



Sami Salmelin

# NavVis VLX-mobiilikartoituslaitteen käyttäminen mallinnuksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinöörityö

3.6.2021

## Tiivistelmä

Tekijä:	Sami Salmelin
Otsikko:	NavVis VLX-mobiilikartoituslaitteen käyttäminen mallinnuksessa
Sivumäärä:	36 sivua + 2 liitettä
Aika:	3.6.2021
Tutkinto:	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	maanmittaustekniikka
Ohjaajat:	lehtori Ilkka Partonen Regional Manager Antti Soikkeli

---

Tämän insinööriyön tavoitteena oli tutkia, selviääkö NavVis VLX-mobiililaserkeilain vaatimuksista, joita laserkeilaimille on esitetty Yleisissä tietomallivaatimuksissa. Tässä työssä käsitellään Yleisten tietomallivaatimusten osaa 2, jossa asetetaan ehdot laserkeilauksen resoluutiolle sekä tarkkuudelle.

Selvitystyössä oleellista vaatimusten lisäksi oli mittaamisen sekä mittaustulosten käsittelyyn käytettävä aika. Varsinkin perinteinen maalaserkeilaus on aikaa vievää työmaalla. Uusi laite tulisi mahdollisesti säästämään aikaa.

Mittausalueelle oli mitattu takymetrilla kiintopisteitä, joita verrataan Leica P40-pistepilvestä mitattuihin kiintopisteiden koordinaatteihin. Kun tiedettiin P40:n pistepilven tarkkuus, voitiin verrata NavVis VLX:n pistepilveä P40:n pistepilveen. Molemmista pistepilvistä laskettiin myös niiden resoluutio eli pistetiheys. Pistepilvien laskenta tehtiin Leica Cyclone- sekä CloudCompare-ohjelmilla. Pistepilvet oli käsitelty valmiiksi tätä insinööriyötä varten.

Tulokset olivat hyviä kohteiden osalta, jotka olivat pysyneet muuttumattomina. Mittaukset suoritettiin kohteessa, jota peruskorjataan. Työmaa oli muuttunut purkutöiden takia mittausten välissä, joten osaa mitatusta datasta oli haastavaa verrata toisiinsa. Lisäksi korkeuden suhteen ei päästy aivan samoihin arvoihin kuin tasokoordinaattien osalta, koska lattioiden ja laatan alapinnoilla oli keilausten välillä tehty purkutöitä. Lopputulokset ovat kuitenkin lupaavia ja lisää tutkimustyötä kannattaa ehdottomasti tehdä.

Avainsanat: laserkeilaus, mobiilikartoitus, pistepilvi

## Abstract

Author: Sami Salmelin  
Title: NavVis VLX Mobile Mapping System in Modelling.  
Number of Pages: 36 pages + 2 appendices  
Date: 3 June 2021

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Land Surveying  
Instructors: Ilkka Partonen, Senior Lecturer  
Antti Soikkeli, Regional Manager

---

The purpose of this Bachelor's thesis was to define whether NavVis VLX laser scanner can fulfil the Common BIM Requirements, especially part two, the modelling of the initial situation. The requirements that were focused on in the thesis concern the resolution and accuracy of the laser scanner.

In addition to the BIM requirements, the thesis focused on the time spent on the measurement and the processing of the measurement result. The aim was to establish whether the device could save time in the usually time-consuming terrestrial laser scanning.

Control points were measured with a total station in the building used as a case in the thesis, a renovation site. The control points were compared to a point cloud created with Leica P40. After that, the point cloud created with the VLX was compared to the Leica P40 point cloud. The resolution or point density were calculated on the basis of both point clouds. The calculation was done in Leica Cyclone and CloudCompare programmes. The point clouds were pre-processed for this thesis.

The results were good for unchanged objects. However, the site had been changed between the measurements, so not all measurement data could be compared to each other. However, the results are promising, and more study remains to be done.

Keywords: laser scanning, mobile mapping, point cloud

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Laserkeilaus	2
2.1	Staattinen maalaserkeilaus	2
2.1.1	Pulssilaser, valon kulkuaikaa mittaava keilain	3
2.1.2	Vaihe-erolaser	4
2.2	Keilauksen laatu	4
2.2.1	Yksittäisen pisteen laatu	4
2.2.2	Pistepilven tiheys	4
2.2.3	Pilvien yhdistämisen laatu	4
2.3	Mobiilikeilaus	5
2.3.1	Mobiilikeilauksen perusteet	5
2.3.2	Paikannusjärjestelmä	5
2.3.3	SLAM	7
3	YTV2012 ja koordinaattijärjestelmä	9
3.1	Yleiset tietomallivaatimukset	9
3.2	Koordinaattijärjestelmä	10
4	Tutkimuksessa käytetyt laitteet	12
4.1	Leica P40	12
4.2	NavVis VLX	13
5	Mittaustyöt, aineiston rekisteröinti ja käsittely	16
5.1	Esivalmistelut	16
5.1.1	Leica P40	16
5.1.2	NavVis VLX	17
5.2	Aineiston rekisteröinti ja käsittely	17
5.2.1	Leica P40	18
5.2.2	NavVis VLX	18
6	Tulosten laskenta	19
6.1	Leica P40	19

6.2 NavVis VLX	24
7 Tulosten esittely, NavVis	33
8 Pohdinta	36
Lähteet	37
Liitteet	
Liite 1: Tulokset Leica P40	
Liite 2: Tulokset NavVis VLX	

## Lyhenteet

ETRS89	Euroopan terrestrinen vertausjärjestelmä 1989.
GK	Gauss-Krüger-projektio, nimetty kahden saksalaisen matemaatikon mukaan.
GNSS	Global Navigation Satellite System. Maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä.
IMU	Inertial Measurement Unit. Kiihtyvyyksien mittaamiseen perustuva paikannusmenetelmä.
MMS	Mobile Mapping System. Mobiilikartoitusjärjestelmä.
NAP	Normaal Amsterdams Peil. Lähtötaso useiden maiden korkeusjärjestelmille.
RMS	Arvojen neliöllisen keskiarvon poikkeama niiden keskiarvosta tai niiden varianssin neliöjuuri.
SLAM	Simultaneous localization and mapping. Järjestelmä, joka paikantaa ja kartoittaa samaan aikaan.
TM35	Perustuu poikittaiseen Mercatorin projektioon. Numero 35 on kartta-projektiojärjestelmän kaista 35.
YTV2012	Yleiset tietomallivaatimukset.

## 1 Johdanto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, voiko NavViksen VLX laserkeilaimella mitata rakennushankkeen lähtötilanteen mallintamisen. Yleiset tietomallivaatimukset asettavat laserkeilaamiselle tietyt reunaehdot, jotka liittyvät pistepilven tarkkuuteen sekä tiheyteen.

Työ tehtiin Exact AIP-Mittaus Oy:lle yhteistyössä NavViksen kanssa. VLX:n tuottamaa pistepilveä verrataan Leican P40-laserkeilaimen tuottamaan pistepilveen.

Selvitystyö tapahtui vertailemalla takymetrilla mitattuja kiintopisteiden koordinaatteja Leica P40:n tuottaman pistepilven kiintopisteiden koordinaatteihin. Kun tiedetään P40:n pistepilven poikkeamat, voidaan pistepilviä verrata toisiinsa ja selvittää poikkeavatko pistepilvet toisistaan. Vertailu tehtiin CloudCompare-ohjelmalla, jossa P40:n pistepilvi toimi referenssipintana. Työssä käytettiin kahta eri ohjelmistoa tarkkuuden sekä resoluution selvittämiseen.

Myös mittauksiin sekä aineiston käsittelyyn käytetty aika huomioitiin, koska toiveena on, että uusi teknologia säästäisi aikaa ja olisi helpompi käyttää. Opinnäytetyössä ei perehdytty yleisiin tietomallivaatimukseen kuin osan 2 vaatimusten mukaisesti, lähtötilanteen mallintaminen laserkeilauksella.

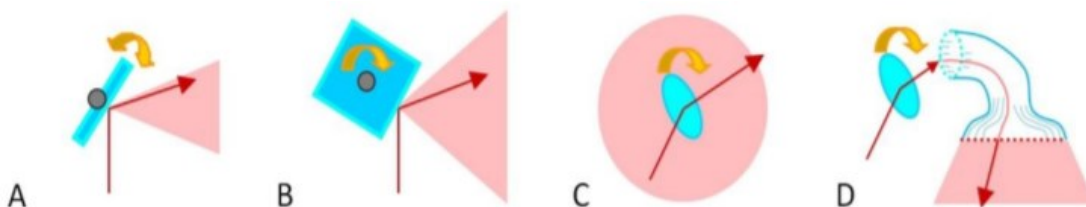
## 2 Laserkeilaus

### 2.1 Staattinen maalaserkeilaus

Keilausta on ennen maalaserkeilausta käytetty kaukokartoitukseen eli ilmalaserkeilaukseen, joka tapahtuu ilmasta maahan. Maalaserkeilaimen toiminta perustuu etäisyyksien ja suuntien mittaamiseen. Laserkeilain soveltuu hyvin rakenteiden ja rakennelmien mittaamiseen sekä mallintamiseen, mutta myös maaston kohteiden mittaaminen onnistuu. [1, s. 271.]

Keilaimessa on nollapiste, josta säde lähtee ja palaa takaisin. Etäisyyden mitaus voi perustua valon kulkuaikaan, kojeesta kohteeseen ja takaisin. Etäisyyttä on myös mahdollista mitata muilla tavoin, tätä on selvitetty luvuissa 2.1.1 ja 2.1.2. Kun säteen kulkema matka kohteeseen tiedetään sekä säteen lähtökulmat (pysty- sekä vaakasuunnassa), voidaan laskea uuden pisteen koordinaatit eli määritetään koordinaatit jokaiselle mitatulle pisteelle. Paluusignaalia tallennetaan pisteille intensiteettiarvo, joka määräytyy signaalin voimakkuuden pohjalta. Laserkeilain lähettää säteitä jopa satojatuhansia sekunnissa, ja nämä pisteet yhdessä muodostavat pistepilven. [2; 3.]

Laserkeilaimissa on myös peilijärjestelmä, jonka avulla säteet saadaan kohdistettua haluttuun suuntaan. Siihen on useampia vaihtoehtoja, kuinka peilijärjestelmän voi toteuttaa. Kuvassa 1 on esitetty neljä erilaista tapaa, miten järjestelmä on mahdollista toteuttaa. [4]

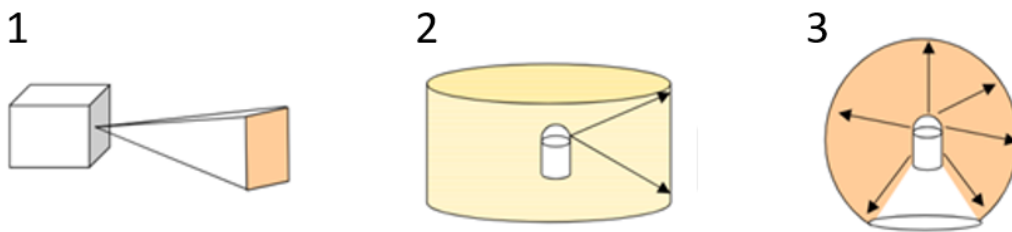


Kuva 1. Keilaimen peilijärjestelmän toimintaperiaate: A: oskilloiva, B: polygoni, C: vinopeili ja D: optinen kolmiomittaus [2; 4].



Ensimmäinen peili (A) on värähtelevä peili, keilauskulma jää hyvin kapeaksi  $<90^\circ$ . Toinen (B) on pyörivä monikulmio, keilauskulma vaakatasossa on  $360^\circ$ , mutta pystykehällä se on vain  $90^\circ$ . Kolmas (C) on pyörivä vinopeili, ja sillä on mahdollista saada  $360^\circ$ :n keilauskulma, mutta rajoitteena saattaa olla laitteen runko. Neljäs (D) tapa, kolmiomittauksella saadaan tarkkaa mittaustietoa, mutta huonona puolena on isot katvealueet sekä lyhyt mittausetäisyys. Suurin osa nykyaikaisista laitteista käyttää vaihtoehtoa C. [2]

Kuvassa 2 on laserkeilaimien tyypit, ja oskilloivalla peilillä saadaan keilamainen (1) keilausalue. Polygoni peili tuottaa panoraamaisen (2) keilausalueen ja vinopeilillä saadaan kupolimainen (3) keilausalue. [4]



Kuva 2. Laserkeilaimien tyypit: 1: keilamainen, 2: panoraamainen ja 3: kupolimainen [2, muokattu].

### 2.1.1 Pulssilaser, valon kulku-aikaa mittaava keilain

Pulssikeilaimet laskevat etäisyyden laserpulssista sen kulkiessa keilaimesta kohteeseen ja takaisin pulssin kulkuajan perusteella. Nämä keilaimet sopivat hyvin laajoihin kartoitusmittauksiin, koska mittausetäisyys voi olla jopa kilometri. Pitkänkin matkan päästä saadaan vielä tiheitä ja tarkkoja pistepilviä. Laitte voi mitata jopa yli miljoona pistettä sekunnissa. [2; 5, s. 30.]

### 2.1.2 Vaihe-erolaser

Vaihe-erokeilain määrittää etäisyyden lähtevän ja palaavan säteen vaihe-erosta, sen lähettämä lasersäde on jatkuvaa. Vaihe-ero mittaustapana soveltuu hyvin tarkkoihin ja lähellä oleviin kohteisiin. Ne ovat paljon nopeampia käyttää kuin pulssikeilaimet ja parhaimmillaan voivat mitata 500 000 pistettä sekunnissa. Mittausetäisyys on vain 80 metriä eikä tiheyttä voi säätää. Kauempana oleville kohteille on mahdotonta mitata tiheää pistepilveä. [2; 5, s. 30.]

## 2.2 Keilauksen laatu

### 2.2.1 Yksittäisen pisteen laatu

Mitattujen pisteiden hajonta on vaikuttava tekijä yksittäisen pisteen laadussa. Hajontaan vaikuttaa paljon kulma, jossa mittaussäde osuu kohteeseen. Mittausmatkan kasvaessa säteen paluusignaali heikkenee. Paluusignaalin voimakkuuteen vaikuttaa mitattavan kohteen pinta sekä muoto. Osa laitteista tallentaa palautuvan signaalin voimakkuuden, joten tasomaisilta kohteilta voidaan erottaa eri pintarakenteita. [2]

### 2.2.2 Pistepilven tiheys

Pistepilviä mitataan yleensä mallintamista varten, ja sen laatuun vaikuttaa pisteiden keskinäinen välimatka pistepilvessä. Mitä tiheämmin mitattu pistepilvi, sitä tarkemmin siitä voidaan mallintaa kohteita. Pistepilvien tarkkuuden pitää olla hyvä, jotta pistepilvestä on hyötyä. [2]

### 2.2.3 Pilvien yhdistämisen laatu

Pistepilviä voidaan yhdistää useilla eri tavoilla. Ensimmäinen tapa on käyttää apuna tähyksiä. Pistepilvistä pitää löytyä kolme yhteistä koodattua tähyistä, jotta pistepilvet yhdistyvät samaan koordinaatistoon. Mikäli pistepilvet halutaan tiettyyn koordinaatistoon, tähyksien keskipisteiden koordinaatit tulee määrittää.

Keskipisteiden määrittäminen tapahtuu takymetrillä. Tällä tavoin päästään parhaimmillaan 1–3 millimetrin tarkkuuteen. Toinen tapa yhdistää pistepilvet on käyttämällä samoja mallinnettuja kohteita erikseen mitatuissa pistepilvissä. Tämä tapa ei kuitenkaan ole yhtä tarkka kuin edellinen, koska mittaaminen on tarkempaa kuin mallintaminen. Kolmas tapa on yhdistää pisteet yhteisillä pistepilven pisteillä, menetelmä vaatii yhteistä peittoa olisi kolmasosa. Peitolla tarkoitetaan, että pistepilvet peittävät samaa aluetta. Tällä menetelmällä päästään noin 5–10 millimetrin tarkkuuteen. [2]

## 2.3 Mobiilikeilaus

### 2.3.1 Mobiilikeilauksen perusteet

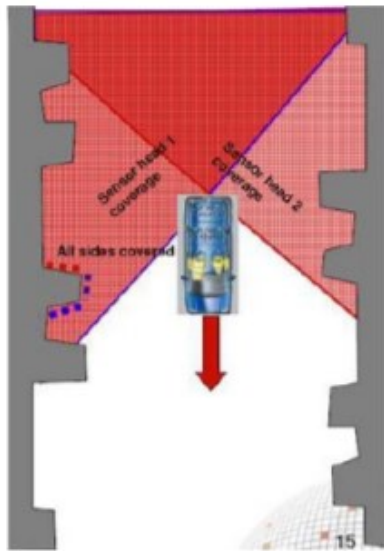
Tässä opinnäytetyössä jätetään ilmakeilauksen osa-alueet käsittelemättä, jotka eivät liity mobiilikeilaamiseen maan pinnalla. Mobiilikeilaus ajoneuvolla vastaa toimintaperiaatteiltaan ja järjestelmiltään ilmakeilausta [6].

MMS on monisensorinen järjestelmä, joka koostuu kartoituslaitteesta, ohjausyksiköstä ja paikannusjärjestelmästä (IMU/GNSS). Ohjausyksikkö synkronoi sekä integroi sijaintitiedon. Koko järjestelmän sensorit on integroitu jäykälle liikkuvalla alustalle ja sen liikerataa lasketaan, ja lopuksi niitä käytetään maantieteellisten 2D/3D-tietojen tuottamiseen. Autoihin asennettavat mobiililaserkeilaimet ovat kustannustehokkaita ja paras vaihtoehto 3D-pilvien tuottamiseen kaupunkialueilla. Keilain tuottaa paljon dataa ja pistepilvissä on korkea pistetiheys sekä hyvä tarkkuus. [7]

### 2.3.2 Paikannusjärjestelmä

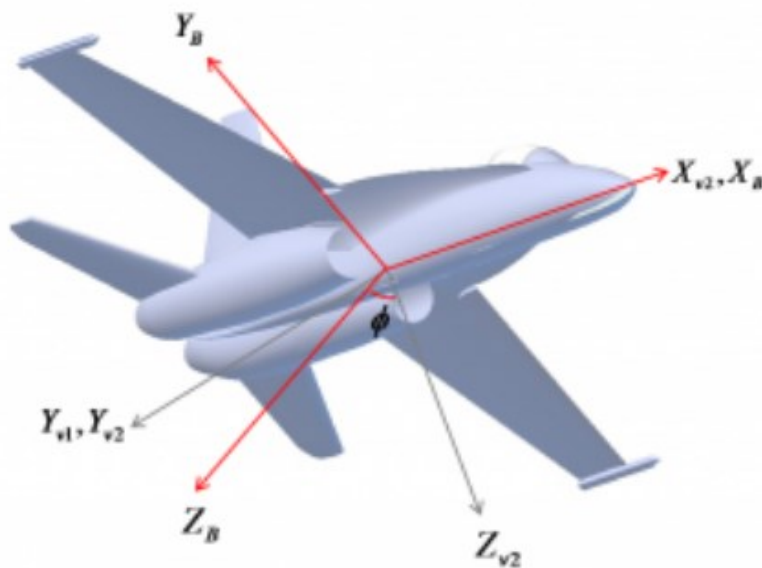
Mobiilimittauksessa ajoneuvoon kiinnitetään yksi tai kaksi 360°:n laserkeilainta sekä paikantava GNSS-IMU-laitteisto. Kuvassa 3 on kahden keilaimen peittoala 180°:n keilauskulmilla. Kameroita ja videokameroita on mahdollista yhdistää laitteistoon. Ajoneuvon kallistelu ja heiluminen ei vaikuta keilauksen aikana yk-

sittäisten pisteiden x-, y-, ja z-koordinaattien tarkkuuteen IMU-järjestelmän ansiosta ja kuvassa 3 on esitetty järjestelmän hyöty. Kaikkien sensorien keskinäiset sijainnit inertialaittein keskipiteeseen nähden on määriteltävä suurella tarkkuudella. Keilaimien pitää sijaita ajoneuvossa mahdollisimman korkealla, koska myös tieluiskien alareunat on mitattava noin 3,5 metrin korkeuteen. [8]



Kuva 3. Kahdella ajoneuvoon asennetulla laserkeilaimella saadaan tien molemmat puolet keilattua. Vaaleanpunaisella yhden keilaimen peittoalue ja tummanpunaisella kahden keilaimen peittoalue eli melkein jokainen kohta alueesta saadaan mitattua kummallakin keilaimella. [8].

Inertia-laitteisto (Inertia Measuring Unit) mittaa myös kuljettua matkaa ajoneuvolla. Auton renkaaseen kiinnitetään kierroslaskuri, joka mittaa renkaan pyörimistä. [9].



Kuva 4. Inertia-laitteiston avulla pystytään huomioimaan laskennassa kierrot x-, y- ja z-koordinaattiakselien ympäri. Kuvassa harmaalla on lentokoneen akselit ja punaisella järjestelmän akselit. [9; 10.]

Inertia-laitteisto laskee kiertokulmat anturin rungon suhteen. Kiertokulmien laskeminen on paljon monimutkaisempi prosessi kuin esimerkiksi kiihtyvyyssanturin tuottaman tiedon laskeminen koordinaateiksi. [10]

### 2.3.3 SLAM

Satelliittipaikannuksen tarkkuus ei riitä laadukkaan paikkatiedon keräämiseen, avuksi tarvitaan myös muita paikannusmenetelmiä. SLAM-menetelmä (Simultaneous Localization and Mapping) samaan aikaan paikantaa kojeen sijaintia sekä kartoittaa ympäristöä. Ajoneuvon suhteellinen liike ratkaistaan kameroiden, laserkeilaimien ja muiden sensoreiden antamasta tiedosta. Näiden avulla voidaan luoda kartta lähialueesta, joka pohjautuu sensorimittauksiin. Kuvassa 4 on esitetty NavVis M6-mobiilikeilausjärjestelmä, joka hyödyntää SLAM-menetelmää. [11]



Kuva 4. NavVis M6:n mobiilikeilausjärjestelmä. Keskellä on keltainen viiva, joka on laitteen kanssa kuljettu reitti vasemmalta oikealle. Samalla kulkiessaan laite kartoittaa ympäristöä eli hyödyntää SLAM-menetelmää. [12]

Peräkkäisten sensorihavaintojen pohjalta lasketaan ajoneuvon sijainti ja ajomatkan kasvaessa sensorien mittausvirheet ovat merkittävä epätarkkuuden lähde. Sijaintivirhe kertyy ajan myötä ja sen suuruusluokka riippuu suurimmaksi osaksi sensorin mittaustarkkuudesta. Autonomisissa (itseohjautuvissa) ajoneuvoissa mittaustarkkuus on laserkeilaimissa noin kahden senttimetrin luokkaa sadan metrin matkalla. [11]

Karttapohjaisten algoritmien avulla voidaan pienentää sijaintivirhettä. SLAM-menetelmistä on erityistä hyötyä paikannukseen tunneleissa ja rakennetuissa ympäristöissä, jolloin satelliittien signaali heikentyy ja paikannuksen tarkkuus heikenee. Vaikeaan toimintaympäristöön saadaan luotua paikannusmenetelmä, joka säilyttää tarkkuutensa yhdistämällä SLAM-menetelmän, kiihtyvyyksiin perustuvan inertianavigoinnin sekä satelliittipaikannuksen. [11]

### 3 YTV2012 ja koordinaattijärjestelmä

#### 3.1 Yleiset tietomallivaatimukset

Vuonna 2007 julkaistiin Senaatti-kiinteistöjen tietomallivaatimukset, vaatimukset päivitettiin vuosina 2011–2012 COBIM-hankkeen muodossa. Hanketta rahoittivat suuri joukko kiinteistön omistajia ja rakennuttajia, ohjelmistotaloja ja rakennusliikkeitä Senaatti-kiinteistöjen lisäksi. Yleiset tietomallivaatimukset 2012 osat 1–9 ja uusina osat 10–14 syntyivät päivitystyön tuloksena.

Osassa 2 on tämän opinnäytetyön kannalta tärkein sisältö, lähtötilanteen mallinuksen mittaus vaatimukset laserkeilausmittaukselle. Kuvassa 5 on esitetty kaikki vaatimukset, jotka on mainittu YTV:ssä. [13]

#### 4.1.3 Taso 3 - Laserkeilausmittaus

Mittaus tehdään laserkeilaamalla kattavasti kaikilta näkyviltä pinnoilta.

##### **Ohje**

*Mitta-aineisto on havainnollista ja sen oikeellisuus on todennettavissa visuaalisesti.*

*Inventointimallia tai piirustuksia voidaan täydentää ja tarkentaa tarvittaessa ilman lisämittauksia.*

##### **Laserkeilausmittauksen mittaustarkkuus**

##### **Vaatimus**

Kohina eli virhe max.  $\pm 10$  mm

Resoluutio eli pistetiheys: mittapisteet alle 5 mm välein.

##### **Ohje**

*Erityistapauksissa, esim. rakennushistoriallisissa dokumentoinneissa voidaan mittaukset tehdä jopa tarkemmalla tasolla, jolloin mittapisteitä on esim. 1mm välein. Tällöin mittaukseen käytettävä työmäärä kuitenkin on huomattavasti suurempi.*

##### **Ohje**

*Hankalasti mitattavista paikoista kuten vesikatoilta voidaan laserkeilausmittauksia täydentää esimerkiksi takymetrimittauksen tai fotogrammetrian avulla.*

*Mitta-aineiston pohjalta voidaan tehdä luotettavasti inventointimalli 10 mm toleranssilla. Aineiston pohjalta voidaan myös laatia yksityiskohtaisia piirustuksia, joissa on mm. materiaalirajat näkyvissä.*

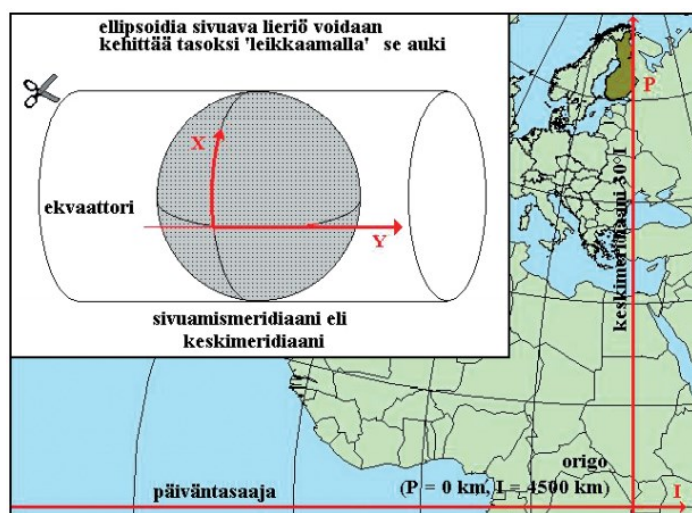
Kuva 5. Yleiset tietomallivaatimukset määräävät laserkeilaamiselle minimivaatimukset. Pisteiden virhe ei saa olla suurempi/pienempi kuin 10 millimetriä ja pisteet pitää sijaita toisistaan alle 5 millimetrin välein. [13]

Tietomallivaatimuksia tullaan päivittämään, mutta hanke tarvitsee rahoitusta [14]. Julkilausuman on allekirjoittanut 89 eri yritystä ja organisaatiota 29.01.2021 mennessä. Organisaatiot ja yritykset pitävät YTV2012:n päivitystä merkityksellisenä ja ajankohtaisena, siinä on merkittäviä puutteita nykyisiin tavoitteisiin sekä mahdollisuuksiin nähden. Puutteita ei ole enää mahdollista korjata pienillä muutoksilla. [15]

### 3.2 Koordinaattijärjestelmä

Koordinaatiston tarkoitus on esittää matemaattisella täsmällisyydellä kohteen sijainti lukuarvoina. Mittaamisessa ja paikantamisessa käytetään kolmenlaisia koordinaatistoja: maantieteellistä, ellipsoidikeskistä sekä kartan suorakulmaista koordinaatistoa. [1, s. 143.] Ellipsoidikeskinen koordinaatisto on kolmiulotteinen ja kaksi muuta on kaksiulotteisia. Kaksiulotteisessa koordinaatistossa on vain tasokoordinaatit, pohjoinen (x) ja itä (y). Kolmiulotteisuus esitetään korkeuden (z) avulla. [1, s. 143; 16.]

Tässä työssä käsitellään vain ETRS-GK (Euroopan terrestrinen vertausjärjestelmä, Gauss-Krüger-projektio) -tasokoordinaatistoa sekä N2000-korkeusjärjestelmää, koska tiedostot ovat jo tässä muodossa. Kuvassa 6 on Gauss-Krüger projektio, jossa lieriö sivuaa maapallon pituuspiiriä [1 s. 151].

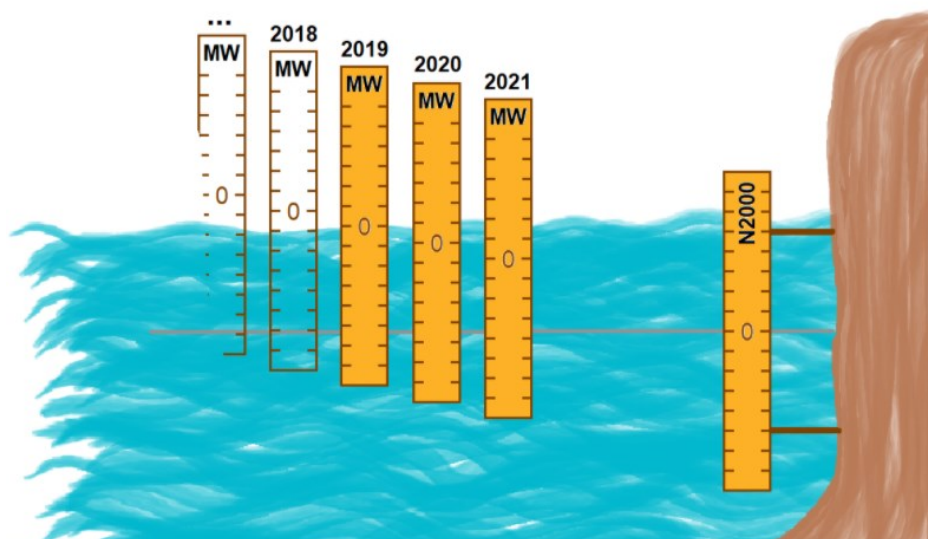


Kuva 6. Lieriö, joka on maapallon päällä poikittain, sivuaa keskimeridiaania eli jotakin pituuspiiriä. Kyseessä on Mercatorin projektio ja myös ETRS-GK-koordinaattiprojektio pohjautuu tähän. [1, s. 151; 17; 18.]



ETRS-GKn on tasokoordinaatisto, jolla saadaan pienempi projektio virhe kuin ETRS-TM35-koordinaatteja käyttämällä. N-koordinaatti on etäisyys päiväntasaajasta pohjoiseen ja E-koordinaatti (itään) on etäisyys keskimeridiaaniin. Suomi on jaettu 13 kaistaan, koska yksi kaista on yhden asteen levyinen. Mikäli kunta on monen kaistan alueella, niin kunta valitsee peittävimmän kaistan ja levittää sen kattamaan koko kunnan alueen. GK:n perässä oleva n korvataan numerolla, jolloin se on kaistan numero, joka sivuaa lieriötä x:n suuntaan kuvassa 6. [18; 19.]

Teoreettinen keskivesi on ennuste vedenkorkeuden odotusarvosta ja se on tehty käytännön tarpeita varten. Teoreettinen keskiveden pinta muuttuu joka vuosi, kuten kuvassa 7 esitetään. [20]



Kuva 7. N2000-korkeusjärjestelmässä on kiinteä nollataso, kun taas teoreettinen keskiveden pinta muuttuu vuosittain [20].

Asteikko asetetaan siten, että vedenkorkeuden keskiarvo on niin lähellä nolaa kuin mahdollista. N2000-korkeusjärjestelmä perustuu tarkkavaaitukseen vuosilta 1978–2006, ja se on kolmas Suomessa tehty. N2000 on suomalainen reaalisatio yhteisestä eurooppalaisesta korkeusjärjestelmästä ja sen lähtötasona toimii NAP (Normaal Amsterdams Peil). Baltic Sea Chart Datum 2000 (BSCD2000) on Itämeren valtioiden järjestelmä, ja se on sama kuin N2000. [20]

## 4 Tutkimuksessa käytetyt laitteet

### 4.1 Leica P40

Valmistajan tietojen mukaan Leican P40-laserkeilaimessa kohinaa on 0.4 millimetriä (RMS) 10 metrin matkalla ja 0.5 millimetriä (RMS) 50 metrin matkalla. Yksittäisen mittauksen pisteiden 3D-tarkkuus 78 %:n heijastavuudella: kolme millimetriä 50 metrin matkalla ja kuusi millimetriä 100 metrin matkalla. Resoluutio on 10 metrin matkalta mitattaessa 0,8–50 millimetriin riippuen mittauksen kestosta, kuvassa 8 on esitetty mittausajan vaikutus resoluutioon. Tiheys heikenee pistepilvissä matkan funktiona eli tiheyteen vaikuttaa suoraan siis mitaustäisyys. [2; 3; 21; 22.]

Resoluutio [mm @ 10 m]	Arvioitu laserkeilauksen kesto [HH:MM:SS] täyskeilaukselle @ herkkyystaso	
	Normaali	Korkea
50	0:00:20	0:00:20
25	0:00:33	0:00:33
12,5	0:00:58	0:00:58
6,3	0:01:49	0:03:25
3,1	0:03:30	0:13:30
1,6	0:13:33	0:54:06
0,8	0:54:06	3:36:21

Kuva 8. Leica P40-keilaimen keilauksen kesto, nopeuskäyttötila.

Insinööriyössä Rinne tutki pintamateriaalin vaikutusta keilainten tarkkuuteen, ja vertailussa oli kaksi laserkeilainta. Molemmat keilaimet Leica P40 sekä MS50 alittivat kohinan osalta YTV2012  $\pm 10$  millimetrin vaatimuksen. [23]



Kuva 9. Leica P40-laserkeilain [22].

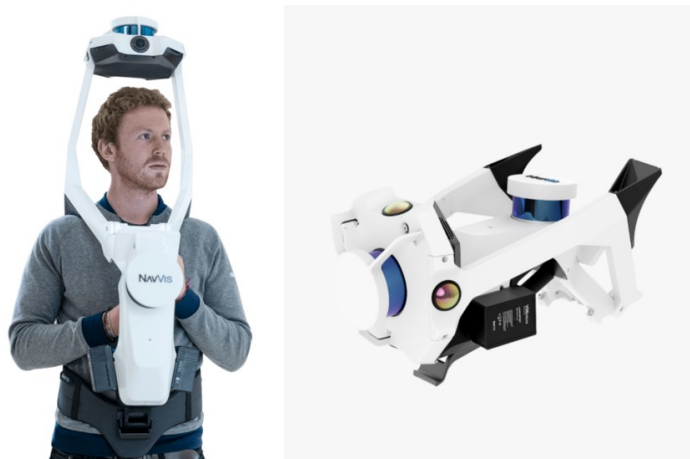
P40:n minimi mittausetäisyys on 0,4 metriä, ja laite mittaa jopa 270 metriin asti. Keilain tuottaa vaakatasossa 360°:n keilauskulman ja pystykehällä 270°:n keilauskulman. Se tuottaa siis kupolimaisen mittausalueen, joka on esitettynä kuvassa 2. Keilain kykenee mittaamaan jopa miljoona pistettä sekunnissa. [3]

Tiedetään jo kokemuksesta, että Leica P40 suoriutuu Yleisistä tietomallivaatimuksista ja että se on yrityksessä käytössä, joten ihan senkin takia se on valittu vertailun kohteeksi. Kuvassa 9 on Leican P40-laserkeilain.

## 4.2 NavVis VLX

NavVis VLX sisältää kaksi 16-tasoista laserskanneria eli lasersäde lähetetään laitteesta panoraamaisesti 16-tasossa molemmista skannerista. Kahdella laserskannerilla saadaan 360°:n keilauskulma vertikaalisesti sekä horisontaalisesti. Yksi skanneri kykenee mittaamaan 300 000 pistettä sekunnissa. Niiden anturit vastaanottavat 3D-koordinaatteja yhdessä SLAM-ohjelmiston kanssa, ja niiden avulla VLX tuottaa pistepilven. Jos mittauksessa käytetään kiintopisteitä, joiden keskipisteen koordinaatit tunnetaan, pistepilven tarkkuus on 5–15 mm 95

VLX:n luottamusvälillä. Keilain sisältää neljä 20 megapikselin kameraa ja kuvassa 10 esitetään kameroiden sijainti laitteen yläosassa. Operaattori saa liikkumatta kuvat joka suunnasta. [24; 25; 26.]



Kuva 10. NavVis VLX on puettava mobiilikeilan, jolla pystytään hyvin keilamaan pieniä tiloja. VLX menee myös kokoon, ja se mahtuu yhteen kantolaukuun. [24, muokattu]

VLX:n kosketusnäyttö antaa palautetta reaaliaikaisesti keilauksen etenemisestä sekä datan laadusta. Näyttö on sisäänrakennettu, joten kädet jäävät kokonaan käyttäjällä vapaaksi. Kiintopisteet voivat olla maassa ja seinillä, ja VLX yhdistää aineiston automaattisesti. Kiintopisteet mitataan laskemalla keilain kiintopisteen päälle. Kuvassa 11 on esitetty maassa olevan kiintopisteen mittaus. [24; 25; 26.]

Laite painaa 9,3 kilogrammaa, ja siinä on terabitin verran siirrettävää muistia. Mittausaikaa on kahdella akulla 1,5 tuntia, ja akkuja laitteeseen mahtuu kaksi kerrallaan. VLX:ssä on WiFi-, Bluetooth- sekä IMU-järjestelmä. Mobiilikartoituslaitteista poiketen, VLX:ssä ei ole satelliittipaikannusjärjestelmää, koska laitteella on tarkoitus mitata rakennusten sisällä sekä niiden lähiympäristöissä. Etäisyyden mittaus on 100 metriin asti. Pistepilven tarkkuus on kahdeksan millimetriä keskihajonnalla, tarkkuus on ympäristöstä riippuvainen ja se on määritetty 100 m<sup>2</sup>:n huoneessa. Laite mahtuu yhteen laatikkoon ja painaa 26,8 kg. [25]



Kuva 11. Kiintopisteen mittaaminen maasta. Keilain lasketaan mittauksen aikana hetkeksi mahaan kiintopisteen päälle. [24]

NavVis VLX valittiin kokeiluun seuraavista syistä:

- Tuote oli juuri viime kesänä tullut markkinoille ja Exact halusi evaluoida uutta teknologiaa.
- NavVis M6-työnnettävästä mobiilikeilaimesta, oli hyvät kokemukset.
- Pohjoismaissa NavVis toimii Exactin yhteistyökumppanina.
- Muiden valmistajien mobiilikeilaimilla ei ollut mahdollista keilata ja kuvata joka suuntaan 360°.
- VLX:n tuottaman materiaalin saa NavVis Indoorviewer-ohjelmistoon. [27]

## 5 Mittaustyöt, aineiston rekisteröinti ja käsittely

Mittaustyöt tässä opinnäytetyössä käsitellään suppeasti, koska mittauksen esivalmistelut ja keilauksen P40:llä suoritti Exact. Lasekeilauksen Leica P40:llä suoritti Sami Luoma. Mittaukset NavVis VLX:llä suoritti NavVis, mittauksen suoritti Matej Leko, tuotepäällikkö. Aineistoa keilattiin ennen rakennuksen peruskorjausta kevytpurun jälkeen. Keilausta suoritettiin myös purun aikana, koska aineisto piti saada suunnittelijoille nopealla aikataululla. Mittauksen aikana tiellä saattoi myös olla tavaraa, tai samassa tilassa saattoi olla purkutyö käynnissä, mikä häiritsi mittauksia. [28]

### 5.1 Esivalmistelut

Rakennukseen on mitattu kiintopisteverkosto jonomittauksella takymetria käyttäen. Kiintopisteverkko sijoittuu rakennuksen ensimmäiseen lohkoon.

Kohde on jaettu kolmeen lohkoon, ja ennen kuin aluetta alettiin kartoittamaan keilaamalla, tähyksiä mitattiin Leican P40-keilaimella rappukäytäviä pitkin ylös. Jokaisen rappukäytävän jokaiselle kerrokselle mitataan vähintään viisi tähytä. Tulevaisuudessa helpottaa, että tähyksiä on mitattu alueelle enemmän kuin tarvitaan. [28]

#### 5.1.1 Leica P40

Kyseisellä purkutyömaalla mittauksissa kesti noin kaksi tuntia yhtä lohkoa kohden, ja työmaa on jaettu kolmeen lohkoon. Mittaustyötä oli yhteensä noin kuuden tunnin verran. Lohko keilataan kahdesta rappukäytävästä kiintopisteiden takia. Tämä helpottaa huomattavasti myös käsittelyä. Palkit ja niiden kiinnikkeet piti mitata millimetrien tarkkuudella, palkit on esitetty kuvassa 12. Lattioiden osalta jouduttiin tekemään poikkeus ja mittaamaan hieman pienemmällä resoluutiolla kuin alun perin suunniteltiin kiireen vuoksi. [28]



Kuva 12. Palkit ja niiden kiinnikkeet piti mitata erittäin tarkasti [28].

Keulaukset tehtiin kahdella eri kerralla. Ensimmäisellä kerralla mitattiin 67 kojeasemalta ja toisella kerralla 64 kojeasemalta. Tähyksinä käytettiin Leican A4-paperitähyksiä. [28]

### 5.1.2 NavVis VLX

VLX:n data kerättiin kahdella eri mittauksella. Ensimmäinen mittaus kesti tunnin ja toinen mittaus kesti 30 minuuttia. Tunnin kestävässä mittauksessa tallennus epäonnistui ohjelmistovirheen vuoksi, mutta virhe saatiin jälkikäteen korjattua. [29]

## 5.2 Aineiston rekisteröinti ja käsittely

Aineisto oli tutkimusta varten rekisteröity ja käsitelty valmiiksi. Leican P40-datan käsitteli Exactin Siim Maeots ja NavVis VLX:n datan käsitteli NavViksen Matej Leko. NavVis antoi materiaaliksi kaksi käsiteltyä ja väritettyä pistepilveä. Exactin materiaalissa on yhdistetty keilausdata sekä raakadata (eri kojeasemat ovat eri tiedostoissa).

### 5.2.1 Leica P40

Raakadatat tuotiin Leica Cyclone -ohjelmaan rekisteröitäväksi, jossa kojeasemien pistepilvet liitettiin yhteen. Pistepilvet yhdistettiin yhteisillä pistepilven pisteillä. Sen jälkeen kojeasemat rappukäytävistä liitettiin mukaan, jossa tähykset ovat mitattu. Mukaan lisättiin takymetrilla mitatut kiintopisteet ja asemoitiin pistepilvi urakoitsijan koordinaattijärjestelmään. [30]

Asemoinnin jälkeen pilvestä etsittiin virheitä ja mikäli virheitä ei löytynyt, pistepilvet vietiin PTS-formaattiin. Tiedosto muunnettiin vielä RCS-formaattiin AutoDesk ReCap-ohjelmaa varten, jonka jälkeen molemmat tiedostot toimitettiin asiakkaalle. Molempien keilausten rekisteröintiin aikaa kului noin 3–4 tuntia. [30]

### 5.2.2 NavVis VLX

Tallennuksen epäonnistuttua keilausdatasta piti poistaa viimeinen minuutti, jotta sitä pystyttiin prosessoimaan. Data tuotiin NavVis IndoorViewer -ohjelmaan, minkä jälkeen valitaan asetuksista, mitä tiedostolle tehdään. Esimerkiksi voidaan valita pistepilvelle eri resoluutioita sekä lisätä kontrollitiedosto, jossa on kiintopisteiden koordinaatit. [29]

Oletusasetuksilla, tunnin kestävän mittauksen käsittely kestää noin 9 tuntia, mutta 5 millimetrin resoluutiovaatimuksen takia käsittely kesti noin 16 tuntia. Oletusasetuksilla käsittely kestää aina noin 9 tuntia riippumatta siitä, paljonko on mitattu. Pistepilven käsittely tehtiin NavVis Cloud -ratkaisua käyttäen. [29]



## 6 Tulosten laskenta

Leica P40:n tuottamasta pistepilvestä lasketaan pistepilven tarkkuus eli kohina sekä resoluutio. NavVis VLX:stä lasketaan pistepilven resoluutio, jonka jälkeen pisteiden tarkkuutta verrataan P40:n tuottamaan dataan.

Kaikki kolmen lohkon datat on laskettu ja loput laskelmat sekä kuvat löytyvät liitteistä. Tuloksia on pyritty laskemaan mahdollisimman isoina kokonaisuuksina, mutta tiedostoja jouduttiin pilkkomaan ohjelmien sekä tietokoneen suorituskyvyn takia.

### 6.1 Leica P40

#### Kohina

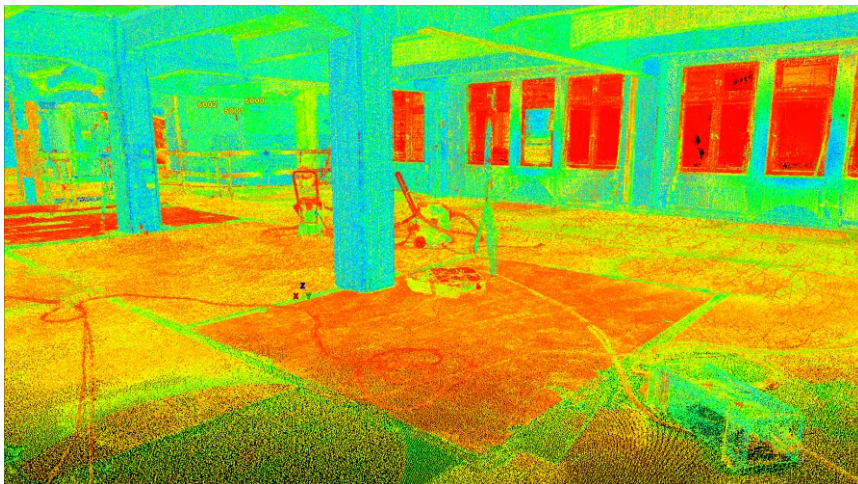
Leican P40 osalta on laskettu poikkeamat takymetrilla mitattuihin pisteisiin. Pistepilvet ovat paikallisessa koordinaatistossa, joten ne on käännetty ETRS-GK25-järjestelmään. Alueella on 11 Leica:n A4-pareritähystä, joiden avulla pistepilvi käännettiin ETRS-GK25-koordinaatistoon. Vertailu alueen ulkopuolella on neljä A4-paperitähystä, jotka toimivat kontrollipisteitä. Neljän tähyksen avulla varmistettiin, että pistepilvi on käännetty oikein uuteen koordinaatistoon. P40:n pistepilvi käännettiin ETRS-GK25-koordinaatistoon, koska tähykset oli mitattu kyseiseen koordinaatistoon.

Takymetrilla mitatut pisteet ovat toimineet tähyksinä laserkeilauksen aikana ja niiden avulla P40:n keilatut pistepilvet on yhdistetty. Pistepilven tähyksien koordinaatteja verrataan takymetrilla mitattuihin tähyksien koordinaatteihin. Tähyksien koordinaattien tiedot tuotiin pistepilveen ja vertailu suoritettiin Leica Cyclone -ohjelmalla Registration-työkalua käyttäen. Pisteet tuotiin ohjelmaan kontrollitiedostona.

Taulukko 1. Leica P40:n rekisteröinnin jäännösvirheet tähyksien osalta.

Laskelmat	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	DXY (m)	DXYZ (m)
Poikkeamien keskiarvo	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Poikkeamien keskihajonta	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Maksimiarvo	0,002	0,003	0,001	0,003	0,004
Yläraja	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Taulukossa yksi on laskettu poikkeamat yksittäisille koordinaateille, tasokoordinaateille sekä 3D-koordinaateille. Keskiarvo sekä keskihajonta ovat kaikki yhden millimetrin, eivätkä yksittäiset arvotkaan ylitä yli neljää millimetriä. Neljän millimetrin ero on tullut tähyksestä, joka on vain kahdessa keilauksessa mukana. Ylärajana on Yleisten tietomallivaatimusten raja kohinalle eli pistetarkkuudelle, ja se on 10 millimetriä, joten kohinan osalta Leican P40 alittaa vaatimusten rajat suhteellisen helposti. Kuvassa 13 on esitetty P40:n pistepilvi, alueella oli myös melko paljon ylimääräistä tavaraa. Laskelmat on kokonaan esitetty liitteessä 1.

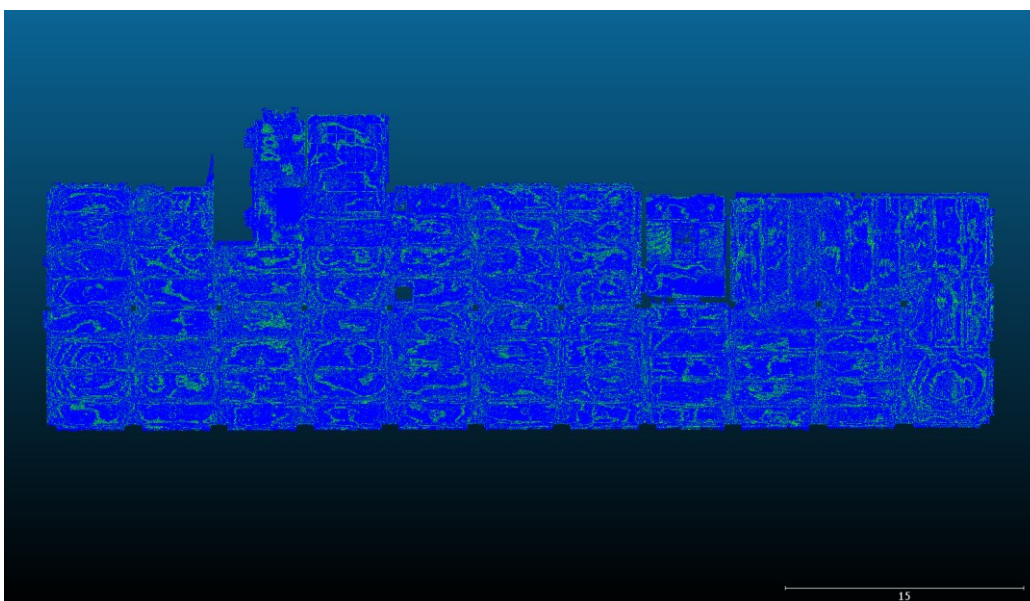


Kuva 13. Leica P40:n pistepilvi.

## Resoluutio

Resoluution eli pistetiheyden selvittämiseksi käytettiin CloudCompare -ohjelmaa. Ohjelma valikoitui työhön, koska pistepilvestä on mahdollista selvittää tiheys pilkkomatta pistepilveä pieniksi osiksi. Pistepilvien koko tuotti kuitenkin ongelmia, koska ohjelma pysähtyi kokonaan ja lopetti vastaamisen.

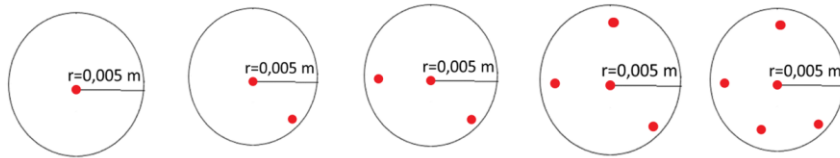
Resoluutio on erikseen laskettu lohkoista 1, ja lohkoista 2 ja 3. Laskenta tehtiin Geometric features -työkalua käyttäen. Ohjelma pystyy laskemaan lähellä olevien pisteiden määrän, ja pinnan sekä tilavuuden tiheyden. Paras vaihtoehto oli laskea läheisten pisteiden määrä antamalla ympyrän säde. Säteen ( $r$ ) arvoksi syötettiin 0,00499. Kuvissa, joissa on taulukko, values tarkoittaa pisteiden kokonaismäärää. Pisteiden tuli olla alle viiden millimetrin päässä toisistaan. Kuvassa 14 esitetään lohkon 1 tulokset kuvana.



Kuva 14. Pisteiden väri kertoo läheisten pisteiden määrän. Värien tarkoitus esitetään kuvassa 15.

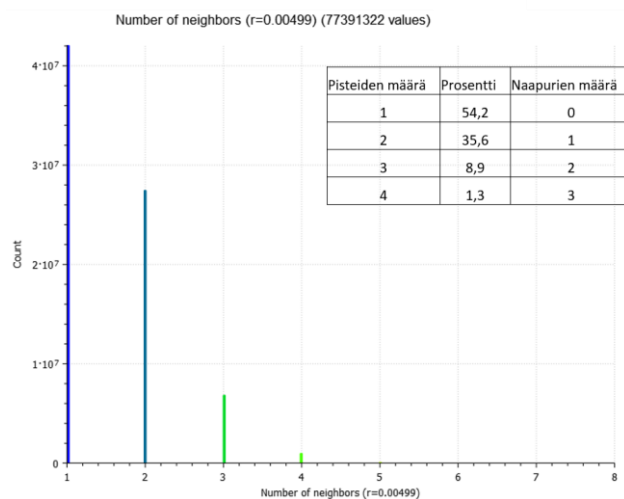
Pisteiden väritystä ei saanut erottuvaisemmaksi, joten kuvasta ei näy selkeästi pistetiheyttä. Kuvassa 16 on esitetty, kuinka monta pistettä on alle viiden millimetrin säteellä toisistaan. Luku 1 tarkoittaa, että sen läheisyydessä ei ole yhtään pistettä ja luku 2, että kaksi pistettä osuu toleranssin sisään.

Tiheys ilmoitetaan tässä työssä pisteiden määränä, jotka ovat lähellä pistettä. Kuvassa 15 on esimerkki siitä, mitä tarkoittaa taulukossa oleva yksi piste, kaksi pistettä, jne. Pisteiden määrän ollessa yksi, siinä ei ole yhtäkään pistettä alle 5 millimetrin etäisyydellä.



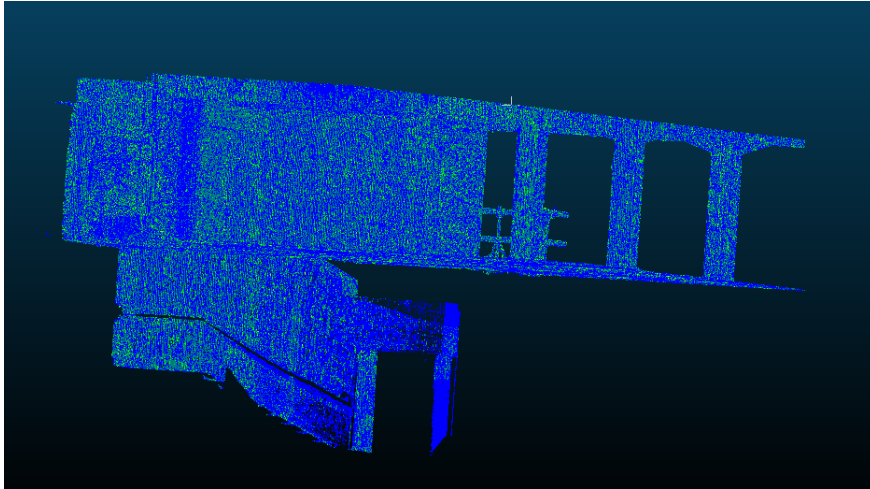
Kuva 15. Ohje, miten taulukoita pitää lukea resoluution suhteen.

Kuvan 16 taulukossa esitetään, kuinka monella prosentilla pisteistä piste on lähellä. Lähellä tarkoitetaan tässä työssä alle viiden millimetrin säteellä. Keskimäärin lattiassa sekä katossa pistetiheys on noin 8–9 millimetriä. Seinien ja palkkien kohdalla tiheys on noin 5 millimetriä. Laskenta suoritettiin samalla työkalulla (Geometric features), mutta säteen arvoksi annettiin 0,008 metriä. Sen jälkeen muutokset pystyttiin tarkastamaan suoraan kartan väreistä.



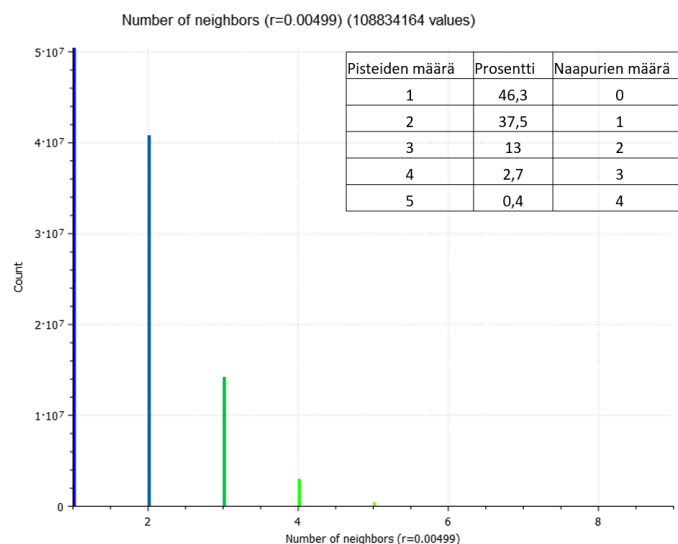
Kuva 16. Vasemmalla olevassa y-akselissa pisteiden määrä ja x-akselissa läheisten pisteiden määrä. Taulukosta selviää läheisten pisteiden määrä prosentuaalisesti. Lohko 1.

Lohkolla 1 54,4 %:lla ei ole yhtään pistettä lähellä, joten se ei täytä tältä osin Yleisten tietomallivaatimuksia. Aiemmin kuitenkin mainittiin, että kiireen vuoksi jouduttiin keilaamaan lattiat pienemmällä resoluutiolla.



Kuva 17. Lohkon 1 seinien ja palkkien tiheys.

Kuvassa 17 on samalta alueelta keilattua dataa, ja kuvassa on osittain vihreätä väriä, eli pisteillä on kaksi pistettä lähellä toisiaan. Palkit ja seinät kuitenkin täyttävät tietomallivaatimusten tason.



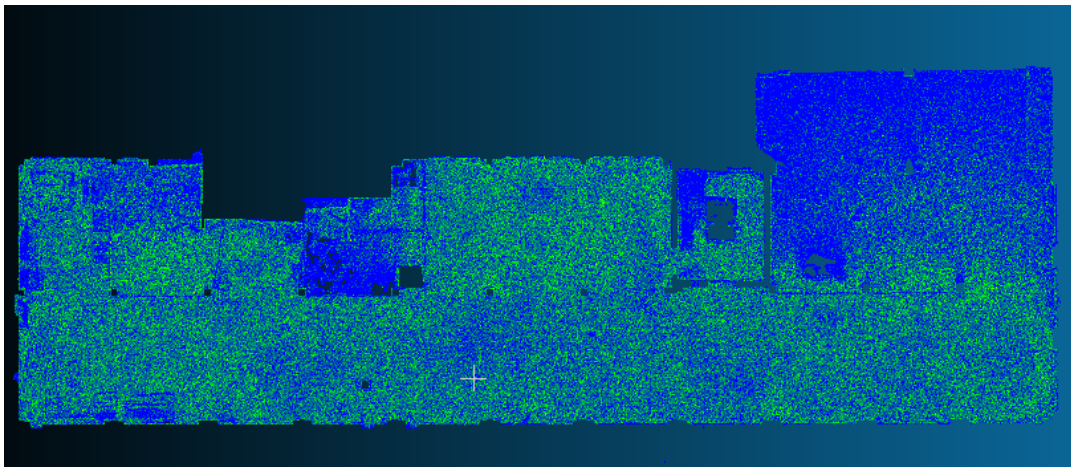
Kuva 18. Vasemmalla olevassa y-akselissa pisteiden määrä ja x-akselissa läheisten pisteiden määrä. Taulukosta selviää läheisten pisteiden määrä prosentuaalisesti. Lohkot 2 ja 3.

Tulokset lohkojen 2 ja 3 osalta kuvassa 18, pistepilvi on liitteen 1 kuvassa 1. Pistepilven resoluutio on tiheämpää kuin lohossa yksi ja pisteitä, joilla ei ole pisteitä lähellä on 46,3 %. Tulos ei ole tavoiteltu, mutta se on parempi kuin loholla 1.

## 6.2 NavVis VLX

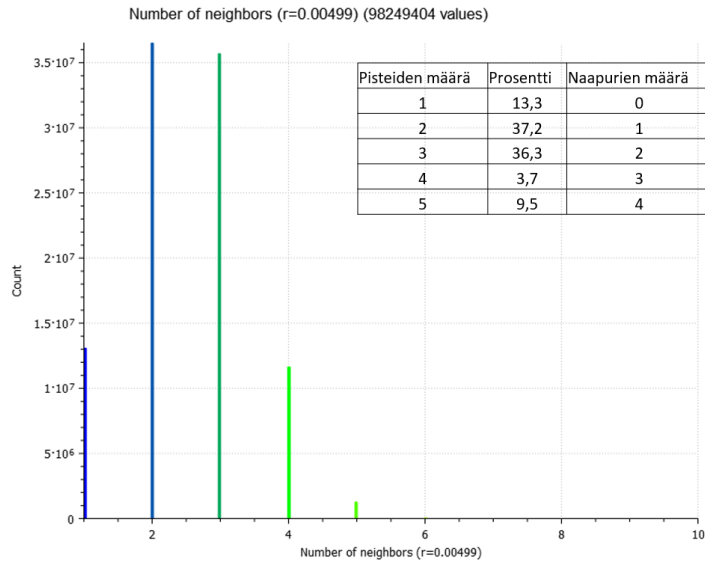
### Resoluutio

NavVis VLX:n pistepilven resoluution laskenta tehdään samalla tavalla kuin edellisessä luvussa laskettiin P40-keilaimen kohdalla. Kuvassa 19 on VLX:n keilausdata lohkolta 1. Datan laskemiseen on käytetty täysin samoja työkaluja ja arvoja kuin luvussa 6.1.



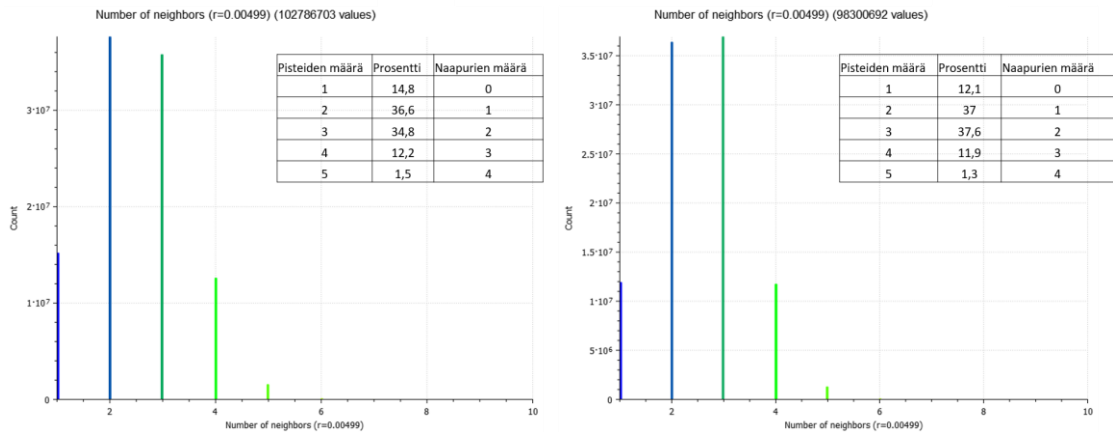
Kuva 19. Pisteiden väri kertoo läheisten pisteiden määrä. Värien tarkoitus esittää seuraavassa kuvassa, kuva 19.

Pistepilven väryksestä erottaa, että se on resoluutioltaan tiheämpää kuin P40:n data. Pistepilvessä on enemmän vihreää väriä kuin sinistä väriä. Kuvassa 20 olevasta taulukosta selviää, että pisteitä, joilla ei ole yhtään läheistä pistettä, on vain 13,3 %.



Kuva 20. Vasemmalla olevassa y-akselissa pisteiden määrä ja x-akselissa läheisten pisteiden määrä. Taulukosta selviää läheisten pisteiden määrä prosentuaalisesti. Lohko 1.

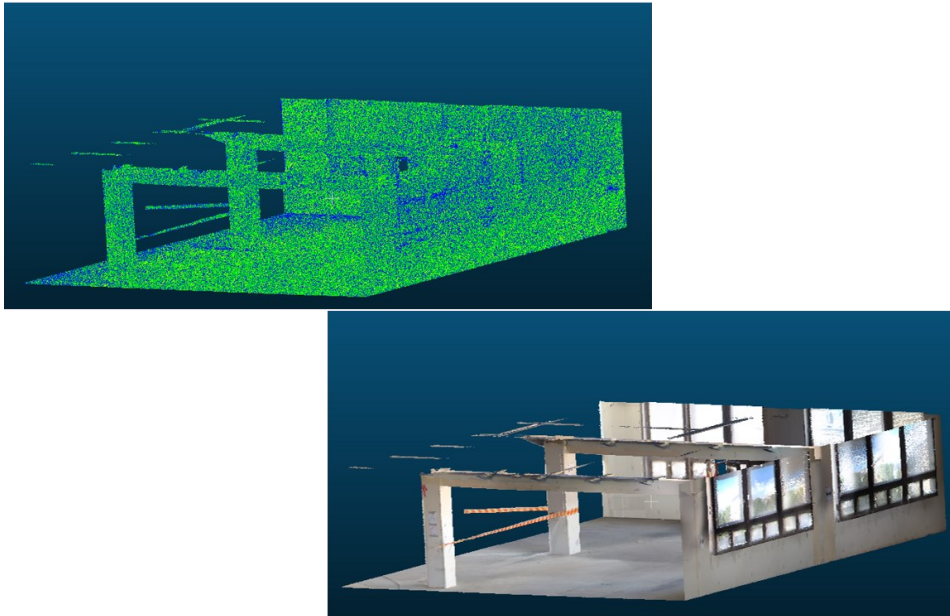
Tulokset lohkojen kaksi ja kolme osalta kuvassa 21 (pistepilvi on liitteen kaksi, kuvassa yksi). Resoluutio on hyvin samankaltainen kuin ensimmäisellä loholla, mutta eroa pisteiden määrän ollessa viisi.



Kuva 21. Vasemmalla olevassa y-akselissa pisteiden määrä ja x-akselissa läheisten pisteiden määrä. Taulukosta selviää läheisten pisteiden määrä prosentuaalisesti. Lohkot 2 ja 3.



Kuvassa 22 on lohkolta yksi pistepilveä, joka on keilattu VLX keilaimella. Pistepilven resoluutio on korkea, koska pisteet ovat alle viiden millimetrin päässä toisistaan.



Kuva 22. Vasemmalla puolella on pistepilvi, jossa esitetään pistetiheys. Oikeanpuoleiseen kuvaan liitetty tekstuuri pisteistä mukaan. Keilattu NavVis VLX:llä.

Resoluution tarkastelua on tehty myös visuaalisesti. Kuvassa 19 matalalla resoluutiolla olevat alueet, erottuvat kuvasta sinisen värin vuoksi. Pienemmällä resoluutiolla mitatut alueet johtuvat siitä, että kohdetta ei ole päästy mittaamaan tarpeeksi läheltä esimerkiksi sulkunauhan takia.

### Kohina

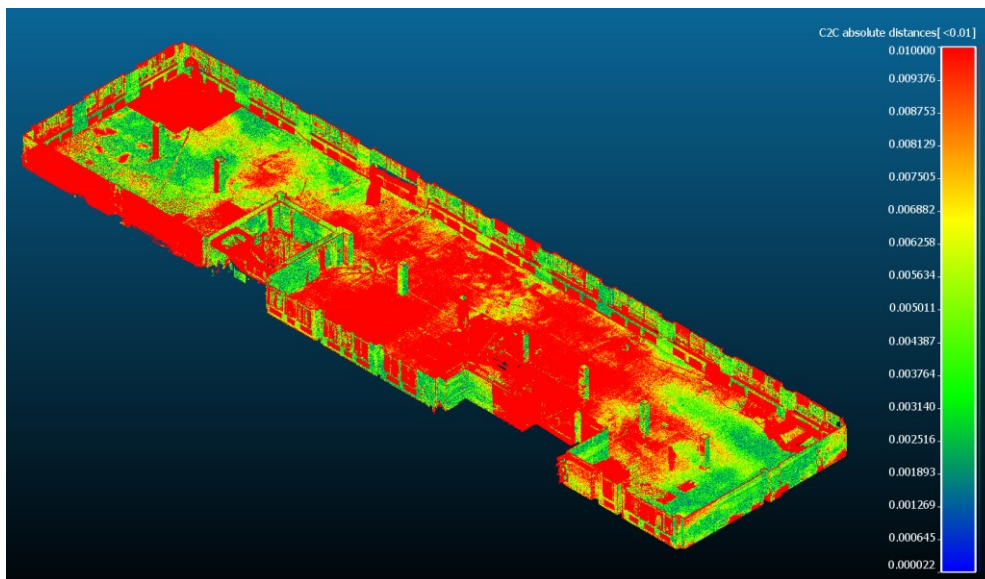
Laserkeilaimien tuottamaa dataa verrataan toisiinsa, jotta voidaan selvittää, kuinka tarkasti NavVis VLX-keilaimella voidaan mitata. Leica P40-keilain suoriutuu pisteiden tarkkuusvaatimuksista (YTV2012) taulukon 1 tulosten perusteella. Tässä osiossa on kuvat vain lohkoista 1, loput kuvat ovat liitteissä.



Pistepilvet piti pilkkoa CloudCompare -ohjelmaa varten, koska se ei toiminut kahdella useamman gigatavun kokoisilla tiedostoilla. Aineisto on pilkottu lohkoittain ja lohkot on vielä pilkottu kahteen eri tiedostoon: ensimmäisessä on data lattiasta sekä seinistä, ja toisessa on data katosta sisäpuolelta katsottuna.

Vertailu suoritettiin Compute cloud/cloud distance -työkalua käyttäen. Ohjelmaan asetettiin maksimietäisyydeksi 0,01 metriä. P40:n pistepilvi toimi referenssi tiedostona VLX:n pistepilvälle. Ohjelma laskee P40:n pistepilvestä etäisyydet VLX:n pistepilveen.

Lohko 1 valittiin tarkasteluun kattorakenteiden takia. Katon alapuolella on palkkeja, joiden avulla voidaan verrata datan luotettavuutta myös katon suhteen. Kuvassa 23 on lohkon 1 keilainten datat verrattuna toisiinsa. Punaisella värillä on merkitty alueet, joissa VLX:n pistepilvi on yli senttimetrin päässä P40:n pistepilvestä. Etäisyys on laskettu x-, y- ja z-koordinaatin suuntaan.

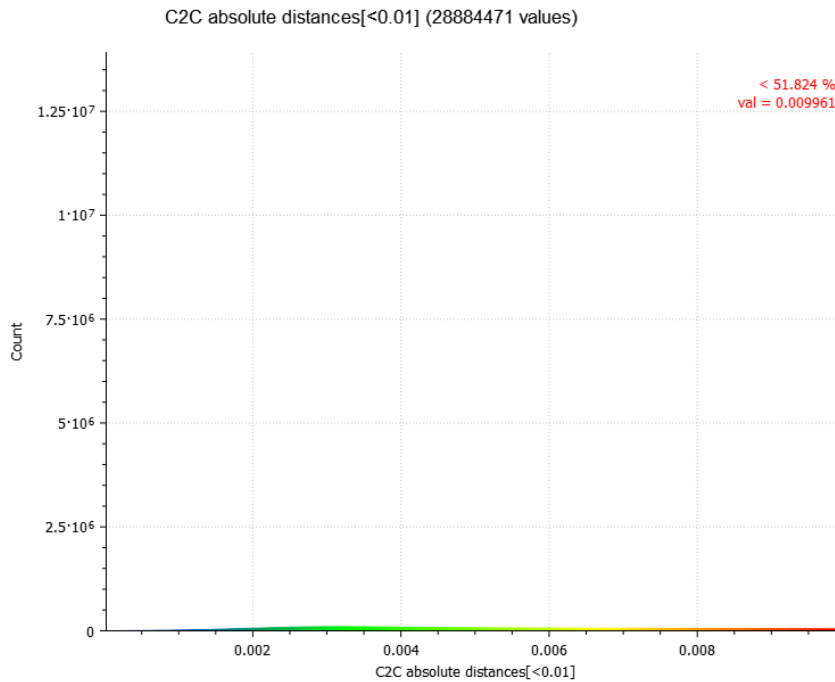


Kuva 23. Lohkon 1 laserkeilainten välistä vertailua.

Seinien reunustoilla on yli senttimetrin eroja, koska siellä on ollut tavaraa edessä. Vasemmassa reunassa oleva seinä näyttyy punaisella värillä suoja-  
peitteen takia, myös ikkunat menevät myös yleensä yli toleranssin. Tarkemmin

tulosten pohdintaa on luvussa 7 Tulosten esittely. Luvussa pohditaan myös, mistä virheet saattavat johtua.

Lohkoilla 2 ja 3 lattian ja seinien tarkkuus on parempi. Lohkolla 2 lattian pinta-alasta noin 15 % ei ole yhden senttimetrin toleranssissa. Kolmannella loholla toleranssin ulkopuolella on vain noin 5 % lattian pinta-alasta.

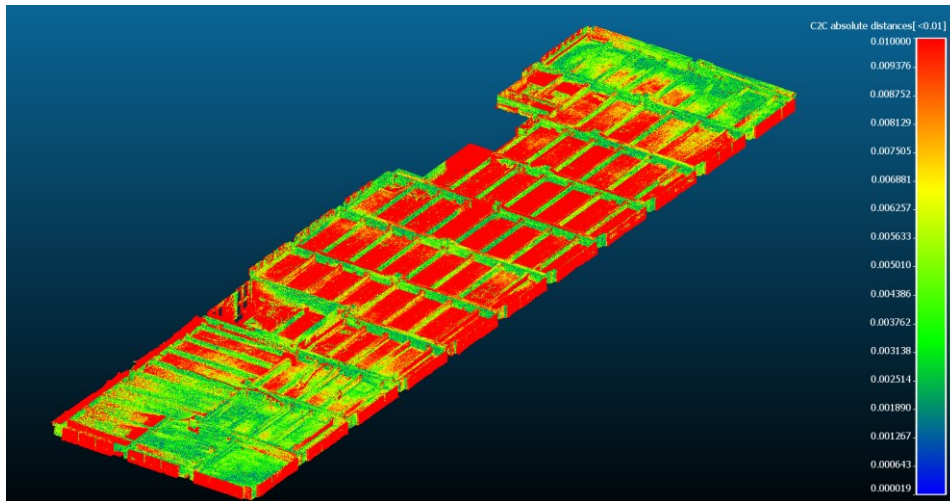


Kuva 24. Lohkon 1 lattian ja seinien toleranssi.

Kuvassa 24 on esitetty, kuinka monta prosenttia kuvan 23 pisteistä on toisistaan alle senttimetrin sisällä. Toleranssin sisällä pisteistä on 52 %, loput pistepilven pisteet ovat toisistaan yli senttimetrin päässä.

Lohkolla 2 (liite kaksi, kuva kaksi) pistepilvien pisteet ovat lähempänä toisiaan, lattian ja seinien osalta toleranssin sisällä on 81 % pisteistä ja pisteitä on 31 miljoonaa. Lohkolla 3 (liite 2, kuva 4) toleranssin sisään osuu 85 % kaikista mitatuista pisteistä, ja niitä on 27 miljoonaa.

Seuraavaksi käsitellään tulokset katon osalta lohkoittain. Palkit oli mitattava tarkasti, ja ne piti mitata tiheällä resoluutiolla. Kuvassa 25 on vertailun tulokset katon osalta, lohkosta 1. Palkit on saatu mitattua tarkasti kummallakin mittauslaitteella, ero pistepilvien välillä noin 2,5–5 millimetriä, mutta itse katto on mennyt toleranssin yli. Sama on havaittavissa myös lohkon 1 lattian kohdalla; huoneen päädyt ovat toleranssin sisällä, mutta keskikohta huoneesta ei ole.

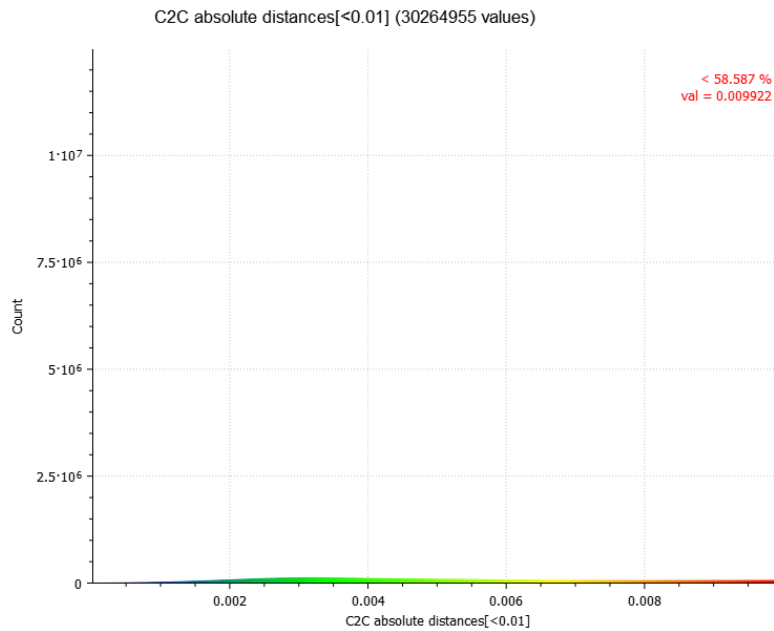


Kuva 25. Lohkon 1 vertailu katon osalta.

Lohkolla 2 (liite 2, kuva 3) pistepilvien pisteet ovat kauempana toisistaan kuin lohkolla 1. Katon alapuolella olevat rakenteet ovat toleranssin sisällä, mutta tasainen osuus katosta ei ole. Viimeisellä lohkolla tulokset ovat katon osalta onnistuneita, ja punaisen väristä pistepilveä on vain noin 10 % katon pinta-alasta.

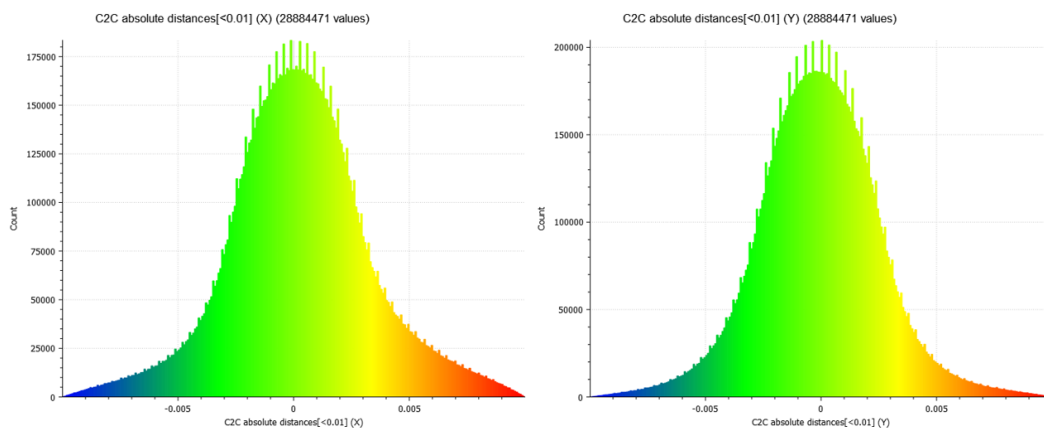
Kuvassa 26 näkyvät pisteet, jotka osuvat senttimetrin toleranssiin sisään lohkon 1 katon osalta. Toleranssin sisään osuu 59 % pisteistä. Se on hieman enemmän kuin lattian kohdalla.

Lohkolla 2 51 % pisteistä osui toleranssin sisälle ja kolmannella lohkolla (liite 2, kuva 5) 79 %. Tasaisen katon vertailun tulosten perusteella toleranssin sisään osuu 63 % pisteistä. Ikkunat menevät toleranssin ulkopuolelle, ja ne vaikuttavat lopulliseen tulokseen.



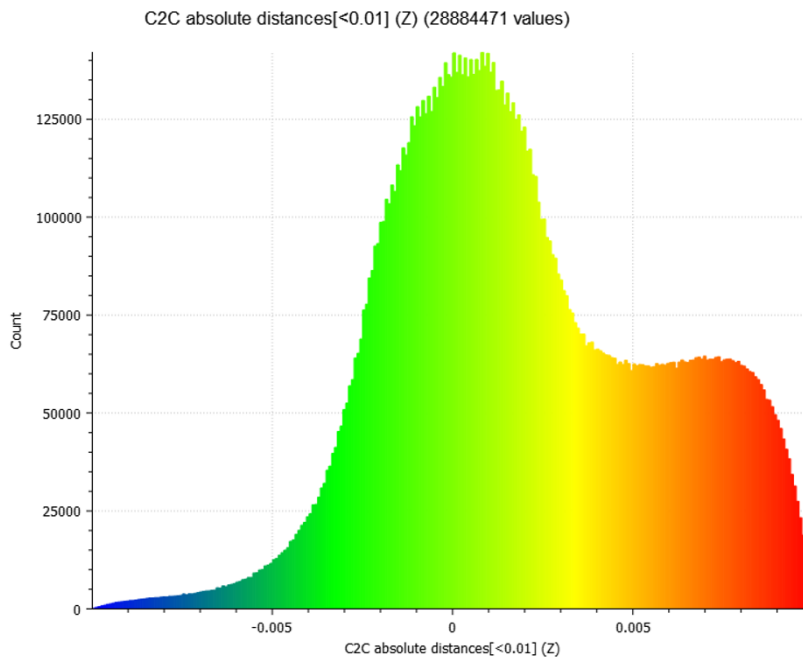
Kuva 26. Lohkon 1 katon tulokset. Toleranssin sisään osuu 58,6 % pisteistä.

Lohkolla 1 tarkastellaan vielä tarkemmin virheitä, koska siellä toleranssin sisään päätyi vain 51 % ja 59 % pistepilven pisteistä. Vertailu tehtiin 3D-koordinaateilla (3D-etäisyys), ja seuraavaksi verrataan koordinaattien eroja yksitellen. Kuvassa 27 on pistepilvien vertailua x- ja y-koordinaatin osalta.



Kuva 27. Lohkon 1 lattian ja seinien vertailu. Vasemmalla puolella x-koordinaatin tulokset ja oikealla y-koordinaatin tulokset.

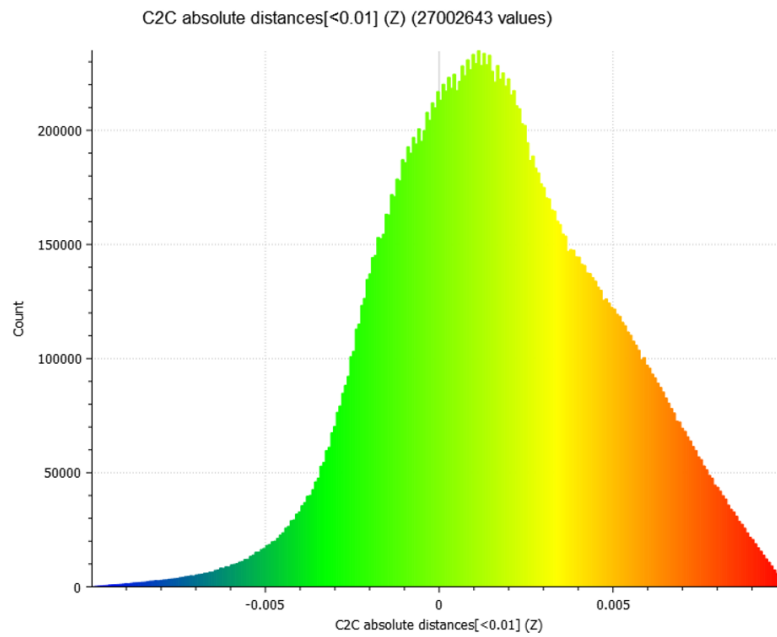
Mittaustulosten odotetaan noudattavan normaalijakaumaa, jolloin mittausvirheet kertyvät keskiarvon molemmille puolille tasaisesti. Kuvaajat muodostavat normaalikäyrän kuvassa 27, joten virheet ovat kertyneet tasaisesti arvon 0 molemmille puolille. Kuvassa 28 on tulokset z-koordinaatin osalta lohkon 1 lattiasta ja seinistä.



Kuva 28. Lohkon 1 z-koordinaatin tulokset.

Kuvasta voidaan sanoa, että tämä ei noudata normaalijakauman käyrää. Virheet kasautuvat viiden millimetrin jälkeen ja kasvavat jopa jonkin verran. Katon kanssa tehtiin sama vertailu, ja tulokset ovat samanlaisia. X- ja y-koordinaatti noudattaa normaalijakauman käyrää, mutta z-koordinaatti ei.

Lohkossa 2 tulokset ovat samanlaisia kuin ensimmäisellä loholla. Kolmannella loholla z-koordinaatin tulokset ovat parempia, ja virheet jakautuvat tasaisemmin. Lohkon 3 lattian tulokset on esitetty kuvassa 29.



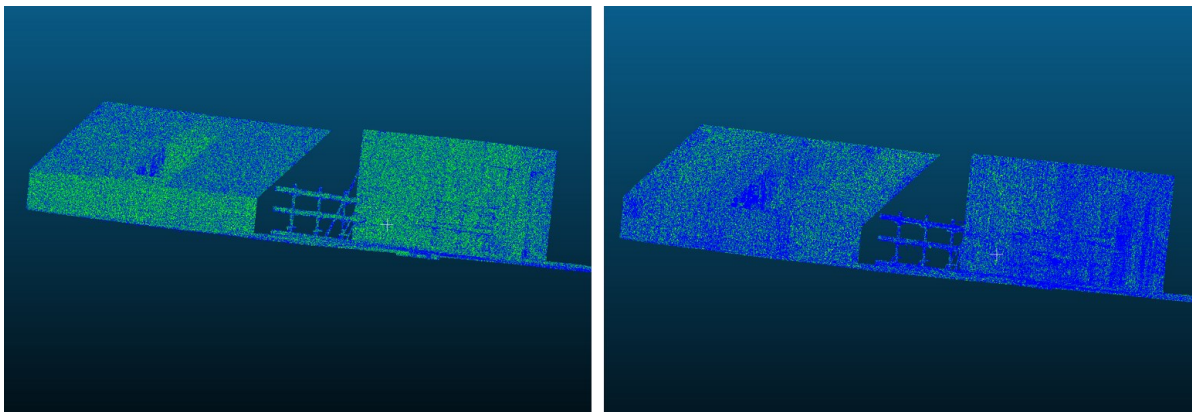
Kuva 29. Lohkon 3 lattian ja seinien tulokset z-koordinaatin osalta.

Kolmannen lohkon tulokset jakautuvat enemmän nollan positiiviselle puolelle. Nollan negatiivisella puolella tuloksista on 32 % pistepilvien pisteistä. Virheistä ja siitä, mistä virheet vertailussa johtuivat, on kerrottu luvussa 7 Tulosten esittely.

## 7 Tulosten esittely, NavVis

Tässä työssä verrataan Leica P40:n tuottamaa pistepilveä NavVis VLX:n pistepilveen. P40-laserkeilaimen pistepilvi on keilattu harvemmalla pistetiheydellä, mutta laitteella voi keilata myös tiheämmällä pistetiheydellä. Työn tarkoituksena oli selvittää VLX-keilaimen pistepilven tiheys ja pistetarkkuus. Vertailun tavoitteena ei ole selvittää, kumpi laitteista on parempi.

NavVis VLX selviää resoluution osalta yleisistä tietomallivaatimuksista, laitteella voi laserkeilata mittauspisteet alle viiden millimetrin säteelle toisistaan. Keskimäärin tässä tutkimuksessa NavVis VLX-keilaimen pistepilvi on tiheämpää kuin Leica P40. VLX:n pistepilvessä noin 87 % on piste alle 5 millimetrin säteellä ja P40:n pistepilvessä vastaava luku on noin 50 %. Kuvassa 30 esitetään ero pilvien tiheydessä, vasemmanpuoleisessa kuvassa on parempi resoluutio ja eron huomaa kuvasta värien perusteella.



Kuva 30. NavVis VLX-pistepilven tiheys ja Leica P40-pistepilven tiheys. Kuva on lohkolta kaksi.

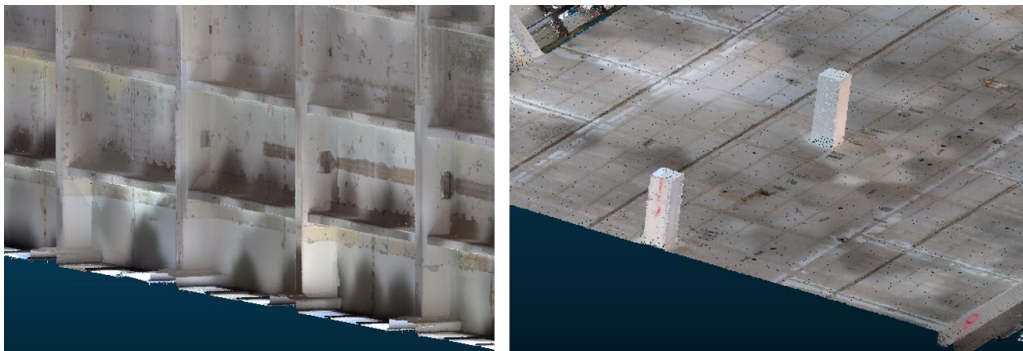
Pistetarkkuus ei jokaisessa kohdassa riitä ainakaan tämän työn puitteissa täyttämään yleisiä tietomallivaatimuksia. Lattiat, seinät sekä katon alapuoliset rakenteet mallintuvat tarkasti, alle senttimetrin tarkkuudella. Suurimmat eroavaisuudet näyttävät olevan tasaisessa katossa rakenteiden välissä sekä lattian kohdalla. Taulukossa 2 on esitetty vertailun tulokset koottuna.

Yläsarakkeessa on lohkot 1, 2 ja 3. Prosentit kertovat, kuinka monta prosenttia pistepilvien vertailussa osuu senttimetrin toleranssin sisään. Oikealla olevassa keskiarvossa on tulokset koko lattiasta ja katosta. Vasemmalla alareunassa oleva keskiarvo jakaa tulokset lohkoittain.

Taulukko 2. Vertailun tulokset lohkoittain.

	<b>L1 (%)</b>	<b>L2 (%)</b>	<b>L3 (%)</b>	<b>ka (%)</b>
lattia	51,8	80,5	85,1	72,5
katto	58,6	50,9	79,1	62,9
ka	55,2	65,7	82,1	67,7

Katossa on myös korkoeroja, lohkolla 3 katon alapinta on noin 50 senttimetriä alempana. Lohkoilla 1 ja 2 on palkkeja katon alapuolella, mutta lohkolla 3 katto on tasainen. Kuvassa 31 on esimerkki katoista sisäpuolelta katsottuna.



Kuva 31. NavVis VLX-keilausdataa lohkoilta 1 ja 3.

Lattioiden erot johtuvat siitä, että kaikkia lattiamateriaaleja ei ollut purettu Leicalla mitattaessa. Katon osalta on myös suoritettu purkua, joten sen takia tulosten vertailussa on virhettä. Mittaukset suoritettiin P40:llä maaliskuussa 2020, ja NavVis mittasi rakennuksen kesäkuussa 2020. Mittaukset tulisi tehdä samanlai-



sisäolosuhteissa, jotta muuttujia olisi mahdollisimman vähän. Neljässä kuukaudessa olosuhteet kerkeävät muuttumaan, muun muassa joitain seiniä oli purettu kokonaan pois.

Palkit mitattiin tarkimmin molemmilla laitteilla, ja vertailussa virhettä on pistepilvien välillä 2–5 millimetriä. Tiedetään, että palkkeja ei ole käsitelty mittausten välissä. Sen perusteella voidaan sanoa, että tulokset ovat onnistuneet. Tarkkoja tietoja ei ole, mitä kaikkia pintoja on käsitelty. Voidaan olettaa, että niissä kohdissa, joissa ero on pistepilvien välillä vähäinen (alle 5 millimetriä), ne ovat pysyneet samana molempien mittausten välillä.

Nurkissa on myös eroja tarkkuudessa, ja tiedetään, että nurkka-alueet eivät muodostu pistepilviin kovin tarkasti VLX:llä. Ne pyöristyvät, ja tarkkaa nurkkalinjaa ei voi mitata eikä mallintaa. Mallintamiseen voidaan käyttää apuna Indoor-Viewer-ohjelmassa olevia 360°:n panoraamakuvia. Kahden seinän nurkka-alue voidaan havaita visuaalisesti ja määritellä malliin seinälinjojen avulla. [28]

## 8 Pohdinta

Työn tarkoituksena oli selvittää voiko, NavVis VLX-laserkeilaimella mitata lähtötietoja Yleisten tietomallivaatimusten mukaisesti. Vielä näillä tuloksilla ei voida todeta täysin, koska mittauksissa oli havaittavissa epävarmuutta muuttuneiden olosuhteiden takia. Luotettavat tulokset ovat tulleet vertailusta palkkien osalta. Näin alustavasti kuitenkin näyttää siltä, että VLX selviää näistä vaatimuksista. Aihe vaatii kuitenkin lisää todentamista. Tarvitaan kohde, jossa on täysin stabiilit olosuhteet ja kontrollipisteitä takymetrillä mitattuna.

VLX sopii myös moniin muihin mittauksiin hyvin. Sillä on nopea kerätä dataa ja pistepilven käsittely on helppoa. Mitatessa kädet jäävät vapaaksi, ja sitä ominaisuutta ei taida olla muilla valmistajilla.

Mittaukseen käytettävässä ajassa VLX on perinteisiä maalaserkeilaimia nopeampi, kohteen mittaukseen kului aikaa P40-keilaimella noin kuusi tuntia ja VLX-keilaimella 1,5 tuntia. Käsittelyaika Leican datassa oli 6–8 tuntia, kun taas VLX:ssä 16 tuntia tarkempien vaatimusten takia. Normaalisti käsittely vie noin yhdeksän tuntia oletusasetuksilla. IndoorViewer-ohjelmalla käsittely on kuitenkin helpompaa.

Resoluution mittaaminen oli myös melko hankalaa, koska ihan absoluuttista totuutta ei saa käytetyillä menetelmillä. Oikeiden ohjelmien löytämiseen tuhlaantui aikaa, koska niistä ei välttämättä löytynyt tarvittavia työkaluja tai ne eivät muuten vastanneet tarpeita.

## Lähteet

- 1 Laurila, Pasi. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemi: Rovaniemen Ammattikorkeakoulu.
- 2 Joala, Vahur. 2006. Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu. Verkkoaineisto  
<<https://docs.google.com/file/d/0B3MfAqwXowlN2Q4MzJIYjktZTA5Ni00ZGMylTikOWUtNTQzMdIwZTI3NDVm/edit?hl=en&pli=1>>. Luettu 03.03.2021
- 3 Leica ScanStation P30/P40 Product Specifications datasheet. 2016. Leica.
- 4 Kukko, Antero. 2013. Mobile Laser Scanning – System development, performance and applications. Kirkkonummi: Suomen Geodeettinen laitos.
- 5 Holopainen, Markus; Hyypä, Juha & Vastaranta, Mikko. 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. Helsinki: Helsingin yliopiston metsätieteiden laitos.
- 6 Rope, Vesa & Laari, Jussi. 2015. Laserkeilauksen opetuksesta Metropolissa. Maankäyttö-lehti 4/2015.
- 7 Toschi, Isabella; Rodríguez-González, Pablo; Remondino, Fabio; Minto, Simone; Orlandini, S & Fuller, A. 2015. Accuracy evaluation of a mobile mapping system with advanced statistical methods. Verkkoaineisto.  
<[https://www.researchgate.net/publication/273203539\\_Accuracy\\_evaluation\\_of\\_a\\_mobile\\_mapping\\_system\\_with\\_advanced\\_statistical\\_methods](https://www.researchgate.net/publication/273203539_Accuracy_evaluation_of_a_mobile_mapping_system_with_advanced_statistical_methods)>. Luettu 23.03.2021.
- 8 Cronvall, Timo; Kråknäs, Pasi & Turkka, Tommi. 2012. Laserkeilauksen käyttö liikennetunneleiden kunnossapidon hallinnassa. Helsinki: Liikennevirasto. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 41/2012.
- 9 Partonen, Ilkka. 2019. Laserkeilaus. Luentomateriaali. Metropolia ammattikorkeakoulu.
- 10 Understanding Euler Angles. Verkkoaineisto. Chrobotics.  
<<http://www.chrobotics.com/library/understanding-euler-angles>>. Luettu 22.03.2021.
- 11 Autonominen ajaminen. Verkkoaineisto. Maanmittauslaitos.  
<<https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematieto/autonominen-ajaminen>>. Luettu 22.03.2021.
- 12 Scalable reality capture. 2021. Verkkoaineisto. NavVis. <<https://www.navvis.com/m6>>. Luettu 22.03.2021.

- 13 Yleiset tietomallivaatimukset. 2012. Verkkoaineisto. Buildingsmart.fi. Tietomallintamisen yhteistyöfoorumi. <<https://buildingsmart.fi/yleiset-tietomallivaatimukset-ytv/>>. Luettu 25.03.2021.
- 14 Mannila, Merja. 2020. Rahapula kiusaa tietomallivaatimusten päivitystä – yli 70 toimijaa perää valtion tukea. Verkkoaineisto. Rakennuslehti 12/2020. <<https://www.rakennuslehti.fi/2020/12/rahapula-kiusaa-tietomallivaatimusten-paivitysta-yli-70-toimijaa-peraa-valtios-tukea/>>. Luettu 12.02.2021.
- 15 Kallinen, Anna-Riitta. 2020. YTV2020 Yleiset tietomallivaatimukset, CO-BIM2020 Common BIM Requirements. Verkkoaineisto. buildingSMART Finland. <<https://buildingsmart.fi/julkilausuma-ytv2020-yleiset-tietomallivaatimukset-paivityksen-merkityksellisyydesta-on-julkaistu/>>. Luettu 13.02.2021.
- 16 Koordinaatti- ja korkeusjärjestelmät. Verkkoaineisto. Maanmittauslaitos. <<https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/tutkimustoiminta/tutkimusryhmat/paattyneet-tutkimusryhmat/koordinaattijarjestelmat-ja-0>>. Luettu 15.02.2021.
- 17 Koordinaatti- ja korkeusjärjestelmät. 2016. Verkkoaineisto. Helsingin kaupunkimittausosasto. <[https://www.hel.fi/helsinki/fi/kartat-ja-liikenne/kartat-ja-paikkatieto/paikkatiedot+ja+-aineistot/koordinaatitot\\_ja+\\_korkeudet/koordinaatti\\_ja\\_korkeusjarjestelmat](https://www.hel.fi/helsinki/fi/kartat-ja-liikenne/kartat-ja-paikkatieto/paikkatiedot+ja+-aineistot/koordinaatitot_ja+_korkeudet/koordinaatti_ja_korkeusjarjestelmat)>. Luettu 17.02.2021.
- 18 Ollikainen, Marko & Ollikainen, Matti. The Finnish coordinate reference system. Verkkoaineisto. Maanmittauslaitos. <[https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/old/Finnish\\_Coordinate\\_Systems.pdf](https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/old/Finnish_Coordinate_Systems.pdf)>. Luettu 20.02.2021.
- 19 Perustietoa koordinaatistoista. Verkkoaineisto. Paikkaoppi. <<https://www.paikkaoppi.fi/fi/yhteystiedot/>>. Luettu 02.04.2021.
- 20 Teoreettinen keskivesi (MW) ja geodeettiset korkeusjärjestelmät Suomessa. 2021. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/keskivesitaulukot>>. Luettu 24.03.2021.
- 21 Leica ScanStation P40/P30 System Field Manual. Version 4.0. Verkkoaineisto. Leica Geosystems AG. <<https://surveyequipment.com/assets/index/download/id/735/>>. Luettu 20.04.2021.
- 22 Walsh, Gregory. 2015. Leica ScanStation P-Series – Details that matter. Verkkoaineisto. Leica. <[https://blog.hexagongeosystems.com/wp-content/uploads/2015/12/Leica\\_ScanStation\\_P-Series\\_details\\_that\\_matter\\_white\\_paper\\_en-4.pdf](https://blog.hexagongeosystems.com/wp-content/uploads/2015/12/Leica_ScanStation_P-Series_details_that_matter_white_paper_en-4.pdf)>. Luettu 25.03.2021.
- 23 Rinne, Mitja. 2017. Pintamateriaalin vaikutus Leica P40- ja Leica MS50 -keilainten tarkkuuteen. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

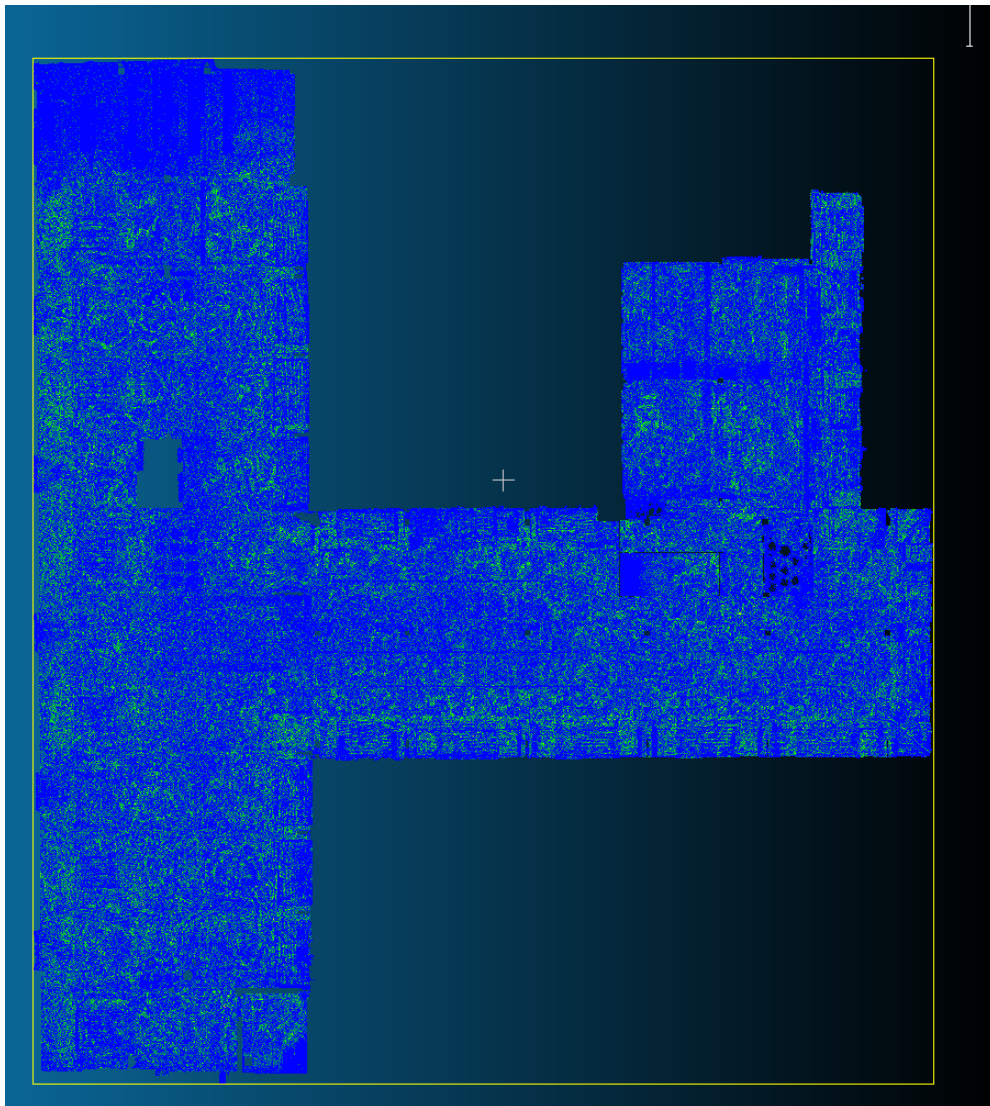
- 24 Versatile reality capture. 2021. Verkkoainesto. NavVis. <<https://www.navvis.com/vlxLuettu>>. 25.03.2021.
- 25 NavVis VLX, product datasheet. NavVis.
- 26 Evaluating the accuracy of a wearable mapping system. 2020. NavVis.
- 27 Soikkeli, Antti. 2021. Regional Manager, Exact AIP-Mittaus Oy. Sähköpostikeskustelu 26.03.2021.
- 28 Luoma, Sami. 2021. Project Manager Scan to BIM, Exact AIP-Mittaus Oy. Puhelinkeskustelu 08.04.2021.
- 29 Leko, Matej. 2021. Senior Technical Account Manager, NavVis. Sähköpostikeskustelu 29.03.2021.
- 30 Mäeots, Siim. 2021. Exact Geomark AS. Sähköpostikeskustelu 29.03.2021.

## Tulokset Leica P40

Taulukko 1. P40-pistepilven asemoinnin tulokset

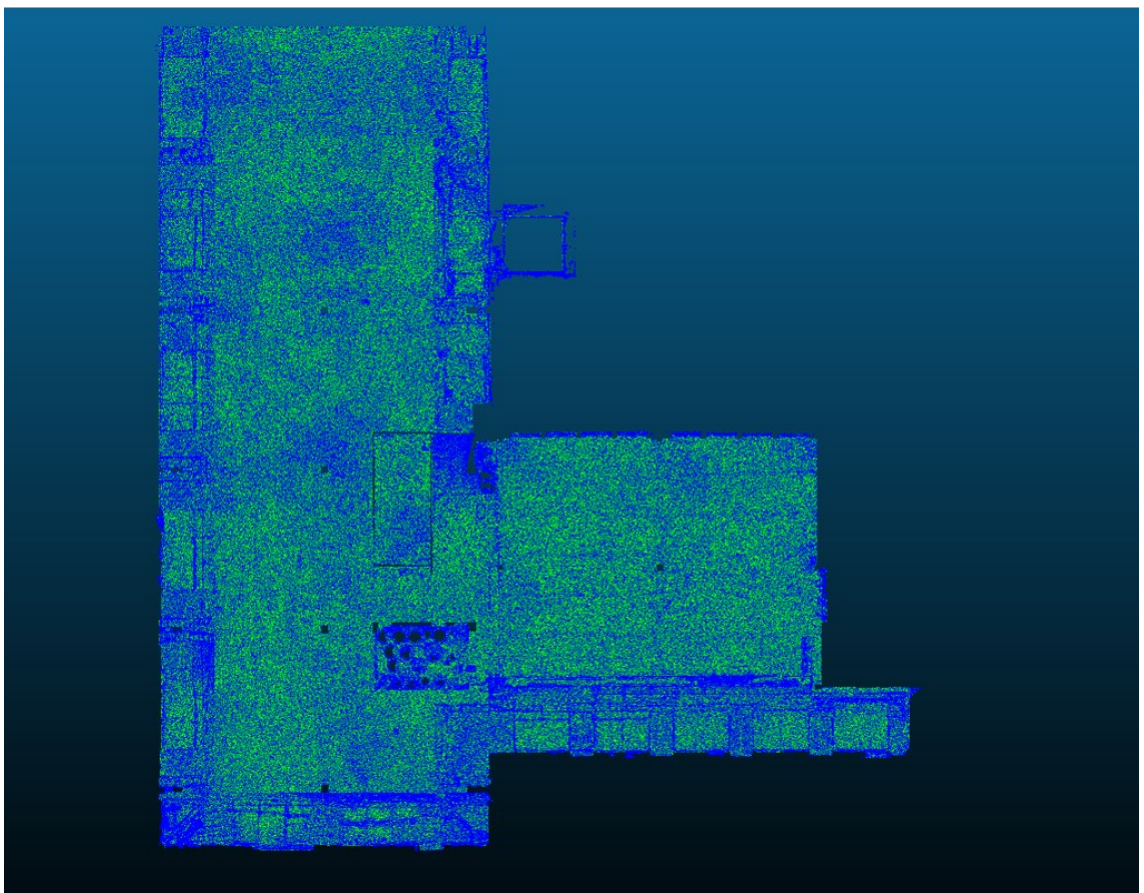
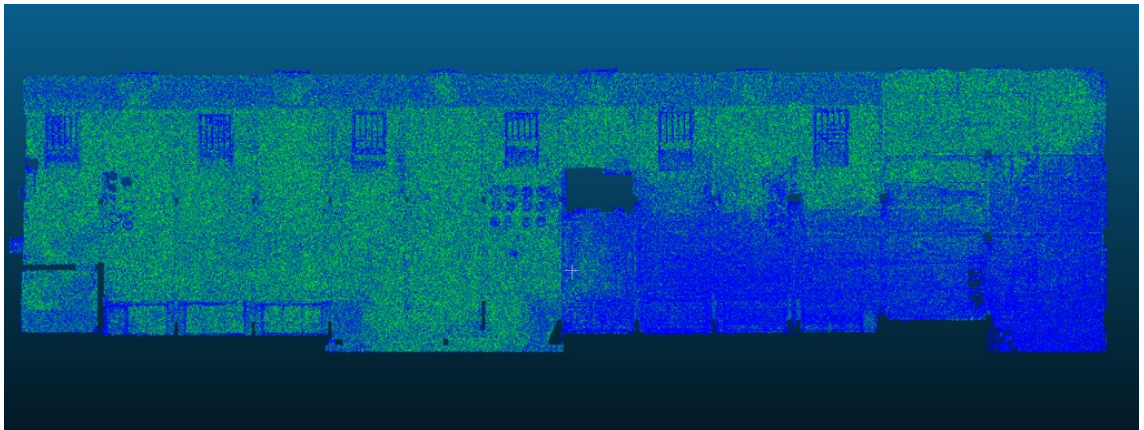
	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	DXY (m)	DXYZ (m)
5015	-0,001	0,001	-0,001	0,001	0,002
5014	0,000	-0,001	0,000	0,001	0,001
5013	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001
5012	-0,001	0,001	-0,001	0,001	0,002
5011	0,000	0,003	0,001	0,003	0,003
5008	0,000	-0,001	-0,001	0,001	0,001
5007	0,000	-0,002	0,000	0,002	0,002
5006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5002	-0,002	0,001	0,000	0,002	0,002
5001	0,001	-0,001	0,001	0,001	0,002
5000	0,002	-0,001	-0,001	0,002	0,002
5009	0,001	0,001	-0,001	0,001	0,002
5004	0	0,001	-0,004	0,001	0,004
5003	0	0,001	-0,001	0,001	0,001
4005	0,001	0,002	-0,001	0,002	0,002
Laskelmat	DX (m)	DY (m)	DZ (m)	DXY (m)	DXYZ (m)
Poikkeamien keskiarvo	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Poikkeamien keskihajonta	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Maksimiarvo	0,002	0,003	0,001	0,003	0,004
Yläraja	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Neljä alinta ovat kontrollipisteitä (5009–4005).



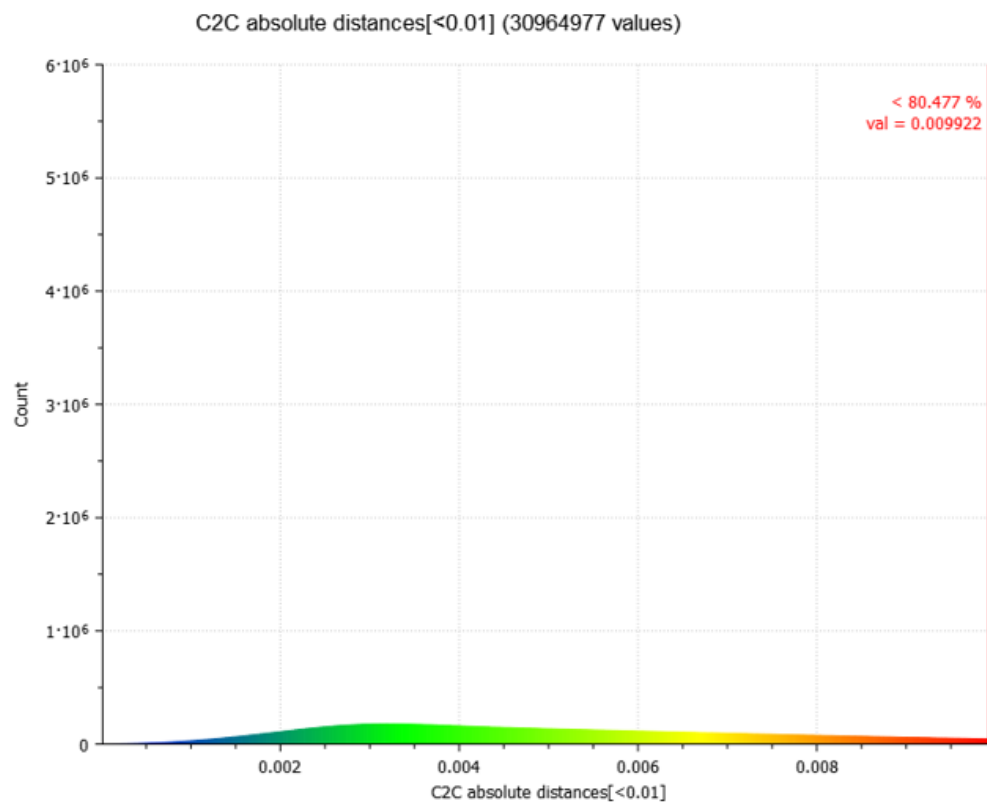
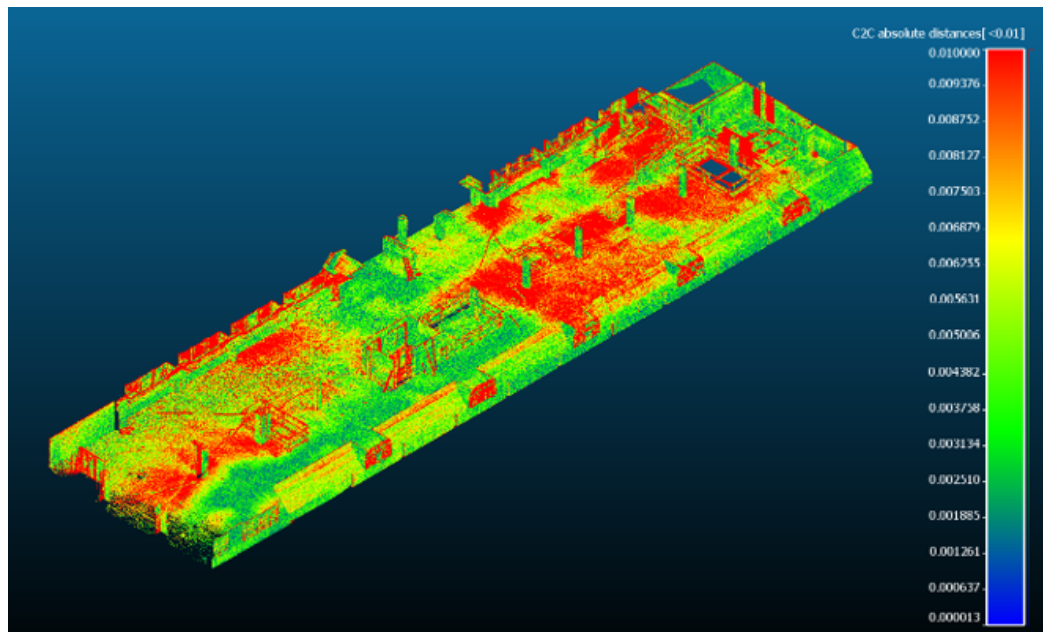
Kuva 1.Lohkon 2 ja 3 P40-pistepilven resoluutio.

## Tulokset NavVis VLX

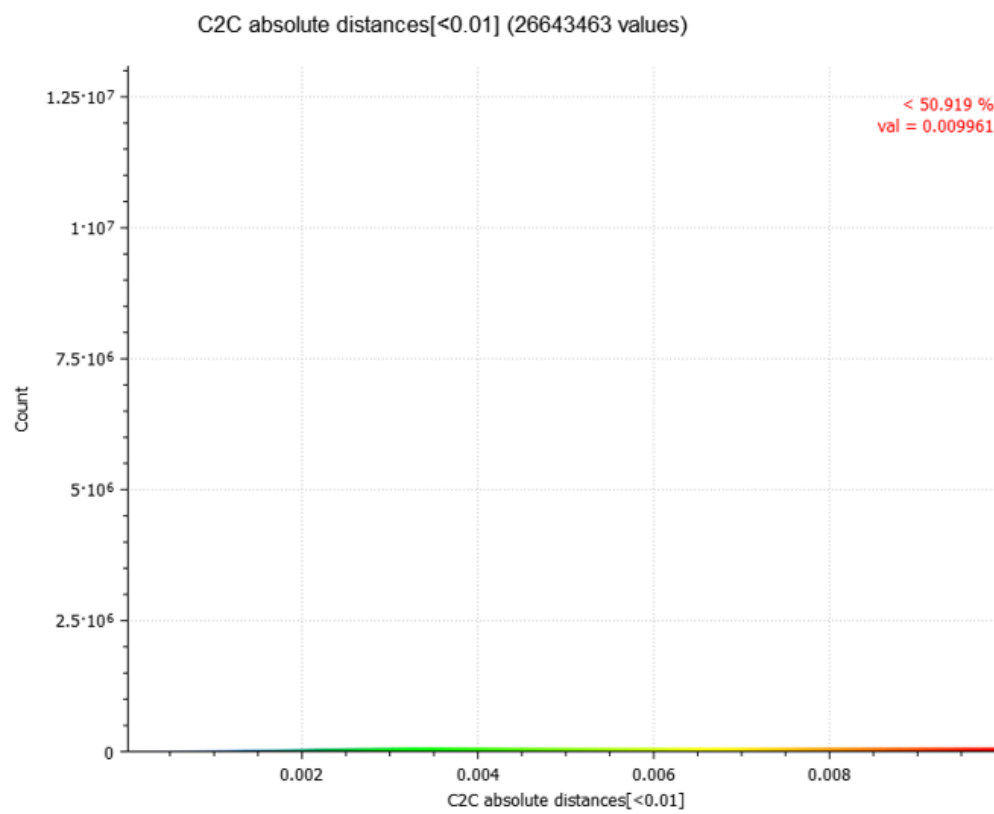
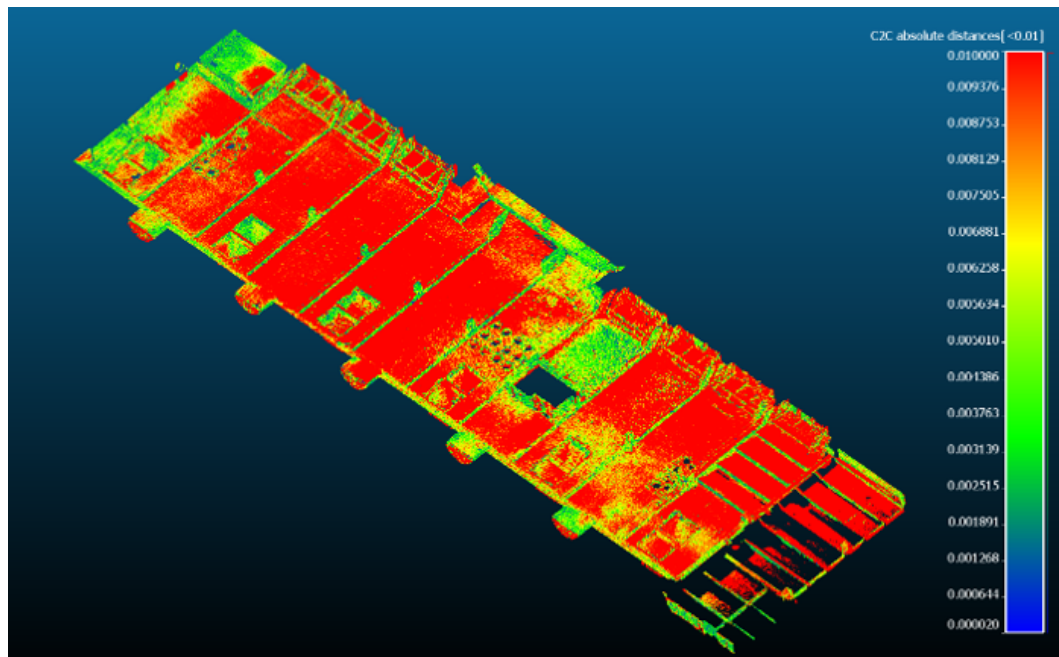


Kuva 1. Lohkojen 2 ja 3 tiheys VLX.

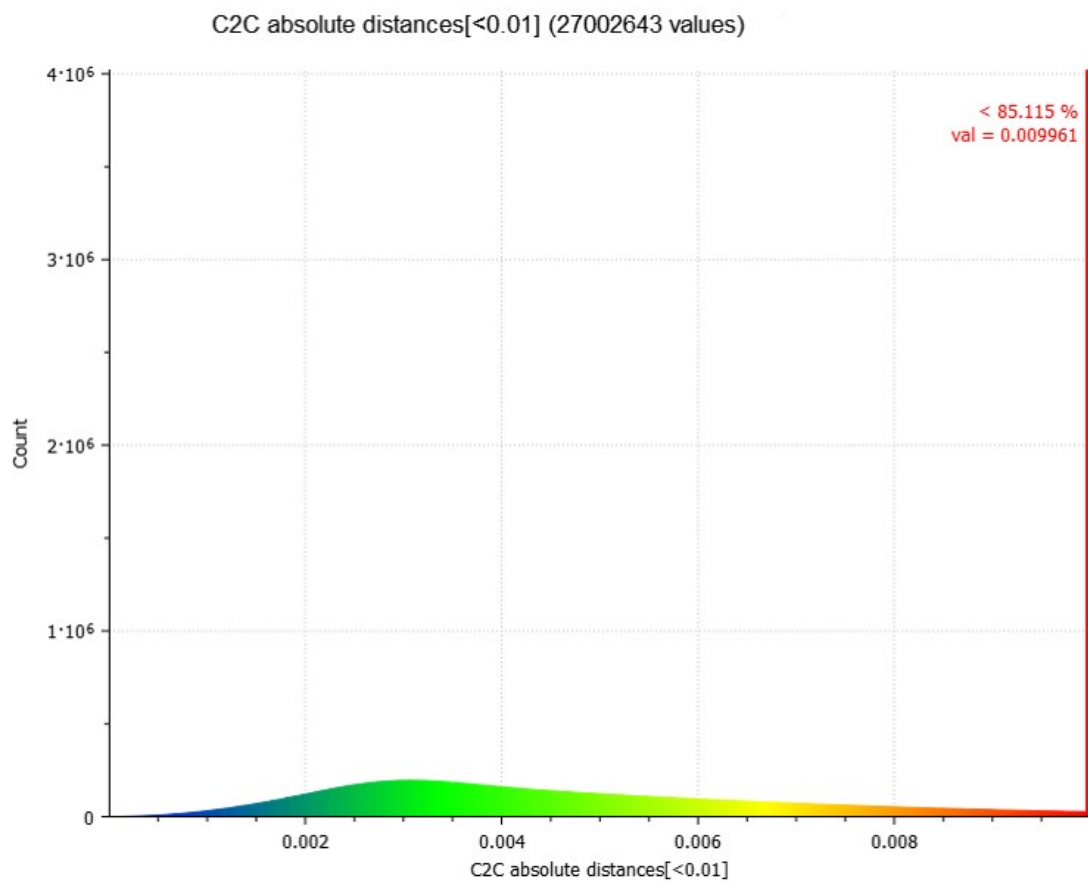
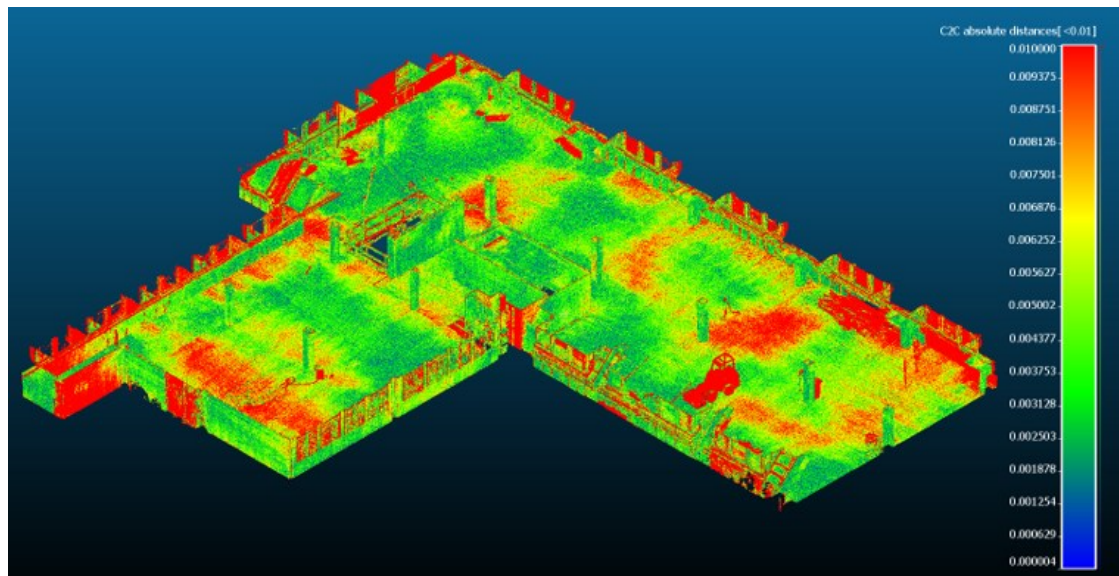




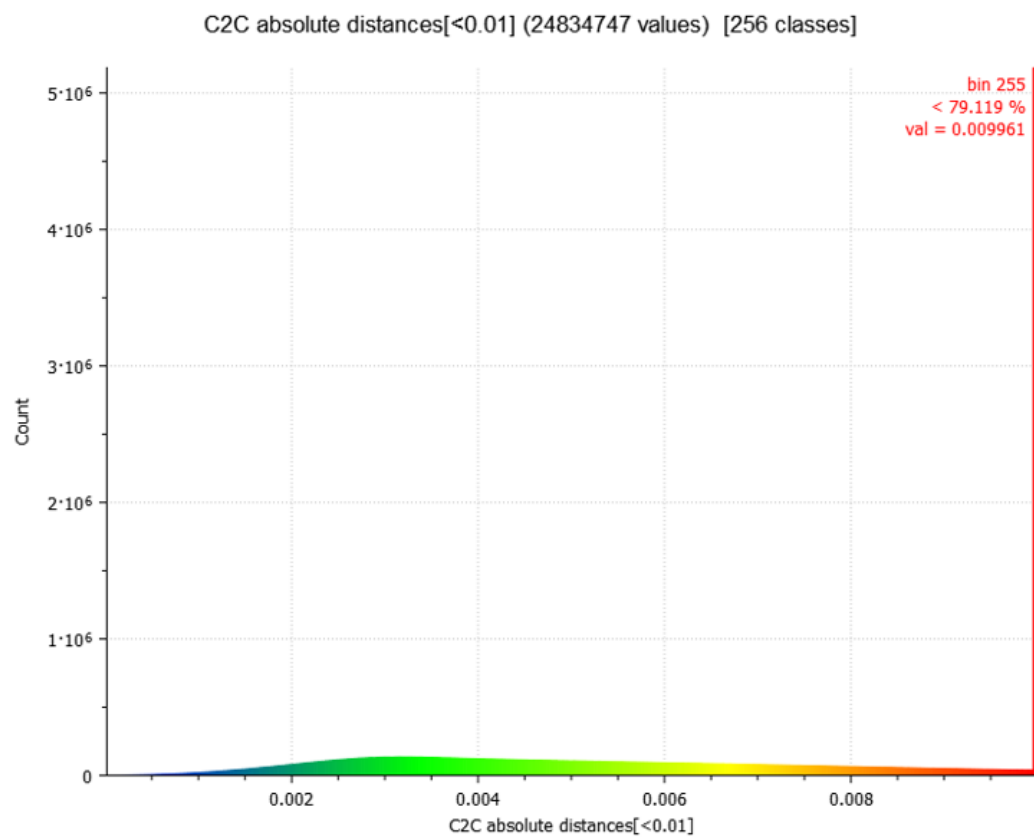
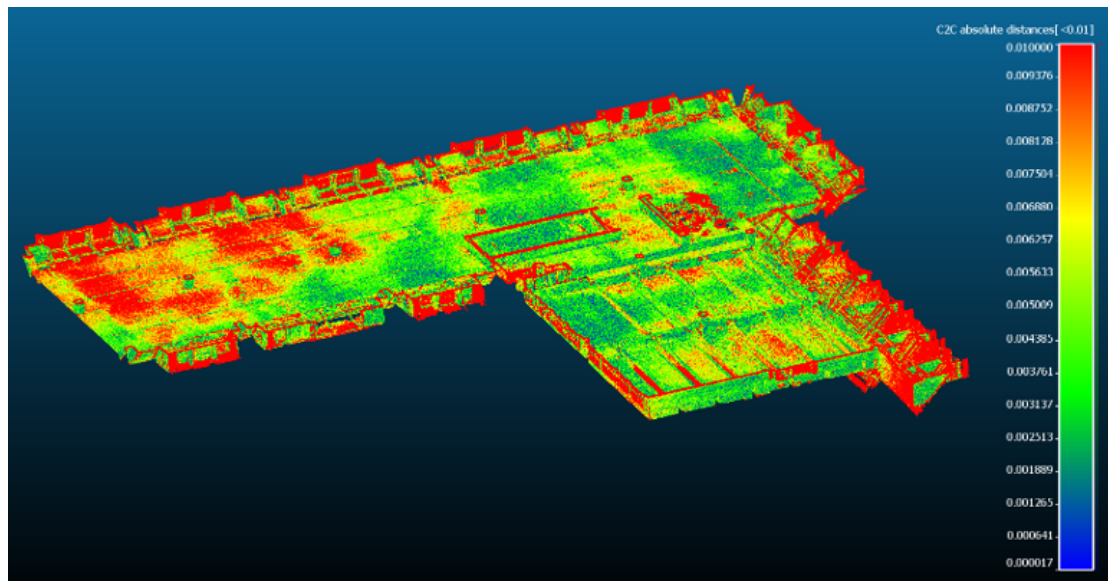
Kuva 2. Vertailun tulokset lohkon 2 lattian osalta.



Kuva 3. Vertailu lohkon 2 katon osalta.



Kuva 4. Lohkon 3 lattian vertailun tulokset.



Kuva 5. Lohkon 3 tulokset katon osalta.