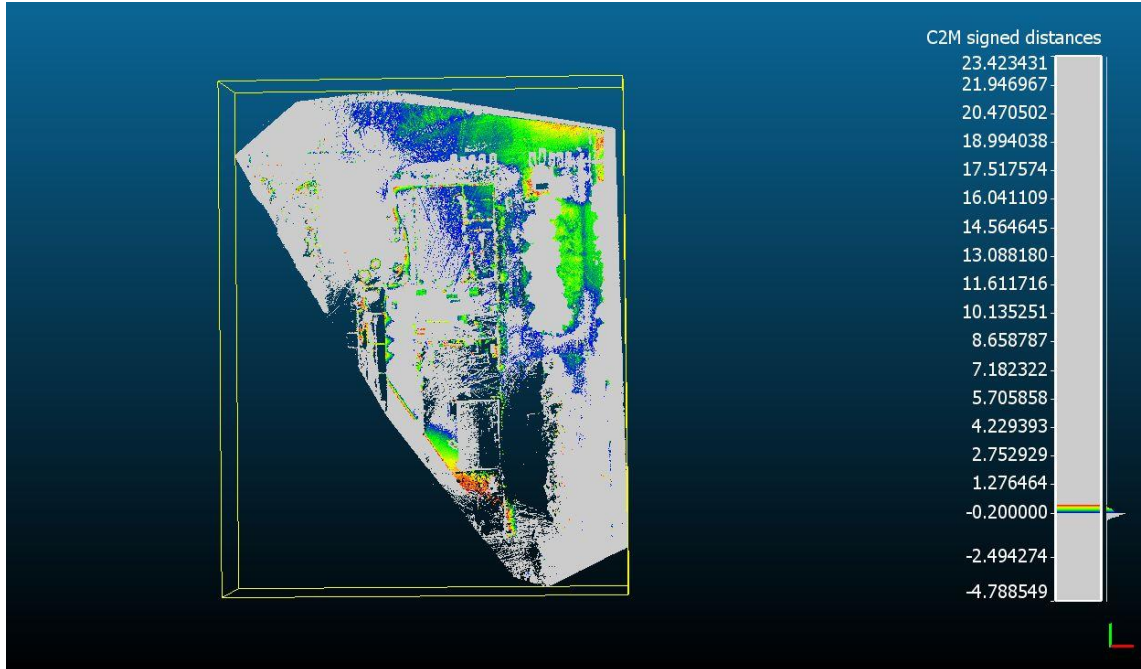
Kuvio 22. Alueet väreissä, jossa takymetri- ja keilausmittausten ero on välillä -1 m ... +1 m

Kuviossa 23 takymetrillä mitatut mittausalueen yli miinus puolen metrin ja alle puolen metrin korkeuserot pistepilveen verrattuna näkyvät kuvassa väreissä. Alueen ulkopuolelle jää puusto, autot ja rakennelma betonialueella. Suureksi osin mittausten väliset erot ovat -0,5 ja 0.5 metrin välillä.



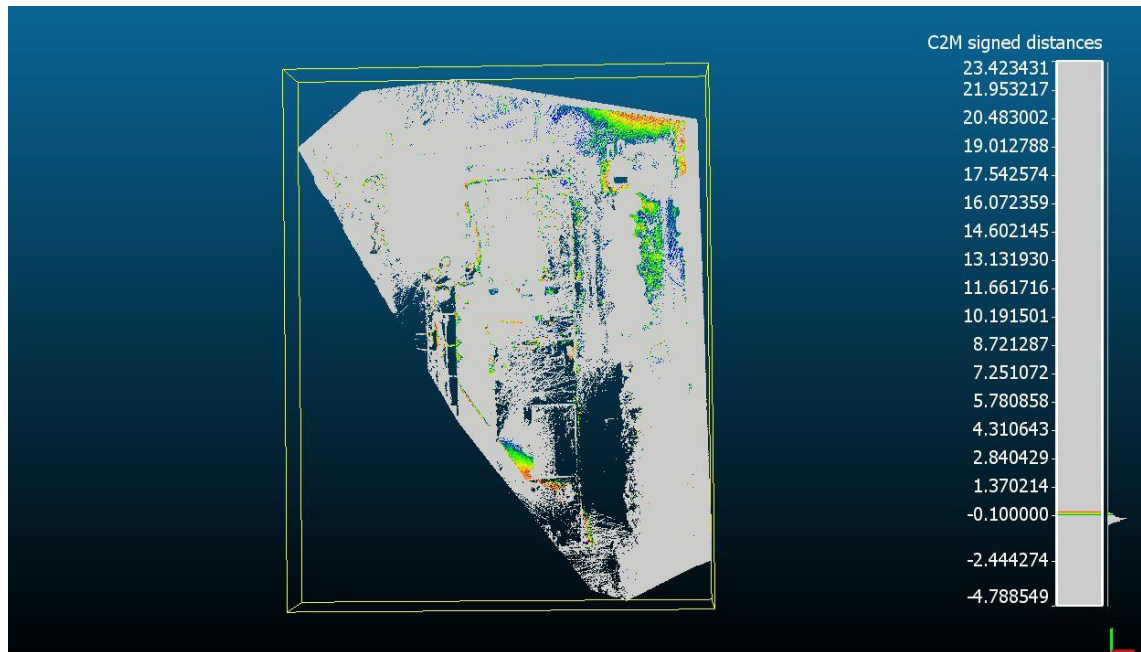
Kuvio 23. Alueet väreissä, jossa takymetri- ja keilausmittausten ero on välillä -0,5 m ... +0,5 m

Kuviossa 24 takymetrillä mitatun mittausalueen alle 20 sentin ja yli -20 sentin korkeuserot pistepilveen verrattuna näkyvät kuvassa väreissä. Rajat kattavan alueen koko on pienehkö.



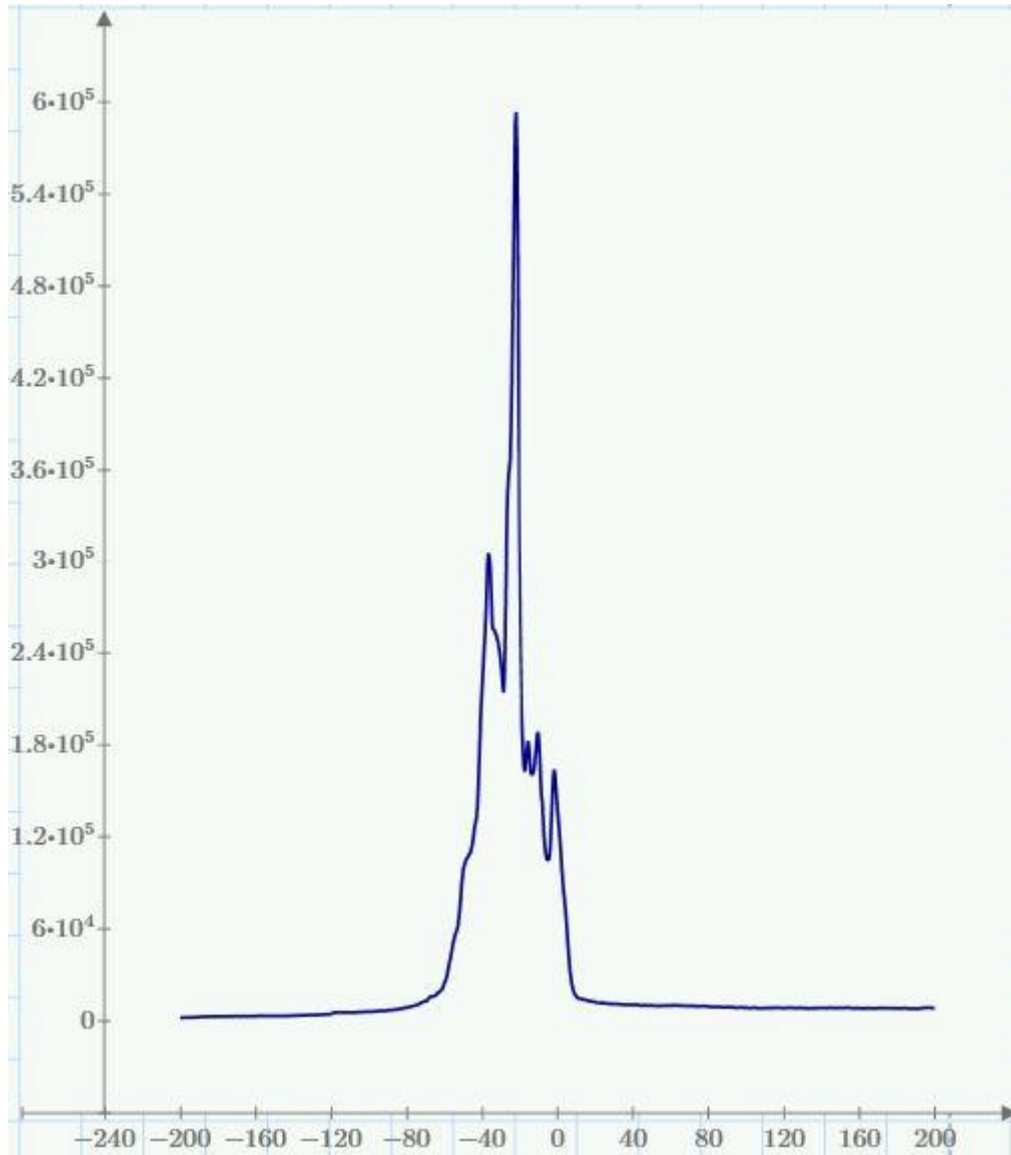
Kuvio 24. Alueet, jossa takymetri- ja keilausmittausten ero on välillä -0,2 m ... +0,2 m

Kuviossa 25 takymetrillä mitatun mittausalueen alle 10 sentin ja yli -10 sentin korkeuserot pistepilveen verrattuna näkyvät kuvassa väreissä. Rajat kattavan alueen koko on aika pieni.



Kuvio 25. Alueet, jossa takymetri- ja keilausmittausten ero on välillä -0,1 m ... +0,1 m

Kuviossa 26 on esitetty havaittujen erojen jakaumaa esittävää histogrammi. Nämä mittaukset on tehty mesh-verkon alueella. Histogrammiin on rajattu -2 metrin ja 2 metrin välinen alue. Taulukossa 1 on esitetty Histogrammin havaintojen jakautuminen eri korkeusetasuuksille. Eniten havaintoja on -20 cm kohdalla. Tarkkuudet on luokiteltu. Mittauksien tarkkuudet löytyvät taulukosta 1. Kuviossa 26 mittausalueena on käytetty mesh-verkon mittausaluetta. Siinä on mitattu ja esitetty takymetrillä mitattujen vaatuspisteiden ja pistepilven välistä korkeuspisteiden erotusta.

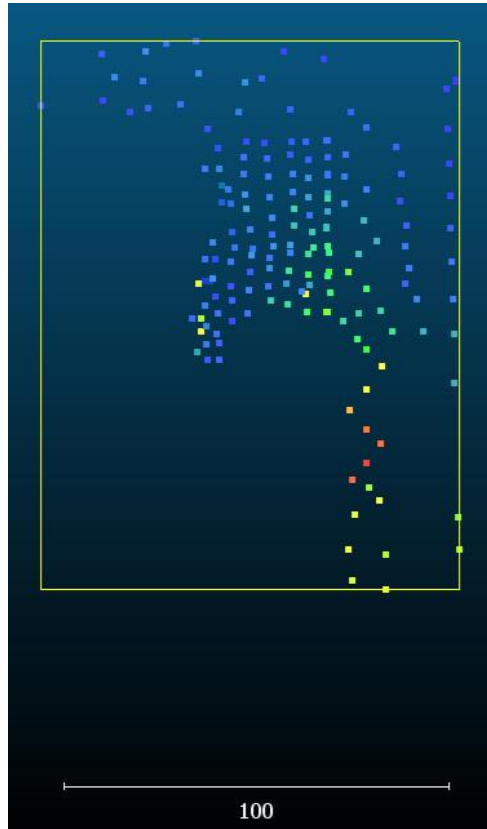


Kuvio 26. Mittaustulosten erojen jakaumaa eri etäisyyksille kuvaava histogrammi

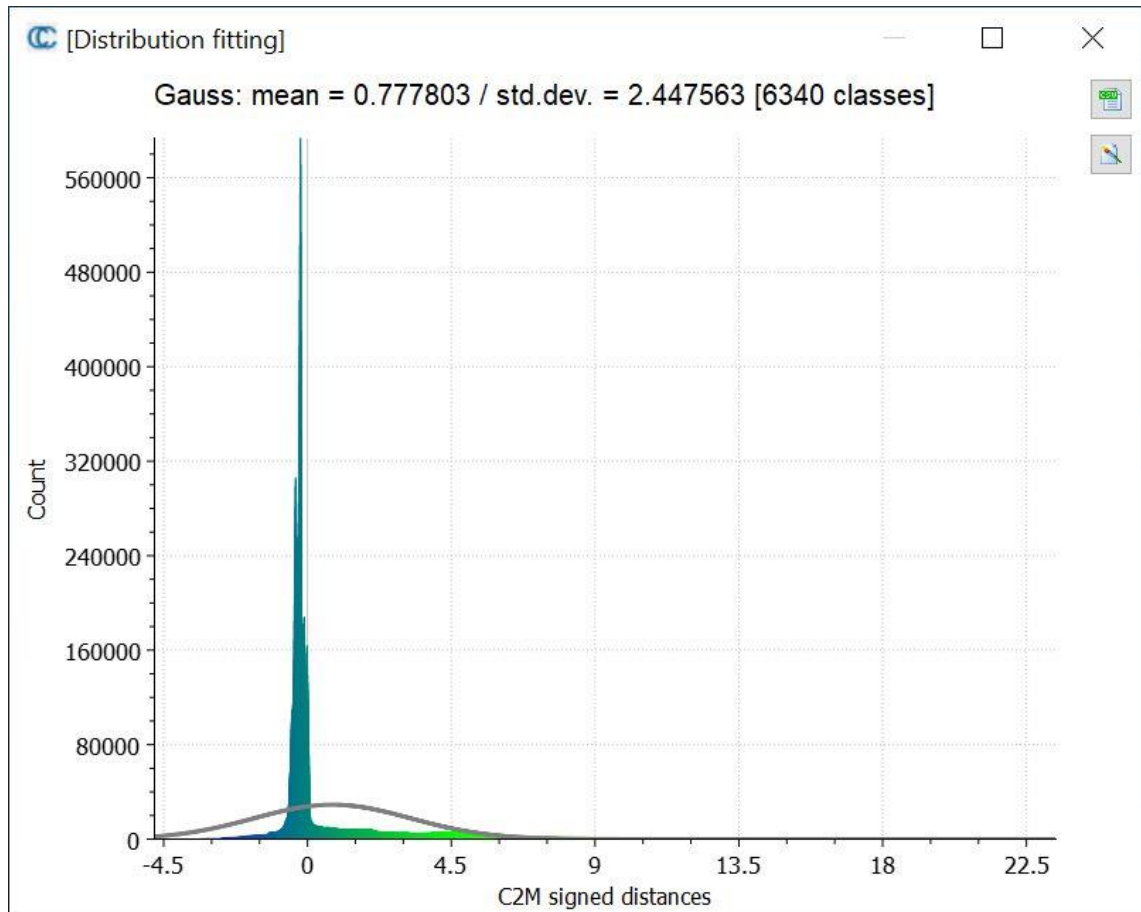
Taulukko 1. Havaintojen jakautuminen histogrammissa

Luokka	Osuus
<200 cm	1
-200 ... +200 cm	82
-100 ... +100 cm	76
-50 ... +50 cm	68
-20 ... +20 cm	22
-10 ... +10 cm	12
>200 cm	17

Tarkimpaan luokkaan (-0,1...+0,1) yltää 12 prosenttia mittauksista. Toiseksi tarkin luokka (-0,2...+0,2) kattaa 22 prosenttia. Kolmanneksi tarkin luokka (-0,5...+0,5) kattaa 68 prosenttia. Tämän jälkeiset tarkkuusluokkien epätarkkuudet ovat joko puustosta, autoista tai rakennelmasta betonialueella johtuvia.



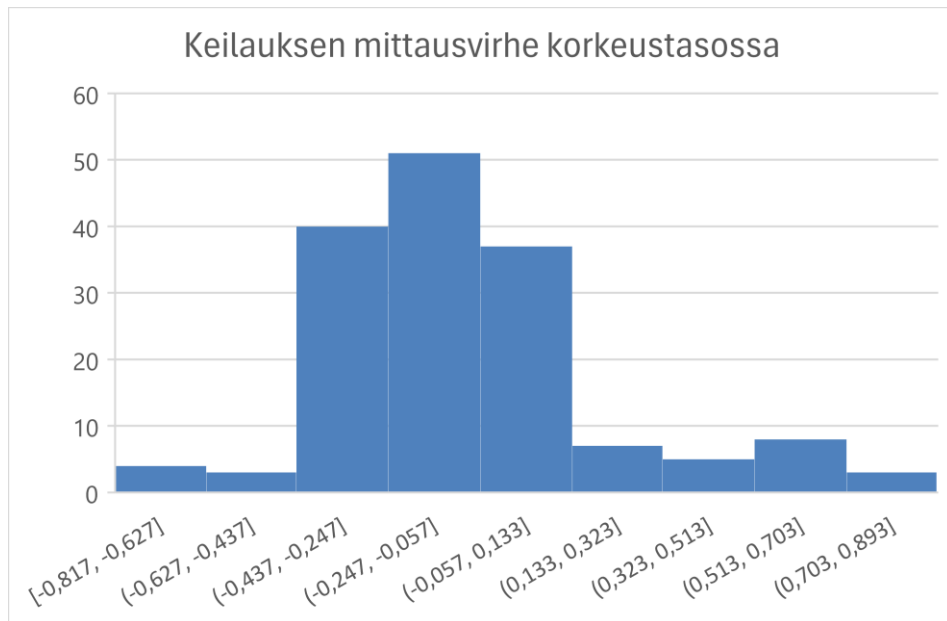
Kuvio 27. Kuvioista näkee, mistä 4 pistepilvestä korko on otettu, kun mitataan takymetrimittauksen ja pistepilven korkoeroja. Eniten vertailukorkoja löytyy ensimmäisestä pistepilvestä (sininen).



Kuvio 28. Mittaustapojen korkeuspisteiden erotus koko pilvessä. Terävä huippu osuu lähelle nollaa.

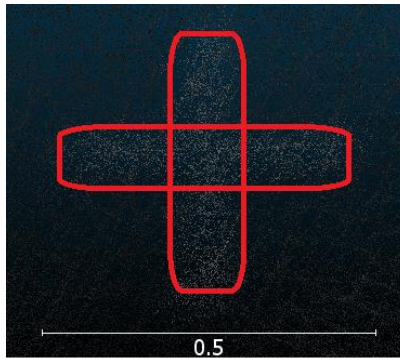
Takymetrimittauksen ja keilauksen välisten korkeuspisteiden välinen erotus näkyy hyvin histogrammissa (kuvio 28). Piikki osuu kohtaan -0,2 metriä. Yli metristä johtuvat tulokset johtuvat lähinnä puustosta.

Taulukko 2. Keilauksen vertailu takymetrimittaukseen nähden. Käytettyjä takymetrimittauksen pisteitä on 158 kappaletta. Suurin osa keilauksista osuu -0,437 ja 0,133 metrin väliin.

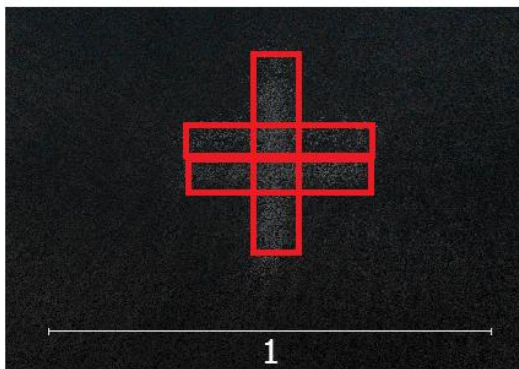


Laserkeilaus- ja takymetrimittauksia vertailtiin Excel-ohjelmassa. Excelissä verrattiin kummankin mittaustavan välillä olevia korkeuseroja mittauksissa. Pistepilvi on alemmalla tasolla kuin takymetrillä mitatut pisteet. Laserkeilauksen mittauspisteiden virheen suhteellinen virhe on 0,0954 metriä. Lasermittauspisteiden keskiarvon keskihajonta on 0,297 metriä.

Pistepilven tarkkuuden ja tiheyden mittaamiseen käytetään signaaliristin tarkastelua. Mitatun signaaliristin (Kuvio 27) leveydeksi mitattiin 37 senttimetriä. Signaaliristin kohdalla pistepilven pisteitä sijoittuu kymmenisen pistettä neliösentin sisään. Näin onnistuneella ja tarkalla mittaamisella päästään periaatteessa jopa muutaman millin tarkkuuteen. Tällöin laserkeilaus pitää olla huolellisesti tehtyä. Signaaliristien kohdalla voidaan tutkia myös pistepilven sisäistä tarkkuutta. Kun avaa kaksi eri pilviedostoa samaan istuntoon ja vertaa niitä signaaliristin kohdalla, niin eroa on lähes 10 senttiä (kuvio 28). Pistepilvitiedoston voi yhdistää, jolloin epätarkkuutta jää muutama sentti.



Kuvio 29. Signaaliristi pistepilvessä



Kuvio 30. Sama signaaliristi kahdesta eri pistepilvitiedostosta

Tulosten käsittelyssä Helmertin muunnos on mahdollinen virhelähde. Työssä havaittiin, että yhteisiä referenssipisteitä on syytä olla mahdollisimman monta – kolme on ehdoton minimi, jotta korkeustarkastelu olisi mahdollinen. Kahdella onnistuu vain kierto, siirto ja skaalaus.

Referenssipisteitä saisi olla monta tarkkuuden kannalta. Teräväreunaisissa alueissa tulee virhettä, koska kolmioverkko ei taivu pistepilven muodon mukaisesti. Virheen korjaamiseksi olisi mitata tällainen alue reunalta ja heti reunan alapuolelta.

Eniten ongelmia työssä aiheutti Helmertin muunnos. Helmertin muunnoksessa korkeuden oletetaan liikuttavan samassa tai ainakin samansuuntaisissa tasoissa. Esimerkiksi Laurilan esittämässä kaavoissa ei ole lainkaan korkeussuuntaista (Z) muunnosta. Helmertin muunnos tehtiin 3D-Win -ohjelmassa. 3D-Win -ohjelmalla X-, Y- ja Z-koordinaatit saadaan kohdalleen. Ongelmana oli Cloud Compare -ohjelman antama väärä tieto X- ja Y-akselin suhteen. Ne olivat toisin päin kuin

3D-Win -ohjelmassa. Myös vähäiset referenssipisteet aiheuttivat päänvaivaa. Helmertin muunnoksen antama keskiarvovirhe XY-tasossa tässä työssä oli 0,07 metriä. Se on näillä mittauskeinoilla odotetun mukainen. Z-tasossa keskiarvovirhe on 0,013 metriä. Se on pieni, koska korot sattuivat samaan pistepilvitiedostoon. Jos referenssipiste olisi sattunut toiseen pistepilvitiedostoon, olisi z-koordinaatin virhe ollut paljon suurempi. Mittakaavamuunnokseksi annettiin tasan yksi, koska mittakaava olisi muutenkin ollut aika lähellä tasan yhtä. Tämä kertoo, että mittakaavojen ero eri mittauksissa on erittäin pieni.

Satelliittimittauksen tarkkuuteen vaikuttaa avaruussään aiheuttamat häiriöt. Lisäksi mittaussignaalia voidaan väärentää vääristämällä signaalin pituutta. (Maanmittauslaitos 2022.) Tämä on rauhan aikana kuitenkin harvinaista. Satelliittimittauksen suhteellinen tarkkuus tässä työssä on muutama sentti. Mittauksen tarkkuutta voi parantaa tekemällä mittaukset huolellisesti.

Käsiskannerin epätarkka tai nopea liike voi aiheuttaa virheitä pistepilvessä. Voimakkaat heijastukset ja heijastavat pinnat voivat häiritä skannausprosessia ja aiheuttaa virheitä. Epäasianmukaisesti kalibroitu käsiskanneri voi tuottaa virheellisiä mittauksia. Myös huonot valaistusolosuhteet, sumu tai liian kaukaiset kohteet voivat vaikuttaa skannauksen laatuun. Skannauksesta saa tarkemman liikuttamalla skanneria tasaisesti ja rauhallisesti mittauksen aikana. Myös kiiltävien ja heijastavien pintojen kanssa saa olla huolella. (Vasara 2024, 20.) Käsilaserin kalibroinnin kanssa pitää olla huolellinen. Käsiskannaus kannattaa tehdä valoisassa ja hyvässä säässä. Tässä työssä lasermittauksen taso liikkui erinomaisesta huonoon. Tarkimmillaan mittauksen suhteellinen tarkkuus oli jopa muutaman millimetrin luokkaa.

Takymetrimittauksessa virheitä aiheuttavat heijastukset ja heijastavat pinnat. Myös liian suuri etäisyys mittakohteen ja takymetrin välillä voi vaikuttaa tarkkuuteen. Sääolosuhteista johtuva huono näkyvyys aiheuttaa epätarkkuutta. Suurin virheen aiheuttaja useasti on mittausasennon epätarkkuus tai liike mittauksen aikana. Myös väärin asetetut parametrit tai kalibrointi aiheuttavat virhettä. Mittausalustan epätasaisuus voi myös aiheuttaa virhettä. Takymetrimittauksen tarkkuus

paranee tekemällä mittaukset huolella. Tässä opinnäytetyössä eniten virhettä aiheutti lattakepin heilunta mittauksen aikana. Takymetrimittauksen suhteellinen tarkkuus on noin muutama senttimetri. ( Laine 2018, 16.)

Käsiskannerin mittauksissa päästään mittauksissa parista millimetristä reilun 20 senttimetrin tarkkuuteen. Mitä huolellisemmin mittaukset tehdään, sitä tarkempi lopputulos saadaan. GeoSLAM ZEB-Horizon käsiskanneri soveltuu hyvin sisä-että ulkomittauksiin tarkkuutensa ja nopeutensa puolesta.

## LÄHTEET

3D-Win 2023. Käyttöohjeet. Viitattu 23.10.2023 Ladattavat tiedostot – 3dwin (3dwin.fi).

Cloud Compare 2020. User manual v.2.6.1. Viitattu 7.6.2020 <http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>.

Dimense 2023. RTKNET-verkkopalvelu. Viitattu 2.11.2023 [bit.ly/3VnOTnP](http://bit.ly/3VnOTnP).

GeoSLAM 2023a. ZEB Horizon. Viitattu 23.02.2023 <https://geoslam.com/solutions/zeb-horizon/>.

–2023b. Zeb Horizon User's Manual. Viitattu 2.11.2023 <https://geoslam.com/wp-content/uploads/2021/02/ZEB-Horizon-User-Manual-v1.3.pdf>.

Geotrim 2024. Trimnet VRS-palvelu. Viitattu 26.3.2024 [https://geotrim.fi/palvelut/trimnet-vrs/?gad\\_source=1&gclid=EAlalQobChMljr3q-42ShQMvX1KRBR08OwnNEAAYAiAAEgLWSPD\\_BwE](https://geotrim.fi/palvelut/trimnet-vrs/?gad_source=1&gclid=EAlalQobChMljr3q-42ShQMvX1KRBR08OwnNEAAYAiAAEgLWSPD_BwE).

Joala, V. 2006. Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu. Viitattu 23.2.2023 <http://docplayer.fi/7209674-Laserkeilauksen-perusteita-ja-mittauksen-suunnittelu.html>.

Keuda 2024. Suureet ja mittaaminen. Viitattu 30.4.2024 [https://pinja.keuda.fi/pluginfile.php/683596/mod\\_resource/content/4/Suureet%20ja%20mittaaminen.pdf](https://pinja.keuda.fi/pluginfile.php/683596/mod_resource/content/4/Suureet%20ja%20mittaaminen.pdf).

Laine, A. 2018. Seurantamittaukset takymetri- ja tarkkavaaituskalustolla. Vantaa: Metropolia ammattikorkeakoulu.

Lanu, N. 2023. Mobiililaserkeilauksen tuottaminen ja hyödyntäminen kuntateknisessä suunnittelussa. Rovaniemi: Lapin ammattikorkeakoulu.

Laurila, P. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemi: Rovaniemen ammattikorkeakoulu.

Leica-geosystems 2023. Leica TS16: Robotic Total Station. Viitattu 23.10.2023 <https://leica-geosystems.com/fi-fi/products/total-stations/robotic-total-stations/leica-ts16>.

Maanmittauslaitos 2011. Määräys mittausten tarkkuudesta ja rajamerkeistä kiinteistötoimituksissa. Viitattu 21.4.2021 [https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/old/Maaraays\\_mittaus\\_rajamerkit\\_21\\_4\\_2011.pdf](https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/old/Maaraays_mittaus_rajamerkit_21_4_2011.pdf).

Maanmittauslaitos 2022. Häiriöitä satelliittipaikannuksessa? Yleisimmät syyt GNSS-häiriöihin. Viitattu 24.4.2024 <https://www.maanmittauslaitos.fi/ajankoh-taista/hairioita-satelliittipaikannuksessa-yleisimmat-syyt-gnss-hairioihin>.

Maanmittauslaitos 2023. Kansalaisen karttapaikka. Viitattu 1.11.2023 <https://asiointi.maanmittauslaitos.fi/karttapaikka/>.

Terttula, J. 2019. 3D-mallin tuottaminen fotogrammetriaa hyödyntäen. Riihimäki: Hämeen Ammattikorkeakoulu.

Vasara, J. 2024. Laserkeilauksen mittatarkkuus ja siihen vaikuttavat tekijät. Varkaus: Savonia-Ammattikorkeakoulu.

## LIITTEET

Helmert muunnos 3D-Win -ohjelmalla

Pisteitä

3

Keskivirhe

xy 0.034230

z 0.217231

Kertoimet

A 0.1895652709

B -0.9818681215

Painopiste

471228.434, 7230980.209

Siirtoparametrit

-20.769, -35.563, -12.020

Mittakaava

1.00000000

Kiertokulma

-87.85842778

Käytetyt pisteet ja jäännösvirheet

pno	X	Y	Z	dX	dY	dXY	dZ
-9.505	-42.563	-1.204	-0.009	0.006	0.011	-0.133	
9.981	0.147	-1.296	-0.020	-0.025	0.032	-0.117	
-62.783	-64.274	-1.585	0.029	0.019	0.035	0.251	