

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

LASERKEILAUKSEN MITTATARKKUUS JA SIIHEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

TEKIJÄ Joel Vasara

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Joel Vasara			
Työn nimi Laserkeilauksen mittatarkkuus ja siihen vaikuttavat tekijät			
Päiväys	29.2.2024	Sivumäärä/Liitteet	85/7
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) AFRY Finland Oy			
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia laserskannauksen mittatarkkuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Teoreettinen tutkimus keskittyi lasersäteen käyttäytymiseen, ulkoisiin tekijöihin ja laitteiston tekniseen tarkkuuteen.</p> <p>Tietoja ja aineistoja kerättiin tieteellisistä julkaisuista, tietokirjoista ja internetistä. Koottuja tietoja analysoitiin ja kuvailtiin arvioiden niiden yhteyttä kokonaisvaltaiseen tarkkuuteen verrattuna laitetarkkuuteen. Opinnäytetyötä varten toteutettiin testimittaus Leica RTC360 laserskannerilla, Leica Icon iCR70 takymetrilla sekä Leica iCON GPS 70 vastaanottimella Länsi-Savon kiinteistön ympäristössä Mikkelissä. Testimittaus datasta tehtiin rekisteröintiohjelmalla vertailua eri rekisteröintitapojen suhteen ja tutkittiin mistä virhe syntyy.</p> <p>Testimittauksesta muodostui onnistunut esimerkki virheiden synnystä, niiden vaikutuksesta rekisteröintiin sekä pistepilven tarkkuuteen. Rekisteröintiohjelma teki virheitä, takymetrimittauksessa tapahtui inhimillisiä virheitä sekä skannausdata sisälsi virheitä aiheuttavia pisteitä. Opinnäytetyön havaintojen perusteella huomattiin, ettei mittavirheen syntymisellä ole selkeää kaavaa laitteiston osalta. Pistepilven mittavirhe syntyi useasta eri syystä ja koostui karkeista virheistä, systemaattisista virheistä sekä satunnaisista virheistä. Suurin syy pistepilvien virheellisyteen oli rekisteröinnissä syntyvät virheet.</p>			
Avainsanat 3D-skannaus, pistepilvi, laserskannaus, pistepilven käsittely			

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering	
Author Joel Vasara	
Title of Thesis Accuracy of Laser Scanning and the Factors Affecting It	
Date 29 February 2024	Pages/Appendices 85/7
Client Organisation /Partners AFRY Finland Oy	
<p>Abstract</p> <p>The purpose of the thesis was to investigate the accuracy of laser scanning and the factors affecting it. The thesis was commissioned by AFRY Finland. The theoretical research focused on the behavior of the laser beam, external factors, and the technical accuracy of the equipment.</p> <p>Information and data were collected from scientific publications, textbooks, and the internet. The collected data was analyzed and described, assessing their relation to overall accuracy compared to instrument accuracy. For the thesis, a test measurement was conducted using the Leica RTC360 laser scanner, Leica Icon iCR70 total station, and Leica iCON GPS 70 receiver in the surroundings of Länsi-Savo property in Mikkeli. The test measurement data was processed using registration software to compare different registration methods and investigate the source of errors.</p> <p>The test measurement provided a successful example of error generation, its impact on registration, and the accuracy of point clouds. The registration software made errors, human errors occurred in the total station measurements, and the scan data contained points causing errors. Based on the observations of the thesis, it was noticed that there is no clear formula for the occurrence of measurement errors in terms of equipment. The error in the point cloud arose from several different reasons and consisted of gross errors, systematic errors, and random errors. The main reason for the inaccuracies in the point clouds was errors in registration.</p>	
<p>Keywords</p> <p>3D-scanning, point cloud, laser scanning, point cloud processing</p>	

ESIPUHE

Haluan ensimmäisenä kiittää vaimoani siitä, että hän mahdollisti tämän loppuun kirjoittamisen kahden alle kaksivuotiaan lapsiarjen keskellä. Suuret kiitokset toimeksiantajalle, Länsi-Savolle, kun saimme käyttää heidän kiinteistönsä ja sen ympäristöä testimittauksissa. Sekä monille kollegoille asiallisista vastauksista kaikkiin esittämiini kysymyksiin. Sekä erityisesti opinnäytetyön toimeksiantajan ohjaajalle Janne Komulaiselle.

Varkaudessa 29.2.2024

Joel Vasara

SISÄLTÖ

SANASTO JA KÄYTETYT LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	8
1.1 Aiempi tutkimus aiheeseen liittyen	9
2 LASERSKANNAUS	10
2.1 Laserskanlaus yleisesti	10
2.2 Laserskanneri tyypit.....	11
3 OPINNÄYTETYÖSSÄ KÄYTETTÄVÄT LAITTEET SEKÄ OHJELMAT	14
3.1 Leica RTC360 laserskanneri	14
3.2 Leica iCON iCR70	14
3.3 Leica iCON GPS 70 vastaanotin	14
3.4 Leica MRP 122 360° Prisma	15
3.5 Leica Cyclone REGISTER 360	15
3.6 Leica Cyclone FIELD 360	15
4 PISTEPILVIEN REKISTERÖINTI PROSESSI	16
4.1 Rekisteröinnin periaatteet.....	16
4.2 Rekisteröinnin algoritmit	17
4.2.1 Interactive Closest Point (ICP)	17
4.2.2 RANSAC-algoritmi.....	17
4.3 Tähyksien tunnistus.....	18
5 MITTAUSTULOKSEEN VAIKUTTAVAT VIRHEET.....	20
5.1 Inhimillinen virhe	22
5.2 Ympäristön ilmasto olosuhteet	22
5.3 Lasersäteen käyttäytyminen	24
5.3.1 Lasersäteen hajoaminen.....	24
5.3.2 Lasersäteen leviäminen.....	25
5.3.3 Aikakävely	25
5.3.4 Kohteen pinnan aiheuttamat virheet	26
5.4 Ohjelmalliset virheet.....	29
5.4.1 Cloud to Cloud	29
5.5 Laserskannerin mittavirhe	30

5.6	Takymetrin mittavirhe.....	31
5.7	Prisma- & tarra tähyksien mittavirhe.....	32
6	TESTIMITTAUS JA SEN MERKITYS TEORIAN KANNALTA.....	33
6.1	Teorian vaikutuksien tutkiminen testimittauksessa	35
7	MITTAUSTULOKSET.....	37
7.1	Takymetrimittaukset.....	37
7.2	Automaattinen rekisteröinti	37
7.3	Manuaalinen rekisteröinti	40
8	TULOSTEN ANALYSOINTI.....	44
8.1	Rekisteröinnin virheiden synty	44
8.2	Takymetrilla luotu kontrolliohjaus.....	44
8.3	Cloud to Cloud rekisteröinti	47
8.4	Georeferoitujen pistepilvien koordinaatti arvojen vertailu	49
8.5	Manuaalisesti rekisteröidyn pistepilven koordinaatti arvojen vertailu	50
9	VERTAILU KOHTEITA.....	51
9.1	Vertailukohde A.....	51
9.2	Vertailukohde B.....	53
10	POHDINTA.....	54
	LÄHTEET	57
	LIITE 1: AUTOMAATTISEN REKISTERÖINNIN REKISTERÖINTIRAPORTTI.....	62
	LIITE 2: MANUAALISEN REKISTERÖINNIN REKISTERÖINTIRAPORTTI.....	66
	LIITE 3: TAKYMETRIN MITTAPISTEET.....	71
	LIITE 4: TAKYMETRIN ASEMOINTIRAPORTTI	73
	LIITE 5: KOORDINAATTIEN ERO TAULUKKO, KONTROLLIOHJATTU MANUAALINEN REKISTERÖINTI	83
	LIITE 6: KOORDINAATTIEN ERO TAULUKKO, KONTROLLIOHJATTU AUTOMAATTINEN REKISTERÖINTI	84
	LIITE 7: KOORDINAATTIEN ERO TAULUKKO, MANUAALINEN REKISTERÖINTI ILMAN KONTROLLIOHJAUSTA.....	85

Sanasto ja käytetyt lyhenteet

LiDAR	Light detection and ranging eli valotutka
RGB	Punaisen, vihreän sekä sinisen värien muodostama värimalli
Cloud to Cloud	Koneoppimispohjainen tai käsin visuaalisesti tehty rekisteröinti
Laserskannaus	Lasermittaukseen perustuva mittaustapa
Pistepilvi	Joukko skannauksia (pisteitä) kolmiulotteisessa avaruudessa, joilla on x-, y- ja z koordinaatit
Skannaus	Yksittäinen pistepilvi, joka on tuotettu laserskannerilla
Reality Capture Model	Yleismuotoinen nimike katselumallille, jossa on panoraama kuvat sekä mahdollisesti BIM malli
Globaali koordinaatisto	Yleisnimike Pistepilvien määrätulle koordinaatistolle, joka vastaa valtakunnallista koordinaattijärjestelmää
Kelluva koordinaatisto	Yleisnimike Pistepilven koordinaatistolle, jonka koordinaatit eivät vastaa suoraan valtakunnallista koordinaattijärjestelmää
Tunnettu piste	Tarkasti mitattu ja dokumentoitu piste, jolla on koordinaattitieto valtakunnallisessa mittausjärjestelmässä
Tähys	Yleisnimike tunnistettavalle mustavalko kuviolle tai pallolle
Aika diskriminaattori	Ajan muutosten tunnistaja ja mittaaja
Prisma	Takymetrimittauksessa käytettävä optinen laite, joka heijastaa mittauspulssin takaisin
Kontrolliohjaus	Takymetrillä mitattu erinäinen määrä tähyksiä teksti tiedostona, joka muodostaa kontrollitiedoston
RMS	Root mean square, neliöllinen keskiarvo
ppm	Parts per million. Suhdeluku, joka ilmaisee virheen arvioidun matkan miljoonasosina. Esimerkiksi 1 ppm kilometrin matkalla vastaa 1 millimetriä

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön lähtökohtana oli laserskannauksen mittavirheen tutkiminen. Teoreettinen tutkimus keskittyi lasersäteen käyttäytymiseen, ulkosiin tekijöihin ja laitteiston tekniseen tarkkuuteen. Tietoja ja aineistoja kerättiin tieteellisistä julkaisuista, tietokirjoista ja internetistä. Koottuja tietoja analysoitiin ja kuvailtiin arvioiden niiden yhteyttä kokonaisvaltaiseen tarkkuuteen verrattuna laite-tarkkuuteen. Valitut menetelmät perustuivat niiden käyttöön toimeksiantajan yrityksessä ja niitä käytetään yleisesti Leican laitteistolla. Opinnäytetyötä varten toteutettiin testimittaus Länsi-Savon kiinteistön ympäristössä Mikkelissä. Testimittaus datasta tehtiin rekisteröintiohjelmalla vertailua eri rekisteröintitapojen suhteen ja tutkittiin mikä tai mistä virhe syntyy.

Opinnäytetyön toimeksiantajana oli AFRY Finland Oy. AFRY on perustettu vuonna 2019 jolloin Ruotsalainen ÅF ja Suomalainen Pöyry yhdistyi. AFRY on yksi Skandinavian suurimmista konsultointi- ja suunnitteluyrityksistä, jossa työskentelee tällä hetkellä yli 19 000 henkilöä.

Opinnäytetyön tutkimuksen hypoteesi on, että cloud to cloud rekisteröinti aiheuttaa joko rakennuksen taipumista sivu suunnassa (X, Y akseleilla) tai maanpinnan kohoamista (Z arvon heittoa) tai näitä molempia. Ongelma esiintyy eritoten ulkotiloissa tai niin isoissa sisätiloissa, joissa skannerin mittausmatka ei yllä joka seinälle, esimerkiksi jos halli olisi 300 metriä pitkä, skannaus ei yllä molempiin suuntiin vaan vähintään toinen pääty jää pois skannauksesta, jolloin tämä ei voi auttaa algoritmia tai rekisteröijää varmistumaan rekisteröinnin onnistumisesta. Ulkotiloissa skannatessa ei yleensä löydy sellaista kohtaa, jossa tallainen "neliön sulkku" onnistuisi eli jossa skanneria ympäröisi seinät ja katto.

1.1 Aiempi tutkimus aiheeseen liittyen

Laserskannauksen tarkkuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä on tutkittu yksittäisinä osioina paljonkin, mutta lopullisen rekisteröinnin mittatarkkuuden tarkastelun tutkimus on ollut vähäisempää. Osaa tutkimuksista voidaan pitää vanhentuneena koska tekniikka etenee vuosittain, ellei jopa kuukausittain harppauksin eteenpäin.

Suomalaisista opinnäytetöistä tarkkuutta on tutkineet muun muassa Laserkeilaus Liperin Meijerirakennuksen 3D-mallinnuksessa ja laserkeilauksen mittatarkkuus (Väänänen & Lindroos, 2021) , Maa-laserkeilaimen pistepilvien georeferoinnin vertailu (Koski, 2012). Väänänen & Lindroos tutkimus keskittyi vertaamaan mittoja suoraan pistepilvestä, jotka otettiin, revit ohjelmalla ja niitä verrattiin rulla mitalla, lasermitalla sekä kenttämitalla tehtyihin mittauksiin. Tällaisella tekniikalla ei päästä mittauksessa samaan pisteeseen vaan valitut mittapistet ovat satunnaisia, joka voi aiheuttaa suurtakin virhettä sekä, vertailukohteena oli yksittäisen skannauksen tarkkuus. Työssä ei otettu huomioon rekisteröinnin aiheuttamaa virhettä. Kosken työssä käytetyt ohjelmat sekä laitteet ovat vanhentuneita eikä niiden tarkkuus yllä samaan tasoon mitä nykyajan laitteisto tarjoaa, sekä ohjelmat ovat kehittyneet Cyclone 7.2 versiosta.

2 LASERSKANNAUS

2.1 Laserskannaus yleisesti

Laserskannerit ovat kuin kameroita. Kuten kameroilla, niillä on kartiomaiset katselukulmat ja ne pystyvät keräämään tietoa ainoastaan näkyvistä pinnoista. Siinä missä kamera kerää väritietoa kuvan pinnasta, laserskanneri kerää etäisyystietoa pinnasta. Näin laserskannerin "kuva" esittää etäisyyttä pintaan jokaisessa pisteessä. Tämä mahdollistaa jokaisen pisteen kolmiulotteisen sijainnin tunnistamisen kuvassa. (Ebrahim, 2014, s. 4) Nykyaikaisella laserskannerilla tuotettu skannaus muistuttaa erehdyttävästi valokuvaa, johtuen suuresta pistetiheydestä, jotka on väritetty RGB värimallilla kuten kuvassa 1. RGB värimallissa väri jaetaan kolmeen sävyyn: punaiseen, vihreään ja siniseen. Kaikki muut värit luodaan näiden kolmen värin yhdistelmällä väriteorian mukaan. (Stone, 2003, s. 43-44)



KUVA 1. Onko kuva valokuvasta vai pistepilvestä? Kuva on pistepilvestä. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Laserskanneri kerää kolmiulotteista tietoa kohteesta. Etäisyyden mittaus tapahtuu lähettämällä laserpulsssi kohteeseen ja mittaamalla sen matka-aika laitteesta takaisin. Mittalaite käyttää valon kulkuaikaa, vaihe-eroja tai kolmiomittausta riippuen laitteesta. (Joala, 2006) Tyypillinen pulsilaseretäisyydsmittaus lähettää lyhyen pulssin, joka jaetaan kahteen osaan. Toinen osa, eli aloituspulsssi, lähetetään vastaanottiin käynnistäen aikamittausyksikön, kun taas toinen osa lähetetään kohteeseen. Kun laserpulsssi saavuttaa skannattavan kohteen pinnan, se sirpaloituu, ja osa siitä heijastuu takaisin laserskanneriin. Pulssein säteilevä teho muunnetaan sähkövirraksi, joka vahvistetaan vastaanottimessa ja lähetetään aikadiskriminaattoriin. Aikadiskriminaattori suorittaa ajoituksen (rekisteröi paluupulssin) ja pysäyttää aikamittausyksikön. Aikaväli aloituspulssein lähetysten ja paluupulssin vastaanoton välillä mitataan, jolloin saadaan pulssin kulkema aika määritettyä. Tästä voidaan laskea ja määrittää lasersäteiden kulkema matka. (Reshetyuk, 2009, s. 13-14)

Laserskannauksen päämääränä on muodostaa pistepilvi (yksittäinen skannaus), joka kuvaa mitattavan alueen ympäristöä kolmiulotteisesti lasersäteiden avulla. Pistepilvi sekä yksittäinen skannaus voi

sisältää valtavan määrän pisteitä, joista jokaisella on x-, y- ja z-koordinaatit. (Koski, 2001, s. 25) Pistepilvestä mitatusta pisteestä voidaan käyttää mittapiste termiä, jota käytetään tästä eteenpäin opinnäytetyössä, kun pistepilvestä tai skannauksesta otetaan mittoja.

Skanneri tallentaa säteen paluuvoimakkuuden eli intensiteettiarvon, joka riippuu mitattavan kohteen etäisyydestä, heijastavan pinnan materiaalista, heijastuskulmasta ja muodosta. Haastavia kohteita skannauksessa ovat pyöreän muotoiset ja heijastavat pinnat, esimerkiksi ruostumattomasta teräksestä valmistetut komponentit. Intensiteettiarvoa käytetään sävyerojen luomiseen, jotka helpottavat kohteen muotojen hahmottamista. Kohde skannataan yleensä useasta eri suunnasta, jotta katvealueet voidaan välttää. Katvealueita esiintyy, kun lasersäde ei osu kohteeseen, johtuen tulokulmasta tai esteistä kohteen ja skannerin välillä. (Joala, 2006, s. 3)

2.2 Laserskanneri tyypit

Laserskannereita on erilaisia eri mittaustarkoituksiin. Laitteen valintaan vaikuttaa mitattava kohde, haluttu lopputulos sekä aikataulu.

- Kaukokartoitus-laserskannerit
Operoidaan lentokoneella tai helikopterilla, mittausetäisyys on 0,1–100 km, mittatarkkuus alle 10 cm, tarkkuus riippuu lentokorkeudesta. (Shan & Toth, 2018, s. 107) (Cronvall;Kråknäs;& Turkka, 2012, s. 12)
- Teollisuuslaserskannerit
Käytetään laadunvarmistuksessa ja tarkkuutta vaativien komponenttien mittauksessa. Mittatarkkuus alle millin luokkaa. Mittausetäisyys käsiskannerilla rajoittuu alle 10 metriin (Creaform, 2023), laserseuraimella (laser tracker) mittausetäisyys on jopa 160 metriä. (Hexagon, 2023)
- Mobiili laserskannerit
Ajoneuvon asennettu laserskannauslaitteisto on tarkempi kuin ilmasta tehtävä skannaus, maanpinnan ja skannerin etäisyys on huomattavasti pienempi. Mittausetäisyys riippuu laitteistosta, 0,3 metristä 490 metriin. Mittatarkkuus riippuu laitteistosta, satelliittipaikannuksesta (GNSS) sekä GNSS signaalin korjauspalvelusta. Leica Pegasus TRK laitteiden georeferoidun mittapisteen tarkkuus on 15 mm luokkaa. Leica Pegasus TRK EVO laserskannerin tarkkuus on 1 millimetriä. (Leica Geosystems, 2022)
- terrestriaaliset laserskannerit (maalaserskannerit)
Kolmijalalle asetettava mittalaite, jonka mittausetäisyys on 0,5 metristä 6000 metriin. Tyypillisesti mittausetäisyys on kuitenkin 0,5 m – 130 m. Mittatarkkuus on tyypillisesti alle 1 cm. (Riegl, 2020)

- Käsiskannerit

Nämä ovat eri laitteita kuin käsin kannettavat teollisuusskannerit. Mittausetäisyys 0,4 metristä 100 metriin. Käsiskannereiden mittatarkkuus riippuu laitteesta, mutta kuitenkin alle 20 millimetriä. (FARO, 2021) (Geoslam, 2019)

Käsiskannereihin voitaisiin löyhästi ajateltuna lukea myös Apple iPhone 12 mallisarjasta ylöspäin, joissa on LiDAR. Tämän tarkkuus tosin ei yllä 20 mm luokkaan eikä mittausetäisyys ole kuin muutamia metrejä. (Luetzenburg;Kroon;& Bjørk, 2021)

Applen tarkoitus hyödyntää LiDAR:ia liittyy enemmänkin valokuvien ja videoiden laadun parantamiseen hämärässä sekä muotokuvia ottaessa. (Apple, 2020) (Stein, 2022) Tämän vuoksi Applen laitteita ei voi suoranaisesti laskea käsiskanneriksi.

- Robotti skannerit (Autonomous scanners)

Uusimpana tekniikkana laserskannaus voidaan toteuttaa automaattisena robotin avulla. Esimerkiksi työmaan edistymää voidaan seurata päivittäin, kun robotti skannaa työmaan yön aikana ja tulokset ovat saatavilla heti aamusta. Tämä ei vielä toimi "push and play" tapaan vaan vaatii robotin opettamista. Robotin opettamisen tarve vähenee koko ajan, voi olla, että julkaisu hetkellä jonkun valmistajan algoritmi kykenee operoimaan robottiskanneria täysin autonomisesti. Mittausetäisyys tai mittatarkkuus riippuu skannerista, suurin ero on vain siinä mikä mittalaitetta siirtää. Esimerkiksi Boston Dynamicsin robottiin voidaan asentaa Leica RTC360 tai Leica BLK ARC skanneri, kuten kuvassa 2 esimerkki Leica BLK ARC skannerin asennuksesta. (Leica Geosystems)



KUVA 2. Esimerkki robotti skannerista. Robotti on Boston Dynamicsin tekemä, johon on liitetty Leica ARC skanneri. Algoritmi saa kokoonpanon toimimaan yhdessä, jolloin robotti skannaa ennalta määritetyn reitin. (Leica Geosystems)

- Drone skannerit

Yleensä dronet mielletään enemmän fotogrammetriseen mallintamiseen, joka pohjautuu tietokone-laskentaan valokuvista. (Terttula, 2019) Leica Geosystems:iltä löytyy lentävä laserskanneri, joka on tiettävästi ainut, mikä kykenee skannaamaan myös ylöspäin, skannausalue on havainnollistettu kuvassa 3. Leica BLK2FLY mittausetäisyys on 25 metriä sekä suhteellinen tarkkuus on <20 millimetriä. (Leica Geosystems, 2021) Droneihin on saatavilla usealta valmistajalta LiDAR skanneri lisävarusteena, mutta näihin ei tässä opinnäytetyössä perehdytä työn rajaamiseksi.



KUVA 3. Havainnollistava kuva Leica BLK2FLY skannaussektorista. (Leica BLKFLY, 2023)

3 OPINNÄYTETYÖSSÄ KÄYTETTÄVÄT LAITTEET SEKÄ OHJELMAT

Laserskannaus ohjelmistot ovat tyypillisesti valmistajakohtaisia, jolloin yleensä alkuperäisdataa ei kolmannen osapuolen ohjelmilla saa avattua. Opinnäytetyössä käytettiin Leica Geosystems:in laitteita sekä ohjelmia, tästä syystä opinnäytetyö rajataan käytettyyn laitteistoon sekä ohjelmiin.

3.1 Leica RTC360 laserskanneri

Hexagonin omistama Leica Geosystems julkaisi RTC360 laserskannerin vuonna 2017. Leica RTC360 skannerin kanssa julkaistiin FIELD 360 esirekisteröinti ohjelma mobiililaitteille. Esirekisteröinti nopeuttaa varsinaista rekisteröintiprosessia, kun skannaukset ovat jo suunnilleen keskenään kohdallaan. (Leica Geosystems, 2018)

Leica RTC360 skannerin 3D tarkkuus on 1,9 mm 10 metrin päässä, skannausnopeus on jopa 2 000 000 pistettä sekunnissa. Skannerin kulmatarkkuus on 18" (arkkisekuntia), etäisyyden mittatarkkuus on 1,0 mm + 10 ppm. (Leica Geosystems, 2018) ppm on suhdeluku, joka ilmaisee virheen arvioidun matkan miljoonasosina. Esimerkiksi 1 ppm kilometrin matkalla vastaa 1 millimetriä. (Laurila, 2012, s. 225) 18 arkkisekuntia on pyöristettynä 0,005 astetta. Leica RTC360 skannerin maksimi mittausmatka on 130 metriä, 3D tarkkuus 50 metrissä on 6,4 mm ja miltei kantaman loppupäässä, 100 metrin kohdalla 12,5 mm (Leica Geosystems, 2018) Leica RTC360 skannerin kallistuksen korjaus High tilt accuracy moodissa on 18 arkkisekuntia kun laitteen kallistuskulma pysyy +- 5 asteen sisällä. (Leica Geosystems, 2021)

3.2 Leica iCON iCR70

Leica iCON iCR70 on keskipitkän kantaman takymetri, joka on suunniteltu erityisesti rakennustyömaiden tarpeisiin. Takymetrissa on työmaakäyttöön sopiva neljän painikkeen näppäimistö sekä luotettava tiedonsiirto ohjaimen, jonka kantama on jopa 400 metriä. (Leica Geosystems, 2024)

Leica iCON iCR70 Kulmatarkkuus on 2" (arkkisekuntia) horisontaalisesti, 5" (arkkisekuntia) vertikaalisti. Pituusmittauksen tarkkuus prismaa käytettäessä 1 mm + 1,5 ppm. Pituusmittauksen tarkkuus mihin pintaan tahansa 2 mm + 2 ppm. (Leica Geosystems, 2019)

Ilmoitetut mittatarkkuudet pätevät, kun sää on pilvinen, ei ole sumua ja näkyvyys on 40 km eikä auringon lämpö aiheuta väreilyä. Mitattaessa ilman prismaa, ilmoitettu mittatarkkuus edellyttää, että kohde on varjossa eikä aurinko paista sekä mitattavan kohteen pinta vastaa Kodak Gray Card värisävyä 90 % heijastavuudella. (Leica Geosystems, 2019)

Käytännössä mittausetäisyys on pienempi kuin ilmoitettu noin 500 metriä koska tyypillisesti mitta-alueen heijastavuus on 18 %. Jos heijastavuus olisi 90 % luokkaa voidaan päästä valmistajan ilmoittamiin mittausetäisyyksiin. (Lappalainen, 2009, s. 12-13)

3.3 Leica iCON GPS 70 vastaanotin

Leica iCON GPS 70 vastaanotin on kalibroituvaa GNSS tekniikkaan perustuva paikannuslaite. Leica iCON GPS 70 vastaanottimessa on inertiamittausyksikkö (IMU) jolla voidaan kompensoida mitta-

sauvan kaltevuuskulma. Mittatarkkuus ihannetilanteessa horisontaalisesti on 8 mm + 1 ppm, vertikaalisti 15 mm + 1 ppm. Mittaussauvan kallistuksen tuoma epävarmuus on tyypillisesti alle 8 mm + 0,4 mm /° 0–30 asteen alueella. (Leica Geosystems, 2019)

Täsmällisyys, tarkkuus, luotettavuus ja alustaminen riippuvat erilaisista tekijöistä, muun muassa satelliittien lukumäärä, havaintoaika, ilmakehän olosuhteet, monitieheijastumat jne. Esitetyt luvut perustuvat normaaleihin tai suotuisiin olosuhteisiin. Täysi BeiDou- ja Galileo-satelliittikonstellaatio lisää entisestään mittauksen suorituskykyä ja tarkkuutta. (Leica Geosystems, 2019)

3.4 Leica MRP 122 360° Prisma

Leica MRP 122 360° Prisma on mittaussauvaan sijoitettava optinen laite. Leica MRP 122 360° Prisman keskitystarkkuus on 2 millimetriä. Leica MRP 122 360° Prismassa on kierteet molemmissa päissä, joten sen päälle voidaan asentaa muun muassa GNSS vastaanotin (SCCS survey, 2024)

3.5 Leica Cyclone REGISTER 360

Leica REGISTER 360 on skannausten rekisteröinti ohjelma. REGISTER 360 julkaistiin vuonna 2017 Leica RTC360 skannerin kanssa. Leica REGISTER 360 ohjelma tuli aluksi Leica Cyclone REGISTER (CORE) ohjelman rinnalle, helppokäyttöisempänä sekä visuaalisempänä kuin CORE. (Leica Geosystems, 2020) Nykyään Leica Cyclone REGISTER 360 on Leica Cyclone REGISTER 360+ ja se on korvannut vanhemman rekisteröintiohjelman Leica Cyclone (CORE)n.

Leica Cyclone REGISTER 360 2022.0.0 versio päivittyi tukemaan Leica RTC360 skannerin High tilt accuracy:n tuottamaa raakadataa niin ettei REGISTER 360 lähtökohtaisesti muuta skannausten kallistuskulmaa, jos skannauksessa on käytetty High tilt accuracy moodia. (Leica Geosystems, 2022, s. 39)

Leica Cyclone REGISTER 360 ohjelma hyödyntää automaattisen rekisteröinnin luomisessa FIELD 360 ohjelmassa luotua esirekisteröintiä sekä RTC360 skannerin VIS tietoa. Näillä tiedoilla saadaan hyvät lähtökohdat automaattisen rekisteröinnin teolle. (Leica Geosystems, 2022)

3.6 Leica Cyclone FIELD 360

Leica Cyclone FIELD 360 on esirekisteröinti ohjelma mobiililaitteille. Ohjelmalla voidaan kontrolloida RTC360, P30/P40, P50 sekä BLK360 laserskannereita. Laitteen kontrolloinnin ominaisuudet riippuvat skannerista. Leica FIELD 360 ohjelmalla kontrolloitu skannausprojekti helpottaa jälkikäsitteilyä REGISTER 360 ohjelmassa. (Leica Geosystems, 2022)

4 PISTEPILVIEN REKISTERÖINTI PROSESSI

4.1 Rekisteröinnin periaatteet

Laserskanneri tuottaa yksittäisen skannauksen kyseisen paikan tiedoista siltä sijainniltaan. Skannerin paikka toimii paikallisena koordinaatistona kyseiselle skannaukselle. Kun skannattavan kohteen koko on suuri, tarvitaan useita skannauksia eri paikoista, jotta koko kohde voidaan peittää, koska skannerin näkökenttä on rajoitettu. Tämä prosessi tuottaa useita skannauksia. Näiden skannausten on oltava rekisteröity yhteiseen koordinaatistoon, jotta saadaan tarkka muoto koko kohteesta. Tätä prosessia kutsutaan skannausten rekisteröinniksi. (Mostafa, 2014, s. 16)

Skannausten rekisteröintiä voidaan tehdä kolmella tavalla, käyttäen tähyksiä, Cloud to Cloud menetelmällä sekä näiden yhdistelmällä. Leica suosii neliömäisiä mustavalko tähyksiä, kun taas FARO suosii pallomaisia tähyksiä, tässä opinnäytetyössä keskitytään mustavalko tähyksien ja Cloud to Cloud rekisteröintiin koska opinnäytetyön aineiston tuottamiseen on käytetty Leican laitteita ja ohjelmia.

Skannaukset voidaan rekisteröidä keskenään paikalliskoordinaatistoon ilman kiinteää suhdetta viralliseen koordinaattijärjestelmään, tätä voidaan kutsua myös kelluvaksi koordinaatistiksi. Kun pistepilvi rekisteröidään tunnettujen pisteiden avulla tätä, kutsutaan georeferoinniksi. (Eling, 2009, s. 23) Tunnettu piste on tarkasti mitattu ja dokumentoitu piste, jolla on koordinaattitieto valtakunnallisessa mittausjärjestelmässä.

Rekisteröinnin tärkeimmät vaiheet ovat vastaavuuspisteiden etsiminen ja transformaation laskeminen. Kuitenkin tarkkojen vastaavuuspisteiden löytäminen on kriittistä ja haastavaa, koska pistepilvet edustavat 3D-näkymää diskreettinä ympäristönä. Iterative Closest Point (ICP) on vakiintunein algoritmi vastaavuuspisteiden etsimiseen. ICP on paikallinen optimointimenetelmä. Tämä menetelmä kuitenkin vaatii hyvän alkuarvion transformaatiolle. (Haiqing;Jingxuan;& Yao, 2022, s. 3)

Yleisesti ottaen RANSAC-menetelmällä havaitaan geometrisia ominaisuuksia, jotka sitten sovitetaan optimaalisesti vähimmäisneliöiden menetelmällä. Kuitenkin ominaisuuksien avulla tapahtuvassa rekisteröinnissä voi esiintyä pieniä rotaatiivirheitä. (Cheng, ym., 2018, s. 3) ICP ja RANSAC menetelmät mahdollistavat Cloud to Cloud rekisteröinnin.

4.2 Rekisteröinnin algoritmit

Tässä luvussa käsitellään tarkemmin ICP-, RANCAS algoritmeja. Monen ohjelman logiikka pohjautuu ICP, RANCAS algoritmiin tai näistä jatko jalostetuista toiminnoista. Algoritmeja ja tapoja löytyy monia, mutta tässä opinnäytetyössä ei ole tarkoitus syventyä algoritmien vertailuun vaan antaa osviittaa mihin skannausten rekisteröinti perustuu.

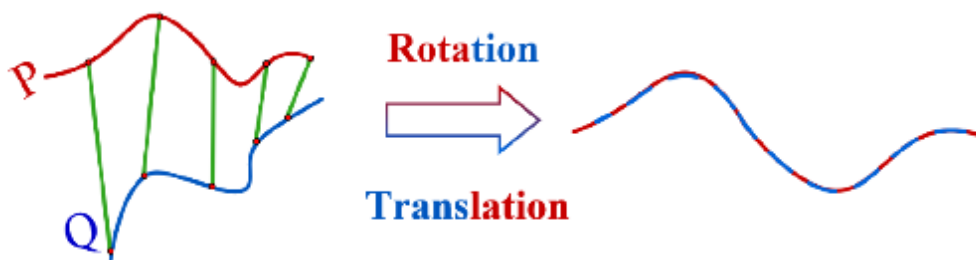
4.2.1 Interactive Closest Point (ICP)

ICP hyödyntää kahden eri koordinaatistojärjestelmän datajoukkojen välisen transformaatioyhteyden löytämistä datan vastaavuuteen, tämä tunnetaan yleisesti nimellä ICP-algoritmi. Peruseriaate esitetään kuvassa 4: ratkaistaan spatiaalinen transformatio lähtöpistepilven P ja kohdepistepilven Q välillä kahden pistepilven päällekkäisellä alueella, jotta niiden välinen etäisyys minimoituu. Oletetaan, että $E(R, t)$ on virhe Q :n ja P :n välillä pyörimisessä ja siirroissa; tällöin optimaalisen transformatiomatriisin ratkaisemisen ongelma voidaan muuttaa optimaaliseksi ratkaisuksi, $E(R, t)$.

(Haiqing;Jingxuan;& Yao, 2022, s. 3) Tämä voidaan ilmaista seuraavalla kaavalla:

$$E(R, t) = \sum_{i=1}^n \|Q_i - (P_i \times R + t)\|^2 \quad (1)$$

missä R on kierto, t on siirto ja P_i lähtöpistepilvi vastaa Q_i kohdepistepilveä.



KUVA 4. ICP algoritmin periaate. (Haiqing;Jingxuan;& Yao, 2022 CC-BY)

4.2.2 RANSAC-algoritmi

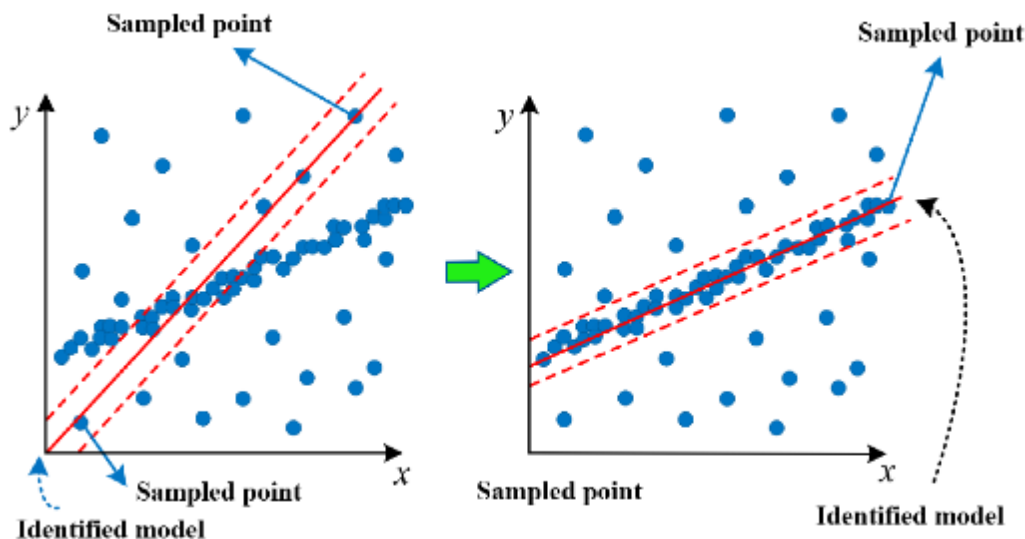
RANSAC-algoritmi on laajasti käytetty erilaisissa mallinnusongelmissa, erityisesti tietokonetieteen alalla. Sen suoraviivainen luonne tekee siitä sopivan valinnan robustiin estimointiin. Kuva 5 havainnollistaa RANSAC-algoritmin käsitteellistä kaaviota yksisuuntaisessa mallinnusongelmassa. Tavoitteena on löytää kohinalle vastustuskykyisiä malleja. Algoritmi käyttää pienintä otosta laskemaan mahdolliset malliparametrit, sovittaa nämä parametrit kaikkiin dataotoskohtiin ja laskee niihin liittyvien sisäpisteiden määrän, kunnes määritelty iteraatioiden enimmäismäärä saavutetaan.

(Haiqing;Jingxuan;& Yao, 2022, s. 9)

Jos nykyisen optimaalisen mallin sisäpisteiden määrä ylittää ennalta määrätyn kynnyksen, tämä malli hyväksytään lopulliseksi ja otosprosessi päättyy. Muussa tapauksessa otoksenotto jatkuu. Koska maksimaalinen iteraatioiden määrä N varmistaa, että ainakin yksi otos sisältää sisäpisteitä tietyllä luottamustodennäköisyydellä, laskukaava N :lle voidaan johtaa seuraavasti:

$$N = \frac{\log(1-p)}{\log(1-(1-p)^m)} \quad (2)$$

missä ν on näytteen epäjäsenaste; m on vähimmäismäärä tarvittavaa dataa malliparametrien laske-
miseksi, p on etukäteen asetettu luottamus todennäköisyys, eli todennäköisyys p on taattu N näyt-
teenoton kertaa, tehdään kaikki piirretyn näytteet sisäpisteiksi. (Haiqing;Jingxuan;& Yao, 2022, s. 9)



KUVA 5. Satunnaismallien konsensus (RANSAC) konseptikuvaus. (Haiqing;Jingxuan;& Yao, 2022 CC BY)

4.3 Tähyksien tunnistus

Laserskannerien käyttäjät hyödyntävät yleisesti valmistajan omaa tähyksen tunnistus ohjelmistoa (rekisteröintiohjelma), jonka toimintatapa ja algoritmien periaatteet pidetään salaisina kilpailullisista syistä. Näistä algoritmeista on tietoa tieteellisissä julkaisuissa, joissa niitä on kuvattu menetelmällisten lähestymistapojensa mukaan taulukossa 1. (Janßen, 2019, s. 4)

TAULUKKO 1. Tähyksien keskipisteen tunnistusalgoritmita, luokiteltu kolmeen lähestymistapaan.

Luokka	Metodi
A	Keskiarvoistaminen
B 1	Reunan tunnistus
B 2	
C 1	Pisteiden intensiteettiarvoilla
C 2	Symmetrialla
	Mallin avulla

Luokka A: Ensimmäiset yksinkertaisiin keskiarvotekniikoihin perustuvat algoritmit tähyksen tunnistamiseksi julkaistiin 2000-luvun alussa. Vaikka niitä parannettiin seuraavina vuosina, niiden tarkkuus

pysyi usein useiden millimetrien tai senttimetrien haarukassa. Siksi tämän algoritmikategorian hyödyllisyys on nykyään vähäinen. (Janßen, 2019, s. 4)

Luokka B: Tämän kategorian algoritmit hyödyntävät kohteiden mustan ja valkoisen alueen välistä reunaa. Esimerkiksi intensiteettikuva johdetaan pistepilvestä ja reunat tunnistetaan kuvan gradienttien avulla (luokka B.1). Ensimmäiset julkaisut tästä lähestymistavasta rajoittuivat radiaalisesti symmetrisiin kohteisiin, mutta myöhemmin menetelmää laajennettiin kattamaan yleisesti käytetyt ruudukkokohteet. Luokan B.2 algoritmit tunnistavat mustan ja valkoisen siirtymien reunat suoraan mitattujen pisteiden intensiteeteistä, eivätkä käytä intensiteettikuvia. (Janßen, 2019, s. 4)

Luokka C: Viimeinen algoritmikategoria perustuu kohteen keskipisteen arvioimiseen korrelaatioiden avulla. Joko kohteen symmetriaa hyödynnetään kohteiden paikantamiseen intensiteettikuvasta (luokka C.1) tai signaalipisteiden koordinaatit arvioidaan mallin perusteella (luokka C.2). Tätä lähestymistapaa sovelletaan myös kohteen keskipisteen määrittämiseen RGB-kuvista, jotka on saatu kuvan avustamalla kokonaisuasemilla. Aikaisempien julkaisujen perusteella luokka C.1:n algoritmit vaikuttavat parhaiten soveltuvan karkeaan kohteiden tunnistamiseen intensiteettikuvasta eivätkä tarkkaan koordinaattien arviointiin. Toisaalta luokka C.2:n lähestymistapa mahdollistaa tarkan kohteen keskipisteen arvioinnin. (Janßen, 2019, s. 4)

Otetaan esimerkki B luokan algoritmista, joka hyödyntää mustan ja valkoisen alueen välistä reunaa. Tarkkaa tietoa miten eri ohjelmat toteuttavat tähyksen tunnistuksen ei ole liikesalaisuuksien suojelemiseksi. Alla oleva esimerkki kuvastaa tunnistamisen algoritmin periaatteen.

Menetelmä koostuu neljästä päävaiheesta: ensin määritetään kohteen taso, sitten luokitellaan heijastuksen intensiteetti-arvot ja poimitaan rajat valkoisen ja mustan värin välillä, kolmanneksi havaitaan ja poistetaan virheelliset pisteet vaiheesta kaksi, ja neljänneksi sovitetaan leikkauslinjat ja laskeaan kahden linjan keskipiste. Menetelmä käyttää robusteja arviointimenetelmiä satunnaisvirheiden vaikutuksen vähentämiseksi. (Xuming & Wunderlich, 2014, s. 4-5)

5 MITTAUSTULOKSEEN VAIKUTTAVAT VIRHEET

Mikä on virhe? Virhe on tilanne, jossa todellinen tulos tai suoritus poikkeaa tavoitetuloksesta tai tavoitesuorituksesta. Virheet voivat johtua esimerkiksi virheellisestä toiminnasta, puutteellisesta tiedosta tai virheellisestä arviosta. Virheitä voi esiintyä monenlaisissa tilanteissa, kuten teknisissä tai tieteellisissä mittauksissa, tietokoneohjelmien käytössä, kirjoituksessa tai ihmisten välisessä kommunikaatiossa.

Mittauksessa voi tapahtua lukemattomia virheitä, riippuen välineistöstä, käytettävästä tekniikasta ja niin edelleen, tämän vuoksi opinnäytetyössä keskitytään oleellisesti laserskannaukseen vaikuttaviin virheisiin sekä joihin tekijä törmäsi työn ohessa.

Yksittäinen skannauksen tarkkuus on yleisesti laitevalmistajan ilmoittamien tietojen mukainen. Se mikä tekee mittavirheen pistepilveen, on pääsääntöisesti rekisteröinti. Yleensä yksi skannaus ei riitä kattamaan kaikkea, jolloin tarvitaan useampi skannaus sekä rekisteröintiä, tällöin syntyy virhe. Se kuinka suuri, on monen tekijän summa.

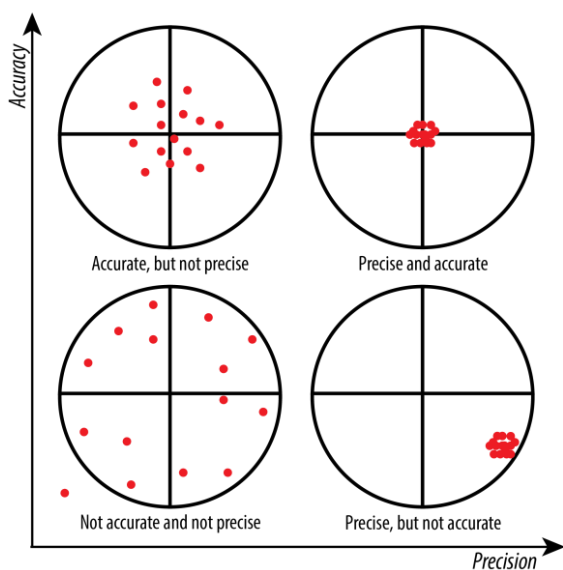
Takymetri on vielä tarkempi kuin laserskanneri, mutta täkymetriä käyttäessä mittaajan ominaisuudet ns. inhimilliset virheet korostuvat. Laserskannaus tähykset ovat yleensä sellaisia, jotka mitataan käsimitauksella, jolloin täkymetrin automaatio ei korjaa mitaustulosta vaan mittauksen onnistuminen on mitaajasta sekä olosuhteista kiinni.

Ennen kuin syvennymme erilaisiin virheisiin mitkä vaikuttavat laserskannauksen laatuun, on hyvä selkeyttää mitä tarkoitetaan laadukkaalla ja tarkalla pistepilvellä / Reality Capture mallilla koska tämä voidaan määritellä monella eri tavalla. On kaksi keskeistä termiä: täsmällisyys ja tarkkuus. Nämä kaksi termiä auttavat meitä ymmärtämään, kuinka luotettavia mittauksemme ovat.

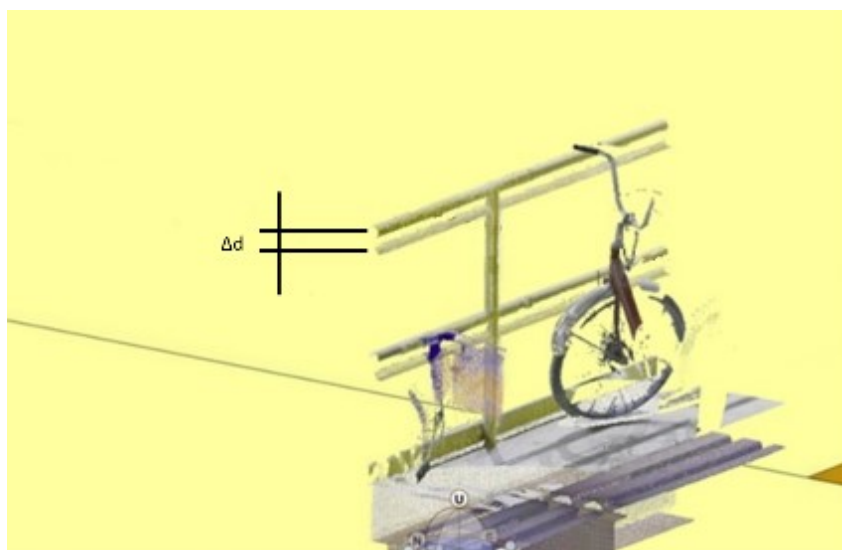
Ensimmäinen termi, täsmällisyys (precision), viittaa siihen, kuinka lähellä toisiaan eri mittaukset ovat. Jos teemme useita mittauksia samasta kohteesta ja saamme hyvin samankaltaisia tuloksia, voimme todeta, että mittauksemme ovat täsmällisiä. Tämä tarkoittaa, että mittausmenetelmämme on johdonmukainen ja toistettavissa. (ISO 5725-1: 2023, 2023)

Toinen termi, tarkkuus (accuracy), kertoo meille, kuinka lähellä mittauksemme on todellista, "oikeaa" arvoa. Jos mittauksemme on hyvin lähellä tunnettua tai hyväksyttyä arvoa, voimme todeta, että mittauksemme on tarkka. Tämä tarkoittaa, että mittausmenetelmämme antaa tuloksia, jotka ovat lähellä todellista arvoa. (ISO 5725-1: 2023, 2023)

Kuva 6 havainnollistaa miten tarkkuus ja täsmällisyys vaikuttaa laadukkaaseen pistepilveen. Punaiset pisteet kuvastavat skannauksia, kaukaiset pisteet kuvaa rekisteröinti virhettä skannauksien kesken. Mitä lähempänä punaiset pisteet toisiaan ovat, sitä vähemmän skannausten rekisteröinnissä on virhettä. Musta ristikko kuvastaa globaalia tai paikallista koordinaatistoa, skannaukset voivat olla rekisteröity keskenään hyvin, mutta ne eivät välttämättä kohtaa globaalin tai paikallisen koordinaatiston kanssa. Käytännössä tämä ilmenee esimerkiksi niin että 3D malli ja pistepilvi eivät sovi päällekkäin keskenään kuten kuvassa 7, tai rakennuksesta tehty pistepilvi ei ole suora vaan käyrä vaikka, rakennus olisikin suora. Jotta pistepilvi olisi laadukas ja luotettava, on sen oltava tarkka ja täsmällinen.



KUVA 6. Havainnollistava kuva tarkkuuden ja täsmällisyyden vaikutuksista. (Precision Vs. Accuracy)



KUVA 7. Kuvaleike Esimerkki rekisteröintivirheestä skannausten kesken. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

5.1 Inhimillinen virhe

Inhimillinen virhe tarkoittaa tai virhettä, joka johtuu inhimillisestä toiminnasta tai päätöksenteosta. Tämä voi johtua monista syistä, kuten huolimattomuudesta, puutteellisesta koulutuksesta tai kokeimattomuudesta, väsymyksestä, stressistä, häiriötekijöistä tai inhimillisestä subjektiivisuudesta. (Mahaju;Carver;& Bradshaw, 2023, s. 2)

Mittaajan rooli mittausten tarkkuuden ja luotettavuuden kannalta on keskeinen, sillä hänen ajattelukykynsä muodostavat keskeisen osan mittaustyötä. Mittaaja valitsee mittaustavan ja mittausvälineet huomioiden käytettävissä olevat resurssit ja oma osaamisensa. Mittaajan aiheuttamat virheet voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: ammattitaito, pysyvät ja muuttuvat ominaisuudet sekä näkökyky. Mittaaminen vaatii sekä pitkäaikaista kokemusta että riittävää teoreettista koulutusta, joten työntekijän ammattitaidon merkitystä näiden tekijöiden valossa ei voi liioitella. (Andersson & Tikka, 1997, s. 143-144)

Pysyvillä ominaisuuksilla viitataan mittaajan luonteenpiirteisiin, jotka ovat pysyvästi läsnä eikä niitä voi muuttaa merkittävästi esimerkiksi koulutuksen avulla. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi huolellisuus, stressinsietokyky ja älykkyys. (Andersson & Tikka, 1997, s. 143-144)

Nopea älykkyys on tärkeä tekijä karkeiden virheiden välttämiseksi kaikissa mittaukseen liittyvissä valinnoissa ja toiminnan kehittämisessä. Mittaajan muuttuvat ominaisuudet voivat vaihdella päivittäin, jopa saman päivän aikana. Näitä ominaisuuksia ovat muun muassa fyysinen kunto, väsymystila ja motivaatio. (Andersson & Tikka, 1997, s. 143-144)

Näkökyvyllä, erityisesti erotuskyvyllä, on merkittävä vaikutus monissa mittauksissa, kun tavoitellaan lopputuloksen tarkkuutta. Valaistuksen voimakkuus on olennaisen tärkeä silmän erotuskyvyille. Valaistuksen tulee olla riittävän kirkas, mutta samalla välttää häikäisyä. Ympäristön ei tulisi olla liian hämärä, jotta silmä ei joutuisi jatkuvasti sopeutumaan valaistuksen muutoksiin ja rasittuisi. (Andersson & Tikka, 1997, s. 143-144)

Mitattaessa takymetrillä inhimillisen virheen voi muodostaa parallaksivirhe. Parallaksivirhe tarkoittaa yksinkertaisesti sitä, että ristikon sijainti muuttuu suhteessa kohteeseen silloin, kun mittaajan silmä ei ole täysin samalla linjalla takymetrin okulaarin kanssa. (Laurila, 2012, s. 22) Tämä virhe johtuu siitä, että mittauskaukoputken linssien optinen keskipiste ei ole samalla tasolla mittauskaukoputken ristikon kanssa. Tämän seurauksena ristikon ja kohteen näkyminen tarkkoina ei tapahdu samanaikaisesti. (Laurila, 2012, s. 22) Parallaksi virhe voidaan korjata linssin säädöillä, jos takymetrissa on tarvittava optiikka tähän.

5.2 Ympäristön ilmasto olosuhteet

Kun valo kulkee ilmassa tai muussa aineessa kuin tyhjiössä, sen nopeus hidastuu hieman. Tämä johtuu siitä, että valon kulku hidastuu, kun se siirtyy aineen eri ominaisuuksista, kuten sen tiheydestä,

taittumiskertoimesta ja absorptiokyvystä. Tämä hidastuminen aiheuttaa valon taipumisen, kun se kulkee ilmassa tai muussa aineessa. (Rantanen, 2001, s. 317)

Alla esitetään tarkemmin valon käyttäytymiseen vaikuttavia ilmiöitä, jotka liittyvät sen kulkuun ilmassa tai muissa aineissa kuin tyhjiössä. Koska lasersäde on pohjimmiltaan valo, samat vaikuttavat ilmiöt koskevat myös lasersädettä.

Sironnassa tapahtuu säteilyn suunnan muuttumista, kun se kohtaa esteen tai tiheyden muutoksen aineessa, jonka läpi se kulkee. Kaasumaiset aineet, kuten ilmamolekyylit (kuten typpi, happi ja otsoni), aiheuttavat säteilyn hajaantumista. Sironnan voimakkuuteen vaikuttavat säteilyn aallonpituus sekä kohtaamansa esteen koko ja muoto. Rayleigh-sironnaksi kutsutaan ilmiötä, jossa säteilyn sironta on voimakkaampaa, kun säteilyn aallonpituus on lyhyempi. Mie-sironta, toisaalta, ilmenee, kun säteily kohtaa pilvien vesipisarot, savun, tulivuoren kaasut ja muut pienhiukkaset, eikä se riipu säteilyn aallonpituudesta. (Space Research at FMI, ei pvm)

Absorptiossa säteily imeytyy ilmakehän kaasumaisiin molekyyleihin ja pienhiukkasiin, kuten saavuun, pilvien vesihöyryyn ja aerosoleihin. Otsoni on erityisen tehokas imeytymään ultraviolettisäteilyä. Refraktio on ilmiö, jossa valonsäde taipuu, kun se kulkee rajapinnan yli, jossa aineen tiheys muuttuu tai taitekerroin vaihtelee. (Space Research at FMI, ei pvm)

Refraktio- eli taittumisilmiöt ilmenevät, kun valo taipuu ja heijastuu eri lämpötilaisissa ilmakerrosten raja-alueilla. Refraktio ilmakehässä on riippuvainen ilman tiheydestä, joka taas määräytyy ilman paineen, lämpötilan, kosteuden, valon aallonpituuden ja valon kulkiessa ilmakehässä. Suurin refraktio tapahtuu horisontissa ja pienin zeniitissä, eli suoraan ylhäällä. (Space Research at FMI, ei pvm)

Skintillaatio on ilmiö, joka ilmenee ilmakehän eri lämpötiloissa ja tiheyksissä olevien kerrosten välisessä värähtelyssä. Tämä värähtely johtuu ilmakehässä tapahtuvista virtauksista ja pyörteistä. Kun valo kulkee tällaisen värähtelevän ilmakerroksen läpi, se kokee nopeita refraktiomuutoksia eri suuntiin, minkä seurauksena valo näyttää välkkyvän ja tuikkivan. (Space Research at FMI, ei pvm)

Konvektio, lämpöväreily on visuaalinen ilmiö. Se ilmenee, kun valo taipuu kylmän ja lämpimän ilman kohtaamisesta. Tämä tapahtuu, koska valon nopeus muuttuu ilman optisen tiheyden vaihtelun myötä. Säteen kulkua voidaan ennustaa laskennallisesti niin kauan kuin ilman taitekerroin pysyy vakiona. Kun taitekerroin vaihtelee, säteen suunta muuttuu, mikä synnyttää lämpöväreilyn.

Lämpöväreily on käytännössä kangastusilmiö. Kangastus jaetaan kahdeksi osa-alueeksi: yläpuolinen ja alapuolinen kangastus riippuen siitä, miten kylmä ja lämmin ilmassa ovat suhteessa toisiinsa.

Alapuolinen kangastus on erikoistapaus lämpöväreilyssä, missä alempi lämmin ilma sekoittuu yläpuolella olevaan kylmään ilmaan.

Eryteisesti auringon lämmittäessä maaperää, maan lämpötila voi nousta huomattavasti korkeammaksi kuin ympäröivä ilman lämpötila, luoden edellytykset tämän ilmiön syntymiselle. Tämä väreily saa valon taipumaan ennalta arvaamattomasti, mikä heikentää mittauksen tarkkuutta koneen ja prisman välillä, kun mittaussmatka kasvaa. (Martikainen, 2017, s. 16)

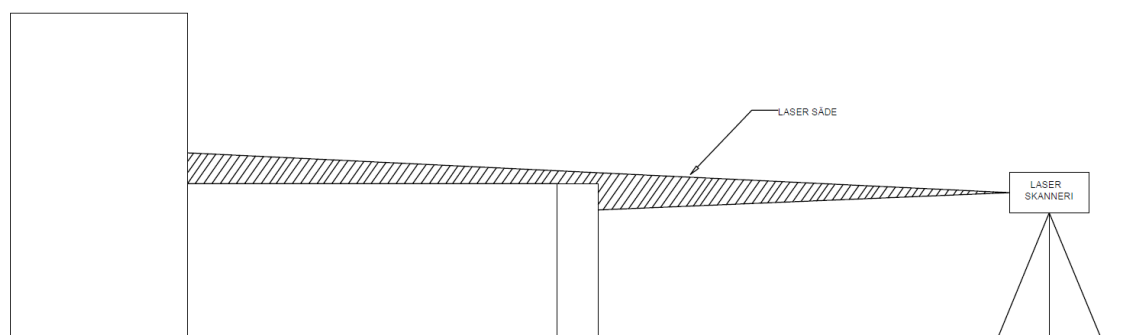
5.3 Lasersäteen käyttäytyminen

Pelkän lasersäteen hajoaminen, leviäminen sekä käyttäytyminen pinnalla vaikuttaa mittaustulokseen eritoten laserskannauksessa koska laserskannerin operoija ei voi vaikuttaa suoranaisesti mihin lasersäde osuu.

Todennäköisesti osa virheistä korjataan laitteiston ohjelmalla, esimerkiksi hajonneet pisteet ja niin edelleen. Laittevalmistajat eivät kerro suoraan mitä heidän ohjelmansa korjaa tai muokkaa, mutta datan vertailulla pystyy toteamaan eroja aineiston välillä.

5.3.1 Lasersäteen hajoaminen

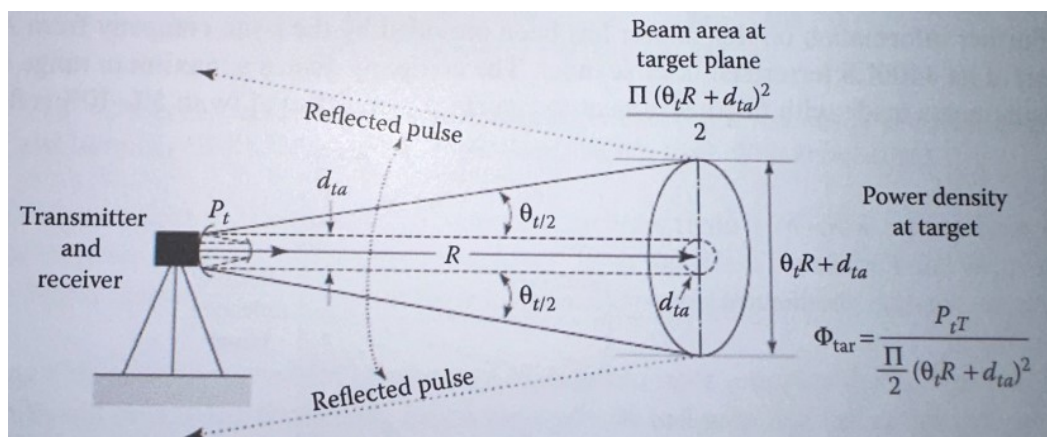
"Hajonneet pisteet" aiheuttavat ylimääräisiä poikkeamia mitattuihin etäisyyksiin kohteen reunoilla. Lasersäteen hajaantumisen takia, kun lasersäde osuu kohteen reunaan, osa siitä heijastuu kohteen pinnasta ja osa kohteen takana olevasta pinnasta tai ei lainkaan, kuten Kuvassa 8 (jos skannerin mittaetäisyydellä ei ole kohdetta takana). Jos etäisyys kahden pinnan välillä on alle puolet pulssin leveydestä, skanneri ei pysty erottamaan pulssia, joka palaa molemmilta pinnoilta. Näin ollen etäisyys lasketaan integroimalla etäisyydet pisteisiin molemmilla pinnoilla lasersäteen vaikutusalueella. Lopullinen etäisyys ei ole kummallakaan pinnalla vaan jossain niiden välillä. Virhe, joka johtuu tästä, voi vaihdella millimetrin murto-osasta useisiin kymmeneen senttimetreihin. Tämän vuoksi laserskannerit tuottavat runsaasti virheellisiä pisteitä reunojen läheisyydessä, mikä vaikeuttaa pistepilven mallintamista. Laitteiston ominaisuuksien takia "hajonneiden pisteiden" ongelma on sisäänrakennettu laserskanneriin eikä sitä voida poistaa kokonaan. "Hajonneiden pisteiden" aiheuttama virhe voidaan nähdä karkeana virheenä. (Reshetyuk, 2009, s. 41-42)



KUVA 8. Laser säteen hajoamisen ongelma sivuprofilista. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

5.3.2 Lasersäteen leviäminen

Lasersäteen tai pulssin kohdistuksesta riippumatta, kun se saapuu etäisyysmittauslaitteesta maanpinnalle tai kohteeseen, se muodostaa valaistusalueen, joka on pyöreä tai elliptinen. Tämä valaistusalue kasvaa suuremmaksi mitä kauempana kohteesta ollaan, kun tarkastellaan tiettyä kulmaa säteen matkalla. Näin ollen, epätasainen maasto tai korkeuserot voivat johtaa laserheijastusten sekoittumiseen maanpinnalla tai kohteessa. Kuva 9 esittää laseretäisyyden mittarin ja kohteen välisen matkan geometrian. Levinneen lasersäteen kattama alue (A) on yhtä suuri kuin $\frac{\pi(\theta/2R + d)^2}{2}$, missä θ on hajaantumiskulma radiaaneina, d on aukon halkaisija ja R on etäisyys. (Shan & Toth, 2018, s. 23)



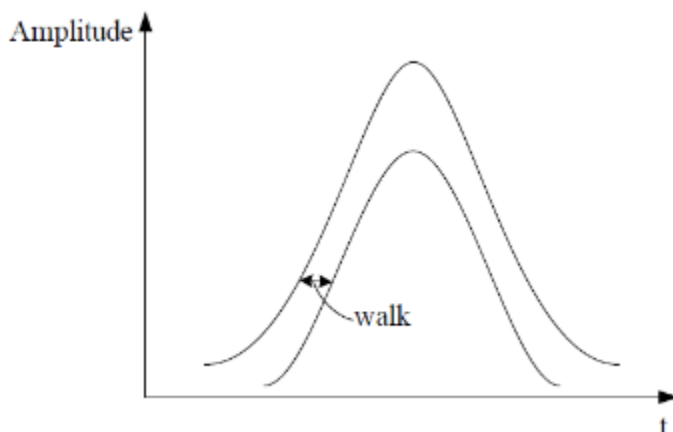
Copyright © 2024 From Topographic laser ranging and scanning: principles and processing by Shan, Jie; Toth, Charles K. Reproduced by permission of Taylor and Francis Group, LLC, a division of Informapl.

KUVA 9. Etäisyysmittarista lähteneen säteen tai pulssin leviäminen ja sen hajaantuminen sen matkalla maanpintaan tai kohteeseen sekä sen paluussa kohteesta. (Shan & Toth, 2018, s. 23)

Lasersäteen leviäminen on riippuvainen laserskannerista, mutta esimerkiksi Kaukokartoitus-laserskanneri RIEGL LMS-Q560 säteen leviäminen on 0,5 mrad. Tyypillisen skannauslentokorkeuden ollessa 1000 metriä, lasersäde leviää 50 senttimetriä. (Shan & Toth, 2018, s. 24)

5.3.3 Aikakävely

Aikakävely on virhe, joka esiintyy aikadiskriminaattorissa ja johtuu ajoituspulssin amplitudin ja muodon vaihteluista, kuva 10 havainnollistaa tätä. Nämä vaihtelut puolestaan riippuvat skannatun kohteen pinnan heijastavuudesta. Aikakävelyn muita aiheuttajia ovat muutokset aikadiskriminaattorin signaalin etenemisviiveessä sekä sen mahdollisista häiriöistä. Ajoituksen pulssin amplitudin muutokset ovat erityisen merkittäviä laserskannauksessa, sillä heijastavuus muuttuu nopeasti, kun lasersäde liikkuu kohteen yli. (Reshetyuk, 2009, s. 38) Aikakävelyn virheen määrään voidaan vaikuttaa käyttämällä nopeampaa pulssia sekä korkeampaa taajuutta, esimerkiksi 1 GHz pulssilla saadaan aikakävelyn virhe +/- 1 mm luokkaan. (Kilpelä, 2004, s. 61)



KUVA 10. Havainnollistava kuva Aikakävely ilmiöstä. (Amann;Bosch;Lescure;Myllylä;& Rioux, 2001, s. 12CC BY)

5.3.4 Kohteen pinnan aiheuttamat virheet

Pinnan aiheuttamat virheet liittyvät kohteisiin, joita skannataan. Tärkein tekijä näiden virheiden takana on kohteen pinnan heijastavuus. Koska maalaserskanneri on heijastamaton maastomittausmenetelmä, joka ei vaadi heijastavaa kohdetta mittaukseen. Tämän vuoksi etäisyysmittauksen tulokset ovat vahvasti riippuvaisia kohteen heijastavuudesta. Tämä puolestaan vaikuttaa merkittävästi signaali-kohinasuhteeseen. Heijastavuus voidaan määritellä suhteena heijastetun ja saapuvan laserpulssin tehon välillä. Se riippuu seuraavista tekijöistä:

- Kohteen elektromagneettiset ominaisuudet
- Pinnan väri
- Lasersäteen aallonpituus
- Lasersäteen tuloaaltokulma
- Pinnan karkeus, joka riippuu aallonpituudesta ja tuloaaltokulmasta (Nayar;Ikeuchi;& Kanade, 1989)
- Pinnan lämpötila. Kuumaa kohdetta skannatessa, esimerkiksi teollisuusympäristössä, kuuman pinnan aiheuttama taustasäteily vähentää signaali-kohinasuhdetta ja siten etäisyysmittausten tarkkuutta
- Pinnan kosteus.

(Reshetyuk, 2009, s. 50)

Laserin heijastuneen intensiteetin ja pinnan heijastavuuden välistä suhdetta kuvataan yleisesti geometrisen optiikan Lambertin heijastusmallilla kaavassa 3. (Hancock, 1999, s. 68)

$$I \sim \frac{\rho \cos \beta}{R^2}, \quad (3)$$

jossa I on heijastuneen lasersäteen voimakkuus, ρ on pinnan takaisinheijastuvuuskerroin, β on säteen tuloaaltokulma ja R on etäisyys kohteeseen. (Hancock, 1999, s. 68)

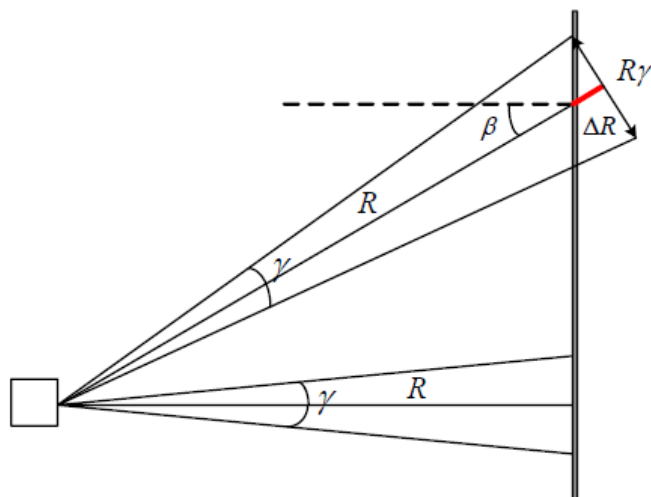
Erilaiset heijastavuusominaisuudet pinnalla aiheuttavat virheitä mitattuun etäisyyteen. Laserskannerin mittaaman etäisyyden riippuvuus pinnan heijastavuudesta tunnetaan nimellä etäisyys/heijastavuusristisidonnaisuus. Tämä voidaan parhaiten osoittaa sillä, että saman etäisyyden päähän laserskannerista sijaitsevien pintojen mittaama etäisyys voi olla erilainen, jos niiden heijastavuus eroaa. Tämä johtuu osittain aikakävelyvirheestä ja skannerin rajoittuneesta dynaamisesta alueesta. Pinnat, joilla on korkea heijastavuus, tarjoavat luotettavampia ja tarkempia etäisyyden mittauksia kuin ne, joilla on alhainen heijastavuus, koska suurempi osa laserenergiasta heijastuu takaisin skanneriin. Jos kohteen heijastavuus on liian suuri (esim. heijastava teippi, hapon kestävä teräs) tai liian matala, etäisyys voi tallentua hyväksyttävän epätarkasti tai ollenkaan. Mitatun etäisyyteen pinnan heijastavuuden vuoksi aiheutuneet virheet vastaavat tietyssä määrin nollavirheen osaa yleismittausasemissa, kun otetaan huomioon heijastuspisteen ja heijastimen fyysisen keskuksen erottaminen ja lasikappaleen sisällä tapahtuva aikavähennys. Eri materiaaleista aiheutuvat virheet, jotka on skannattu eri aallonpituuksilla, ovat erilaisia. Tästä syystä voidaan todeta, että yleiskorjausta laserskannerin nollavirheeseen ei voi määrittää. Kuitenkin voidaan valita "viitesuora" ja käyttää sitä vain nollavirheen laitekohtaiseen osaan. Pinnan heijastavuusominaisuudet vaikuttavat paitsi mitatun etäisyyden luotettavuuteen myös suurimpaan toimintamatkaan. (Reshetyuk, 2009, s. 50-51)

Laserskannereiden valmistajat määrittelevät yleensä, minkä tyyppisille kohteille (heijastavuus, hajautettu/heijastava heijastus) lausuma maksimikantamasta on voimassa. Lasersäteen saapumiskulma aiheuttaa systemaattisen virheen pulssietäisyyden mittauksessa kuten kuva 11 havainnollistaa, jota jotkut kutsuvat "etäisyyden virheeksi", joka voidaan laskea seuraavasti:

Lasersäteen tuloaaltokulma aiheuttaa systemaattisen virheen pulssietäisyyksissä, jota nimitetään "etäisyysvinoumaksi", ks. Kaava 4, ja sen voi laskea seuraavasti:

$$\Delta R = \frac{R\gamma}{2} \tan \beta, \quad (4)$$

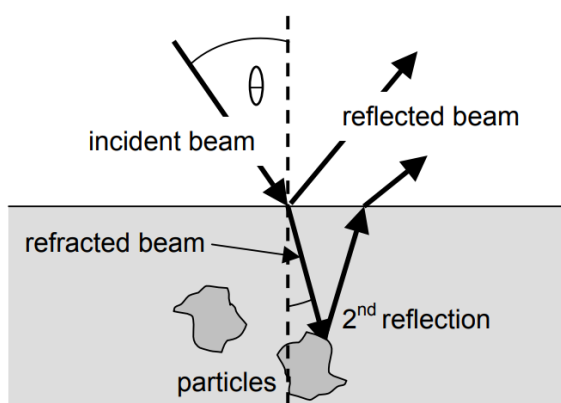
missä R on etäisyys, γ on säteen hajaantumiskulma ja β on tuloaaltokulma.



KUVA 11. Virhe kantaman osalta johtuen säteen tuloaaltokulmasta. (Reshetyuk, 2009, s. 51)

Voimakkaasti heijastavat pinnat, jotka on skannattu suurella tuloaaltokulmalla, voivat aiheuttaa "monitie" -virheitä, kun lasersäde heijastuu tällaiselta pinnalta toiselle pinnalle, josta se heijastuu lopulta takaisin skanneriin. (Reshetyuk, 2009, s. 51)

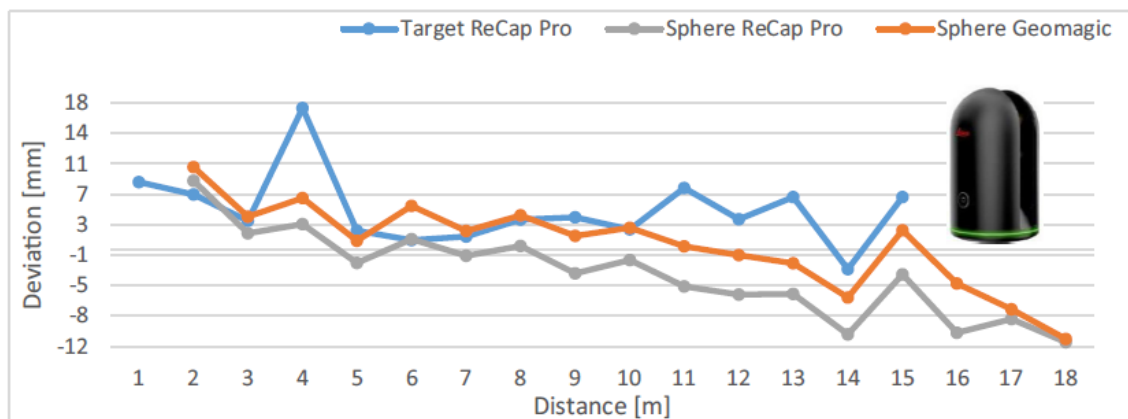
Lasersäde voi tunkeutua tiettyntyyppisiin materiaaleihin esimerkiksi kuvassa 12, kuten puuhun, marmoriin ja styrokseen, ja sen jälkeen taipua ja heijastua materiaalin sisällä, mikä lisää etäisyyssmittausten virhettä. (Ingensand;Ryf;& Schulz, 2003, s. 2)



KUVA 12. Lasersäteen tunkeutuminen materiaaliin, joka aiheuttaa taittumisia sekä heijastumia. (Ingensand;Ryf;& Schulz, 2003, s. 2)

5.4 Ohjelmalliset virheet

Ohjelmallisia virheitä on jokaisella ohjelmalla, esimerkiksi pallomaisen tähyksen tunnistuksen virhe riippuu matkasta ja käytettävästä ohjelmistosta. Kersten: nin ja Lindstaedt: nin (2022) tutkimuksissa todettiin pallomaisen tähyksen mittavirheen ero eri rekisteröintiohjelmien kesken, kuten kuvassa 13 näkyy. (Kersten & Lindstaedt, 2022, s. 427)

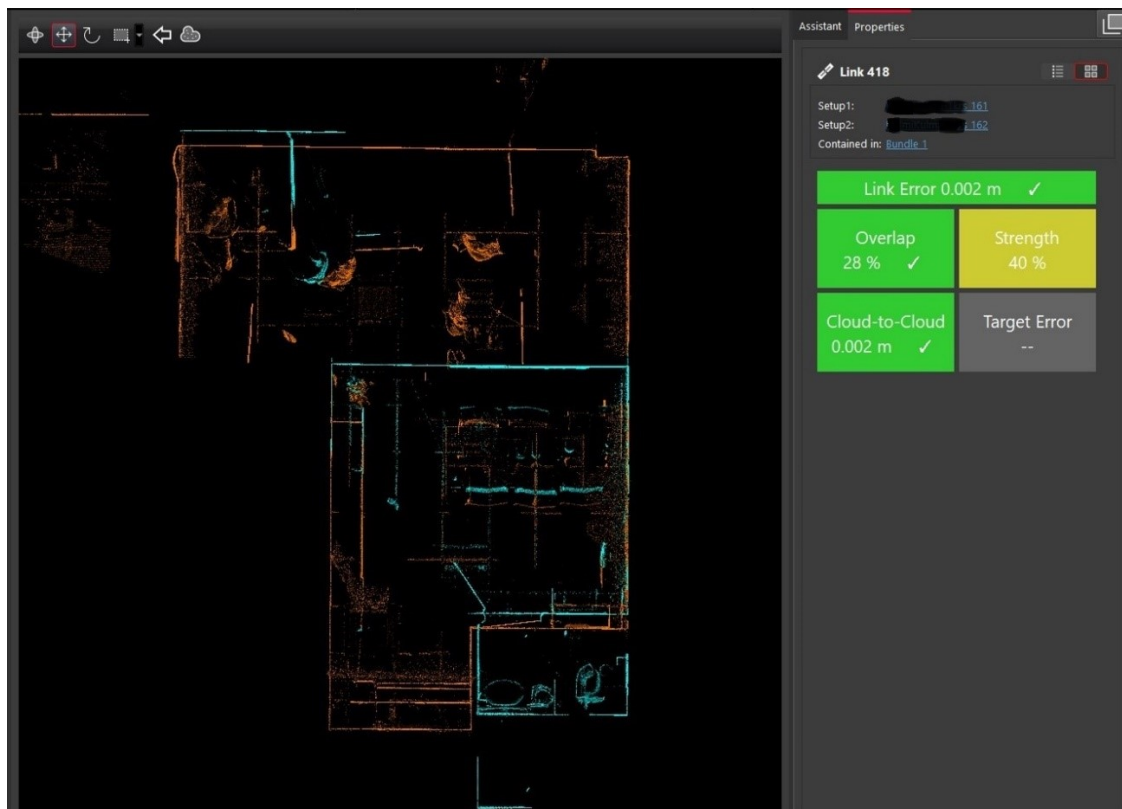


KUVA 13. Tähyksen mittatarkkuuden vertailua rekisteröintiohjelman sekä tähyksen kesken. (Kersten & Lindstaedt, 2022, s. 427, CC BY)

Jokaisella ohjelmalla on omat vahvuudet sekä heikkoudet, pääsääntöisesti parhaiten laitetoimittajan ohjelmisto toimii laitetoimittajan laitteiden raakadatan kanssa. Suurimpaan osaan raakadataa ei ole kolmannella osapuolella pääsyä, joten tämä rajaa raakadatan hyödyntämistä eri ohjelmien välillä. Raaka-data voidaan toteuttaa tiedostojen vientinä yleiseen formaattiin esim. e57, joka toimii myös kolmannella osapuolella. Yleisesti ohjelmien aiheuttamat rekisteröinti virheet muodostuvat esimerkiksi ICP algoritmin tuottaman kulmavirheen vuoksi.

5.4.1 Cloud to Cloud

Cloud to Cloud rekisteröinti tekee välillä virheitä. Vaikka numerollinen virhearvo on pieni se ei tarkoita, etteikö virhettä olisi. Cloud to cloud voi tehdä sellaisen virheen, että se rekisteröi pistepilvet 10 cm erolla, mutta virheilmoitus näyttää 2 mm eroa kuten kuvassa 14 näkyy.



KUVA 14. Esimerkki Cloud to Cloud rekisteröinnin virheestä. Asiakastietoja peitetty tietosuojajasyistä. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Cloud to Cloud rekisteröinnin laatuun vaikuttaa suuresti itse raakadata. Ulkona skannatessa mittapisteitä muodostuu skannerin maksimimatkalta, 70 metristä 650 metriin, jotka aiheuttavat erinäisiä häiriöitä. Suurin tekijä ulkoskannauksissa on kasvillisuus, puiden liikehdintä sekä seisahnut vesi. Tuulisena päivänä jopa lyhtypylväät voi huojua sen verran että sen erottaa skannauksista.

5.5 Laserskannerin mittavirhe

Laserskannerin mittaamien pisteiden ilmoitettu mittatarkkuus riippuu valmistajasta. Esimerkiksi Leican RTC360 skannerin mitatun pisteen 3D tarkkuus on 1,9 mm 10 metrin päässä. Mitatun pisteen 3D tarkkuus heikkenee mittaussmatkan kasvaessa, RCT360 skannerin mitatun pisteen 3D tarkkuus 40 metrin päässä on 5,3 mm (Kersten & Lindstaedt, 2022, s. 423)

Pisteen 3D tarkkuus tarkoittaa mitatun pisteen suhdetta todelliseen sijaintiin koordinaatistossa, kuten kuva 15 havainnollistaa. Takymetrien tarkkuus ilmoitetaan yleensä 2D muodossa, tarkkuus X, Y suunnassa sekä erikseen mainitaan Z suunnassa.



KUVA 15. Havainnollistava esimerkki mitatun pisteen 3D tarkkuudesta. Todellinen keskipiste on punaisen pallon keskellä, ja vihreä pallo on mitattu piste koordinaatistossa. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Laserskannerin virheisiin vaikuttavat skannerin pyörivät liikkeet, jotka sisältävät pyörivän peilin aiheuttamat erilaiset kulmavirheet, nopeusvirheet, mahdolliset jumittamiset sekä kompensattorin toiminta. (Reshetyuk, 2009, s. 46-47) Jos laite on kalibroitu ja kunnossa, näiden virheen vaikutus sisältyy valmistajan ilmoittamiin tarkkuuksiin, joten näihin ei perehdytä tässä opinnäytetyössä.

Laserskannerin elektroniikka on kalibroitu tallentamaan paluusignaalin teho tiettyyn alueeseen (minimi- ja maksimiarvojen välillä). Jos pinnasta heijastuvan signaalin teho on arvojen sisällä, ajan mittausyksikkö pysähtyy oikealla hetkellä ja etäisyys pintaan tallennetaan oikein. Kuitenkin voi käydä niin, että paluusignaalin teho on kalibroidun alueen ulkopuolella, eli liian voimakas tai liian heikko. Esimerkki liian voimakkaasta paluusignaalista on lasersäteen heijastuminen erittäin heijastavilta pinoilta, kuten liikennemerkkeiltä, erityisesti lyhyillä etäisyyksillä. Tällaisessa heijastuksessa paluusignaalin teho on suurempi kuin odotettu (laserskannerin mukaan). Tämän seurauksena ajoitus tapahtuu liian aikaisin ja etäisyys, jonka skanneri tallentaa, on lyhyempi kuin todellinen etäisyys. Toisaalta, jos paluusignaali on liian heikko, tallennettu etäisyys on pidempi kuin todellinen etäisyys. (Reshetyuk, 2009, s. 15)

5.6 Takymetrin mittavirhe

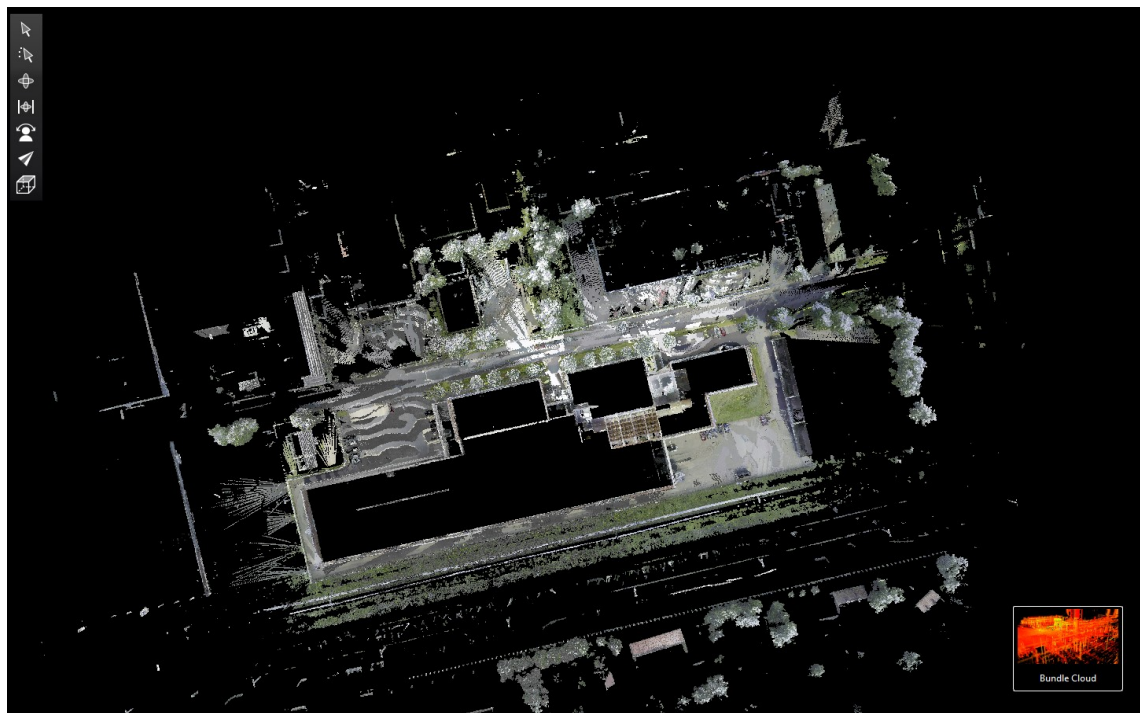
Takymetrin valmistajan ilmoittama tarkkuus on suurimmassa osassa laitteita 1 mm luokkaa. Mitatun pisteen tarkkuuteen vaikuttaa aiemmin läpikäytyt asiat muun muassa, inhimillisen virheen tekijät, ilmasto sekä lasersäteiden leviäminen. Takymetrille määritetään raja-arvot joihin mittauksien keskinäinen virhe pitää sopia, esimerkiksi 2D toleranssi 12 mm ja korkeustoleranssi 16 millimetriä.

5.7 Prisma- & tarra tähyksien mittavirhe

Täkymetrimittauksessa käytettävän prisman tarkkuus on prismasta riippuvainen, 0,3 millistä 2 millimetriin. (Leica Geosystems, 2017) Opinnäytetyön testimittauksissa käytettiin Leican MRP 122 360° prismaa. Tarratähyksien mittavirhe on tyypillisesti 2 mm luokkaa. Tähän vaikuttaa tarratähyksen laatu, mitataanko automaatti asetuksilla vai käsikäytöllä. (Braun, 2015, s. 495)

6 TESTIMITTAUS JA SEN MERKITYS TEORIAN KANNALTA

Testimittauksessa kohteena oli Länsi-Savon rakennus Mikkeliissä. Testimittauksen tarkoituksena oli testata rekisteröinnin tarkkuutta sekä selvittää virheiden syntymistä. Takymetrimittauksilla luotiin georeferoitu kontrolliohjaus, jota hyödynnettiin rekisteröinnin korjauksessa sekä vertailussa. Mittauspäivänä sää oli aurinkoinen ja lämpötila 23–25 asteen välillä. Aurinkoinen sää lämmitti asfalttia siinä määrin että siitä aiheutui lämpöväreilyä. Mittausalue on esitettyä kuvassa 16. Länsi-Savon rakennus sijaitsee osoitteessa Teollisuuskatu 2–6, 50130 Mikkeli. Skannausalueen koko on noin 240 metriä pitkä ja 90 metriä leveä.

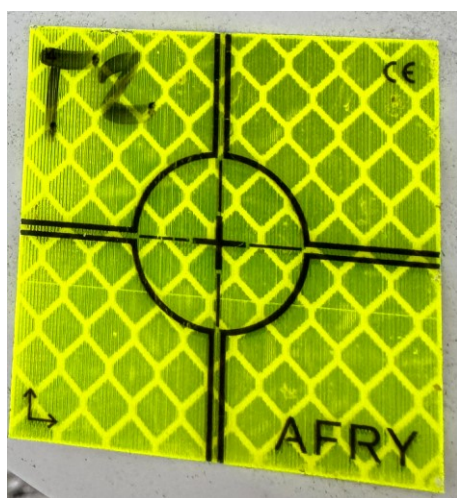


KUVA 16. Ilmakuva skannauskohteesta. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Skannaukset esirekisteröitiin FIELD 360 ohjelmalla ja sitten lopullinen rekisteröinti tehtiin Leica REGISTER 360 ohjelmalla. Testimittaukset toteutettiin Länsi-Savon rakennuksen ympäristössä. Takymetritähykset aseteltiin rakennuksen ympärille, joka mahdollisti takymetrin operoinnin kiinteistön ympärillä. Laserskannaus tähykset aseteltiin rakennuksen seiniin tai muihin pystypintoihin, mikäli se oli mahdollista, niin että ne olisivat joka kolmannessa skannauksessa. Laserskannerin tähykset on kuvassa 17 ja takymetrin käyttämä tarratähykset kuvassa 18.



KUVA 17. Laserskannerin mustavalko tähys. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

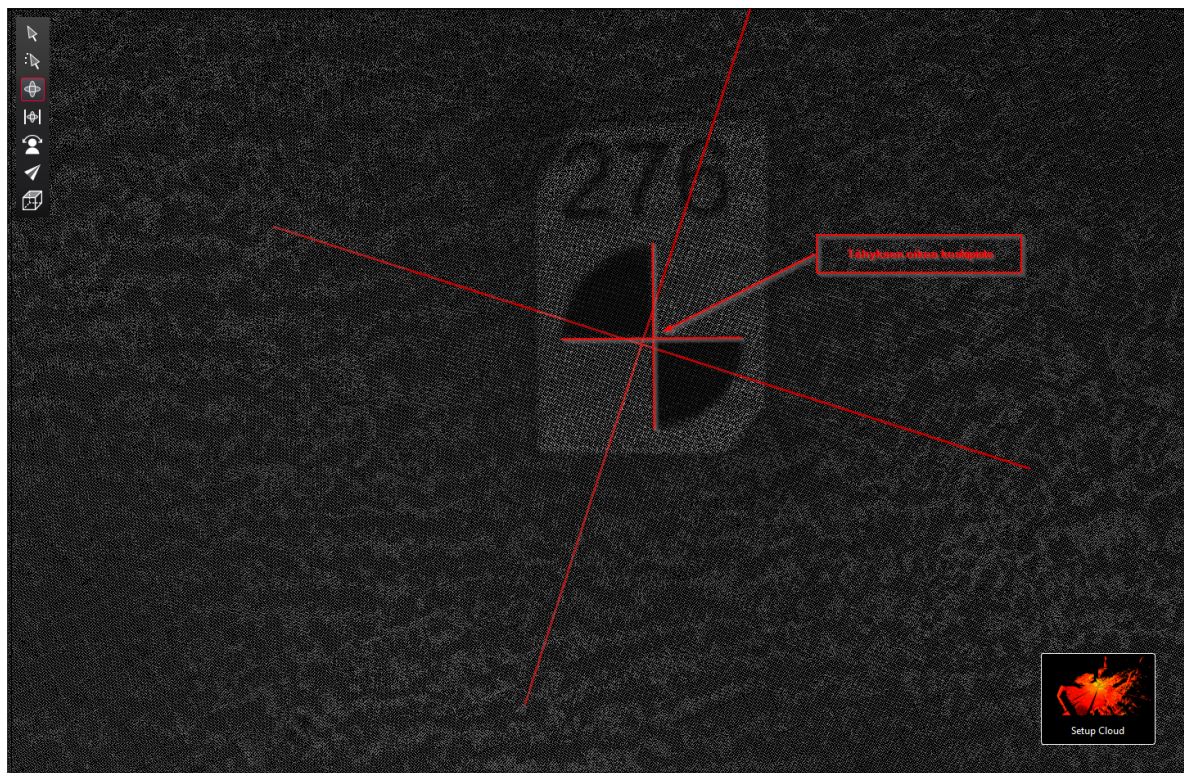


KUVA 18. Takymetri mittauksessa käytettävä tarratähys. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Rekisteröinnin testauksessa oli tarkoitus verrata FIELD 360 & REGISTER 360 tuottamaa automaattista rekisteröintiä takymetrimittauksien tuottamaan kontrollikorjaukseen, jolloin voitiin tutkia suoraan paljonko pistepilvi mahdollisesti heittää takymetrimittauksiin nähden. Samanlainen tutkimus tehtiin manuaalisesti rekisteröidylle pistepilville. Kolmannessa testissä molempien rekisteröintitapojen aineistot korjattiin kontrolliohjauksella, joka hyödyntää takymetrin mittaustietoja.

Testimittauksen skannauksia ei käsitelty ylimääräisten pisteiden osalta, jolloin muun muassa puiden, ihmisten aiheuttamat mittapistet jäivät skannauksiin. Skannauksien valokuvista sensuroitiin rekisterikilvet, ihmisten kasvot yksityisyyden varmistamiseksi. Myös skannauksista poistettiin tunnistettavat osat esim. rekisterikilven muodostamat mittapistet.

Skannaus aineistoa läpikäydessä huomattiin, ettei REGISTER 360 ole onnistunut määrittämään tähyn keskipistettä oikein kuten kuvasta 19 ilmenee. Tällaisia virheitä löytyi muutamia, jotka korjattiin ennen kontrolliohjauksen lisäämistä.



KUVA 19. Kuvakaappaus REGISTER 360 ohjelman virheellisesti määritetystä tähyksestä. Kuvaan on vahvistettu oikea keskipiste. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

6.1 Teorian vaikutusten tutkiminen testimittauksessa

Testimittauksessa tarkasteltiin inhimillisen virheen mahdollisuutta, laserskannauksen ja erityisesti takymetrimittauksen osalta. Laserskannausprosessi kentällä on pitkälle automatisoitu ja ohjelmien ja laitteiden ominaisuudet korostuvat, kun taas takymetrimittauksessa inhimillisen virheen mahdollisuudet ovat suuremmat.

Mittauspäivä oli aurinkoinen ja kuuma, mikä aiheutti asfaltin lämpöväreilyä. Takymetrimittaukset saattoivat kärsiä enemmän lämpöväreilystä, mutta on epäselvää, näkyykö tämä vaikutus laserskannauksen tuottamassa materiaalissa.

Takymetri mittauksessa lasersäteen käyttäytyminen korostuu erityisesti, koska yleensä mitataan vain yksi mittapiste, jota pidetään lähtökohtaisesti validina. Jos lasersäde hajoaa tai leviää, mittatulos on virheellinen ja tämä saattaa jäädä huomaamatta. Laserskannauksessa tällaiset poikkeamat voidaan huomata suhteellisen helposti, koska yleensä vastaavia virheellisiä mittapisteitä on useita.

Aikakävelyn virheen tarkka arviointi ilman lasersäteen sekä laitteen tehotietoja on vaikeaa. Laitteiston ohjelmisto voi korjata tätä virhettä, mutta tällaisia korjaavia algoritmeja ei paljasteta liikesalaisuuksien vuoksi. Aikakävely virhettä ei tutkittu tämän enempää näiden huomioiden vuoksi.

Testimittauksen kohteessa oli erilaisia pintoja, joiden aiheuttamia virheitä tarkasteltiin. Heijastuvat ja kimpoilevat mittapisteet on yleensä helppo tunnistaa intensiteettiä perusteella, mutta on epäselvää, kuinka paljon nämä virheelliset mittapisteet vaikuttavat rekisteröintiin, jos niitä ei poisteta ennen rekisteröintiä. Yleensä tällaiset virheelliset mittapisteet poistetaan skannauksista ennen rekisteröintiä.

Takymetrin laitteen mittatarkkuus on erittäin hyvä eikä aiheuta suurta virhettä. GNSS-virhe puolestaan riippuu satelliittien määrästä ja RTK korjauspalvelun laadusta. Takymetrin tähtäys tai mittavirheitä voi esiintyä mitattaessa manuaalisesti sekä prisman kanssa.

Testimittauksessa oli tarkoitus tuottaa rekisteröintivirhe automaattisella sekä manuaalisella rekisteröinnillä, Cloud to Cloud menetelmällä niin ettei sitä voi tunnistaa ilman takymetri mittaukseen tehtävää vertailua. Opinnäytetyön tekijän aiemman kokemuksen perusteella virhe voi olla ohjelman raportissa muutamien millien luokkaa, mutta käytännössä isoissa pistepilvissä se voi olla jopa metrejä. Koska takymetrimittaus toimii kontrolloivana tekijänä, takymetrimittauksessa tapahtuvia mahdollisia virheitä haluttiin saada esiin.

7 MITTAUSTULOKSET

Mittavirheiden selvitystä varten pistepilvistä otettiin takymetrimittauksia vastaavat mittapisteet taulukon 2 tähyksille. Taulukoiden koordinaattien perusteella laskettavat eroavaisuudet poikkeavat REGISTER 360 ohjelman ilmoittamasta virhearvosta laskentatavan vuoksi. REGISTER 360 vertaa rekisteröinnin luomaa koordinaatistoa kontrollikoordinaatistoon. (Rinne, 2023) Tällöin rekisteröinnin liitosvirheet voivat vaikuttaa REGISTER 360 ilmoittamaan virhearvoon eikä mittapisteen arvot vastaa todellisuutta. Termi kontrollitiedosto on REGISTER 360 ohjelmaan tuotu takymetrimittaus tiedosto. Mittojen mittayksikkö on metri, ellei toisin mainita.

7.1 Takymetrimittaukset

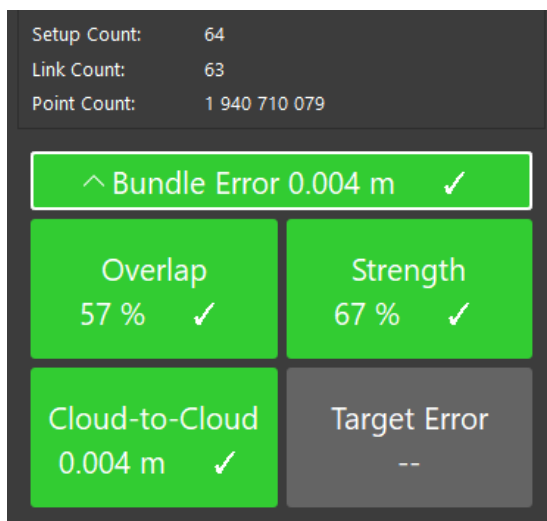
Takymetrin asemointiraportti on liitteessä 4. Takymetrimittauksen tulokset on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 3. Taulukkoon 2 otettiin kymmenen satunnaista mittaustulosta takymetrimittauksen joukosta. Takymetrimittaukset on ilmoitettu ETRS-GK27 tasokoordinaatistossa. Korkeusarvo on ilmoitettu N2000 korkeusjärjestelmässä. Itä ja Pohjoinen ovat yleisesti tunnettuja termejä maanmittauksen osa-alueella, ne kuvaavat koordinaattiarvoja vaaka sekä pysty suunnassa. Vastaavasti 3D suunnittelussa käytetään termejä X, Y, Z. 3D suunnittelun termi X vastaa maanmittauksen termiä Pohjoinen ja 3D suunnittelun termi Y vastaa maanmittauksen termiä Itä.

TAULUKKO 2. Kontrolliverkon takymetrimittauksia satunnainen kymmenen kappaleen otos.

Tähystunnus	Itä (Y)	Pohjoinen (X)	Korkeus (Z)
261	6841189.550	27513465.686	96.430
262	6841168.171	27513460.470	96.185
264	6841157.163	27513457.555	95.933
268	6841115.159	27513429.114	93.705
272	6841103.588	27513378.217	93.695
280	6841080.796	27513269.542	95.810
282	6841085.503	27513276.141	96.025
284	6841121.185	27513267.891	96.130
287	6841127.680	27513296.370	95.154
290	6841164.799	27513335.928	95.945

7.2 Automaattinen rekisteröinti

Skannausten rekisteröinti toteutettiin REGISTER 360 ohjelman automaattisella rekisteröinnillä. Automaattinen rekisteröinti valitaan jo skannauksia tuodessa ohjelmaan. Kuvassa 20 näkyy ohjelman ilmoittama rekisteröintitulokset. Kuvassa 21 on mustavalko tähyksien virhe kontrollipisteisiin nähden. Koska automaattisen rekisteröinnin virheet ilman kontrollikorjausta olivat suuret, sen pistepilvestä ei otettu mittapisteen koordinaatteja.



KUVA 20. Automaattirekisteröinnin ohjelman ilmoittama rekisteröintitulos. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Takymittaukset GK-27_N2000_siistitty

Applied To: [Bundle 1](#)
Mean Error: 0.109 m

Control Constraints

	Label ^	Setup	Error	Error Vector NEZ	Weight
✓	259	Mikkelin Painotalo- Scan.001	0.054 m	-0.031 -0.023 -0.038 m	1
✓	260	Mikkelin Painotalo- Scan.002	0.051 m	-0.031 -0.025 -0.032 m	1
✓	261	Mikkelin Painotalo- Scan.001	0.055 m	-0.029 -0.027 -0.039 m	1
✓	262	Mikkelin Painotalo- Scan.006	0.045 m	0.039 -0.002 -0.022 m	1
✓	265	Mikkelin Painotalo- Scan.007	0.044 m	0.038 -0.022 -0.002 m	1
✓	266	Mikkelin Painotalo- Scan.010	0.091 m	0.050 -0.073 0.021 m	1
✓	268	Mikkelin Painotalo- Scan.011	0.079 m	-0.072 0.003 0.030 m	1
✓	280	Mikkelin Painotalo- Scan.021	0.058 m	-0.056 -0.004 0.013 m	1
✓	281	Mikkelin Painotalo- Scan.021	0.204 m	0.123 0.162 -0.013 m	1
✓	282	Mikkelin Painotalo- Scan.021	0.198 m	0.116 0.160 -0.012 m	1
✓	285	Mikkelin Painotalo- Scan.024	0.080 m	0.021 -0.049 -0.060 m	1
✓	288	Mikkelin Painotalo- Scan.029	0.274 m	-0.103 -0.118 0.225 m	1
✓	288	Mikkelin Painotalo- Scan.029	0.099 m	0.024 -0.048 -0.083 m	1
✓	290	Mikkelin Painotalo- Scan.029	0.101 m	0.028 -0.047 -0.085 m	1
✓	291	Mikkelin Painotalo- Scan.039	0.285 m	-0.086 0.185 0.199 m	1
✓	291	Mikkelin Painotalo- Scan.039	0.066 m	-0.016 -0.036 -0.053 m	1
✓	291	Mikkelin Painotalo- Scan.038	0.064 m	-0.014 -0.037 -0.051 m	1

KUVA 21. Automaattisen rekisteröinnin mustavalko tähyksien virhe kontrollitiedostoon nähden. Lisätauksesta puuttuu tähyksiä, johtuen siitä, että virhearvo ylittää 300 mm rajan n. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Takymetrilla korjattu automaattinen rekisteröinti

Kuvassa 22 esitetään automaattisen rekisteröinnin tulokset kontrollikorjauksen jälkeen. Taulukossa 3 esitetään samojen 10 satunnaisen tähyksen koordinaatit pistepilvestä, jotka ovat kontrolliohjattuja. Tarkemmat tulokset löytyvät rekisteröintiraportista liitteestä 1. Liite 1 on koostettu osuus rekisteröintiraportista. Tässä liitteessä on rekisteröintiraportin oleellinen osuus.

Takymittaukset GK-27_N2000_siiistitty

Applied To: [Bundle 1](#)
Mean Error: 0.035 m

Control Constraints

	Label ^	Setup	Error	Error Vector NEZ	Weight
✓	259	Miikkelin Painotalo- Scan.001	0.007 m	0.001 0.004 0.006 m	1
✓	260	Miikkelin Painotalo- Scan.002	0.004 m	-0.001 0.001 0.003 m	1
✓	261	Miikkelin Painotalo- Scan.001	0.002 m	0.001 0.000 -0.001 m	1
✓	262	Miikkelin Painotalo- Scan.006	0.002 m	-0.001 0.001 0.002 m	1
✓	263	Miikkelin Painotalo- Scan.006	0.007 m	0.000 0.004 -0.006 m	1
✓	264	Miikkelin Painotalo- Scan.007	0.005 m	-0.001 0.004 -0.003 m	1
✓	264	Miikkelin Painotalo- Scan.006	0.003 m	0.001 -0.003 0.001 m	1
✓	265	Miikkelin Painotalo- Scan.007	0.005 m	-0.000 -0.004 0.002 m	1
✓	266	Miikkelin Painotalo- Scan.010	0.034 m	0.031 -0.015 0.002 m	1
✓	268	Miikkelin Painotalo- Scan.011	0.037 m	-0.034 0.015 0.000 m	1
✓	270	Miikkelin Painotalo- Scan.012	0.015 m	0.014 -0.006 0.000 m	1
✓	271	Miikkelin Painotalo- Scan.014	0.058 m	-0.054 0.021 -0.001 m	1
✓	272	Miikkelin Painotalo- Scan.014	0.025 m	0.025 -0.006 0.002 m	1
✓	273	Miikkelin Painotalo- Scan.014	0.033 m	0.029 -0.015 -0.002 m	1
✓	274	Miikkelin Painotalo- Scan.017	0.011 m	-0.000 0.011 0.001 m	1
✓	275	Miikkelin Painotalo- Scan.017	0.007 m	0.006 -0.004 -0.002 m	1
✓	276	Miikkelin Painotalo- Scan.017	0.009 m	-0.006 -0.006 0.001 m	1
✓	277	Miikkelin Painotalo- Scan.019	0.003 m	-0.003 0.000 -0.002 m	1
✓	278	Miikkelin Painotalo- Scan.019	0.003 m	-0.003 0.001 -0.000 m	1
✓	279	Miikkelin Painotalo- Scan.019	0.004 m	0.003 -0.001 0.002 m	1
✓	280	Miikkelin Painotalo- Scan.021	0.164 m	-0.122 -0.110 0.010 m	1
✓	281	Miikkelin Painotalo- Scan.021	0.081 m	0.057 0.056 -0.006 m	1
✓	282	Miikkelin Painotalo- Scan.021	0.074 m	0.050 0.054 -0.006 m	1
✓	283	Miikkelin Painotalo- Scan.024	0.025 m	0.025 -0.000 0.003 m	1
✓	284	Miikkelin Painotalo- Scan.024	0.024 m	0.024 0.003 0.004 m	1
✓	285	Miikkelin Painotalo- Scan.024	0.021 m	-0.020 0.004 -0.003 m	1
✓	286	Miikkelin Painotalo- Scan.026	0.010 m	-0.009 -0.005 -0.002 m	1
✓	287	Miikkelin Painotalo- Scan.026	0.011 m	-0.008 -0.004 -0.006 m	1
✓	288	Miikkelin Painotalo- Scan.029	0.217 m	-0.079 -0.049 0.196 m	1
✓	288	Miikkelin Painotalo- Scan.029	0.123 m	0.047 0.019 -0.112 m	1
✓	290	Miikkelin Painotalo- Scan.029	0.091 m	0.032 0.030 -0.080 m	1
✓	291	Miikkelin Painotalo- Scan.038	0.032 m	-0.010 0.020 0.023 m	1
✓	291	Miikkelin Painotalo- Scan.039	0.018 m	0.001 -0.011 -0.014 m	1
✓	292	Miikkelin Painotalo- Scan.039	0.016 m	0.005 -0.008 -0.013 m	1

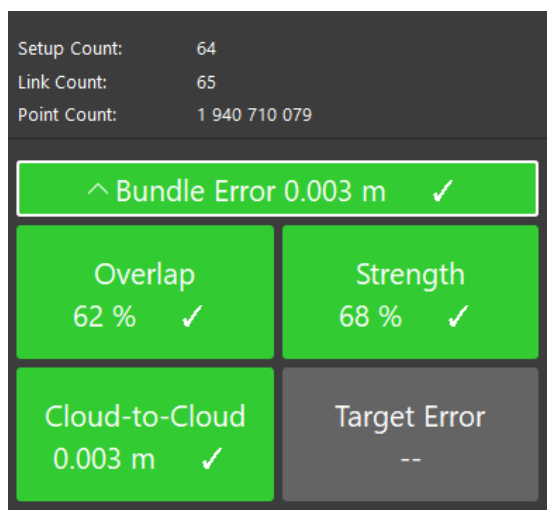
KUVA 22. Automaattisen rekisteröinnin kontrollivirheet kontrollitiedostoon nähden kontrollikorjauksen jälkeen. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Taulukko 3. Automaattisen rekisteröinnin tähyksien koordinaattien arvot pistepilvessä kontrollikortin jälkeen.

Tähystunnus	Itä (Y)	Pohjoinen (X)	Korkeus (Z)
261	6841189.549	27513465.686	96.431
262	6841168.172	27513460.469	96.183
264	6841157.162	27513457.558	95.932
268	6841115.195	27513429.105	93.705
272	6841103.563	27513378.218	93.693
280	6841080.897	27513269.671	95.800
282	6841085.463	27513276.08	96.031
284	6841121.162	27513267.884	96.126
287	6841127.687	27513296.375	95.16
290	6841164.772	27513335.893	96.025

7.3 Manuaalinen rekisteröinti

Skannaukset tuotiin REGISTER 360 ohjelmaan. Kun skannatessa on käytetty FIELD 360 ohjelmaa esirekisteröintiin, tämä tieto tallentuu raakadatan mukaan. Manuaalisessa rekisteröinnissä jokaiselle skannaukselle luotiin liitos toisen skannauksen kanssa Cloud to Cloud menetelmällä. Skannaukset rekisteröitiin ketjutettuna, skannaus 1 <-> skannaus 2 tyypisesti, kohteen luonteen vuoksi. Kuvassa 23 näkyy ohjelman ilmoittama rekisteröintitulokset. Kuvassa 24 on mustavalko tähyksien virhe kontrollipisteisiin nähden. Taulukossa 4 esitetään samojen 10 satunnaisen tähyksen koordinaatit pistepilvestä, joilla ei ole kontrolliohjausta.



KUVA 23. Manuaalirekisteröinnin ohjelman ilmoittama rekisteröintitulokset. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Takymittaukset GK-27_N2000_siistitty

Applied To: [Bundle 1](#)
Mean Error: 0.051 m

Control Constraints

	Label ^	Setup	Error	Error Vector NEZ	Weight
<input checked="" type="checkbox"/>	259	Mikkelin Painotalo- Scan.001	0.035 m	-0.033 -0.013 0.002 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	260	Mikkelin Painotalo- Scan.002	0.036 m	-0.032 -0.016 -0.001 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	261	Mikkelin Painotalo- Scan.001	0.036 m	-0.032 -0.016 0.005 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	262	Mikkelin Painotalo- Scan.006	0.037 m	0.035 0.009 -0.005 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	263	Mikkelin Painotalo- Scan.006	0.041 m	0.038 0.008 -0.012 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	264	Mikkelin Painotalo- Scan.006	0.038 m	0.037 -0.001 -0.010 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	264	Mikkelin Painotalo- Scan.007	0.034 m	0.033 -0.001 -0.007 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	265	Mikkelin Painotalo- Scan.007	0.036 m	0.034 -0.009 -0.007 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	266	Mikkelin Painotalo- Scan.010	0.076 m	0.046 -0.059 -0.015 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	268	Mikkelin Painotalo- Scan.011	0.078 m	-0.074 0.021 -0.011 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	270	Mikkelin Painotalo- Scan.012	0.086 m	-0.083 0.021 -0.009 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	271	Mikkelin Painotalo- Scan.014	0.111 m	-0.108 0.027 0.005 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	272	Mikkelin Painotalo- Scan.014	0.031 m	-0.030 -0.006 0.005 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	273	Mikkelin Painotalo- Scan.014	0.025 m	-0.019 -0.016 0.005 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	274	Mikkelin Painotalo- Scan.017	0.028 m	-0.022 0.001 0.017 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	275	Mikkelin Painotalo- Scan.017	0.022 m	-0.008 -0.013 0.015 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	276	Mikkelin Painotalo- Scan.017	0.025 m	-0.015 -0.014 0.013 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	277	Mikkelin Painotalo- Scan.019	0.023 m	-0.003 -0.013 0.019 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	278	Mikkelin Painotalo- Scan.019	0.025 m	-0.003 -0.012 0.021 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	279	Mikkelin Painotalo- Scan.019	0.023 m	0.000 -0.012 0.019 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	280	Mikkelin Painotalo- Scan.021	0.062 m	-0.060 0.013 -0.008 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	281	Mikkelin Painotalo- Scan.021	0.217 m	0.119 0.179 -0.030 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	282	Mikkelin Painotalo- Scan.021	0.211 m	0.112 0.177 -0.028 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	283	Mikkelin Painotalo- Scan.024	0.031 m	0.017 -0.025 -0.007 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	284	Mikkelin Painotalo- Scan.024	0.031 m	0.017 -0.025 -0.007 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	285	Mikkelin Painotalo- Scan.024	0.036 m	0.017 -0.031 -0.008 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	286	Mikkelin Painotalo- Scan.026	0.030 m	0.018 -0.023 -0.007 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	287	Mikkelin Painotalo- Scan.026	0.028 m	0.018 -0.021 -0.006 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	288	Mikkelin Painotalo- Scan.029	0.037 m	0.019 -0.030 0.010 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	290	Mikkelin Painotalo- Scan.029	0.039 m	0.024 -0.029 0.007 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	291	Mikkelin Painotalo- Scan.038	0.035 m	-0.022 -0.025 0.012 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	291	Mikkelin Painotalo- Scan.039	0.035 m	-0.023 -0.024 0.010 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	292	Mikkelin Painotalo- Scan.039	0.030 m	-0.018 -0.022 0.010 m	1

KUVA 24. Manuaalisen rekisteröinnin mustavalko tähyksien virhe kontrollitiedostoon nähden. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Taulukko 4. Manuaalisen rekisteröinnin tähyksien koordinaattien arvot pistepilvessä, joilla ei ole kontrolliohjausta.

261	27513465.708	6841189.579	96.425
262	27513460.455	6841168.138	96.190
264	27513457.550	6841157.126	95.943
268	27513429.106	6841115.236	93.716
272	27513378.228	6841103.617	93.690
280	27513269.539	6841080.858	95.818
282	27513275.947	6841085.423	96.053
284	27513267.912	6841121.164	96.137
287	27513296.387	6841127.659	95.160
290	27513335.953	6841164.770	95.938

Takymetrilla korjattu manuaalinen rekisteröinti

Kuvassa 25 esitetään automaattisen rekisteröinnin tulokset kontrollikorjauksen jälkeen. Tarkemmat tulokset löytyvät rekisteröintiraportista liitteestä 2. Liite 2 on koostettu osuus rekisteröintiraportista. Tässä liitteessä on rekisteröintiraportin oleellinen osuus. Taulukossa 5 esitetään samojen 10 satunnaisen tähyksen koordinaatit pistepilvestä, joilla on kontrolliohjaus.

Taulukko 5. Manuaalisen rekisteröinnin tähyksien koordinaattien arvot pistepilvessä kontrollikorjauksen jälkeen.

Tähystunnus	Itä (Y)	Pohjoinen (X)	Korkeus (Z)
261	6841189.550	27513465.687	96.429
262	6841168.173	27513460.467	96.182
264	6841157.162	27513457.559	95.933
268	6841115.200	27513429.106	93.706
272	6841103.563	27513378.218	93.695
280	6841080.890	27513269.670	95.795
282	6841085.458	27513276.077	96.033
284	6841121.190	27513267.891	96.129
287	6841127.681	27513296.368	95.153
290	6841164.796	27513335.927	95.947

Takymittaukset GK-27_N2000_siistitty

Applied To: [Bundle 1](#)

Mean Error: 0.019 m

Control Constraints

	Label ^	Setup	Error	Error Vector NEZ	Weight
<input checked="" type="checkbox"/>	259	Mikkelin Painotalo- Scan.001	0.002 m	0.000 0.002 -0.000 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	260	Mikkelin Painotalo- Scan.002	0.002 m	-0.001 -0.001 -0.001 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	261	Mikkelin Painotalo- Scan.001	0.001 m	0.000 -0.001 0.001 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	262	Mikkelin Painotalo- Scan.006	0.004 m	-0.001 0.003 0.003 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	263	Mikkelin Painotalo- Scan.006	0.005 m	0.001 0.004 -0.003 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	264	Mikkelin Painotalo- Scan.006	0.004 m	0.000 -0.004 -0.000 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	264	Mikkelin Painotalo- Scan.007	0.004 m	-0.001 0.004 0.000 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	265	Mikkelin Painotalo- Scan.007	0.005 m	0.000 -0.005 -0.000 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	266	Mikkelin Painotalo- Scan.010	0.045 m	0.039 -0.023 -0.000 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	268	Mikkelin Painotalo- Scan.011	0.041 m	-0.039 0.015 -0.001 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	270	Mikkelin Painotalo- Scan.012	0.001 m	0.001 0.000 0.000 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	271	Mikkelin Painotalo- Scan.014	0.059 m	-0.055 0.023 0.000 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	272	Mikkelin Painotalo- Scan.014	0.025 m	0.024 -0.006 0.000 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	273	Mikkelin Painotalo- Scan.014	0.034 m	0.030 -0.015 -0.000 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	274	Mikkelin Painotalo- Scan.017	0.011 m	-0.007 0.008 0.001 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	275	Mikkelin Painotalo- Scan.017	0.007 m	0.006 -0.004 0.000 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	276	Mikkelin Painotalo- Scan.017	0.004 m	0.001 -0.004 -0.001 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	277	Mikkelin Painotalo- Scan.019	0.002 m	-0.002 -0.001 -0.000 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	278	Mikkelin Painotalo- Scan.019	0.003 m	-0.002 0.001 0.001 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	279	Mikkelin Painotalo- Scan.019	0.002 m	0.002 0.001 -0.001 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	280	Mikkelin Painotalo- Scan.021	0.159 m	-0.115 -0.110 0.015 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	281	Mikkelin Painotalo- Scan.021	0.086 m	0.063 0.058 -0.009 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	282	Mikkelin Painotalo- Scan.021	0.079 m	0.056 0.056 -0.008 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	283	Mikkelin Painotalo- Scan.024	0.006 m	-0.005 0.002 0.001 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	284	Mikkelin Painotalo- Scan.024	0.005 m	-0.005 0.001 0.001 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	285	Mikkelin Painotalo- Scan.024	0.013 m	0.010 -0.008 -0.002 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	286	Mikkelin Painotalo- Scan.026	0.001 m	-0.000 -0.000 -0.000 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	287	Mikkelin Painotalo- Scan.026	0.003 m	-0.000 0.002 0.001 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	288	Mikkelin Painotalo- Scan.029	0.003 m	-0.002 0.000 0.001 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	290	Mikkelin Painotalo- Scan.029	0.003 m	0.003 0.000 -0.002 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	291	Mikkelin Painotalo- Scan.039	0.003 m	-0.002 0.001 0.001 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	291	Mikkelin Painotalo- Scan.038	0.002 m	-0.001 0.001 0.002 m	1
<input checked="" type="checkbox"/>	292	Mikkelin Painotalo- Scan.039	0.002 m	0.002 -0.000 -0.001 m	1

KUVA 25. Manuaalisen rekisteröinnin kontrollivirheet kontrollitiedostoon nähden kontrollikorjauksen jälkeen. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

8 TULOSTEN ANALYSOINTI

Mittaustuloksista havaittiin, että rekisteröinti ohjelman ilmoittama virhe cloud to cloud liitoksille on suhteellisen pieni verrattuna kontrollipisteiden virheisiin. Takymetrilla luodussa kontrolliverkossa ilmeni suuria mittavirheitä pistepilven koordinaatistoon verrattuna, joka nostattaa virhearvoa globaalien koordinaattien vertailussa sekä pistepilven ja kontrollin välillä.

Rekisteröinnin tuloksia vertailemalla voidaan todeta, ettei automaattinen rekisteröinti onnistu luomaan yhtä tarkkaa rekisteröintiä kuin manuaalinen rekisteröinti. Manuaalinen rekisteröinti kykenee tekemään liitoksista tarkempia, mutta kokonaisuuden tarkkuus ei riitä. Kokonaisuuden tarkkuustavoitteena oli ylittää standardin PSK 3402 mukaiseen tarkkuuteen yksityiskohtaisessa suunnittelussa, joka on $\pm 5 \text{ mm} / \pm 10 \text{ mm}$ (PSK 3402 2. painos, 2021)

8.1 Rekisteröinnin virheiden synty

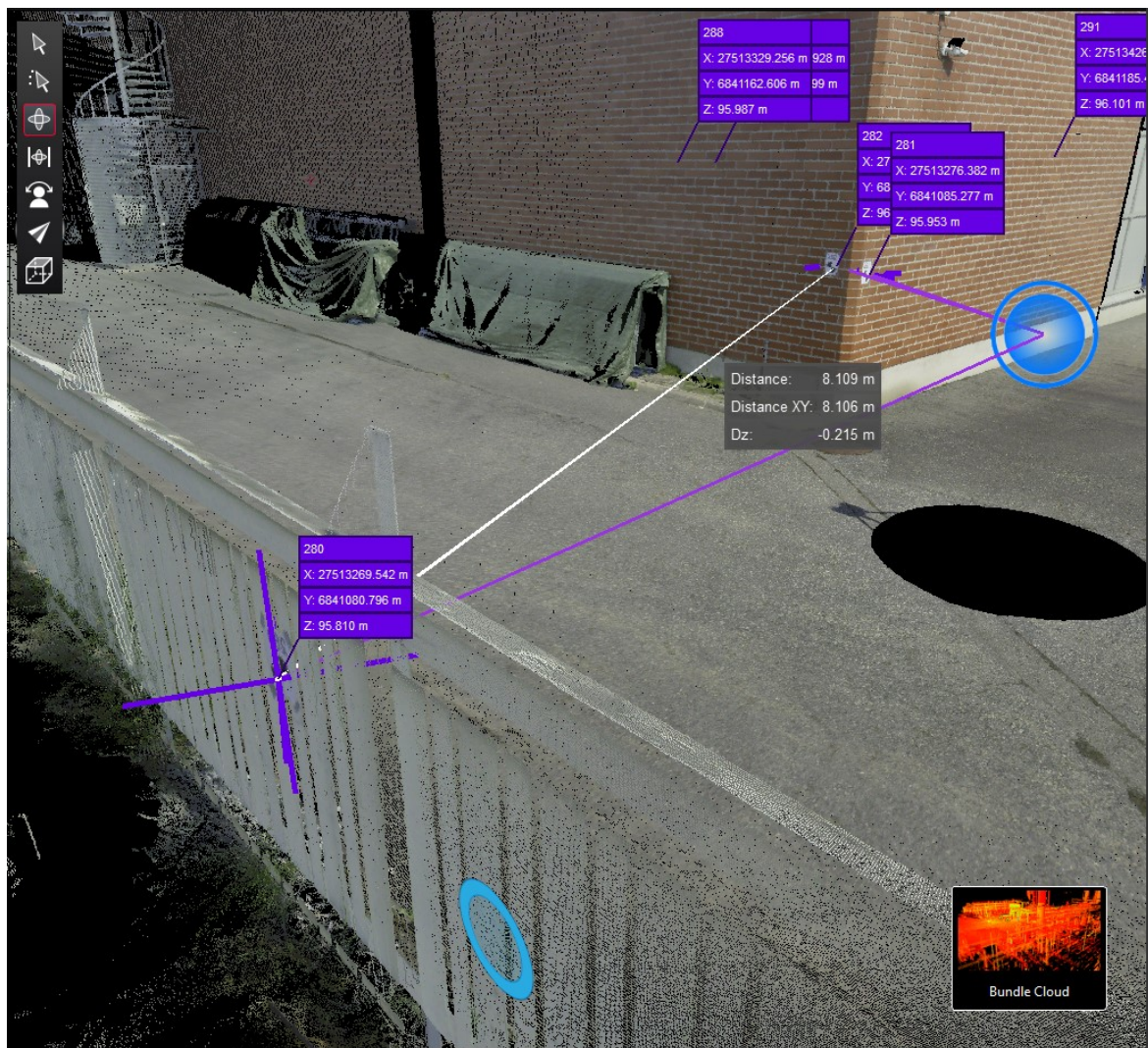
REGISTER 360 ohjelman automaattinen rekisteröinti kuin myös manuaalisen rekisteröinnin cloud to cloud pohjautuu ICP algoritmiin, joka tuottaa omat haasteensa. Testimittauksessa käytössä oli FIELD 360 esirekisteröinti ohjelma sekä Leica RTC360 skanneri. Tällöin REGISTER 360 hyödyntää FIELD 360 esirekisteröintiä sekä Leica RTC360 skannerin VIS ominaisuutta.

REGISTER 360 ohjelman automaattinen rekisteröinti pyrkii sovittamaan pistepilvet päällekkäin niin että pisteet olisivat mahdollisimman laaja-alaisesti päällekkäin keskenään. Tämä pakottaa automaattisen rekisteröinnin tekemään kompromisseja mitkä eivät aina ole optimaalisia tai oikeita. Testikohde sisältää ulkoskannauksia, jotka eivät ole olosuhteiltaan stabiileja. Kasvillisuuden liike, muu kulkeva liikenne aiheuttaa virheellisiä mittapisteitä.

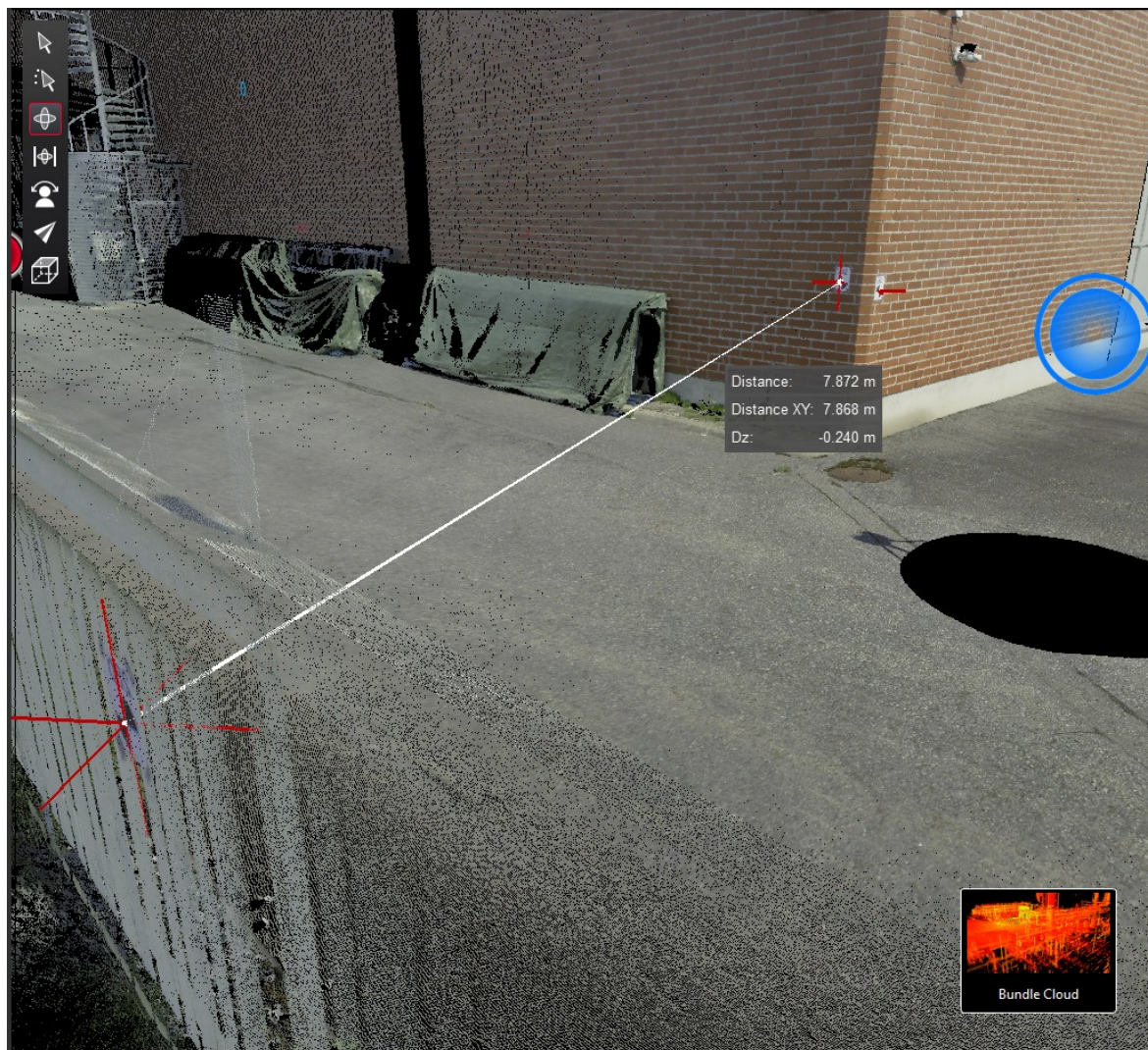
Cloud to Cloud rekisteröinnin ongelmat ovat manuaaliselle rekisteröintitavalle sekä automaattiselle yhteisiä. Manuaalisessa rekisteröinnissä ohjelma antaa enemmän painoarvoa käyttäjän määrittelemälle liitokselle, jolloin päästään parempiin tuloksiin.

8.2 Takymetrilla luotu kontrolliohjaus

Osa takymetrimittattuja kontrollipisteitä ei voida pitää luotettavina, liian suuren virhearvon vuoksi. Suurimman virheen omaaville tähyksille tehtiin mittapisteiden välinen mittaus Leica Cyclone REGISTER 360 ohjelman measure työkalulla takymetrin kontrollipisteille kuvassa 26. Vastaava mittapisteiden välinen mittaus tehtiin Leica REGISTER 360 ohjelmassa yksittäisestä skannauksesta kuten kuvassa 27 näkyy. Suurimmat mittavirheet jäivät tähyksille 280, 281, 282. Epäluotettavuuden rajana käytettiin 10 mm virhearvoa, jos suurelle virhearvolle ei löydy selkeää hyväksyttävää syytä.



KUVA 26. Kuvakaappaus etäisyydsmittauksesta Leica Cyclone REGISTER 360 ohjelmassa. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

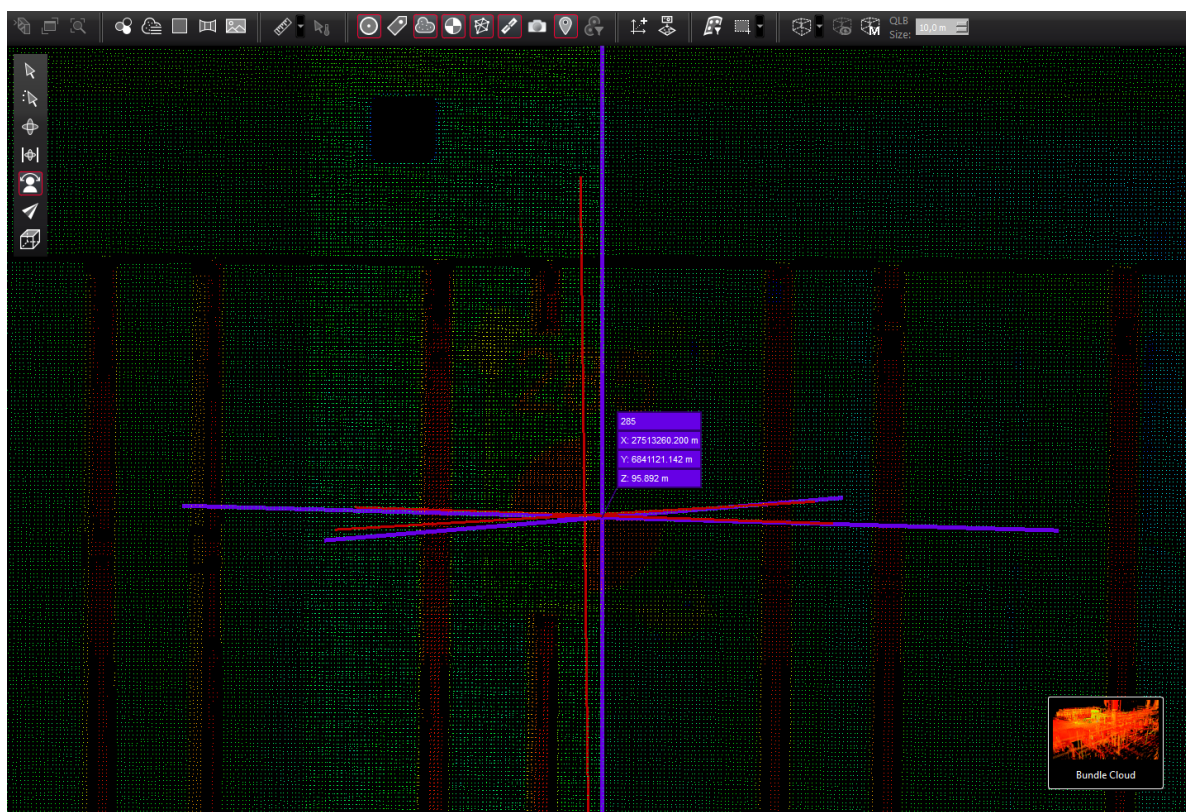


KUVA 27. Kuvakaappaus etäisyysmittauksesta Leica Cyclone REGISTER 360 ohjelmassa. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Tähyksien 280 ja 282 välinen suora etäisyys takymetrimittauksen perusteella on 8,109 metriä. Tähyksien 280 ja 282 välinen suora etäisyys yksittäisen skannauksen perusteella on 7,872 metriä. Etäisyys laserskannerin ja tähyksien välillä on maksimissaan 5,4 metriä tässä kohtaa kaukaisin tähyks on 280. Vastaavasti Takymetrin etäisyys kaukaisimpaan tähykseen 282 on maksimissaan 4,8 metriä. Takymetri mittaus on 23,7 senttimetriä pitempi kuin yksittäisen skannauksen mitta. Tähyksen 281 välimatkat skannerista tähyksen vektoriin mitattiin Leica REGISTER 360 ohjelmassa. Takymetrin mittapisteen etäisyys on 3,470 metriä. Laserskannerin mittapisteen etäisyys on 3,304 metriä. Takymetrin mittaus on 16,6 cm pitempi kuin laserskannerin.

Mittalaitteet ovat olleet mittaushetkellä kalibroituja, eikä skannauksesta löydy selkeää vikaa, joten takymetrimitatuille pisteillä 280, 281, 282 on etäisyysvinouma. Mittapisteen 280, 281, 282 on mitattu samalta asemapisteltä, jolloin virhe on tapahtunut kyseisellä asemapistellä.

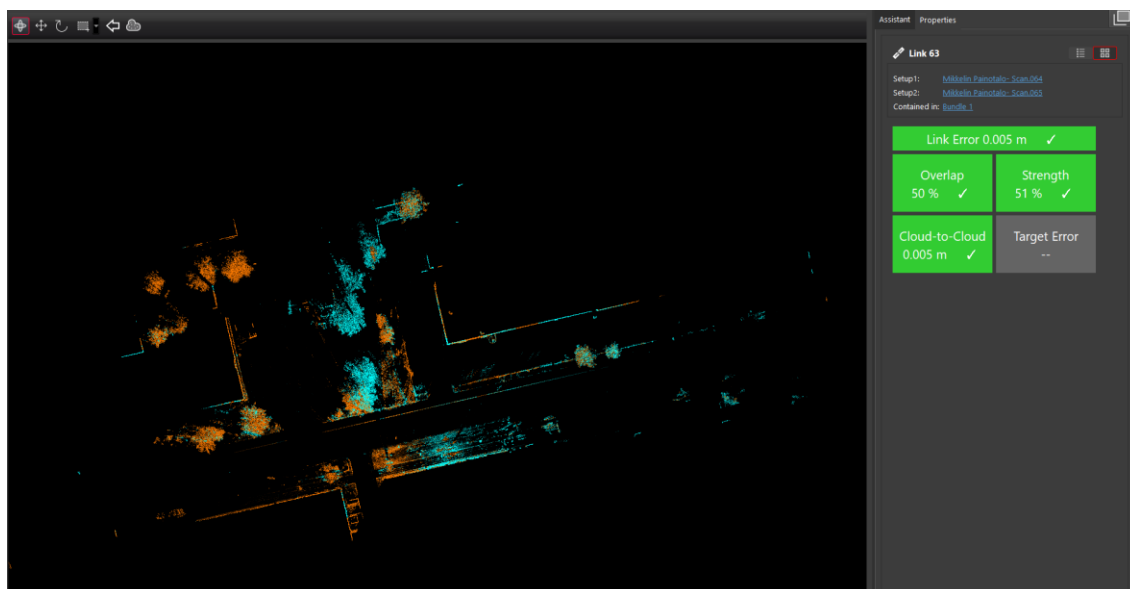
Tähykset 274, 273, 272, 271, 268 on mitattu samalta asemapisteeltä hyödyntäen mittasauvassa olevaa Leican MRP 122 360° prismaa. Prismen korkeus mittasauvassa oli 1,8 metriä, jolloin sauvan suorassa pysyminen täytyy olla vakaata mittauksia tehdessä. Näiden pisteiden mittavirheen aiheuttajana on todennäköisesti prisma-sauvan kallistuminen, lämpöväreily tai näiden yhteisvaikutus. Tähyks 266 on myös mitattu samalta asemapisteeltä, mutta mittaus tehtiin manuaali mittauksella. Tähykselle on todennäköisesti tullut etäisyysvinouma. Tähyks 285 on mitattu eri asemapisteeltä, takymetri-mittaus on hieman sivussa laserskannauksen tähykseen nähden kuten on esitetty kuvassa 28. Tähykselle 285 on todennäköisesti käynyt inhimillinen tähtäysvirhe parallaksi virheen vuoksi.



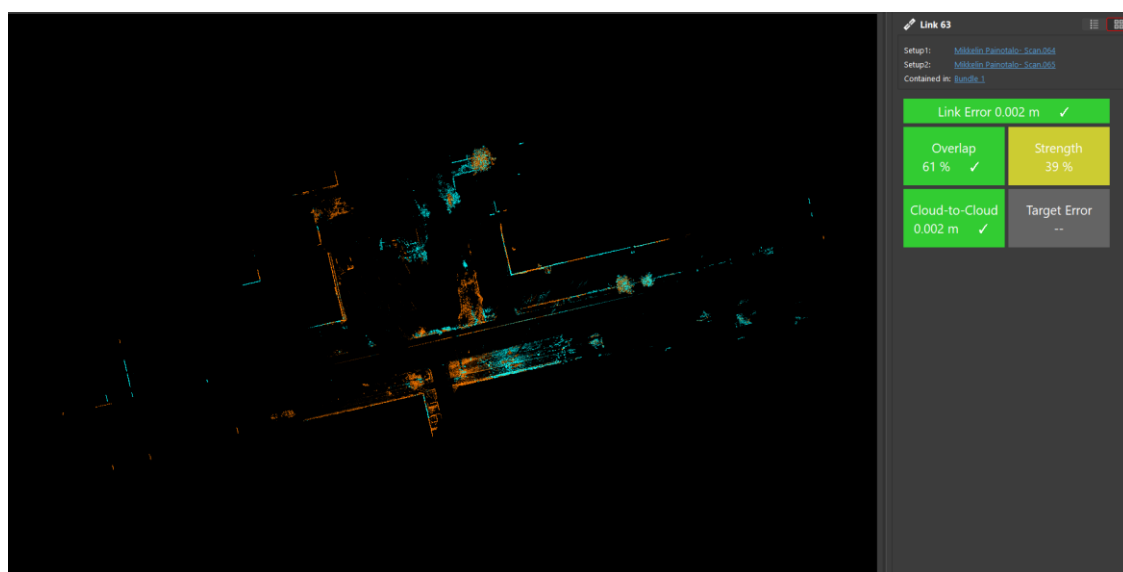
KUVA 28. Tähyksen 285 sivuttavirhe kontrollimittauksen ja rekisteröintihjelman kesken. Sininen ristikko on kontrollimittaus, punainen rekisteröintihjelman tunnistama. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

8.3 Cloud to Cloud rekisteröinti

Virhearvon laskenta perustuu RMS kaavaan. (Rinne, 2023) Cloud to cloud rekisteröinti algoritmi käy läpi skannaukset, joissa on mittapisteitä keskimäärin 22 miljoonaa kappaletta. Ulkoskannauksissa suurin osa voi olla kasvillisuutta, joka nostaa RMS virhearvoa. Esimerkiksi puun lehti ei ole täysin samassa kohtaa kuin kolme minuuttia sitten. Tällaiset pienet erot, mutta paljon mittapisteitä keräävät kohteet nostattavat RMS kaavan luomaa virhearvoa. Kasvillisuutta poistamalla voidaan virhearvoa pienentää ilman että cloud to cloud algoritmi ryhtyy korjaamaan skannausten asentoa kasvillisuuden perusteella. Kuvilla 29 ja 30 havainnollistetaan kuinka pelkkää kasvillisuutta poistamalla cloud to cloud liitoksen virhettä saadaan pienennettyä.



KUVA 29. Cloud to cloud liitoksen lähtötilanne. Pistepilvien keskinäinen vastaavuus on hyvä, mutta virhearvo on 5 millimetriä. (Vasara, 2023, CC BY-ND)



KUVA 30. Cloud to cloud liitoksen tilanne muokkauksen jälkeen. Pistepilvien keskinäinen vastaavuus on hyvä, mutta virhearvo on 2 millimetriä. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Vaikka liitoksen Vahvuusarvo tippui 51 prosentista 39 prosenttiin, kuitenkin liitoksen virhearvo pieni 2 millimetriin pelkästään kasvillisuutta poistamalla.

Vahvuusarvo perustuu virheiden jakautumisesta eri komponenttien suunnassa X, Y,Z. Virheet normalisoidaan vahvimman suunnan mukaan. (Rinne, 2023)

8.4 Georeferoitujen pistepilvien koordinaatti arvojen vertailu

Koordinaattien välinen vertailu toteutettiin niin että rekisteröidystä ja georeferoidusta pistepilvestä otettiin tähyksien laskennallisen keskipisteen koordinaatit ja näitä verrattiin takymetrimittauksiin. Koordinaattivertailu tehtiin kaikille mittapisteille ja ne ovat liitteinä 5 ja 6. Alla olevat taulukot koostuvat kymmenestä mittapisteestä. Taulukoiden 6 ja 7 tulokset on laskettu yksinkertaisesti vähennyslaskuna, takymetrimittattu mittapiste – pistepilven mittapiste. Taulukossa 6 on esitetty manuaalisen rekisteröinnin vertailu, taulukossa 7 on automaattisen rekisteröinnin vertailu.

Taulukko 6. Manuaalisen rekisteröinnin tähyksien virhe takymetrimittauksiin nähden.

Tähystunnus	X	Y	Korkeus (Z)	Virhe vektorisuureena
261	-0,001	0,000	0,001	0,001
262	0,003	-0,002	0,003	0,005
264	-0,004	0,001	0,000	0,004
268	0,008	-0,041	-0,001	0,042
272	-0,001	0,025	0,000	0,025
280	-0,128	-0,094	0,015	0,160
282	0,064	0,045	-0,008	0,079
284	0,000	-0,005	0,001	0,005
287	0,002	-0,001	0,001	0,002
290	0,001	0,003	-0,002	0,004

Taulukko 7. Automaattisen rekisteröinnin tähyksien virhe takymetrimittauksiin nähden.

Tähystunnus	X	Y	Korkeus (Z)	Virhe vektorisuureena
261	0,000	0,001	-0,001	0,001
262	0,001	-0,001	0,002	0,002
264	-0,003	0,001	0,001	0,003
268	0,009	-0,036	0,000	0,037
272	-0,001	0,025	0,002	0,025
280	-0,129	-0,101	0,010	0,164
282	0,061	0,040	-0,006	0,073
284	0,007	0,023	0,004	0,024
287	-0,005	-0,007	-0,006	0,010
290	0,035	0,027	-0,080	0,091

Mittaeroja vertailemalla huomattiin manuaalisen rekisteröinnin parempi tarkkuus verrattuna automaattiseen rekisteröintiin. Taulukoista voidaan huomata kuinka virheellinen takymetri mittaus tähykselle 280 korostuu suurena virhearvona. Koordinaattien eroavaisuuksien vertailu muun muassa keskiarvo laskennalla kaikkien tähyksien kesken on alle millimetrin luokkaa. REGISTER 360 ohjelman ilmoittama mean error kontrollipisteiden yhteydessä kuvastaa hyvin pistepilven sisäistä virhettä globaaleihin koordinaatteihin nähden.

8.5 Manuaalisesti rekisteröidyn pistepilven koordinaatti arvojen vertailu

Tätä manuaalista rekisteröintiä ei ole georeferoitu. Vertailu tehtiin samalla tavalla kuin georeferoiduille pistepilville. Manuaalisesti rekisteröidystä pistepilvestä otettiin tähyksien laskennallisen keskipisteen koordinaatit ja näitä verrattiin takymetrimittauksiin. Tämän avulla saatiin selkeä käsitys, kuinka paljon manuaalisesti rekisteröidystä pistepilvestä mitatut pisteet eroavat takymetrimittattuihin pisteisiin. Koordinaattivertailu tehtiin kaikille mittapisteille ja ne ovat liitteenä 7. Alla olevassa taulukossa 8 on esitetty kymmenen mittapisteen koordinaattierot.

Taulukko 8. Manuaalisen rekisteröinnin tähyksien virhe takymetrimittauksiin nähden.

Tähystunnus	X	Y	Korkeus (Z)	Virhe vektorisuurena
261	-0,022	-0,029	0,005	0,037
262	0,015	0,033	-0,005	0,037
264	0,005	0,037	-0,01	0,039
268	0,008	-0,077	-0,011	0,078
272	-0,011	-0,029	0,005	0,031
280	0,003	-0,062	-0,008	0,063
282	0,194	0,08	-0,028	0,212
284	-0,021	0,021	-0,007	0,031
287	-0,017	0,021	-0,006	0,028
290	-0,025	0,029	0,007	0,039

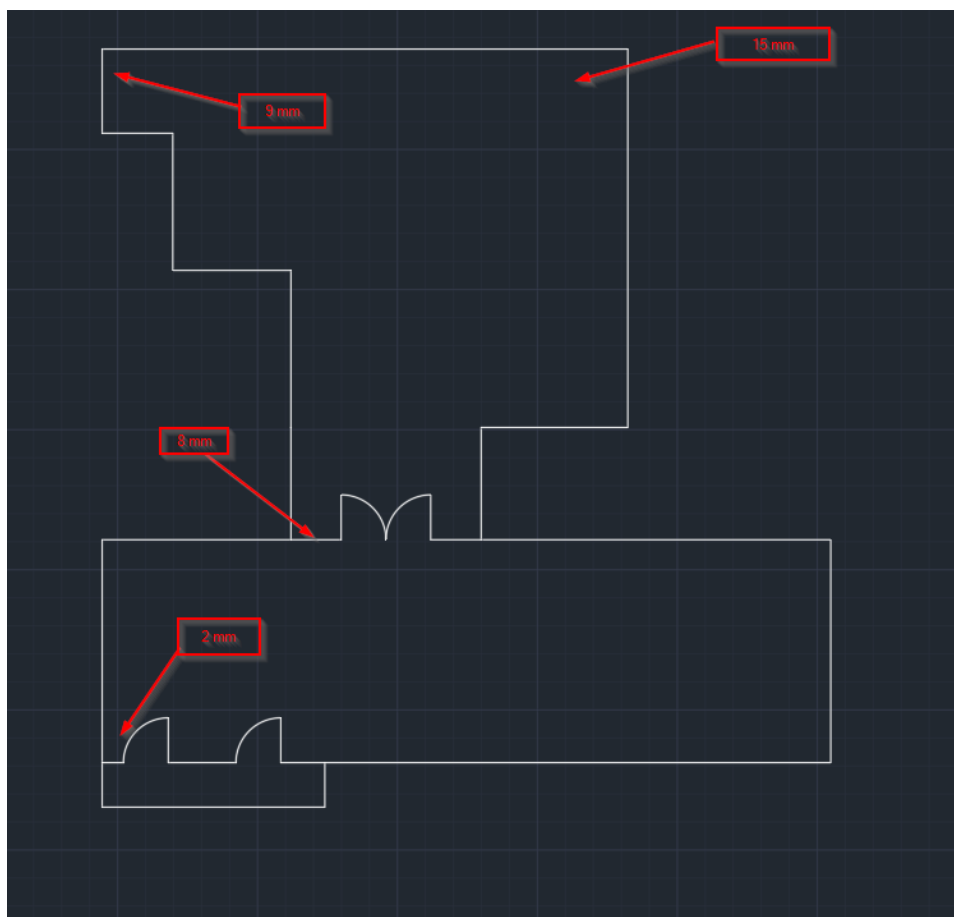
Manuaalisesti rekisteröity pistepilvi on silmämääräisesti ja rekisteröintitulosten perusteella laadukas, mutta Cloud to Cloud liitoksissa tapahtuu pieniä kulman muutoksia mitkä aiheuttavat kulmavirheitä, jotka yksittäisessä liitoksessa eivät näy, mutta useamman rekisteröintiliitoksen jälkeen pieni kulmavirhe aiheuttaa suuren mittavirheen.

9 VERTAILU KOHTEITA

Opinnäytetyön pohdinnan tueksi otettiin kaksi vertailukohdetta. Vertailukohteina toimii kohteet A ja B. Kohteet ovat projektikohteita, joita ei ole toteutettu tutkimus käyttöön. Näistä kohteista kuitenkin saadaan hyvä käsitys, miten laserskannauksen virheet muodostuvat käytännössä ammattitaitoisella henkilöstöllä. Vertailukohteiden takymetrimittauksen on tehnyt maanmittauksen ammattilainen, jonka vuoksi vertailuaineiston tarkkuuksia voidaan pitää validina. Vertailukohteista mitattiin kontrollipisteiden virhe Cloud to Cloud rekisteröintiin nähden, josta voidaan päätellä missä virhe syntyy.

9.1 Vertailukohde A

Kohde A on toteutettu laitosympäristössä sisätiloissa lyhyillä välimatkoilla, mutta mittatarkkuus ei yllä vaadittuun tarkkuuteen sisään ilman takymetrin tuottamaa kontrolliohjausta. Kuvassa 31 on merkittynä keskimääräinen kontrollipiste virhe cloud to cloud liitokselle.

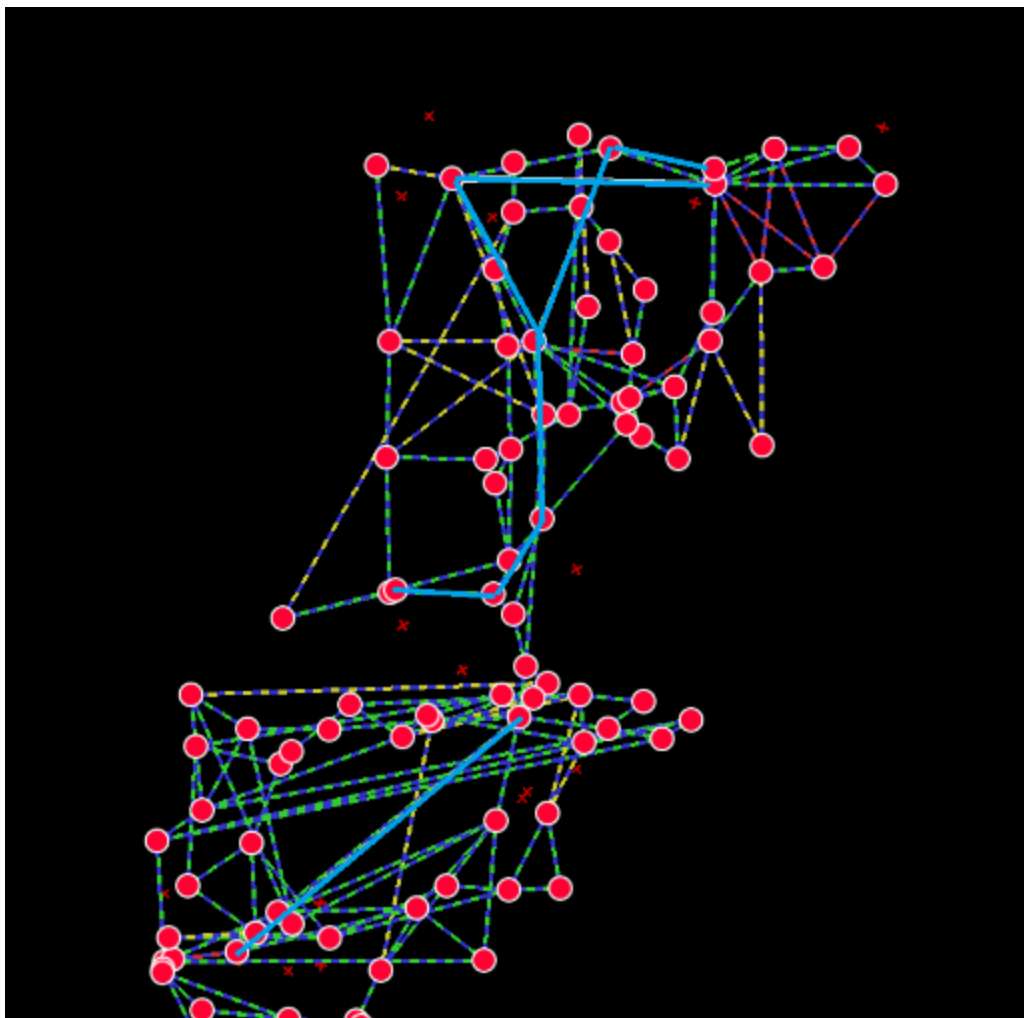


KUVA 31. Kohteen A kontrollipisteiden virhe eri kohdissa rakennusta. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Kuten kuvasta 31 huomataan, laserskannauksen siirtyessä tilasta toiseen, virheen määrä kasvaa, vaikka välimatkat rakennuksen sisällä eivät ole suuret. Suurimmat ongelmakohdat ovat oviaukot, kun siirrytään tilasta toiseen. Kontrollikorjauksella kohteen virhearvot tähyksille asettuvat 4 millimetrin keskiarvolle. Oviaukot on skannattu useammalla skannauksella, jotta saataisiin katettua mahdollisimman paljon molempia tiloja.

Kohteessa on paljon kiiltäviä putkia, jotka aiheuttivat aineistoon paljon heijastumia eli virhepisteitä, joka nostattaa RMS arvoa sekä voi aiheuttaa kulmavirheitä cloud to cloud liitoksiin.

Kuvassa 32 näkyy cloud to cloud rekisteröinnin linkitysketju. Ketjuun on merkitty sinisellä ne cloud to cloud liitokset mitkä aiheuttavat kulmavirheen, jos kyseisiä liitoksia optimoidaan cloud to cloud algoritmeilla. Tämä havainnollistaa kuinka muutaman arkkiminuutin kulmavirhe kertaantuu pidemmälle mentäessä. Kuvassa 32 näkyvät kontrollipisteiden virheet asettuvat sinisen viivan reitille, alkaen kuvan 32 alalaidasta.

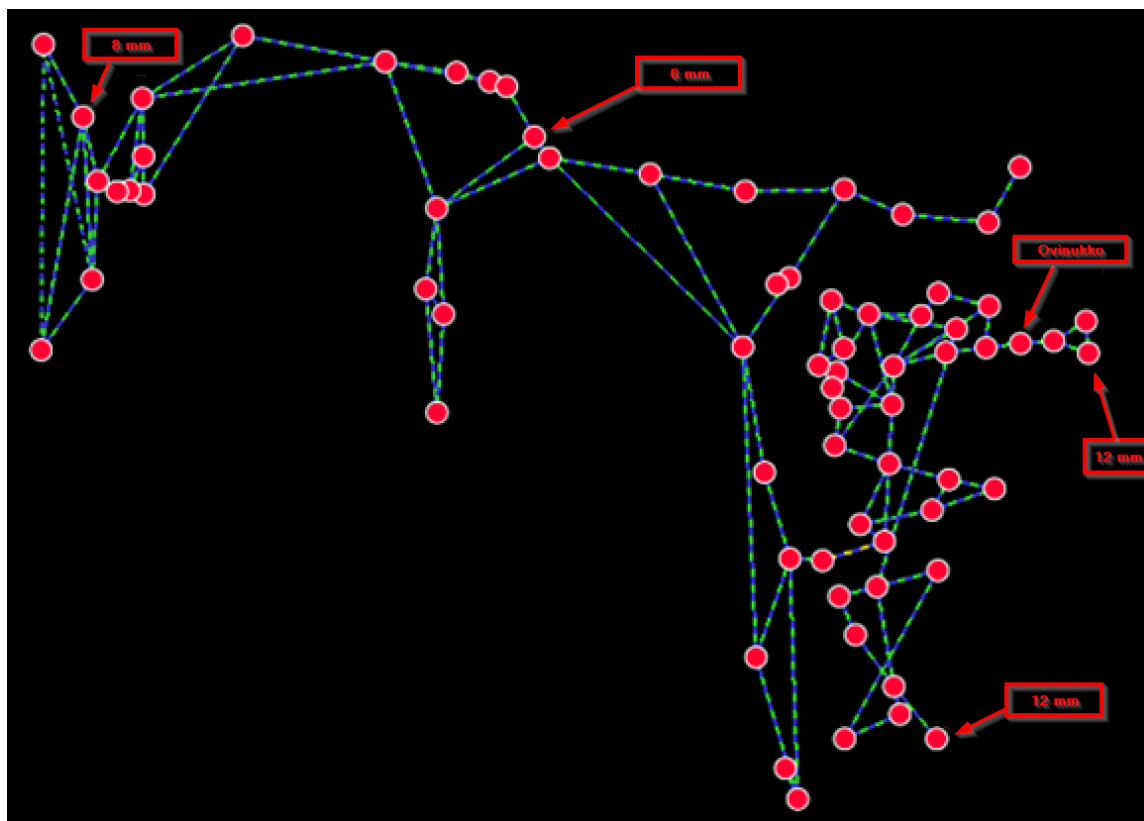


KUVA 32. Vertailukohte A:n cloud to cloud rekisteröinnin linkitysketju, johon on merkitty virhettä luovat liitokset. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Vertailukohteen A mittausten aikaan ulkolämpötila on ollut noin -8 astetta ja sisätilojen lämpötila +35 jolloin takymetrimittaus oviaukosta ei voitu suorittaa lämpöväreilyn vuoksi. Tämän vuoksi takymetrimittaus on jouduttu mittaamaan lasin läpi. Lähtökohtaisesti lasin läpi mittaus ei ole suositeltavaa, ellei muuta vaihtoehtoa ole. Takymetri mittauksessa on käytetty keskiarvo mittausta, yhtä mitapistettä on mitattu viisi kertaa ja mittatulos on viiden mittauksen keskiarvo.

9.2 Vertailukohde B

Vertailukohde B on toteutettu sisällä sekä ulkona tehdasympäristössä. Tällaisessa kohteessa ulkoa sisälle siirtyminen pelkästään cloud to cloud menetelmällä on erityisen haasteellista, yhteisen pinnan vähyyden vuoksi. Kohteessa on korkoeroa 15 metriä, jonka olettaisi asettavan ongelmia pelkälle cloud to cloud menetelmälle. Yllätykseksi aineiston suurin kontrollipiste virhe on 12 mm. Tämä 12 mm virhe on sisätiloissa, seuraavassa huoneessa. Tässäkin tapauksessa mittauksen ketjutus oviaukosta tuottaa kulmavirheen. Seuraavaksi suurin virhe 12 mm ilmenee sisätiloissa ylätasanteella, useamman cloud to cloud liitoksen takana. Skannaukset jatkuvat ulkotiloissa noin 80 metriä eteenpäin ja noin 10 metriä alaspäin. Skannausten loppupäässä, 10 metriä alempana ja 80 metriä kauempana tähyksien kontrollivirhe on vain 8 mm. Näin pieni kontrollivirhe on mahdollista saavuttaa "High Tilt Accuracy" moodi päällä, jolloin skannausten asentoa ei korjata kallistamalla vaan kääntämällä päältä päin X,Y suunnassa. Kohteessa ulkoskannaukset toteutettiin tiheästi noin kymmenen metrin välein, tämä näkyy kuvan 33 ylhäällä keskellä. Kohde on tiivisti rakennettua aluetta, joka edesauttaa cloud to cloud rekisteröintiä pysymään hallinnassa.

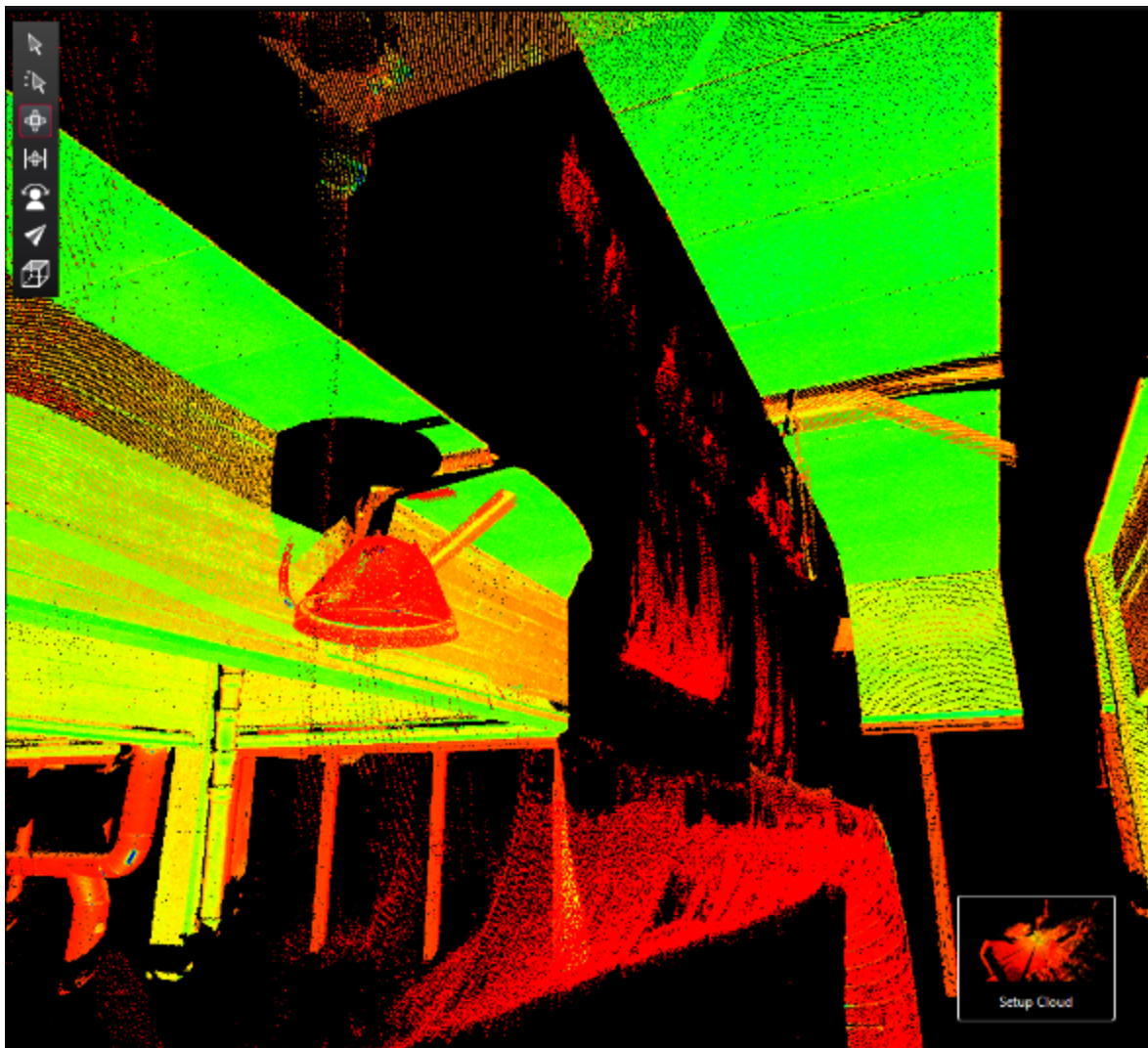


KUVA 33. Vertailukohde B:n cloud to cloud rekisteröinnin linkitysketju, johon on merkitty virheitä kontrolliverkkoon nähden. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Takymetri mittauksessa on käytetty keskiarvo mittauksista, yhtä mittapistettä on mitattu viisi kertaa ja mittatulokset on viiden mittauksen keskiarvo.

10 POHDINTA

Vertailuaineiston sekä testimittauksen perusteella huomattiin, ettei mittavirheen syntymisellä ole selkeää kaavaa laitteiston puolesta. Pistepilven mittavirhe syntyy useasta eri syystä ja koostuu karkeista virheistä, systemaattisista virheistä sekä satunnaisista virheistä. Pistepilven virheelliset pisteet voi tunnistaa harjaantunut silmä, koska niitä on yleensä satoja, esimerkiksi kuvassa 34 näkyy kiiltävän putken aiheuttama haamu katon rajassa. Takymetrimittauksessa tällaisen virheen tunnistaminen on hankalaa koska yleensä mitataan yksi tai muutama piste, ei satoja vierekkäin kuten laserskanneri tekee.



KUVA 34. Esimerkki virheellisistä pisteistä skannauksessa. (Vasara, 2023, CC BY-ND)

Suurin syy pistepilvien virheellisyyteen on rekisteröinnissä syntyvät virheet. Nämä virheet ovat karkeita- sekä järjestelmällisiä virheitä. Karkea virhe syntyy, kun aineiston käsittelijä tekee virheellisen liitoksen, kontrollitiedostoon päätyy vääriä arvoja. Järjestelmä virhe syntyy skannausten laadun, laitteiden ja ohjelmien yhteisvaikutuksesta.

Rekisteröidessä Cloud to Cloud menetelmällä päällekkäin limitettäviä pisteitä voi olla 156 miljoonaa kappaletta. Tällaisen pistemäärän sovittaminen täydellisesti limittäin on haastavaa johtuen lasersäteiden leviämisestä, mitatun pisteen lopullisesta 3D tarkkuudesta. Kuten aiemmin todettiin pisteen 3D tarkkuus 10 metrin päässä on 1,9 mm, mutta 50 metrin päässä se on 6,4 mm. Tällöin, jos asemapisteen välimatka olisi 20 metriä, mitattujen pisteiden 3D tarkkuus on suurin piirtein 3 mm luokkaa, joka aiheuttaa cloud to cloud rekisteröintiin järjestelmällisen 3 mm virheen, vaikka rekisteröintiohjelma ilmoittaisi virheeksi 0–1 mm. Tämä aiheuttaa linkitysketjun vähittäin tapahtuvaa taipumista, eli esimerkiksi suora rakennus menee vinoon. Vaikka kahdella ääriskannauksella olisi yhteistä pintaa ei tämä auta ongelman korjaamisessa, joko ICP algoritmi ei kykene suorittamaan laskentaa tai laskennallinen virhe kasvaa liian suureksi. Jos tällainen liitos onnistuu se yleensä kääntää pistepilveä enemmän vinoon.

Tätä ongelmaa voidaan ehkäistä takymetrillä luodulla kontrollipiste verkolla. Takymetrimittauksen suurin hyöty on siinä, että sillä voidaan mitata pitkiäkin matkoja yhdellä mittauksella millin tarkasti. Tällöin kulmavirheen syntyminen on minimaalista sekä mittaustekniset virheet jäävät pienemmäksi verrattuna tiheään lyhyeen mittaukseen.

Testimittauksessa takymetri oli jatkuvan mittauksen moodissa, takymetriin olisi mahdollista määrittää keskiarvo mittaus. Keskiarvo mittauksen hyöty korostuu, kun mitataan prisma sauva, ellei prisma sauva ole kiinteästi paikoillaan, mittaaja mitä todennäköisemmin tahattomasti liikuttaa prismaa hieman koko ajan. Esimerkiksi jos prisman korkeus on 1800 mm ja prisma sauva on yhden asteen vinossa, tämä tarkoittaa X, Y suunnassa noin 30 mm virhettä, 0,5 astetta -> 15 millimetriä.

Mitä todennäköisemmin tällainen virhe on vaikuttanut tähyksiin 271, 272, 273 koska myös tähykset 274–279 on mitattu samalta asemapisteeltä eikä näillä ole läheskään yhtä suurta kontrollivirhettä. Tähyksien 266, 280, 281, 282 suuren kontrollivirheen todennäköisimpänä syynä on, takymetrin liian läheinen asemapiste tähyksiin nähden sekä mittauskulma on ollut suuri. Takymetrin laserluokka on 3R ja laserskannerin 1, takymetrin lasersäde on tehokkaampi, jolloin takymetrin lasersäteellä riittää energiaa aiheuttaa heijastuminen pinnan läpi. Koska testimittauksissa takymetri oli jatkuvan mittauksen moodissa, ei tähyksiä mitattu uudelleen, jolloin kyseinen läpi heijastuminen olisi voitu ehkä havaita mittauksen aikana.

Yhteenvedon voidaan todeta, että laserskannaukseen syntyvät virheet tehdään rekisteröinnin yhteydessä tai skannatessa, takymetrimittauksessa inhimillisen virheen osuus korostuu huomattavasti. Nykyiset laserskannerit on tehty niin helppokäyttöiseksi, että sitä kykenee käyttämään henkilö suhteellisen hyvin tuloksin nopeastikin, mutta takymetrimittaus vaatii enemmän tietotaitoa sekä tarkkuutta. Pienikin mittasauvan väärä asento, huonosti tähdätty mittaus kostautuu rekisteröinti vaiheessa, vaikka mittausvaiheessa kaikki on mennyt nappiin.

Työssä ei tutkittu rekisteröinnin toteuttamista pelkkien tähyksien avulla. Tallainen rekisteröintitapa ei hyödynnä Cloud to Cloud menetelmää tai takymetrilla toteutettua kontrollia. Pelkkien tähyksien perusteella toteutettava rekisteröinti pohjautuu myös algoritmi pohjaiseen laskentaan ja tähyksille tulee virheellisiä keskipisteen määrittämiä muun muassa tähyksien etäisyydestä skanneriin, jolloin pistetarkkuus heikkenee. Kuinka suureksi tallainen virhe muodostuu, olisi hyvä tutkia jatkossa.

LÄHTEET

- Amann, M.-C.; Bosch, T.; Lescure, M.; Myllylä, R.; & Rioux, M. (Tammikuu 2001). *Laser ranging: a critical review of unusual techniques for distance measurement*. Haettu 19. Lokakuu 2023 osoitteesta <https://doi.org/10.1117/1.1330700>
- Andersson, P.; & Tikka, H. (1997). Mittaus- ja laatutekniikat. Teoksessa P. H. Andersson; & H. Tikka, *Mittaus- ja laatutekniikat* (1 p., ss. 143-144). Porvoo: WSOY. Haettu 1. Lokakuu 2023
- Apple. (2020). *Apple uutishuone*. Haettu 10. Lokakuu 2023 osoitteesta Apple: <https://www.apple.com/cz/newsroom/2020/10/apple-announces-iphone-12-and-iphone-12-mini-a-new-era-for-iphone-with-5g/>
- Braun, J. (Tammikuu 2015). *Testing of the automatic targeting of total station trimble S8 on reflective targets*. Haettu 22. Lokakuu 2023 osoitteesta <https://www.researchgate.net/publication/284735215>
- Cheng, Y.; Hongwen, X.; Qiaoyun, W.; Yuan, Z.; Mingqiang, W.; Bo, W.; & Laishui, Z. (2018). *Researchgate*. Haettu 1. Lokakuu 2023 osoitteesta Automatic Detection of Cross-Shaped Targets for Laser Scan Registration: <https://www.researchgate.net/publication/322876827>
- Creaform. (Lokakuu 2023). *MetraSCAN 3D tekniset tiedot*. Haettu 1.10.2023. Lokakuu 2023 osoitteesta Creaform: <https://www.creaform3d.com/en/optical-3d-scanner-metrascan/technical-specifications>
- Cronvall, T.; Kråknäs, P.; & Turkka, T. (2012). Laserkeilauksen käyttö liikennetunneleiden kunnossapidon hallinnassa. Haettu Syyskuu 2023 osoitteesta <https://www.doria.fi/handle/10024/121138>
- Ebrahim, M. A.-B. (Lokakuu 2014). *3D LASER SCANNERS: HISTORY, APPLICATIONS, AND FUTURE*. Haettu 6. Kesäkuu 2023 osoitteesta ResearchGate: <https://www.researchgate.net/publication/267037683>
- Eling, D. (2009). Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung. Teoksessa D. Eling, *Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung* (1 painos p.). München: Deutsche Geodätische Kommission. Haettu 1. Lokakuu 2023
- FARO. (2021). *Esite, FARO Freestyle 2 handheld scanner*. Haettu 1. Lokakuu 2023 osoitteesta FARO: https://media.faro.com/-/media/Project/FARO/FARO/FARO/Resources/2021/04/19/01/16/TechSheet_Free-style2_EN.pdf?rev=5e48ca3c2eed4e78b8638b35600a56dc
- Geoslam. (2019). Haettu 1. Lokakuu 2023 osoitteesta Geoslam: https://geoslam.com/wp-content/uploads/2021/03/Horizon_Spec_Sheet.pdf
- Haiqing, S.; Jingxuan, Q.; & Yao, L. (2022). Haettu 1. Lokakuu 2023 osoitteesta A Review of Point Cloud Registration Algorithms for Laser Scanners: Applications in Large-Scale Aircraft Measurement: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/20/10247>
- Hancock, J. (1999). *Laser Intensity-Based Obstacle Detection and Tracking*. Haettu 19. Lokakuu 2023 osoitteesta https://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub1/hancock_john_1999_1/hancock_john_1999_1.pdf

- Hexagon. (Lokakuu 2023). *Leica Absolute Tracker AT500 tuotesivu*. Haettu 1. Lokakuu 2023 osoitteesta Hexagon:
<https://hexagon.com/products/leica-absolute-tracker-at500?accordId=58A5375FE3004910BDD4255161CD02F6>
- Ingensand, H.;Ryf, A.;& Schulz, T. (2003). *PERFORMANCES AND EXPERIENCES IN TERRESTRIAL LASERSCANNING*. Haettu 20. Lokakuu 2023 osoitteesta
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=114399dce22fec2d8ef285b902d75b7ec504c4d8>
- ISO 5725-1: 2023. (2023). *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1*. Vernier: the International Organization for Standardization. Haettu 20. Heinäkuu 2023
- Janßen, J. (2019). *Decreasing the Uncertainty of the Target Center Estimation at Terrestrial Laser Scanning by Choosing the Best Algorithm and by Improving the Target Desing*. Haettu 1. Lokakuu 2023 osoitteesta
<https://www.mdpi.com/2072-4292/11/7/845>
- Joala, V. (2006). Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu. Haettu 3. Toukokuu 2023 osoitteesta
<https://drive.google.com/file/d/0B3MfAq-wXowIN2Q4MzJIYjktZTA5Ni00ZGMylTikOWUjNTQzMdIwZTI3NDVm/view?resourcekey=0-oQ0IKbagU1tAsVfnZXWibg>
- Kersten, T.;& Lindstaedt, M. (2022). *Geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanner systems in the laboratory and in the field*. Haettu 20. Lokakuu 2023 osoitteesta <https://doi.org/10.1007/s12518-022-00442-2>
- Kilpelä, A. (2004). *PULSED TIME-OF-FLIGHT LASER RANGE FINDER TECHNIQUES FOR FAST, HIGH PRECISION MEASUREMENT APPLICATIONS*. Haettu 15. Tammikuu 2024 osoitteesta Oulun yliopiston julkaisuarkisto:
<https://urn.fi/URN:ISBN:9514272625>
- Koski, J. (Huhtikuu 2001). LASERKEILAUS - uusi ulottuvuus paikkatiedon keräämiseen. *Maankäyttö*. Haettu 25. Heinäkuu 2023 osoitteesta http://www.maankaytto.fi/arkisto/mk401/mk401_273_koski.pdf
- Koski, J. (2012). *Maalaserkeilaimen pistepilvien georeferoinnin vertailu*. Haettu 23. Tammikuu 2024 osoitteesta Theseus: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2012060111230>
- Lappalainen, E. (15. Marraskuu 2009). *Prismaton takymetrimittaus maastomalli- ja kartoitusmittauksissa*. Haettu 22. Lokakuu 2023 osoitteesta Theseus: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-200912047076>
- Laurila, P. (2012). Teoksessa P. Laurila, *MITTAUS- JA KARTOITUSTEKNIIKAN PERUSTEET* (4. uudistettu painos p.). Rovaniemi: Rovaniemen ammattikorkeakoulu Julkaisutoiminta. Haettu 1. Lokakuu 2023
- (2023). *Leica BLKFLY*. Haettu 1. Lokakuu 2023 osoitteesta The Droning company:
<https://www.thedroningcompany.com/blog/tech-update-leica-geosystems-blk2fly>
- Leica Geosystems. (Marraskuu 2017). *Esite, Surveying Reflectors White Paper Characteristics and Influences*. Haettu 22. Lokakuu 2023 osoitteesta Leica Geosystems: https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/white-papers/leica_surveying_reflectors-_wp.ashx?la=en-us&hash=955F4596E3E0B8AE9A546BB467354082

- Leica Geosystems. (2018). *Esite Terrestrial Laser Scanners Which 3D laser scanner is right for me?* Haettu 18. Lokakuu 2023 osoitteesta Leica Geosystems: <https://leica-geosystems.com/nl-nl/products/laser-scanners/-/media/2ad1c92aa90944bba10c691e2203d984.ashx?la=nl-nl&hash=F83407091B151FCC4D1949358BB3DC23>
- Leica Geosystems. (2018). *Leica RTC360 3D skannerin tekniset tiedot.* Haettu 9. Lokakuu 2023 osoitteesta Leica Geosystems: <https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica-rtc360-ds-872750-0422-en.ashx?la=en&hash=ABBA1A8228C2A16C4BF39928B795BBD6>
- Leica Geosystems. (2018). *Leica uutishuone.* Haettu 14. Syyskuu 2023 osoitteesta Leica Geosystems: <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-field-360/boosting-productivity-in-the-field>
- Leica Geosystems. (2019). *Esite, Leica iCON GPS 70.* Haettu 10. Lokakuu 2023 osoitteesta Leica Geosystems: <https://leica-geosystems.com/fi-fi/products/construction-tps-and-gnss/smart-antennas/-/media/13a0ed6d674b4eafac7953167c91297f.ashx?la=fi-fi&hash=6259A5891B88971C342954A070A16551>
- Leica Geosystems. (2019). *Esite, Leica iCON iCR70.* Haettu 9. Lokakuu 2023 osoitteesta Leica Geosystems: <https://leica-geosystems.com/fi-fi/products/construction-tps-and-gnss/robotic-total-stations/-/media/aff0c58f44ee48b1b2a99003cfb9557b.ashx?la=fi-fi&hash=4FF022E5FF00AD363802ABA8C2836077>
- Leica Geosystems. (2020). *Leica Cyclone tuotesivu.* Haettu 10. Lokakuu 2023 osoitteesta Leica Geosystems: <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/user-coordinate-system-and-control>
- Leica Geosystems. (2021). *Leica Geosystems verkkokauppa.* Haettu 1. Lokakuu 2023 osoitteesta Leica Geosystems BLK2FY tekniset tiedot: <https://shop.leica-geosystems.com/leica-blk/blk2fly/tech-specs>
- Leica Geosystems. (2021). *Leica RTC360 tuotesivu.* Haettu 30. Joulukuu 2023 osoitteesta Leica Geosystems: <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/scanners/leica-rtc360/leica-rtc360-enhancements-to-increase-your-efficiency>
- Leica Geosystems. (22. Helmikuu 2022). *Julkaisutiedot Cyclone REGISTER 360 2022.0.0.* (Leica Geosystems) Haettu 16. Tammikuu 2024 osoitteesta pointclouds.eu: https://pointclouds.eu/downloads/03_Software/Cyclone%20Reg360/2022.0.0/v2022_Leica%20Cyclone%20REGISTER%20360%20Release%20Notes.pdf
- Leica Geosystems. (2022). *Leica Cyclone FIELD 360 tuotesivu.* Haettu 24. Tammikuu 2024 osoitteesta Leica Geosystems: <https://leica-geosystems.com/fi-fi/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-field-360>
- Leica Geosystems. (2022). *Leica Pegasus TRK tuotesivu.* Haettu 1. Lokakuu 2023 osoitteesta Leica Geosystems: <https://leica-geosystems.com/fi-fi/products/leica-pegasus-trk/product-overview/leica-pegasus-trk-evo>
- Leica Geosystems. (2024). *Leica iCON iCR70 tuotesivu.* Haettu 9. Lokakuu 2023 osoitteesta Leica Geosystems: <https://leica-geosystems.com/fi-fi/products/construction-tps-and-gnss/robotic-total-stations/leica-icon-icr70>

- Leica Geosystems, B. (ei pvm). *BLK ARC*. Haettu 1. Lokakuu 2023 osoitteesta <https://shop.leica-geosystems.com/leica-blk/blk-arc/overview>
- Luetzenburg, G.;Kroon, A.;& Bjørk, A. A. (2021). *Evaluation of theApple iPhone 12 Pro LiDAR for anApplication in Geosciences*. Haettu 2. Lokakuu 2023 osoitteesta <https://www.nature.com/articles/s41598-021-01763-9>
- Mahaju, S.;Carver, J.;& Bradshaw, G. (10. Toukokuu 2023). *Human error management in requirements engineering: Should we fix the people, the processes, or the environment?* Haettu 11. Lokakuu 2023 osoitteesta ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.infsoc.2023.107223>
- Martikainen, J. (2017). *LÄMPÖVÄREILYN VAIKUTUS MITTAUSETÄISYYKSIIN JA -TARKKUUKSIIN RADAN KUNNOSSAPITOMITTAUKSISSA*. Noudettu osoitteesta Theseus: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2017120720097>
- Mostafa, A.-B. (2014). *ResearcGate*. Haettu 1. Lokakuu 2023 osoitteesta 3D LASER SCANNERS: HISTORY, APPLICATIONS, AND FUTURE: <https://www.researchgate.net/publication/267037683>
- Nayar, S.;Ikeuchi, K.;& Kanade, T. (1989). *Surface Reflection: Physical and Geometrical Perspectives*. Haettu 19. Lokakuu 2023 osoitteesta Technical Report CMU-RI-TR-89-7: https://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub3/nayar_s_k_1989_1/nayar_s_k_1989_1.pdf
- (ei pvm). *Precision Vs. Accuracy*. Haettu 6. Syyskuu 2023 osoitteesta St. Olaf College: <https://wp.stolaf.edu/it/gis-precision-accuracy/>
- PSK 3402 2. painos. (2021). *PISTEPILVEN JA MALLINNUKSEN HANKINTA TEOLLISUUDESSA*. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry.
- Rantanen, P. (2001). *Maastomittauksen perusteet* (1. painos p.). Kajaani: Opetushallitus. Haettu 1. Lokakuu 2023
- Reshetyuk, Y. (Tammikuu 2009). Teoksessa Y. Reshetyuk, *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning* (1. painos p.). Tukholma: Royal Institute of Technology (KTH) Department of Transport and Economics Division of Geodesy. Haettu 18. Lokakuu 2023
- Riegl. (2020). *RIEGL VZ-6000 tuotesivu*. Haettu 1. Lokakuu 2023 osoitteesta Riegl: <http://www.riegl.com/nc/products/terrestrial-scanning/produktdetail/product/scanner/33/>
- Rinne, M. (15. Elokuu 2023). Sähköpostikeskustelu. *Register360 & muita kysymyksiä opinnäytetyöhön liittyen Yksityinen sähköpostiviesti 15.8.2023. Viestin saaja: Joel Vasara*. Haettu 7. Syyskuu 2023
- SCCS survey. (2024). *Prisma tuotekuva*. Haettu 17. Tammikuu 2024 osoitteesta SCCS survey: <https://www.sccssurvey.co.uk/leica-mpr122-360-prism.html>
- Shan, J.;& Toth, C. (2018). *Topographic laser ranging and scanning : principles and processing*. Teoksessa J. Shan;& C. K. Toth, *Topographic laser ranging and scanning : principles and processing* (2 Painos p.). Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press. Haettu 12. Joulukuu 2023
- Space Research at FMI. (ei pvm). *Valonsäteen kohtaamat ilmiöt*. Haettu 15. Marraskuu 2023 osoitteesta Space Research at FMI: <https://space.fmi.fi/oppimateriaali/envisat/valonsade/ilmiot.html>

- Stein, S. (7. Helmikuu 2022). Lidar is one of the iPhone and iPad Pro's coolest tricks: Here's what else it can do. CNET. Haettu 10. Lokakuu 2023 osoitteesta <https://www.cnet.com/tech/mobile/lidar-is-one-of-the-iphone-ipad-coolest-tricks-its-only-getting-better/>
- Stone, M. (2003). Teoksessa M. Stone, *A Field Guide to Digital Color* (1 painos p.). Massachusetts, USA: CRC Press LLC. Haettu 8. Tammikuu 2024
- Terttula, J. (16. Joulukuu 2019). *3D-mallin tuottaminen fotogrammetriaa hyödyntäen*. Haettu 1. Lokakuu 2023 osoitteesta Theseus: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2019121426712>
- Vasara, J. (2023, CC BY-ND). *Kuvakaappaus*. Haettu 2023
- Väänänen, T.;& Lindroos, S. (Elokuu 2021). *LASERKEILAUUS LIPERIN MEIJERIRAKENNUKSEN 3D-MALLINNUKSESSA JA LASERKEILAUKSEN MITTATARKKUUS*. Haettu 23. Tammikuu 2024 osoitteesta Theseus: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2021091817864>
- Xuming, G.;& Wunderlich, T. (Huhtikuu 2014). *Target identification in terrestrial laser scanning*. Haettu 10. Tammikuu 2024 osoitteesta Researchgate: <https://www.researchgate.net/publication/272223846>

LIITE 1: AUTOMAATTISEN REKISTERÖINNIN REKISTERÖINTIRAPORTTI

Survey Report Länsi-Savon painotalo automatic registration

Abs. Mean Error of Control to 'Bundle 1': 0.105 m

Bundle Name	Setup	Label	Error
Bundle 1	Mikkelin Painotalo-Scan.001	259	0.004 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.001	261	0.003 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.021	282	0.092 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.002	260	0.005 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.006	262	0.013 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.007	265	0.003 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.010	266	0.047 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.011	268	0.050 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.021	280	0.148 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.024	285	0.166 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.024	284	0.159 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.024	284	0.355 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.029	290	0.098 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.029	288	0.117 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.029	288	0.224 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.038	291	0.074 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.039	291	0.146 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.039	291	0.196 m
Mikkelin Painotalo-Scan.021	281	0.098 m	

Link Error Results

1 Overview

Link Name	Setup 1	Setup 2	Overlap	Abs. Mean Error
Link 1	Mikkelin Painotalo- Scan. 001	Mikkelin Painotalo- Scan. 002	25 %	0.008 m
Link 2	Mikkelin Painotalo- Scan. 001	Mikkelin Painotalo- Scan. 036	39 %	0.004 m
Link 3	Mikkelin Painotalo- Scan. 002	Mikkelin Painotalo- Scan. 003	44 %	0.006 m
Link 4	Mikkelin Painotalo- Scan. 003	Mikkelin Painotalo- Scan. 004	64 %	0.004 m
Link 5	Mikkelin Painotalo- Scan. 004	Mikkelin Painotalo- Scan. 005	72 %	0.005 m
Link 6	Mikkelin Painotalo- Scan. 005	Mikkelin Painotalo- Scan. 006	77 %	0.003 m
Link 7	Mikkelin Painotalo- Scan. 006	Mikkelin Painotalo- Scan. 007	79 %	0.004 m
Link 8	Mikkelin Painotalo- Scan. 007	Mikkelin Painotalo- Scan. 008	44 %	0.006 m
Link 9	Mikkelin Painotalo- Scan. 008	Mikkelin Painotalo- Scan. 009	82 %	0.014 m
Link 10	Mikkelin Painotalo- Scan. 009	Mikkelin Painotalo- Scan. 010	68 %	0.008 m
Link 11	Mikkelin Painotalo- Scan. 010	Mikkelin Painotalo- Scan. 011	46 %	0.013 m
Link 12	Mikkelin Painotalo- Scan. 011	Mikkelin Painotalo- Scan. 012	63 %	0.008 m
Link 13	Mikkelin Painotalo- Scan. 012	Mikkelin Painotalo- Scan. 013	53 %	0.004 m
Link 14	Mikkelin Painotalo- Scan. 013	Mikkelin Painotalo- Scan. 014	65 %	0.005 m
Link 15	Mikkelin Painotalo- Scan. 014	Mikkelin Painotalo- Scan. 015	62 %	0.004 m
Link 16	Mikkelin Painotalo- Scan. 015	Mikkelin Painotalo- Scan. 016	73 %	0.005 m
Link 17	Mikkelin Painotalo- Scan. 016	Mikkelin Painotalo- Scan. 017	61 %	0.004 m
Link 18	Mikkelin Painotalo- Scan. 017	Mikkelin Painotalo- Scan. 018	64 %	0.004 m
Link 19	Mikkelin Painotalo- Scan. 018	Mikkelin Painotalo- Scan. 019	63 %	0.004 m
Link 20	Mikkelin Painotalo- Scan. 019	Mikkelin Painotalo- Scan. 020	70 %	0.003 m
Link 21	Mikkelin Painotalo- Scan. 020	Mikkelin Painotalo- Scan. 021	67 %	0.006 m
Link 22	Mikkelin Painotalo- Scan.	Mikkelin Painotalo- Scan.	49 %	0.015 m

	021	022		
Link 23	Mikkelin Painotalo- Scan. 022	Mikkelin Painotalo- Scan. 023	79 %	0.015 m
Link 24	Mikkelin Painotalo- Scan. 023	Mikkelin Painotalo- Scan. 024	44 %	0.031 m
Link 25	Mikkelin Painotalo- Scan. 024	Mikkelin Painotalo- Scan. 025	49 %	0.011 m
Link 26	Mikkelin Painotalo- Scan. 025	Mikkelin Painotalo- Scan. 026	72 %	0.010 m
Link 27	Mikkelin Painotalo- Scan. 026	Mikkelin Painotalo- Scan. 027	69 %	0.009 m
Link 28	Mikkelin Painotalo- Scan. 027	Mikkelin Painotalo- Scan. 028	57 %	0.011 m
Link 29	Mikkelin Painotalo- Scan. 028	Mikkelin Painotalo- Scan. 029	77 %	0.012 m
Link 30	Mikkelin Painotalo- Scan. 029	Mikkelin Painotalo- Scan. 030	23 %	0.008 m
Link 31	Mikkelin Painotalo- Scan. 030	Mikkelin Painotalo- Scan. 031	31 %	0.007 m
Link 32	Mikkelin Painotalo- Scan. 031	Mikkelin Painotalo- Scan. 032	24 %	0.007 m
Link 33	Mikkelin Painotalo- Scan. 032	Mikkelin Painotalo- Scan. 033	34 %	0.006 m
Link 34	Mikkelin Painotalo- Scan. 033	Mikkelin Painotalo- Scan. 035	46 %	0.003 m
Link 35	Mikkelin Painotalo- Scan. 033	Mikkelin Painotalo- Scan. 064	43 %	0.005 m
Link 36	Mikkelin Painotalo- Scan. 036	Mikkelin Painotalo- Scan. 037	60 %	0.014 m
Link 37	Mikkelin Painotalo- Scan. 037	Mikkelin Painotalo- Scan. 038	38 %	0.005 m
Link 38	Mikkelin Painotalo- Scan. 038	Mikkelin Painotalo- Scan. 039	45 %	0.027 m
Link 39	Mikkelin Painotalo- Scan. 038	Mikkelin Painotalo- Scan. 040	55 %	0.006 m
Link 40	Mikkelin Painotalo- Scan. 040	Mikkelin Painotalo- Scan. 041	56 %	0.005 m
Link 41	Mikkelin Painotalo- Scan. 041	Mikkelin Painotalo- Scan. 042	55 %	0.005 m
Link 42	Mikkelin Painotalo- Scan. 042	Mikkelin Painotalo- Scan. 043	54 %	0.004 m
Link 43	Mikkelin Painotalo- Scan. 043	Mikkelin Painotalo- Scan. 044	54 %	0.005 m
Link 44	Mikkelin Painotalo- Scan. 044	Mikkelin Painotalo- Scan. 045	56 %	0.004 m
Link 45	Mikkelin Painotalo- Scan. 045	Mikkelin Painotalo- Scan. 046	47 %	0.005 m
Link 46	Mikkelin Painotalo- Scan. 046	Mikkelin Painotalo- Scan. 047	68 %	0.003 m

Link 47	Mikkelin Painotalo- Scan. 047	Mikkelin Painotalo- Scan. 048	79 %	0.004 m
Link 48	Mikkelin Painotalo- Scan. 048	Mikkelin Painotalo- Scan. 049	51 %	0.002 m
Link 49	Mikkelin Painotalo- Scan. 049	Mikkelin Painotalo- Scan. 050	58 %	0.003 m
Link 50	Mikkelin Painotalo- Scan. 050	Mikkelin Painotalo- Scan. 051	75 %	0.004 m
Link 51	Mikkelin Painotalo- Scan. 051	Mikkelin Painotalo- Scan. 052	71 %	0.003 m
Link 52	Mikkelin Painotalo- Scan. 052	Mikkelin Painotalo- Scan. 053	69 %	0.003 m
Link 53	Mikkelin Painotalo- Scan. 053	Mikkelin Painotalo- Scan. 054	84 %	0.003 m
Link 54	Mikkelin Painotalo- Scan. 054	Mikkelin Painotalo- Scan. 055	59 %	0.003 m
Link 55	Mikkelin Painotalo- Scan. 055	Mikkelin Painotalo- Scan. 056	60 %	0.003 m
Link 56	Mikkelin Painotalo- Scan. 056	Mikkelin Painotalo- Scan. 057	43 %	0.004 m
Link 57	Mikkelin Painotalo- Scan. 057	Mikkelin Painotalo- Scan. 058	54 %	0.002 m
Link 58	Mikkelin Painotalo- Scan. 058	Mikkelin Painotalo- Scan. 059	56 %	0.003 m
Link 59	Mikkelin Painotalo- Scan. 059	Mikkelin Painotalo- Scan. 060	61 %	0.002 m
Link 60	Mikkelin Painotalo- Scan. 060	Mikkelin Painotalo- Scan. 061	57 %	0.002 m
Link 61	Mikkelin Painotalo- Scan. 061	Mikkelin Painotalo- Scan. 062	57 %	0.003 m
Link 62	Mikkelin Painotalo- Scan. 062	Mikkelin Painotalo- Scan. 063	53 %	0.003 m
Link 63	Mikkelin Painotalo- Scan. 064	Mikkelin Painotalo- Scan. 065	40 %	0.006 m

LIITE 2: MANUAALISEN REKISTERÖINNIN REKISTERÖINTIRAPORTTI

Survey Report Länsi-Savon painotalo manual registration

Abs. Mean Error of Control to 'Bundle 1': 0.019 m

Bundle Name	Setup	Label	Error
Bundle 1	Mikkelin Painotalo-Scan.001	259	0.002 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.001	261	0.001 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.019	278	0.003 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.002	260	0.002 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.019	279	0.002 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.021	280	0.159 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.021	281	0.086 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.021	282	0.079 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.024	285	0.013 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.024	284	0.005 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.024	283	0.006 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.026	287	0.003 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.012	270	0.001 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.026	286	0.001 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.029	290	0.003 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.006	263	0.005 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.029	288	0.003 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.038	291	0.002 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.039	291	0.003 m
	Mikkelin Painotalo-	292	0.002 m

	Scan.039	---	-----
	Mikkelin Painotalo-Scan.006	264	0.004 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.007	264	0.004 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.006	262	0.004 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.014	273	0.034 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.007	265	0.005 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.010	266	0.045 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.011	268	0.041 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.014	271	0.059 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.014	272	0.025 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.017	275	0.007 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.017	276	0.004 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.017	274	0.011 m
	Mikkelin Painotalo-Scan.019	277	0.002 m

Link Error Results

1 Overview

Link Name	Setup 1	Setup 2	Overlap	Abs. Mean Error
Link 1	Mikkelin Painotalo- Scan. 001	Mikkelin Painotalo- Scan. 002	25 %	0.008 m
Link 2	Mikkelin Painotalo- Scan. 001	Mikkelin Painotalo- Scan. 036	50 %	0.002 m
Link 3	Mikkelin Painotalo- Scan. 002	Mikkelin Painotalo- Scan. 003	58 %	0.007 m
Link 4	Mikkelin Painotalo- Scan. 003	Mikkelin Painotalo- Scan. 004	83 %	0.005 m
Link 5	Mikkelin Painotalo- Scan. 004	Mikkelin Painotalo- Scan. 005	80 %	0.006 m
Link 6	Mikkelin Painotalo- Scan. 005	Mikkelin Painotalo- Scan. 006	82 %	0.004 m
Link 7	Mikkelin Painotalo- Scan. 006	Mikkelin Painotalo- Scan. 007	79 %	0.006 m
Link 8	Mikkelin Painotalo- Scan. 007	Mikkelin Painotalo- Scan. 008	48 %	0.006 m
Link 9	Mikkelin Painotalo- Scan. 008	Mikkelin Painotalo- Scan. 009	82 %	0.014 m
Link 10	Mikkelin Painotalo- Scan. 009	Mikkelin Painotalo- Scan. 010	68 %	0.008 m
Link 11	Mikkelin Painotalo- Scan. 010	Mikkelin Painotalo- Scan. 011	65 %	0.016 m
Link 12	Mikkelin Painotalo- Scan. 011	Mikkelin Painotalo- Scan. 012	69 %	0.008 m
Link 13	Mikkelin Painotalo- Scan. 012	Mikkelin Painotalo- Scan. 013	73 %	0.004 m
Link 14	Mikkelin Painotalo- Scan. 013	Mikkelin Painotalo- Scan. 014	72 %	0.005 m
Link 15	Mikkelin Painotalo- Scan. 014	Mikkelin Painotalo- Scan. 015	73 %	0.004 m
Link 16	Mikkelin Painotalo- Scan. 015	Mikkelin Painotalo- Scan. 016	78 %	0.004 m
Link 17	Mikkelin Painotalo- Scan. 016	Mikkelin Painotalo- Scan. 017	72 %	0.004 m
Link 18	Mikkelin Painotalo- Scan. 017	Mikkelin Painotalo- Scan. 018	70 %	0.003 m
Link 19	Mikkelin Painotalo- Scan. 018	Mikkelin Painotalo- Scan. 019	84 %	0.003 m
Link 20	Mikkelin Painotalo- Scan. 019	Mikkelin Painotalo- Scan. 020	78 %	0.004 m
Link 21	Mikkelin Painotalo- Scan. 020	Mikkelin Painotalo- Scan. 021	67 %	0.006 m
Link 22	Mikkelin Painotalo- Scan.	Mikkelin Painotalo- Scan.	65 %	0.015 m

	021	022		
Link 23	Mikkelin Painotalo- Scan. 022	Mikkelin Painotalo- Scan. 023	80 %	0.015 m
Link 24	Mikkelin Painotalo- Scan. 023	Mikkelin Painotalo- Scan. 024	50 %	0.017 m
Link 25	Mikkelin Painotalo- Scan. 024	Mikkelin Painotalo- Scan. 025	62 %	0.005 m
Link 26	Mikkelin Painotalo- Scan. 025	Mikkelin Painotalo- Scan. 026	78 %	0.006 m
Link 27	Mikkelin Painotalo- Scan. 026	Mikkelin Painotalo- Scan. 027	77 %	0.004 m
Link 28	Mikkelin Painotalo- Scan. 027	Mikkelin Painotalo- Scan. 028	63 %	0.002 m
Link 29	Mikkelin Painotalo- Scan. 028	Mikkelin Painotalo- Scan. 029	78 %	0.005 m
Link 30	Mikkelin Painotalo- Scan. 029	Mikkelin Painotalo- Scan. 030	37 %	0.006 m
Link 31	Mikkelin Painotalo- Scan. 030	Mikkelin Painotalo- Scan. 031	31 %	0.005 m
Link 32	Mikkelin Painotalo- Scan. 031	Mikkelin Painotalo- Scan. 032	39 %	0.006 m
Link 33	Mikkelin Painotalo- Scan. 032	Mikkelin Painotalo- Scan. 033	51 %	0.005 m
Link 34	Mikkelin Painotalo- Scan. 033	Mikkelin Painotalo- Scan. 035	68 %	0.003 m
Link 35	Mikkelin Painotalo- Scan. 033	Mikkelin Painotalo- Scan. 064	46 %	0.004 m
Link 36	Mikkelin Painotalo- Scan. 036	Mikkelin Painotalo- Scan. 037	67 %	0.014 m
Link 37	Mikkelin Painotalo- Scan. 037	Mikkelin Painotalo- Scan. 038	52 %	0.005 m
Link 38	Mikkelin Painotalo- Scan. 038	Mikkelin Painotalo- Scan. 039	65 %	0.004 m
Link 39	Mikkelin Painotalo- Scan. 038	Mikkelin Painotalo- Scan. 040	60 %	0.005 m
Link 40	Mikkelin Painotalo- Scan. 040	Mikkelin Painotalo- Scan. 041	65 %	0.004 m
Link 41	Mikkelin Painotalo- Scan. 041	Mikkelin Painotalo- Scan. 042	62 %	0.004 m
Link 42	Mikkelin Painotalo- Scan. 042	Mikkelin Painotalo- Scan. 043	54 %	0.003 m
Link 43	Mikkelin Painotalo- Scan. 043	Mikkelin Painotalo- Scan. 044	55 %	0.004 m
Link 44	Mikkelin Painotalo- Scan. 044	Mikkelin Painotalo- Scan. 045	56 %	0.003 m
Link 45	Mikkelin Painotalo- Scan. 045	Mikkelin Painotalo- Scan. 046	47 %	0.004 m
Link 46	Mikkelin Painotalo- Scan. 046	Mikkelin Painotalo- Scan. 047	68 %	0.003 m

Link 47	Mikkelin Painotalo- Scan. 047	Mikkelin Painotalo- Scan. 048	78 %	0.004 m
Link 48	Mikkelin Painotalo- Scan. 048	Mikkelin Painotalo- Scan. 049	53 %	0.002 m
Link 49	Mikkelin Painotalo- Scan. 049	Mikkelin Painotalo- Scan. 050	59 %	0.003 m
Link 50	Mikkelin Painotalo- Scan. 050	Mikkelin Painotalo- Scan. 051	75 %	0.004 m
Link 51	Mikkelin Painotalo- Scan. 051	Mikkelin Painotalo- Scan. 052	71 %	0.003 m
Link 52	Mikkelin Painotalo- Scan. 052	Mikkelin Painotalo- Scan. 053	69 %	0.004 m
Link 53	Mikkelin Painotalo- Scan. 053	Mikkelin Painotalo- Scan. 054	85 %	0.003 m
Link 54	Mikkelin Painotalo- Scan. 054	Mikkelin Painotalo- Scan. 055	63 %	0.003 m
Link 55	Mikkelin Painotalo- Scan. 055	Mikkelin Painotalo- Scan. 056	60 %	0.003 m
Link 56	Mikkelin Painotalo- Scan. 056	Mikkelin Painotalo- Scan. 057	43 %	0.005 m
Link 57	Mikkelin Painotalo- Scan. 057	Mikkelin Painotalo- Scan. 058	54 %	0.002 m
Link 58	Mikkelin Painotalo- Scan. 058	Mikkelin Painotalo- Scan. 059	56 %	0.003 m
Link 59	Mikkelin Painotalo- Scan. 059	Mikkelin Painotalo- Scan. 060	61 %	0.002 m
Link 60	Mikkelin Painotalo- Scan. 060	Mikkelin Painotalo- Scan. 061	57 %	0.002 m
Link 61	Mikkelin Painotalo- Scan. 061	Mikkelin Painotalo- Scan. 062	57 %	0.003 m
Link 62	Mikkelin Painotalo- Scan. 062	Mikkelin Painotalo- Scan. 063	53 %	0.003 m
Link 63	Mikkelin Painotalo- Scan. 064	Mikkelin Painotalo- Scan. 065	50 %	0.005 m
Link 64	Mikkelin Painotalo- Scan. 039	Mikkelin Painotalo- Scan. 065	27 %	0.003 m
Link 65	Mikkelin Painotalo- Scan. 063	Mikkelin Painotalo- Scan. 035	33 %	0.013 m

LIITE 3: TAKYMETRIN MITTAPISTEET

target ID	North	East	Elevation	Layer
AP1	6841216.896	27513477.253	94.680	12
AP2	6841185.449	27513480.861	94.417	12
AP3	6841199.488	27513468.011	94.539	12
6	6841219.663	27513480.210	97.135	TARRATAHYS
5	6841222.074	27513496.926	96.791	TARRATAHYS
7	6841128.992	27513489.944	95.976	TARRATAHYS
8	6841128.992	27513489.945	95.976	
260	6841184.040	27513475.986	95.511	SHAKKITAHYS
259	6841190.435	27513474.077	96.160	SHAKKITAHYS
261	6841189.550	27513465.686	96.430	SHAKKITAHYS
T9	6841174.790	27513377.279	96.673	TARRATAHYS
291	6841185.444	27513426.112	96.101	SHAKKITAHYS
292	6841185.551	27513425.907	95.851	SHAKKITAHYS
293	6841163.333	27513438.151	96.463	TARRATAHYS
112	6841207.460	27513427.680	95.876	TARRATAHYS
113	6841173.649	27513429.924	96.892	TARRATAHYS
AP293X	6841170.090	27513441.295	96.486	TARRATAHYS
114	6841162.404	27513432.970	98.512	TARRATAHYS
115	6841163.522	27513431.284	98.519	TARRATAHYS
293.2KRS	6841165.226	27513442.491	101.210	TARRATAHYS
117	6841157.989	27513440.004	101.273	TARRATAHYS
116	6841177.729	27513438.885	100.998	TARRATAHYS
1	6841151.542	27513402.709	101.348	SEINAMITTA
2	6841151.577	27513402.702	99.338	
3	6841151.576	27513402.702	99.337	SEINAMITTA
4	6841159.877	27513443.668	99.319	SEINAMITTA
5	6841160.202	27513443.596	101.270	SEINAMITTA
6	6841162.280	27513448.431	101.482	SEINAMITTA
7	6841162.464	27513448.391	99.530	SEINAMITTA
8	6841177.483	27513438.513	99.379	SEINAMITTA
9	6841156.517	27513432.445	99.387	SEINAMITTA
262	6841168.171	27513460.470	96.185	SHAKKITAHYS
263	6841161.765	27513456.513	96.097	SHAKKITAHYS
264	6841157.163	27513457.555	95.933	SHAKKITAHYS
265	6841152.213	27513458.684	96.041	SHAKKITAHYS
266	6841123.269	27513440.479	95.407	SHAKKITAHYS
8	6841137.323	27513500.048	96.243	TARRATAHYS
280	6841080.796	27513269.542	95.810	SHAKKITAHYS
200	6841123.074	27513440.544	95.635	TARRATAHYS
268	6841115.159	27513429.114	93.705	SHAKKITAHYS
270	6841111.375	27513412.634	93.718	SHAKKITAHYS
271	6841106.115	27513378.193	93.694	SHAKKITAHYS
272	6841103.588	27513378.217	93.695	SHAKKITAHYS
273	6841104.068	27513375.182	93.633	SHAKKITAHYS
274	6841098.059	27513338.439	93.930	SHAKKITAHYS
275	6841096.160	27513336.263	93.923	SHAKKITAHYS

276	6841095.027	27513338.957	93.849	SHAKKITAHYS
277	6841090.293	27513305.530	94.310	SHAKKITAHYS
278	6841087.942	27513303.436	94.275	SHAKKITAHYS
279	6841086.289	27513305.939	94.229	SHAKKITAHYS
291	6841185.441	27513426.113	96.103	SHAKKITAHYS
292	6841185.551	27513425.910	95.853	SHAKKITAHYS
XX	6841162.463	27513300.640	94.580	12
XX1	6841175.947	27513300.521	94.855	12
69	6841182.386	27513320.464	96.769	TARRATAHYS
286	6841128.374	27513297.785	95.436	SHAKKITAHYS
287	6841127.680	27513296.370	95.154	SHAKKITAHYS
288	6841162.606	27513329.256	95.987	SHAKKITAHYS
289	6841164.803	27513335.924	105.295	SHAKKITAHYS
290	6841164.799	27513335.928	95.945	SHAKKITAHYS
10	6841140.884	27513334.211	96.302	TARRATAHYS
11	6841172.999	27513279.458	96.699	TARRATAHYS
285	6841121.142	27513260.200	95.892	SHAKKITAHYS
3	6841121.025	27513260.272	96.178	TARRATAHYS
284	6841121.185	27513267.891	96.130	SHAKKITAHYS
283	6841121.592	27513268.197	96.194	SHAKKITAHYS
4	6841125.815	27513260.882	96.357	TARRATAHYS
66	6841076.576	27513273.349	96.548	TARRATAHYS
281	6841085.277	27513276.382	95.953	SHAKKITAHYS
282	6841085.503	27513276.141	96.025	SHAKKITAHYS

LIITE 4: TAKYMETRIN ASEMOINTIRAPORTTI

Projektin nimi	MIKKELI TESTIT
Ensinn luotu	29.06.2023 - 09:03:54
Vuimieisin muokkaus	29.06.2023 - 19:41:56
Pituusyksiköt	Metri
Kulmayksiköt	Gon
Kaltevuusyksiköt	%
Takymetrin ppm tai mm/km	0.0

Asetuksen nimi	ASP1037
Menettelytapa	Koordinaatit minne tahansa
Päivitetty Aika	29.06.2023 - 09:37:47
Itäinen	27513484.387
Pohjoinen	6841201.245
Korkeus	95.973
Kojekorkeus	0.000
Aseta 2D toleranssi	0.012
Aseta korkeustoleranssi	0.016

Kontrollipisteiden tiedot							
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakulma	Pystyikulma	Vinomitä	Vaakaetäisyys	Jäännösvirheet 2D
27513477.253	6841216.896	94.680	372.772	97.977	17.207	17.198	0.003
27513480.861	6841185.449	94.417	213.991	99.035	16.175	16.173	0.011
27513468.011	6841199.488	94.539	293.189	98.590	16.466	16.462	0.008

Asetuksen nimi		ASP1038					
Menettelytapa		Koordinaatit minne tahansa					
Päivitetty Aika		29.06.2023 - 13:33:49					
Itäinen		27513484.943					
Pohjoinen		6841205.160					
Korkeus		96.078					
Kojekorkeus		0.000					
Aseta 2D toleranssi		0.012					
Aseta korkeustoleranssi		0.016					
Kontrollipisteiden tiedot							
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakuuma	Pystykuuma	Vinomitta	Vaakaetäisyys	Jäännösvirheet 2D
27513496.926	6841222.074	96.791	39.242	97.812	20.742	20.729	0.001
27513480.210	6841219.663	97.135	379.916	95.601	15.293	15.256	0.000
Asetuksen nimi		ASP1039					
Menettelytapa		Koordinaatit minne tahansa					
Päivitetty Aika		29.06.2023 - 13:46:50					
Itäinen		27513431.754					
Pohjoinen		6841190.281					
Korkeus		96.177					
Kojekorkeus		0.000					
Aseta 2D toleranssi		0.012					
Aseta korkeustoleranssi		0.016					
Kontrollipisteiden tiedot							
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakuuma	Pystykuuma	Vinomitta	Vaakaetäisyys	Jäännösvirheet 2D
27513496.926	6841222.074	96.791	71.106	99.461	72.517	72.515	0.001
27513377.279	6841174.790	96.673	282.362	99.442	56.638	56.636	0.001

Asetuksen nimi		ASP1040					
Menettelytapa		Koordinaatit minne tahansa					
Päivitetty Aika		29.06.2023 - 14:12:11					
Itäinen		27513435.471					
Pohjoinen		6841174.131					
Korkeus		96.545					
Kojekorkeus		0.000					
Aseta 2D toleranssi		0.012					
Aseta korkeustoleranssi		0.016					
Kontrollipisteiden tiedot							
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakulma	Pystykulma	Vinomitta	Vaakaetäisyys	Jäännösvirheet 2D
27513427.680	6841207.460	95.876	385.381	101.243	34.233	34.227	0.000
27513438.151	6841163.333	96.463	184.514	100.472	11.126	11.126	0.000
Asetuksen nimi							
Menettelytapa							
Päivitetty Aika							
Itäinen							
Pohjoinen							
Korkeus							
Kojekorkeus							
Aseta 2D toleranssi							
Aseta korkeustoleranssi							
Kontrollipisteiden tiedot							
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakulma	Pystykulma	Vinomitta	Vaakaetäisyys	Jäännösvirheet 2D
27513427.680	6841207.460	95.876	385.351	101.250	34.197	34.190	0.006
27513438.151	6841163.333	96.463	184.609	100.487	11.175	11.174	0.006

Asetuksen nimi	ASP1042						
Menettelytapa	Koordinaatit minne tahansa						
Päivitetty aika	29.06.2023 - 14:43:12						
Itäinen	27513431.330						
Pohjoinen	6841171.589						
Korkeus	96.554						
Kojekorkeus	0.000						
Aseta 2D toleranssi	0.012						
Aseta korkeustoleranssi	0.016						
Kontrollipisteiden tiedot							
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakulma	Pystykulma	Vinomitta	Vaakaetäisyys	Jäännösvirheet 2D
27513429.924	6841173.649	96.892	361.876	91.416	2.517	2.494	0.000
27513441.295	6841170.090	96.486	109.504	100.430	10.078	10.078	0.000
Asetuksen nimi	ASP1043						
Menettelytapa	Koordinaatit minne tahansa						
Päivitetty aika	29.06.2023 - 15:00:17						
Itäinen	27513433.234						
Pohjoinen	6841164.284						
Korkeus	99.147						
Kojekorkeus	0.000						
Aseta 2D toleranssi	0.012						
Aseta korkeustoleranssi	0.016						
Kontrollipisteiden tiedot							
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakulma	Pystykulma	Vinomitta	Vaakaetäisyys	Jäännösvirheet 2D
27513429.924	6841173.649	96.892	378.369	114.203	10.185	9.933	0.000
27513432.970	6841162.404	98.512	208.909	120.551	2.003	1.899	0.000

Asetuksen nimi		ASP1044					
Menettelytapa		Koordinaatit minne tahansa					
Päivitetty Aika		29.06.2023 - 15:13:41					
Itäinen		27513439.595					
Pohjoinen		6841165.429					
Korkeus		100.801					
Kojekorkeus		0.000					
Aseta 2D toleranssi		0.012					
Aseta korkeustoleranssi		0.016					
Kontrollipisteiden tiedot							
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakuuma	Pystykuuma	Vinomitta	Vaakaetäisyys	Jäännösvirheet 2D
27513431.284	6841163.522	98.519	285.639	116.647	8.827	8.527	0.000
27513442.491	6841165.226	101.210	104.441	91.110	2.932	2.904	0.000
Asetuksen nimi							
Menettelytapa							
Päivitetty Aika							
Itäinen							
Pohjoinen							
Korkeus							
Kojekorkeus							
Aseta 2D toleranssi							
Aseta korkeustoleranssi							
Kontrollipisteiden tiedot							
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakuuma	Pystykuuma	Vinomitta	Vaakaetäisyys	Jäännösvirheet 2D
27513438.885	6841177.729	100.998	396.869	99.285	18.398	18.397	0.000
27513440.004	6841157.989	101.273	190.059	78.657	1.464	1.382	0.000

ASP1045
 Koordinaatit minne tahansa
 29.06.2023 - 15:24:16
 27513439.789
 6841159.354
 100.791
 0.000
 0.012
 0.016

Asetuksen nimi		ASP1046					
Menettelytapa		Koordinaatit minne tahansa					
Päivitetty aika		29.06.2023 - 17:00:09					
Itäinen		27513493.775					
Pohjoinen		6841147.659					
Korkeus		95.616					
Kojekorkeus		0.000					
Aseta 2D toleranssi		0.012					
Aseta korkeustoleranssi		0.016					
Kontrollipisteiden tiedot							
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakuuma	Pystykuuma	Vinomitta	Vaakaetäisyys	Jäännösvirheet 2D
27513480.210	6841219.663	97.135	388.145	98.680	73.287	73.271	0.001
27513489.944	6841128.992	95.976	212.888	98.800	19.058	19.055	0.001
Asetuksen nimi		ASP1047					
Menettelytapa		Koordinaatit minne tahansa					
Päivitetty aika		29.06.2023 - 17:11:34					
Itäinen		27513491.994					
Pohjoinen		6841135.079					
Korkeus		95.550					
Kojekorkeus		0.000					
Aseta 2D toleranssi		0.012					
Aseta korkeustoleranssi		0.016					
Kontrollipisteiden tiedot							
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakuuma	Pystykuuma	Vinomitta	Vaakaetäisyys	Jäännösvirheet 2D
27513480.210	6841219.663	97.135	391.187	98.818	85.415	85.400	0.001
27513489.944	6841128.992	95.976	220.682	95.795	6.436	6.422	0.001

Asetuksen nimi		ASP1049					
Menettelytapa		Koordinaatit minne tahansa					
Päivitetty aika		29.06.2023 - 17:27:19					
Itäinen		27513473.603					
Pohjoinen		6841137.508					
Korkeus		95.316					
Kojekorkeus		0.000					
Aseta 2D toleranssi		0.012					
Aseta korkeustoleranssi		0.016					
Kontrollipisteiden tiedot							
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakuuma	Pystykuuma	Vinomitta	Vaakaetäisyys	Jäännösvirheet 2D
27513489.944	6841128.992	95.976	130.585	97.722	18.438	18.426	0.000
27513500.048	6841137.323	96.243	100.445	97.765	26.463	26.447	0.001
Asetuksen nimi		ASP1049					
Menettelytapa		Koordinaatit minne tahansa					
Päivitetty aika		29.06.2023 - 17:37:10					
Itäinen		27513453.930					
Pohjoinen		6841125.363					
Korkeus		95.055					
Kojekorkeus		0.000					
Aseta 2D toleranssi		0.012					
Aseta korkeustoleranssi		0.016					
Kontrollipisteiden tiedot							
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakuuma	Pystykuuma	Vinomitta	Vaakaetäisyys	Jäännösvirheet 2D
27513500.048	6841137.323	96.243	83.846	98.413	47.659	47.644	0.000
27513440.544	6841123.074	95.635	289.218	97.285	13.593	13.580	0.000

Asetuksen nimi ASP1050
 Menettelytapa Koordinaatit minne tahansa
 Päivitetty aika 29.06.2023 - 18:05:06
 Itäinen 27513443.808
 Pohjoinen 6841207.542
 Korkeus 96.207
 Kojekorkeus 0.000
 Aseta 2D toleranssi 0.012
 Aseta korkeustoleranssi 0.016

Kontrollipisteiden tiedot
 Itäinen Pohjoinen Korkeus Vaakakuuma Pystykuuma Vinomitta Vaakaetäisyys Jäännösvirheet 2D
 27513496.926 6841222.074 96.791 82.999 99.328 55.074 55.071 0.001
 27513377.279 6841174.790 96.673 270.877 99.599 74.156 74.154 0.001

Asetuksen nimi ASP1051
 Menettelytapa Koordinaatit minne tahansa
 Päivitetty aika 29.06.2023 - 18:31:56
 Itäinen 27513308.024
 Pohjoinen 6841160.365
 Korkeus 95.683
 Kojekorkeus 0.000
 Aseta 2D toleranssi 0.012
 Aseta korkeustoleranssi 0.016

Kontrollipisteiden tiedot
 Itäinen Pohjoinen Korkeus Vaakakuuma Pystykuuma Vinomitta Vaakaetäisyys Jäännösvirheet 2D
 27513300.640 6841162.463 94.580 317.619 94.269 7.706 7.675 0.002
 27513300.521 6841175.947 94.855 371.434 96.415 17.326 17.299 0.005

Asetuksen nimi		ASP1052					
Menettelytapa		Koordinaatit minne tahansa					
Päivitetty Aika		29.06.2023 - 19:13:34					
Itäinen		27513297.671					
Pohjoinen		6841135.158					
Korkeus		95.090					
Kojekorkeus		0.000					
Aseta 2D toleranssi		0.012					
Aseta korkeustoleranssi		0.016					
Kontrollipisteiden tiedot							
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakulma	Pystykulma	Vinomitta	Vaakaetäisyys	Jäännösvirheet 2D
27513334.211	6841140.884	96.302	90.105	97.915	37.006	36.986	0.000
27513320.464	6841182.386	96.769	28.625	97.963	52.468	52.441	0.001
Asetuksen nimi							
Menettelytapa							
Päivitetty Aika							
Itäinen							
Pohjoinen							
Korkeus							
Kojekorkeus							
Aseta 2D toleranssi							
Aseta korkeustoleranssi							
Kontrollipisteiden tiedot							
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakulma	Pystykulma	Vinomitta	Vaakaetäisyys	Jäännösvirheet 2D
27513260.272	6841121.025	96.178	271.339	98.559	5.128	5.127	0.000
27513334.211	6841140.884	96.302	84.147	99.786	71.529	71.529	0.001

Asetuksen nimi	ASP1054					
Menettelytapa	Koordinaatit minne tahansa					
Päivitetty aika	29.06.2023 - 19:40:27					
Itäinen	27513273.678					
Pohjoinen	6841081.415					
Korkeus	95.910					
Kojekorkeus	0.000					
Aseta 2D toleranssi	0.012					
Aseta korkeustoleranssi	0.016					
Kontrollipisteiden tiedot						
Itäinen	Pohjoinen	Korkeus	Vaakakuuma	Pystykuuma	Vinomitta	Vaakaetäisyys
27513260.882	6841125.815	96.357	382.136	99.386	46.208	46.206
27513273.349	6841076.576	96.548	204.323	91.657	4.892	4.850
						Jäännösvirheet 2D
						0.000
						0.000

LIITE 5: KOORDINAATTIEN ERO TAULUKKO, KONTROLLIOHJATTU MANUAALINEN REKISTERÖINTI

Tähystunnus	X	Y	Z	Virhe vektorisuurena
259	0,002	0	0	0,002
260	-0,001	-0,001	-0,001	0,002
261	-0,001	0	0,001	0,001
262	0,003	-0,002	0,003	0,005
263	0,004	0	-0,003	0,005
264	-0,004	0,001	0	0,004
265	-0,004	0,001	0	0,004
266	-0,015	0,043	0	0,046
268	0,008	-0,041	-0,001	0,042
270	0	0	0	0,000
271	0,013	-0,058	0	0,059
272	-0,001	0,025	0	0,025
273	-0,01	0,033	0	0,034
274	0,007	-0,008	0,001	0,011
275	-0,003	0,007	0	0,008
276	-0,004	0,001	-0,001	0,004
277	-0,001	-0,001	0	0,001
278	0	-0,002	0,001	0,002
279	0,001	0,001	-0,001	0,002
280	-0,128	-0,094	0,015	0,160
281	0,068	0,052	-0,009	0,086
282	0,064	0,045	-0,008	0,079
283	0,001	-0,006	0,001	0,006
284	0	-0,005	0,001	0,005
285	-0,007	0,011	-0,002	0,013
286	0	0	0	0,000
287	0,002	-0,001	0,001	0,002
288	0	-0,002	0,001	0,002
289	6,577	2,082	9,618	11,836
290	0,001	0,003	-0,002	0,004
291	-0,001	0,001	-0,001	0,002
292	0	0,002	-0,001	0,002

LIITE 6: KOORDINAATTIEN ERO TAULUKKO, KONTROLLIOHJATTU AUTOMAATTINEN REKISTERÖINTI

Tähystunnus	X	Y	Z	Virhe vektorisuurena
259	0,004	0	0,006	0,007
260	0,001	-0,001	0,003	0,003
261	0	0,001	-0,001	0,001
262	0,001	-0,001	0,002	0,002
263	0,004	0	-0,006	0,007
264	-0,003	0,001	0,001	0,003
265	-0,004	0,001	0,002	0,005
266	-0,009	0,033	0,002	0,034
268	0,009	-0,036	0	0,037
270	-0,003	0,014	0	0,014
271	0,012	-0,057	-0,001	0,058
272	-0,001	0,025	0,002	0,025
273	-0,01	0,031	-0,002	0,033
274	0,011	-0,002	0,001	0,011
275	-0,003	0,006	-0,002	0,007
276	-0,007	-0,005	0,001	0,009
277	0	-0,003	-0,002	0,004
278	0,001	-0,003	0	0,003
279	0	0,003	0,002	0,004
280	-0,129	-0,101	0,01	0,164
281	0,065	0,047	-0,006	0,080
282	0,061	0,04	-0,006	0,073
283	0,004	0,025	0,003	0,025
284	0,007	0,023	0,004	0,024
285	0	-0,02	-0,003	0,020
286	-0,006	-0,008	-0,002	0,010
287	-0,005	-0,007	-0,006	0,010
288	0,027	0,043	-0,112	0,123
289	6,606	2,128	9,504	11,768
290	0,035	0,027	-0,08	0,091
291	-0,011	0,006	-0,016	0,020
292	-0,01	0,006	-0,015	0,019

LIITE 7: KOORDINAATTIEN ERO TAULUKKO, MANUAALINEN REKISTERÖINTI ILMAN KONTROLLIOH-
JAUSTA

Tähystunnus	X	Y	Z	Virhe vektorisuurena
259	-0,019	-0,03	0,002	0,036
260	-0,021	-0,029	-0,001	0,036
261	-0,022	-0,029	0,005	0,037
262	0,015	0,033	-0,005	0,037
263	0,014	0,036	-0,012	0,040
264	0,005	0,037	-0,01	0,039
265	-0,003	0,036	-0,007	0,037
266	-0,05	0,056	-0,015	0,077
268	0,008	-0,077	-0,011	0,078
270	0,006	-0,085	-0,009	0,086
271	0,008	-0,111	0,005	0,111
272	-0,011	-0,029	0,005	0,031
273	-0,019	-0,016	0,005	0,025
274	-0,003	-0,022	0,017	0,028
275	-0,014	-0,005	0,015	0,021
276	-0,016	-0,013	0,013	0,024
277	-0,013	0	0,019	0,023
278	-0,013	-0,001	0,021	0,025
279	-0,012	0,003	0,019	0,023
280	0,003	-0,062	-0,008	0,063
281	0,197	0,086	-0,03	0,217
282	0,194	0,08	-0,028	0,212
283	-0,021	0,021	-0,007	0,031
284	-0,021	0,021	-0,007	0,031
285	-0,028	0,022	-0,008	0,036
286	-0,02	0,022	-0,007	0,031
287	-0,017	0,021	-0,006	0,028
288	-0,026	0,024	0,01	0,037
289	6,551	2,109	9,626	11,833
290	-0,025	0,029	0,007	0,039
291	-0,029	-0,016	0,008	0,034
292	-0,028	-0,014	0,008	0,032