



LASERKEILAUS SILLAN INVENTOINTIMENETELMÄNÄ

Hattulan Mierolan vanha silta

Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri (AMK)

Syksy 2024

Noora Lindholm

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli luoda laserkeilauksen avulla pistepilvi sekä inventointimalli Hattulan Mierolan vanhasta sillasta. Opinnäytetyössä tutkittiin, miten sillasta luodaan 3D-malli laserkeilausta hyödyntäen, miten syntynyt malli käsitellään käyttökelpoiseen muotoon ja kuinka se saadaan siirrettyä Tekla Structures -ohjelmaan.

Ennen laserkeilausta ja pistepilven käsittelyä perehdyttiin aiheen teoriaan ja laitteiston toimintaan. Laserkeilaus on mittausten menetelmä, jota käytetään tallentamaan nopeasti ja tarkasti monimutkaisten rakenteiden ja pintojen nykytilanne. Laserkeilaamalla luotu pistepilvi toimii itsessään lopputuotteena tai tarvittaessa pistepilveä voidaan jatkojalostaa käytettäväksi esimerkiksi korjausrakentamishankkeissa kohteen olemassa olevan geometrian dokumentointiin ja analysointiin.

Mierolan sillan pistepilvimalli luotiin laserkeilainta käyttäen, laserkeilauskojeasemia oli lopulta 19. Saatu pistepilvimalli jatkokäsiteltiin Trimble RealWorks -ohjelmalla. Ensimmäisiltä kojeasemilta saadut pistepilvet rekisteröitiin luotettavuuden varmistamiseksi, jonka jälkeen pistepilvestä poistettiin epäolennaiset objektit, kuten ympäristön kasvillisuus, rakennukset ja ihmiset. Sillan rakenteista luotiin kolmiopinnot, jotka siirrettiin IFC-muodossa Tekla Structures -ohjelmaan. Tekla Structures -ohjelmassa IFC-muotoiset objektit muunnettiin Tekla Structures -osiksi ja luokiteltiin samalla eri värisiksi mallin havainnollisuuden parantamiseksi.

Työn tärkeimpinä tuloksina voidaan todeta, että laserkeilaus soveltuu erinomaisesti esimerkiksi vanhojen siltojen dokumentointiin, sillä sillat voivat olla muun muassa ympäristöolosuhteiden ja geometriansa vuoksi haastavia kohteita. Itse laserkeilaus on hyvin suunniteltuna verrattain nopea prosessi. Pistepilven jatkokäsittely puolestaan vaatii enemmän aikaa, kokemusta ja työvälineiden tehokkuutta.

Degree Programme of Construction Engineering

Author Noora Lindholm

Subject Laser Scanning as an Inventory Method of Bridges

Supervisors Elis Kivi

Abstract

Year 2024

The purpose of this thesis was to use laser scanning to create a point cloud and an inventory model of the old bridge in Hattula Mierola. The thesis researched how to create a 3D model of a bridge using laser scanning, how to process the created model into a usable form and how to transfer it to the Tekla Structures program.

Before laser scanning and handling the point cloud, we familiarized ourselves with the theory of the subject and the operation of the equipment. Laser scanning is a measurement method that is used to record the current situation of complex structures and surfaces quickly and accurately. The point cloud created by laser scanning works as a final product in itself or, if necessary, the point cloud can be further processed to be used, for example, in repair construction projects to document and analyze the existing geometry of the object.

The point cloud model of the Mierola bridge was created using a laser scanner, there were 19 laser scanning stations in the end. The obtained point cloud model was further processed with the Trimble RealWorks program. First, the point clouds obtained from different laser scanning stations were registered to ensure reliability, after which irrelevant objects such as surrounding vegetation, buildings and people were removed from the point cloud. Mesh surfaces were created from the bridge structures, which were transferred in IFC format to the Tekla Structures program. In the Tekla Structures program, the IFC format objects were converted into Tekla Structures parts and these parts were classified into different colors to improve the visualization of the model.

As the most important results of the work, it can be stated that laser scanning is excellently suited for documenting old bridges, because bridges can be challenging objects due to environmental conditions and their geometry, for example. Laser scanning itself is a relatively quick process if well planned. The further processing of the point cloud, on the other hand, requires more time, experience, and the efficiency of work tools.

Keywords Information model, laser scanning, bridge modelling, BIM

Pages 32 pages

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tietoperusta	2
2.1	Laserkeilaus	2
2.2	Pistepilvi	3
2.3	Laserkeilauksen suunnittelu	4
2.4	Ohjelmistot	7
2.5	Sillan tietomallintaminen korjauskohteessa	7
3	Tietomallintamisen kohde	9
3.1	Teräsbetoninen holvisilta	9
3.2	Mierolan silta	9
4	Laserkeilauksen toteuttaminen	11
4.1	Käytettävä laitteisto	11
4.2	Laserkeilaus	12
4.3	Hankitun pistepilviaineiston käsittely	18
5	Mierolan sillan pistepilvimalli	20
6	Pohdinta	28
	Lähteet	30

Kuvat, taulukot ja kaavat

Kuva 1	Mierolan silta	10
Kuva 2	Trimble X7 -laserkeilain ja Trimble T100 -tabletti	11
Kuva 3	Sääolosuhteet keilauspäivänä, kojeasema 1	12
Kuva 4	Kojeasemien sijainnit	13
Kuva 5	Kojeasema 5	14
Kuva 6	Sillan eteläpäätty	15
Kuva 7	Sillan pohjoispäätty	16

Kuva 8 Sillan eteläpääty	17
Kuva 9 Pääosin käsittelemätön pistepilvi RealWorks-ohjelmassa	18
Kuva 10 Rekisteröintiraportti	19
Kuva 11 Siistitty pistepilvi.....	20
Kuva 12 Siistityn pistepilven yksityiskohtia	21
Kuva 13 Malli kolmiopintojen luomisen jälkeen	21
Kuva 14 Malli Tekla Structures -ohjelmassa	22
Kuva 15 Rakenneosat havainnollistettuna värein.....	23
Kuva 16 Sillan kansilaatan mallin aukko	24
Kuva 17 Sillan sivumuurin mallin aukkoja	24
Kuva 18 Teräsbetoniholvien mallien tarkkuuserot	25
Kuva 19 Kolmiopintojen erot päädyissä	26
Kuva 20 Mittatietojen havainnollistus	26
Kuva 21 Teräsbetonikaarirakenteet	27

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on luoda laserkeilauksen avulla inventointimalli Kanta-Hämeessä sijaitsevasta Hattulan Mierolan vanhasta sillasta ja tutkia, miten sillan lähtötietomalli luodaan. Halusin valita opinnäytetyökseni itseäni kiinnostavan aiheen, joka myös tukisi työllistymistäni ja ammatillista osaamistani tulevaisuudessa. Laserkeilaus on tulevaisuuden työväline, jonka käyttö tulee lisääntymään ja kehittymään. Aihealueena laserkeilaus oli itselleni uusi, mutta todella mielenkiintoinen. Kohteen valinta oli selkeä, sillä olen kiinnostunut siltasuunnittelusta ja laserkeilauksen käyttö lähtötietojen hankinnassa tulee todennäköisesti yleistymään entisestään siltojen korjaussuunnittelussa.

Opinnäytetyö muodostuu teorianäytelmästä, laserkeilauksen toteuttamisesta sekä pistepilvimallin käsittelystä. Taustateoria käsittelee laserkeilausta, pistepilviä, laserkeilauksen suunnittelua sekä sillan tietomallintamista korjauskohteessa. Työn tavoitteena on tuottaa olemassa olevasta Mierolan vanhasta sillasta 3D-malli laserkeilausta hyödyntäen, ja tutkia miten syntynyt malli käsitellään käyttökelpoiseen muotoon sekä kuinka se saadaan siirrettyä Tekla Structures -ohjelmaan. Työtä voidaan hyödyntää lähtötietona tulevissa korjaus- ja muutostöissä.

Tietomalli tarkoittaa digitaalisessa muodossa olevaa 3D-mallia rakennuksen geometriasta. Tietomalli sisältää myös rakennuksen ominaisuustiedot mahdollistaen sillan rakenteiden ja ominaisuuksien tarkemman dokumentoinnin sekä visualisoinnin digitaalisessa muodossa. Tämä parantaa suunnittelun tarkkuutta ja tehokkuutta, sillä lähtötiedot saadaan hankittua kohtuullisen nopeasti. Näin ollen siltojen tietomallintaminen on olennainen osa modernia infrastruktuurin hallintaa ja ylläpitoa, ja opinnäytetyössä pyritään osoittamaan sen käytännön hyödyt Mierolan vanhan sillan tapauksessa.

2 Tietoperusta

Opinnäytetyön tietoperusta pohjautuu kirjallisuuteen sekä henkilökohtaiseen tiedonantoon. Ensimmäisessä alaluvussa 2.1 perehdytään laserkeilaukseen käsitteenä, sen hyödyntämiseen sekä ominaisuuksiin. Alaluvussa 2.2 käydään läpi pistepilven ominaisuuksia ja käyttötarkoituksia. Alaluvussa 2.3 perehdytään laserkeilauksen suunnitteluun ja siinä huomioitaviin asioihin. Alaluvussa 2.4 esitellään työssä käytettävät ohjelmistot ja alaluvussa 2.5 kerrotaan sillan tietomallintamisesta korjauskohteessa.

2.1 Laserkeilaus

Kolmiulotteinen laserkeilaus on optinen menetelmä, jota käytetään tallentamaan nopeasti ja tarkasti monimutkaisten rakenteiden ja pintojen nykytilanne. Laserkeilausta voidaan kutsua pistepilvien mittaustekniikaksi ja se perustuu lähetettyjen laserpulssien ja pinnoista takaisin heijastuneiden paluupulssien kulkeman ajan mittaamiseen. Yksittäisten pisteiden mittaaminen tarkasti ei onnistu laserkeilaimella. Laserkeilaimen käyttökohteita ovatkin erilaisten pintojen mittaukset, joissa mittauspisteiden määrä on jopa useita miljoonia pisteitä mittauskohdetta kohden. Laserkeilausta hyödynnetään inventointimallinnuksessa sekä suunnittelussa geometriatietona. Nämä inventointimallit ovat käytössä pääasiassa rakennusten korjaus- ja perusparannushankkeissa, sekä kiinteistöomaisuuden dokumentoinnissa. (Heikkilä ym. 2005, s. 16; Rashidi ym., 2020, s. 2.; RT103133, 2019, ss. 1–2)

Laserkeilaus voidaan suorittaa joko ilma- tai maalaserkeilauksella. Ilmalaserkeilausta hyödynnetään pääsääntöisesti maa- ja tiealueiden lähtötietona, sillä se soveltuu erityisesti laajojen alueiden kartoittamiseen. Maalaserkeilausta käytetään pääasiallisesti laitosmittauksissa. Sillä voidaan suorittaa myös siltatyömaiden mittauksia, ja se soveltuukin hyvin yksittäisten kohteiden dokumentointiin. Maalaserkeilaus tarjoaa useita etuja; mittaus ei vaadi spesifejä valaistusolosuhteita eikä se vaadi suoraa kontaktia rakenteeseen. Kontaktittomuuden ansiosta mittaus ei vaurioita rakennetta, ja lisäksi vaikeastikin saavutettavissa olevat rakenteet (esimerkiksi holvit ja keskipilarit) voidaan skannata. (Heikkilä ym. 2005, s. 16; Lubowiecka ym., 2009, s. 2)

Laserkeilainten mittaustaajuus vaihtelee laitteesta riippuen välillä 1–500 kHz. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi Leican HDS-2500 -laserkeilaimella miljoonan pisteen kerääminen vie tuhat sekuntia eli noin 16 minuuttia. Tyypillisesti laserkeilan halkaisija vaihtelee välillä 6–

16 millimetriä, kun mittausetäisyys on 50 metriä. Maalaserkeilaimissa mittausetäisyydet vaihtelevat 1–300 metrin välillä, mittaustarkkuuden ollessa alle 2 senttimetriä.

Teollisuuslaserkeilaimissa mittausetäisyys on alle 30 metriä, ja mittaustarkkuus alle millimetrin. Mittauksien tarkkuuteen vaikuttavat sääolosuhteiden lisäksi kohdemateriaalin väri, pinnan laatu sekä lasersäteen osumiskulma kohteen pintaan nähden. (Heikkilä ym. 2005, ss. 16–17; Joala, 2006, s. 1)

2.2 Pistepilvi

Pistepilvi tarkoittaa mittatarkkaa kolmiulotteisten xyz-koordinaattien joukkoa, joka syntyy esimerkiksi laserkeilauksen tai fotogrammetrian tuloksena. Pistepilvet voivat käsittää jopa satoja miljoonia mittapisteitä, mikäli kyseessä on suurikokoinen kohde, mittaukset on toteutettu laajasti ja yksityiskohtaisesti ja mikäli mittauslaitteisto sen mahdollistaa.

Pistepilvestä on mahdollista tutkia koordinaattien lisäksi etäisyyksiä ja pinta-aloja, sekä laserpisteistön ominaisuustietoja. Jokainen piste voi puolestaan sisältää koordinaattitietojen lisäksi metadatan, kuten väri- ja intensiteettiarvoja. Intensiteetti kuvaa lasersäteen takaisinheijastumisvoimakkuutta. Intensiteetti voidaan esittää harmaasävy- tai väriasteikolla, jolloin kohteen materiaalit ja värit saadaan erottumaan toisistaan. RGB-arvoilla välitetään mittauskohteen väritietoa. Väritieto luodaan keilauksen yhteydessä valokuvaamalla, ja se liitetään erikseen pistepilvitiedostoon. (RT103133, 2019, ss. 1–2; RT 103375, 2021, s. 2)

Pistepilviaineistolla tarkoitetaan tietosisältöä, joka voi sisältää pistepilvidataa tai sen pohjalta käsiteltyä dataa kuten 3D-pintamalleja ja rasterimuotoisia projektiokuvia. Pistepilven pisteiden keskinäinen välimatka, eli pistepilven tiheys, on tärkeä tekijä mallintamisen laadussa. Mitä tiheämpi pistepilvi on, sitä tarkemmin mallintaminen onnistuu.

Mittausetäisyyden kasvaessa pääsääntöisesti myös pisteväli kasvaa, eli tiheys pienenee. Tiheyden muuttuessa myös tiedostokoko muuttuu; kun pistetiheys puolittuu, tiedostokoko pienenee neljännekseen. Pisteiden tarkkuuden tulee olla hyvä parhaan lopputuloksen takaamiseksi. (RT 103375, 2021, s. 2, 5; Joala, 2006, s. 3) Kohinalla tarkoitetaan pisteiden hajontaa, eli pisteiden keskinäisen sijainnin tasaisuutta suoralla pinnalla. Suuri kohina alentaa pistepilven tarkkuutta ja laatua. (Zhou ym., 2022, s. 2)

Maalaserkeilain tuottaa strukturoidun pistepilven. Strukturoitu pistepilvi koostuu useiden eri kojeasemien erikseen mitatuista pistepilvistä, joita voidaan käsitellä ja tarkastella erillään toisistaan. Strukturoitu pistepilvi voidaan muuttaa tarvittaessa strukturoimattomaksi, eli yhtenäiseksi kokonaisuudeksi. Harvennettu pistepilvi tarkoittaa alkuperäisestä datasta muokattua aineistoa, jossa pisteitä on vähennetty. Harventamalla aineisto pyritään saamaan

paremmin käsiteltävään muotoon ja pienempään tiedostokokoon pistevälin ollessa yleensä vakioitu. Harvennettu pistepilvi on tarkoitettu käytettäväksi suunnitteluohjelmistoissa ja muissa sovelluksissa. Harventamatonta pistepilveä käytetään muun muassa tiedonsiirtoon sekä arkistointiin. Tiedostokooltaan suuri harventamaton pistepilvi sisältää kaikki mitatut pisteet ja sen tulee täyttää määritellyt resoluutiovaatimukset. (RT 103375, 2021, ss. 2, 5–6)

Pistepilveä voidaan hyödyntää esimerkiksi korjausrakentamishankkeissa kohteen geometrian mittatarkkaan dokumentointiin, piirteiden tulkintaan sekä analysointiin. Se toimii myös lopputuotteena edistäen hankkeen osapuolia kohteen hahmottamisessa ja mitoituksissa. Mallintamisohjelmistot tunnistavat automaattisesti pistepilvestä erilaisia geometrisia pintoja ja luovat niistä pintamalleja. Pistepilveä voidaan myös verrata kohteen suunnitelmamalliin ja tuottaa siitä erilaisia havainnollisia malleja sekä esimerkiksi pohja- ja julkisivupiirroksia. Tietomallien muodostamiseen tarvitaan lisäksi tietoa rakennuksen tiloista, kohteen rakennetekniset asiakirjat, asiantuntijätietoa ja tarpeen vaatiessa lisätutkimuksia esimerkiksi piilossa olevista rakenteista. Keskeistä mittauspistepilven käsittelyssä on, millainen informaatio on lopputuloksen kannalta oleellista. (RT103133, 2019, s. 2; Heikkilä ym., 2005, ss. 18–19)

2.3 Laserkeilauksen suunnittelu

Laserkeilauksen toteutus on hyvä aloittaa huolellisella suunnittelulla. Täsmällisellä suunnittelulla laserkeilaus kyetään suorittamaan mahdollisimman tehokkaasti ja selkeästi. Suunnitteluvaiheessa tulee määrittää laserkeilausten kojeasemat ja niiden määrä, saadun aineiston käyttötarkoitus, käytettävä koordinaatisto ja runkopisteistö sekä mallinnustarkkuus. Lisäksi on tärkeää tunnistaa kohteen erityisominaisuudet ja huomioida ne aikataulutuksessa ja suorituksessa. Kohteen olosuhteet, kohteessa kulkeminen ja työturvallisuus on myös hyvä käydä läpi. Tavoitteissa voidaan ottaa kantaa esimerkiksi tarkkuusvaatimuksiin, pistetiheyksiin sekä koordinaatistovaatimuksiin. (Keitaanniemi, 2021; RT103133, 2019, s. 3)

Kari Immonen on Geotrim Oy:n tuki- ja koulutuspäällikkö ja on pitänyt Hämeenlinna ammattikorkeakoulun opiskelijoille Korjausrakentamisen suunnittelun opintojaksolla luentoja lasermittauksesta, opinnäytetyössä on käytetty lähteenä luentojen videotallenteita. Luennollaan 3D Lasermittaus Kari Immonen (henkilökohtainen tiedonanto, 25.3.2021) kertoo, että käytettävän koordinaatiston valintaan vaikuttavat esimerkiksi suunnittelujärjestelmä, kykeneekö järjestelmä käyttämään pitkiä numeroarvoja vai käytetäänkö paikallista koordinaatistoa. Mikäli järjestelmä ei pysty käyttämään pitkiä

numeroarvoja, koordinaattiarvoja on myös mahdollista ”lyhentää”. Tätä käytäntöä hyödynnetään usein siltasuunnittelussa.

Mikäli kohteesta on saatavilla pohjapiirros, laserkeilausasetukset voidaan esittää siinä sijoitettuna suunniteltuihin kohtiin. Laserkeilausasetusten sijoittelussa pohjatietona hyödynnetään käytettävän laserkeilaimen minimi- ja maksimimittausetäisyyttä ja pistepilven toivottua tarkkuutta. Laserkeilausasetusten sijainti vaikuttaa mittausarvoon osumakuulan ja mittausetäisyyden kautta. Lasersäteen osumakuulan ollessa liian pieni lasersäde ei palaa keilaimeen, jolloin kohteesta ei muodostu havaintoa. Mitattavan kohteen ja keilaimen etäisyys ei saa olla liian suuri, sillä iso etäisyys heikentää saavutettavaa pistetiheyttä. (Keitaanniemi, 2021)

Yleensä laserkeilaus suoritetaan silmien korkeudelta. Tarvittaessa korkeutta on mahdollista muuttaa. Esimerkiksi lattian ollessa olennaisessa roolissa voidaan laserkeilaus toteuttaa korkeammalta, jotta lasersäteen osumakuulat kohteeseen ovat suuremmat. Samalla kun laserkeilaimen korkeus säädetään, varmistetaan myös laserkeilaimen suoruus vatupassikulpan avulla. Uusissa laserkeilaimissa erillistä vatupassikulpa ei välttämättä ole, vaan keilain tasaa itsensä. (Keitaanniemi, 2021)

Laserkeilaimen asetuksista voidaan valita havaintojen keräysalue sekä resoluutio. Resoluution koko on valittava niin, ettei pienin havaittava kohde jää pisteiden väliin. Resoluution kasvaessa myös mittausaika ja tiedostokoko kasvavat, joten myöskään liian iso resoluutio ei ole kannattavaa. Resoluution valintaan vaikuttavat keilattava kohde, mittaukselle asetetut vaatimukset sekä mittausetäisyys. Pistepilven tiheys kasvaa laserkeilainta lähestyttäessä ja harvenee kauemmas mentäessä. Laserkeilainten resoluutio ilmaistaankin etäisyyden suhteessa kohteeseen. Jos resoluutioetäisyys on kymmenen metriä, alle kymmenen metrin etäisyydellä resoluutio kasvaa, yli kymmenen metrin etäisyydellä taas heikkenee. (Keitaanniemi, 2021)

Laserkeilaus vaatii lähes aina useita keilauksia ja keilausasetuksia kohteen mitaamiseksi joka puolelta. Keilausasetusten määrä on kuitenkin syytä pitää mahdollisimman pienenä, jotta aineistoin koko ja mittausaika pysyvät tarkoituksenmukaisina. Jokaisen keilausasetuksen tulisi kattaa mahdollisimman suuri alue, huomioiden myös näkyvyyttä estävät rajoitteet, joista muodostuu pistepilven aukkoja. Laserkeilausasetusten välille tulee jättää päällekkäisyyttä, jotta eri asemien pistepilvet voidaan luotettavasti yhdistää toisiinsa. (Keitaanniemi, 2021)

Luennollaan Kari Immonen (henkilökohtainen tiedonanto, 25.3.2021) mainitsee huomioitavaksi seikaksi kohteen rajauksen. Mallinnetaanko koko rakennus vai sen osa, mikä on lopputuloksen kannalta olennaista ja mitä voi jättää pois. Työmäärän, aikataulun ja tulosten tarkkuuden hallitsemiseksi on järkevää etukäteen rajata, mitkä rakenneosat halutaan aineistoon mukaan ja näin välttää turhien osien mittaus. Immonen (henkilökohtainen tiedonanto, 25.3.2021) kertoo, että mittaustarkkuusvaatimuksen kasvaessa mittaukseen käytettävä aika kasvaa eksponentiaalisesti. Tämän vuoksi kohteen kannalta riittävä tarkkuus on määritettävä ajoissa, useimmissa kohteissa riittävä tarkkuustaso on 5–10 millimetriä. Keitaanniemen (2021) mukaan laserkeilauksen toteuttamisaikaan vaikuttavat tarkkuusvaatimusten lisäksi esimerkiksi kohteen koko sekä muoto sekä pintamateriaali. Kiiltävät pintamateriaalit vääristävät keilauksen tuloksia, sillä ne heijastavat laserin. (Keitaanniemi, 2021)

Suunnitelmassa tulee huomioida myös kohteen muu ympäristö. Kohteen ympäristössä voi olla pölyä, tärinää, liikennettä tai esteitä, jotka tulee ottaa huomioon laserkeilaimen sijoittelussa. Keilaus kannattaa suorittaa mahdollisimman vähäliikenteiseen aikaan häiriötekijöiden minimoimiseksi. (Keitaanniemi, 2021)

Suunnittelun aikana on syytä valita, miten erilliset laserkeilausasemat yhdistetään toisiinsa. Luennollaan Kari Immonen (henkilökohtainen tiedonanto, 25.3.2021) kertoo, että pistepilven rekisteröinti, eli kohdistaminen referenssiin voi perustua joko tähyksiin, yksittäisiin pisteisiin tai toiseen pistepilveen. Tähyys tarkoittaa kartoitusmerkkiä, joita käytetään esimerkiksi mittauksissa ja kartoituksissa. Mikäli laserkeilauksessa käytetään apuna tunnettuja pisteitä tai pintoja tähysten avulla, tulee varmistaa, että tähykset ovat havaittavissa myös pistepilvessä. Tähyksiä tulee sijoittaa kohteen ympärille riittävä määrä, jotta jokaisesta keilausasemasta havaitaan vähintään 2–3 tähyistä. Tähykset tulee sijoitella kohteeseen mahdollisimman kattavasti, ja huomioida, että vaakasuuntaisten tähysten lisäksi tarvitaan myös korkeussuuntaisesti sijoitettuja tähyksiä. Tähyserkkien sijainnit voidaan mitata esimerkiksi takymetrillä. Pilvipohjainen yhdistäminen ei vaadi esivalmisteluja; riittää, että keilausasemien välillä on 30–40 % päällekkäisyyttä. Monet uudet laserkeilaimet yhdistävät laserkeilausasemien pistepilviä jo laserkeilauksen aikana pilvipohjaisesti. (Keitaanniemi, 2021; Heikkilä ym., 2005, s. 17)

Laserkeilaimen sisäänrakennetulla kameralla voidaan ottaa valokuvia keilauksen aikana, jolloin pistepilvi on mahdollista värjätä todellisilla väreillä. Asetuksista voidaan määrittää myös montako kertaa yksi havainto tehdään. Kun yksi havainto on tehty useamman kerran, voidaan jälkiprosessoinnissa poistaa mahdolliset virheelliset havainnot, kuten kohteen

edessä liikkuneet ihmiset tai eläimet. Nämä lisäasetukset pidentävät mittausaikaa. (Keitaanniemi, 2021)

2.4 Ohjelmistot

Opinnäytetyössä käytettäviksi ohjelmiksi valikoituivat Trimble RealWorks ja Tekla Structures, sillä ne ovat yleisessä käytössä suunnittelutoimistoissa, ja niihin oli saatavilla tarvittavat lisenssit Hämeen ammattikorkeakoulun kautta. Lisäksi näiden ohjelmistojen käyttöön oli saatavilla ohjausta.

Trimble RealWorks on 3D-skannausohjelmisto, jonka avulla voi analysoida, visualisoida ja luoda 3D-tuotoksia skannatusta pistepilvestä. Ohjelmiston avulla pistepilvestä luodut 3D-mallit voi siirtää suoraan esimerkiksi Tekla Structures- ja AutoCad-ohjelmistoihin.

Ohjelmistoa hyödynnetään erityisesti rakennusalalla, mutta sitä käytetään myös esimerkiksi maanmittauksessa ja rikostutkinnassa. (Trimble (n.d.), Geotrim (n.d.-a))

Tekla Structures on 3D-mallinnusohjelmisto rakennesuunnitteluun ja rakennustuotantoon. Se mahdollistaa kolmi- ja neliulotteisten yksityiskohtaisten rakennemallien luomisen sekä BIM-tietomallien linkittämisen muihin suunnitteluohjelmistoihin, kuten arkkitehtuuri- ja talotekniikkasovelluksiin IFC-standardin avulla. Ohjelmistoa voidaan käyttää sekä suunnittelussa että valmistuksessa, luonnossuunnittelusta aina tarkkaan detajisuunnitteluun. Lisäksi se mahdollistaa tiedonvaihdon muiden analysointi- ja laskentaohjelmien kanssa sekä erilaisten dokumenttien, kuten piirustusten ja raporttien, tulostamisen. Tekla Structures tukee dwg-tiedonsiirtoa. (Tekla (n.d))

2.5 Sillan tietomallintaminen korjauskohteessa

Tietomallinnus on yleiskäsite kolmiulotteiselle mallille, joka sisältää tietoa rakenteesta, geometriasta ja ominaisuuksista. Mallia voidaan hyödyntää suunnittelussa, tuotannossa ja ylläpidossa rakenteen elinkaaren aikana ja siitä voidaan jalostaa esimerkiksi rauditusmalli. Sillan tietomallia kutsutaan inframalliksi. Lähtötietomalli puolestaan kuvaa kohteen nykytilaa sisältäen hankitut lähtötiedot digitaalisessa muodossa. Lähtötietomalli ei kuitenkaan sisällä hankkeeseen kuuluvia suunnitelmia. Sillan korjaus- tai muutostyöllä voidaan tarkoittaa esimerkiksi uusimista, ylläpitokorjausta tai peruskorjausta. Korjaustoimenpiteet ja siltapaikan vaatimusluokka määrittävät mallinnustason korjaussuunnitelmassa. Tyypillisesti

korjaussuunnitelman inframallissa olemassa olevien rakenteiden geometriatieto tuotetaan geometriamallin muodossa. (Väylävirasto, 2022, s. 10, 34, 65; RIL 179-2018, ss. 286–287)

Sillan geometriamalliin kuuluvat siltapaikan keskeiset rakenteet tilavuus- tai pintamallina, ja sen tulee perustua mittauksiin, kuten rakenneosien nurkkapisteisiin tai laserkeilaukseen. Mallissa selvitetään silta, siltapaikan varusteet, ympäröivä maasto ja siltapaikalle johtava väylä. Sillan rakenteiden taiteviivoja ja pintoja voidaan muodostaa mittapisteiden tai kartoitusten avulla, jolloin sallittu tarkkuuspoikkeama tehdyistä mittauksista on ± 20 mm ja formaatti on IFC tai 3D DWG. Suorissa pinnoissa pinta voidaan yleensä mallintaa kartoittamalla nurkkapisteet, kaarevissa pinnoissa tiheämpi mittauspisteistö on tarpeen, jotta pisteiden avulla muodostettu viiva tai pinta ei ylitä vaadittua mittatoleranssia. (Väylävirasto, 2022, s. 36)

Korjattavissa silloissa maastomalli muodostuu pääsääntöisesti maaston ja rakenteiden näkyvissä olevista osista, sillä korjauskohteissa on usein piilossa olevia rakenteita. Korjaussuunnittelussa voidaan hyödyntää kohteen vanhoja suunnitelmia ja muodostaa tilavuusobjekti vanhasta rakenteesta. (Väylävirasto, 2022, s. 36)

3 Tietomallintamisen kohde

Tässä kappaleessa esitellään Kanta-Hämeessä sijaitsevan Hattulan Mierolan vanhan sillan historiaa ja rakennetta, sekä käydään yleisesti läpi teräsbetonisten holvisiltojen rakennetta. Mierolan silta kuuluu ensimmäisiin teräsbetonisiin siltoihin Suomessa.

3.1 Teräsbetoninen holvisilta

Puristettuihin siltoihin kuuluvissa holvisilloissa on leveä kotelomainen tai massiivinen holvikaari. Niissä pääkannattimena on teräsbetoninen kaarirakenne. Poikkileikkaukseltaan päällysrakenteet näissä silloissa ovat yleensä laattoja tai laattapalkkeja. Siltojen kaari voi koostua myös useammasta kaaresta, jolloin ne yhdistetään toisiinsa poikkirakenteiden avulla. (RIL 179-2018, s. 55.)

Siltojen käyttöikätaavoitteeksi on kirjattu yleisesti 100 vuotta, mutta Väyläviraston julkaisun mukaan peruskorjaus on tarpeen noin 30–40 vuoden kohdalla. Vuoden 2022 tilastotietojen mukaan 58 % Suomen tiesilloista on tyypiltään teräsbetonisia. Teräsbetonisista silloista puolestaan noin 8 % on holvisiltoja. (RIL 179-2018, s. 55; Väylävirasto, 2024)

3.2 Mierolan silta

Kuva 1 esitetty Hattulan Mierolan holvisilta sijaitsee siltapaikalla, jossa on ollut silta jo 1600-luvulta lähtien. Silta ylittää Vanajaveden, kuuluen Vanajaveden kapeikon kulttuurimaisemaan. Teräsbetoninen holvisilta rakennettiin aiemman, 1904 valmistuneen, puisen tukiansassillan tuhouduttua kansalaissodassa. Uusi silta määrättiin valtion rakennettavaksi, sillan rakentamisesta vastasi Oy Constructor Ab. (Museovirasto, 2009; Liimatainen, 2007, s. 91). Hattulan kunnalta saadun vuoden 2017 korjaussuunnitelmaselostuksen (henkilökohtainen tiedonanto, 6.2.2024) mukaan silta valmistui liikenteelle vuonna 1920. Korjaussuunnitelmaselostus ei ole julkisesti saatavilla. Siltaan on tehty perusparannus vuonna 1981 ja se kirjattiin museosillaksi vuonna 1982. Kohteen valinnasta museosillaksi ei ole kirjattu perusteluja.

Kuva 1 Mierolan silta



Aikaisemman puusillan tilalle oli Hattulan kunnan toimesta suunniteltu kestävämpää siltaa jo ennen sen tuhoutumista. Piirustukset kiviltaa varten olivat valmiit, mutta kunta valitsi lopulta edullisemmän ja nopeammin valmistuvan teräsbetonisillan. Silta kuuluu ensimmäisten teräsbetonisten siltojen joukkoon Suomessa, ja sen suunnittelussa ja rakenneratkaisuissa myös sillan lopullinen ulkonäkö otettiin huomioon. (Liimatainen, 2007, s. 91) Silta on kolmijänteinen holvisilta, jota voidaan pitää myös rakenteensa puolesta seinämäkaarisiltana. Pääjätteen nivelet on tehty teoreettisiin nivelkohtiin ristiinraudoituksella. 30-metrinen kolminivelisen keskijätteen sivusysäys on johdettu sivujätteen kautta vanhan puusillan maatukiin. (Hurme ym.1991, s. 132)

Hattulan kunnalta saadun vuoden 2023 erikoistarkastuksen raportissa (henkilökohtainen tiedonanto, 13.3.2024) kerrotaan sillan päätytukien olevan kiviverhoiltuja, maataytteisiä kantamuureja. Niiden sivuilla on kiviset sivumuurit. Sillan kaksi välitukea muodostuvat betonianturasta, kivisestä kantamuurista ja yläosan betonivalusta. Reunajätteen päällysrakenteena toimivat teräsbetoniset kaaret, keskijätteellä teräsbetoniholvi. Kaiteet ovat betonia, ja niiden sisäpinnassa on teräksiset johteet. Kansilaatan päällysteenä on asfaltti.

4 Laserkeilauksen toteuttaminen

Tässä kappaleessa esitellään laserkeilauksessa käytetty laitteisto ja kerrotaan laserkeilauksen toteutuksesta. Lisäksi käydään läpi laserkeilaamalla hankitun pistepilven käsittelyä, sisältäen esimerkiksi pistepilvien rekisteröinnin.

4.1 Käytettävä laitteisto

Laserkeilauksen suorittamista varten saatiin käyttöön Hämeen ammattikorkeakoululta Trimble X7 -laserkeilain. Trimble X7 -keilaimessa kantama on 0.6 metristä 80 metriin ja kantaman tarkkuus on 2 millimetriä. Keilaimessa on automaattinen kalibrointi, joten se ei vaadi tähyksiä tai toimenpiteitä käyttäjältä. Skannausnopeus on jopa 500 kHz. Tuotettua pistepilveä on mahdollista tarkastella työmaalla heti keilauksen jälkeen. Keilainta ohjataan Trimble T100 -tabletin kautta Trimble FieldLink -ohjelman avulla (Kuva 2). (Geotrim, n.d.-b)

Kuva 2 Trimble X7 -laserkeilain ja Trimble T100 -tabletti



4.2 Laserkeilaus

Keilauksen onnistumisen ja sujuvuuden kannalta optimaalisinta olisi suunnitella keilauksen toteutus mahdollisimman tarkasti, mutta ulkokeilauksessa on useita muuttujia ympäristön ja liikenteen suhteen. Ennen keilausta sillan ympäristöön tutustuttiin ja suunniteltiin kojeasemien sijainteja ja määrää. Suunnittelukäynnillä huomattiin, että sillan pohjoispäädyn rannat ovat yksityisomisteisilla tonteilla, ja keilauksen suorittamiseen tarvitaan tontin omistajien luvat. Luvat keilausten suorittamiseen tonteilta käsin saatiin keilausviikolla kirjallisesti. Myös sääolosuhteiden vaihtelevuus aiheutti epävarmuutta keilauksen onnistumiseen; onko maassa lunta, onko puihin ehtinyt tulla lehtiä, missä kunnossa maasto on ja niin edelleen. Keilaus suoritettiin perjantaina, ja vielä alkuvuikosta oli runsaasti lumimyräköitä. Lumi onneksi sulii perjantaihin mennessä, mutta maasto oli märkää ja osin liukasta.

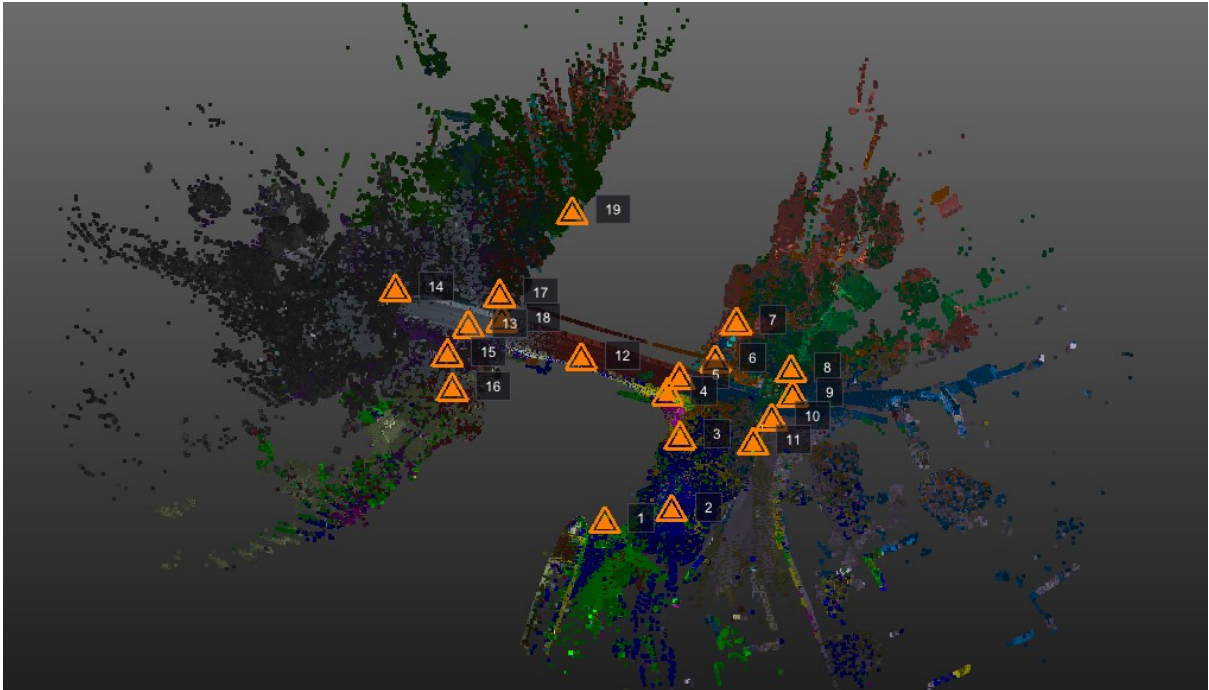
Laserkeilaus toteutettiin 26.4.2024, sää oli pilvinen ja lämpötila noin +3°C (Kuva 3).

Kuva 3 Sääolosuhteet keilauspäivänä, kojeasema 1



Keilauksen aikana satoi hieman vettä, välillä paistoi myös aurinko. Keilaus kesti noin kolme tuntia; keilaus aloitettiin kello 10 aamulla ja saatiin päätökseen noin kello 13 iltapäivällä. Kojeasemia tuli lopulta 19. Kojeasemien sijainnit on esitetty Kuva 4 ja jokaisen asemapisteen pisteet on esitetty omalla värillään.

Kuva 4 Kojeasemien sijainnit



Kojeasemat 1–11 sijaitsivat sillan eteläpäädyssä, kojeasema 12 sillan keskikohdalla ja kojeasemat 13–19 sillan pohjoispäädyssä. Pääosin kojeasemat sijaitsivat rannalla tuottaen pistepilveä sillan sivupinnoista. Kojeasemat 4 ja 5 sijaitsivat sillan teräsbetonikaarirakenteen alla, mahdollistaen tarkan pistepilven rakenteesta (Kuva 5). Kojeasemilla 8–11 sekä 13 ja 14 pyrittiin saamaan pistepilviaineistoa sillan päädyistä ja pintamateriaaleista.

Kuva 5 Kojeasema 5



Keilauksen kestoon vaikutti keilaajan kokemuksen puute, vaikka laitteistoon ja ympäristöön olikin tutustuttu etukäteen. Kokemuksen karttuessa keilaukseen käytettävä aika vähenee. Keilaukseen oli varattu noin viisi tuntia, sillä tarkoitus oli asettaa kohteeseen tähyksiä ja hankkia niiden koordinaatit takymetrillä, mutta sillan ympäristöstä löytyikin useita metallisia rajapyykkejä, joita voi tarvittaessa hyödyntää tunnettuina kiintopisteinä.

Keilaimen asetuksista valittuina olivat:

- Tiheys: Matala
- Yliherkkyys: Pois päältä
- Kuva: Nopea
- Valaistus: Pilvinen

Näillä asetuksilla yhden keilauksen mittausajan arvio oli 2 minuuttia 35 sekuntia sekä pisteväli 5,7 millimetriä 5 metrin etäisyydellä, 40 millimetriä 35 metrin etäisyydellä ja 91,5 millimetriä 80 metrin etäisyydellä. Valaistusasetusta ei suositella muutettavaksi kesken keilauksen, vaikka sääolosuhteet muuttuisivat, sillä se voi vääristää pistepilven väritystä.

Keilauksen edetessä vastaan tuli muutamia haasteita. Sillan edessä oli molemmin puolin puustoa, joka häytti näkyvyyttä. Etelärannalla oli onneksi juuri kaadettu puita, mikä paransi keilauksen tarkkuutta (Kuva 6).

Kuva 6 Sillan eteläpääty



Pohjoispäädyssä (Kuva 7) maaston kaltevuus ja erityisesti rantojen jyrkkyys rajoitti kojeasemien sijoittelua. Pohjoispäädyn pistepilven laatu jäikin heikommaksi ympäristön asettamien haasteiden vuoksi. Mallinnuksessa oletetaan tästä syystä päätyjen olevan geometrialtaan lähes symmetriset. Lisäksi veden pinnan heijasteet loivat pistepilveen paljon ylimääräisiä pisteitä ja vaikuttivat todennäköisesti automaattisen rekisteröinnin onnistumiseen heikentävästi.

Kuva 7 Sillan pohjoispääty



Vedenpinta oli korkealla, minkä vuoksi sillan anturat jäivät veden alle. Tämä esti sillan anturoiden keilaamisen, eikä niitä voi mallintaa luotettavasti. Samasta syystä pohjoispäädyn holvi jäi keilaamatta, sillä keilainta ei saanut veden määrästä johtuen turvallisesti holvin alle, toisin kuin eteläpäädyn holvissa (

Kuva 8).

Kuva 8 Sillan eteläpäätty



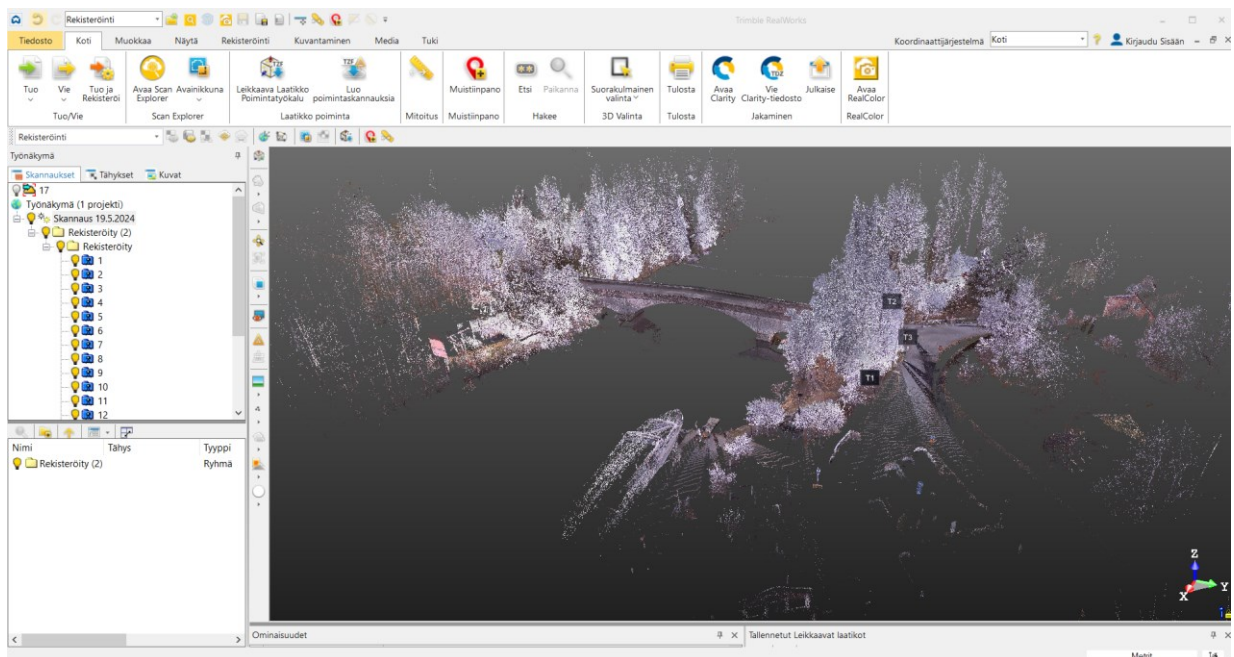
Työturvallisuus huomioitiin kojeasemien valinnassa; maastoltaan liian haastavat paikat vältettiin ja sillan ylittävä liikenne huomioitiin. Pyrkimyksenä oli häiritä liikennettä mahdollisimman vähän, joten ohikulkuliikennettä ei pysäytetty ja keilaukset suoritettiin kulkuväylien reunoilta. Keilaukset tauotettiin liikenteen mukaan.

Käytössä ollut laserkeilain yhdisti kojeasemia automaattisesti toisiinsa jo keilauksen aikana. Rekisteröinnit eivät kuitenkaan osuneet täysin kohdilleen, vaikka niitä yritettiin korjata myös manuaalisesti. Yliherkkyyasetus asetettiin käyttöön, mikä pidensi keilausaikaa kaksinkertaiseksi, mutta se ei vaikuttanut rekisteröinnin onnistumiseen, joten asetuksesta luovuttiin. Automaattinen rekisteröinti onnistui kuitenkin siinä määrin, että mallia pystyttiin tutkimaan jo paikan päällä ja toteamaan kojeasemien ja pisteiden määrän olevan riittävä.

4.3 Hankitun pistepilviaineiston käsittely

Laserkeilausaineisto siirrettiin tabletilta ulkoiselle kovalevyllä aineiston suuren tiedostokoon vuoksi. Laserkeilausaineiston jatkokäsittely suoritettiin Trimble RealWorks -ohjelmalla Hämeen ammattikorkeakoulun etäyhteyden kautta. Käytössä oli Lenovo ThinkPad P50 -tietokone. Pääosin käsittelemätön pistepilvi sekä ohjelman yleisnäkymä on esitetty Kuva 9. Ennen kuvan ottoa pistepilvien rekisteröinti oli suoritettu sekä merkitty tunnetut kiintopisteet. Pistepilven automaattinen rekisteröinti ei täysin onnistunut keilauksen yhteydessä, ja haasteita oli myös RealWorks -ohjelman automaattisessa rekisteröinnissä. Automaattinen rekisteröinti saattoi siirtää keilauksen täysin väärään asentoon tai sijaintiin. Pistepilviperusteinen rekisteröintityökalu toimi lopulta parhaiten.

Kuva 9 Pääosin käsittelemätön pistepilvi RealWorks-ohjelmassa



Pistepilvet kohdistettiin ensin mahdollisimman tarkasti manuaalisesti ja sen jälkeen Tarkenna-työkalu viimeisteli kohdennuksen. Pistepilvien kohdentamisessa haasteita ilmeni erityisesti edessä olleen kasvillisuuden takia. Osa kojeasemista sijaitti myös niin kaukana toisistaan, että yhteisiä pisteitä oli vaikeaa löytää. Rekisteröintiraportti (Kuva 10) ilmaisee rekisteröinnin luotettavuuden, luotettavuusprosentit olivat oikein hyvät aineiston haastavuuteen nähden. Rekisteröintiraportissa pistepilvien päällekkäisyysprosentit olivat välillä 15–68 %, virhe välillä 0,76–8,19 millimetriä ja luotettavuus välillä 70–97 %.

Georeferointia, eli rekisteröidyn pistepilven sitomista kohdekoordinaatistoon, ei tässä kohteessa nähty tarpeelliseksi suorittaa, vaan aineisto pidettiin omassa koordinaatistossaan.

Kuva 10 Rekisteröintiraportti

Rekisteröintiraportti (TZF skann. perust)				Rekisteröintiraportti (TZF skann. perust)			
Name	Virhe	Päällekkäisyys (%)	Luotettavuus (%)	Name	Virhe	Päällekkäisyys (%)	Luotettavuus (%)
Skannaus 19.5.2024				9			
1				8	5.23 mm	20%	79%
2	3.50 mm	49%	96%	10	6.79 mm	56%	92%
3	2.79 mm	51%	97%	11	8.19 mm	34%	88%
4	5.10 mm	27%	88%	9	6.79 mm	56%	92%
5	5.96 mm	22%	81%	11	1.02 mm	50%	98%
12	5.17 mm	21%	81%	3	2.26 mm	32%	94%
1	3.50 mm	49%	96%	9	8.19 mm	34%	88%
3	2.16 mm	46%	97%	10	1.02 mm	50%	98%
4	4.66 mm	27%	88%	12			
12	2.79 mm	24%	87%	1	5.17 mm	21%	81%
1	2.79 mm	51%	97%	2	2.79 mm	24%	87%
2	2.16 mm	46%	97%	13	1.55 mm	33%	95%
4	2.26 mm	33%	94%	12	1.55 mm	33%	95%
11	2.26 mm	32%	94%	14	0.76 mm	34%	96%
16	5.55 mm	21%	80%	15	6.16 mm	19%	77%
1	5.10 mm	27%	88%	13	0.76 mm	34%	96%
2	4.66 mm	27%	88%	15			
3	2.26 mm	33%	94%	13	6.16 mm	19%	77%
5	0.70 mm	68%	99%	16	2.38 mm	25%	89%
1	5.96 mm	22%	81%	3	5.55 mm	21%	80%
4	0.70 mm	68%	99%	15	2.38 mm	25%	89%
6	1.85 mm	20%	81%	17			
5	1.85 mm	20%	81%	18	1.21 mm	42%	97%
7	1.44 mm	63%	98%	19	2.64 mm	17%	75%
8	1.76 mm	31%	94%	6	4.94 mm	21%	80%
18	4.94 mm	21%	80%	17	1.21 mm	42%	97%
19	2.50 mm	26%	89%	19	2.52 mm	15%	70%
6	1.44 mm	63%	98%	6	2.50 mm	26%	89%
8	1.85 mm	17%	76%	7	2.83 mm	23%	86%
19	2.83 mm	23%	86%	17	2.64 mm	17%	75%
6	1.76 mm	31%	94%	18	2.52 mm	15%	70%
7	1.85 mm	17%	76%				
9	5.23 mm	20%	79%				

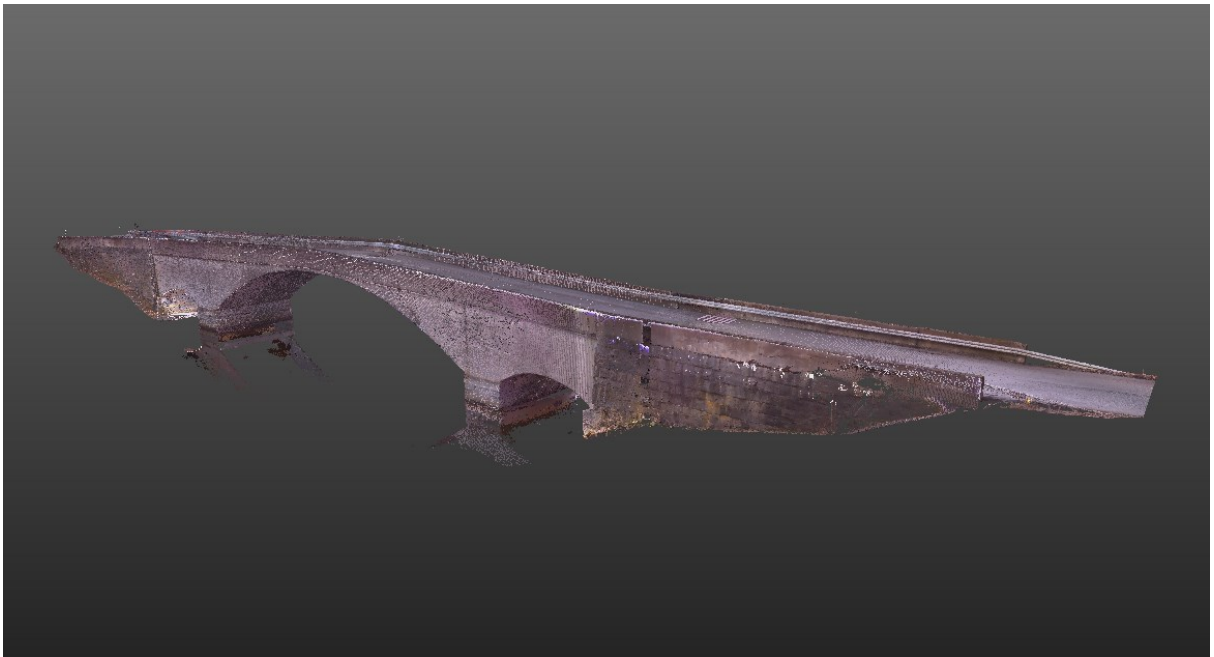
Pilvestä pilveen kokonaisvirhe: 3.05 mm Tallenna RTF muodossa Sulje Ohje

5 Mierolan sillan pistepilvimalli

Kun rekisteröintien luotettavuuteen oltiin tyytyväisiä, oli vuorossa pistepilven tarkempi käsittely. Pistepilvestä poistettiin ylimääräiset objektit, kuten kasvillisuus, ympäristön rakennukset ja ihmiset. RealWorks -ohjelmassa on mahdollista luoda automaattinen luokittelu objekteille, ulkotilaluokittelussa valittavia luokkia poimintaan ovat esimerkiksi rakennus, korkea kasvillisuus sekä liikennepylväät ja merkit.

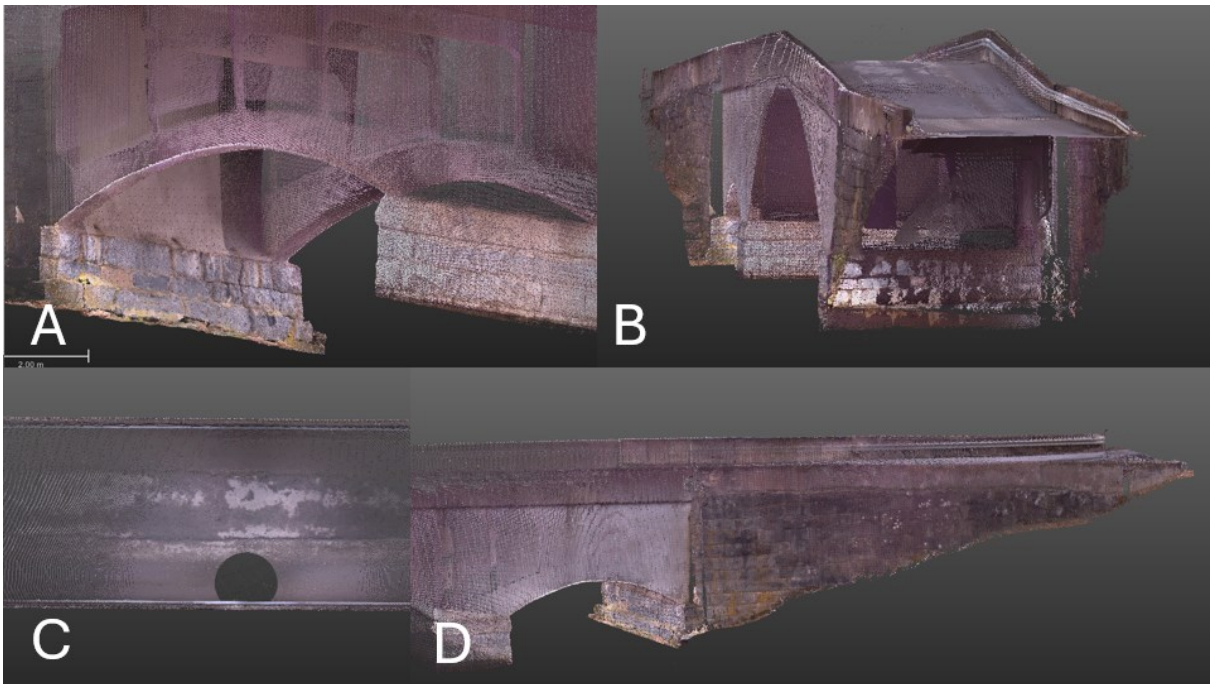
Objektit, joita ohjelma ei saanut luokiteltua tarpeeksi tarkasti, poistettiin manuaalisella rajauksella. Manuaalisella rajauksella oli mahdollista rajata pois jopa yksittäisiä pisteitä tarkasti. Siistimisessä avuksi oli mahdollisuus pyörittää ja tutkia pistepilveä eri suunnista. Kun mallia tutkailtiin eri kulmista ja suunnista, oli helpompi hahmottaa olennaiset pinnat ja tarpeettomat pistepilven osat. Siistitty pistepilvi on esitetty Kuva 11.

Kuva 11 Siistitty pistepilvi



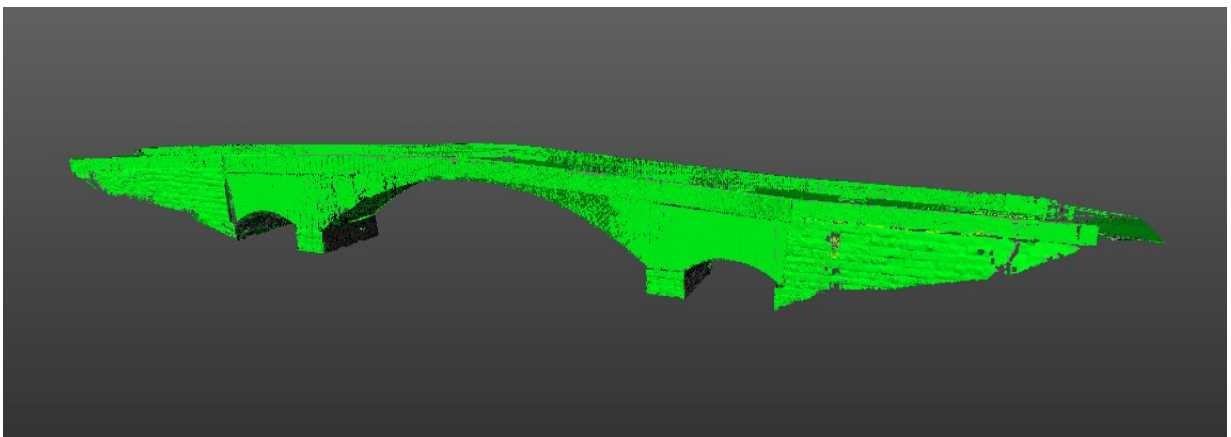
Kuva 12 on esitetty siistityn pistepilven yksityiskohtia. Kohdissa A ja D on näkyvissä sillan kivistä, maatyhteistä kanta- ja sivumuuria sekä teräsbetonikaarirakennetta sillan eteläpäädyssä. Kohdassa B nähdään sillan kansirakennetta pohjoispäädyssä katsoen. Kohdassa C silta on kuvattuna ylhäältä päin. Sillan päällä sijainnut kojeasema näkyy kuvassa pyöreänä aukkona. Lähellä kojeasemaa myös sillan kannen pinta ja sen muodot ovat kuvautuneet tarkasti.

Kuva 12 Siistityn pistepilven yksityiskohtia



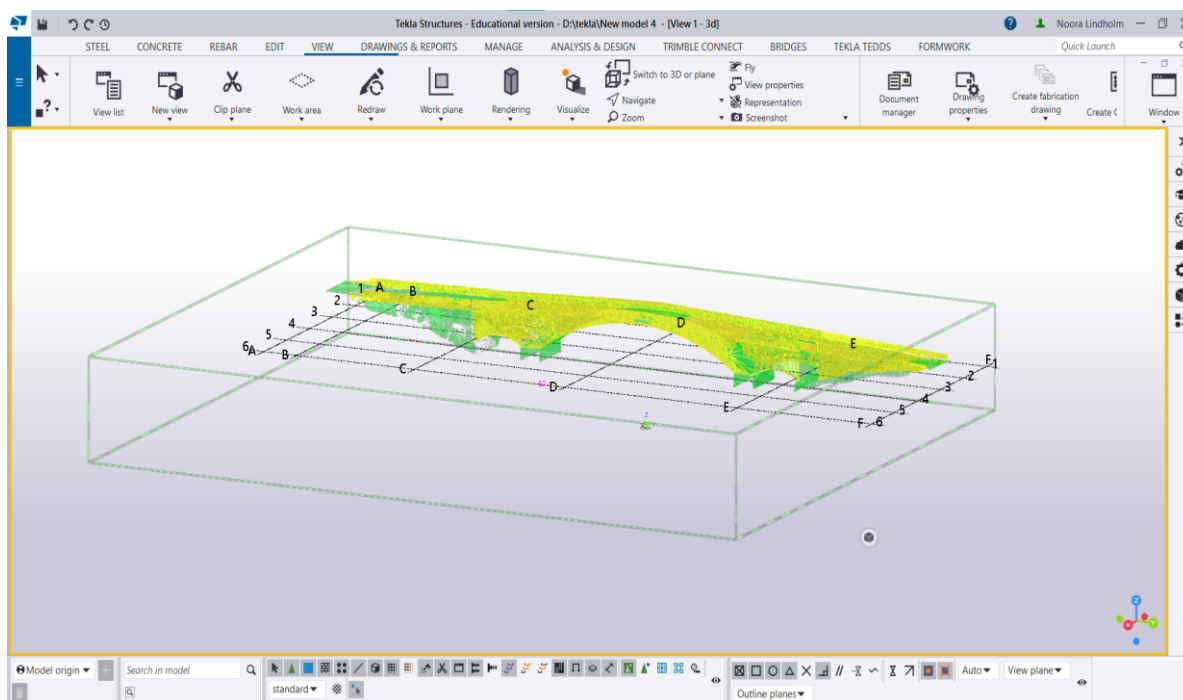
Siistimisen jälkeen pistepilven eri osista luotiin pintoja mallin jatkokäsittelyn helpottamiseksi. Sillassa on vähän suoraa, tasaisia pintoja, joten pelkkien tasopintojen luominen todettiin haastavaksi. Kolmiopintojen luonti (Kuva 13) sen sijaan osoittautui käyttökelpoiseksi menetelmäksi tässä kohteessa, vaikkakin pinnat täytyi tehdä hyvin pienissä osissa. Aluksi kolmiopinnat koetettiin luoda todella yksityiskohtaiseksi, mutta testaamisen jälkeen päädyttiin huomattavasti kevyempiin yksityiskohtiin, sillä muuten tietokoneen kapasiteetti ei olisi riittänyt.

Kuva 13 Malli kolmiopintojen luomisen jälkeen



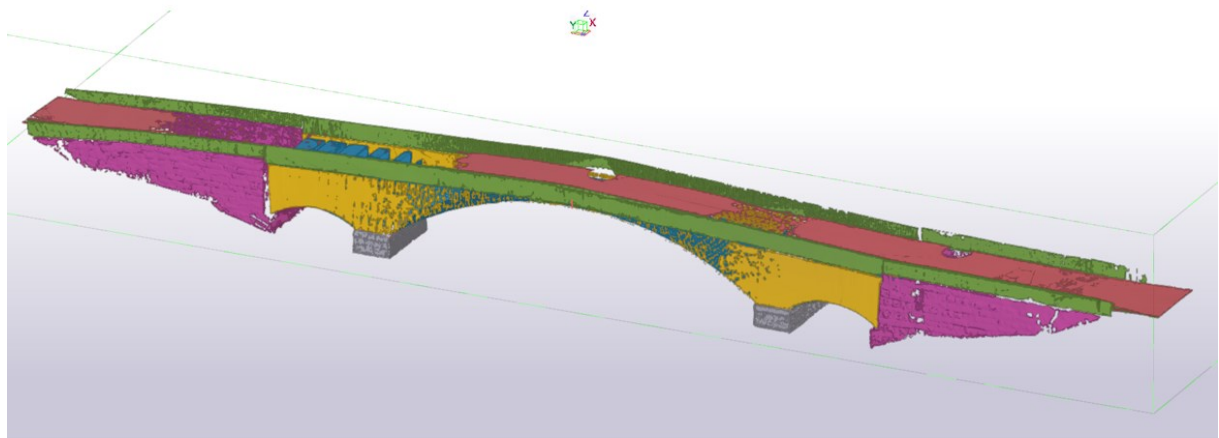
Tekla Structures -ohjelmaan RealWorks -ohjelmassa luotu malli siirrettiin IFC-muodossa Reference model -työkalulla (Kuva 14). Aluksi koetettiin myös eri tiedostomuotoja (esimerkiksi e57- sekä DWG-tiedostomuodot), mutta IFC-muoto todettiin tässä tapauksessa toimivimmaksi ja käyttökelpoisimmaksi. IFC-muodossa mallin osien luokittelu sekä värien ja ominaisuuksien muokkaaminen onnistui helpoimmin.

Kuva 14 Malli Tekla Structures -ohjelmassa



Tekla Structures -ohjelmassa IFC-objektit muunnettiin Tekla Structures-osiiksi ja eri rakenneosat luokiteltiin Class-luokittelun avulla. Tällä tavalla mallista tuli havainnollisempi (Kuva 15). Tekla Structures -ohjelmassa olisi mahdollista verrata luotua pistepilvimallia olemassa olevaan malliin, jolloin mallien eroavaisuudet voisi helposti tarkistaa. Mierolan sillasta ei kuitenkaan ole olemassa aiempaa mallia, joten vertailua ei voitu tehdä.

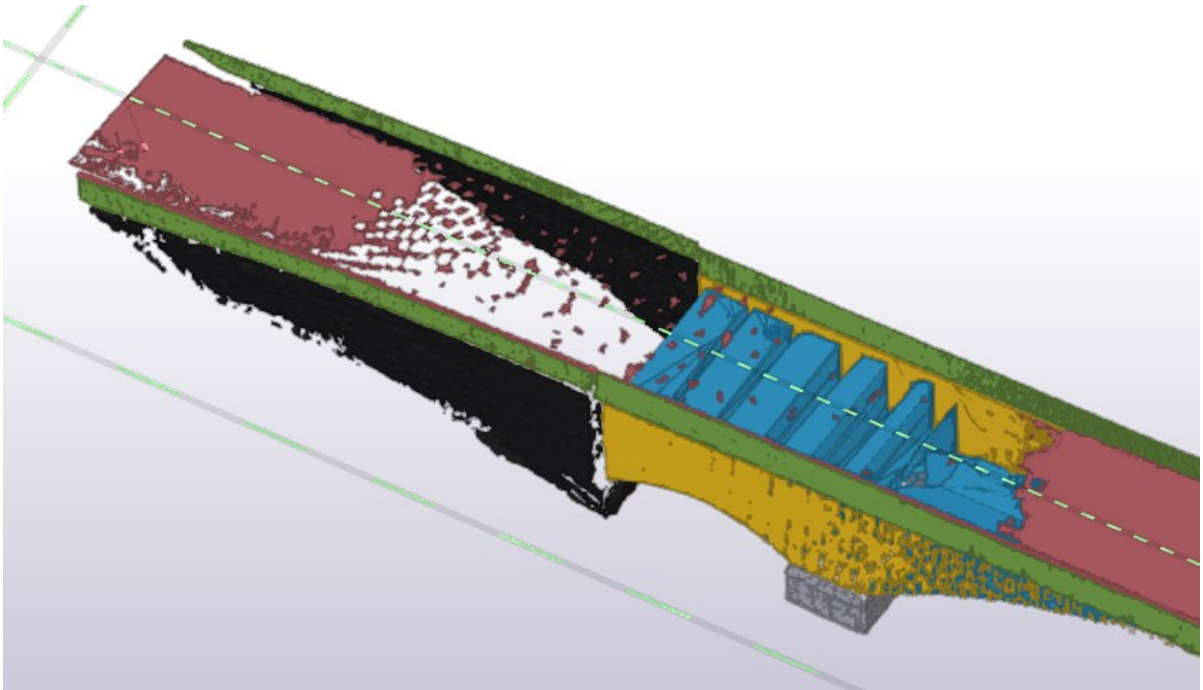
Kuva 15 Rakenneosat havainnollistettuna värein



	Kansilaatta, päällyste asfaltti		Teräsbetonikaarirakenteet, teräsbetoninen keskiholvi
	Kiviset, maataytteiset kanta- ja sivumuurit		Betoniset kaiteet, sisäpinnassa teräksiset johteet
	Teräsbetoniset sivumuurit		Välituet, kivinen kantamuuri, yläosassa betonivalu

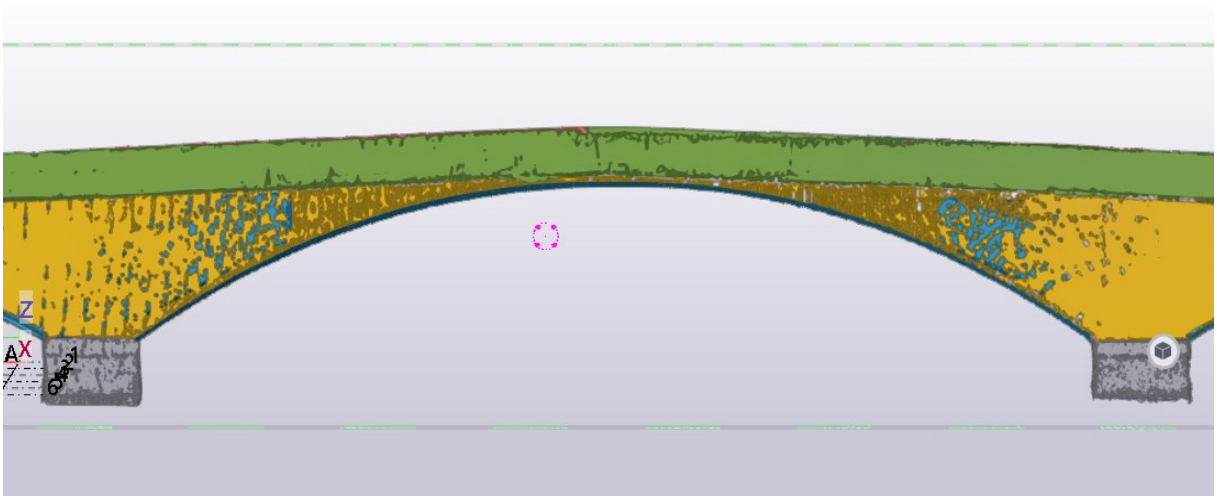
Mallin pintoihin jäi aukkoja, erityisesti kansilaatan päällysteeseen, sillä näissä kohdissa oli joko ollut esteitä (esimerkiksi kasvillisuutta) heikentämässä laserkeilauksesta saatua pistepilviaineistoa tai pistepilven jäätyä muusta syystä liian harvaksi. Kuva 16 on esitetty isoin kansilaatan päällysteen aukko. Kyseisessä kohdassa sillan pinnan kaltevuus on todennäköisesti vaikuttanut syntyneeseen katvealueeseen. Kojeasemat sijaitsivat sillan keskellä ja päädyissä, jolloin myös pitkähkö keilausetaisyys heikensi pistepilven laatua. Kansilaatan päällysteen osalta useampi kojeasema sillan päältä olisi ollut ainoa ratkaisu pistepilven laadun parantamiseen.

Kuva 16 Sillan kansilaatan mallin aukko



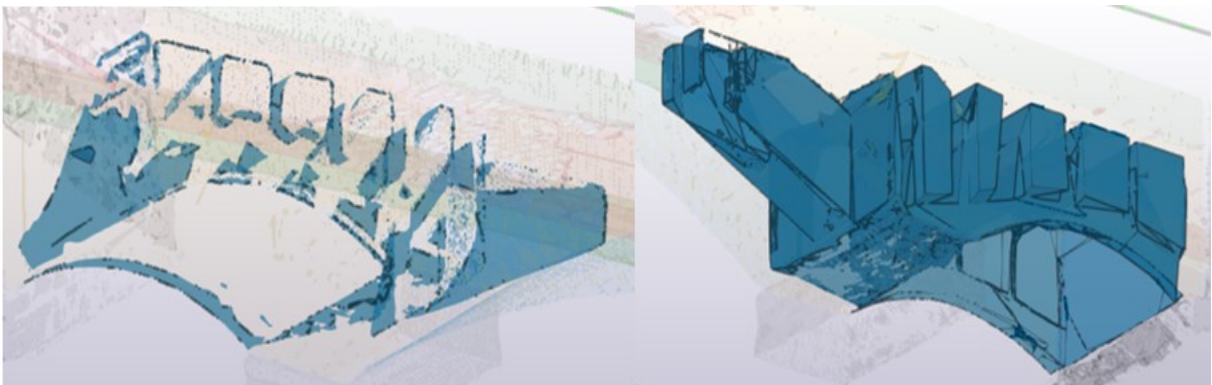
Kuva 17 on nähtävissä sillan sivumuurin mallin aukkoja. Sivumuurin aukot johtuvat pitkästä keilausetäisyydestä. Niiden ehkäiseminen olisi vaatinut kojeasemia veden päältä, eli skannauksen esimerkiksi veneestä käsin. Toisin kuin kansilaatan päällysteen aukot, sivumuurin epätarkkuudet eivät kuitenkaan merkittävästi vaikuta mallin käytettävyyteen sivumuurin pinnan ollessa pääsääntöisesti tasaista ja yhtenäistä.

Kuva 17 Sillan sivumuurin mallin aukkoja



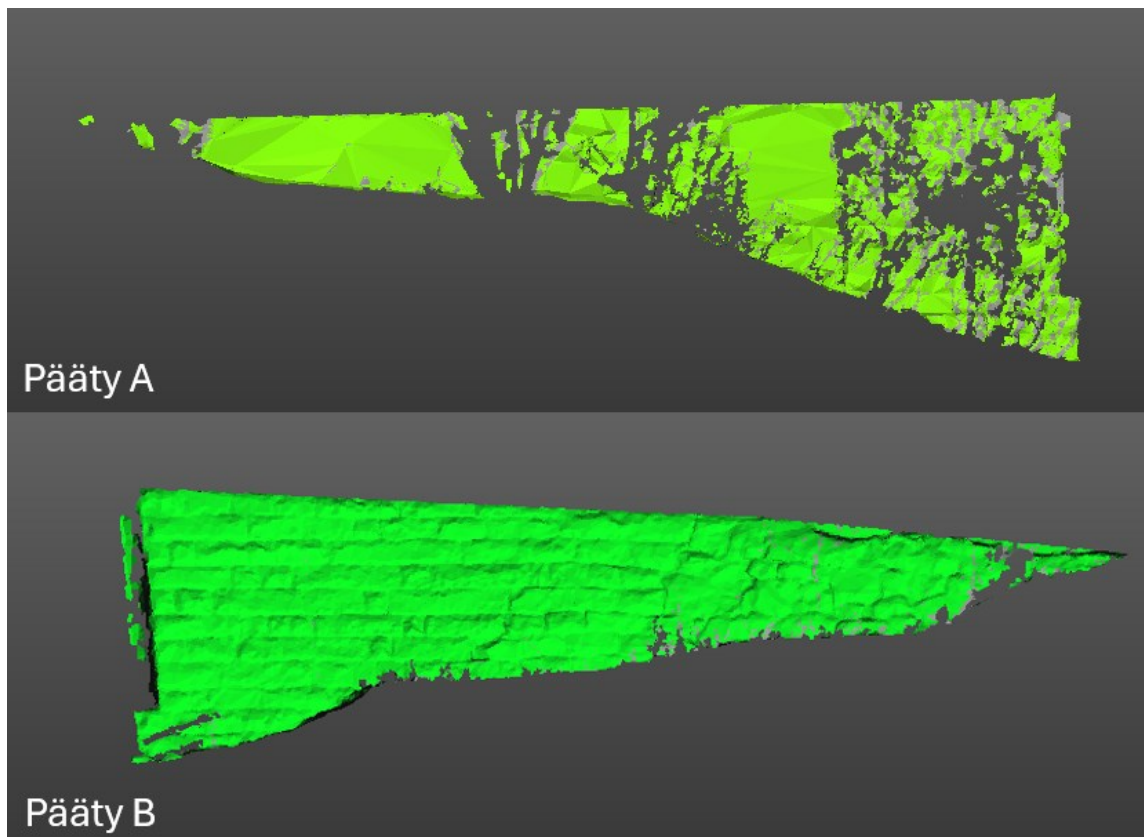
Kuva 18 on havainnollistettu teräsbetoniholvien mallien tarkkuuseroja eri päädyissä. Vasemmanpuoleinen malli on sillan pohjoispäädystä, jossa holvin alle ei ollut pääsyä veden korkeudesta johtuen. Holvin muodot ovat pääpiirteissään nähtävissä, mutta epätarkasti. Oikeanpuoleinen malli on sillan eteläpäädystä, jossa kojeasema saatiin sijoitettua holvin alle mahdollistaen todella tarkan ja luotettavan pistepilven. Pohjoispäädyn holvin tarkempi laserkeilaus olisi vaatinut joko veneen käyttöä tai laserkeilauksen suorittamista syksyllä veden pinnan ollessa mahdollisesti alempana. Holvirakenteiden voidaan olettaa olevan lähes symmetriset.

Kuva 18 Teräsbetoniholvien mallien tarkkuuserot



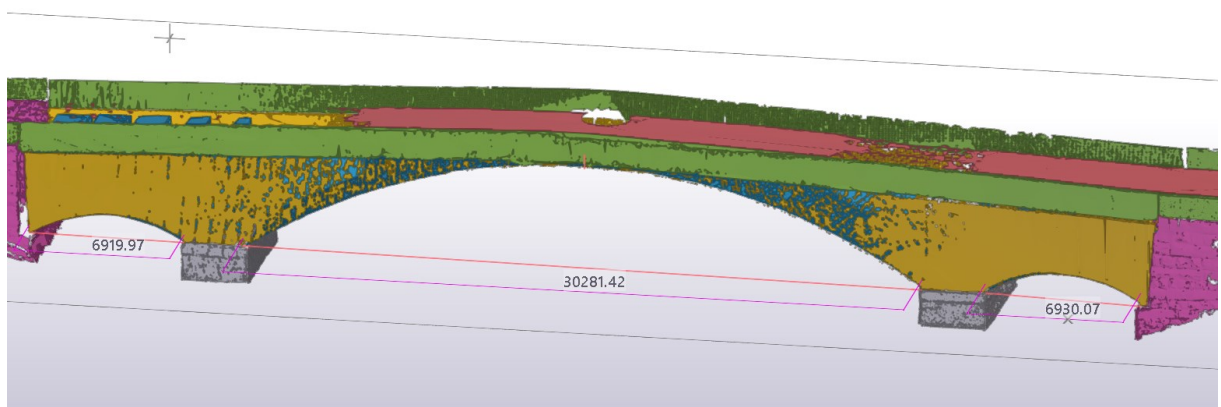
Kuva 19 on esitetty sillan kahden eri päädyn kiviset sivumuurit. Päädyssä A (pohjoispääty) kasvillisuus peitti muuria huomattavasti, ja pinta jäi epätarkaksi, kun taas päädyssä B (eteläpääty) esteitä ei juurikaan ollut ja pääty havaittiin useammasta eri kojeasemasta. Kolmiopintoja muokatessa aukkoja olisi voinut manuaalisesti täyttää, mutta visuaalinen ulkonäkö heikkeni ja käytetyn tietokoneen kapasiteetin ollessa riittämätön ohjelma kaatui usein.

Kuva 19 Kolmiopintojen erot päädyissä



Kuva 20 on havainnollistettu mittatieto-objekteja, joita voitaisiin hyödyntää esimerkiksi mallista tehtävästä yleispiirustuksessa. Yleispiirustusta voitaisiin hyödyntää esimerkiksi sillan korjaussuunnittelussa sekä työnaikaisten telineiden suunnittelussa.

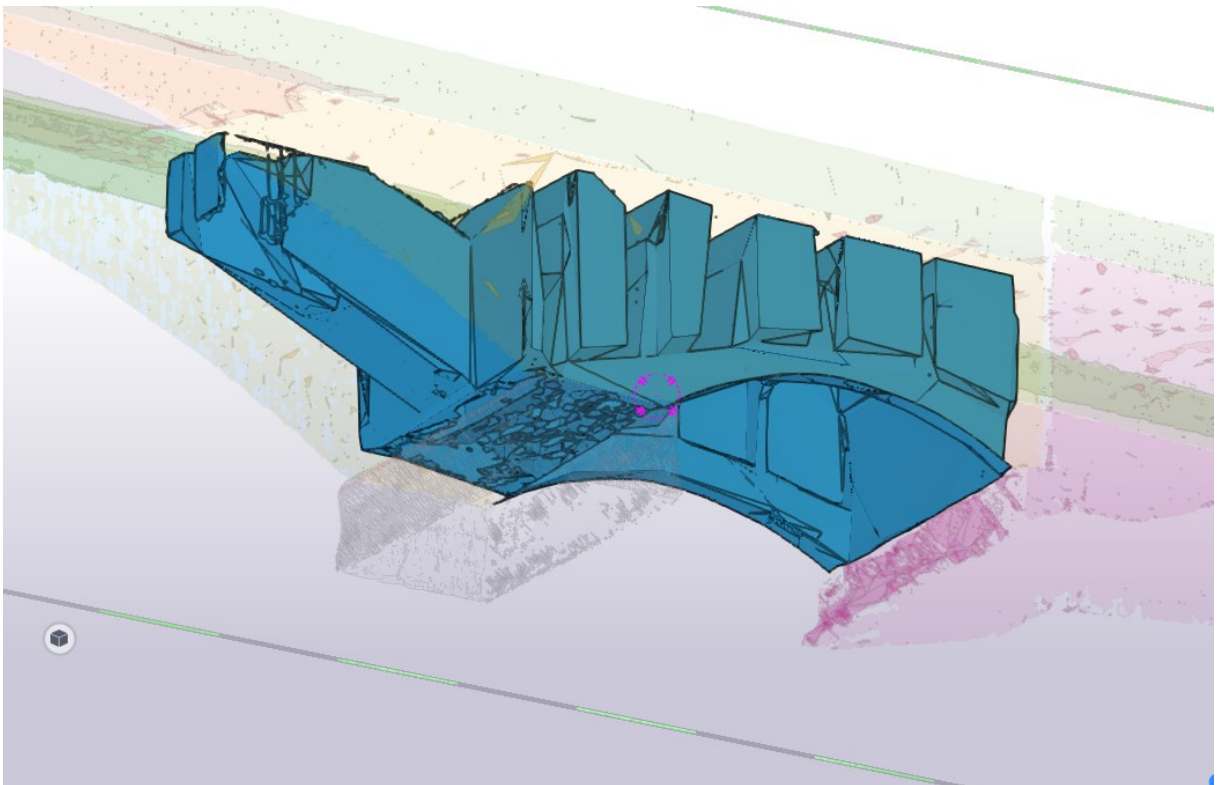
Kuva 20 Mittatietojen havainnollistus



Luodun mallin avulla sillan mittatietojen tarkistus on luotettavampaa ja helpompaa. Esimerkiksi vapaa-aukkojen koko voidaan tarkistaa tarkemmin kuin yksittäisen mittauksen avulla. Mallista voi myös helpommin arvioida määriä.

Esimerkiksi kannen alaosan geometria teräsbetonikaarirakenteineen (Kuva 21) on haastava mallintaa pelkästään olemassa olevien lähtötietojen, kuten kuvien, avulla. Laserkeilauksen avulla luotu lähtötietomalli helpottaa mallintamista huomattavasti.

Kuva 21 Teräsbetonikaarirakenteet



6 Pohdinta

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia laserkeilauksen käyttöä Mierolan vanhan sillan inventointimenetelmänä. Samalla tarkasteltiin sillan lähtötietomallin luomista sekä pistepilvimallin käsittelyä käyttökelpoiseen muotoon käyttäen Trimble RealWorks- ja Tekla Structures -ohjelmistoja. Sillasta saatiin luotua luotettava ja käyttökelpoinen malli.

Opinnäytetyöprosessi koostui laserkeilauksen, pistepilven ja tietomallintamisen teoriataustaan perehtymisestä. Teoriaosuuteen kuului myös laserkeilauksen suunnittelu sekä käytettäviin ohjelmistoihin tutustuminen. Hyvän perehtymisen ja suunnittelun jälkeen suoritettiin laserkeilaus ja laserkeilauksen tuloksena syntyneen pistepilven jatkokäsittely.

Tämän prosessin aikana selkiytyi kuinka paljon aikaa pistepilvimallin luominen ja käsittely vie. Samoin huolellisen suunnittelun tärkeys korostui tässä projektissa; mitä tarkemmin laserkeilaus ja sen toteuttaminen on suunniteltu, sen tehokkaammin ja todennäköisemmin päästään tarkkaan ja luotettavaan lopputulokseen. Myös tekijän osaamisen merkitys ajankäytössä korostui ja tuli ilmi pistepilviaineiston käsittelyssä. RealWorks -ohjelmassa lähes valmiiksi saatu malli vioittui tuntemattomasta syystä, eikä sitä saatu enää palautettua useista yrityksistä huolimatta. Mallin luomiseen oli kulunut useita viikkoja ja kun sen muokkaaminen jouduttiin aloittamaan alusta, samaan vaiheeseen päästiinkin päivissä. Ohjelman käyttö ja tarvittavat työvaiheet olivat tulleet tutuiksi ja tekeminen tehostunut huomattavasti. Samalla myös useiden varmuuskopioiden tärkeys eri työvaiheista korostui.

Opinnäytetyöprosessia jälkikäteen reflektoidessa esiin tuli kehitysehdotuksia, jotka olisivat tehneet prosessista sujuvamman. Mallinnusvaihetta olisi helpottanut, mikäli mallille olisi ollut tarkkaan määritelty käyttötarkoitus. Tällöin tarkkuustaso ja kohteiden valinta olisi ollut selkeämpää ja kojeasemien sijoittelua olisi voinut suunnitella tarkemmin. Olisi myös ollut helpompi arvioida, minkälaisia muokkauksia malliin kannattaa tehdä esimerkiksi ennen siirtoa RealWorks -ohjelmasta Tekla Structures -ohjelmaan.

Laserkeilauksessa olisi ollut tarkoituksenmukaista suorittaa useampi keilaus sillan päältä. Tämä olisi parantanut mallinnuksen tarkkuutta erityisesti sillan kansilaatan osalta, mutta olisi kuitenkin vaatinut liikenteen pysäyttämisen työturvallisuuden takaamiseksi. Pistepilvien rekisteröinti olisi todennäköisesti sujunut jouhevammin lisäkojeasemien myötä, sillä yhteisiä pintoja olisi ollut enemmän. Myös erillisten tähyksien käyttö olisi voinut olla avuksi rekisteröinneissä helpottaen pistepilvien yhdistämistä. Sillan pohjoispäädyn keilaus vällinneissa olosuhteissa olisi vaatinut esimerkiksi veneen tai dronen käyttöä, jotta kaikki osat

olisi saatu keilattua, myös keskiholvin pistepilveä olisi näillä välineillä saatu tarkemmaksi. Todennäköisesti syksyllä vedenpinta voisi olla alempana, jolloin pohjoispäädyn keilaus onnistuisi myös ilman erillisiä apuvälineitä. Ulkokohteissa laserkeilauksen ajankohdan valinta nouseekin tärkeään asemaan.

Syntynyttä mallia voidaan hyödyntää esimerkiksi sillan korjauksen yhteydessä. Mierolan sillasta on tehty korjaussuunnitelma ja mikäli silta korjataan, siitä voisi suorittaa uuden laserkeilauksen ja verrata syntynyttä pistepilvimallia tässä opinnäytetyössä tehtyyn malliin. Laserkeilauksen tuloksena syntynyttä pistepilveä ja siitä jalostettua aineistoa voidaan hyödyntää korjaussuunnittelussa myös sillan painumien tai muiden muutosten seurannassa. Tämä vaatisi tarkemman mallin, jotta muutoksia voitaisiin vertailla luotettavasti. Tarkkuutta malliin saataisiin esimerkiksi ottamalla useampia laserkeilauksia sillan päältä.

Laserkeilauksen etuina voidaan pitää tässä kohteessa sen nopeutta, tarkkuutta ja mahdollisuutta tuottaa aineistoa monimutkaisistakin rakenteista. Laserkeilauksen haasteiksi puolestaan voidaan todeta laitteistojen ja ohjelmistojen kustannukset, kohteiden työturvallisuuden varmistamisen sekä ulkokeilauksessa ympäristöolosuhteiden vaihtelevuuden. Tiedostokoot ovat myöskin suuria ja aineiston jälkikäsittely vaatii osaamista ja perehtyneisyyttä ollakseen tehokasta. Vaikka kehityskohteita tulikin esiin, opinnäytetyön tarkoituksiin saatu lopputuote on luotettava ja tarkkuudeltaan tarkoituksenmukainen. Laserkeilauksen avulla silloista on mahdollista luoda havainnollinen ja tarkka inventointimalli.

Lähteet

- Autodesk. (n.d.) *Autodesk Revit: BIM-ohjelmisto kaikenlaiseen suunnitteluun ja valmistukseen*. Haettu 15.3.2024 osoitteesta <https://www.autodesk.fi/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- Geotrim. (n.d.-a). *Trimble RealWorks. Ohjelmisto pistepilvien käsittelyyn*. <https://geotrim.fi/tuotteet/ohjelmistot/toimisto-ohjelmisto-trimble-realworks/>
- Geotrim. (n.d.-b) *Trimble® X7*. <https://buildingpointfinland.fi/tuotteet/laitteet/trimble-x7/>
- Heikkilä, R., Karjalainen, A., Pulkkinen, P., Haapa-Aho, E., Jokinen, M., Oinonen, A. & Jaakkola, M. (12/2005). *Siltojen 3D-suunnittelu- ja mittausprosessin kehittäminen ja käyttöönottoaminen (Älykäs silta)*. Tiehallinnon selvityksiä 12/2005. <https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Ava-palvelin/pdf/3200924-vsiltojen3dsuunn.pdf>
- Hurme, R., Häyrynen, M., Penttala, E., Putkonen, L., Soini, E., & Vähäkallio, P. (1991). *Betoni Suomessa 1860–1960*. Suomen betonitieto.
- Joala, V. *Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu*. (2006). Leica Nilomark Oy. <https://drive.google.com/file/d/0B3MfAq-wXowIN2Q4MzJIYjktZTA5Ni00ZGM5LTikOWUtNTQzMdIwZTI3NDVm/view?pli=1&sourcekey=0-oQ0IKbagU1tAsVfnZXWibq>
- Keitaanniemi, A. (28.12.2021) *Huomioitavat asiat saneerauskohteen laserkeilausta suunniteltaessa*. BuildingPoint Finland. <https://buildingpointfinland.fi/huomioitavat-asiat-saneerauskohteen-laserkeilausta-suunniteltaessa/>
- Liimatainen, K. (11/2007). *Tiehallinnon museotiet ja -sillat*. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 11/2007. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Tiehallinto/4000555-vtieh_museotiet_ja_sillat.pdf
- Lubowiecka, I., Armesto, J., Arias, P. & Lorenzo, H. (2009). Historic bridge modelling using laser scanning, ground penetrating radar and finite element methods in the context of structural dynamics. *Engineering Structures*. 31(11), 2667-2676. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.06.018>

Museovirasto. (22.12.2009). *Valtakunnallisesti merkittävät rakennetut kulttuuriympäristöt.*

https://www.rky.fi/read/asp/r_kohde_det.aspx?KOHDE_ID=48

RIL 179-2018. *Sillat: Suunnittelu, toteutus ja ylläpito.* Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Rashidi, M., Mohammadi, M., Kivi, S. S., Abdolvand, M. M., Truong-Hong, L., & Samali, B. (2020). A Decade of Modern Bridge Monitoring Using Terrestrial Laser Scanning: Review and Future Directions. *Remote sensing (Basel, Switzerland)*, 12(22), 3796.

<https://doi.org/10.3390/rs12223796>

Riveiro, B., Linderbergh, R. (2020). *Laser Scanning: An Emerging Technology in Structural Engineering.* ISPRS.

https://books.google.fi/books?hl=fi&lr=&id=6UW4DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=MMvLG90rBV&sig=nIDBs_fVSBvCAQNiMUu0X014SA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

RT 103375 (2021). *Pistepilviaineisto suunnittelun lähtötietona ja inventointimallintaminen.*

Rakennustieto Oy. <https://kortistotezp-rakennustieto-fi.ezproxy.hamk.fi/resource/juha/content/22206#page=1>

RT 103133 (2019). *Rakennuksen laserkeilaus.* Rakennustieto Oy. <https://kortistotezp-rakennustieto-fi.ezproxy.hamk.fi/resource/juha/content/22206#page=1>

Tekla. (n.d.) *Tekla Structures.* Haettu 15.3.2024 osoitteesta

<https://www.tekla.com/fi/tuotteet/tekla-structures>

Trimble. (n.d.) *3D Scanning Software. Trimble RealWorks.* Haettu 7.3.2024 osoitteesta

<https://fieldtech.trimble.com/en/product/trimble-realworks>

Väylävirasto. *Väyläviraston sillat 31.12.2022.* Väyläviraston julkaisuja 8/2024.

https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/188467/vj_2023-82_978-952-405-126-2.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Väylävirasto. *Siltojen inframalliohje.* Väyläviraston ohjeita 41/2022.

https://ava.vaylavirasto.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2022-41_siltojen_inframalliohje.pdf

Zhou, L., Sun, G., Li, Y., Li, W., Su, Z. (2022) Point cloud denoising review: from classical to deep learning-based approaches. *Graphical Models*, 121, 2.
<https://doi.org/10.1016/j.gmod.2022.101140>