



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Eero Salmenmäki

Laserkeilauksella tehtävän seuranta- mittauksen laadun parantaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinöörityö

27.5.2019

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Eero Salmenmäki Laserkeilauksella tehtävän seurantamittauksen laadun parantaminen 66 sivua + 5 liitettä 27.5.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaaja	lehtori Ilkka Partonen
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli todistaa hypoteesi, jonka mukaan laserkeilauksella suoritettavassa seurantamittauksessa pistepilvien välisestä etäisyysvertailusta tehty heat-map on monimutkaisessa ympäristössä sitä laadukkaampi, mitä tarkemmin käytettävät laserkeilaimen kojeasemat ovat samoja sijainniltaan seurantamittauksen ensimmäisellä ja myöhemmillä mittauskerroilla.</p> <p>Esimerkkejä mainitusta ympäristön monimutkaisuudesta ovat tuki-, koristerakenteet ja teollisuuden putkistot. Opinnäytetyön tutkimuksessa ympäristön monimutkaisuutta vastasi seurattavaksi valitun laboratoriotilan runsas putkisto.</p> <p>Heat-mapin laaduksi oli tässä opinnäytetyössä määritelty se, kuinka selkeästi heat-map-näkymästä ovat erotettavissa seurattavassa tilassa tapahtuneet muutokset.</p> <p>Tilasta tehtiin useita keilauksia, joista kukin oli keilattu eri etäisyydeltä ensimmäisen keilauksen kojeasemasta. Hypoteesin mukainen riippuvuus laadun ja sijainnin välillä todettiin vertailemalla toisiinsa eri kojeasemista keilattujen pistepilvien suhteen tehtyjen etäisyysvertailun heat-map-näkymiä.</p> <p>Työssä saavutettiin asetettu päämäärä eli todettiin hypoteesin mukainen riippuvuus. Lisäksi opinnäytetyössä tutkittiin ja todettiin eräiden pistepilvien käsittely, vertailu- ja tarkastelutapojen hyödyllisyys.</p> <p>Opinnäytetyössä esitettiin myös nyrkkisääntö sille, miten määrittää mittaustilanteen vaatima tarkkuus kojeaseman pystytykseen.</p>	
Avainsanat	laserkeilaus, seurantamittaus, heat-map

Author Title Number of Pages Date	Eero Salmenmäki Improving the Quality of the Laser Scanning Control Measurement 66 pages + 5 appendices 27 May 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructor	Ilkka Partonen, Senior Lecturer
<p>The goal of this final year project was to find ways to improve the quality of control measured heat-maps. The focus was on comparing how the difference in the accuracy of setting up the scanning station on known points affects the quality of heat-maps. In this bachelor's thesis, quality was defined in terms of the clarity and accuracy of the recognition of deformations in the heat-map view.</p> <p>The thesis presented a geometrical model to explain how the location correlates to the quality of the heat-map. Furthermore, the thesis compared several heat-maps simulating different accuracies for setting up the scan station. The project also studied whether the deformations could be made more recognizable by various ways of processing and comparing the point clouds, and by using geometrically important viewing angles in the heat-map analysis.</p> <p>The project showed that the accuracy of setting up the scanning station on known points does affect the quality of heat-maps. Furthermore, the thesis presented a rule of thumb for determining the necessary location accuracy when setting up a scan station for a survey. It was shown that the quality of the heat-map was affected most when the measured object or its environment had complex surfaces.</p>	
Keywords	laser scanning, control measuring, heat-map

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Pohjustus	2
2.1	Laser-etäisyysmittaus	2
2.1.1	Valon kulkuajalla	2
2.1.2	Lähetetyn pulssin vaihe-erolla	2
2.1.3	Optinen kolmiomittaus	2
2.2	Takymetri	3
2.2.1	Takymetri	3
2.2.2	Takymetrin orientointi	3
2.2.3	Pakkokeskistysperiaate	4
2.3	Laserkeilaus	4
2.3.1	Laserkeilain	4
2.3.2	Laserkeilaimen orientointi, tasaus ja keskistys	6
2.3.3	Tähys laserkeilauksessa	8
2.3.4	Keilaintakymetri	8
2.4	Pistepilvi	9
2.4.1	Määritelmä	9
2.4.2	Pistetieto	9
2.4.3	Skalaarikenttä	9
2.5	Seurantamittaus	10
2.5.1	Seurantamittaus yleisesti	10
2.5.2	Esimerkkejä seurantamittauksesta	11
2.5.3	Lähtöpisteet	11
2.5.4	Ilman lähtöpisteitä	12
3	Seurantamittaus laserkeilauksella	13
3.1	Rasteri	13
3.2	Pinnan suuntainen liike ja puuttuva pinta	13
3.2.1	Pinnan suuntainen liike	13
3.2.2	Puuttuva pinta	15
3.2.3	Kaksisuuntainen vertailu	15
3.3	Seurantamittauksen laserkeilauksen teoreettinen suoritus	16

3.4	Seurantamittauksen laserkeilaus käytännössä	17
3.5	Yhden keilauksen vaatima työaika	17
4	Esitetyt hypoteesit	20
4.1	Geometrinen riippuvuus kojeaseman sijainnin ja katveen sijoittumisessa kohteen pinnalle	20
4.2	Heat-map-tarkastelu referenssipilven nollapisteestä	24
5	Muutosesitys laserkeilaus seurantamittauksen käytäntöön	30
5.1	Mittaustapa	30
5.2	Pilvien käsittely	31
5.3	Heat-map-tarkastelu	31
6	Tutkimus	33
6.1	Laitteisto	33
6.2	Ohjelmat	33
6.3	Tila	34
6.4	Seurantamittaukseen varten tilaan mittausten välillä tehdyt muutokset	37
6.5	Mittauksen suoritus	39
6.5.1	Takymetri	39
6.5.2	Mittauksen kohteet	39
6.5.3	Laserkeilaus	40
6.5.4	Keilausten tarkoitus	41
6.6	Pistepilvien käsittely Cyclone-ohjelmalla	42
6.7	Pistepilvien alkukäsittely CloudCompare-ohjelmalla	43
6.8	Pistepilvien vertailu CloudCompare-ohjelmalla	44
6.9	Tarkasteluun tuotetut heat-mapit	45
6.10	Vertailut	45
6.10.1	Pilvien nollapisteiden välisen etäisyyden vaikutus heat-map-näkymän laatuun	45
6.10.2	Referenssipilven nollapistenäkymän käytön vaikutus pilvien heat-map-näkymien laatuun	46
6.10.3	Muuntumien erottuminen tilasta eri pilvien heat-map-näkymistä	47
6.10.4	Muuntumien erottuminen nollapistenäkymästä verrattuna niiden erottumiseen lähitarkastelun näkymästä	56
6.10.5	Kaksisuuntainen vertailu	58
7	Päätelmät	59

7.1	Päätelmät tuloksista	59
7.2	Ehdotuksia	59
7.2.1	Keilaimen sijoittaminen seurantamittaus keilauksessa tunnetuille pisteille	59
7.2.2	Takymetrin ja tähysten sijoitus tunnetuille pisteille	62
7.2.3	"Hidden point removal" -työkalun käyttö heat-map-pilveen referenssipilven nollapisteestä	62
7.3	Rajoitukset	62
8	Lisäpohdinta	64
	Lähteet	65
	Liitteet	
	Liite 1. Pistepilven puhdistus CloudCompare "hidden point removal" -työkalulla	
	Liite 2. Kaksisuuntainen vertailu	
	Liite 3. Heat-mapien tarkastelu referenssipilven nollapisteestä	
	Liite 4. Pilvien nollapisteiden välisen etäisyyden vaikutus heat-map-näkymän laatuun	
	Liite 5. Esimerkkikuvasarjoja taulukosta 6	

Lyhenteet

GNSS	Global Navigation Satellite System. Useiden satelliittipaikannusjärjestelmien käyttö paikannukseen.
GPS	Global Positioning System. Yhdysvaltojen kehittämä maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä.
RAM	Random-access memory. Tietokoneen keskusmuisti.
RGB	Red, green and blue. Väri muodostetaan punaisen, vihreän ja sinisen kirkkausarvoista.
RTK	Real Time Kinematic. Reaaliaikainen kinemaattinen mittaus. Sijainnin määrittäminen tukiaseman korjaussignaalin avulla käyttäen paikannukseen paikannussatelliitin kanta-aallon vaihetta.
VRS	Virtual Reference Station. Satelliittipaikannusmenetelmä, jossa tukiasemaverkon mittauksista laskettua korjaussignaalia lähetetään GPS/GNSS mitalaitteeseen mittaustarkkuuden parantamiseksi.

1 Johdanto

Tehdystä mittauksesta saatu tulos pitää paikkansa tarkkuudella, joka on riippuvainen mittaukseen panostetun työn määrästä. Tehokkuuden maksimoimiseksi kuuluu tilanteeseen valita mittaamismetodi, joka tuottaa tuloksen mittauksen tarkoituksen vaatimalla tarkkuudella mahdollisimman vähällä työllä.

Tämä opinnäytetyö pyrkii osoittamaan, että tietyissä laserkeilauksella tehtävän seurantamittauksen tilanteissa, joissa ympäristön monimutkaisuus estää seurattavan kohteen pintojen täyden kartoituksen, pieni muutos mittausmetodiin voi parantaa saatavan heat-map-vertailudatan laatua. (Heat-map määritelty luvussa "2.4.3 Skalaarikenttä".)

Mittausmetodiin esitetty muutos on tunnettujen pisteiden määrittäminen seurantamittausprojektin ensimmäisessä mittauskerrassa käytettyihin laserkeilaimen kojeasemiin. Sen jälkeisillä mittauskerroilla laserkeilain pystytetään vain näihin tunnettuihin pisteisiin.

Opinnäytetyö tarkastelee, mikä on pistepilvien vertailusta tuotetun heat-map-skalaarikentän laadun riippuvuus kojeaseman sijoitustarkkuudesta ideaalitalanteessa. Työssä esitellään tämän riippuvuuden geometrisen teoria, johon opinnäytetyössä tehtävät päätelmät perustuvat.

Lisäksi opinnäytetyö esittelee muutosta heat-map-pistepilven tarkastelumetodiin. Tarkastelumetodiin esitetyt muutokset käsittelevät heat-map-pistepilven käsittelyä ja tarkastelua geometrisin perustein.

2 Pohjustus

2.1 Laser-etäisyysmittaus

2.1.1 Valon kulkuajalla

Mittalaite lähettää laserpulssin, joka osuu kohteen pintaan. Mittalaiteessa oleva anturi vastaanottaa pinnasta lähtevän laserpulssin heijastuksen ja mittalaite laskee etäisyyden kohteen pintaan laserpulssin lähettämisen ja sen heijastuksen vastaanoton välillä kuluneesta ajasta. (2) Tämän opinnäytetyön käyttämän laitteiston etäisyysmittaus toimii tällä periaatteella.

2.1.2 Lähetetyn pulssin vaihe-erolla

Mittalaite lähettää pitkän laserpulssin, jonka lähetystaajuus muuttuu ajan kuluessa. Mittalaiteessa oleva anturi vastaanottaa laserpulssin heijastuksen, ja mittalaite laskee kohteen pinnasta heijastuneen laserpulssin ja lähetettävän laserpulssin vaiheiden erosta valon lähetyksen ja vastaanoton välillä kuluneen ajan. Mittalaite laskee tästä ajasta etäisyyden kohteen pintaan. (13, s. 6–7.)

2.1.3 Optinen kolmiomittaus

Mittalaite lähettää lasersäteen kohteen pintaan. Mittalaiteessa oleva anturi on sijainniltaan lasersäteen lähettimen vieressä. Anturi mittaa vastaanottamansa lasersäteen heijastuksen kulman. Mittalaite laskee etäisyyden pintaan kolmiomittauksella. (13, s. 7.) (Kolmion sivujen pituudet voidaan laskea, jos tiedetään yhden sivun pituus ja kaksi kulmaa. Yksi tunnettu etäisyys on lähettimen ja anturin välinen etäisyys, ja kaksi tunnettua kulmaa ovat lasersäteen lähetyksen kulma ja anturin mittaama kulma.)

2.2 Takymetri

2.2.1 Takymetri

Takymetri on kulman- ja etäisyydenmittauslaite. Se havaitsee siis pysty- ja vaakakulmia ja etäisyyksiä. Takymetrissa oleva tai sen yhteydessä käytettävä maastotietokone laskee näistä perushavainnoista koordinaatteja, korkeuksia ja muita suureita. (1, s. 238, 244.)

Takymetrin rakenteellisia osia ovat mm. mittauskaukoputki, elektro-optinen etäisyysmittari, elektroniset tasaimet, tasausalusta, jalkaruuvit, optinen luoti. Tasausalusta on irrallinen osa, jolla koje kiinnitetään jalustaan, yleensä kolmijalkaan. Tasausalustan kolmella jalkaruuvilla suoristetaan takymetrin asento (kojeen tasaus). Optinen luoti voi olla koneen rungossa tai tasausalustassa. Sen antamalla alanäkymällä voidaan koje asettaa maanpinnalla olevan pistemerkin kautta kulkevalle pystysuoralle eli suorittaa kojeen keskistys tunnetulle pisteelle. (1, s. 239–242.)

2.2.2 Takymetrin orientointi

Orientointi on edellytys koordinaattimuotoisten mittausten tekemiselle. Se tarkoittaa koordinaatiston ja korkeustason määrittelyä kojeasemalle; toisin sanoen määritetään kojeaseman sijainti ja suuntaus valitussa koordinaatistossa.

Orientointi vapaalle asemapisteelle tapahtuu tasaamalla takymetri ja mittaamalla vähintään 2 koordinaateiltaan tunnettua pistettä kulma- ja etäisyysmittauksella tai vähintään 3 koordinaateiltaan tunnettua pistettä kulmamittauksella. Lisäksi orientointi on mahdollista suorittaa kaarileikkauksella eli mittaamalla 2 koordinaateiltaan tunnettua pistettä pelkällä etäisyysmittauksella, jos mittaaja pystyy päättämään, kumpi kaarileikkauksen antamasta kahdesta ratkaisusta on oikea. (1, s. 65, 259–260.)

Orientointi tunnetulle pisteelle tapahtuu siten, että takymetri keskistetään tunnetun pisteen päälle, tasataan ja mitataan sen korkeus tunnetusta pisteestä. Sitten mitataan vähintään yksi koordinaateiltaan tunnettu piste. Keskistys eli koneen sijoitus vaakatasossa tunnetun pisteen päälle pystytään suorittamaan noin 1 mm:n tarkkuudella.

Kojekorkeudet mitataan yleensä taskumitalla. Kojekorkeus on mahdollista mitata noin 1 mm:n tarkkuudella huolellisella mittauksella ja mitatun vinomitan korjaamisella pystysuoraksi etäisyydeksi. (1, s. 253, 256–258.)

2.2.3 Pakkokeskistysperiaate

Jos takymetri, prisma tai tähys kiinnitetään samanlaisen tasausalustan välityksellä jalustaan, voidaan takymetri irrottaa tasaalustaan ja laittaa tilalle prisma tai tähys ilman uutta tasausta tai keskistystä (1, s. 350).

On huomion arvoista, että myös useat kolmijaloille pystytettävät laserkeilaimet kiinnitetään jalustoihinsa samanlaisen tasausalustan välityksellä eli niihin pätee pakkokeskistysperiaate.

2.3 Laserkeilaus

2.3.1 Laserkeilain

Mittausmenetelmä muistuttaa mittaustekniikaltaan mittausta takymetrillä. Mittalaitteen nollapisteen (piste, jossa laitteen pyörimisakselit risteävät) kautta kulkeva lasersäde mittaa kohteen etäisyyden mittalaitteesta. Laitte laskee etäisyydestä ja vaaka- ja pystykulmasta koordinaatit mitatulle pisteelle. (2) Laserkeilain on paljon takymetria nopeampi pisteiden mittauksessa. Tämä nopeus voi esimerkiksi Leica ScanStation P40 -laserkeilaimessa olla jopa 1.000.000 pistettä sekunnissa, kun keilattava pinta on alle 120 m:n etäisyydellä keilaimesta (3).

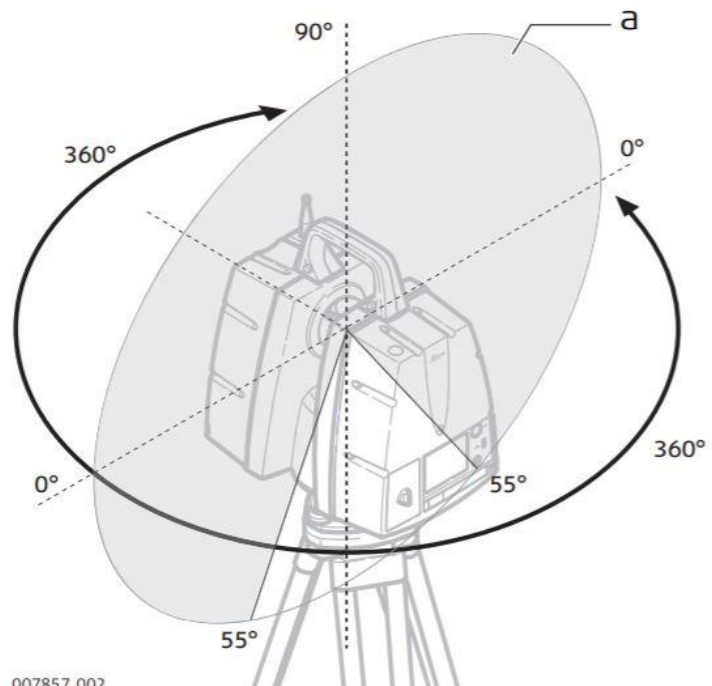
Laserkeilaimia on erityyppisiä.

- Kaukokartoituslaserkeilaimet, joilla tehdään ilmalaserkeilausta lentokoneista ja helikoptereista.
- Maalaserkeilaimet eli terrestriaaliset laserkeilaimet. Maanpinnalta tehtävään laserkeilaukseen, jotka kykenevät mittauksiin 1–300 m:n etäisyyksillä ja 2 cm:n tai parempaan mittaustarkkuuteen.
- Teollisuuslaserkeilaimet, jotka kykenevät millimetriä parempaan tarkkuuteen (alle 30 m:n etäisyydeltä).

Enemmistö käytettävistä maalaserkeilaimista keilaavat ympäristönsä kupolimaisesti (kuva 1), eli ne pystyvät keilaamaan koko ympäristönsä mittauksensa maksimietäisyyteensä saakka lukuun ottamatta aluetta laitteen alapuolelta (2).

Laserkeilausta voidaan suorittaa myös liikkuvasta ajoneuvosta, kuten työnnettävästä mittausvaunusta. Tätä mittaustapaa käytetään erityisesti tunnelien seinien skannauksessa. (4)

Opinnäytetyön aihe käsittelee vain maalaserkeilaimia, ja vain niillä pysyvässä sijainnissa tehtävää laserkeilausta. Tästä eteenpäin tässä dokumentissa käytettävillä termeillä ”laserkeilain” ja ”laserkeilaus” tarkoitetaan vain maalaserkeilainta ja sen käyttöä liikkumattomalla alustalla.



a) Scanning laser beam

Kuva 1. Kupolimainen keilaus. Laite kykenee keilaamaan koko ympäristönsä lukuun ottamatta aluetta laitteen alapuolelta (5, s. 12). Laitteen päällä oleva kantokahva on irrotettavissa (5, s. 20).

2.3.2 Laserkeilaimen orientointi, tasaus ja keskistys

2.3.2.1 Laserkeilaimen orientointi

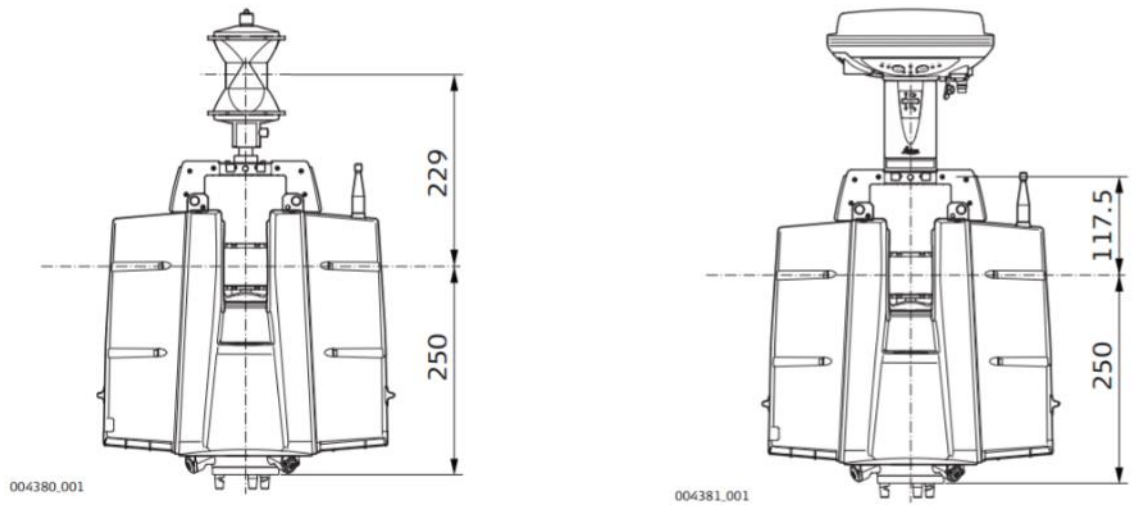
Laserkeilainta itseään ei tarvitse orientoida, vaan keilatut pistepilvet voidaan yhdistää toisiinsa tai/ja koordinaatistoon pistepilvien käsittely ohjelmalla.

Osa laserkeilainmalleista (kuten Leica ScanStation P30 ja P40) voidaan orientoida tähyksistä. (Ks. luku ”2.3.3 Tähys laserkeilauksessa”.)

2.3.2.2 Laserkeilaimen tasaus ja keskistys

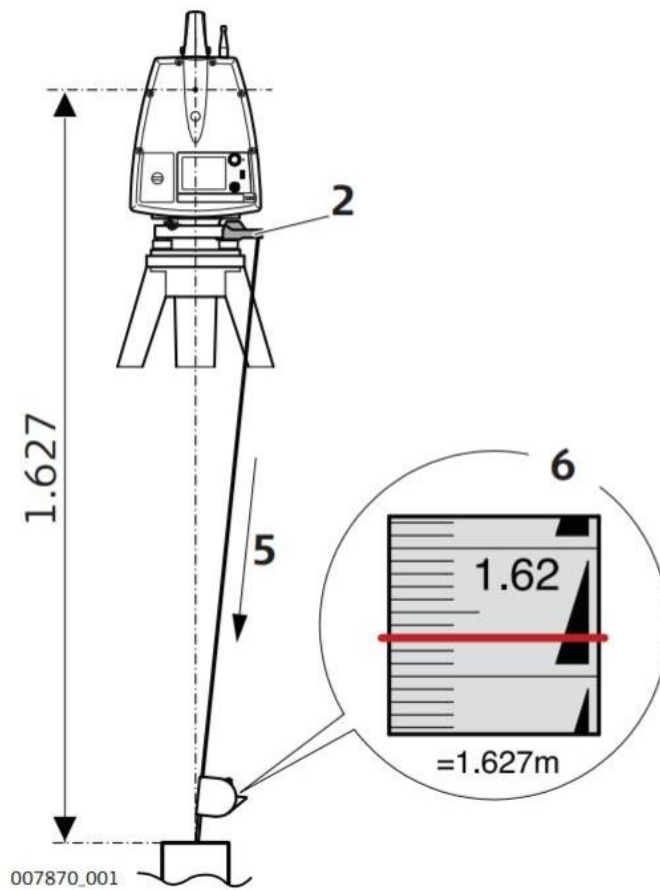
Laserkeilain tasataan tasausalustalla. Laserkeilain voidaan keskistää tunnetulle pisteelle käyttäen tasausalustan optista luotia tai laserkeilaimessa itsessään olevaa laserluotia, mikä on koneesta suoraan alaspäin osoittava lasersäde. Leican ilmoittama P30 keilaimen laserluodin tarkkuus on 1,5 m:n matkalla 1,5 mm ja sen leveys 2,5 mm (6). Koneen nollapisteen korkeus sen alla olevasta tunnetusta pisteestä voidaan mitata millimetrin tarkkuudella käyttäen mallikohtaisia mittavälineitä (kuva 3). Tai mittaamalla normaalilla mittanauhalla tunnetun pisteen etäisyys laserkeilaimen kyljessä olevaan vaaka-akselin merkintään, joka on nollapisteen korkeudella (5, s. 30–31). Koska taskumitalla ei voida mitata tätä pystysuoraa etäisyyttä suoraan, riippuu tuloksen tarkkuus siitä, kuinka hyvin mitatusta vinomitasta osataan arvioida pystysuora etäisyys (1, s. 256).

Joihinkin laserkeilainmalleista voidaan kiinnittää prisma, josta laserkeilaimen nollapisteen sijainti voidaan mitata takymetrilla. Joihinkin malleista voidaan kiinnittää myös GNSS-vastaanotin. (Kuva 2.) (5, s. 54.)



Kuva 2. Laserkeilaimeen kiinnitetty prisma ja GNSS-vastaanotin.

Kuvassa 3 mitataan nollapisteen korkeus käyttäen mallikohtaisia mittavälineitä.



Kuva 3. Nollapisteen korkeuden mittaus käyttäen mallikohtaisia mittavälineitä (5, s. 30).

2.3.3 Tähys laserkeilauksessa

Jos laserkeilainta ei orientoida, täytyy sen mittaamat pistepilvet yhdistää toisiinsa tai/ja koordinaatistoon pistepilvien käsittelyohjelmalla. Pistepilvien yhdistäminen toisiinsa voidaan tehdä käyttämällä pistepilven mittauksen yhteydessä keilattuja tähyksiä pistepilvien yhteisinä pisteinä. Mikäli pistepilvet halutaan yhdistää koordinaatistoon, täytyy näiden tähyksien tähtäyskohdan koordinaatit mitata takymetrillä. Pistepilvien yhdistäminen tapahtuu kyseisellä menetelmällä parhaimmillaan 1–3 mm:n tarkkuudella (2, s. 4).

Tähys on joko kuvioitu alusta tai geometrisesti symmetrinen muoto (usein pallo tai puolipallo). Alustan kuvioinnista laserkeilaimen ohjelmisto tai pistepilven käsittely ohjelmisto määrittää pistemäisen tähtäyskohdan. (2, s. 4.) Keilainmalleille Leica ScanStation P30 ja P40 ilmoitettu tarkkuus tähyksen tähtäyskohtien määrittämiseen on 2 mm 50 m:n matkalla (5, s. 47). Laserkeilauksessa tähys voi esimerkiksi olla seinään tai muuhun tasaiseen rakenteeseen teipattava A4-paperi, johon on tulostettu tähtäyskuvio. On myös pystytettävissä ja kiinnitettävissä telineitä, joissa tähyslevyn tähtäyskohta pysyy paikallaan niitä käännettäessä. Pallon tai puolipallon muotoisissa tähyksissä tähtäyskohta määriytyy pallon keskipisteeseen. Markkinoilla on tähyspallot, joihin on upotettu prisma niin, että pallon keskipisteen koordinaatit voidaan määrittää upotetusta prismasta takymetrimittauksella.

2.3.4 Keilaintakymetri

Tunnetaan myös nimityksellä ”takymetrilaserkeilain”. Laite toimii sekä takymetrinä että laserkeilaimena ja mahdollistaa siten takymetrimittauksen ja laserkeilauksen yhdistelmän. Laite voidaan orientoida suoraan takymetrimittauksen lähtöpisteistä. Tähyksiä ei tarvita, mikä poistaa niiden käytön aiheuttamat virhelähteet. Lisäksi laserkeilausmittaus yksinkertaistuu, kun mittaus voidaan suorittaa yhdellä laitteella. (7)

On tosin huomion arvoista, että tätä opinnäytetyötä kirjoittaessa löytyi Suomen markkinoilta tällä tuotenimellä vain yksi tuote: Trimble SX10 -keilaintakymetri. Sen keilausnopeus on 26.600 pistettä sekunnissa, mikä on huomattavasti pienempi kuin laserkeilaimen keilausnopeus.

Tässä opinnäytetyössä läpi käytävä laserkeilainten sijoittamisen periaate on geometrinen, joten se soveltuu yhtäläisesti keilaintakymetreihin.

2.4 Pistepilvi

2.4.1 Määritelmä

Pistepilvi on joukko pisteitä, joilla on 3D-sijainti, eli kullakin pisteellä on x , y ja z -koordinaatti. Pistepilven pisteet voivat sisältää koordinaattitiedon lisäksi myös muuta tietoa. Mikäli kyseinen pistetieto on suure, kutsutaan tätä pistepilven tietoa skalaariksi. (14)

2.4.2 Pistetieto

Laserkeilaimella mitatut pistepilvet sisältävät yleensä koordinaattitiedon lisäksi kullekin pisteelle intensiteettiarvon laserpulssin paluusignaalin voimakkuuden pohjalta. Jos keilain asetetaan keilauksen yhteydessä ottamaan kuvia, voidaan näistä kuvista väritieto eli RGB-tieto lisätä pistetietoon.

Keilattujen pisteiden lisäksi laserkeilain tuottaa pistepilveen pisteinä keilaimen nollapisteen sijainnin ja keilatuista tähyksistä määritetyt nimetyt tähtäyskohdat. Kun useita pistepilviä yhdistetään yhdeksi pistepilveksi, voi pistepilveen jättää tiedon siitä, mistä pilvestä kukin piste on peräisin. Toisin sanoen koneasemien keilaukset ovat erillisinä osapilvinä pistepilvessä.

Tästä eteenpäin tässä dokumentissa käytetään pistepilveen määritetystä keilaimen nollapisteen sijainnista termiä "nollapiste". Esimerkiksi "Pilvi X:n nollapiste", tarkoittaa Pilvi X:n keilanneen laserskannerin nollapisteelle keilauksessa määriteltyä sijaintia. Tässä opinnäytetyössä ei pistepilviä ole yhdistetty, joten kullakin pilvellä on oma nollapisteensä.

2.4.3 Skalaarikenttä

Pistepilvessä skalaari tarkoittaa pisteen jotain ominaisuutta kuvaavaa suuretta. Esimerkiksi pisteen intensiteettiarvo on skalaari. Kun pistepilven kaikilla pisteillä on

ominaisuutta kuvaava suure, käytetään tästä nimitystä skalaarikenttä (eng. *scalar field*). Pistepilven skalaarikenttää voi visualisoida suureen arvosta määräytyvällä värisävyllä tai värin kirkkaudella. Pistepilvellä voi olla useita skalaarikenttiä. Pistepilviin voi lisätä ja niistä voi poistaa skalaarikenttiä. Niitä voi muokata ja niitä voi tuottaa. (14)

Tämä opinnäytetyö keskittyy sellaisen skalaarikentän tuottamiseen, jossa suureen arvo pisteelle määräytyy kahden pistepilven välisestä vertailusta. Vertailtavan pistepilven pisteelle laskettava skalaariarvo on sitä suurempi, mitä kauempana siitä sijaitsevat referenssinä toimivan pistepilven lähimmät pisteet. Mikäli vertailussa käytetään pisteiden hahmottelevaa pintaa paikallisesti approksimoivaa mallia, lasketaan vertailtavan pilven pisteiden etäisyydet tähän malliin. (12) (Ks. luku ”6.7 Pistepilvien vertailu CloudCompare-ohjelmalla”.) Tässä opinnäytetyössä tällaisesta skalaarikentästä käytetään nimeä heat-map, ja se visualisoi väreillä tai sävyillä sitä, miten paljon pistepilvet kunkin pisteen kohdalla eroavat toisistaan.

Tästä eteenpäin tässä dokumentissa ilmaisu ”Pilvi X:n heat-map pilvi Y:n suhteen” tarkoittaa Pilvi X:n ja Pilvi Y:n pisteiden etäisyysvertailusta, jossa Pilvi Y toimi referenssinä Pilvi X:lle, tuotettua skalaarikenttää, jossa pisteen väri tai värisävy osoittaa pisteen ominaisuuden arvoa eli sitä, kuinka kaukana Pilvi X:n pisteestä olivat referenssinä toimineen pistepilven Pilvi Y:n lähin piste tai approksimoitu pinta.

2.5 Seurantamittaus

2.5.1 Seurantamittaus yleisesti

Seurantamittaus on saman mittauksen ajoittaista toistoa, ajan kuluessa mahdollisesti tapahtuvien muutoksien toteamiseksi (8). Mittauksella siis seurataan mitattavaa. Muita seurannasta käytettäviä termejä ovat monitorointi ja kontrollimittaus.

Mahdollinen muutos voidaan todeta, kun mittaustuloksen ero referenssinä olevaan aiempaan mittaukseen on suurempi kuin mittaukselle ominainen epätarkkuus. Huom. epätarkkuus tässä tarkoittaa lukuarvoa, jota mittaukseen arvioitujen virheiden summa ei ylitä tietyllä valitulla todennäköisyydellä. (1, s. 36.) Mikäli mittaus voidaan toistaa niin

identtisesti, että tuloksessa olevat systemaattiset virheet pysyvät vakioina eri mittauskerrojen välillä, kumoutuvat systemaattiset virheet muutosten toteamisen tarkastelussa (9).

2.5.2 Esimerkkejä seurantamittauksesta

Seuraavassa on esimerkkejä seurantamittauksen kohteista.

Rakennuksen, rakennelman tai rakenteen mahdollinen painumisen mittaus voidaan suorittaa tarkkavaaiteemalla rakenteeseen upotetun pultin korkeus. Mikäli rakenne on kiinteä ja jäykkä, voidaan pisteen korkeuden mittauksesta päätellä korkeusmuutokset rakenteessa.

Rakenteiden pysyvyyden tarkastelussa rakenteeseen asetetaan erottuvia kohteita, esimerkiksi tarroja, joissa on tähyskuvio, porattavia pultteja tai tussilla piirretty ruksi (tähtäyskohta on piste, jossa viivat risteävät). Takymetrimittauksella mitataan näiden rakenteissa olevien kohteiden osoittamien pisteiden 3D-sijainti. Mikäli rakenne on kiinteä ja jäykkä, voidaan mittauspisteiden siirtymistä päätellä rakenteiden liikkuminen.

Rakenteen pintojen muodon laajaa visualisointia ja tarkastelua laserkeilauksella toteutetaan esimerkiksi eroosion tarkasteluun maaperässä (10) ja arkeologiassa. Muuntumia pyritään selvittämään monimutkaisissa rakenteissa kuten sillat, laivarungot tai teollisuuden rakenteet.

2.5.3 Lähtöpisteet

Orientoimalla seurantamittaukset lähtöpisteiden määrittämään koordinaatistoon saadaan näkyviin rakenteessa seurattavien pisteiden tai pintojen mahdollinen liikkuminen näiden lähtöpisteiden suhteen. Lähtöpisteiden täytyy olla tukevassa ja kestävässä alustassa, joka on liikkumaton suhteessa siihen rakenteeseen, johon kohteen pintojen liikkumista on oleellista verrata. Esimerkiksi rakennuksen vajoamisen tarkastelu voi olla oleellista tehdä suhteessa kallioperään. Rakennuksen julkisivun tarkastelu voi olla oleellista tehdä suhteessa sen perustuksiin. Teollisuustiloissa olevien säiliöiden ja putkien tarkastelu voi olla oleellista tehdä suhteessa tilojen lattiaan, seiniin ja pylväisiin.

2.5.4 Ilman lähtöpisteitä

Jos seurantamittaus tehdään ilman orientointia tai yhtenäistä koordinaatistoa eri mittauskertojen välillä, tehdään myös mittauksien vertailut ilman yhtenevää koordinaatistoa. Näin esimerkiksi silloin, kun lähtöpisteet ovat tuhoutuneet tai jos rakenteet, joihin lähtöpisteet ovat kiinnitetty, on todettu epävakaaiksi, jolloin lähtöpisteiden koordinaattitietoon ei enää voi luottaa. Myös mitattavasta kohteesta ja sen ympäristöstä riippuen lähtöpisteiden käyttö saattaa olla mahdotonta, esimerkiksi jos kohdetta kuljetetaan sijainnista toiseen, kohde on ympäristöstään irrallinen ja liikkuva tai kohde itse on liikenneväline.

Tällöin pisteiden tai pintojen mittaus tapahtuu suhteessa vain kohteeseen itseensä. Mittattu pistepilvi siirretään ja käännetään mahdollisimman yhteneväksi aiemman mittauksen pistepilven kanssa pienimmän neliösumman menetelmällä tai muulla metodilla. Näin ollen vertailu ei anna tietoa siitä, miten, paljonko tai mihin suuntaan kohteesta mitatut pisteet tai pinnat ovat liikkuneet, vaan se kertoo vain sen, miten ne ovat liikkuneet suhteessa toisiinsa.

3 Seurantamittaus laserkeilauksella

3.1 Rasteri

Laserkeilain ei keilatessa tähtää mihinkään tiettyyn kohtaan ympäristössään. Laserpulsit lähtevät kojeen nollapisteestä kulmittain tasavälein kojeen kiertyessä akseliensa ympärillä (kuva 1). Näin ollen keilausta voi ajatella tasaisena kupolimaisena pisterasterina, joka projisoituu keilaimesta ympäristön pinnoille. Se miten tämä rasteri tarkalleen lähtee keilaimesta, on sattumanvaraista, joten pinnan samojen pisteiden mittaus ei ole mahdollista, vaikka laserkeilainta pidettäisiin paikallaan keilausten välillä. Laserkeilaus ei siis mittaa pisteitä toistettavasti. Mittauksen toistettavuus perustuu siihen, että pinnoille projisoitunut rasteri on tarpeeksi tiheä hahmottamaan pinnan muodot. Seurantamittauksessa näitä hahmotuksia verrataan toisiinsa.

3.2 Pinnan suuntainen liike ja puuttuva pinta

3.2.1 Pinnan suuntainen liike

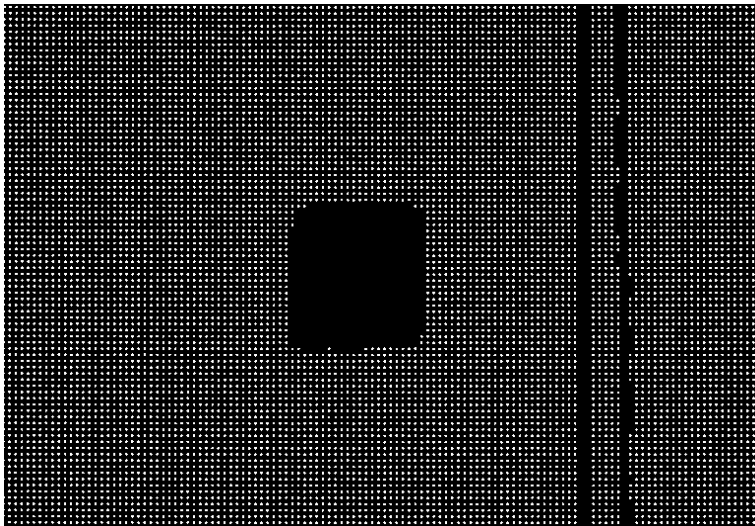
Heat-map-tarkastelu paljastaa muutoksen pinnan muodossa, mutta se ei välttämättä paljasta pinnan liikettä. Jos pinta on tasainen ja liike tapahtuu pinnan suuntaisesti (esim. tasainen seinä, joka vajoaa), ei sen muodossa tapahdu muutoksia. Tämän tapaisen liikkeen toteaminen vaatisi visuaalista tarkastelua sekä myös sitä, että pinnassa on vertailun vaatimaa kuviointia (kuva 4).

Jotta tämän tapainen liike olisi havaittavissa heat-map-näkymässä, tulisi pintaan lisätä uloke tai syvennys, jonka sijainnin muutoksen pilvien vertailu pystyisi toteamaan. Pintaan voi myös kiinnittää materiaalia, joka ei ole keilattavissa (kuva 5), jolloin siitä pistepilveen syntyvän ”aukon” liike on todettavissa heat-map-näkymästä pistepilvien erona.



Kuva 4. Purkkien pinta on kääntynyt useita senttimetrejä (vasemmanpuoleisin purkki on kiertynyt 10 cm) referenssi- ja vertailtavan mittauksen välillä, mikä on selvästi nähtävissä RGB-väritetyssä pistepilvessä pinnan kuviosta ja todettavissa intensiteetin skalaarikenttä näkymässä purkkien kahvan liikkeestä. Kuitenkaan tätä liikettä ei pystytä toteamaan kummastakaan pistepilvestä toisen suhteen tehdystä heat-map-skalaarikentästä, sillä liike ei muuttanut purkin muotoa (lukuun ottamatta kahvan sijaintia). Heat-map-näkymässä kirkas vihreä väri osoittaa 1 cm:n eroa pilvien välillä.

Kuva 4 näyttää kiertynyttä kohdetta heat-map-näkymässä.



Kuva 5. Pistepilven näkymä takymetrin orientointiin käytettävästä heijastavasta tarratäyhksestä. Keilain (Leica ScanStation P30) ei saa mittaustulosta tarran pinnasta, joten pistepilven muodostuu aukko.

3.2.2 Puuttuva pinta

Jos seurantamittattavassa kohteessa tapahtuva muutos on pinnan poistuminen täysin (esim. ulokkeen tippuminen pois rapautuvasta arkeologisesta kohteesta), se ei tule esille muutoksena normaalissa pistepilvien etäisyys vertailussa. Näin on, siksi että vertailu pistepilvestä referenssipilveen tapahtuu vain vertailtavassa pilvessä oleville pisteille. Mikäli on syytä olettaa, että seurattavasta kohteesta voi poistua pintoja, on tarpeen tehdä pistepilvien vertailu myös toiseen suuntaan eli verrata referenssipilveä myöhemmän mittauksen pilveen. Tuotetaan siis ”referenssipilven” heat-map myöhemmin mitatun pilven suhteen.

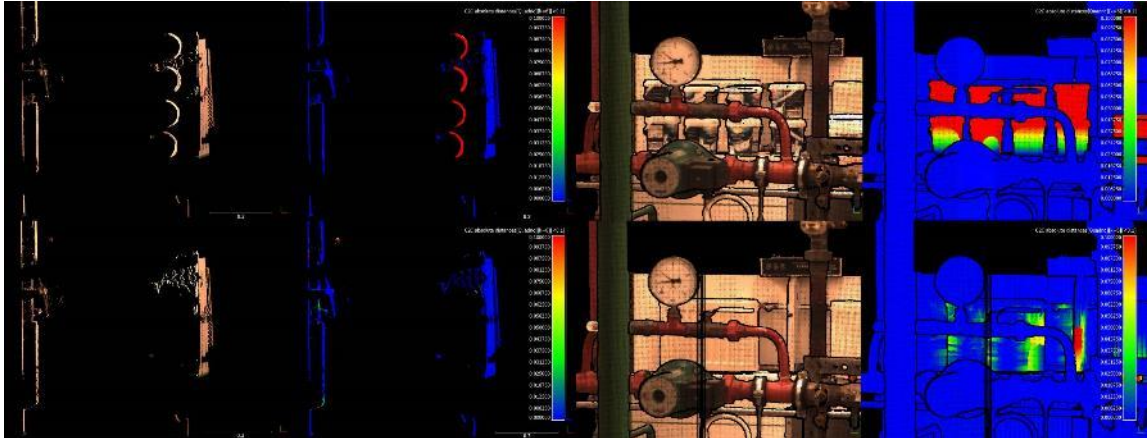
3.2.3 Kaksisuuntainen vertailu

Pilvi 6:n heat-map pilvi 5:n suhteen (pilvi 6 on keilattu pilvi 5:n jälkeen) ei siis paljasta mittauskertojen välillä poistunutta pintaa. Jotta poistunut pinta voitaisiin todeta, pitää tehdä pilvi 5:n heat-map pilvi 6:n suhteen. Tästä eteenpäin tässä dokumentissa kutsutaan sitä, että kummastakin pilvestä tehdään heat-map toisen suhteen kaksisuuntaiseksi vertailuksi.

Esimerkkinä kuva 6. Ylemmät 4 näkymää ovat pilvi 5:stä, alemmat pilvi 6:sta. Vasemmalta oikealle: RGB-näkymä ylhäältä, heat-map näkymä ylhäältä, RGB-näkymä pilvi 5:n nollapisteestä, heat-map-näkymä pilvi 5:n nollapisteestä. Heat-map-näkymässä punainen väri kertoo yli 10 cm:n muutoksesta. Vihreä väri kertoo yli 4cm:n muutoksesta.

Pilvi 5:ssä on neljä purkkia, joita ei ole pilvi 6:ssa. Pilvi 6:n heat-mapistä pilvi 5:n suhteen niiden puuttuminen ei tule esille. Tekemällä vertailu toiseen suuntaan saadaan poistunut pinta esille.

Tässä tapauksessa voidaan myös pilvi 6:n heat-map pilvi 5:n suhteen kertoa epäsuorasti tapahtuneesta muutoksesta, sillä pilvet on keilattu vain yhdestä asemasta ja pistepilvistä ei ole leikattu pois purkkien takana ollutta seinää. Näin ollen pilvi 6:ssa on takaseinällä pisteitä, jotka pilvi 5:n keilauksessa jäivät purkkien varjoon. Nämä pisteet tulevat näkyviin muutoksena pistepilvien välillä.



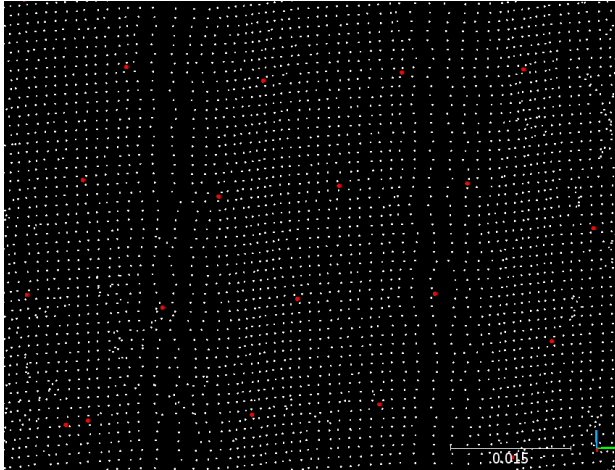
Kuva 6. Ylemmät 4 kuvaa ovat pilvi 5:n RGB-näkymää ja pilvi 5:n heat-map pilvi 6:n suhteen, alemmat ovat pilvi 6 RGB-näkymää ja pilvi 6:n heat-map pilvi 5:n suhteen. Vasemmalta oikealle: RGB-näkymä ylhäältä, heat-map-näkymä ylhäältä, RGB-näkymä pilvi 5:n nollapisteestä, heat-map-näkymä pilvi 5:n nollapisteestä.

Laajempi testaus kaksisuuntaisesta vertailusta liitteessä 2.

3.3 Seurantamittauksen laserkeilauksen teoreettinen suoritus

Teoriassa paras laatu seurantamittauksen pistepilvien vertailussa saadaan, jos ensimmäisellä mittauskerralla kohteen koko pinta keilataan tiheällä resoluutiolla. Kojeasemien sijainnin ja keilauksen resoluution valinnassa on otettava huomioon, että koska rasteri projisoituu pinnalle, riippuu sen pistetiheys pinnalla siitä, kuinka kaukana pinta on keilaimesta ja siitä, kuinka vinossa kyseinen pinta on keilaimen kohtisuoraan nähden.

Mikäli mittaus vaatii useita kojeasemia, niistä keilatut pistepilvet yhdistetään yhdeksi pilveksi. Tämän jälkeen pilvi harvennetaan tiedostokooltaan käyttökelpoiseksi referenssipilveksi.



Kuva 7. Koska pinnasta on tiheä referenssipilvi (valkoiset pisteet), ovat myöhemmin keilatun harvemman vertailupilven (punaiset pisteet) pisteiden lähellä referenssipilven pisteitä huolimatta siitä, mihin kohtaan pintaa ne sattuvat osumaan.

Myöhemmät mittaukset voivat tapahtua harvemmalla resoluutiolla, eikä niiden tarvitse keilata kohteen koko pintaa, sillä niitä vain verrataan referenssipilveen. Koska referenssipilvi on hahmottanut pinnan, voi siihen verrata harvempaa pisteiden mittausta tai jopa yksittäisten pisteiden mittausta pinnasta (kuva 7).

3.4 Seurantamittauksen laserkeilaus käytännössä

Käytännössä kohteen koko pinnan keilaus on mahdotonta, jos pinnassa tai pinnan ja keilaimen välillä olevissa rakenteissa on monimutkaisuutta. Tällaista monimutkaisuutta ovat esimerkiksi tukirakenteet, koristerakenteet ja teollisuuden putkistot. Tällaista kohdetta keilataan niin monesta kojeasemasta kuin kyetään käytettävissä olevan ajan ja työpanoksen puitteissa. Kohteen pinnan keilaukseen jää vääjäämättä katveita, eli pinnassa on kohtia, joista ei ole pistemäistä mittaustietoa.

3.5 Yhden keilauksen vaatima työaika

Luetellut ajat ovat arvioita. Ne pätevät osittain vain Leica ScanStation P30 -laserkeilaimelle ja Cyclone-ohjelmistolle. Osittain kuluva aika riippuu työssä käytettyjen teknisten laitteiden, kuten laserkeilain, tietokoneet ja USB-tiedonsiirto, laadusta. Lisäksi

keilauksen tekijän ja pistetiedon käsittelijän kokemus voi vaikuttaa työtehtävään kuluvan ajan määrään.

Luettelon tarkoitus on antaa käsitys siitä, kuinka paljon työaikaa vaatii koko prosessi heat-mapin tuottamiseksi verrattuna pelkän keilauksen vaatimaan aikaan.

Keilauksesta heat-mapiksi. Ajat arvioita:

- Keilaimen pystytys (ilman keskistystä tunnetulle pisteelle). 5 min
- Tähyksien erillinen keilaus. 10 min
- Täyden kupolin keilaus resoluutiolla 3,1 (kuva 8) tai neljänneskupolin keilaus resoluutiolla 1,6. 4 min
- Keilaimen valokuvien otto. 15 min
- USB-tiedonsiirto keilaimesta USB-muistiin. 5 min
- USB-tiedonsiirto USB-muistista tietokoneelle. 5 min
- Keilaimen raakatiedon tuonti Cyclone-tietokantaan (RGB-tiedolla). 30 min
- Käsittely Cyclone-ohjelmalla. 5 min
- Pistepilven kirjoittaminen ptx-muotoon. 10 min
- Ptx-muodon avaaminen CloudCompare-ohjelmalla. 6 min
- Pilven segmentointi CloudCompare-ohjelmalla. 1 min
- Heat-map generointi. 4 min.

Scan duration (ScanStation P30):

Resolution [mm @ 10 m]	Estimated scan duration [HH:MM:SS] for a full dome scan
50	00:00:20
25	00:00:33
12.5	00:00:58
6.3	00:01:49
3.1	00:03:30
1.6	00:13:33
0.8	00:54:07

Kuva 8. Keilauksen keston arvioita Leica ScanStation P30 -keilaimesta.

Yksittäinen 20 min:n kestoinen (keilaus ja valokuvat.) resoluution 3,1 keilaus vie käsittelyaikaa 1½ h – 2 h. Koska suurin osa näistä käsittelyn prosesseista on riippuvaisia pisteiden määrästä, voidaan päätellä, että yksi täyden kupolin keilaus resoluutiolla 1,6 veisi käsittelyaikaa 3–4 kertaa tätä kauemmin.

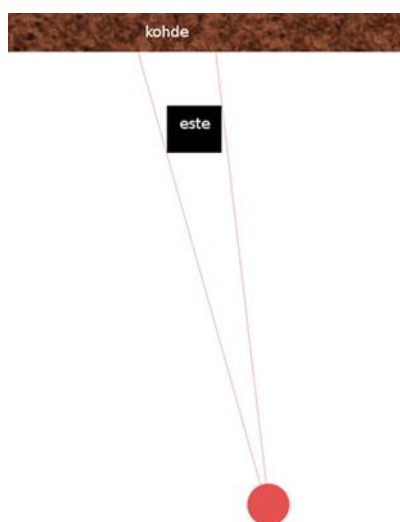
Käsittelyä voi huomattavasti nopeuttaa keilaamalla vähemmän pisteitä. Esim. rajaamalla keilattavaa aluetta tai käyttämällä väljempää resoluutiota. Pistepilvestä voi jättää RGB-tiedon keräämättä, mikäli värinäkö ei ole tarpeen muuntumien tarkastelussa. Lisäksi Cyclone-ohjelmaa käytettäessä voi pistepilvestä leikata pois muuntumien tarkastelulle turhia alueita, mikä nopeuttaa pistepilven käsittelyä CloudCompare-ohjelmalla.

4 Esitetyt hypoteesit

4.1 Geometrinen riippuvuus kojeaseman sijainnin ja katveen sijoittumisessa kohteen pinnalle

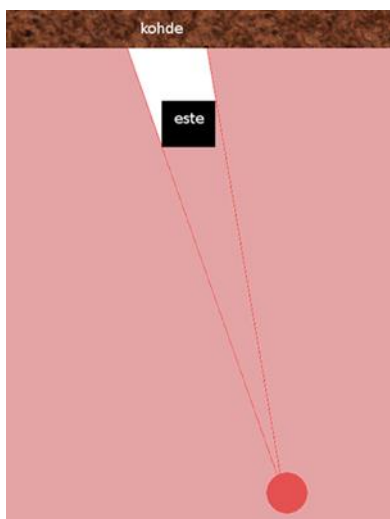
Esitetty hypoteesi on, että se mihin sijaintiin keilain on pystytetty ja se mihin katve sijoituu kohteen pinnalle ovat suoraan riippuvaisia toisistaan.

Kaavakuvassa (kuvat 9, 10, 11) ”kohde” on laserkeilauksella seurattava objekti. ”Este” on muu objekti, joka peittää laserkeilaimen näkyvyyden kohteeseen. Punainen ympyrä esittää laserkeilaimen sijaintia.



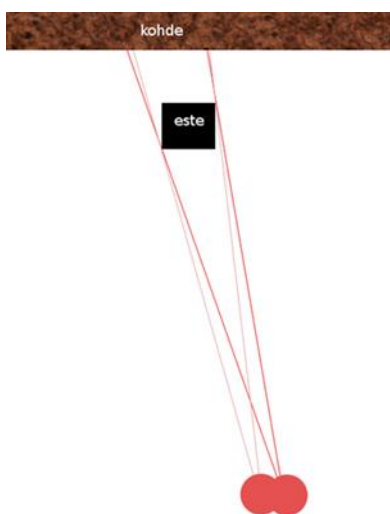
Kuva 9. Laserkeilaimen ja keilattavan kohteen välillä on näköeste.

Mikäli laserkeilaimen ja keilattavan kohteen välillä on näköesteitä (kuva 9), estää tämä pistepilven saamisen esteen kohteeseen luomasta varjosta (kuva 10).



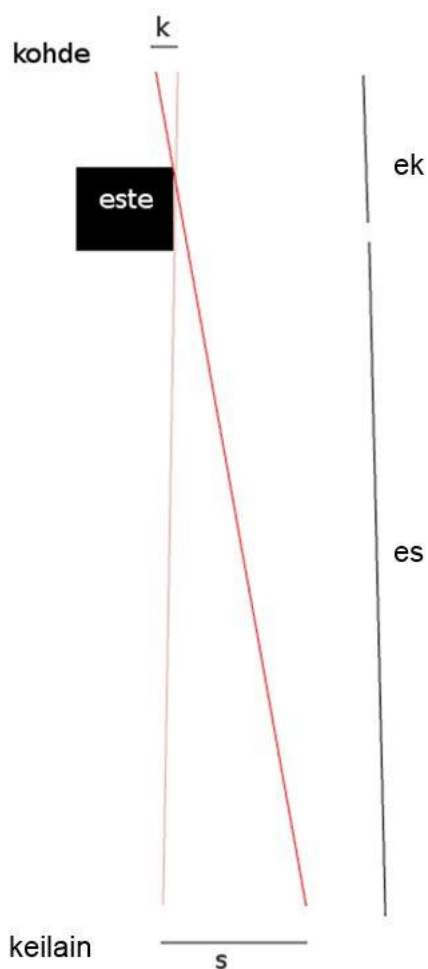
Kuva 10. Este luo kohteen pintaan varjon.

Keilattuun pistepilveen syntyy katvealue. Jos keilaimen sijainti muuttuu eri mittauskertojen välillä, muuttuu myös katvealueen sijainti (kuva 11). Näin ollen este aiheuttaa eroavaisuutta eri sijainneista kuvattujen pistepilvien välille sitä enemmän, mitä enemmän keilaimen sijainti eroaa aiemmasta.



Kuva 11. Katvealueen sijainti on riippuvainen keilaimen sijainnista.

Tämä yksinkertaistettu tilanne voidaan esittää suorana riippuvuutena (kuva 12).



Kuva 12. Muuttujat katvealueen sijainnin ja keilaimen sijainnin välisessä riippuvuudessa.

Muuttujat:

- ”k” on ero pistepilvien välillä.
- ”s” on ero keilaimen sijainnissa.
- ”ek” on matka esteestä kohteeseen.
- ”es” on matka esteestä keilaimeen.

Muuttujat yhtälönä 1.

$$\frac{k}{s} = \frac{ek}{es} \quad (1)$$

Lisäksi on otettava huomioon, että keilattava pinta saattaa olla vinoissa laserkeilaimesta tulevan lasersäteen kohtisuoraa vastaan. Tämä vinous voidaan ottaa huomioon

suorakulmaisen kolmion kaavalla (hypotenuusan pituus on viereisen kateetin pituus jaettuna kulman kosinilla) (yhtälö 2).

Muuttujat:

”k” on ero kohtisuoralla lasersäteen suuntaa vastaan.
 ”h” on ero pistepilvien välillä vinolla pinnalla.
 ”a” on kulma lasersäteen kohtisuoraa vastaan.

$$h = \frac{1}{\cos a} * k \quad (2)$$

Merkitään että $x = 1/\cos(a)$ (yhtälö 3).

$$x = \frac{1}{\cos a} \quad (3)$$

Tällöin x saa seuraavat arvot näillä annetuilla kulman arvoilla.

0° -> x = 1 = 1
 45° -> x = 1,4 ≈ 1,5
 60° -> x = 2 ≈ 2
 75° -> x = 3,9 ≈ 4

Kaavat yhdistettyinä (yhtälö 4). Ero katveen sijainnissa pinnalla (h) on keilaimen sijainnin epätarkkuus (s) kertaa kulmakorjaus (x) kertaa kohteen pinnan (ek) ja keilaimen (es) etäisyyksien suhde esteestä.

$$h = s * x * \frac{ek}{es} \quad (4)$$

Käännettynä (yhtälö 5). Vaadittu tarkkuus keilaimen pystytykselle tunnetulle pisteelle (s) katvealueille sallitusta sijaintien erosta (h).

$$s = \frac{h}{x} * \frac{es}{ek} \quad (5)$$

Esitetty periaate on pelkistetystä tilanteesta, eikä siis vastaa todellisuutta. Esitettyjen kaavojen onkin tarkoitus tarjota nyrkkisäännöt, joista voi nopeasti päätellä keilaustilanteen vaatiman vähimmäistarkkuuden keilaimen pystytykselle tunnetulle pisteelle.

Esimerkiksi

Jos este on 1 m kohteesta (ek) ja 10 m keilaimesta (es) ja pinta 45° :n kulmassa ($x=1,5$), niin alle 10 cm ero keilaimen sijainnissa (s) pitäisi pistepilvien kattavuus erot alle 1,5 cm (h).

Jos taas $ek=10$ m, $es=1$ m ja pinnan kulma 60° , niin jo 1 cm:n ero keilaimen sijainnissa (s) aiheuttaisi 20 cm:n kattavuuseroja.

Jos suurin sallittu kattavuusero on 1 mm (h), kohteen pinnassa on pintaa 60° :n kulmassa ($x=2$), este on 10 cm kohteesta (ek) ja 10 m keilaimesta (es), niin sallittu ero keilaimen sijainnissa on 5 cm (s).

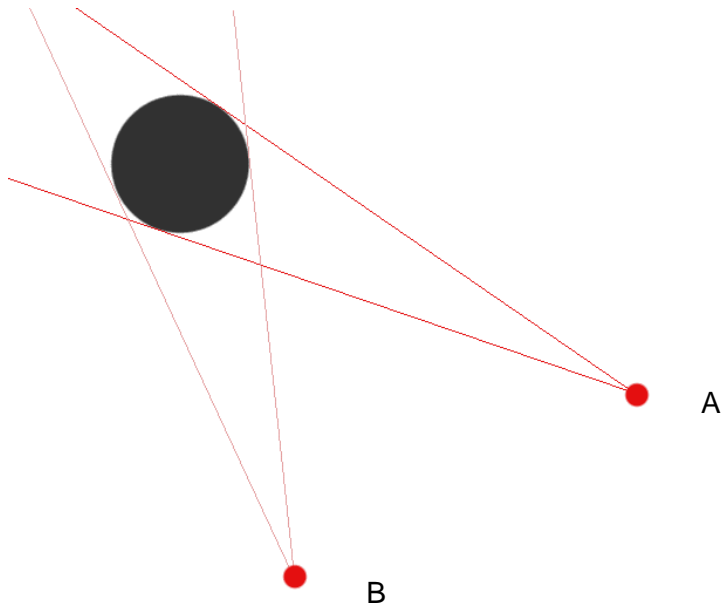
Sama periaate pätee myös kohteen pinnan omaan epätasaisuuteen, eli sen pinnan ulkonemiin ja syvennyksiin, jotka aiheuttavat katveita keilauksessa.

Huom! Jos seurantamittauksessa myöhempiä mittauksia verrataan myös toisiinsa (sen sijaan että niitä verrattaisiin pelkästään ensimmäiseen mittaukseen), pitää pystytyksen epätarkkuus kertoa kahdella näihin nyrkkisääntöihin, sillä tällöin kummankin mittauskerroksen kojeasema on pystytetty kyseisellä epätarkkuudella.

4.2 Heat-map-tarkastelu referenssipilven nollapisteestä

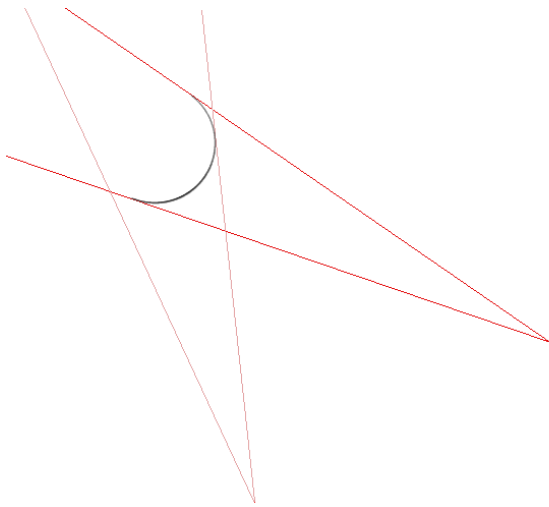
Esitetty hypoteesi on, että jos keilaus tapahtui eri mittauskerroilla läheisistä kojeasemista ja keilatessa pistepilvessä ei ole aukkoja johtuen keilauskelvottomasta pinnasta (esim. prismapinnat), niin asettamalla näkymä pilven heat-mapille referenssinä toimineen pilven nollapisteeseen, poistuvat näkyvistä kattavuuden eroista johtuvat pilvien erot. Näkyviin jää vain se pinta, joka on keilattu molemmilla mittauskerroilla.

Seuraavaksi kyseinen hypoteesi selostettuna tarkemmin kaavakuvilla (kuvat 13–22). Kohde on mustalla. Punaiset pallot ovat keilaimen asemat eri mittauskerroilla. Punaiset viivat osoittavat keilaimen näkyvyyttä kohteen pintaan sekä näkyvyyttä keilatun pilven nollapisteestä. Eriväriset kaaret ovat keilattuja pistepilviä.



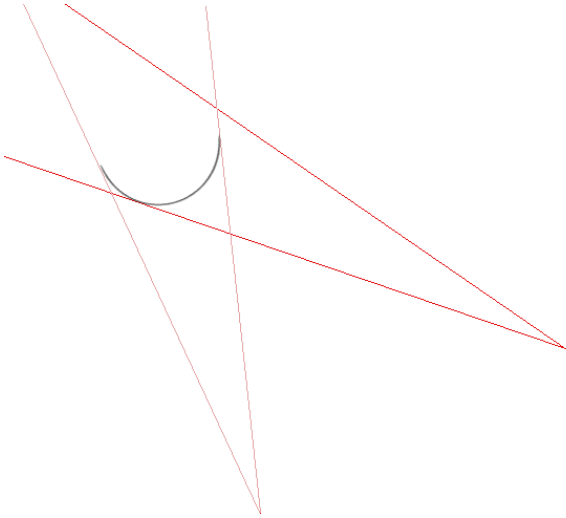
Kuva 13. Kohdetta keilataan kahdesta eri sijainnista.

Eri mittauskerroilla kohdetta keilataan eri sijainneista (kuva 13). Keilaus A ja keilaus B.



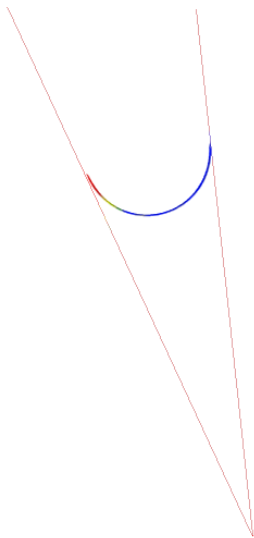
Kuva 14. Pilvi A

Keilausdata muunnetaan pistepilviksi.



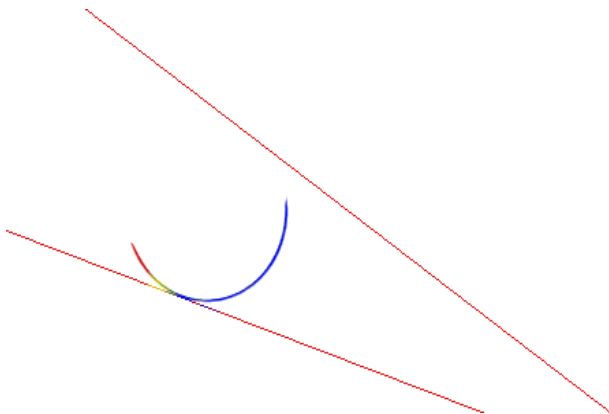
Kuva 15. Pilvi B

Näin tuotetaan kaksi eri pistepilveä, pilvi A ja pilvi B. Ne kattavat kohteen pintaa eri kohdista, sillä ne keilattiin eri sijainneista (kuvat 14 ja 15).



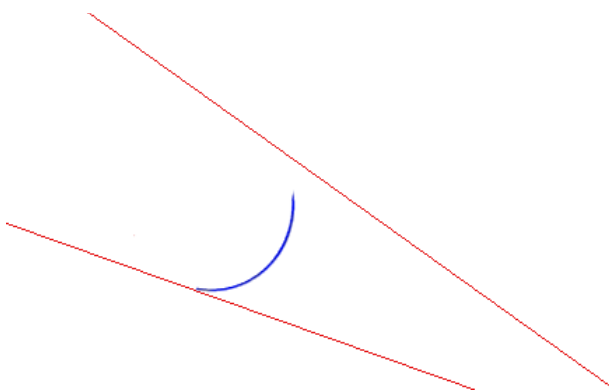
Kuva 16. Pilvi B:n heat-map pilvi A:n suhteen.

Pilvi B:n heat-map pilvi A:n suhteen näyttää ne pilvi B:n osat, joita ei kattavuuserojen takia ole pilvi A:ssa, muuntumina pilvien välisen etäisyyden tarkastelussa (kuvat 16 ja 17). Punaiset ja keltaiset kohdat osoittavat eroa pilvien välillä. Punainen osoittaa suurta eroa ja keltainen pientä.



Kuva 17. Pilvi B:n tarkastelu pilvi A:n nollapisteestä.

Tarkastelemalla pilveä referenssinä toimineen pilven nollapisteestä, voi katsoja piilottaa näkyvistä pilvi B:stä ne pinnat, joka eivät olisi olleet näkyvissä pilvi A:n nollapisteestä (kuva 17). Näkyviin jää vain se pinta, jonka molemmat kojeasemat ovat kattaneet (kuva 18).

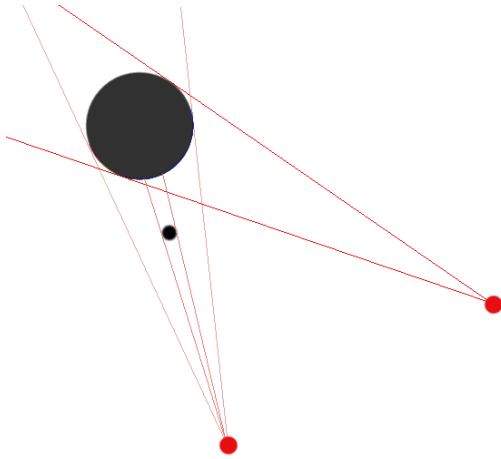


Kuva 18. Katsojan näkymä pilvi B:stä pilvi A:n nollapisteestä.

Tämä perustuu siihen, että kun pilvi B:tä katsotaan pilvi A:n nollapisteestä, pilvi B:n omat pisteet peittävät näkyvistä ne osat pilvi B:n kohdetta kuvaavista pinnoista, jotka eivät

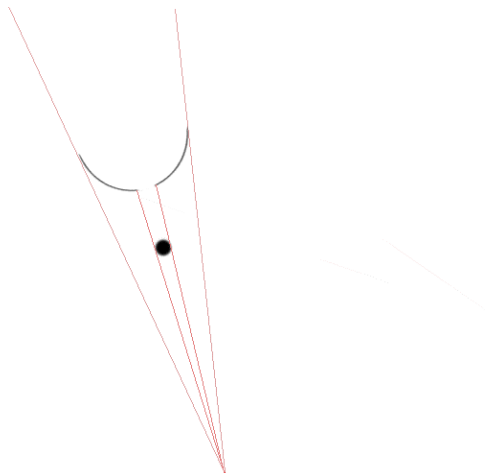
olleet näkyvissä pilvi A:n keilauksessa, eli eivät ole näin ollen näkyvissä pilvi A:n nollapisteestä. Monimutkaisessa ympäristössä tämä tarkastelutapa toimii vain, jos pilvien keilaukset tapahtuivat toisiaan lähellä olevista kojeasemista. Tämä siksi, että silloin molempien keilausten kattama pinta on esteiden varjostavan vaikutuksen johdosta repaleinen ja vain jos kojeasemat olivat hyvin lähellä toisiaan peittyvät kattavuuserot näkyvistä.

Esimerkki tilanteesta, jossa esitetty tarkastelu ei onnistu.



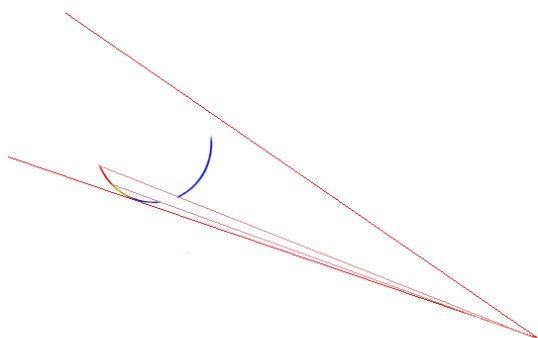
Kuva 19. Pilvi B:n keilauksessa on kohteen edessä este, joka peittää kohdetta osittain.

Pilvi B:n keilauksessa on kohteen edessä este, joka peittää kohdetta osittain (kuva 19).



Kuva 20. Kohteesta keilatussa pilvi B:ssä on esteen "varjo".

Pilvi B:ssä on kohteen pinnan pisteissä nyt esteen "varjo" (kuva 20).



Kuva 21. Pilvi B:n tarkastelu referenssinä toimineen pilvi A:n nollapisteestä.

Kun pilvi B:n pisteitä katsotaan referenssinä toimineen pilvi A:n nollapisteestä, jää katve-eroja näkyviin (kuva 21).



Kuva 22. Katsojan näkymä pilvi B:stä pilvi A:n nollapisteestä. Tarkastelu on epäonnistunut.

Näin ollen tarkasteluun jää häiriötä (kuva 22). Sama ongelma tulee vastaan myös, jos keilattavassa pinnassa on keilauskelvotonta materiaalia eli pintaa, josta laserkeilain ei saa lukemaa (esim. prismapinnat).

5 Muutosesitys laserkeilaus seurantamittauksen käytäntöön

5.1 Mittaustapa

Esitetty muutos mittauskäytäntöön on se, että seurantamittausprojektissa kohteen laserkeilaus suoritetaan vain tunnetuilta pisteiltä. Nämä tunnetut pisteet ovat ensimmäisen mittauskerran eli referenssipilven laserkeilauksen kojeasemat. Sen jälkeisillä mittauskerroilla laserkeilain pystytetään vain näihin tunnettuihin pisteisiin.

Esitetyn hypoteesin mukaan (ks. luku ”4.1 Geometrinen riippuvuus kojeaseman sijainnin ja katveen sijoittumisessa kohteen pinnalle”), jos keilaimen ja kohteen välillä on näkyvyyden estäviä rakenteita tai kohteen pinta itsessään on monimutkainen, se, mihin kohtiin kohteen pintaa keilauksen katvealueet tulevat eli mihin kohtiin kohteen pintaa peittävään pistepilven jää aukkoja, riippuu suoraan kojeaseman sijainnista. Lisäksi keilaaminen vain tunnetuilta pisteiltä varmistaa, että kukin kojeasema kattaa mahdollisimman paljon samaa pintaa kuin referenssimittauksessa.

Lisäksi ehdotan, että referenssimittauksessa käytettyjen laserkeilaimen tähysten sijainnit kuitataan talteen ja että samoja sijainteja käytetään myöhempien mittauksen tähyksille. Tämä siksi, että kyseisten sijaintien näkyvyys tunnetuille pisteille on jo tiedossa ja näin niiden uudelleenkäyttö potentiaalisesti säästää aikaa ja vaivaa.

Lisäksi ehdotan, että referenssimittauksessa käytettyjen takymetrin asemien sijainnit otetaan muistiin (esim. laittamalla merkki lattiaan tussilla tai tarralla) ja että samoja sijainteja käytetään myöhemmissä mittauksissa. Tämä kannattaa siksi, että kyseisistä sijainneista näkyvyys tähyksiin (ja laserkeilaimen kojeasemiin, mikäli takymetria käytetään laserkeilaimen sijoittamisessa) on jo tiedossa, ja näin niiden uudelleenkäyttö potentiaalisesti säästää aikaa ja vaivaa.

5.2 Pilvien käsittely

Ehdotan, että yhdistettäessä mittauskerran eri keilausten pistepilviä yhdeksi pilveksi, kukin keilaus jätetään säännönmukaisesti erilliseksi osapilveksi pilveen. Tämä mahdollistaa

- heat-map-vertailun kahteen suuntaan osapilvikohtaisesti siltä varalta, että kohteesta on poistunut pintaa (liite 2).
- osapilven jättämisen pois vertailusta, mikäli jokin niistä on epäonnistunut laadultaan.
- osapilviä voi käsitellä erikseen ”hidden point removal” -työkalulla (liite 1).

Yleensä osapilvitieto jää automaattisesti pilveen, kun pilviä yhdistetään, mutta pistepilven käsittelyssä, kuten harvennuksessa, tämä tieto voi kadota.

Ehdotan, että keilaimen nollapisteen sijainnit eri kojeasemista jätetään säännönmukaisesti pilveen. Tämä mahdollistaa perspektiivinäkymän nollapisteestä eli pistepilven tarkastelun nollapisteestä. Yleensä tämä tieto jää automaattisesti pilveen, mutta pistepilven käsittelyssä tämä tieto voi kadota.

5.3 Heat-map-tarkastelu

Esitän, että heat-map-vertailu tehdään kaksisuuntaisesti, eli sen lisäksi, että tehdään heat-map-vertailu myöhemmän mittauksen pistepilvelle käyttäen referenssinä ensimmäisen mittauksen pilveä, tehdään myös heat-map-vertailu ensimmäisen mittauksen pilvelle käyttäen referenssinä myöhemmän mittauksen pilveä. Tämä paljastaa kohteesta poistuneen pinnan (liite 2).

Esitän, että heat-map-tarkastelussa käytetään hyödyksi näkymää referenssinä toimineen pilven nollapisteestä. Mikäli vertailtavien pilvien keilausten nollapisteen ovat lähellä toisiaan, tässä näkymässä kaikki muu kuin molemmista kojeasemista näkyvä pinta on piilossa tämän yhteisen pinnan takana (luku ”4.2 Heat-map tarkastelu referenssipilven nollapisteestä”).

Lisäksi ehdotan, että pistepilvien vertailussa testataan heat-mapin puhdistamista käyttämällä CloudCompare-ohjelman "hidden point removal" -työkalua heat-mapin referenssinä toimineen pilven nollapisteestä (liite 1). Työkaluun on syytä suhtautua varauksella, sillä CloudCompare-ohjelman tämänhetkinen versio käyttää pintojen approksimaatiota, joka liioittelee näköesteiden takana olevien pintojen leikkausta sitä enemmän, mitä suurempi on esteen etäisyys kohteen pinnasta. Se on silti käyttökelpoinen ja tehokas työkalu, jos liioitteleva pisteiden poisto ei haittaa vertailua tai jos kohteen pintaa peittävät esteet ovat lähellä kohteen pintaa.

6 Tutkimus

6.1 Laitteisto

Mittauksessa käytettiin Trimble S6 DR 300+ -takymetria koordinaattien mittaamiseen kolmeen seinille teipattuun A4-paperitähykseen. Kojepystytettiin normaaliin kolmijalkaan jalustatähden päälle.

Laserkeilaus suoritettiin Leica ScanStation P30 -laserkeilaimella. Kojepystytettiin normaaliin kolmijalkaan jalustatähden päälle. Koneen tarkkuus on Leican ilmoittamien spesifikaatioiden mukaan seuraava (6):

- Etäisyysmittauksen tarkkuus: 1.2 mm + 10 ppm etäisyydestä
- Kulmamittauksen tarkkuus: 8" vaakakulma, 8" pystyakulma. Yksiköt kulmasekunneja.
- Edellisistä johdettu pisteen 3D-tarkkuus: 3 mm:n tarkkuus 50 m:n etäisyydellä; 6 mm:n tarkkuus 100 m:n etäisyydellä.

Ottaen huomioon, että etäisyydet mitattaviin kohteisiin tässä koejärjestelyssä olivat alle 12 m, voi päätellä tarkkuuden olevan mitatuille pilville parempi kuin 3 mm.

Projektissa pääasiallisesti, erityisesti CloudCompare-ohjelman suorittamiseen, käytetyn tietokoneen suorituskyky on

- käyttöjärjestelmä: Windows 8
- prosessori: Intel Core i7-3770K 3.50 GHz
- RAM-muisti: 31,9 GB DDR3.

6.2 Ohjelmat

Leica Geosystems HDS Cyclone on Leica Geosystems -yhtiön maksullisella lisenssillä tarjoama ohjelmistomoduulien tuotesarja pistepilvien käsittelyyn ja mallinnukseen. Sen myyntisivusto on ["https://leica-geosystems.com/fi-FI/products/laser-scanners/software/leica-cyclone"](https://leica-geosystems.com/fi-FI/products/laser-scanners/software/leica-cyclone).

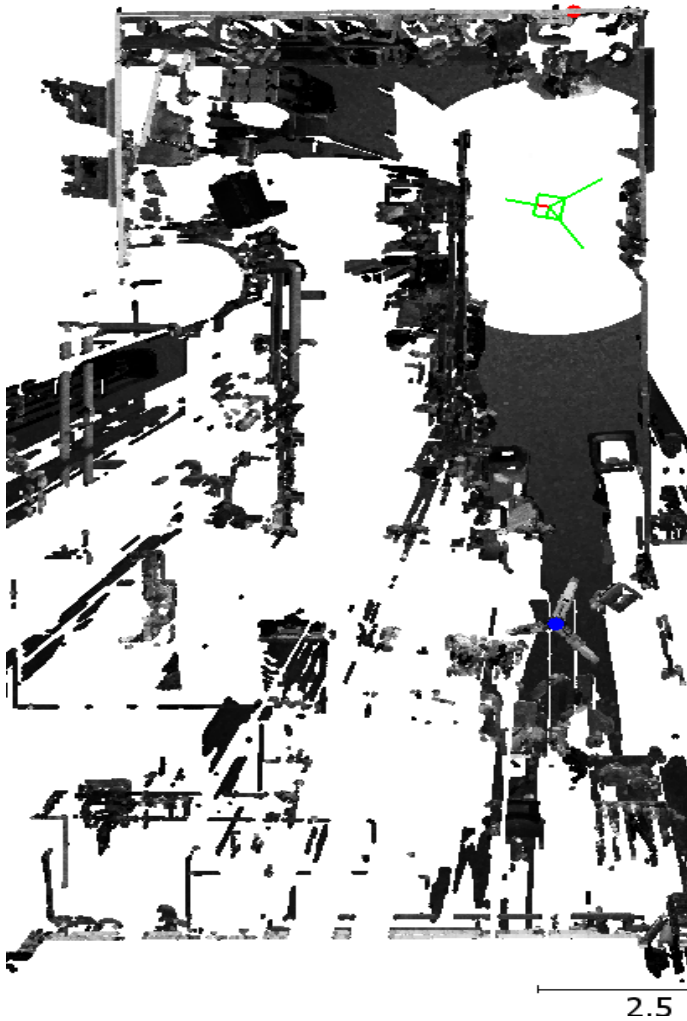
Projektissa Cyclone-ohjelmaa käytettiin Leica ScanStation P30 -laserkeilaimen raakadatan purkamiseen ja muokkaamiseen pistepilviksi RGB-väritiedolla. Puretut pistepilvet käännettiin koordinaatistoon yhdistämällä pilvet takymetrillä mitattuihin tähyksien koordinaatteihin. Lisäksi Cyclone-ohjelmalla tuotettiin referenssipistepilvestä redusoitu versio.

CloudCompare on CloudCompare-projektin ylläpitämä avoimen lähdekoodin ilmaisohjelma (jakosivusto: "<https://www.cloudcompare.org>") pistepilvien käsittelyyn ja vertailuun. Se jaetaan lisenssillä GNU GPLv2 (11).

CloudCompare (v2.10.2) -ohjelmaa käytettiin pistepilvien segmentointiin, heat-map-tuotantoon ja -tarkasteluun.

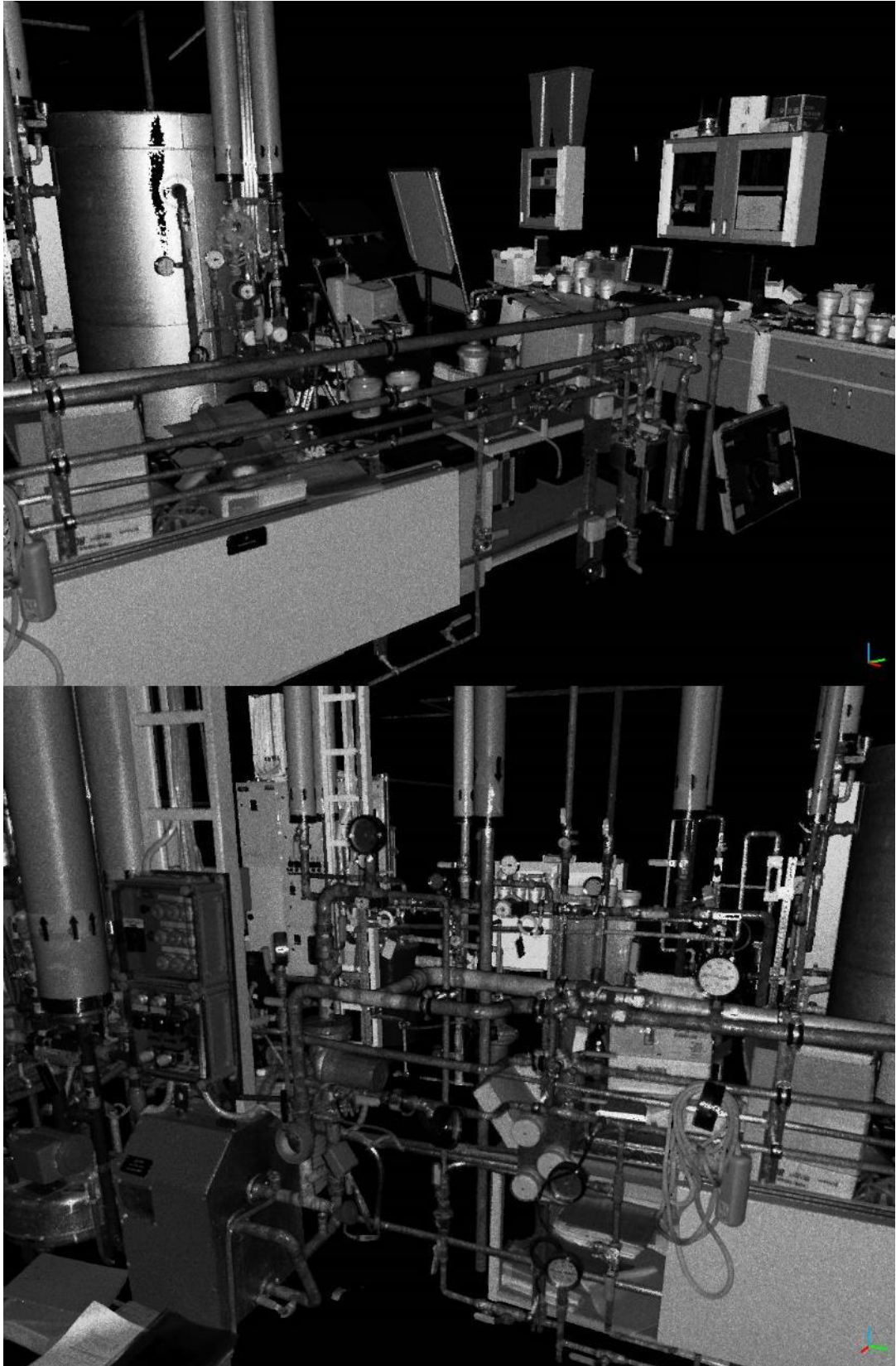
6.3 Tila

Seurantamittaustutkimuksen mittaukset suoritettiin Metropolia AMK Leppävaaran kampuksen Kattilalaboratorio-huoneessa. Huone koostuu laboratoriotilasta, toimistotilasta ja varastotilasta. Mittaus tehtiin laboratoriotilassa, joka oli sivumitoiltaan noin 8 m x 12 m ja korkeudeltaan noin 3,5 m (kuva 23).



Kuva 23. Ylänäköymä pistepilvestä pilvi 1. Pistepilvestä on poistettu huoneen katto, heijastuksista mitattuja pisteitä ja huoneen ulkopuolelta ikkunoiden läpi mitattuja pisteitä. Pistepilvi on väritetty intensiteetin skalaarikentällä harmaansävyisenä. Laserkeilaimen sijainti merkittynä vihreällä kuviolla. Takymetri on merkittynä sinisellä pallolla. Tähykset ovat merkittynä punaisilla palloilla.

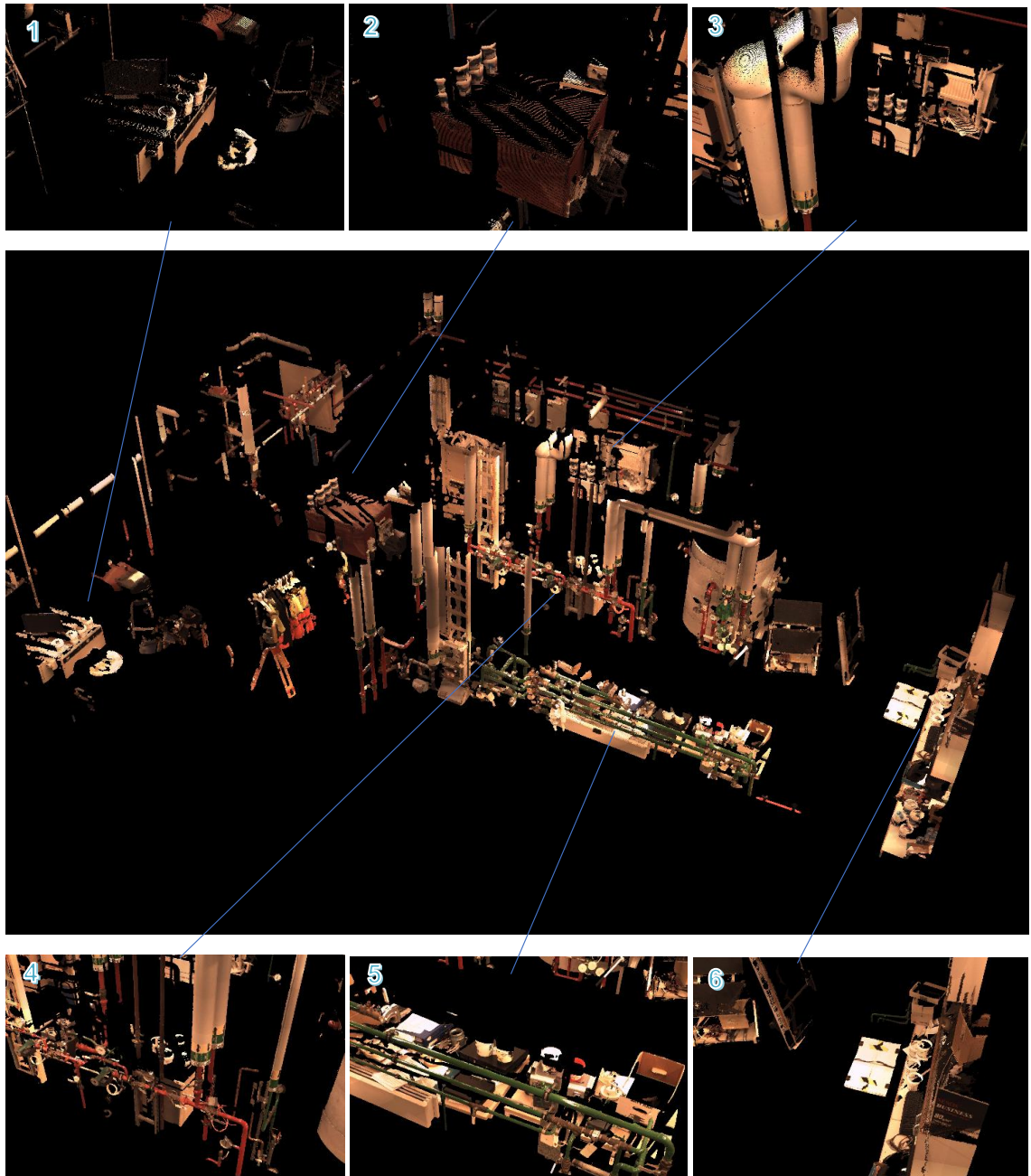
Tila valittiin tutkimukseen sen laserkeilaukselle tuoman haastavuuden vuoksi. Laboratoriotilan useat vaaka- ja pystysuorat putket ja säiliöt vaikeuttavat laserkeilausta estämällä tilan ja sinne sijoitettujen kohteiden pintoja kunnollisesti kattavaa keilausta (kuva 24).



Kuva 24. Pistepilvinäkymiä Kattilalabran laboratoriotilasta.

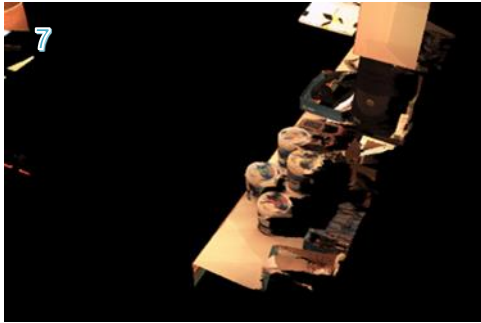
6.4 Seurantamittausta varten tilaan mittausten välillä tehdyt muutokset

Pilvien vertailua varten huoneeseen sijoitettiin jugurttipurkkien ryhmiä (kuvat 25 ja 26). Osaa purkeista siirrettiin referenssipilven keilauksen jälkeen. Pilvi 5:n ja pilvi 6:n keilauksen välillä purkit poistettiin.



Kuva 25. Purkkien ryhmät numeroituna. Ryhmät 1–6.

Ryhmä 7 sijoittui isossa kuvassa (kuva 25) alaoikealle (kuva 26).



Kuva 26. Purkkien ryhmä numeroituna. Ryhmä 7 on isossa kuvassa (kuva 25) alaoikealla.

Eri purkkiryhmien ja niiden purkkien siirtymät yksityiskohtaisesti (taulukko 1).

Taulukko 1. Purkkien liike ryhmäkohtaisesti. Ryhmissä 1–4, 6–7 oli kussakin yksi purkki kontrollina, jota ei liikutettu lainkaan. Samansuuntaisuus tarkoittaa liikkeen olleen samansuuntaista ryhmän purkkien kesken. Kiertoliike tapahtui kunkin purkin pysty-akselin ympäri. Ryhmä 3:n aiottu liike oli 1 cm, 0,5 cm, 0,25 cm, 0 cm, mutta ryhmän alusta liikkui toisesta kulmastaan 1 cm. Ryhmä 5:n purkkeja siirrettiin kutakin eri suuntaan suorakulmaisesti toisiinsa nähden. Liikkeen suunta referenssimittauksen nolapistestä katsoen: pois päin, vasemmalle, sisään päin, oikealle.

Purkki-ryhmä	Purkkien luettelointi näkymässä	Purkkien siirtymä (cm). Suunta ja määrä.				
1	alhaalta ylös	samansuuntainen	10	2,5	0	5
2	alhaalta ylös	samansuuntainen	0	0,5	0,25	1
3	vasemmalta oikealle	samansuuntainen	2	1,25	0,5	0
4	vasemmalta oikealle	samansuuntainen	2,5	5	0	10
5	vasemmalta oikealle	erisuuntainen	0,25 – 0,5			
6	alhaalta ylös	kiertoliike	2,5	5	0	10
7	alhaalta ylös	kiertoliike	0	1	0,5	0,25

6.5 Mittauksen suoritus

6.5.1 Takymetri

Takymetri sijoitettiin niin, että kaksi tähystä eteläseinällä olivat noin 90 asteen kulmassa itäseinän tähykseen (kuva 23, kuvassa itä on ylhäällä). Takymetrillä luotiin paikalliskoordinaatisto, josta sillä mitattiin tähyksille koordinaatit.

6.5.2 Mittauksen kohteet

Tilaan sijoitettiin sylinterimäisiä jugurttipurkkeja neljän purkin ryhmiksi (kuvat 25 ja 26).

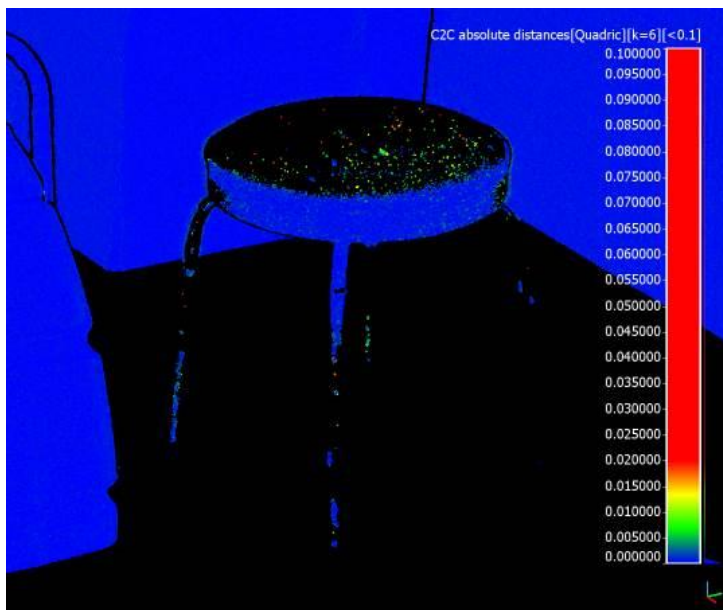
Referenssipilven ja pilvi 1:n keilauksien välissä purkkeja siirrettiin (taulukko 1).

Pilvi 5:n ja pilvi 6:n keilauksien välissä purkit poistettiin tilasta (liite 2).

Muita aitoja muuntumia, joita tilassa tapahtui tutkimuksen aikana, olivat

- kääntynyt takymetri
- laserkeilainlaatikon liikkunut kansi
- 2 liikkunutta johtoa huoneen itäpäädyn (kuvassa 23 ylhäällä) pöytätasolla
- purkkien ryhmä 3:n alustan liikkuminen 1 cm toisesta kulmastaan.

Takymetri, keilainlaatikko ja johdot jätettiin tarkasteluissa huomiotta. Ryhmä 3:n alustan liikkuminen otettiin huomioon ja sitä käsiteltiin osana tarkasteltavaa kohdetta ryhmä 3. Lisäksi tilassa oli pinnaltaan heijastava istuinpalli, joka on heijastamisensa takia selkeä yksittäinen virhelähde (kuva 27). Myös tämä jätetään huomiotta.



Kuva 27. Näkymä istuinpallista.

On huomion arvoista, ettei kyseisen tapaista heijastavaa pintaa voi seurantamitata laserkeilauksella.

6.5.3 Laserkeilaus

Laserkeilauksella tehtiin keilauksia sekä resoluutiolla 1,6 mm / 10 m että 3,1 mm / 10 m. Tämä tarkoittaa, että jos pisteitä mitattaisiin 10 m:n säteellä keilaimesta olevalta kupolin sisäpinnalta, niitä mitattaisiin 1,6 mm:n välein resoluutiolla 1,6 mm / 10 m ja 3,1 mm:n välein resoluutiolla 3,1 mm / 10 m. Keilain oli asetettu kaikissa keilauksissa ottamaan ympäristöstään resoluutiolla 960x960 valokuvat pistepilven RGB-tietoa varten.

Taulukko 2. Käsiteltävät keilaukset. Keilaukset lueteltu siinä järjestyksessä, jossa ne keilattiin. Keilaukset on nimetty niistä tuotettujen pistepilvien mukaan. Keilaimen liike keilausten välillä tarkoittaa siirtymää edellisen keilauksen jälkeen. Siirtymä referenssipilven nolllapisteeseen tarkoittaa välimatkaa keilauksen nolllapisteen ja referenssipilven nolllapisteiden välillä. Etäisyydet on johdettu pistepilvien nolllapisteiden koordinaateista, ja ne eivät ole ristiriidassa siirtymistä fyysisesti viivoittimella tehtyjen mittausten kanssa.

Keilaus	Resoluutio	Keilaimen liike keilausten välillä (m)	Siirtymä referenssipilven nolllapisteeseen (m)
Referenssipilvi	1,6	0	0
Pilvi 1	3,1	0	0
Pilvi 2	3,1	0,001	0,001
Pilvi 3	3,1	0,017	0,018
Pilvi 4	3,1	0,109	0,126
Pilvi 5	3,1	2,155	2,264
Pilvi 6	3,1	0	2,264

Tutkimuksessa käsitellään seitsemän laserkeilaimella tehtyä keilausta. Keilaukset on nimetty niistä tuotettujen pistepilvien mukaan. (Taulukko 2.)

6.5.4 Keilausten tarkoitus

Referenssipilvi. Pilven tarkoitus on toimia referenssinä myöhemmin mitatuille pilville.

(Purkkien siirtäminen tapahtui referenssipilven ja pilvi 1:n keilausten välillä.)

Pilvi 1. Laserkeilainta ei ollut liikutettu tämän ja edellisen mittauksen välillä. Tarkoitus on tuottaa pistepilvien vertailuun laadultaan ideaalinen heat-map, johon muiden heat-map näkymien laatua voi verrata.

Pilvi 2. Keilainta siirrettiin 1 mm. Tarkoitus on simuloida inhimillisesti tarkinta mahdollista kojeen sijoittamisen tarkkuutta sitä pystyttäessä tunnetulle pisteelle (1, s. 255–256). Tarkoitus on tuottaa pistepilvien vertailuun laadultaan paras mahdollinen heat-map, jonka mittaaja pystyy tuottamaan.

Pilvi 3. Keilain siirrettiin, ja sen siirtymä referenssipilven nolapisteestä oli 1,8 mm. Tarkoitus on simuloida kojeen sijoittamisessa tarkkuutta, joka on työmäärältään ja tarkkuusvaatimukseltaan realistinen suhteessa useimpiin mittaustarkoituksiin.

Pilvi 4. Keilain siirrettiin, ja sen siirtymä referenssipilven nolapisteestä oli 12,6 cm. Tarkoitus on simuloida helposti saavutettavaa tarkkuutta kojeen sijoittamisessa. Tämä tarkkuus voidaan saavuttaa niin, ettei keilausten vaatima työn määrä tai aika kasva.

Pilvi 5. Keilain siirrettiin, ja sen siirtymä referenssipilven nolapisteestä oli yli 2 m. Tarkoitus on tuottaa vertailuun laadultaan huono heat-map, jotta heat-map-näkymien riippuvuus sijoituksesta tulee selvästi esille. Lisäksi tämä pilvi toimii referenssinä pilvi 6:lle poistuvan pinnan heat-map vertailussa.

(Purkkien poistaminen tilasta tapahtui pilvi 5:n ja pilvi 6:n keilausten välillä.)

Pilvi 6. Laserkeilainta ei ollut liikutettu tämän ja edellisen mittauksen välillä. Tarkoitus on tuottaa pistepilvien vertailuun laadultaan ideaalinen heat-map, joka tarkastelee tilanetta, jossa muuntuneen kohteen sijasta kohde puuttuukin kokonaan.

6.6 Pistepilvien käsittely Cyclone-ohjelmalla

Laserkeilaimen raakadata tallentamat keilaustiedot avattiin Cyclone-ohjelmassa ja tuotiin Cyclone-tietokantaan. Muunnon yhteydessä yhdistettiin valokuvien väritieto pistepilveen.

Cyclone-ohjelmalla avattiin pistepilveksi tekstitiedosto, jossa oli koordinaattitietona takymetrillä mitatut tähysten koordinaatit yhdistettynä tähysten nimiin. Kaikki muut pistepilvet käännettiin tähyksistään takymetrimittattuihin koordinaatteihin ja kukin pilvi kirjoitettiin erikseen ulos pistepilven ptx-formaatissa.

6.7 Pistepilvien alkukäsittely CloudCompare-ohjelmalla

Aluksi pistepilvet muutettiin ptx-formaatista CloudCompare-ohjelman bin-formaattiin, sillä se on nopeampi avata CloudCompare-ohjelmalla. Pistepilven avaaminen ja käsittely CloudCompare-ohjelmassa vie vähintään yhtä paljon keskusmuistia kuin sen bin tiedostokoko. Esimerkiksi 11 GB:n referenssipilven avaaminen ja segmentointi Windows 8 -käyttöjärjestelmän taustaohjelmien kanssa vei kaikkiaan lähes 30 GB keskusmuistia. Koska tämä oli käytetyn tietokoneen suorituskyvyn raja, segmentoitiin (ohjelman käyttämä termi pistepilven pisteiden leikkaamisesta erilleen pilvestä) kaikista pistepilvistä CloudCompare-ohjelman segmentointi toiminnolla katon, lattian ja seinien pinnoista mitatut pisteet pistepilvien käsittelyn nopeuttamiseksi ja helpottamiseksi (taulukko 3).

Segmentoinnin murtoviiva on tallennettavissa, joten täsmälleen sama segmentointi voitiin suorittaa kaikille pilville. Pilven leikkaus suoritettiin kahdella segmentoinnilla.

Taulukko 3. Pistepilvien koot. Leikatun pilven tiedostokoko on todettu pilvestä ennen vertailu skalaarikenttien lisäämistä. Ilmoitetut tiedostojen koot ovat pistepilvistä CloudCompare-ohjelman bin-formaatissa. On huomion arvoista, että CloudCompare-ohjelman bin-formaatin pakkaustehokkuus vaihtelee eri pilvien välillä. Tiedostokoot ovat gigatavuina. Pistemäärät on pyöristetty miljoonan tarkkuuteen.

Pilvi	Pistemäärä miljoonina	Tiedostokoko (GB)	Leikatun pilven pistemäärä	Leikatun pilven tiedostokoko (GB)
referenssipilvi	415	11,1	56	1,0
pilvi 1	130	3,3	16	1,2
pilvi 2	130	3,3	16	1,2
pilvi 3	130	3,3	16	1,2
pilvi 4	130	3,3	16	1,2
pilvi 5	114	3,0	16	1,2
pilvi 6	114	3,0	16	1,2

Kaikki pilvet sisälsivät RGB-tiedon, intensiteetin skalaarikentän ja pilven keilanneen keilaimen nollapisteen sijainnin.

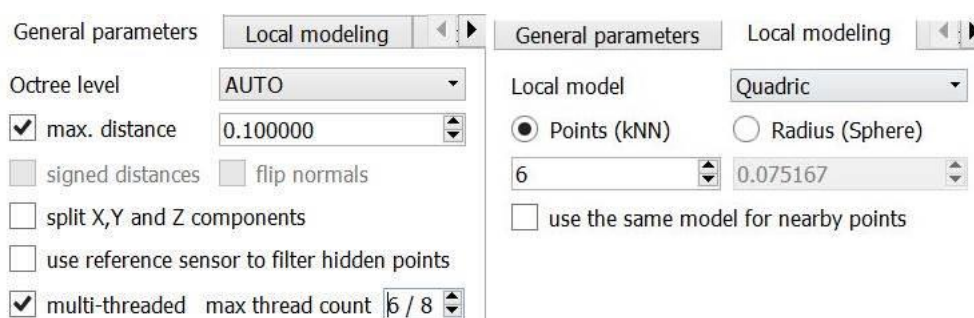
6.8 Pistepilvien vertailu CloudCompare-ohjelmalla

Heat-map on näkymä, jossa pisteen väri tai värisävy osoittaa pisteen jonkin ominaisuuden arvoa. Tässä tapauksessa kyseinen ominaisuus on se, kuinka kaukana pisteestä ovat referenssinä toimivan pistepilven lähin piste. CloudCompare-ohjelma tarjoaa etäisyys tarkastelussa mahdollisuuden käyttää referenssinä toimivan pilven pisteiden muodostamaa pintaa paikallisesti approksimoivaa mallia, johon lasketaan vertailtavan pilven pisteiden etäisyydet.

Tarjolla olevat mallinnukset ovat ”None”, ”Least squares plane”, ”2D1/2 triangulation” ja ”Quadric” (12).

Näitä eri mallinnuksia verrattiin toisiinsa käyttämällä niitä Kattilalaboratoriosta keilattujen pistepilvien heat-mapien tuotantoon. Testauksessa ei ”Quadric”- ja ”Least squares plane” -malleilla tuotettujen heat-mapien välillä näkynyt havaittavaa eroa laadussa. Molemmat olivat kuitenkin selvästi laadultaan parempia Kattilalaboratoriosta keilattujen pistepilvien vertailuun kuin ”None” tai ”2D1/2 triangulation”. Laatu määriteltiin olevan sitä parempi, mitä vähemmän muuntumia heat-map näytti pinnoilla, joiden tiedettiin olleen liikkumattomia.

Pilvien välisen etäisyysvertailun heat-map-skalaarikentät tuotettiin ”Quadric”-mallinnuksella, sillä se soveltuu CloudCompare Wikin (12) mukaan parhaiten pinnan approksimointiin useimmille pinnan muodoille (kuva 28).



Kuva 28. Kuvassa heat-map-generoinnissa käytetyt parametrit.

6.9 Tarkasteluun tuotetut heat-mapit

Pilvistä 1–5 tuotettiin heat-mapit Referenssipilven suhteen. Pilvistä 2–5 tuotettiin heat-mapit pilvi 1:n suhteen. Pilvi 5:stä ja 6:sta tehtiin kaksisuuntainen vertailu (taulukko 4).

Taulukko 4. Taulukossa pilvistä tuotetut heat-map-vertailut. Arvo taulukon solussa kertoo tehdystä vertailusta. Taulukon solun arvo kertoo, mikä vertailtavan pilven ja referenssinä olevan pilven keilaamiseen käytettyjen kojeasemien etäisyys toisistaan metreinä.

Vertailtava pilvi	Vertailun referenssi			
	Referenssipilvi	Pilvi 1	Pilvi 5	Pilvi 6
pilvi 1	0			
pilvi 2	0,001	0,001		
pilvi 3	0,018	0,018		
pilvi 4	0,126	0,126		
pilvi 5	2,264	2,264		0
pilvi 6			0	

6.10 Vertailut

6.10.1 Pilvien nollapisteiden välisen etäisyyden vaikutus heat-map-näkymän laatuun

Pilvistä 2–5 tuotettiin heat-mapit pilvi 1:n suhteen.

Tarkastelussa tutkittiin, miten heat-map-näkymän laatu muuttuu, kun pilvien nollapisteiden välistä etäisyyttä muutetaan. Virheelliset havainnot muuntumista voivat johtua esimerkiksi eroista, miten pistepilvet kattavat kohteen pintoja, tai pistepilven keilauksen epätarkkuudesta.

Koska pilven 1 ja pilvien 2–5 keilausten välissä ei tuotettu muita muuntumia kuin takymetrin kääntyminen, tarkastelu yksinkertaistuu, sillä näin ollen kaikki punainen väri kuvissa on virheellistä havaintoa (paitsi takymetrissa). Väri ilmaisee etäisyyseroa pistepilvien välillä. Mitä enemmän punaista väriä näkymässä on, sitä huonolaatuisempi se on. Kaikkien heat-mapien värikylläisyysarvot oli asetettu arvoon 10 mm. Käytetyt näkymät ovat sijainniltaan ja suunnaltaan samat eri pilvien kesken.

Tehty tutkimus on liitteessä 4.

Tutkimuksesta tehty päätelmä on, että pilvistä tuotetun heat-mapin laatu on sitä huonompi, mitä kauempana pilvien keilausten kojeasemat olivat toisistaan.

6.10.2 Referenssipilven nollapistenäkymän käytön vaikutus pilvien heat-map-näkymien laatuun

Tarkastelussa tutkittiin, paraneeko heat-map-näkymän laatu, jos sitä tarkastellaan referenssipilven nollapisteestä.

Tutkimuksessa suoritettiin pilvien 2–5 heat-map-vertailu. Referenssinä oli pilvi 1. Tarkastelussa oli näkökulman valinnan vaikutus heat-mapin näkymien selkeyteen. Tarkastelu suoritettiin vertaamalla ensin kullekin pilvelle heat-map-näkymiä referenssipilven nollapisteestä ja nollapisteen sivusta. Sitten näitä pilvikohtaisia tarkasteluja verrattiin keskenään.

Selkeys tässä tutkimuksessa määriteltiin olevan näkymä, jossa aito muuntuma erottuu näkymästä olemalla eri värinen kuin ympäristö. Koska pilvien 2–5 ja pilven 1 keilausten välissä ei tuotettu (liitteen 3 kuvissa nähtäviin pintoihin) muuntumia, tarkastelu on yksinkertainen, sillä tällöin kaikki punainen väri kuvissa on virheellistä havaintoa. Näin ollen, mitä enemmän punaista väriä näkymässä on, sitä huonolaatuisempi se on.

Virheelliset havainnot muuntumista voivat johtua osittain pistepilven keilauksen epätarkkuudesta, mutta määrääväksi muuttujaksi vertailussa katsotaan se, miten pistepilvien kattavuus kohteen pinnoissa eroaa referenssinä toimivan pilven kattavuudesta.

Tehty tutkimus on esitetty liitteessä 3.

Tutkimuksesta tehty päätelmä on, että kun pilvien nollapisteiden etäisyys on 1 mm, ei nollapistetarkastelu paranna heat-map-näkymää. Etäisyyden kasvaessa (sentteihin) nollapistenäkymä parantaa näkymää peittämällä näkyvistä katve-erojen aiheuttamaa väri-tystä. Ja jo 10 cm:n nollapisteiden etäisyydellä on nollapistenäkymä välttämätön työkalu, jotta näkymä olisi käyttökelpoinen muutosten erottamiseen. Kun nollapisteiden etäisyys kasvaa vielä tästä, tulee vastaan raja, jonka jälkeen ei nollapistenäkymästä pysty enää parantamaan käyttökelpotonta näkymää.

6.10.3 Muuntumien erottuminen tilasta eri pilvien heat-map-näkymistä

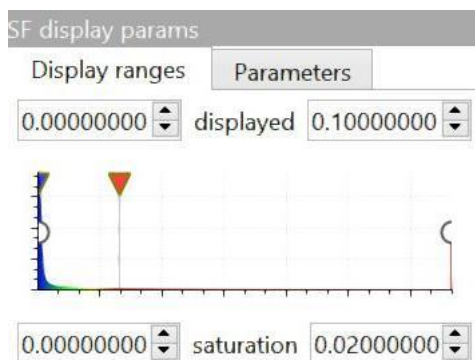
6.10.3.1 Tarkastelutapa

Tässä tarkastellaan sitä, miten pilvien heat-mapit referenssipilven suhteen riippuvat laadultaan siitä, kuinka lähellä niiden nollapiste sijaitsee referenssipilven nollapistettä. Laatu todetaan siitä, kuinka hyvin tilassa tapahtunut aito muuntuma erottuu ympäristöstä määrävästi. Erottuminen todetaan heat-map-näkymän väristä, sillä väri ilmaisee etäisyys-eroa pistepilvien välillä. Määrävyyden määritetään olevan näkymä, jossa aidot muuntumat ovat pistepilvessä eri värillä kuin virheellisesti havainnot muuntumista.

Virheelliset havainnot muuntumista voivat johtua esimerkiksi eroista siinä, miten pistepilvet kattavat kohteen pintoja, tai pistepilven keilauksen epätarkkuudesta.

6.10.3.2 Toimintatapa

Pilvien heat-mapien laatua vertaillaan tarkastelemalla koordinaateiltaan ja suunnaltaan samaa näkymää eri pilvien heat-mapeista. Tarkasteltavan pistepilven heat-map-skalaarikentän näkymähaarukan (eng. *Display ranges*) värikylläisyyslukua (eng. *saturation*) pienennetään niin kauan kuin aito tilassa tapahtunut muuntuma on eri värillä kuin virheelliset havainnot (kuva 29). Se kuinka pieneksi tämä luku voidaan näin asettaa, kertoo siitä, kuinka pieniä muuntumia kyseisellä heat-map-näkymällä voidaan todeta. Näin ollen värikylläisyysluvun pienuus kertoo heat-mapin laadusta.



Kuva 29. Esimerkki näkymähaarukkalikosta. Värikylläisyys on kuvassa asetettu arvoon 20 mm.

Mikäli näkymä ei ole selkeä edes lukuarvolla 100 (millimetreinä), pilven näkymä katsotaan hyödyttömäksi ja se merkitään kirjaimella "x".

Mikäli näkymä ei ole yksiselitteinen lukuarvolla 100 mutta näkymä on silti tulkittavissa vertailemalla sitä referenssipilven RGB-näkymään, katsotaan se hyödylliseksi, mutta kokemusta vaativaksi. Tällöin värikylläisyys lukua pienennetään niin kauan kuin näkymä olisi kokeneelle tarkastelijalle yksiselitteinen. Saadun arvon perään lisätään kirjain "e".

6.10.3.3 Pilvistä tarkasteltavia heat-map-näkymiä

Vertailu ympäristöön, eli kuinka hyvin muuntuma erottuu tilassa.

- Ortografinen näkymä ylhäältä (perspektiivitön näkymä yläpuolelta).
- Isometrinen näkymä (perspektiivitön näkymä yläviistosta).
- Näkymä referenssinä toimineen pilven keilaimen nollapisteestä ilman zoomausta.

Vertailu lähiympäristöön lähinäkymässä, eli kuinka hyvin muuntuma on erotettavissa, jos mahdollisen muutoksen suurpiirteinen sijainti on tiedossa.

- Lähinäkymät kustakin purkkiryhmästä 1–7.
- Näkymä referenssinä toimineen pilven keilaimen nollapisteestä zoomatuna lähinäkymäksi kullekin purkkiryhmälle 1–7.

Vertailu aidon muutoksen kontrolliin eli kunkin purkkiryhmän yhtä purkkia, jota ei liikuttu, verrataan muihin. Tämä tarkastelee sitä, kuinka hyvin muuntuma on erotettavissa, jos sen mahdollinen sijainti tiedetään tarkasti.

- Lähinäkymät kustakin purkkiryhmästä 1–7.
- Näkymä referenssinä toimineen pilven keilaimen nollapisteestä zoomatuna lähinäkymäksi kullekin purkkiryhmälle 1–7.

6.10.3.4 Näkymien vertailu

Vertailussa tarkastellaan sitä, kuinka hyvin tilassa tapahtuneet muuntumat ovat erotettavissa heat-map-näkymistä.

Näkymissä, joissa vertaillaan muuntuman erottumista ympäristöstä, käytetään värikylläisyys arvoja 5 mm:n välein. Vertailussa, joka käsittelee liikkuneen kohteen erottuvuutta liikkumattomasta kontrollikohteesta käytetään arvoja 1 mm:n välein. Tulokset esitetään millimetreinä (taulukko 5).

Tarkastelussa vertailtiin kunkin näkymän (taulukon rivit) selkeyttä kullekin pilvelle (taulukon sarakkeet). ”Nollapiste”-näkymät ovat näkymiä referenssipilven nollapisteestä. Kunkin näkymän laatu määriteltiin olevan heat-mapin näkymähaarukan pienin värikylläisyyden lukuarvo, jolla tarkkailtu ominaisuus oli havaittavissa näkymästä.

Liitteessä 5 on esimerkki näkymien kuvasarjoista ja niiden tulkinnasta.


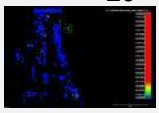
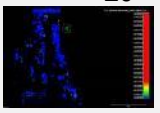
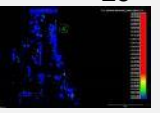
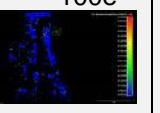
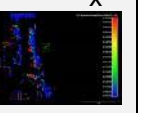

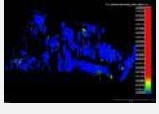
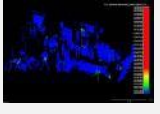
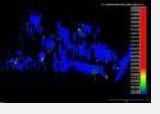
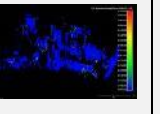
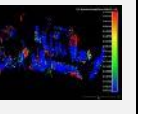

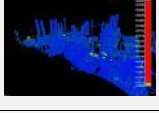
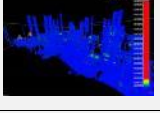
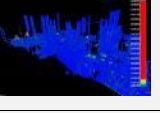
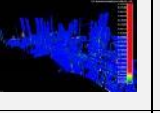
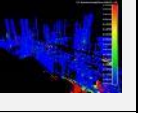




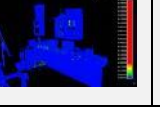
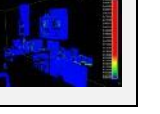
Taulukko 5. Pienin käyttökelpoinen värikylläisyysluku heat-mapissä. Taulukon on tarkoitus verrata eri pilvien selkeyttä kullekin näkymälle, eli rivillä olevia arvoja verrataan toisiinsa. "x" tarkoittaa, ettei vertailu ole mahdollista kyseisellä näkymällä. Luvun perässä oleva "e" tarkoittaa, että vertailu on mahdollista kyseisellä luvulla, mikäli tarkastelija on kokenut ja manuaalisesti tarkistaa, mitkä heat-mapin näyttämät muuntumat ovat virheellisiä. Teksti "(b)" tarkoittaa, että näkymä on referenssipilven nol-lapisteesta. Teksti "k" tarkoittaa, että ryhmien 1–4, 6 ja 7 näkymissä verrataan paikallaan pysynyttä kontrollipurkkia liikkuneisiin purkkeihin. Ryhmän 5 näkymissä "k" tarkoittaa sitä, että verrataan purkkien liikkeiden suunnan erottumisen selkeyttä.

Näkymä	Vertailtu pilvi				
	pilvi 1	pilvi 2	pilvi 3	pilvi 4	pilvi 5
Ortografinen	20	20	25	100e	x
Isometrinen	20	30	30e	100e	x
Nollapiste 1	5	10	10	15	x
Nollapiste 2	10	10	10	20	30e
Ryhmä 1 (b)	5	5	10	10	30
Ryhmä 2 (b)	5	5	10	30e	x
Ryhmä 3 (b)	5	5	10	30e	x
Ryhmä 4 (b)	5	5	5	20	x
Ryhmä 5 (b)	5	5	5	20	x
Ryhmä 6 (b)	5	5	5	10	30e
Ryhmä 7 (b)	5	5	5	10	35e
Ryhmä 1 k (b)	2	3	3	2	2
Ryhmä 2 k (b)	2	2	3	4	x
Ryhmä 3 k (b)	2	4	5	x	x
Ryhmä 4 k (b)	2	2	5	15	x
Ryhmä 5 k (b)	2	2	2	x	x
Ryhmä 6 k (b)	1	1	2	2	3
Ryhmä 7 k (b)	x	x	x	x	x
Ryhmä 1	10e	10e	10e	10e	10e
Ryhmä 2	2	2	15	70	x
Ryhmä 3	2	3	20	x	x



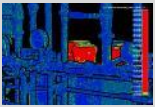


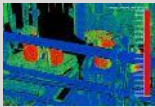
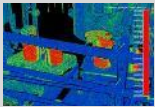
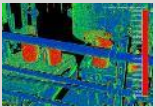
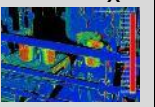

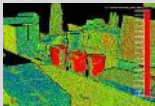
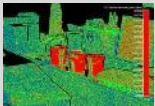
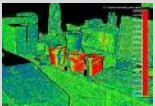
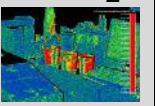
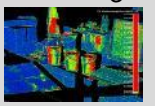
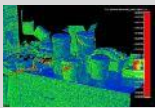
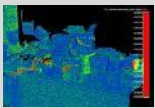
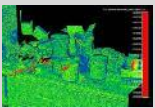
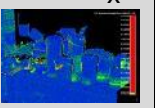




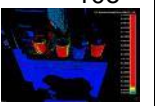







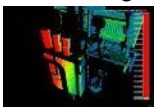

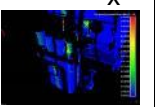
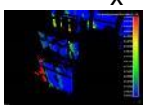



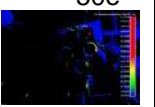

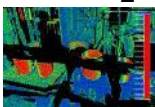
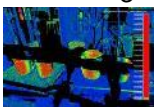
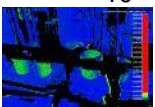
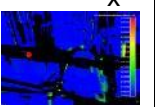
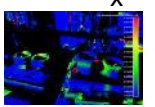



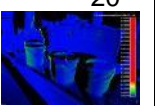
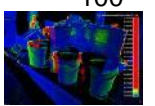
Ryhmä 4	10e	10e	10e	50e	x
Ryhmä 5	2	3	10	x	x
Ryhmä 6	15	15	15	20	100
Ryhmä 7	4	3	3	10	40e
Ryhmä 1 k	2	3	3	2	2
Ryhmä 2 k	2	2	5	x	x
Ryhmä 3 k	3	3	5	x	x
Ryhmä 4 k	9	10	15	x	x
Ryhmä 5 k	2	2	5	x	x
Ryhmä 6 k	15	15	15	20	x
Ryhmä 7 k	x	x	x	x	x

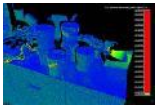
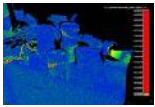
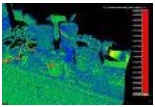
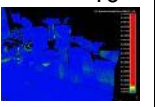


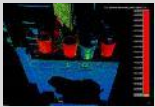
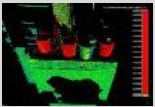
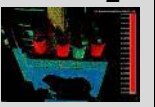





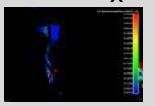

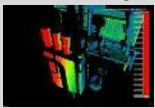

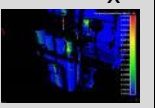
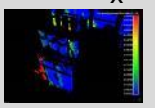



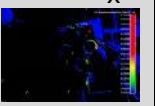

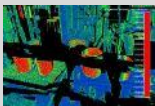
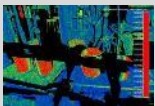
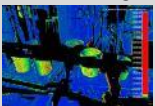

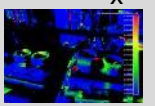





Taulukossa 6 sama taulukkotieto on esitetty yhdistettynä pikkukuviin kyseisistä näkymistä.

Taulukko 6. Taulukon 5 tiedot pikkukuvien kanssa.

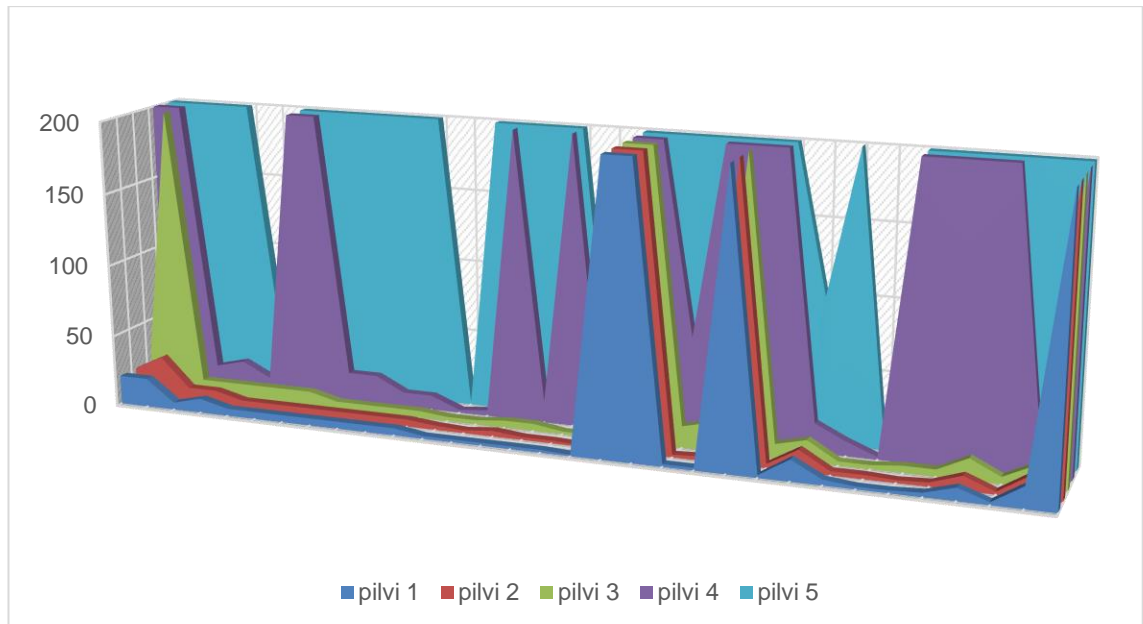
Näkymä	Vertailtu pilvi				
	pilvi 1	pilvi 2	pilvi 3	pilvi 4	pilvi 5
Ortografinen 	20 	20 	25 	100e 	x 
Isometrinen 	20 	30 	30e 	100e 	x 
Nollapiste 1 	5 	10 	10 	15 	x 
Nollapiste 2 	10 	10 	10 	20 	30e 

Ryhmä 1 (b)	5	5	10	10	30
Ryhmä 2 (b)	5	5	10	30e	x
Ryhmä 3 (b)	5	5	10	30e	x
Ryhmä 4 (b)	5	5	5	20	x
Ryhmä 5 (b)	5	5	5	20	x
Ryhmä 6 (b)	5	5	5	10	30e
Ryhmä 7 (b)	5	5	5	10	35e
Ryhmä 1 k (b)	2	3	3	2	2
Ryhmä 2 k (b)	2	2	3	4	x
Ryhmä 3 k (b)	2	4	5	x	x

Ryhmä 4 k (b)	2 	2 	5 	15 	x 
Ryhmä 5 k (b)	2 	2 	2 	x 	x 
Ryhmä 6 k (b)	1 	1 	2 	2 	3 
Ryhmä 7 k (b)	x 	x 	x 	x 	x 
Ryhmä 1	10e 	10e 	10e 	10e 	10e 
Ryhmä 2	2 	2 	15 	70 	x 
Ryhmä 3	2 	3 	20 	x 	x 
Ryhmä 4	10e 	10e 	10e 	50e 	x 
Ryhmä 5	2 	3 	10 	x 	x 
Ryhmä 6	15 	15 	15 	20 	100 

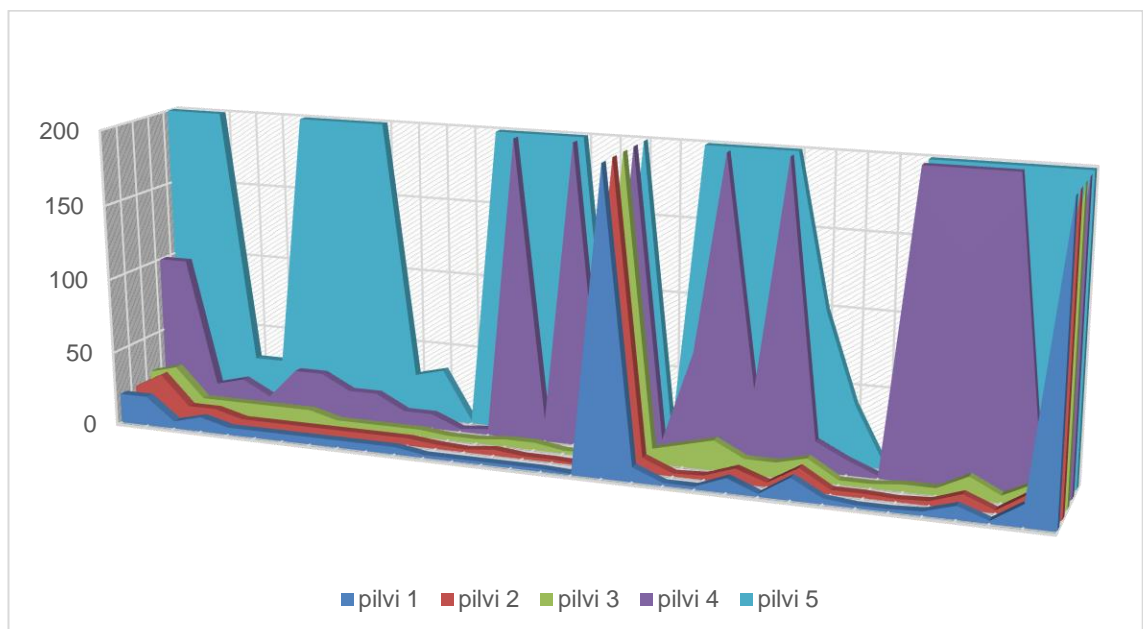
Ryhmä 7	4 	3 	3 	10 	40e 
Ryhmä 1 k	2 	3 	3 	2 	2 
Ryhmä 2 k	2 	2 	5 	x 	x 
Ryhmä 3 k	3 	3 	5 	x 	x 
Ryhmä 4 k	9 	10 	15 	x 	x 
Ryhmä 5 k	2 	2 	5 	x 	x 
Ryhmä 6 k	15 	15 	15 	20 	x 
Ryhmä 7 k	x	x	x	x	x

Taulukon tiedot on esitetty kaaviona kuvassa 30. Vertailussa ovat pilvien heat-map-skaalarikentät. Pieni arvo kertoo laadusta. Taulukon arvot, joissa on kirjain ”x” tai ”e”, visualisoidaan lukuna 200.



Kuva 30. Taulukon 5 tiedot kaaviossa. Arvot, joissa on kirjain "x" tai "e", esitetään lukuna 200.

Taulukon tiedot on esitetty kaaviona kuvassa 31. Vertailussa ovat pilvien heat-map-skaalarikentät. Pieni arvo kertoo laadusta. X visualisoidaan lukuna 200. Luvut, joissa on "e", visualisoidaan normaaleina lukuina.



Kuva 31. Taulukon 5 tiedot kaaviossa. Arvot, joissa on kirjain "x", esitetään lukuna 200.

Taulukosta ja sitä visualisoivista kaavioista on todettavissa, että muuntumien erottuminen heat-map-näkymissä on riippuvainen pilvien nollapisteiden etäisyydestä (taulukko 5, kuvat 30 ja 31). Todisteeksi katsotaan se, että vaadittu värikylläisyysluku pääsääntöisesti nousee, kun nollapisteiden välimatka kasvaa. Se, että värikylläisyysluku joillain taulukon riveillä laskee 1 mm määrän liikuttaessa oikealle, ei katsota merkittäväksi, sillä pistepilvien orientoinnin tarkkuus oli 1 mm tai huonompi. Oletettavasti pilvien 4 ja 5 orientointi onnistui paremmin kuin pilvien 2 ja 3 orientointi.

6.10.4 Muuntumien erottuminen nollapistenäköstä verrattuna niiden erottumiseen lähitarkastelun näköstä

Tarkastellaan, onko näkö referenssipilven nollapisteestä hyödyllinen tarkastelutapa verrattuna normaaliin tapaan tarkastella pistepilveä eli tarkastella kohdetta lähietäisyydeltä, kun tarkastellaan tilassa tapahtuneita muuntumia (taulukko 7).

Taulukko 7. Vertaillaan nollapistenäkymän ja normaalin lähinäkömisen toimivuutta heat-map-tarkastelussa. "b" tarkoittaa nollapistenäkymää. "n" tarkoittaa normaalia lähinäkömistä. Teksti "k" on määritelty taulukko 5:ssä.

	Vertailtu pilvi									
	pilvi 1		pilvi 2		pilvi 3		pilvi 4		pilvi 5	
Näköm	b	n	b	n	b	n	b	n	b	n
Ryhmä 1	5	10e	5	10e	10	10e	10	10e	30	10e
Ryhmä 2	5	2	5	2	10	15	30e	70	x	x
Ryhmä 3	5	2	5	3	10	20	30e	x	x	x
Ryhmä 4	5	10e	5	10e	5	10e	20	50e	x	x
Ryhmä 5	5	2	5	3	5	10	20	x	x	x
Ryhmä 6	5	15	5	15	5	15	10	20	30e	100
Ryhmä 7	5	4	5	3	5	3	10	10	35e	40e
Ryhmä 1 k	2	2	3	3	3	3	2	2	2	2
Ryhmä 2 k	2	2	2	2	3	5	4	x	x	x
Ryhmä 3 k	2	3	4	3	5	5	x	x	x	x
Ryhmä 4 k	2	9	2	10	5	15	15	x	x	x
Ryhmä 5 k	2	2	2	2	2	5	x	x	x	x
Ryhmä 6 k	1	15	1	15	2	15	2	20	3	x
Ryhmä 7 k	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Pääsääntöisesti pistepilven heat-mapin tarkastelu referenssinä toimineen pilven nollapisteestä oli yhtä hyvä tai parempi tapa erottaa tapahtunut aito muuntuma näkömistä, kun kojeasemien sijainnin ero oli millimetriä suurempi. Huom. muuntuman suunnan ja määrän toteaminen vaatii silti aina tarkastelua lähemmästä näkömistä.

Päätelmä on, ettei kumpikaan tarkastelutapa korvaa toista, vaan ne täydentävät toisiaan.

6.10.5 Kaksisuuntainen vertailu

Pilville 5 ja 6 tehtiin kaksisuuntainen vertailu toistensa suhteen. Tarkoitus oli tarkastella, erottuuko mittauksen välillä poistunut pinta paremmin, kun edeltävän mittauksen pistepilville tehdään pistepilvien välisestä etäisyydestä heat-map käyttäen referenssinä myöhemmän mittauksen pilveä, kuin silloin kun tehdään myöhemmän mittauksen pistepilvien etäisyydestä heat-map käyttäen referenssinä aiemman mittauksen pilveä.

Pilven 5 ja pilven 6 keilausten välillä poistettiin kaikki purkit tilasta (ks. luku ”6.5.2 Mittauksen kohteet”).

Tehtiin kaksi heat-map-skalaarikenttää. Pilvi 5 pilvi 6:n suhteen ja pilvi 6 pilvi 5:n suhteen. Näiden heat-map-skalaarikenttien näkymien selkeyttä vertailtiin toisiinsa.

Tulos oli yksiselitteinen. Vertailu osoitti selkeästi, että poistunut pinta erottui paremmin pilvi 5:stä pilvi 6:n suhteen tehdyistä heat-map-näkymistä (liite 2).

7 Päätelmät

7.1 Päätelmät tuloksista

Opinnäytetyö etsi ratkaisuja yleiseen työelämän tilanteeseen laserkeilauksella tehtävässä seurantamittauksessa, jossa kohteen tai sen ympäristön monimutkainen tuki-, koriste- tai muu rakenne estää kohteen pinnat täysin kattavan keilauksen. Lopputuloksena on tehdyn tutkimuksen tulosten vahvistamia perusteltuja päätelmiä ja ehdotuksia heat-map-aineiston käsittelyyn ja tarkasteluun.

Esitetyn teorian ja tutkimuksesta saatujen tulosten perusteella keilaus tunnetuilta pisteiltä on hyödyllinen lisäys seurantamittaukseen aina, kun on riski siitä, ettei koko kohteen pinnan keilaus ole mahdollista.

Näkymä referenssinä toimineen pilven nollapisteestä osoittautui hyödylliseksi heat-map-näkymän tarkastelukeinoksi, kun vertailtavien pilvien välillä on kojeasemien sijaintien eroa johtuvia katve-eroja.

Tutkimus näytti kahteen suuntaan tehtävän heat-map-vertailun välttämättömäksi, mikäli seurattavassa kohteessa on minkäänlaista vaaraa pinnan poistumisesta. Näin on myös silloin, kun koko kohteen pinta on pystytty keilaamaan aukottomasti.

7.2 Ehdotuksia

7.2.1 Keilaimen sijoittaminen seurantamittaus keilauksessa tunnetuille pisteille

7.2.1.1 Keilaimen pystytystarkkuuden saavutettavuus

Kymmentä senttiä parempi keilaimen pystytyksen tarkkuus on saavutettavissa nopeasti ja vaivattomasti normaalissa mittauksessa. Jos keilauksessa on kohteen pinnan kattavuudessa minkäänlaista epävarmuutta, ei ole syytä olla sijoittamatta keilainta tähän tarkkuuteen. Tunnetut pisteet voi merkitä takymetrilla ja prismalla väliaikaisesti alustalle.

Lisäksi avoimessa ulkotilassa VRS-RTK-mittaus riittää tarkkuudeltaan tunnetun pisteen merkitsemiseksi maastoon.

Yhden senttimetrin pystytystarkkuus keilaimelle on saavutettavissa kohtalaisen nopeasti käyttämällä keilaimen laserluotia ja mallikohtaista mittanauhaa. Jos alustassa ei ole pysyvää merkkiä, takymetrilla sen väliaikainen merkkäus vaatii tarkkuusprismaa. Pystytyksessä voi myös käyttää pakkokeskistä periaatetta, eli kolmijalkaan kiinnitetään prisma, joka takymetrilla seurattuna pystytetään tunnettuun sijaintiin, minkä jälkeen prisman tilalle vaihdetaan laserkeilain.

Yhden millimetrin pystytystarkkuus keilaimelle on mahdollista saavuttaa, jos mittaaja on kokenut, alustassa on erittäin selkeä pysyvä merkki ja hänellä on käytettävissä optinen luoti ja keilaimen mallikohtainen mittanauha. Tämä on kokeneellekin mittamiehelle työläs operaatio.

7.2.1.2 Tunnettujen pisteiden määrittäminen

On huomattava, että se millä tarkkuudella keilain saadaan pystytettyä edeltävän mittauskerran aseisiin, riippuu myös siitä, miten tunnettu piste määritetään. Määrittäminen ei saisi olla epätarkempi kuin keilaimen pystytystapa pisteelle.

Tässä tekstiosiossa käsitellään kahdenlaisia tunnettuja pisteitä. Referenssimittauksen keilaimen nollapiste ja se piste, jossa suoraan keilaimen nollapisteestä alas kulkeva linja kohtaa keilaimen alla olevan pinnan. Jälkimmäistä kutsutaan tässä nimellä maapiste. Maapiste osoittaa nollapisteen sijainnin tasossa, mutta jotta keilain saadaan edellisen mittauskerran nollapisteeseen, on pidettävä muistissa maapisteen ja nollapisteen korkeusero keilaimen pystytykseen.

Kymmenen sentin tarkkuutta paremmat nollapisteen koordinaatit saadaan suoraan keilauksen tiedoista, mikäli keilauksen tähyksille annettiin koordinaatit takymetrilla. Esim. Leica ScanStation P30:n keskihajonta tähyksien sijainnin määrittämiseen on 2 mm 50 m:n etäisyydellä (5, s. 47).

Yhden senttimetrin tarkkuus nollapisteen koordinaatille pitäisi saada tarvittavalla tarkkuudella suoraan keilauksen tiedoista, mutta varmuuden vuoksi on paras tarkistaa nollapisteen sijainti takymetrimittauksella. Se voidaan tarkistaa esimerkiksi keilaimeen kiinnitettävästä prismasta, pakkokeskisellä periaatteella keilaimen tilalle laitettavasta prismasta tai merkitsemällä alustaan laserluodin tai optisen luodin osoittama maapiste, joka sitten mitataan takymetrillä, ja jonka etäisyys nollapisteeseen kirjataan talteen.

Yhden millimetrin tarkkuus. Alustaan rakennetaan erittäin selkeä pysyvä merkki ja keilain pystytetään sen päälle optisella luodilla. Keilaimen nollapisteen korko kyseisestä merkistä määritetään mallikohtaisella mittanauhalla. Maapisteen sijainti kannattaa kaiken varalta mitata myös takymetrillä ja tarkkuusprismalla, siltä varalta, että se tuhoutuisi.

7.2.1.3 Nyrkkisääntö hyödyllisen tarkkuuden päättelyyn keilaimen pystytyksessä

Esitetyn geometrisen riippuvuudesta kojeaseman sijainnin ja katveen sijoittumisessa kohteen pinnalle voidaan muodostaa helppo matemaattinen kaava nyrkkisäännöksi, jolla voi nopeasti päätellä keilaustilanteen vaatiman vähimmäistarkkuuden keilaimen pystytykselle tunnetulle pisteelle.

"h"	on ero pistepilvien katveen välillä.
"s"	on ero keilaimen sijainnissa.
"ek"	on matka esteestä kohteeseen.
"es"	on matka esteestä keilaimeen.
"a"	on kohteen pinnan ja lasersäteen kohtisuoran kulma.

Muuttuja x kulmasta "a":

0° -> x =	1	=	1
45° -> x =	1,4	≈	1,5
60° -> x =	2	≈	2
75° -> x =	3,9	≈	4

Yhtälö 4:

$$h = s * x * \frac{ek}{es} \quad (4)$$

Siten ero katveen sijainneissa (h) on keilaimen sijainnin epätarkkuus (s) kertaa kulma-
korjaus (x) kertaa kohteen pinnan (ek) ja keilaimen (es) etäisyyksien suhde.

Toisin päin (yhtälö 5):

$$s = \frac{h}{x} * \frac{es}{ek} \quad (5)$$

Vaadittu tarkkuus keilaimen pystytykselle tunnetulle pisteelle (s) katvealueille sallitusta sijaintierosta (h).

7.2.2 Takymetrin ja tähysten sijoitus tunnetuille pisteille

Ehdotetaan, että referenssimittauksessa käytetyt takymetrin sijainnit ja laserkeilaimen tähysten sijainnit otetaan muistiin ja että samoja sijainteja käytetään myöhempien mitausten tähyksille. Tämä sijaintien uudelleen käyttö säästää potentiaalisesti aikaa ja vaivaa, sillä näiden tähysten sijaintien näkyvyys keilaimen ja takymetrin vanhoihin sijainteihin on jo tiedossa.

7.2.3 "Hidden point removal" -työkalun käyttö heat-map-pilveen referenssipilven nollapisteestä

Ehdotetaan, että työkalun testausta heat-map skalaarikentän puhdistamiseen keilaimen asemien sijainnin eron aiheuttamasta kattavuus eroista käyttämällä pilven heat-mapin referenssinä toimineen osapilven nollapisteestä (liite 1). Työkaluun on syytä suhtautua varautuneesti, sillä esimerkiksi CloudCompare-ohjelman tämänhetkinen versio käyttää liioittelevaa approksimaatiota pistepilven pinnoista ja leikkaa siksi näköesteiden takana olevia pintojen liikaa. Liioittelu on sitä suurempi, mitä suurempi on näköesteen etäisyys kohteen pinnasta.

7.3 Rajoitukset

Opinnäytetyössä esitetyt sijoitusperiaatteet perustuvat siihen olettamukseen, että seurantamittattavan kohteen pintoja peittävät näköesteet ovat liikkumattomat. Mikäli

näköesteet liikkuvat huomattavasti, niitä poistuu tai tulee lisää, olisi niitäkin tässä esitellyillä seurantamittauksen menetelmillä käsiteltävä seurattavina kohteina. Vaikkakaan ei mahdotonta, mutkistaisi tämä heat-map-tulkintaa.

8 Lisäpohdinta

Opinnäytetyö tuotti myös huomioita ja kysymyksiä, joita siinä pohdittiin mutta joihin se ei kyennyt vastaamaan.

Mikäli keilain pystytetään tunnetulle pisteelle millintarkasti, voiko keilaimen nollapisteen sijaintia käyttää tunnettuna pisteenä (tähyksenä) pistepilviä rekisteröidessä?

Pinnan suuntainen liike vaatii erityistä huomiota, sillä kiertyvä sylinteri tai tasainen seinä, joka liikkuu seinäpinnan suuntaisesti, liikkuu muuttamatta muotoaan, ja siksi tämä liike ei tule näkyviin pilvien välisen etäisyyden heat-mapissä. Voidaanko tämän kaltainen liike tuoda näkyviin asentamalla pintaan syvennyksiä, ulokkeita tai sellaisia tarroja, joiden pinnasta keilain ei saa mittaustulosta?

Vaikuttavatko keilainta orientoidessa keilattujen tähysten kulmat lasersäteen kohtisuoraan systemaattisena virheenä, joka näin ollen kumoutuisi muutosten tarkastelussa, kun tähysten ja keilaimen asemat pidetään samoina eri mittauskerroilla?

Vaikuttavatko kohdetta keilatessa keilattujen pintojen kulmat lasersäteen kohtisuoraan systemaattisena virheenä, joka näin ollen kumoutuisi muutosten tarkastelussa, kun keilaimen asemat pidetään samoina eri mittauskerroilla?

Voiko tilanteessa, jossa kohteen koko pinnan keilaus olisi mahdollista mutta työlästä, vähentää kojeasemien määrää luottaen tunnettujen pisteiden käyttämisen tuomaan lisäantyneeseen laatuun muuntuma tarkastelussa?

Onko kaupallisesti tai ilmaisohjelma projekteissa saatavilla tai kehitteillä line-of-sight-metodilla toimivaa pistepilven leikkaustyökalua?

Kuinka hyvin esitetyt periaatteet toimivat pitkillä matkoilla ulkotiloissa, jossa keilauksen pisteiden mittauksen epätarkkuus kasvaa matkan myötä koneen oman epätarkkuuden vuoksi ja valon taipuminen ilmassa vaihtelee sään mukaan? Tämän opinnäytetyön tutkimuksen koejärjestely pyrki esitetyn hypoteesin todistamiseen ja oli siksi tarkoituksella ideaalinen, eikä välttämättä sovellu sellaisenaan ulkotiloihin.

Lähteet

- 1 Laurila, Pasi. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. 4. uudistettu painos. E-kirja. Rovaniemen ammattikorkeakoulu.
- 2 Joala, Vahur. 2006. Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu. Espoo: Leica Nilomark Oy.
- 3 Leica ScanStation P40/P30 System Field Manual Version 4.0. 2016. Switzerland: Leica Geosystems AG.
- 4 Joala, Vahur. 2006. Leica Keilausuutiset –1/2006. Espoo: Leica Nilomark Oy.
- 5 Leica ScanStation P50/P40/P30 User Manual Version 6.0.1. 2018. Switzerland: Leica Geosystems AG.
- 6 Leica ScanStation P30/P40 Because every detail matters. 2017. Switzerland: Leica Geosystems AG.
- 7 Tekniset tiedot Trimble SX10 Keilaintakymetri. 2016-2017.
- 8 Saloranta, Markku. 2019. Seurantamittaus. Verkkoaineisto. 3D-system Wiki. <<http://www.3d-system.net/wiki/index.php/tyokalut/aputoiminnot/62-seurantamittaus>>. 11.02.2019. Luettu 14.4.2019.
- 9 Lienhart, Werner. 2017. Geotechnical monitoring using total stations and laser scanners: critical aspects and solutions. Verkkoaineisto. Journal of Civil Structural Health Monitoring 7/2017, Vol 7, Osa 3, s. 315–324. <<https://link.springer.com/article/10.1007/s13349-017-0228-5>>.
- 10 Oppikofer, T; Jaboyedoff, M; Blikra, L; Derron, M & Metzger, R. 2009. Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning. Natural Hazards and Earth System Sciences 9, s. 1003–1019, 2009.
- 11 GNU General Public License, version 2. 2017. Verkkoaineisto. GNU Operating System. <<https://www.gnu.org/licenses/old-licenses/gpl-2.0.en.html>>. Päivitetty 4.9.2017. Luettu 14.4.2019.
- 12 Cloud-to-Cloud Distance. 2015. Verkkoaineisto. CloudCompare Wiki. <https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Cloud-to-Cloud_Distance>. Päivitetty 6.10.2015. Luettu 14.4.2019.

- 13 Briese, Christian; Pfeifer, Norbert. 2007. Laser Scanning - Principles and Applications. Austria: Institute of Photogrammetry and Remote Sensing.
- 14 Cloud-to-Cloud Distance. 2016. Verkkoaineisto. CloudCompare Wiki. <<https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Introduction>>. Päivitetty 17.11.2016. Luettu 26.5.2019.

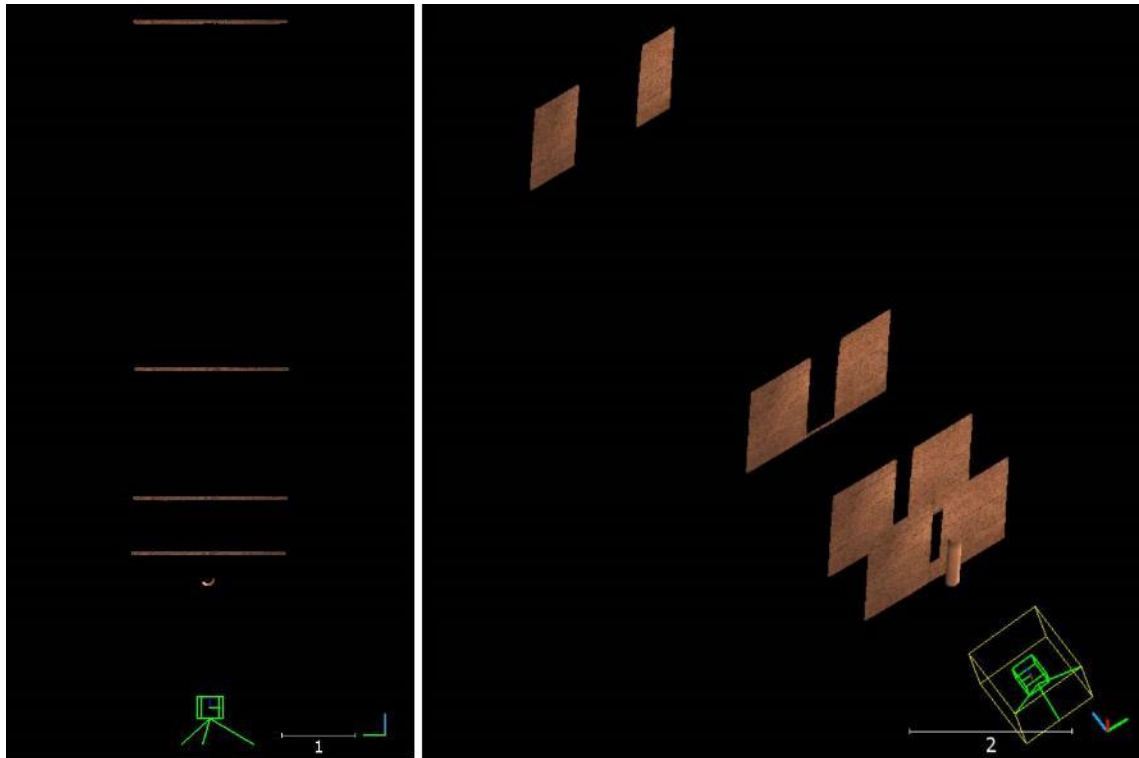
Pistepilven puhdistus CloudCompare ”hidden point removal” -työkalulla

Toimiva line-of-sight (näkölinja) ”hidden point removal” -työkalu (näkymättömissä olevien pisteiden poisto) olisi lupaava työkalu pistepilven puhdistuksessa pistepilvien välisistä kattavuuseroista. Aiemmin esitetyn hypoteesin (ks. luku ”4.2 Heat-map-tarkastelu referenssipilven nollapisteestä”) periaatetta käyttämällä eli asettamalla näkymäksi referenssipilven nollapisteen perspektiivi, line-of-sight ”hidden point removal” -työkalu poistaisi kaikki kattavuuserot pistepilvestä ja pistepilveen jäisi jäljelle vain eri mittauskertojen molemmista kojeasemista näkyvissä ollut pinta.

Ilmaisojelma CloudCompare (v2.10.2) -ohjelman ”hidden point removal” -työkalu ei käytä näkölinjaa vaan pintojen approksimointia. Tämä approksimaatio liioittelee pistepilven pisteiden hahmottelevien pintojen peittävyttä.

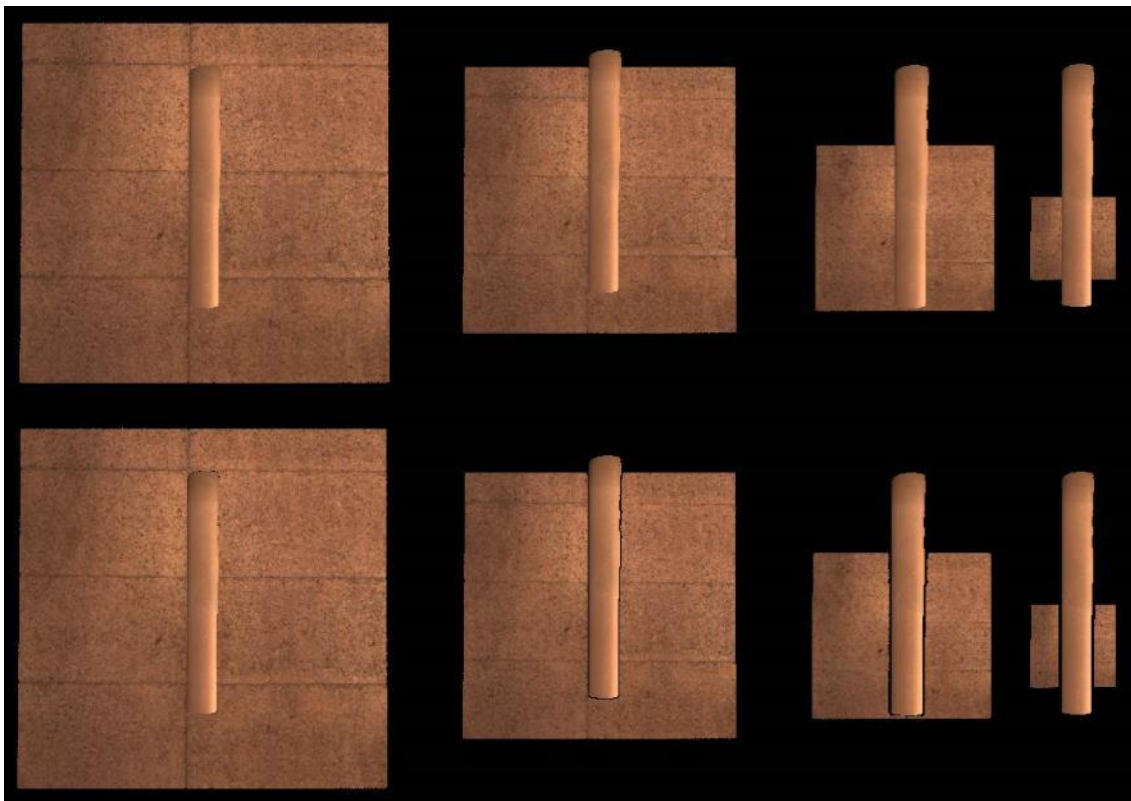
Testi

Väitetyn liioittelun todistamiseksi CloudCompare-ohjelman "hidden point removal" -työkalun testaus. Koejärjestely (kuva a) on yksinkertainen. Este ja näköpiste pidetään paikallaan, seinän sijaintia muutetaan.



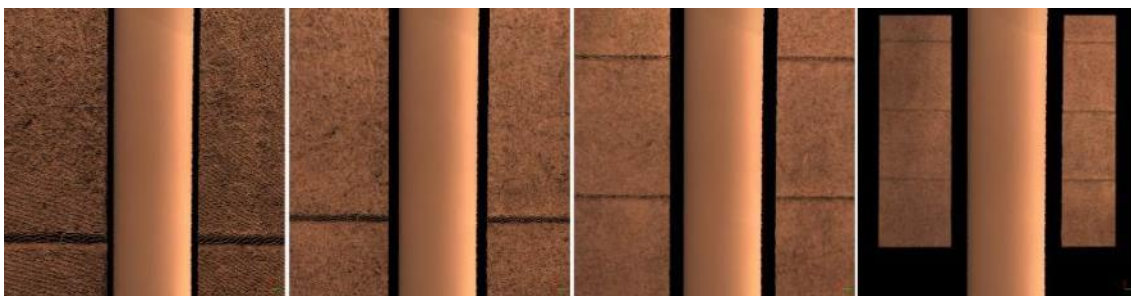
Kuva a. Koejärjestely. CloudCompare-ohjelmaan on tuotettu 4 erillistä pilviä, jossa kussakin on sama este (sylinterimäinen tanko seinien ja näköpisteen välissä) ja seinä. Kussakin pilvessä seinä on eri etäisyydellä esteestä. Kuvassa kaikki pilvet ovat näkyvissä samalla kertaa. Vasemmalla seinät ennen työkalun käyttöä. Oikealla käytön jälkeen.

Kuvan a:ssa näkymä on ilman perspektiiviä. Kuvien b ja c näkymät ovat perspektiiveillä.



Kuva b. Perspektiivinäkymä näköpisteestä ennen (yläkuvat) ja jälkeen (alakuva) ”hidden point removal” -työkalun käytön. Ainoa muuttuja on seinän etäisyys.

Tulos on yksiselitteinen (kuvat b ja c). Approksimaation liioittelu on sitä suurempi mitä suurempi on esteen ja kohteen pinnan etäisyys toisistaan.



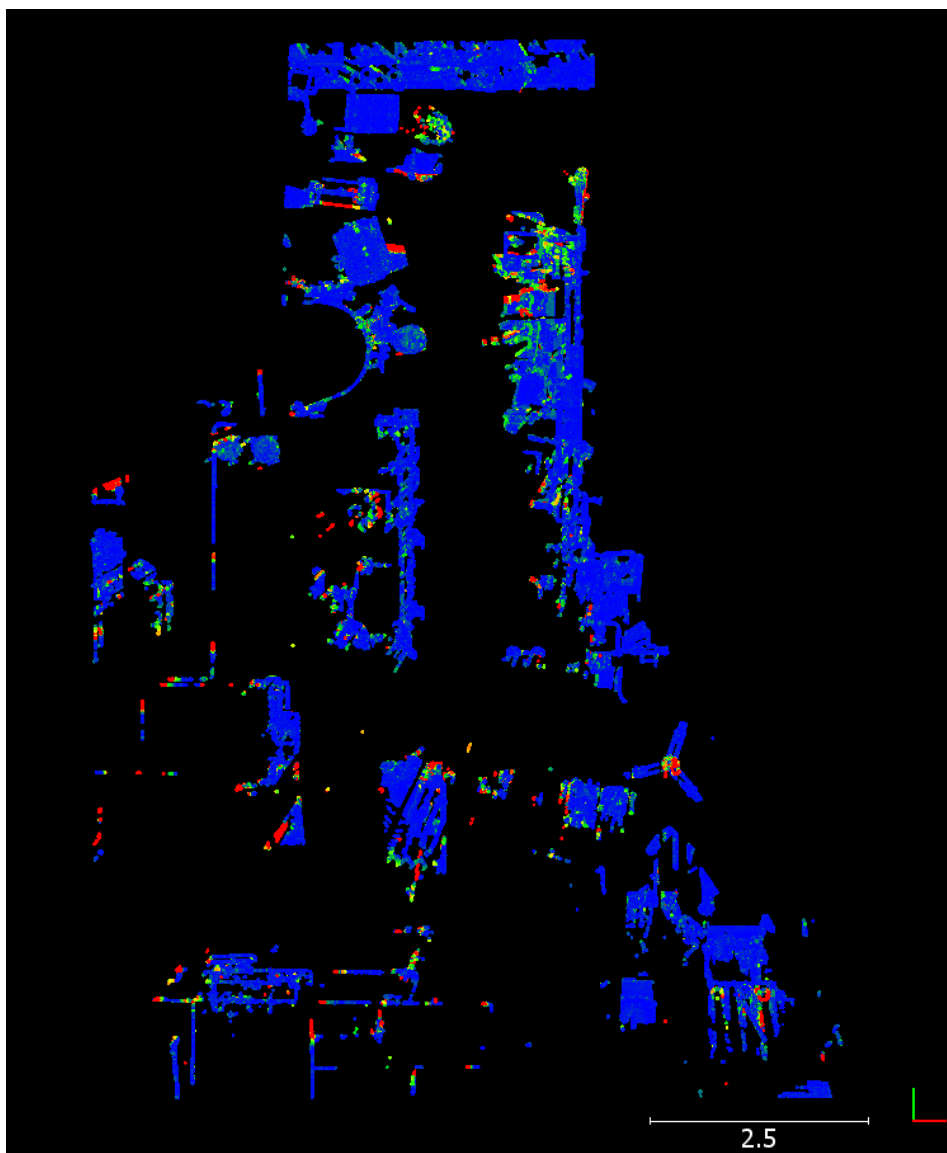
Kuva c. Perspektiivillinen lähikuva näköpisteestä. Approksimaation liioitteleva pisteiden poisto on selvästi havaittavissa.

Työkalu voi silti olla käyttökelpoinen ja tehokas pistepilven käsittelyssä, jos liioitteleva pisteiden poisto ei haittaa vertailua. Tai jos kohteen pintaa peittävät esteet ovat hyvin lähellä kohteen pintaa.

Tämä opinnäytetyö ei kykene tutkimaan kaupallisten pistepilvikäsittelyohjelmien ”hidden point removal” -työkalujen toimintaperiaatetta tai laatua.

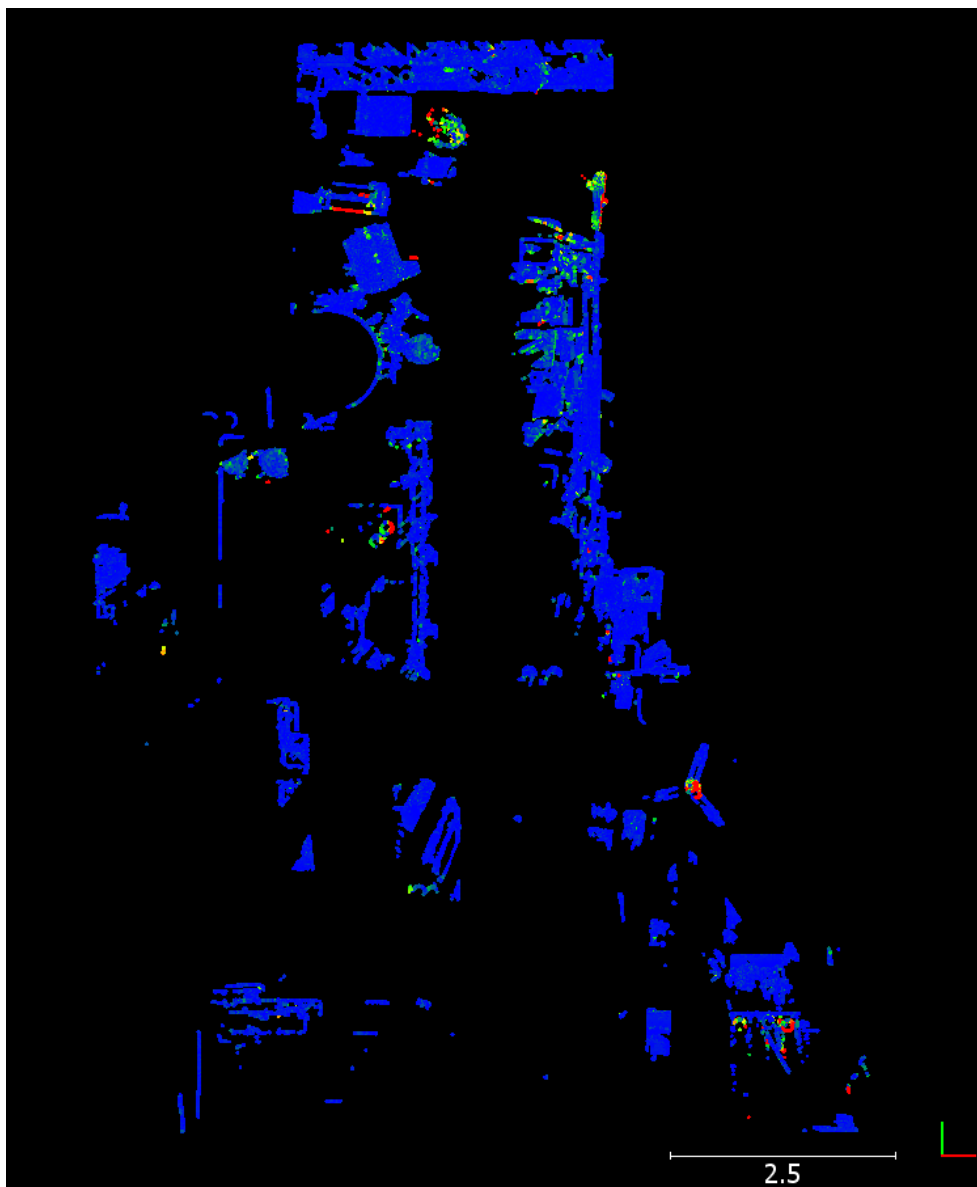
Käytännön esimerkki

Käytännön esimerkki CloudCompare-ohjelman "hidden point removal" -työkalun käytöstä:



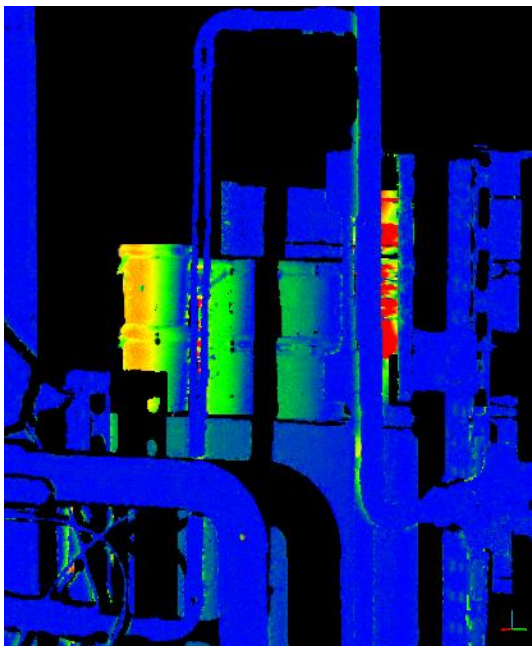
Kuva d. Pilvi 4 heat-map pilvi 1:n suhteen.

Pilvi 4 heat-map pilvi 1:n suhteen. Lähes kaikki punainen väri kuvassa johtuu erossa pistepilvien kattavuudessa, eikä aidoista muuntumista (kuva d).



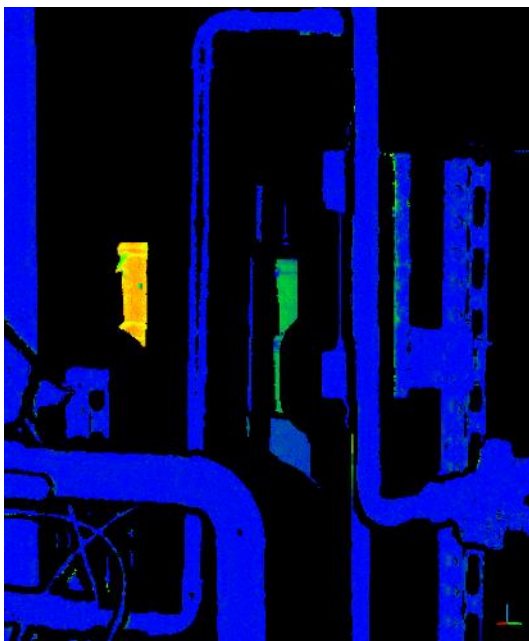
Kuva e. Heat-map leikattuna CloudCompare-ohjelman "hidden point removal" -työkalulla pilvi 1:n (eli referenssin nollapisteestä) nollapisteestä.

Pilvi 4 heat-map pilvi 1:n suhteen leikattuna CloudCompare-ohjelman "hidden point removal" -työkalulla pilvi 1:n nollapisteestä. Pilvi 4:n erot kattavuudessa pilvi 1:een on leikattu pois lähes täysin, mutta approksimaation liioittelu leikkasi pois myös muuta pintaa (kuva e).



Kuva f. Leikkaamaton heat-map. Näkymä referenssin nollapisteestä.

Lähinäkö heat-mapistä. CloudCompare-ohjelman "hidden point removal" -työkalun approksimointi liioittelee pintojen peittävyttä (kuvat f ja g).



Kuva g. Leikattu heat-map. Näkymä referenssin nollapisteestä. Approksimointi on leikannut piltä pois pintaa, joka oli näkyvässä nollapisteestä.

Kaksisuuntainen vertailu

Pilville 5 ja 6 tehtiin kaksisuuntainen vertailu toistensa suhteen. Tarkoituksena oli tarkastella erottuuko mittauksen välillä poistunut pinta paremmin, kun edeltävän mittauksen pistepilville tehdään etäisyys heat-map käyttäen referenssinä myöhemmän mittauksen pilveä, kuin silloin kun tehdään myöhemmän mittauksen pistepilville etäisyys heat-map käyttäen referenssinä aiemman mittauksen pilveä.

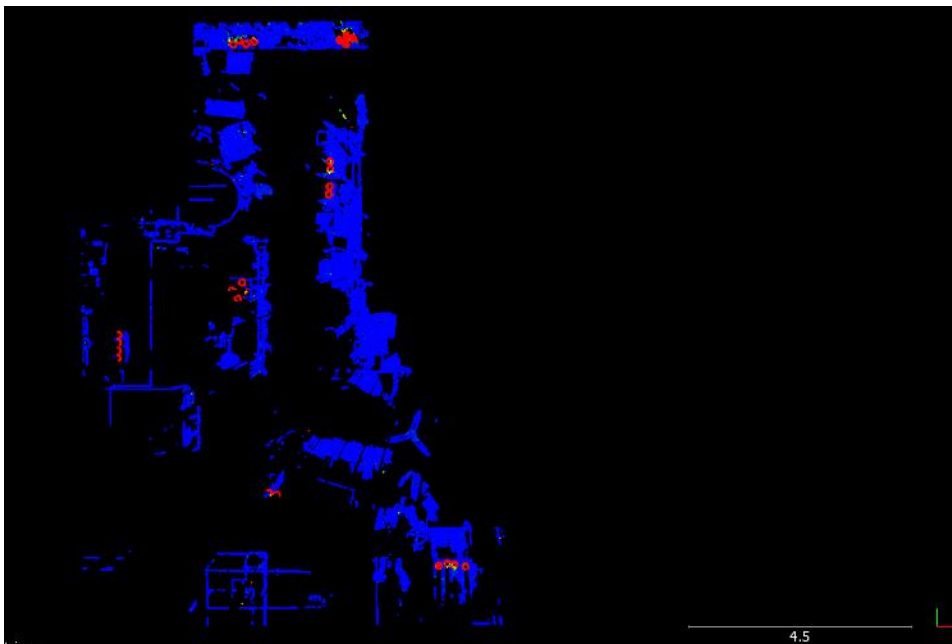
Pilven 5 ja pilven 6 keilausten välillä poistettiin kaikki purkit tilasta.

Tuotettiin kaksi heat-mapia. Pilvi 6 heat-map pilvi 5:n suhteen ja pilvi 5 heat-map pilvi 6:n suhteen. Näiden heat-map-näkymien selkeyttä vertailtiin toisiinsa. Selkeys todettiin siitä, olivatko tilassa tapahtuneet muuntumat heat-map-näkymässä punaisella värillä. Ja olivatko ne alueet, joissa ei muuntumia ei ollut tapahtunut sinisellä värillä.

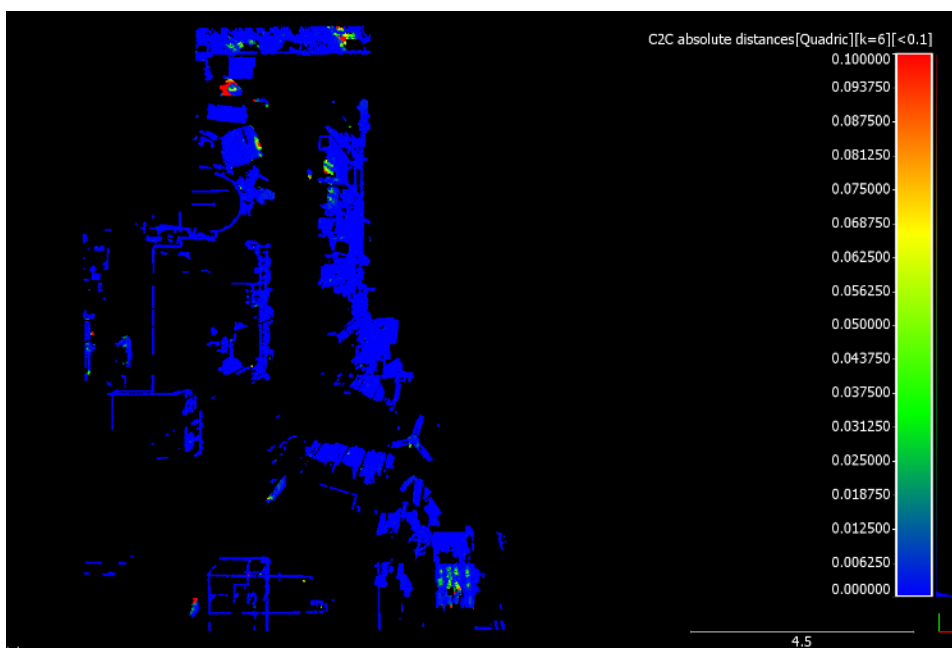
Kuvavertailussa (kuvat a–h) on todettavissa yksiselitteisesti, että poistuneet pinnat ovat erotettavissa ja paikallistettavissa paremmin, kun edeltävän mittauksen pistepilville tehdään pilvien välisen etäisyyden heat-map käyttäen referenssinä myöhemmän mittauksen pilveä. Eli tässä tapauksessa pilvi 5 heat-map pilvi 6:n suhteen.

Huomion arvoista on, että tilaan mittauskertojen välillä ilmaantuvat uudet pinnat ovat samalla periaatteella paremmin todettavissa, kun tehdään myöhemmän mittauksen pistepilville etäisyyden heat-map käyttäen referenssinä aiemman mittauksen pilveä. Näin ollen ei seurannassa kannata tehdä pelkkää käänteistä vertailua vaan tehdä molemmat eli kaksisuuntainen vertailu, jos on syytä olettaa, että seurattavasta kohteesta on poistunut pintaa.

Ylänäkö

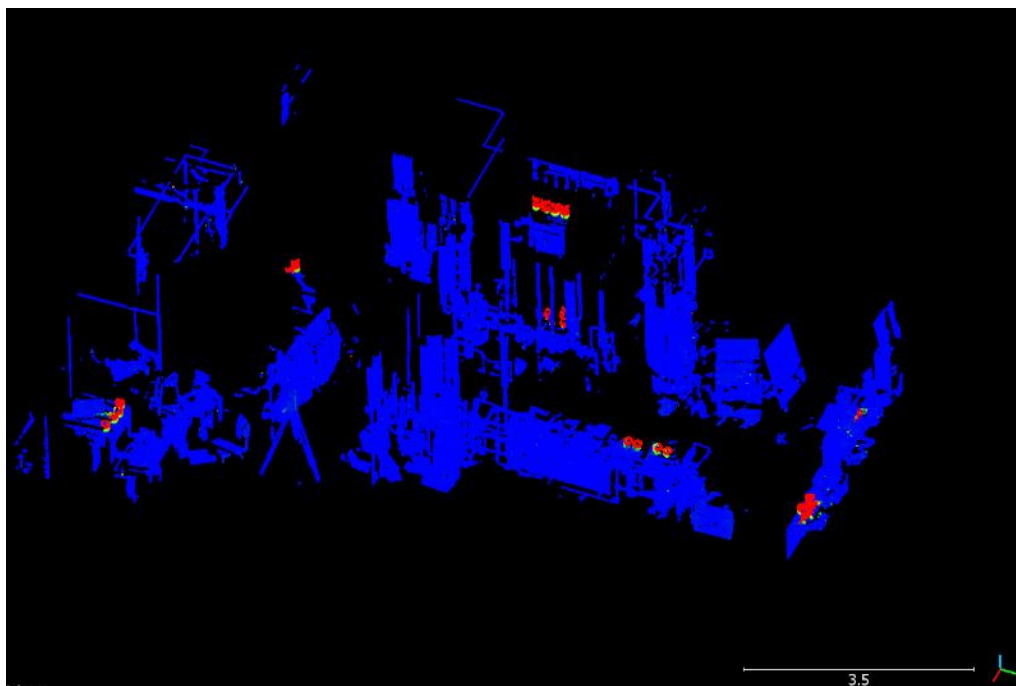


Kuva a. Pilvi 5 heat-map pilvi 6:n suhteen.

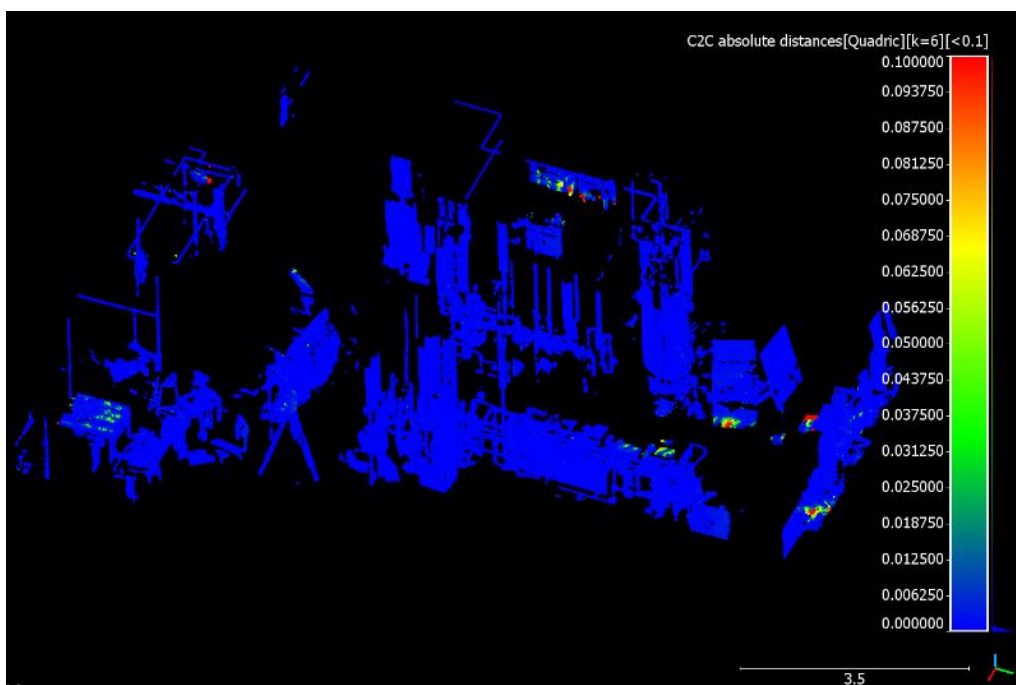


Kuva b. Pilvi 6 heat-map pilvi 5:n suhteen.

Isometrinen näkymä

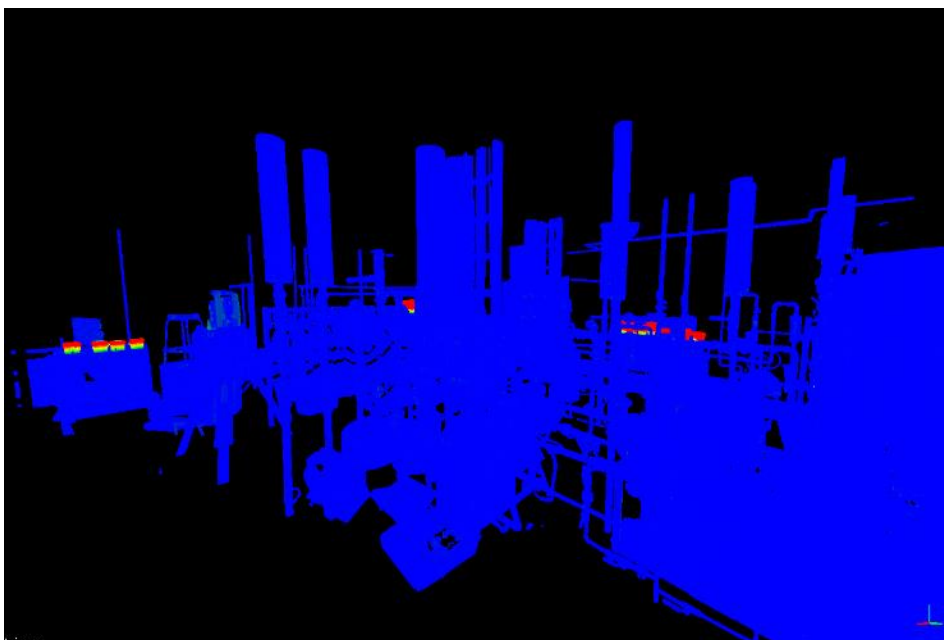


Kuva c. Pilvi 5 heat-map pilvi 6:n suhteen.

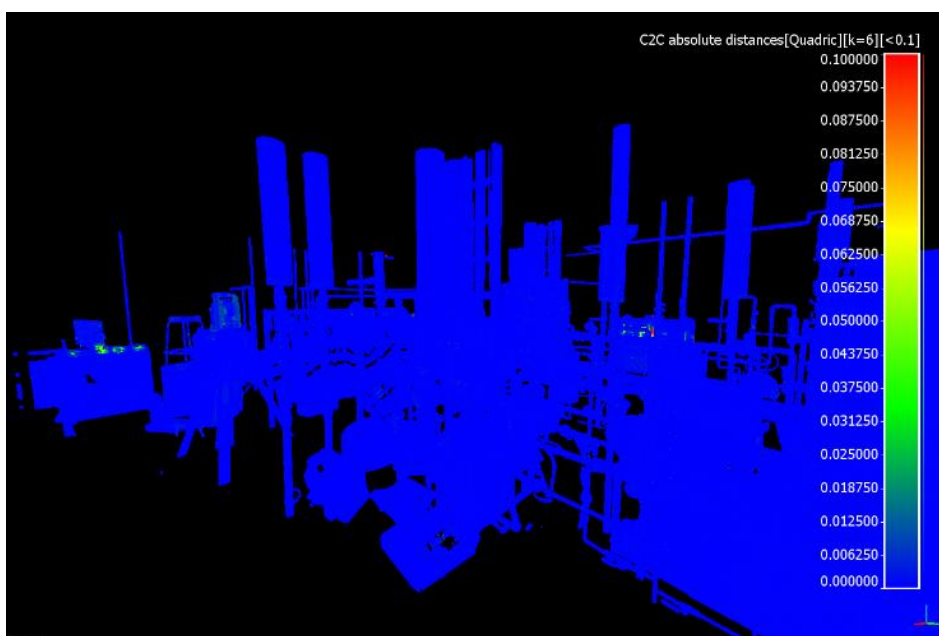


Kuva d. Pilvi 6 heat-map pilvi 5:n suhteen.

Näkymä pilvi 5:n nollapisteestä 1

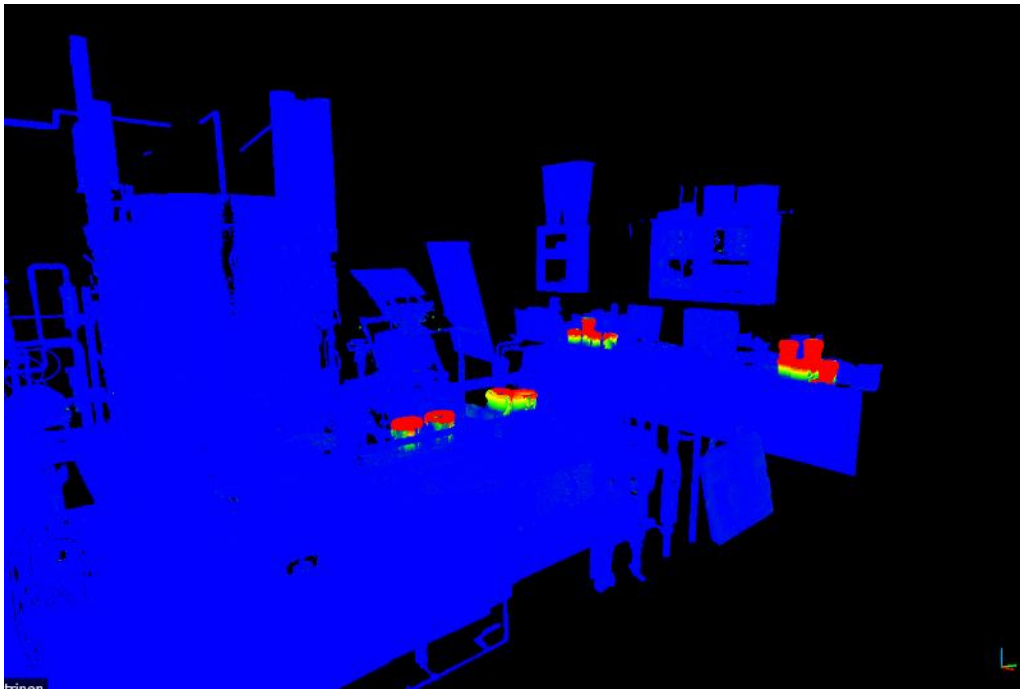


Kuva e. Pilvi 5 heat-map pilvi 6:n suhteen.

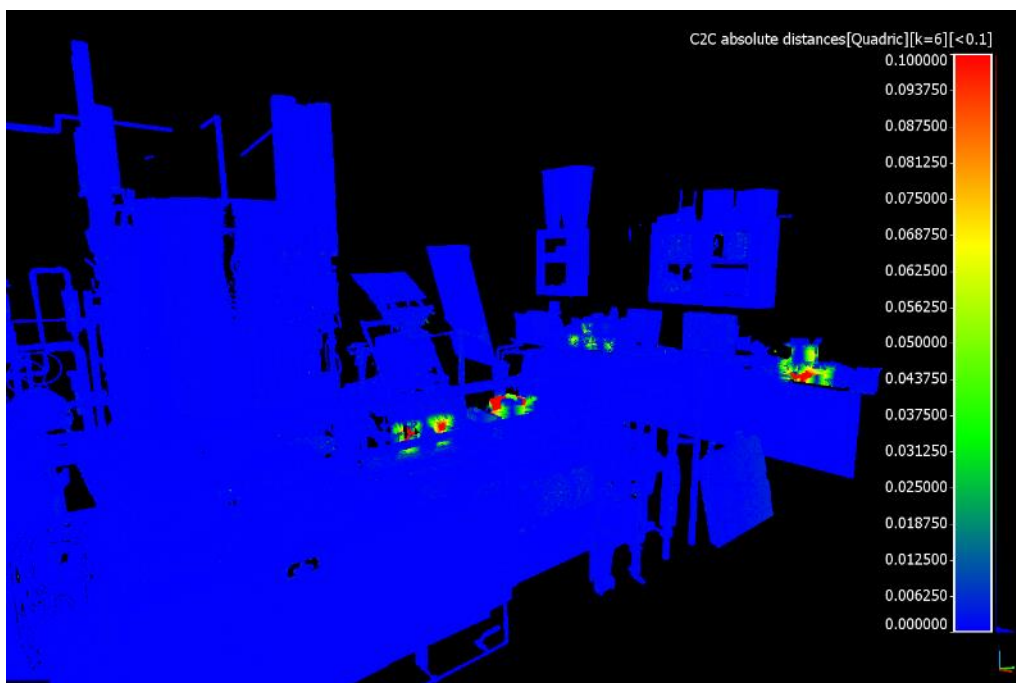


Kuva f. Pilvi 6 heat-map pilvi 5:n suhteen.

Näkymä pilvi 5:n nollapisteestä 2



Kuva g. Pilvi 5 heat-map pilvi 6:n suhteen.



Kuva h. Pilvi 6 heat-map pilvi 5:n suhteen.

Heat-mapien tarkastelu referenssipilven nollapisteestä

Pilvistä 2–5 tehtiin heat-map pilvi 1:n suhteen vertailu. Tarkoitus oli tarkastella, mikä on tarkastelu näkökulman valinnan vaikutus heat-map-näkymän selkeyteen. Selkeä näkymä määriteltiin olevan näkymä, jossa aito muuntuma erottuu väriltään ympäristöstä. Väri ilmaisee etäisyseroa pistepilvien välillä. Virheelliset havainnot muuntumista voivat johtua esimerkiksi eroissa siinä, miten pistepilvet kattavat kohteen pintoja tai pistepilven keilauksen epätarkkuudesta.

Koska pilven 1 ja pilvien 2–5 keilausten välissä ei tuotettu (tämän liitteen kuvien näyttämiin pintoihin) muuntumia, tarkastelu yksinkertaistuu, sillä näin ollen kaikki punainen väri kuvissa on virheellistä havaintoa. Mitä enemmän punaista väriä näkymässä on, sitä huonolaatuisempi se on. Kaikkien heat-mapien värikylläisyysarvot oli asetettu arvoon 10 mm. Käytetyt näkymät ovat sijainniltaan ja suunnaltaan samat eri pilvien kesken.

Tarkastelu tutkii miten näkymän laatuun vaikuttaa se tarkastellaanko heat-mapia referenssipilven nollapisteestä vai nollapisteen sivusta. Tarkasteluja tehtiin kaksi. Normaalista nollapistenäkymästä (kuvat a–i) ja zoomatusta nollapistenäkymästä (kuvat j–p).

Tulokset

Pilvi 2:n tarkastelut olivat väreiltään lähes identtisiä (kuvat b ja c) (kuvat k ja l). Pistepilvien nollapisteiden etäisyyden ero oli 1 mm.

Pilvi 3:n tarkastelut olivat väreiltään eriäviä (kuvat d ja e) (kuvat m ja n). Liikutetussa näkymässä oli punaista väriä. Pistepilvien nollapisteiden etäisyyden ero oli 18 mm.

Pilvi 4:n tarkastelut eroavat voimakkaasti väreiltään (kuvat f ja g) (kuvat o ja p). Siinä missä nollapistenäkymässä hieman punaista väriä, on liikutettu näkymä käyttökelvoton. Pistepilvien nollapisteiden etäisyyden ero oli 126 mm.

Pilvi 5:n kaikki näkymät olivat käyttökelvottomia (kuvat h ja i). Pistepilvien nollapisteiden etäisyyden ero oli yli 2 m.

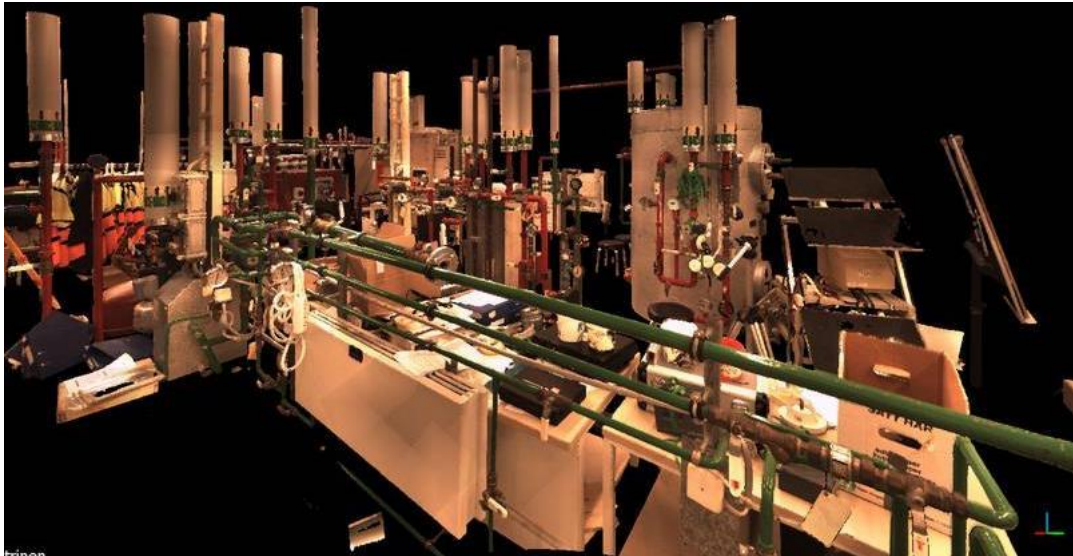
Päätelmät

Kun pilvien nollapisteiden etäisyys on 1 mm, ei nollapistetarkastelu paranna heat-map-näkymää. Etäisyyden kasvaessa (sentteihin) nollapistenäkymä parantaa näkymää peittämällä näkyvistä katve-erojen väritystä. Jo 10 cm nollapisteiden etäisyydellä on nollapistenäkymä välttämätön työkalu, jotta näkymä olisi käyttökelpoinen. Kun nollapisteiden etäisyys tästä vielä kasvaa, tulee vastaan raja, jonka jälkeen nollapistenäkymän käyttö ei enää paranna käyttökeltvotonta näkymää.

Suurin vaikuttava tekijä heat-map-näkymän laadulle katsotaan olevan pistepilvien eriävät katvealueet pinnoissa (ks. luku ”4.2 Heat-map-tarkastelu referenssipilven nollapisteestä”). Näin ollen se, millä nollapisteiden etäisyyden lukuarvolla referenssipilven nollapisteestä tarkastelu tulee tarpeelliseksi riippuu keilattavasta kohteesta ja sen ympäristöstä (ks. luku ”4.1 Geometrinen riippuvuus kojeaseman sijainnin ja katveen sijoittumisessa kohteen pinnalle”).

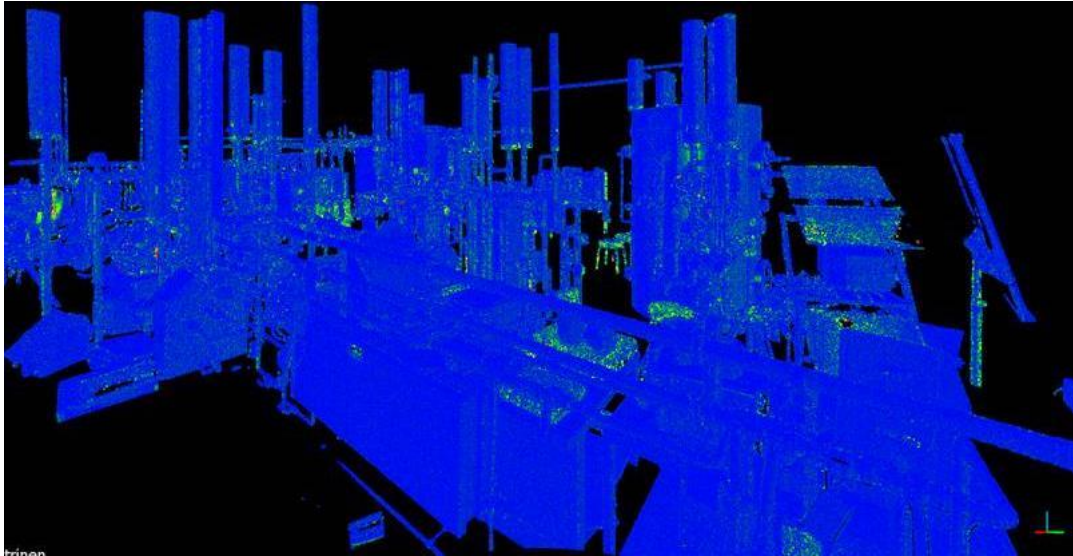
Tutkimus

Zoomaamattomat tarkastelunäkymät (kuvat a–i).



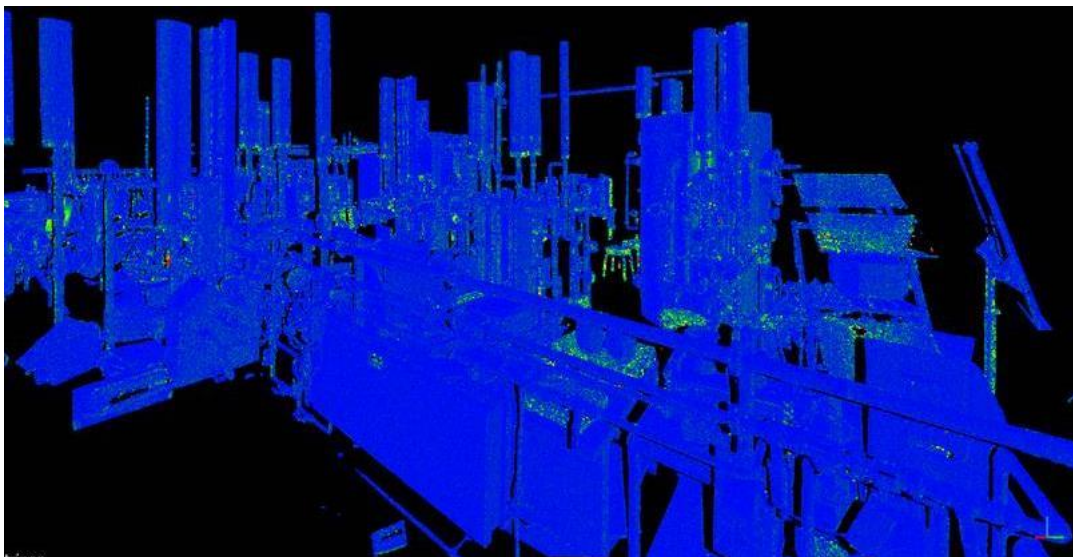
Kuva a. Nollapistenäkömä pilvi 1:stä RGB-väreillä.

RGB-näkömä näyttää tarkasteltavan alueen (kuva a).



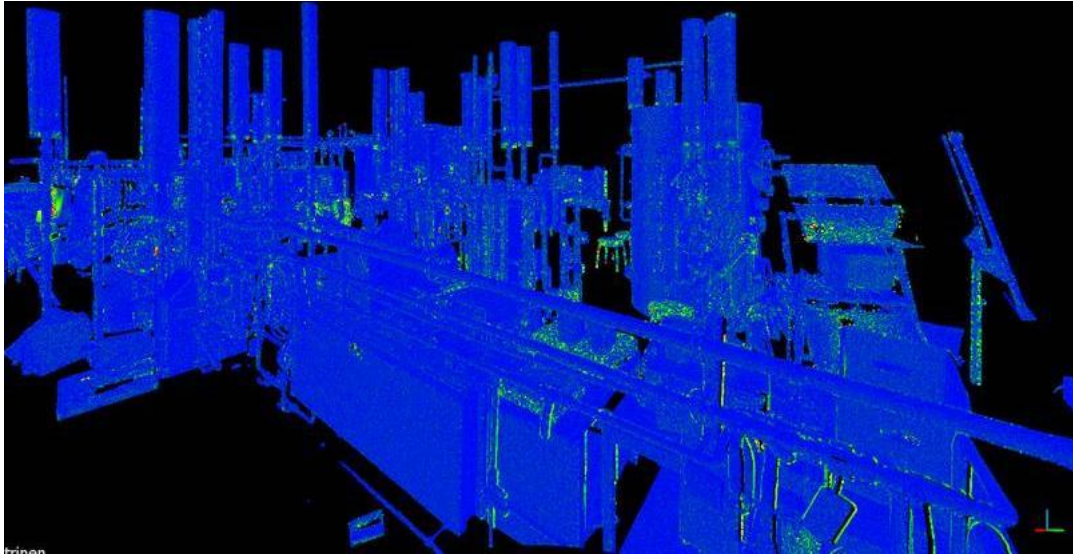
Kuva b. Pilvi 2. Näkymä nollapisteestä.

Näkymä pilvi 2:sta (kuva b).



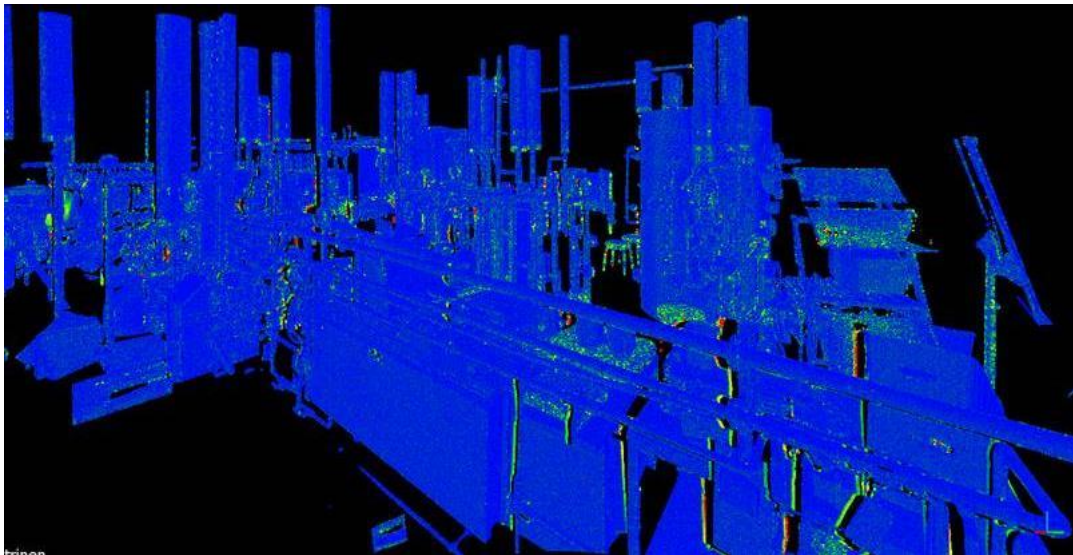
Kuva c. Pilvi 2. Näkymä nollapisteen vierestä.

Näkymä pilvi 2:sta (kuva c). Tarkastelut ovat väreiltään lähes identtisiä (kuvat b ja c).
Pistepilvien nollapisteiden etäisyyden ero oli 1 mm.



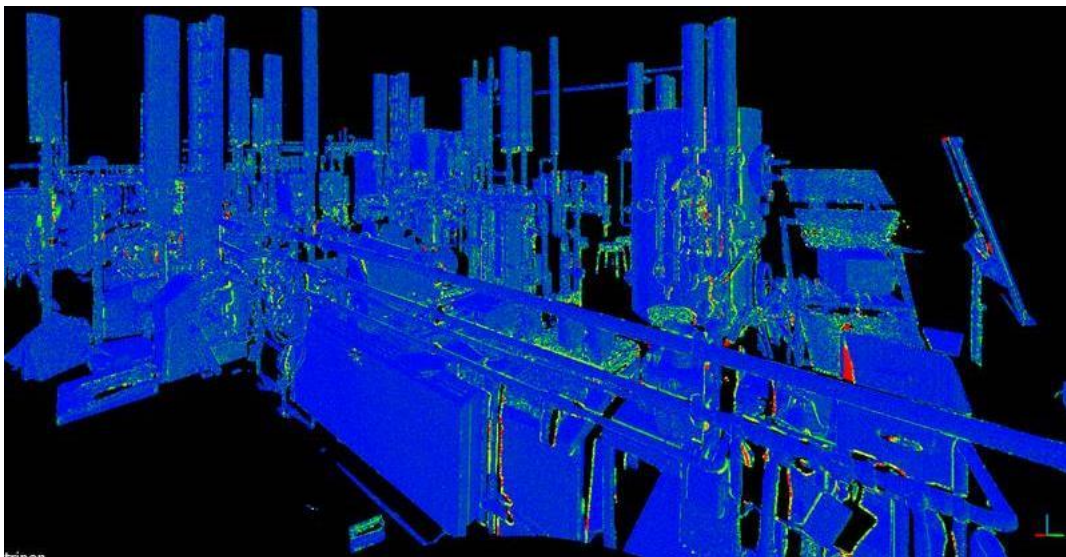
Kuva d. Pilvi 3. Näkymä nollapisteestä.

Näkymä pilvi 3:sta (kuva d).



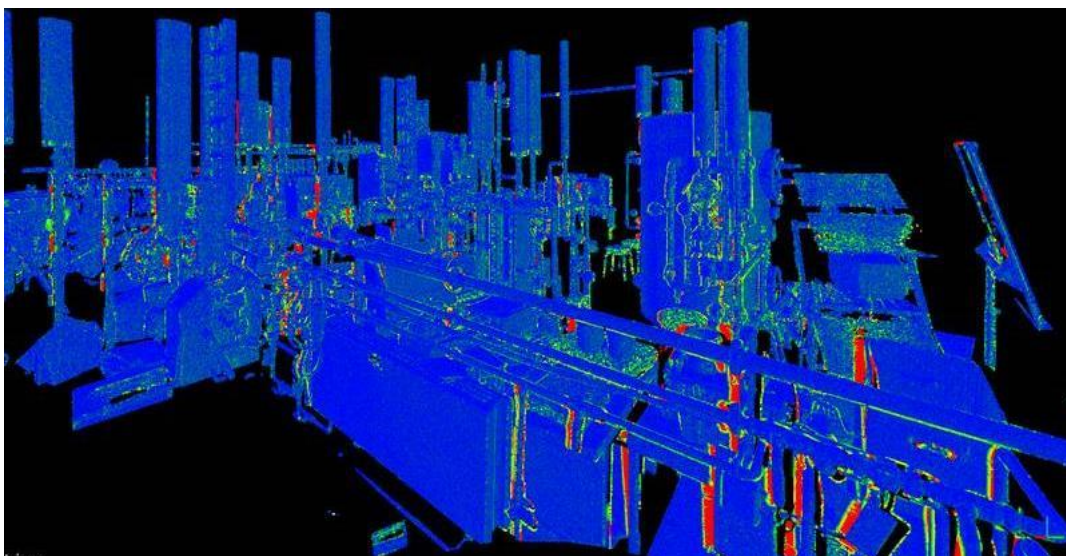
Kuva e. Pilvi 3. Näkymä nollapisteen vierestä.

Näkymä pilvi 3:sta (kuva e). Tarkastelut ovat väreiltään eriäviä (kuvat d ja e). Alemmassa kuvassa on näkyvissä punaista väriä. Pistepilvien nollapisteiden etäisyyden ero oli 18 mm.



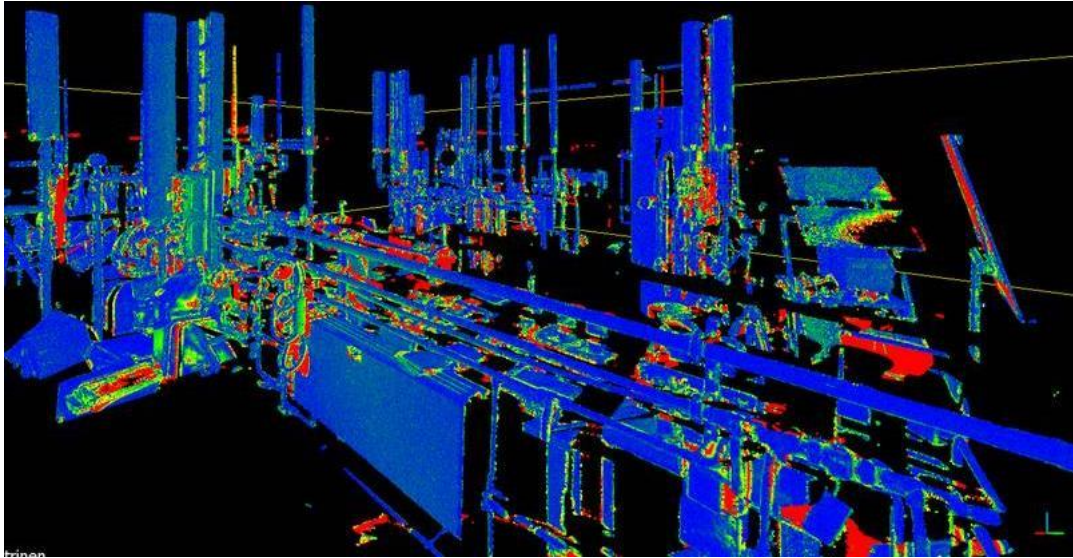
Kuva f. Pilvi 4. Näkymä nollapisteestä.

Näkymä pilvi 4:sta (kuva f).



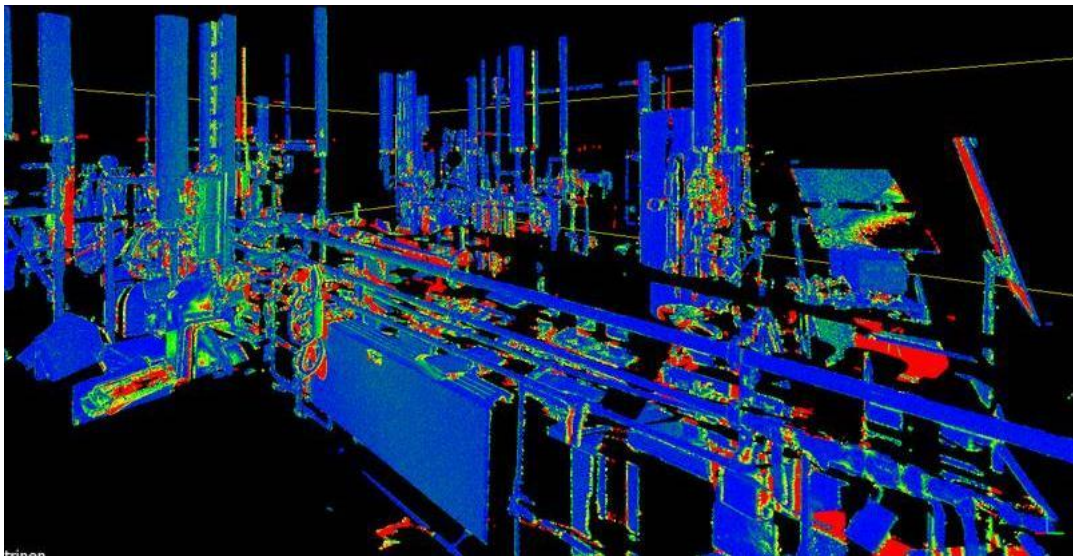
Kuva g. Pilvi 4. Näkymä nollapisteen vierestä.

Näkymä pilvi 4:sta (kuva g). Tarkastelut eroavat voimakkaasti väreiltään (kuvat f ja g). Siinä missä ylemmässä kuvassa on hieman punaista väriä, on alempi kuva käyttökelvoton. Pistepilvien nollapisteiden etäisyyden ero oli 126 mm.



Kuva h. Pilvi 5. Näkymä nollapisteestä.

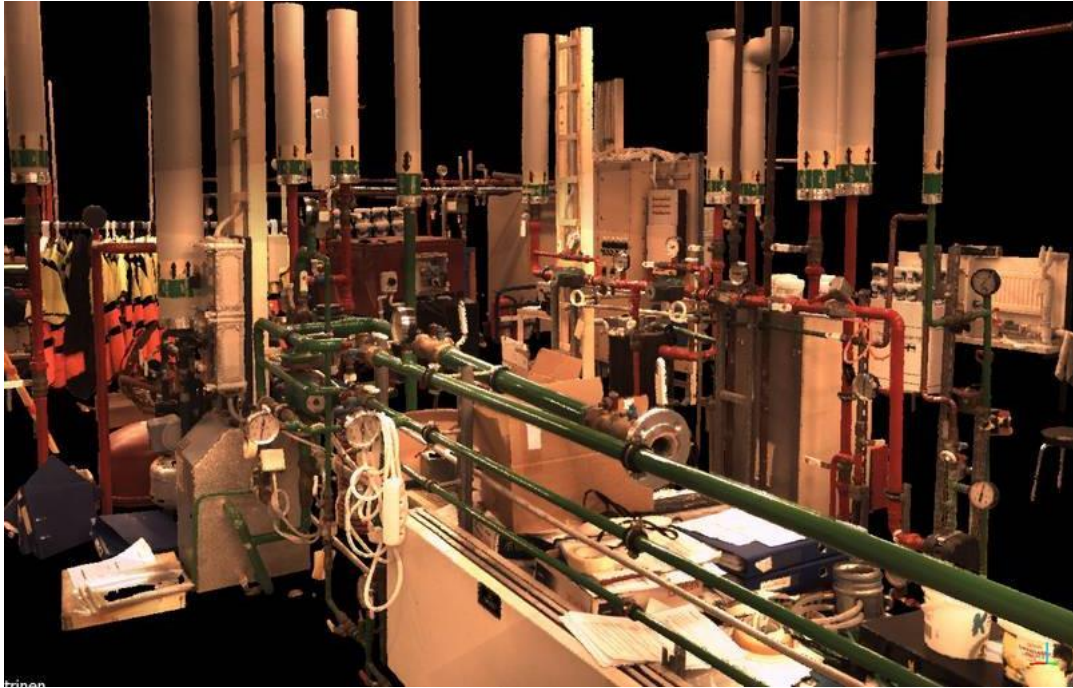
Näkymä pilvi 5:sta (kuva h).



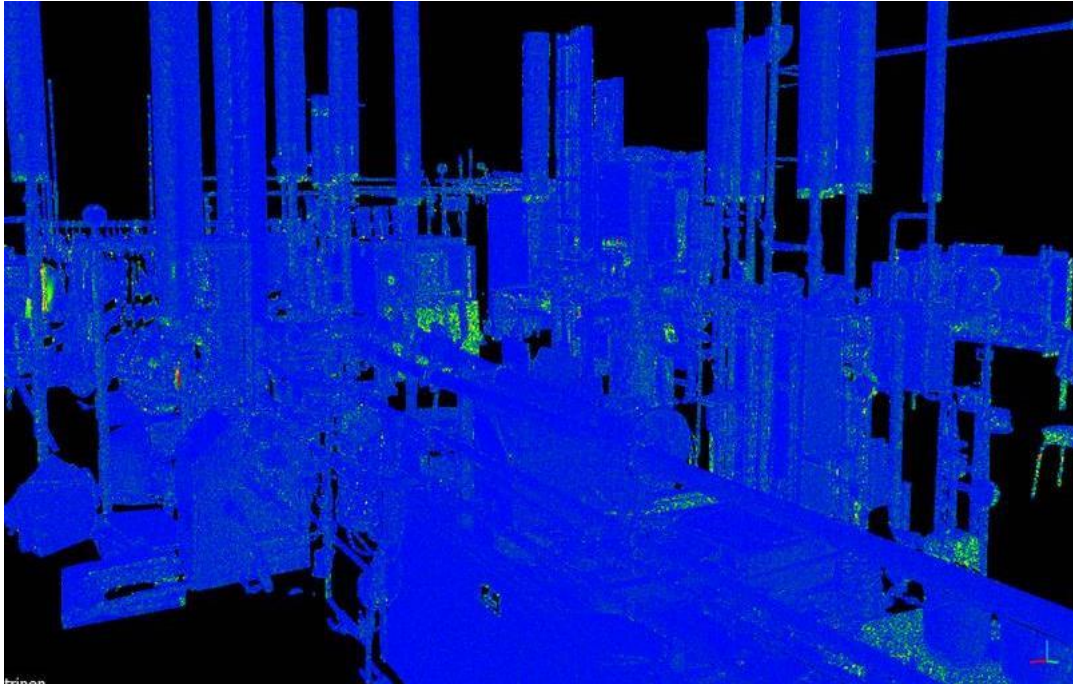
Kuva i. Pilvi 5. Näkymä nollapisteen vierestä.

Näkymä pilvi 5:sta (kuva i). Tarkastelut ovat käyttökelvottomia (kuvat h ja i). Pistepilvien nollapisteiden etäisyyden ero oli yli 2 m.

Zoomatut tarkastelunäkymät (kuvat j–k).

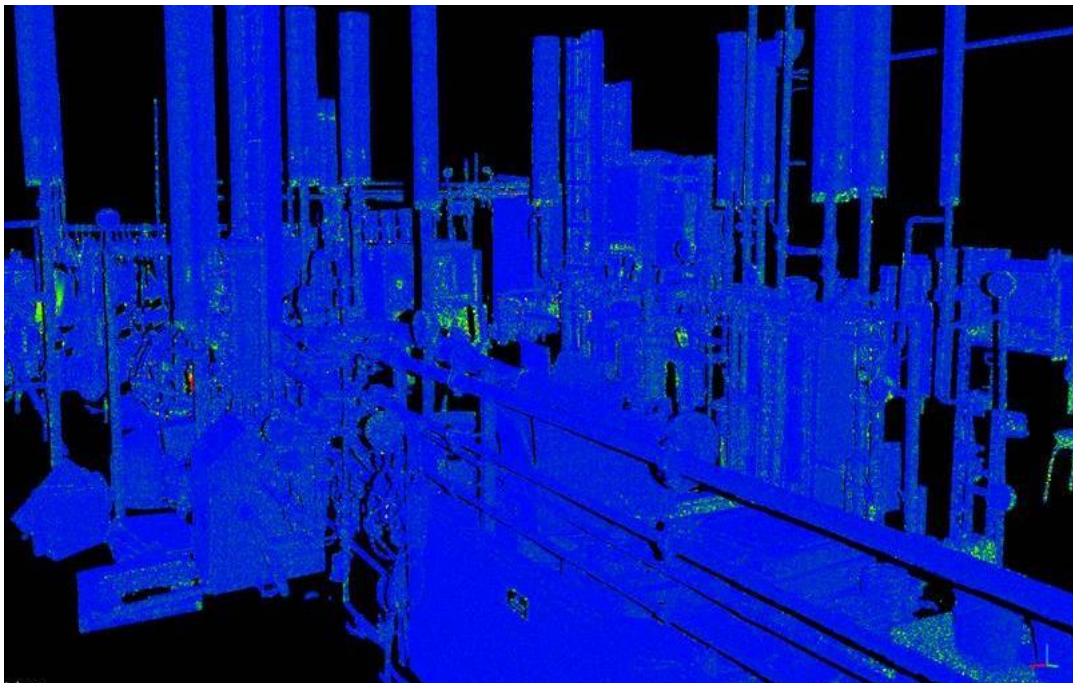


Kuva j. Zoomattu nollapistenäkymä pilvi 1:stä RGB-väreillä.

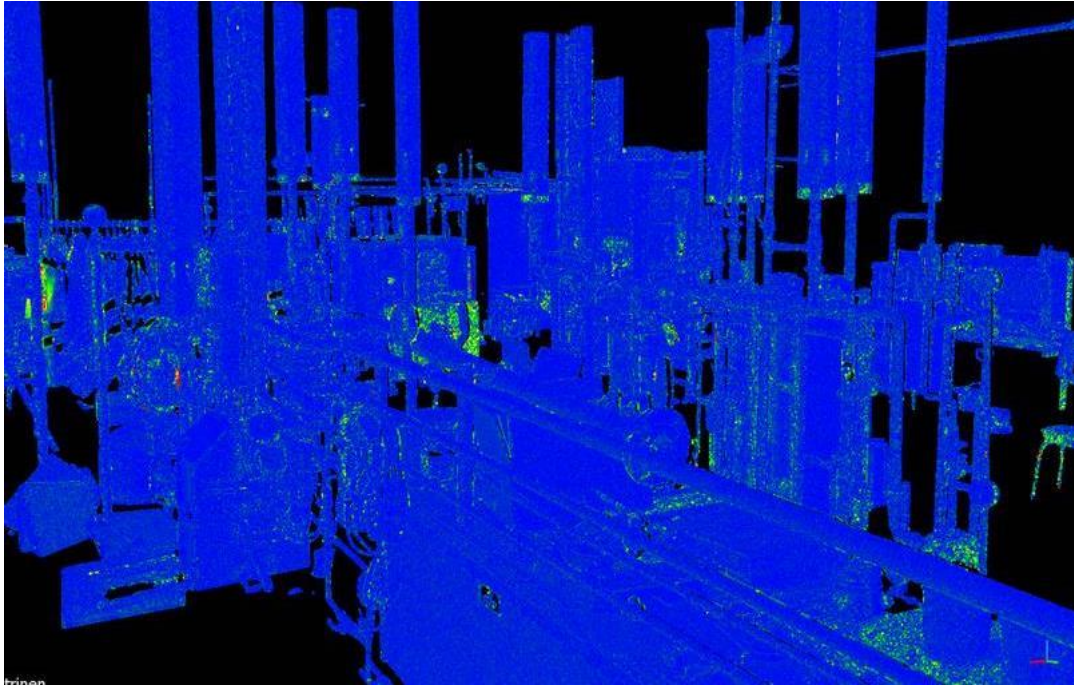


Kuva k. Pilvi 2. Zoomattu näkymä nollapisteestä.

Tarkastelut ovat väreiltään lähes identtisiä (kuvat k ja l).

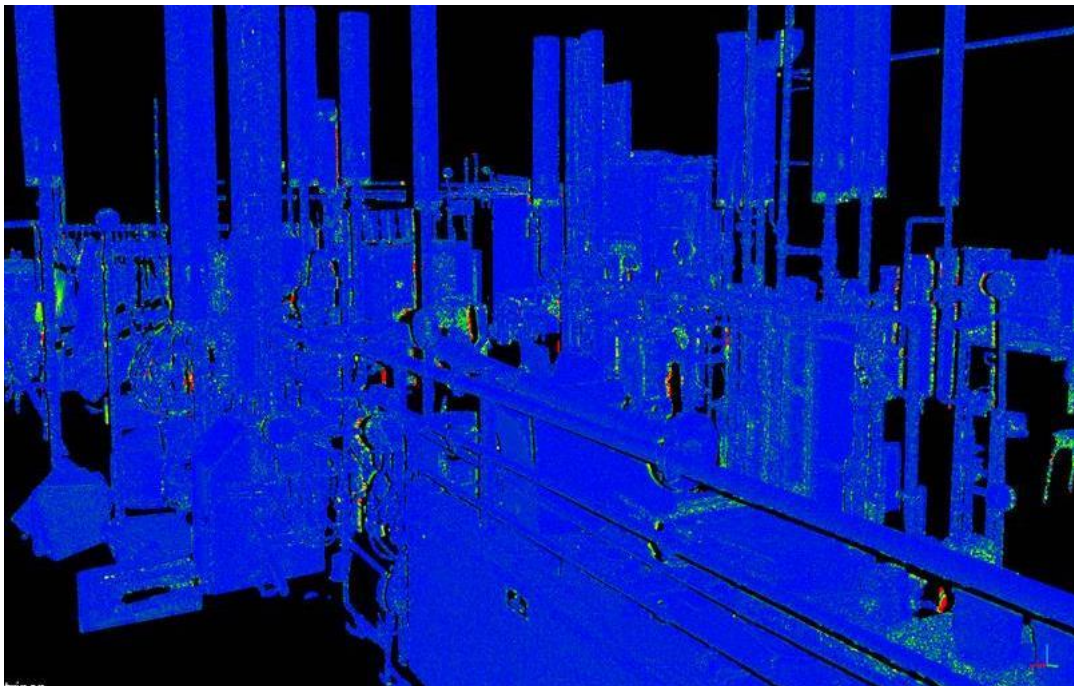


Kuva l. Pilvi 2. Zoomattu näkymä nollapisteen vierestä.

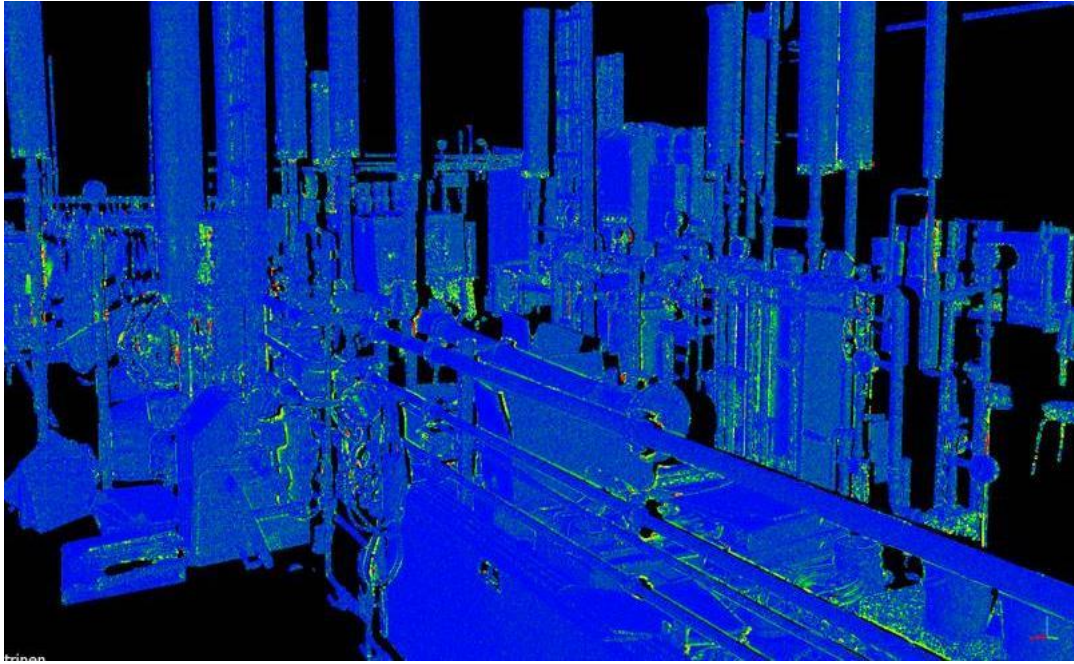


Kuva m. Pilvi 3. Zoomattu näkymä nollapistestä.

Tarkastelut ovat eriäviä (kuvat m ja n). Alemmassa kuvassa näkyvissä punaista väriä.

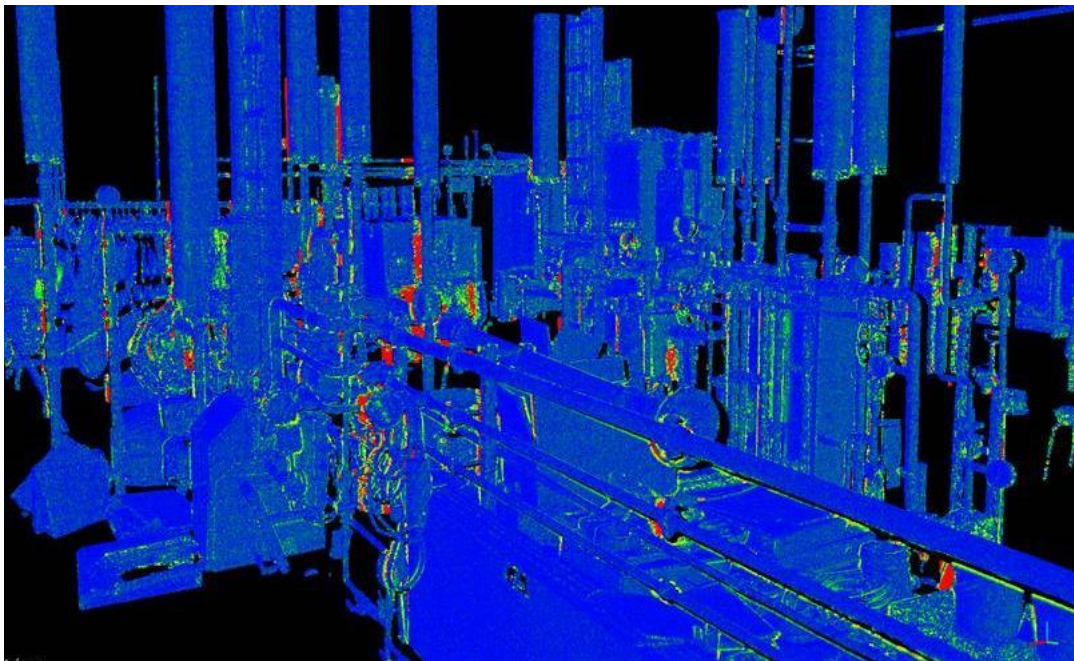


Kuva n. Pilvi 3. Zoomattu näkymä nollapisteen vierestä.



Kuva o. Pilvi 4. Zoomattu näkymä nollapisteestä.

Tarkastelut eroavat voimakkaasti väreiltään (kuvat o ja p). Siinä missä ylemmässä kuvassa on hieman punaista väriä, on alempi kuva käyttökeltvoton.



Kuva p. Pilvi 4. Zoomattu näkymä nollapisteen vierestä.

Pilvien nollapisteiden välisen etäisyyden vaikutus heat-map-näkymän laatuun

Tarkastelussa tutkittiin, miten heat-map-näkymän laatu muuttuu, kun pilvien nollapisteidensä välistä etäisyyttä muutetaan. Tämä tehtiin vertailemalla keskenään pilvien välisestä etäisyyden vertailusta tehtyjä heat-map-näkymiä, silloin kun tilassa ei ollut tapahtunut muunnosta. Väri ilmaisee etäisyseroa pistepilvien välillä. Näin ollen kaikki punainen väri näkymissä on virheellistä havaintoa muuntumista.

Virheelliset havainnot muuntumista voivat johtua esimerkiksi eroissa siinä, miten pistepilvet kattavat kohteen pintoja tai pistepilven keilauksen epätarkkuudesta.

Pilvistä 2–5 tuotettiin heat-mapit pilvi 1:n suhteen.

Koska pilven 1 ja pilvien 2–5 keilausten välissä ei tuotettu muita muuntumia kuin takymetrin kääntyminen, tarkastelu yksinkertaistuu, sillä kaikki punainen väri kuvissa on virheellistä havaintoa (paitsi takymetrissa). Mitä enemmän punaista väriä näkymässä on, sitä huonolaatuisempi se on. Kaikkien heat-mapien värikylläisyysarvot oli asetettu arvoon 10 mm. Käytetyt näkymät ovat sijainniltaan ja suunnaltaan samat eri pilvien kesken.

Tarkastelu tehtiin kahdella kuvasarjalla. Kuvat ovat pilvistä 2–5. Kustakin pilvestä on ylänäkö (kuvat a–e) ja isometrisestä näkö (kuvat f–j).

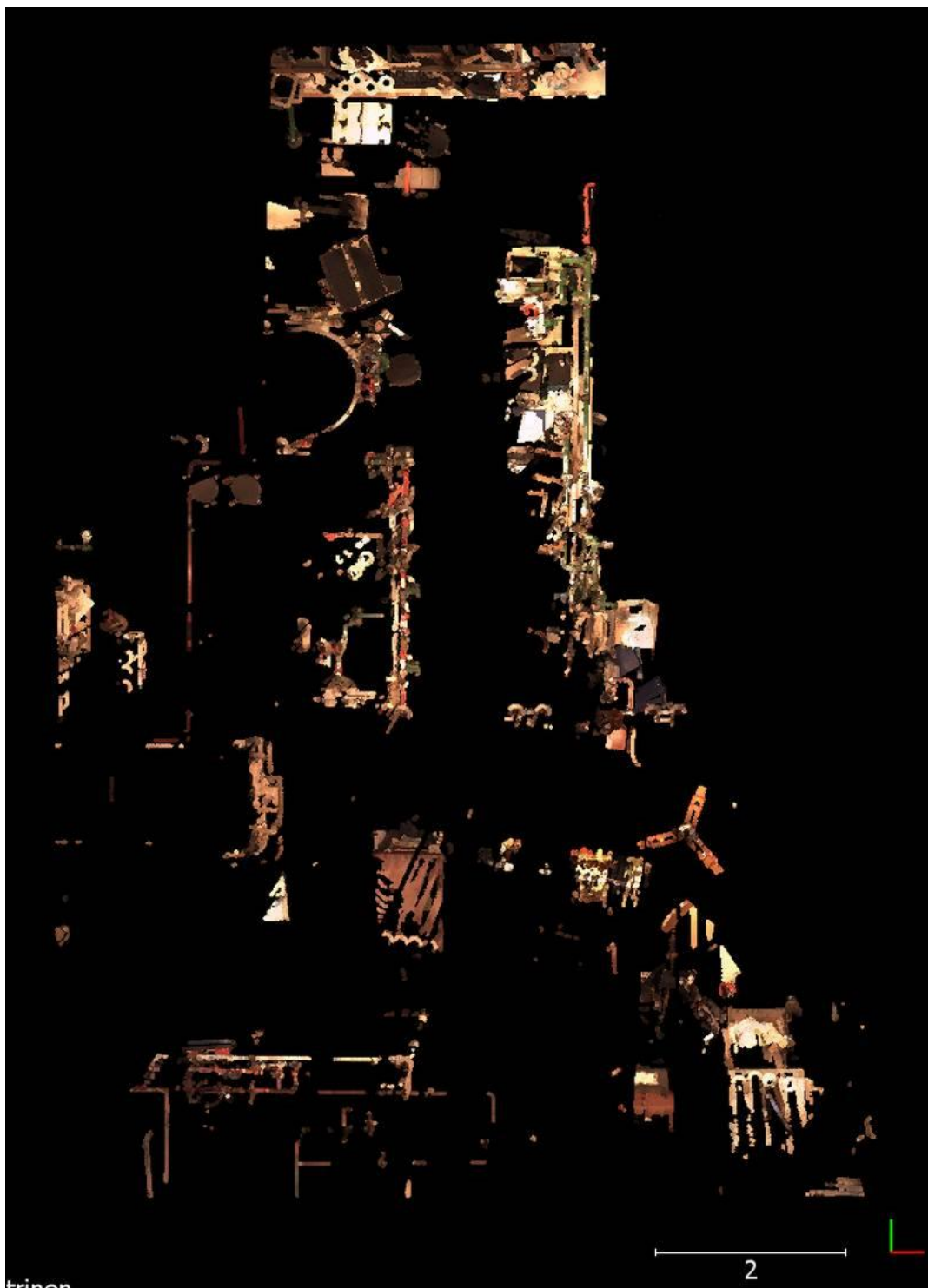
Tulokset

Punaisen värin määrä näkymässä kasvaa voimakkaasti tarkastelun liikkuessa (pilvien numerojärjestyksessä) pilvi 2:stä pilvi 5:en. Tämä tapahtui yhtäläisesti molemmissa kuvasarjoissa.

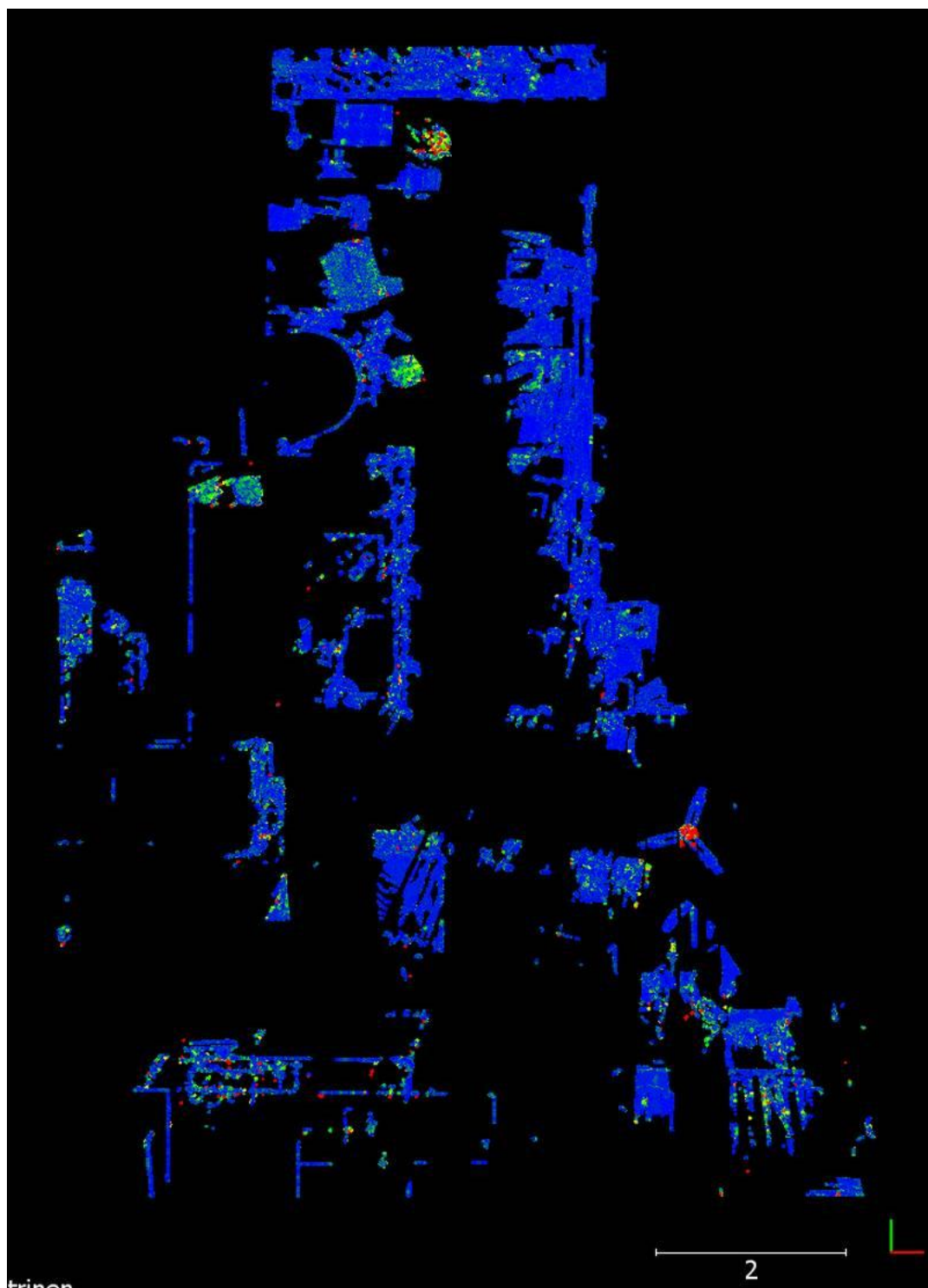
Päätelmät

Päätelmä tutkimuksesta on se, että pilvistä tuotetun heat-map-näkymän laatu on sitä huonompi, mitä suurempi on pilvien nollapisteiden välinen etäisyys.

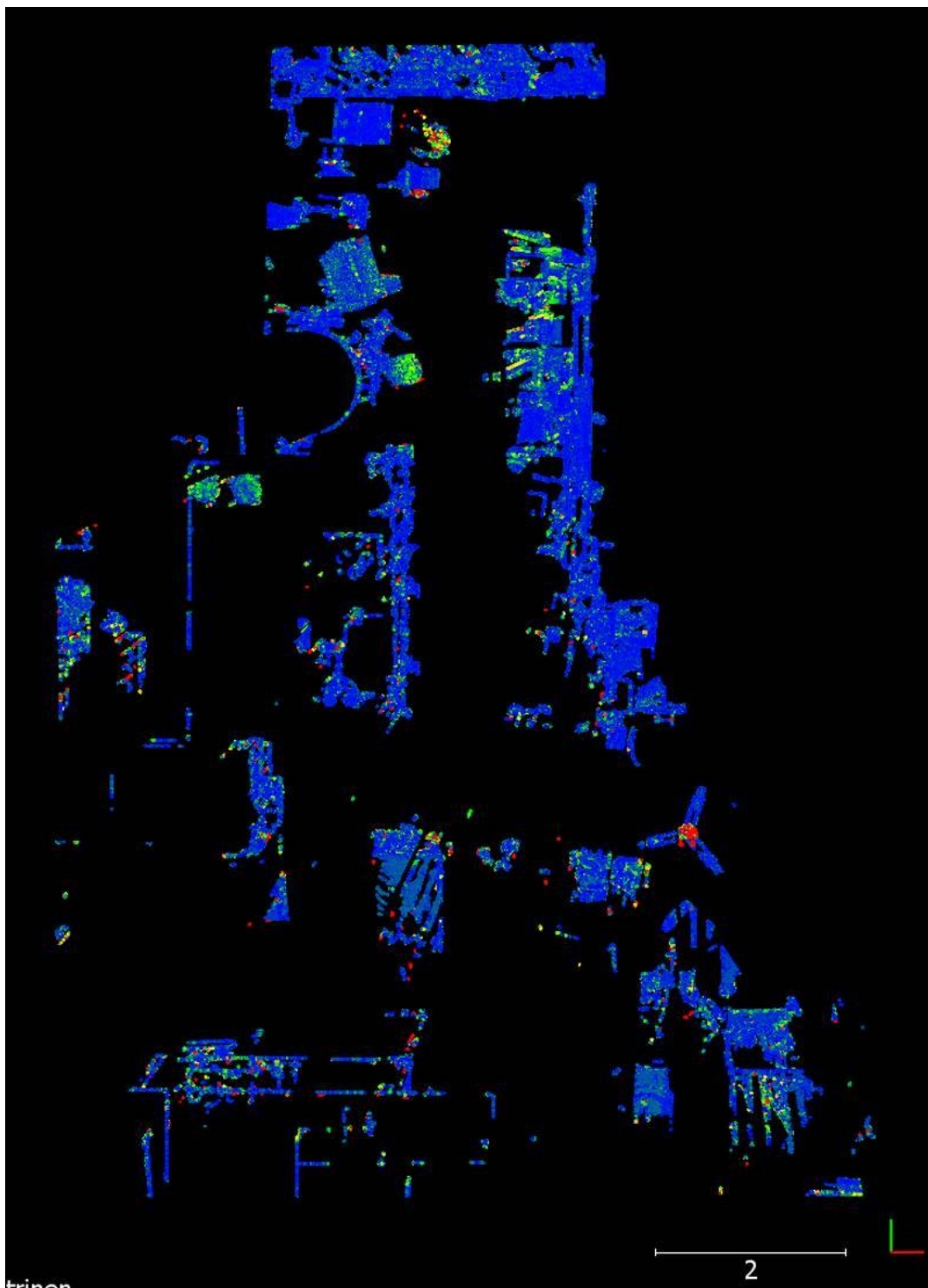
Kuvat ylänäköstä



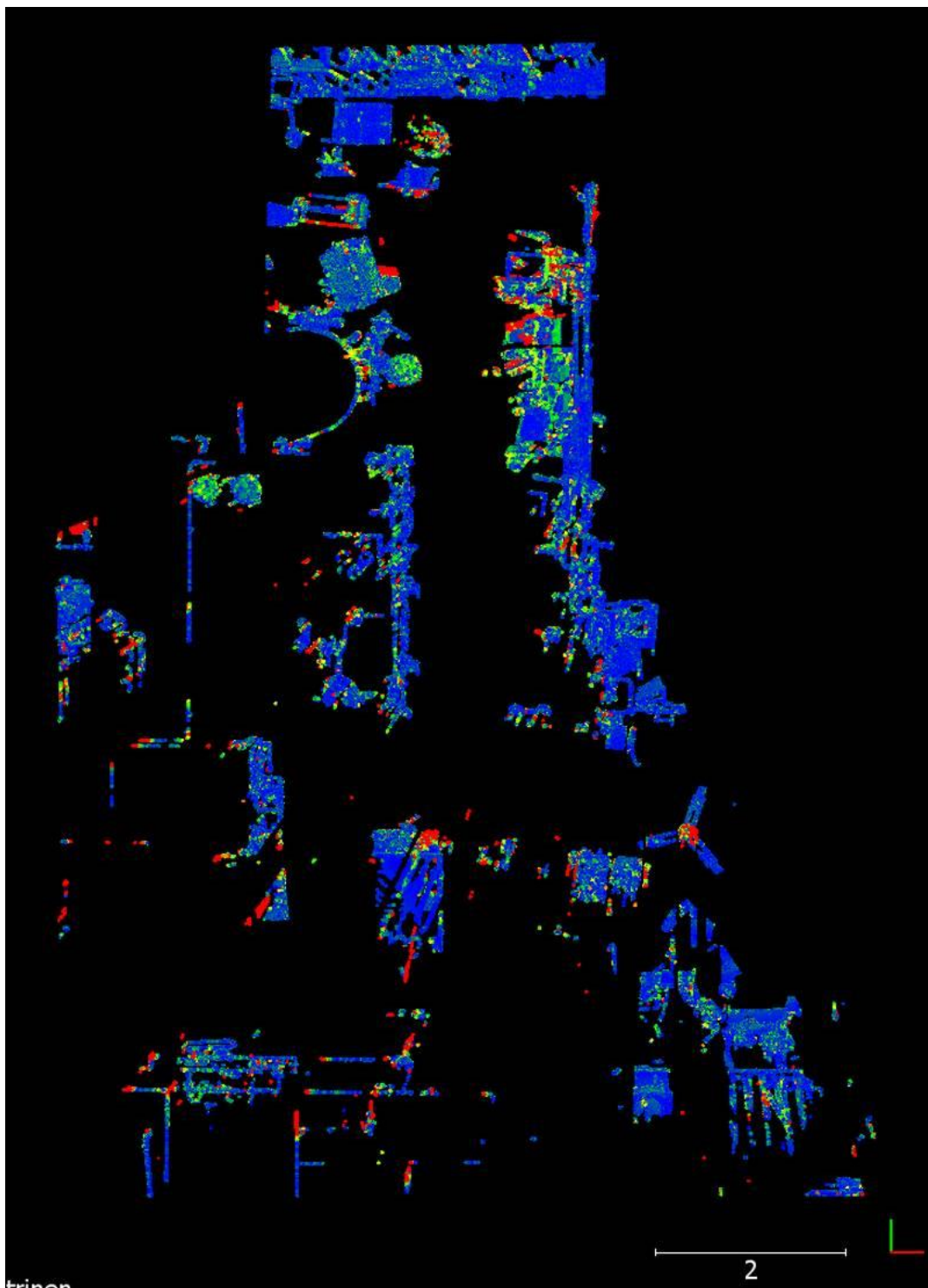
Kuva a. Pilvi 1 RGB-näkymä.



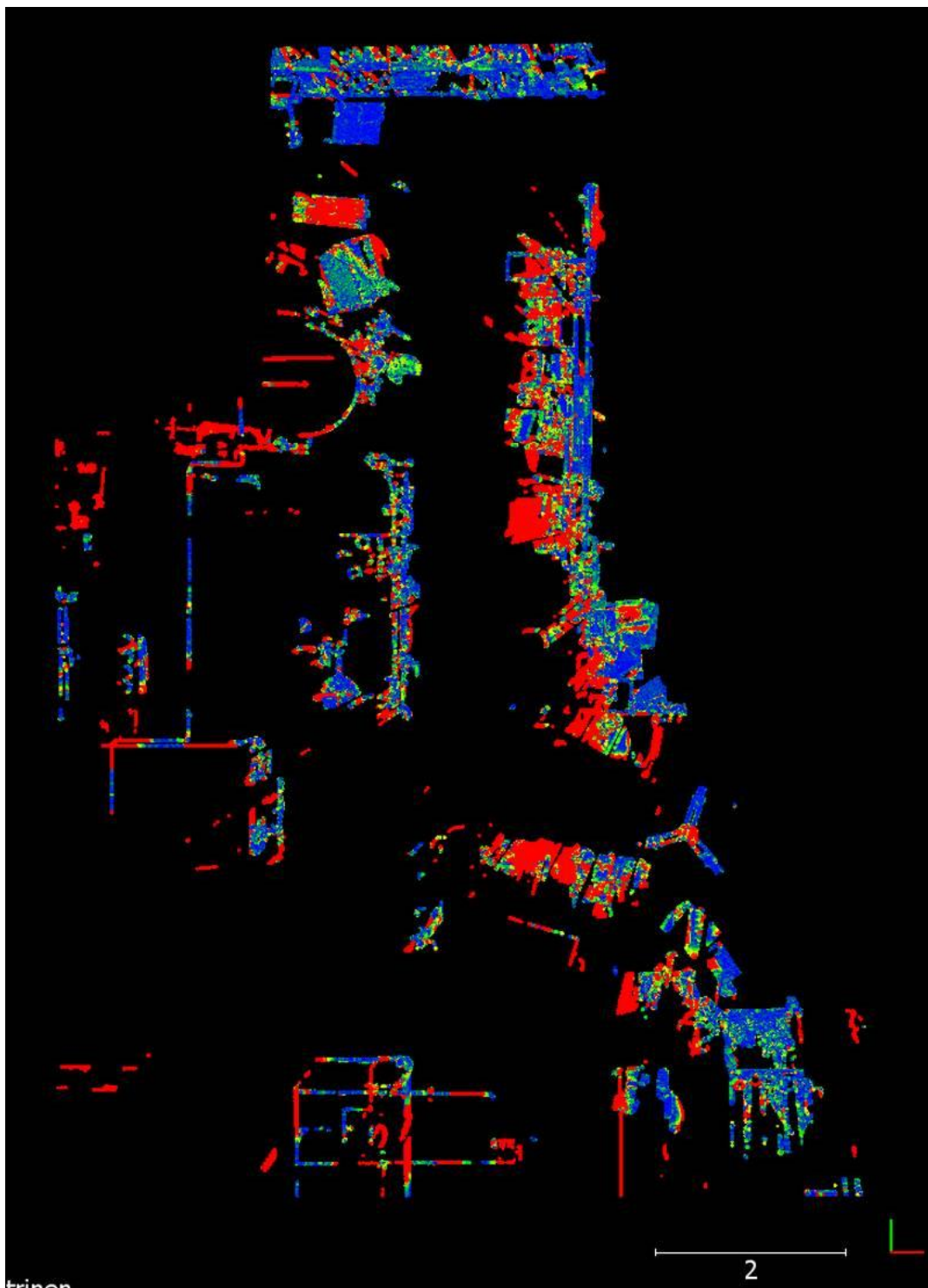
Kuva b. Pilvi 2.



Kuva c. Pilvi 3.



Kuva d. Pilvi 4.



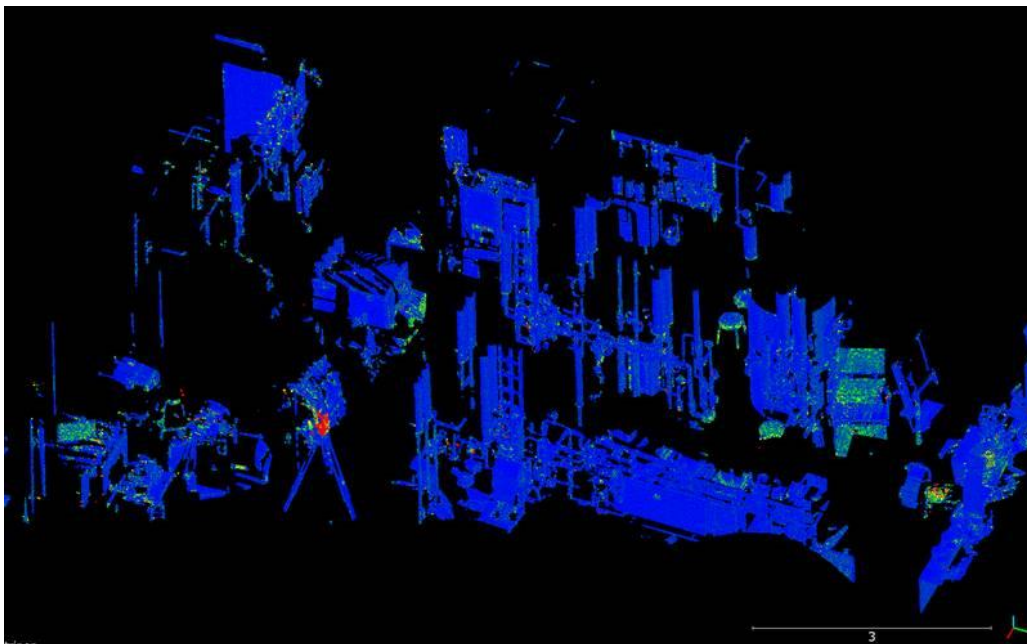
Kuva e. Pilvi 5.

Kuvat isometrisestä näkymästä

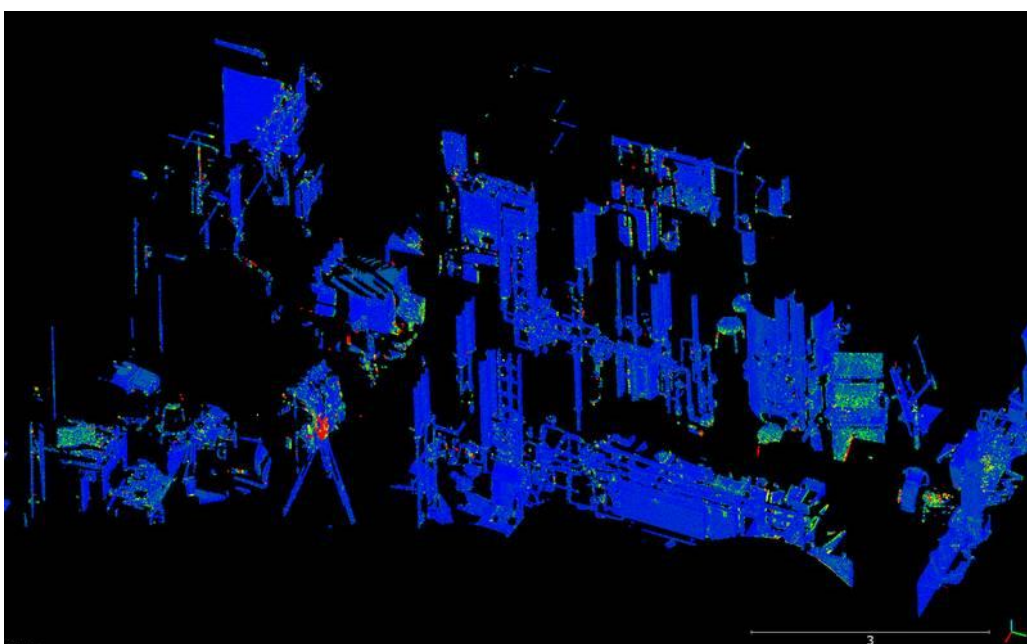


Kuva f. Pilvi 1 RGB-näkymä.

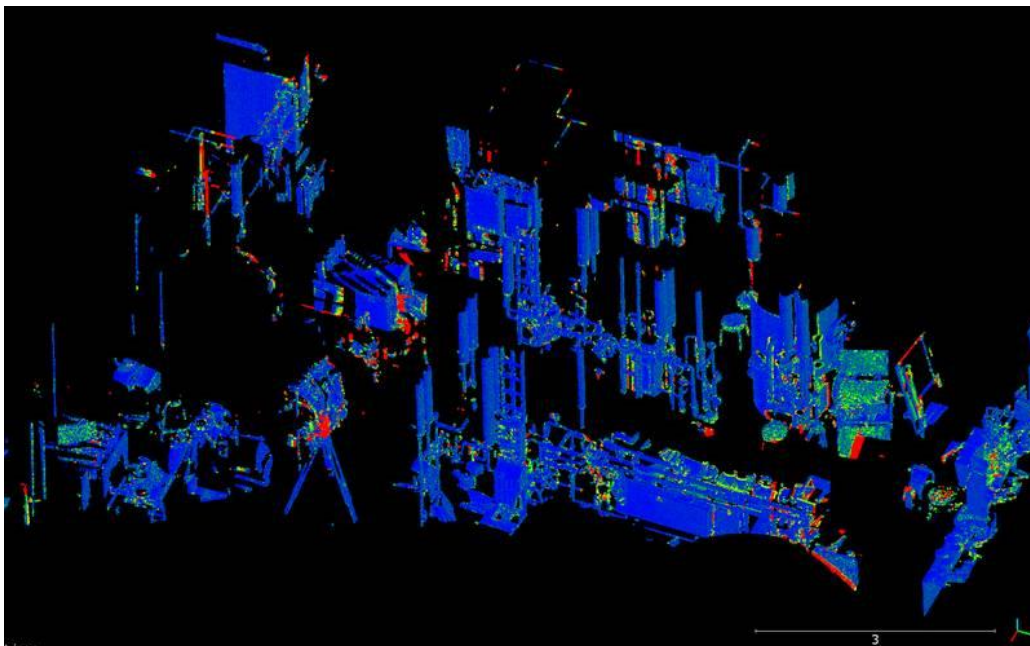
Pilvi 1 RGB-näkymä (kuva f).



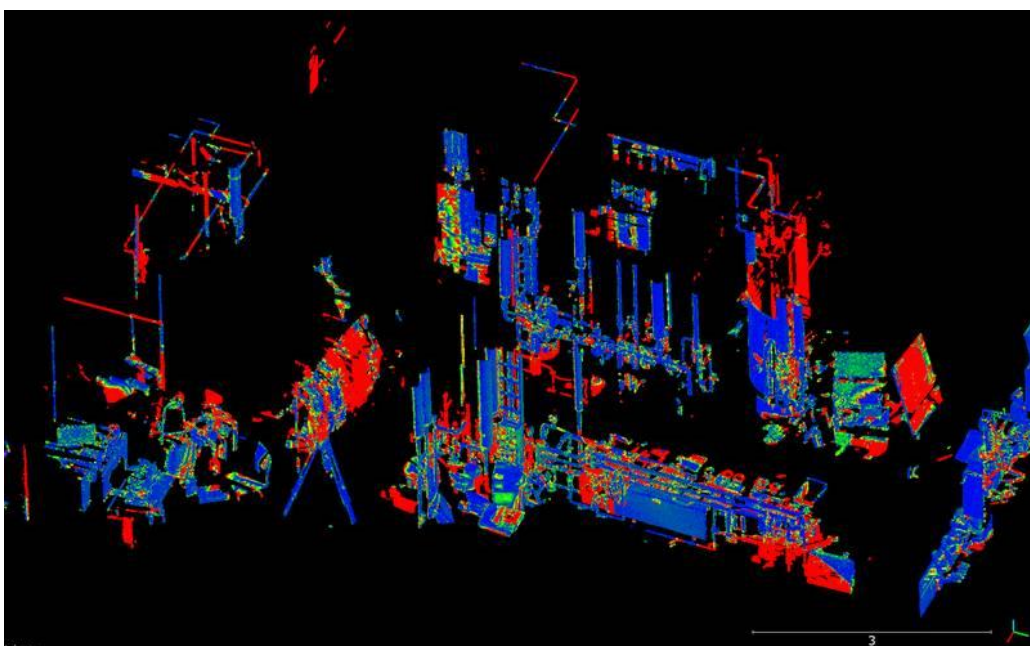
Kuva g. Pilvi 2.



Kuva h. Pilvi 3.



Kuva i. Pilvi 4.

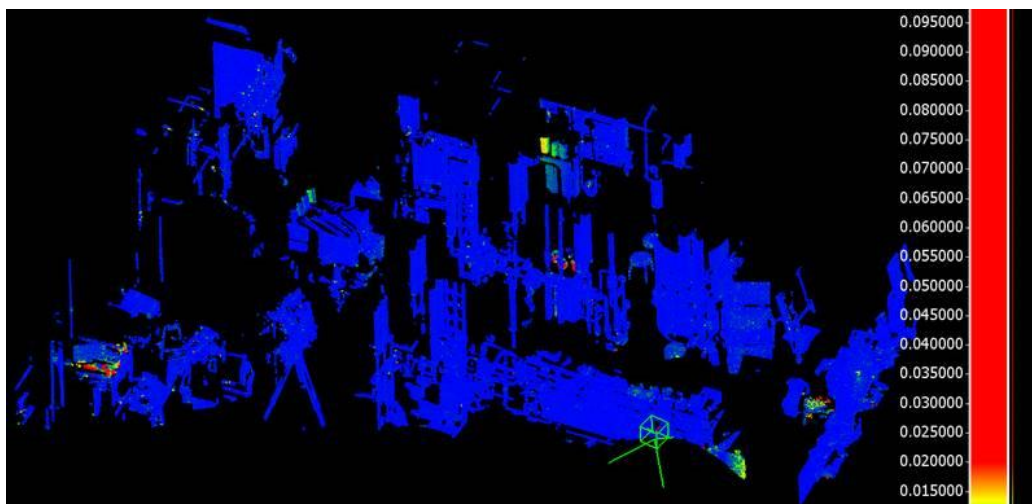


Kuva j. Pilvi 5.

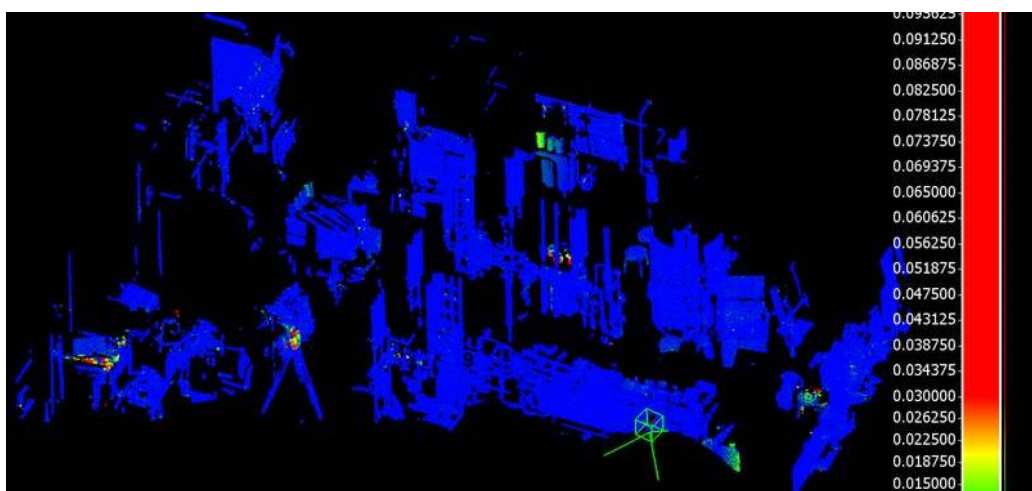
Esimerkkikuvasarjoja taulukosta 6

Esimerkkejä heat-map-näkymien visuaalisesta tarkastelusta. Annetut arvot ovat värikylläisyysarvoja.

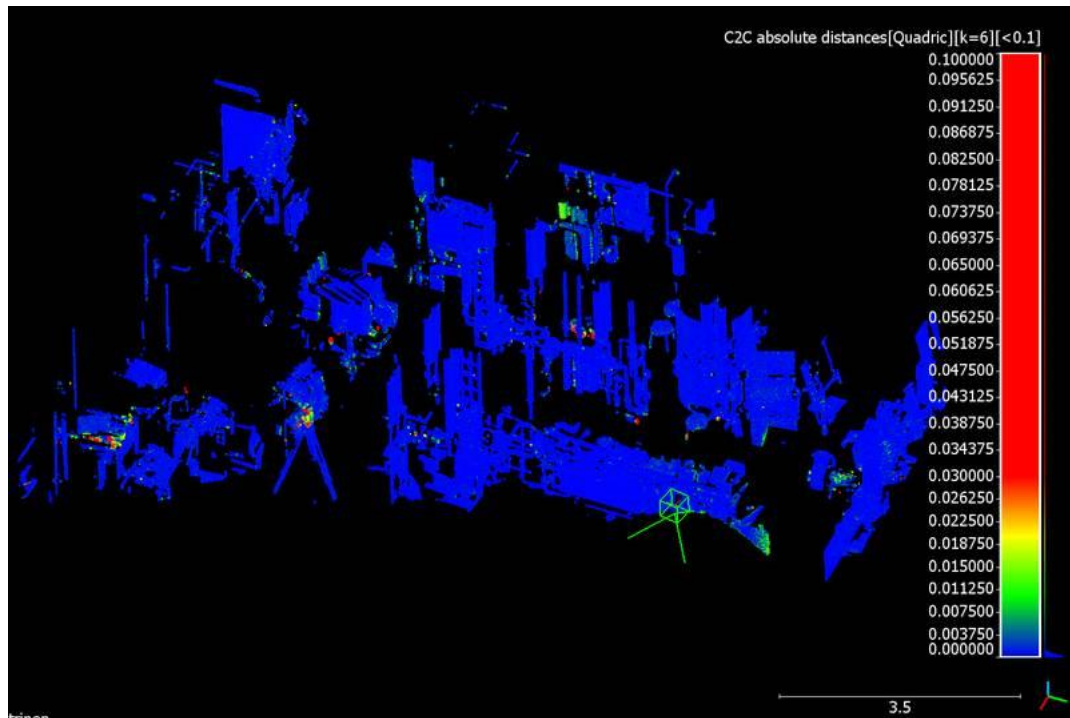
Isometrinen näkymä (kuvat a-e)



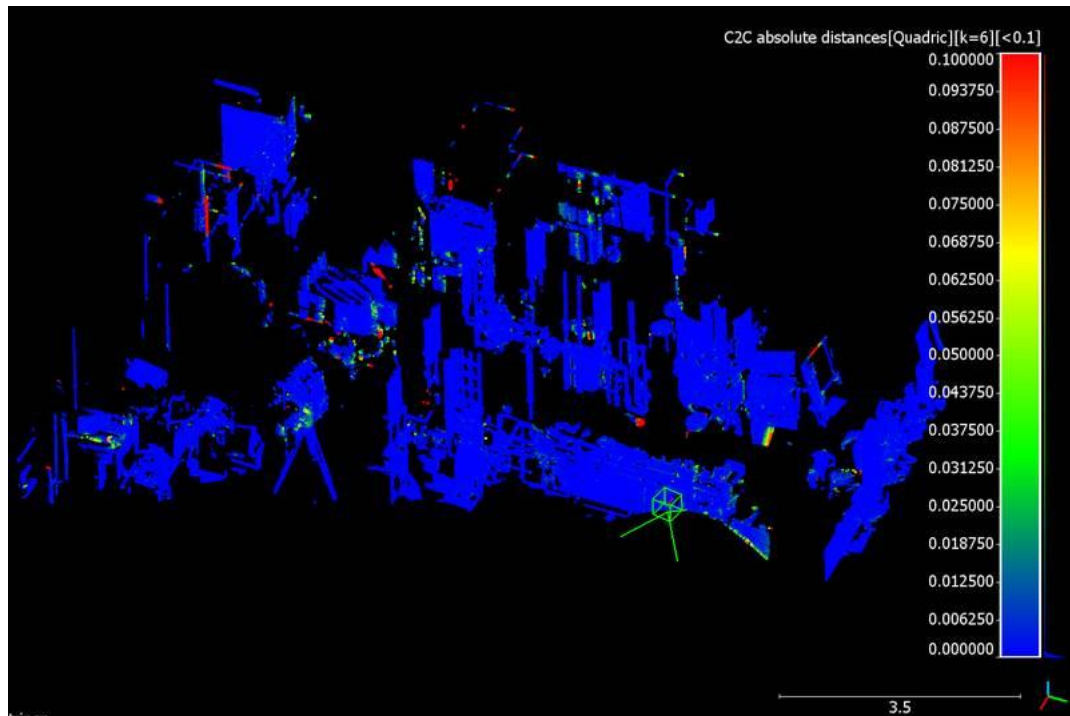
Kuva a. Pilvi 1. Arvo 20.



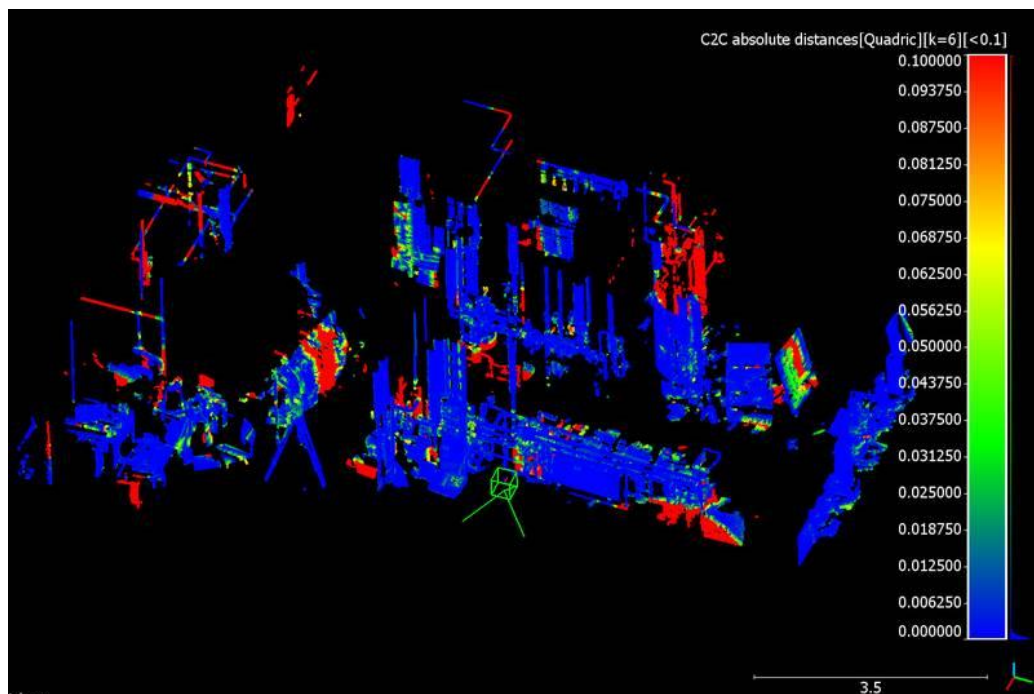
Kuva b. Pilvi 2. Arvo 30.



Kuva c. Pilvi 3. Arvo 30e. Kuvassa on liikaa virheellisesti punaisia kohteita, jotta sitä voisi käyttää sellaisenaan muuntumien toteamiseen. Se vaatii tarkastelua RGB-näkymän kanssa ollakseen käyttökelpoinen.

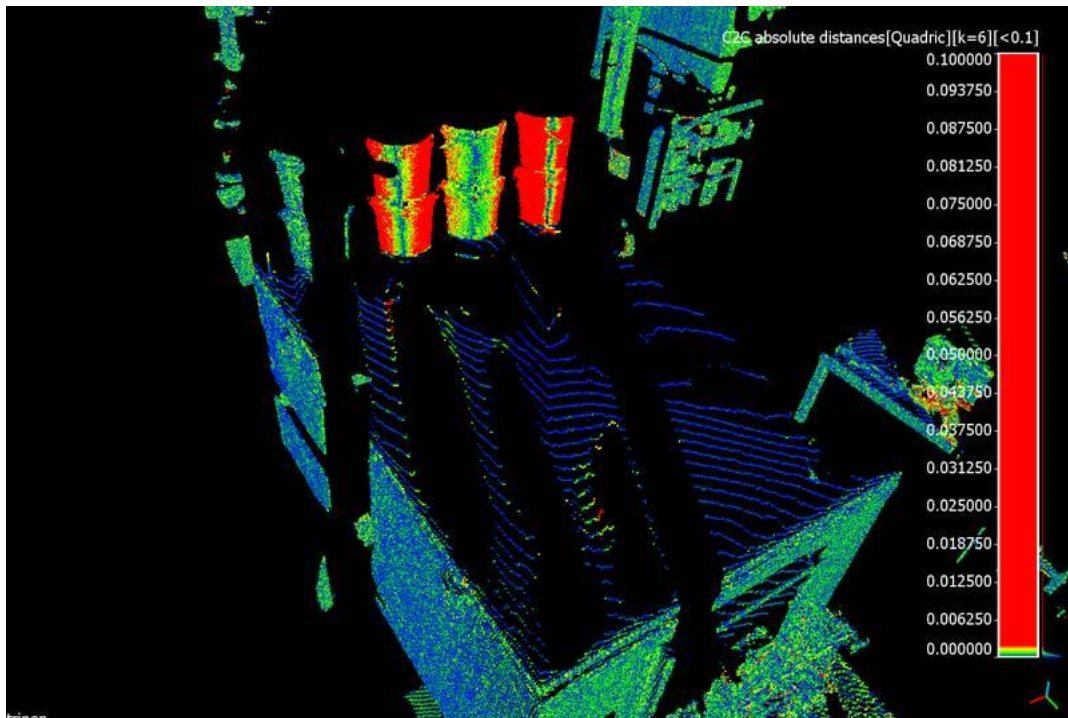


Kuva d. Pilvi 4. Arvo 100e. Kuvassa on liikaa virheellisesti punaisia kohteita, jotta sitä voisi käyttää sellaisenaan muuntumien toteamiseen. Se vaatii tarkastelua RGB-näkymän kanssa ollakseen käyttökelpoinen.

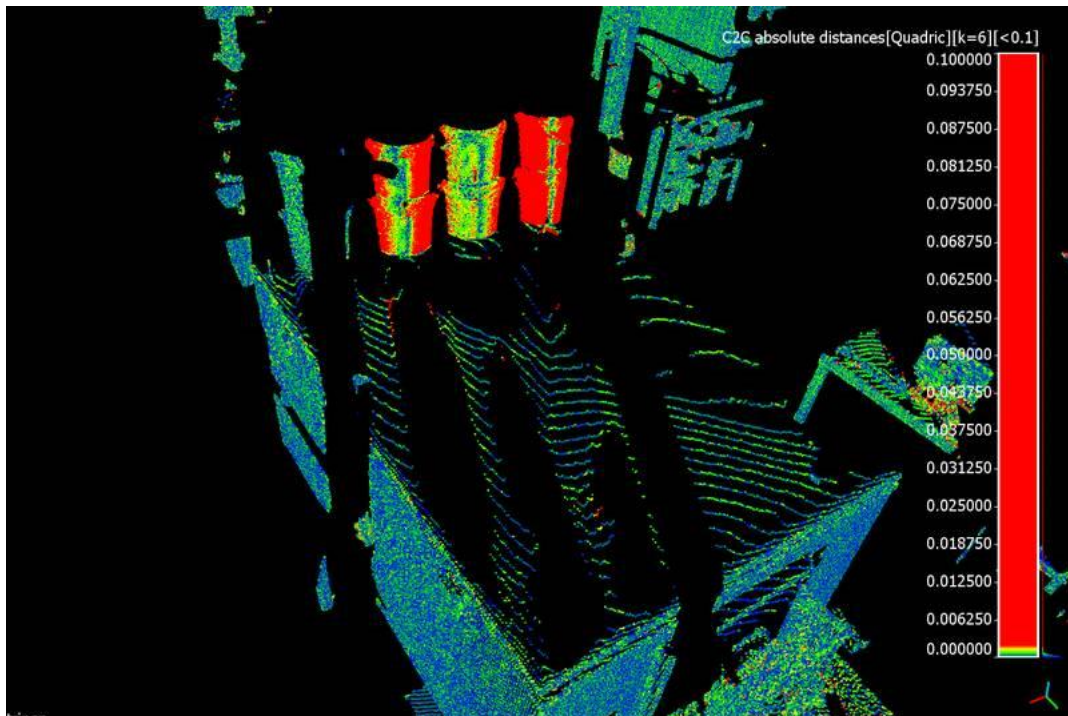


Kuva e. Pilvi 5. Arvo x. Kuva on käyttökeltoton.

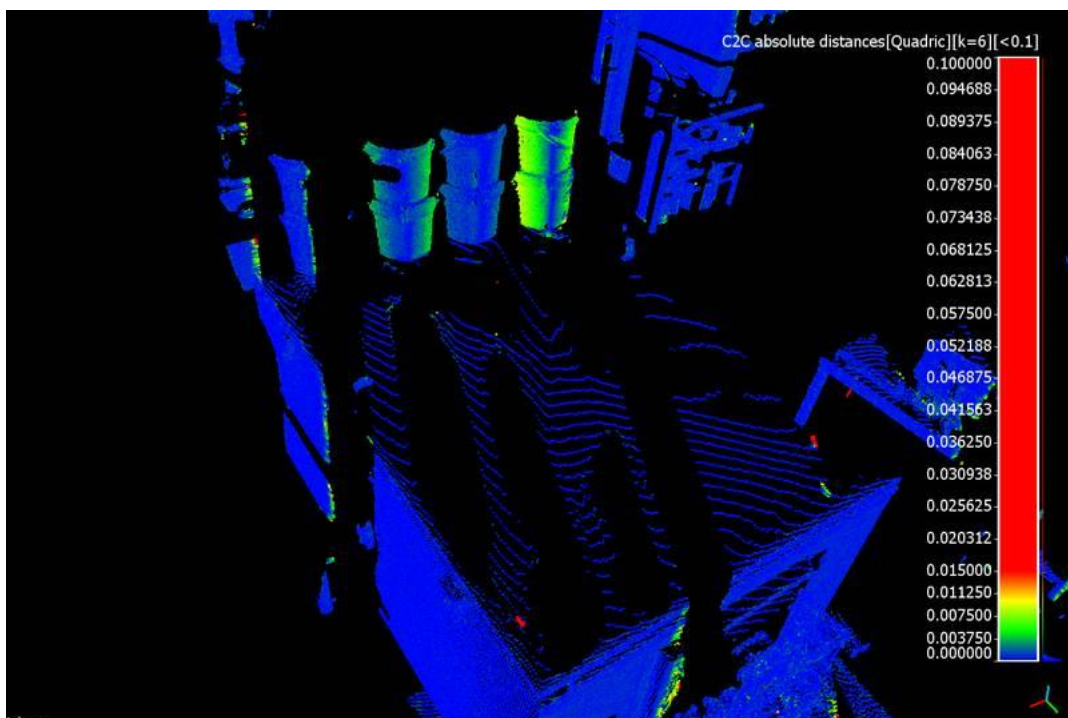
Ryhmä 2:n lähinäkymä (kuvat f–j)



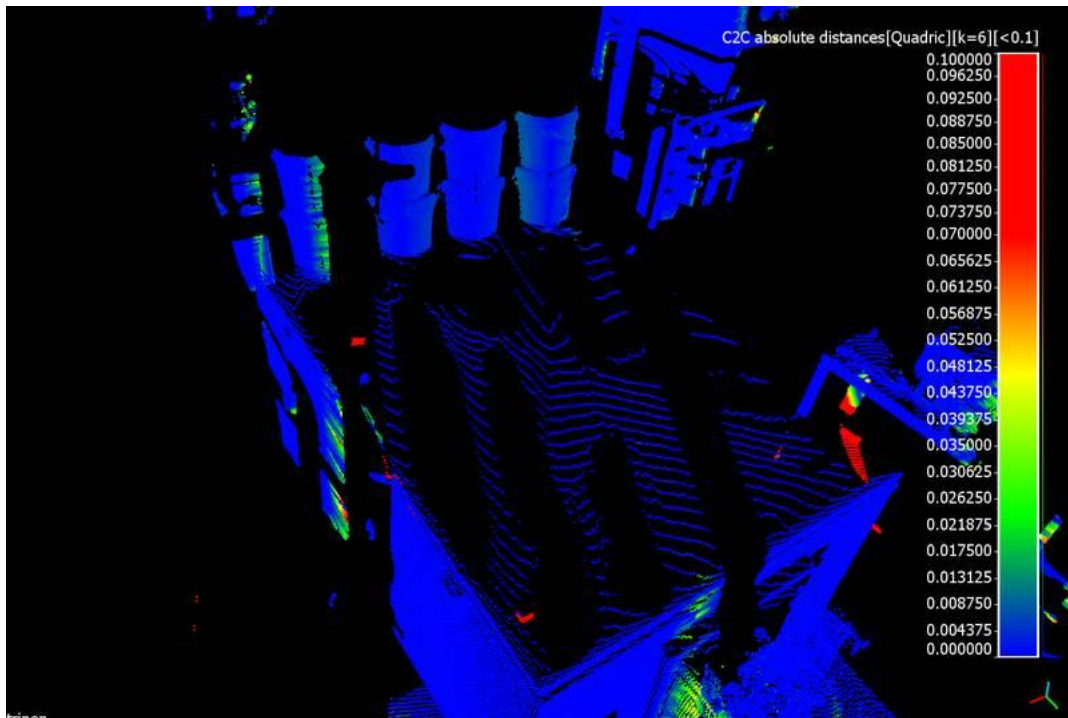
Kuva f. Pilvi 1. Arvo 2.



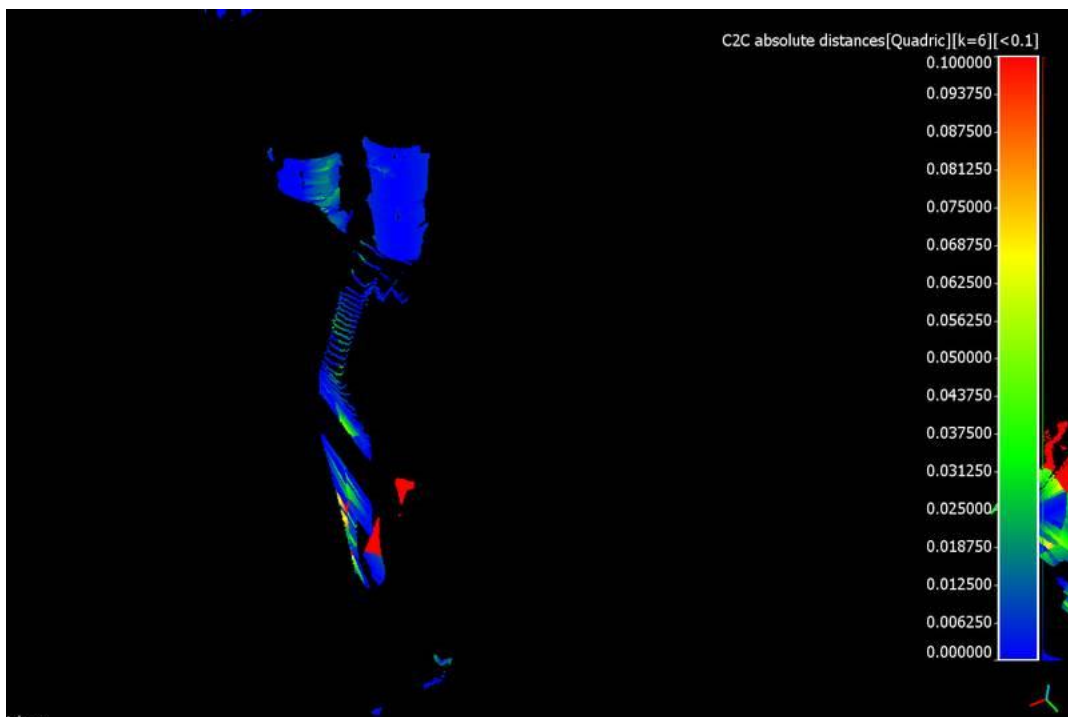
Kuva g. Pilvi 2. Arvo 2.



Kuva h. Pilvi 3. Arvo 15. Lisääntyvät virheelliset värit nostavat värikylläisyyssarvoa.

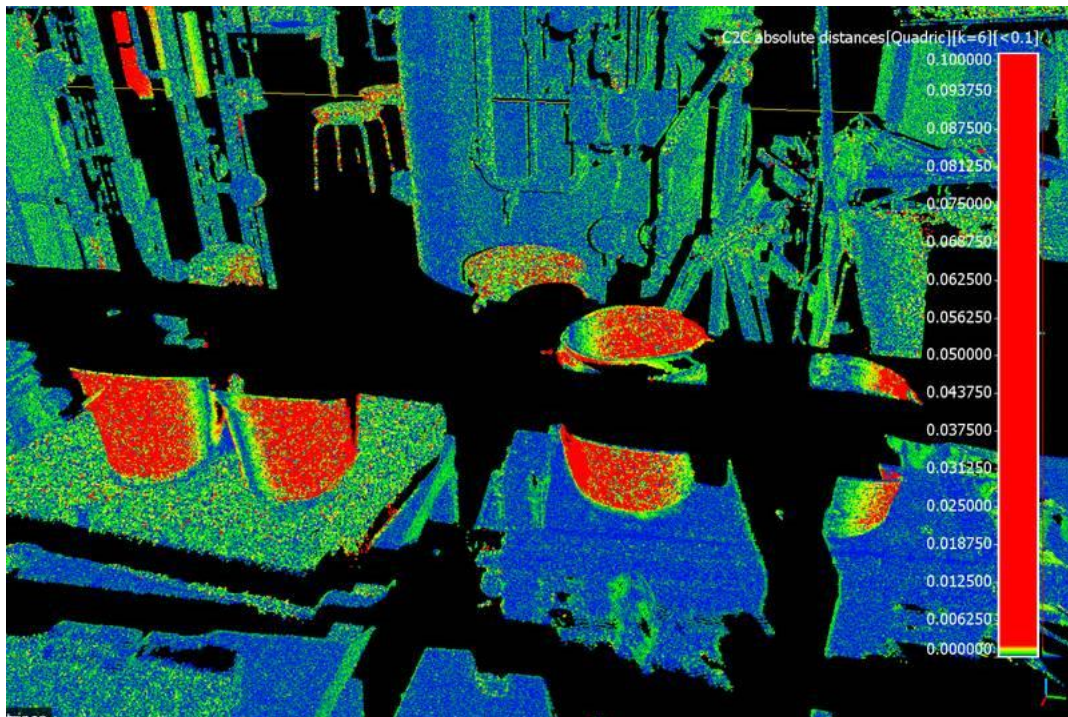


Kuva i. Pilvi 4. Arvo 70. Lisääntyvät virheellisesti muutoksesta kertovat värit nostavat värikyläisyysarvoa.

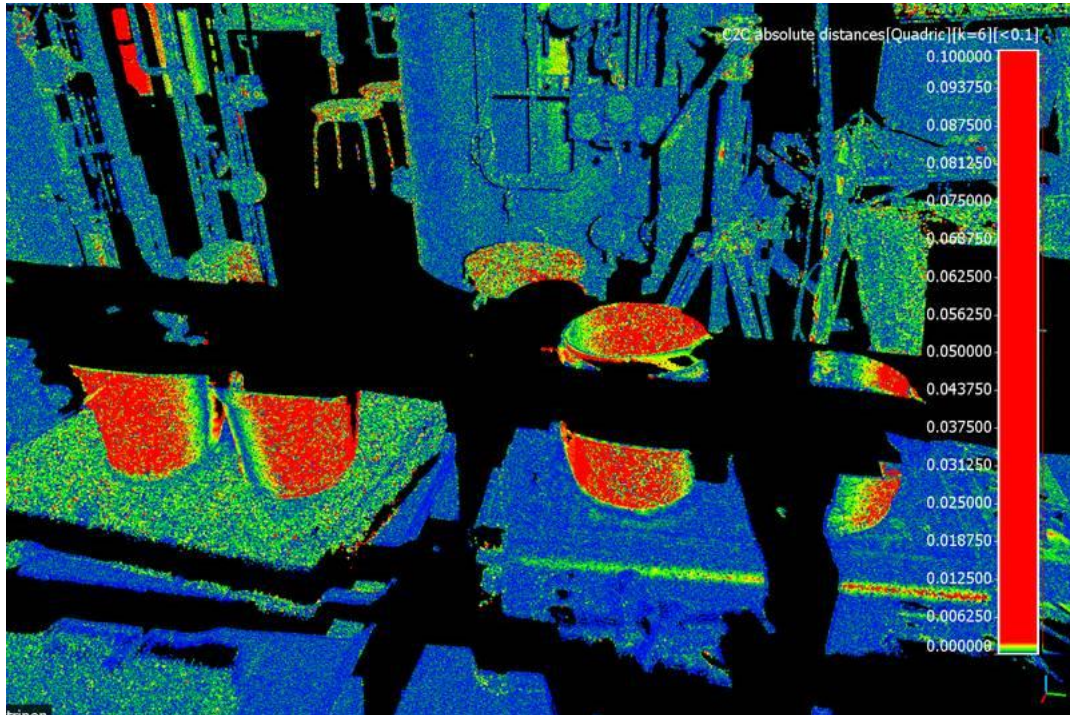


Kuva j. Pilvi 5. Arvo x. Kuva on käyttökeltoton.

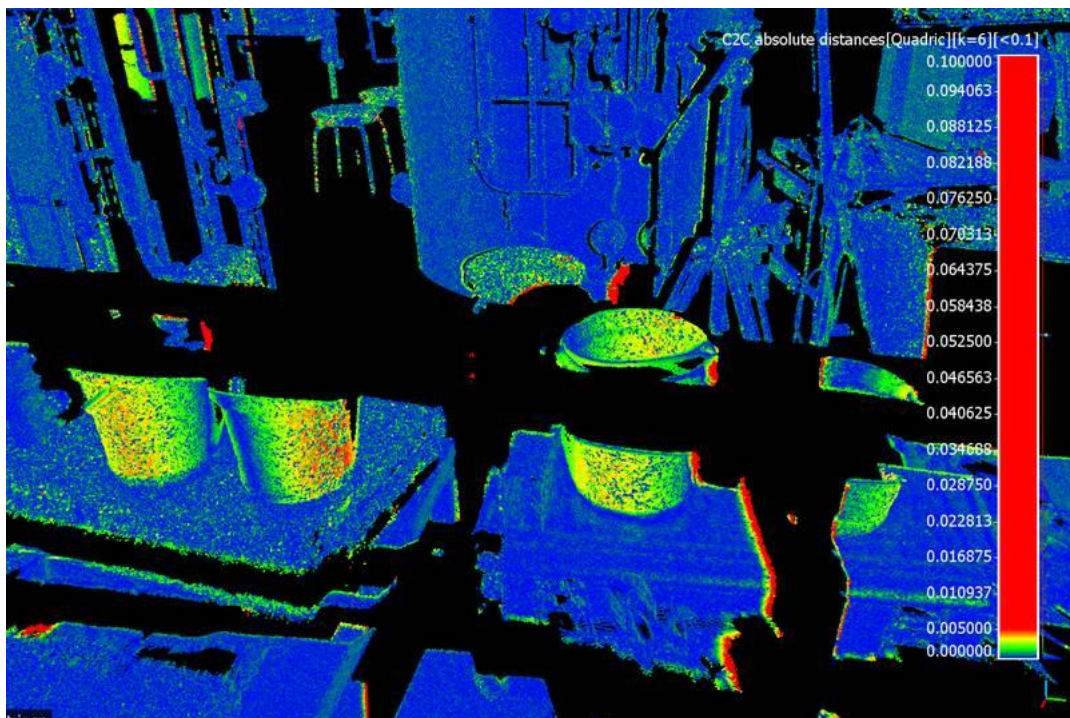
Ryhmä 5:n lähinäkö (kuvat k–o). Kontrollitarkastelu. Tarkastellaan, millä värikylläisyyden arvolla purkkien liikkumasuunta on luotettavasti erotettavissa toisistaan.



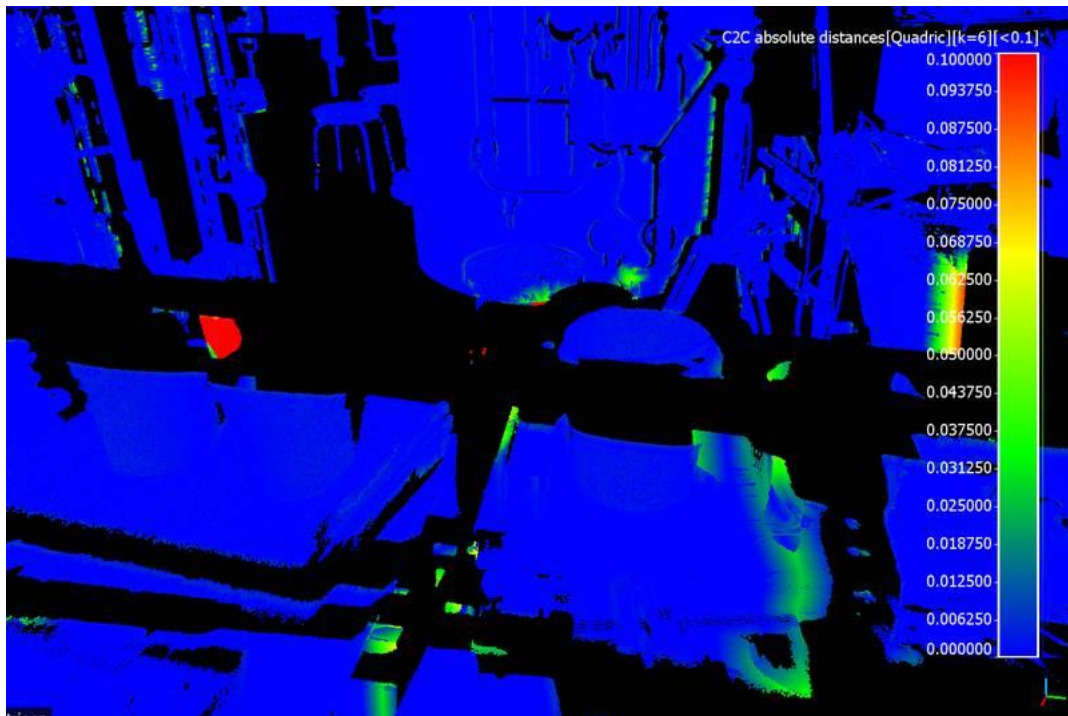
Kuva k. Pilvi 1. Arvo 2.



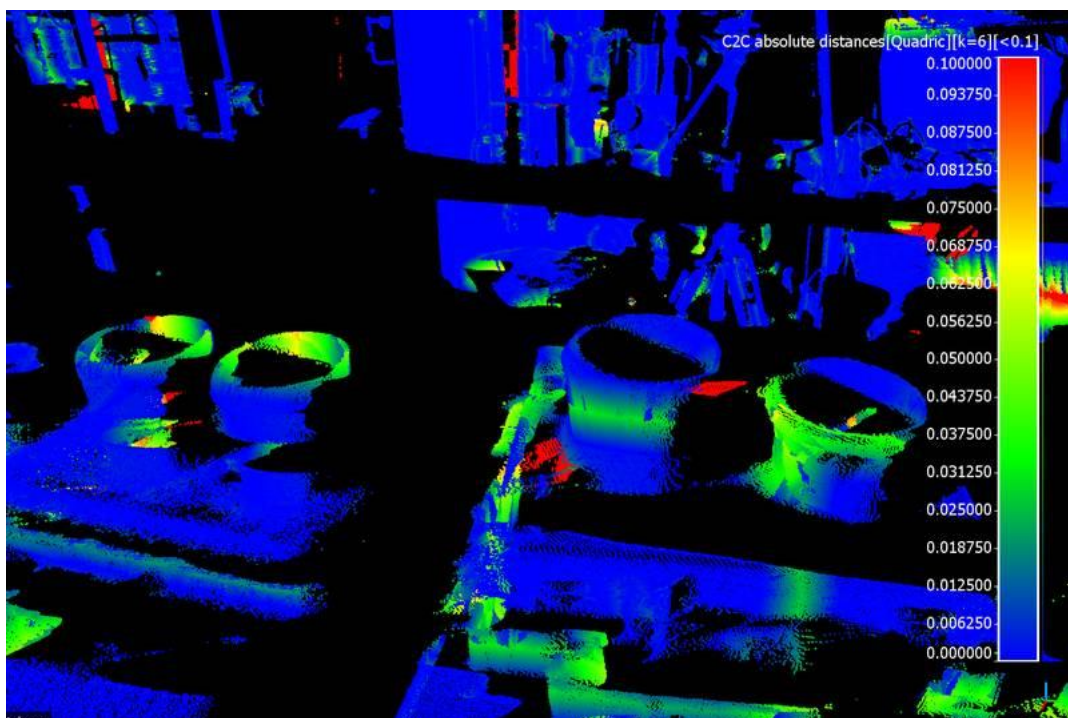
Kuva l. Pilvi 2. Arvo 2.



Kuva m. Pilvi 3. Arvo 5. Ero oikeanpuolimmaisena purkin pinnan peitossa tämän pistepilven ja referenssipilven välillä estää toteamasta sen siirtymän suuntaa tarkemmin.



Kuva n. Pilvi 4. Arvo x. Kuva on käyttökeltoton.



Kuva o. Pilvi 5. Arvo x. Kuva on käyttökeltoton.