

CLT-KOETALON TAIPUMIEN MITTAUS LASER- KEILAIMELLA

Toimeksiantaja Arctic Power

Joni Hakola

Opinnäytetyö
Tekniikka ja liikenne
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

2015

Tekniikka ja liikenne
Maanmittaustekniikka

| | | |
|----------------------------|---|------|
| Tekijä | Joni Hakola | 2015 |
| Ohjaaja | Timo Karppinen | |
| Toimeksiantaja | Arctic Power | |
| Työn nimi | CLT-koetalon taipumien mittaus laserkeilaimella | |
| Sivu- ja liitemäärä | 30 | |

Tämä opinnäytetyö tehtiin Lapin ammattikorkeakoulun alaisuudessa toimivan Arctic Powerin toimeksiannosta ja työ on osa CLT-koetalossa tehtäviä tutkimuksia. Työn tavoitteena oli mitata CLT-koetalon rakenteiden taipumia. Tutkimus suoritettiin mittaamalla Kemiin rakennetun koetalon pintoja säännöllisin väliajoin. Mittaustulosten avulla laskettiin pintojen taipumat.

Koetalon mittaukset suoritettiin Lapin ammattikorkeakoulun Z+F IMAGER 50061 -vaihe-erolaserkeilaimella. Mittaustavaksi valittiin laserkeilain, koska taipumien oletettiin olevan vähäisiä, jolloin erittäin tarkat mittaustulokset ovat tärkeitä. Mittaukset tehtiin seitsemänä päivänä vuoden 2014 aikana ja laserkeilauksia suoritettiin yhteensä 29.

CLT-koetalon taipumat olivat erittäin vähäisiä ja pysyivät samanlaisina koko vertailukauden ajan. CLT-rakentaminen tulee varmasti lisääntymään tulevina vuosina Suomessa.

Laserkeilain soveltui koetalon mittaukseen erittäin hyvin. Suurimmat edut keilaimen valitsemisessa tämän opinnäytetyön mittauksiin olivat keilaimen suuri mittaustarkkuus ja laaja aineisto, jota saatiin kerättyä erittäin nopeasti.

Avainsanat

CLT-koetalo, laserkeilaus, vaihe-erolaserkeilain

Technology, Communication and
Transport
Degree Programme of Land Surveying

| | | |
|--------------------------|--|------|
| Author | Joni Hakola | 2015 |
| Supervisor(s) | Timo Karppinen | |
| Commissioned by | Arctic Power | |
| Subject of thesis | Measuring the Deflections of the CLT Experimental House by Using a Laser Scanner | |
| Number of pages | 30 | |

This thesis was commissioned by Arctic Power which is a research, development and testing center at the Lapland University of Applied Sciences. This thesis was part of a study which is based on the measurements made in the experimental CLT house located in Kemi, Finland. The main goal of this thesis was to measure the deflection of the structures of the CLT house.

The research was accomplished by measuring the surfaces of the experimental house in a regular time basis. By using the measurement results the deflections of the surfaces could be calculated. The measurements of the experimental house were done by using the Z+F IMAGER 50061 laser scanner. The laser scanner was selected to be used in this research because the deflections were estimated to be relatively small. This is why very accurate measurements were crucial. The measurements were done in seven days during the year 2014 and there were 29 laser scans carried out altogether.

The measurement results were similar during the entire comparison interval. The deflections of the structures were remarkably small, only about a few millimeters compared to the scale of all measurement results. The laser scanner suited to this research extremely well. The greatest advantages of the laser scanner were its precise measurement accuracy and wide scale of data the device was capable to measure. In addition the data could be collected in a short time basis.

Key words: CLT experimental house, laser scanner, measurements

SISÄLTÖ

| | |
|---|----|
| KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO | 5 |
| 1 JOHDANTO | 6 |
| 2 LASERKEILAUUS | 7 |
| 2.1 YLEISTÄ | 7 |
| 2.1.1 Toimintaperiaate | 7 |
| 2.1.2 Laatuun vaikuttavat tekijät | 8 |
| 2.2 KÄYTTÖTAVAT JA –KOHTEET | 9 |
| 2.2.1 Kaukokartoitus- eli ilmalaserkeilaus | 9 |
| 2.2.2 Terrestriaalinen laserkeilaus eli maalaserkeilaus | 10 |
| 2.2.3 Teollisuuslaserkeilaus | 11 |
| 2.3 Z+F IMAGER 5006i | 12 |
| 3 CLT-RAKENTAMINEN | 13 |
| 3.1 Yleistä CLT-rakentamisesta | 13 |
| 3.2 CLT-koetalo | 15 |
| 4 RAKENNUKSEN MITTAUS LASERKEILAIMELLA | 17 |
| 4.1 TUTKIMUKSEN TOTEUTTAMINEN | 17 |
| 4.1.1 CLT-Koetalon muodonmuutokset vaakarakenteissa | 17 |
| 4.1.2 Tutkittavat rakenteet | 17 |
| 4.2 MITTAUSTAVAN VALINTA | 18 |
| 4.3 MITTAUSPROSESSI | 19 |
| 4.3.1 Mittausalueeseen tutustuminen ja valmistelut | 19 |
| 4.3.2 Laserkeilaus | 19 |
| 4.3.3 Ongelmat | 20 |
| 4.4 MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELY | 21 |
| 4.4.1 Esikäsitteily Zoller+Fröchlich LaserControl-ohjelmistolla | 21 |
| 4.4.2 Pistepilven jatkokäsittely | 22 |
| 4.4.3 3D-WIN ohjelmistolla tehtävä vertailu | 23 |
| 5 TUTKIMUKSEN TULOKSET | 25 |
| 6 JOHTOPÄÄTÖKSET | 28 |
| LÄHTEET | 30 |

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

| | |
|---|----|
| KUVIO 1. LASERKEILAIMIEN PEILIJÄRJESTELMÄTYYPIT | 8 |
| KUVIO 2. LASERKEILAIN TYYPIT | 11 |
| KUVIO 3. CLT-LEVYJÄ | 13 |
| KUVIO 4. CLT-KOETALO..... | 15 |
| KUVIO 5. TUTKITTAVIEN TAIPUMIEN KOHDAT | 18 |
| KUVIO 6. VALMIIKSI KÄSITELTY MITTAUS LASERCONTROL- OHJELMASSA..... | 22 |
| KUVIO 7. PISTEPILVI TRIMBLE REALWORKS SURVEY-OHJELMASSA . | 23 |
| KUVIO 8. PINTOJEN EROMITAT 3D-WIN-OHJELMASSA | 24 |
| | |
| TAULUKKO1. Z+F IMAGER 5006I -LASERKEILAIMEN TEKNISIÄ TIETOJA (ZOLLER+FRÖHLICH GMBH 2009, 8-9). | 12 |
| TAULUKKO2. CLT-KOETALON YLÄPOHJAN VERTAILU | 25 |
| TAULUKKO3. CLT-KOETALON VÄLIPOHJAN VERTAILU | 26 |
| TAULUKKO4. CLT-KOETALON ALAPOHJAN VERTAILU | 27 |

1 JOHDANTO

CLT lyhenne tulee sanoista Cross Laminated Timber, joka on uusi rakentamisen muoto Suomessa. Liimaamalla ristikkäin ladotuista kerroksista muodostuu puulevy, jonka ominaisuuksia ja etuja ovat muun muassa jämäkyys, ekologisuus ja turvallisuus. CLT-rakentaminen on ollut käytössä Keski-Euroopassa ja Amerikassa useita vuosia. Tämän rakentamismuodon yleistyessä Suomessa, Kemiin rakennettiin CLT-koetalo, jossa tutkitaan kyseisen rakennustavan soveltuvuutta Pohjois-Suomen olosuhteissa. Talo sijaitsee Digipolis-Kampuksen alueella. (Arctic Power 2015b.)

Koetalossa suoritetaan erilaisia mittauksia kuten kosteus, lämpötila- ja taipumamittaukset. Mittaukset suoritetaan Arctic Power osaamiskeskittymän toimesta. Tässä opinnäytetyössä työssä suoritetaan taipumamittaukset, tulosten käsittely, kirjaus sekä tutkitaan laserkeilauksen soveltuvuutta tämänkaltaisiin tutkimuksiin.

Rakenteiden mittauksiin käytetään usein maalaserkeilainta, koska tämän tyyppinen keilain antaa erittäin tarkan mittaustuloksen ja laajan pistepilven. Oletuksena ovat, että taipumat eivät ole kovin suuria, joten tarkat mittaustulokset ovat tärkeitä. Viime vuosikymmenien aikana laserkeilaimet ovat yleistyneet hurjaa vauhtia maanmittausalalla.

Opinnäytetyön tarkoituksena on tuottaa Arctic Powerille tarvittavat tulokset CLT-talon rakenteiden taipumista. Taipumia tutkitaan mittaamalla talon rakenteita sovituin väliajoin ja vertaamalla tuloksia. Rakenteiden mittaus suoritetaan laserkeilaimella sen tarkan mittaustarkkuuden vuoksi.

Tämä opinnäytetyö käsittelee koetalon rakenteiden taipumien tutkimusprosessia maanmittausalan näkökulmasta. Saatuja mittaustuloksia hyödynnetään Ilkka Raution opinnäytetyössä, jossa tutkitaan taipumia sekä verrataan laskettuja tuloksia tarkemmin.

2 LASERKEILAUS

2.1 Yleistä

Laserkeilaus tarkoittaa yleistä etäisyyden mittaussuunnitelmaa. Mittaus perustuu lähtevän valon kulkuun keilaimesta kohteeseen ja takaisin. Lisäksi laserkeilaus perustuu mittaussuuntien tarkkaan orientointiin (Laurila 2012, 275). Laserkeilaimet jaetaan kolmeen luokkaan: maalaserkeilaimet, ilmalaserkeilaimet ja lähilaserkeilaimet. Keilaimet jakautuvat käyttötarkoituksen perusteella. Keilainluokasta riippumatta mittauksesta muodostuu kolmiulotteinen pistepilvi, jossa jokaisella pisteellä X-, Y-, ja Z-koordinaatit. Pistepilvestä voidaan tuottaa muun muassa pintamalleja, kolmioverkkoja ja CAD-malleja. Luodusta mallista voidaan mitata ja tarkastella yksityiskohtia millimetrin sadasosien tarkkuudella. Nykyajan tekniikalla kolmiulotteista kuvaa voidaan pyörittää ja tarkastella sekä muokata digitaalisesti. Laserkeilainaineiston muokkaamiseen ja käsittelyyn tarvitaan yleensä useita eri sovellusohjelmia. (Ahlavuo, Hyyppä & Kukko 2009, 19.)

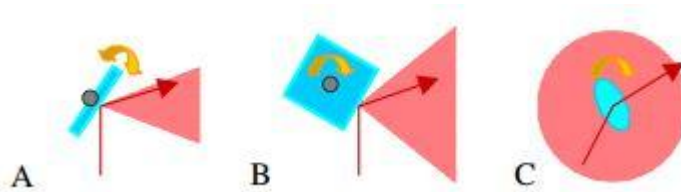
2.1.1 Toimintaperiaate

Laserkeilaimet jaetaan toimintaperiaatteen perusteella kahteen päätyyppiin, aikaero- ja vaihe-erolaseriin. Pulssi- eli aikaerolaser lähettää laserdiodin tuottaman energiapulssin kahden suuntakulman määrittämään suuntaan. Pulssin kulkuaika kohteen sekä laserin välillä mitataan ja aikaerosta lasketaan etäisyydennäköisyysmittaus tulos. Laserin lähettämistä pulsseista muodostetaan kolmiulotteinen näkymä ympäristöstä. Pulssilaserin etuna on mittausetäisyys joka vaihtelee muutamasta metristä yli kilometriin, mutta mittanopeus on hidas. (Kukko 2005, 6–7)

Jatkuva-aaltoisen eli vaihe-erolaserin ero aikaerolaseriin on, että se lähettää jatkuvaa signaalia eri kantoaallonpituuksilla. Kolmiulotteisen näkymän ja etäisyyksien mittaus tapahtuu samalla tavalla kuin aikaerolaserilla eli laserin lähettämistä pulsseista muodostetaan kolmiulotteinen näkymä ympäristöstä. Jatkuva-aaltoisen laserin etuna on erittäin suuri mittausnopeus. Laserin mittausnopeus on parhaimmillaan yli miljoona pistettä sekunnissa (Heiska 2010,

14). Vaihe-erolaserin mittausetäisyys jää alle sataan metriin. (Kukko 2005, 6-7.)

Laserkeilaimen toimintatapaan vaikuttaa myös peilijärjestelmän toteutus. Toteutus voi olla joko ympäripyörivä tai oskilloiva. Alla oleva kuvio 1 kuvaa laserkeilaimissa käytettävät peilijärjestelmätyypit. Oskilloiva peili tuottaa kaavamman keilauskulman verrattuna ympäripyörivään peiliin. Pyörivä peilijärjestelmä voidaan toteuttaa kahdella tavalla: polygonipeilillä ja pyörivällä vinopeilillä. Polygonipeilillä saadaan tyypillinen 90 asteen keilauskulma ja pyörivällä vinopeilillä 360 asteen keilauskulma. Pyörivän vinopeilin toteutuksessa on kuitenkin otettava huomioon, että laitteen runko saattaa aiheuttaa rajoituksia. (Kukko 2005, 6.)



Kuvio 1. Laserkeilaimien peilijärjestelmätyypit. (Kukko 2015, 6.)

2.1.2 Laatuun vaikuttavat tekijät

Prosesseissa, joissa käytetään erilaisia mittaustyövälineitä, on myös tärkeä tarkastella laatuun vaikuttavia tekijöitä. Hyvänlaatuiset mittaustulokset takaavat laadukkaammat loppuanalyysit. Laserkeilausprosessiin vaikuttaa kolme tärkeää laadun tekijää; yksittäisen mitatun pisteen laatu, pistepilven tiheys ja erikseen mitattujen pistepilvien yhdistämisen laatu. (Joala 2006, 3.)

Tiheä pistepilvi tarkoittaa tarkkaa mittaustulosta, kunhan yksittäisen pisteen laatu on hyvä. Mitä lyhempi yksittäisten pisteiden välimatka pistepilvessä on, sitä tarkempi mallinnus kohteesta saadaan. Pistepilven tiheys heikkenee matkan funktiona eli kohteen etäisyys vaikuttaa mittaussaineiston tarkkuuteen. (Joala 2006, 3.)

Yleensä kohteen keilaamiseen tarvitaan monta kojeasemaa, jotta lopputuloksesta saadaan tarpeeksi kattava. Eri kojeasemien pistepilvien yhdistämiseen kokonaiseksi pistepilveksi on useita menetelmiä. Tarkin ja käytetyin tapa yhdistää pistepilviä on käyttää vähintään kolmea yhteistä tähyistä. Tähykset ovat yleensä puolipalloja, pallomaisia tai tasaisia. Mittausta suorittaessa tähyisten keskipiste on mitattava keilaimella. Pistepilvien yhdistämisen tarkkuus tähyksiä käyttämällä on parhaimmillaan yhdestä kolmeen millimetriä. Tähyksille voidaan mitata myös koordinaatit takymetrillä, jotta pistepilvi voidaan siirtää tarvittavaan koordinaattijärjestelmään. (Joala 2006, 4.)

Pistepilvien yhdistäminen voidaan tehdä myös käyttämällä yhteisiä mallinnettuja kohteita. Näille kohteille annetaan koodit ja niitä käytetään avuksi pistepilvien yhdistämisessä. Tämä yhdistämistapa ei kuitenkaan ole läheskään niin tarkka kuin tähyisten keskipisteiden käyttö. (Joala 2006, 4.) Pistepilvien yhteisten alueiden avulla voidaan myös kaksi pilveä yhdistää. Tämä yhdistämistapa vaatii, että kahden pistepilven välillä on ainakin kolmasosan yhteistä peittoa. Isommissa projekteissa käytetään useasti edellä mainittujen menetelmien yhdistelmiä pistepilvien yhdistämiseksi. (Joala 2006, 4.)

2.2 Käyttötavat ja -kohteet

2.2.1 Kaukokartoitus- eli ilmalaserkeilaus

Ilmalaserkeilaus perustuu lentokoneeseen, helikopteriin tai miehittämättömään ilma-alukseen sijoitettuun keilaimen lähettämiin pulsseihin, jotka heijastuvat takaisin osuessaan maanpintaan. Pisteiden paikannustiedot saadaan yhdistämällä ilma-aluksen kallistuskulmista kertovista inertialaitteista, GPS-paikannuksesta ja laseretäisyysmittauksesta saadut tiedot. Jokainen pulssi tallennetaan pistepilveen, josta niiden koordinaatteja ja tietoja voidaan tutkia. Yleisin kaukokartoituksen lopputuote on maastomalli, mutta pistepilvestä saadaan myös aineistoa moniin muihin tarkoituksiin. Mittausaineistoa käytetäänkin muun muassa: ympäristötutkimukseen, maisematutkimukseen, infra-

suunnitteluun, tulvamallinnukseen ja metsäntutkimukseen. (Maanmittauslaitos 2015; Nordic Geo Center 2015.)

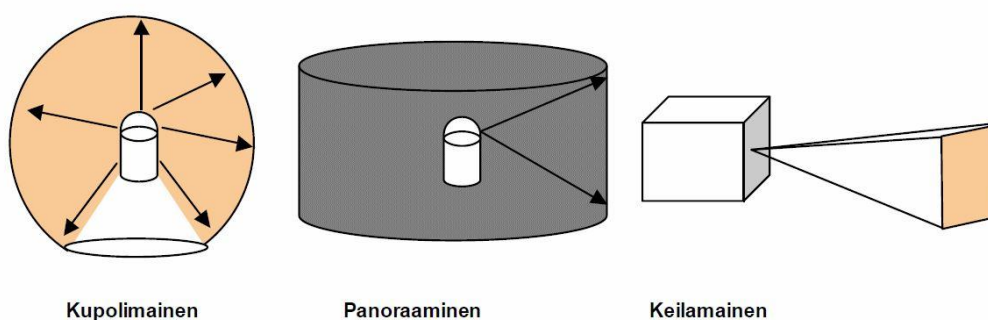
Laserkeilaimesta lähtevä signaali saattaa osua useampaan kohteeseen, esimerkiksi puun oksaan ja maanpintaan, jolloin sensori tallentaa molemmille paluusignaaleille tiedot ja koordinaatit. Useamman signaalin kerääminen mahdollistaa maanpinnan mittaamisen myös kasvuston peittämällä alueilla. Usean signaalin yhtäaikainen kerääminen on suurimpia etuja, kun verrataan laserkeilausta aikaisempiin korkeustiedon tuottamismenetelmiin kuten ilmakuvatulkintaan. (Maanmittauslaitos 2015; Nordic Geo Center 2015.)

2.2.2 Terrestriaalinen laserkeilaus eli maalaserkeilaus

Maalaserkeilainten käyttö erilaisissa mittaustehtävissä on lisääntynyt. Mittausalan tekniikka on kehittynyt kovaa vauhtia ja lisäksi laitteiden ja ohjelmien käytön koulustus on vakiintunut oppilaitoksissa. Maalaserkeilauksen kehitys on laahannut jäljessä verrattuna esimerkiksi ilmalaserkeilauksen kehitykseen. Geodeettiseksi mittalaitteeksi se on alettu hyväksyä vasta viime vuosina maanmittausasiantuntijoiden keskuudessa. Geodeettisella mittalaitteella tarkoitetaan kojetta, jolla voidaan suorittaa erilaisia kartoituksia ja mittauksia. (Heiska 2010, 14–15.)

Nimensä mukaisesti maalaserkeilaimella mittaus tapahtuu maanpinnalta. Keilainjärjestelmä koostuu kolmijalasta, pakkokeskitysjalustasta ja keilaimesta. Mittausta valvotaan tietokoneella, älytietokoneella tai keilaimen ohjauspaneelilla. Näiden avulla määritetään muun muassa mittausparametrit sekä mittausalueet. Maalaserkeilaimen käyttö on parhaimmillaan vaikeakulkuisissa tai vaarallisissa paikoissa, kuten avolouhoksissa tai luolissa. Keilain voidaan myös kiinnittää liikkuvaan ajoneuvoon tai veneeseen. Autoon kiinnitettyä keilainta voidaan käyttää hyväksi tieympäristön kartoittamisessa, tiealueen inventoimisessa sekä tienpinnan mittauksissa. Veneeseen kiinnitettynä keilainta voidaan hyödyntää vesistöjen ranta-alueiden mallintamisessa. (Suominen 2009, 45–46.)

Toimintaperiaatteen pohjalta maalasaserkeilamat voidaan jakaa neljään eri ryhmään. Yleisimmin käytetty keilaintyyppi on kupolimaisesti mittaava (kuvio 2). Tätä tapaa käyttämällä, mittaamatta jää vain pieni alue kojeen alapuolelta. Katvealue muodostuu rungon teknisestä rajoitteesta. Muita mittaustavan toimintaperiaatteita ovat panoraaminen, keilamainen ja optinen kolmiomittaus (kuvio 2). Kolmessa edellä mainitussa toimintaperiaatteessa on rajoitteellisempi pistepilvi kuin ensin mainitussa kupolimaisessa mittaustavassa. (Joala 2006, 1–2.)



Kuvio 2. Laserkeilain tyypit (Joala 2006, 2)

2.2.3 Teollisuuslaserkeilaus

Teollisuus- eli lähilaserkeilainta käytetään yleisesti ottaen pienten kohteiden erittäin tarkkaan mittaamiseen. Lähilaserkeilain antaa alle millimetrin tarkan pistepilven, mutta mittaus täytyy suorittaa enintään 30 metrin etäisyydeltä. Keilaimen toimintaperiaate on pyyhkäistä lasersäteellä kohdetta ja ohjata heijastunut valo objektiivin kautta sensoreille. Tämän toiminnon tuloksena syntyy pistepilvi. Teollisuuslaserkeilaimet jättävät laajoja katvealueita, joiden takia yleensä mittaus suoritetaan useasta suunnasta täydellisen mallin saavuttamiseksi. Tarkan mittaustuloksen ansiosta lähilaserkeilaimia käytetään muun muassa museoissa, laboratorioissa, arkeologisissa tutkimuksissa sekä teollisuuden laadunvalvonnassa. (Ahlavuo-Hyyppä-Kukko 2009, 18-21., Ahlavuo-Hyyppä 2007, 51.)

2.3 Z+F IMAGER 5006i

Opinnäytetyön mittauksissa käytettiin Lapin ammattikorkeakoulun Z+F IMAGER 5006i vaihe-erolaserkeilainta. Kojeen on valmistanut saksalainen Zoller+Fröhlich. Keilaimen toimintaperiaatteena on kupolimainen mittaustapa, jolloin pistepilvi saadaan tarvittavan kattavaksi joka suuntaan. Keilainta on mahdollista ohjata ohjauspaneelin kautta tai langattoman yhteyden välityksellä tietokoneella, kämmentietokoneella tai älypuhelimella. Mittaukset tallentuvat laserkeilaimen kovalevyille, joten tietokonetta ei tarvita työmaalla. Taulukossa 1 on nähtävillä keilaimen tekniset tiedot. (Zoller+Fröhlich GmbH 2007, 2–5)

Taulukko 1. Z+F IMAGER 5006i -laserkeilaimen teknisiä tietoja (Zoller+Fröhlich GmbH 2007, 8–9).

| | | |
|---|---|--------------------------|
| Kantama | 0.4–79 m | |
| Resoluutio | 0.1 mm | |
| Keilausnopeus | ≤508 000 pistettä/sekunti | |
| Etäisyystarkkuus kantaman ollessa 10 m 25 m 50 m | ≤1.2 mm rms ≤2.6 mm rms ≤6.8 mm rms | |
| Käyttölämpötila | -10 °C–45°C | |
| Säteen hajoamiskulma | 0.22 mrad | |
| Lasersäde | Näkyvä, laserluokka 3R | |
| Näkökenttä vaaka/pysty | 310°/360° | |
| Kulmaresoluutio | 0.0018° | |
| Kulmatarkkuus | 0.007° rms | |
| Paino | 14 kg | |
| Keilausresoluutio | Pistettä/360° | Skannausaika/360° |
| Esikatselu | 1 250 | 25 s |
| Keskitiheä | 5 000 | 1 min 40 s |
| Tiheä | 10 000 | 3 min 22 s |
| Super tiheä | 20 000 | 6 min 44 s |
| Ultra tiheä | 40 000 | 26 min 40 s |
| Maksimaalinen pistetiheys valitulle alueelle | 100 000 | - |

3 CLT-RAKENTAMINEN

3.1 Yleistä CLT-rakentamisesta

CLT tulee sanoista Cross Laminated Timber. Tämä tarkoittaa massiivipuulevyä, joka koostuu ristikkäin liimatuista puulamelierkerroksista. Puulevyt työstetään asennusvalmiiksi runkoelementeiksi. Lamelierroksia voi olla useita ja niiden paksuudet voivat vaihdella 20 millimetristä 70 millimetriin. Levyjen paksuudet vaihtelevat 60 millimetristä 400 millimetriin, riippuen kerrosten määrästä ja niiden paksuudesta. Kantavassa seinässä levyn paksuus on oltava minimissään sata millimetriä. CLT-levyn mitat vaihtelet käyttötarkoituksen mukaan; leveys riippuu huonekorkeudesta, joka yleensä on noin kolme metriä ja pituus voi olla jopa 16 metriä. (Ammattiopisto Lappia. 2015.)



Kuvio 3. CLT levyjä (Stora Enso 2013)

CLT-rakentamisen muoto kehitettiin Sveitsissä noin kaksikymmentä vuotta sitten. Nykyään se on nopeasti yleistynyt rakennusmateriaali Keski-Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. Suomessa kiinnostus CLT-rakentamista kohtaan on lisääntynyt viime vuosina. Stora Ensolla on Itävallassa tehtaita, jotka tuottavat CLT-levyjä ja niitä tuodaan Suomen pienille markkinoille. Oy Cross Lam Kuhmo Ltd on Suomen ensimmäinen CLT-tuotantoon keskittynyt tehdas. Tehdas aloitti tuotantonsa elokuussa 2014 Kuhmossa. (Ammattiopisto Lappia 2015; Crosslam 2015a; Crosslam 2015b, 1–13.)

Massiivipuurakentamisen suurin etu on ympäristöystävällisyys, koska Euroopassa puuta kasvaa enemmän kuin sitä hakataan. Kasvaessaan puu sitoo hiilidioksidia ja rakentamisessa käytetyt puulevyt sitovat tämän hiilidioksidin jopa vuosisadoiksi. Puurakenteisen talon purkujätteenä ei synny arvotonta jätettä, vaan se voidaan uudelleen käyttää kierrättämällä tai energialähteenä. Puurakentaminen on näin ollen merkittävä kasvihuoneilmiön hillitsijä. (Stora Enso 2013a.)

Positiivisen hiilidioksidin tasapainon lisäksi CLT-levyillä on erinomaiset rakenteelliset ominaisuudet. Se on kevyempää kuin tiili tai betoni. CLT-levyjä voidaan esivalmistaa pitkälle tehtaalla, joka helpottaa asentamisvaihetta. Tämän ansiosta rakennuksen pystytysaika on lyhyt. Levyjä voidaan työstää plusmiinus yhden millimetrin tarkkuudella. CLT-rakentamisella saadaan jopa kymmenen prosenttia enemmän asuintilaa. Puurakentaminen myös tarjoaa terveellisen ja miellyttävän sisäilman. Massiivipuurakenteen palonkestävyys on erittäin hyvä ja se soveltuu myös maanjäristysalueille. CLT-rakentamista voidaan hyödyntää kaikenlaisissa projekteissa kuten pien- ja kerrostaloissa, mutta myös isommissa projekteissa kuten ostoskeskuksissa tai teollisissa rakennuksissa (Stora Enso 2013b; Stora Enso 2013c.)

3.2 CLT-koetalo

Vuonna 2013 Kemiin rakennettiin kaksikerroksinen CLT-koetalo, koska kiinnostus kyseistä rakentamista kohtaan on kasvanut Suomessa. Talossa tutkitaan rakennustavan soveltuvuutta Pohjois-Suomen olosuhteissa. Rakennus sijaitsee Kemin Digipolis-Kampuksen alueella, osoitteessa Tietokatu 3. Koetaloprojektin päätoteuttaja on Kemin Digipolis Oy ja osatoteuttajina toimivat Lapin ammattikorkeakoulu, Kemi-Tornionlaakson koulutuskuntayhtymä Lappia sekä Ammattiopisto Lappia. Talon pohjan pinta-ala on noin 40 neliötä. Rakennuksen rakenteet; ylä-, väli- ja alapohjat sekä seinät koostuvat CLT-puuelementeistä. Myös talon sisäportaat ja kalusteet ovat rakennettu CLT-levyistä kokeellista designia soveltaen. (Kiintopuu 2015.)

Tutkimukset talossa toteuttaa Arctic Power, joka on kiinteä osa Lapin Ammattikorkeakoulua. Arctic Powerin Internet-sivuilla osaamiskeskittymää kuvailaan seuraavalla tavalla:

”Arctic Power on asiantunteva ICT-, energia- ja rakennusalan osaamiskeskittymä, jonka toiminta-ajatuksena on tuottaa älykkäitä ratkaisuja pohjoisen arktisiin olosuhteisiin.” (Arctic Power 2015a.)



Kuvio 4. CLT-koetalo (Yle 2014.)

Koetalon seurantatutkimuksen kohteena on erityisesti lämpö- ja kosteustekninen toiminta. Näitä edellä mainittuja toimintoja analysoidaan talon vaipparakenteisiin asennetuilla mittausjärjestelmillä. Muita seurantatutkimuksen kohteita ovat rakenteiden muodonmuutokset sekä mahdollinen paukemelu. Tämä opinnäytetyö liittyy rakenteiden muodonmuutos seurantatutkimukseen. Lisäksi tutkitaan rakenteiden ilmatiivyyttä, värähtelyä, energiakulutusta sekä ääneneristävyyttä. (Arctic Power 2015a; Arctic Power 2015b.)

4 RAKENNUKSEN MITTAUS LASERKEILAIMELLA

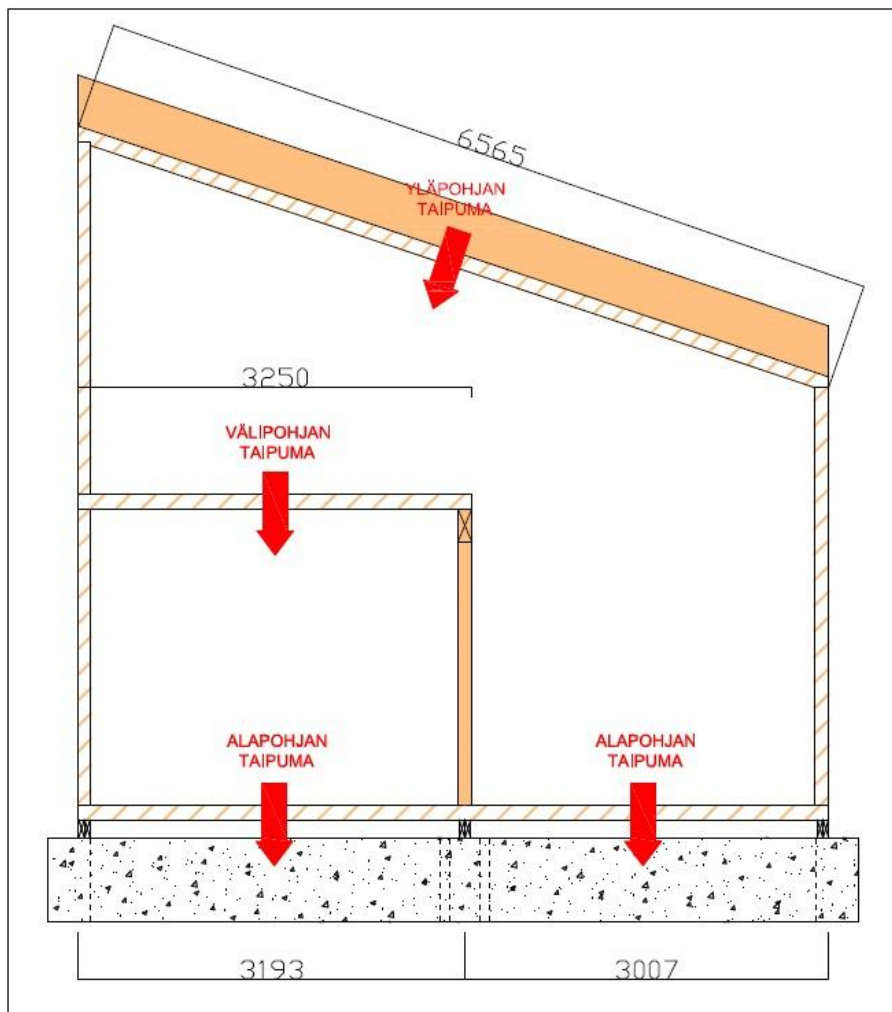
4.1 Tutkimuksen toteuttaminen

4.1.1 CLT-Koetalon muodonmuutokset vaakarakenteissa

Tässä opinnäytetyössä keskityttiin CLT-koetalon vaakarakenteiden muodonmuutosten mittaamiseen sekä laserkeilaimen soveltuvuuden arviointiin kyseisissä mittauksissa. Mittauksissa tarkasteltiin alapohjan, välipohjan sekä yläpohjan muodonmuutoksia säännöllisin mittausvälein vuoden aikana. Koetalon mittaukset suoritettiin vuoden 2014 tammikuun ja joulukuun välisenä aikana Z+F IMAGER 5006i -laserkeilaimella. Keilaimen antamista tuloksista tarkasteltiin mahdolliset muodonmuutokset valituissa pisteissä. Lisäksi koetalon nurkista otettiin satunnaisesti mittauksia, joista havaittiin talon mahdolliset vajoamiset routimisen seurauksena. Projektin aikana huomioitiin laserkeilaimen käyttöön ja mittauksiin liittyviä asioita sekä mahdollisesti ilmenneitä ongelmia.

4.1.2 Tutkittavat rakenteet

Jokainen tutkittava pohja koostuu kolmesta rinnakkaisesta 120 millimetriä vahvasta CLT-elementistä. Perustuksena talossa on betonisokkeli sekä betonipilarit. Alapohja on tuettu päistä betonisokkelin päälle ja keskellä on betonipilareista tehty kantava linja. Välipohjan elementit on tuettu toisesta päästä seinäelementin päälle ja toisesta päästä liimapuisen välipohjapalkin päälle. Välipohjapalkki on tuettu keskeltä pilarilla ja päistä seinälevyjen päälle. Yläpohjan elementit on tuettu seinälevyjen päälle ja elementtien yläpuolella on kattovasat, jotka siirtävät kuorman seinille. Keskimmaisissa elementeissä tuenta on toteutettu vain päistä eikä pitkiltä sivuilta, kuten reunimmaisissa elementeissä toinen sivu on. Tämän takia oletettavasti suurimmat muutokset näkyvät keskimmaisissa elementeissä. Mittauksissa keskityttiinkin tarkemmin keskimmaisten elementtien taipumiin. (Arctic Power 2014.)



Kuvio 5. Tutkittavien taipumien kohdat (Arctic Power 2014.)

4.2 Mittaustavan valinta

Tutkimuksen mittaukset suoritettiin Lapin ammattikorkeakoulun omistamalla Z+F IMAGER 5006i -laserkeilaimella. Laserkeilausmittauksiin päädyttiin, koska laserkeilain antaa tarkimman mittaustuloksen sekä kattavan pistepilven koko rakennuksesta. Vaikka tutkimuksessa keskityttiin katon, välipohjan sekä lattian taipumiin, saatiin myös muun rakennuksen pinnat kartoitettua samalla mittauskerralla. Tämä mahdollistaa näiden pintojen myöhemmän tutkimuksen.

Mittaukset olisi voitu suorittaa myös takymetrin prismattomalla mittauksella, mutta tällöin mittaaminen olisi ollut hitaampaa ja havaintopisteitä olisi tullut huomattavasti vähemmän. Takymetrin orientointi rakennuksen sisälle olisi ollut myös haastavaa, koska rakennuksen kaikkia ikkunoita ei ollut mahdollis-

ta avata. Tämän takia takymetrille olisi ollut vaikea löytää paikka, josta olisi saatu näkyvyys orientointiin tarvittaville apupisteille sekä mitattaville pisteille. Tämän vuoksi päädyttiin käyttämään Z+F IMAGER 5006i -laserkeilainta.

4.3 Mittausprosessi

4.3.1 Mittausalueeseen tutustuminen ja valmistelut

Ensimmäinen käynti CLT-koetalolla tehtiin 31.1.2014, jolloin tutustuttiin mitausalueeseen. Samalla suoritettiin mitausalueen valmistelut ja ensimmäinen mittaus. Tutkimuksen ensimmäinen vaihe oli luoda takymetrillä kuvitteellinen koordinaatisto, jotta jokainen laserkeilaus saatiin kiinnitettyä samaan koordinaatistoon. Yhteinen koordinaatisto helpotti mittauksen vertailua. Kuvitteellinen koordinaatisto luotiin Lapin ammattikorkeakoulun Geodimeter 601 takymetrillä. Takymetrillä tarkoitetaan kulma- ja etäisyysmittauskojetta, jolla voidaan mitata pysty- ja vaakakulmia sekä etäisyyksiä. Näistä havainnoista voidaan laskea koordinaatteja, korkeuksia ja muita suureita (Laurila 2012, 238).

Koetalon läheisten rakennusten perusteisiin tehtiin neljä apupistettä ja mitattiin niiden koordinaatit. Apupisteitä käytettiin myöhemmin takymetrin orientointiin. Koetalon perustuksen nurkkiin luotiin pisteet, jotka mitattiin muutamalla tutkimuskerralla. Tällä tavoin varmistettiin, ettei talo ole vajonnut routimisen takia.

4.3.2 Laserkeilaus

Ennen laserkeilauksen aloittamista takymetri orientoitiin aikaisemmin luotuun koordinaatistoon käyttämällä apupisteitä. Tämän jälkeen takymetrillä mitattiin koordinaatit tähyksille. Kun keilaus suoritetaan useasta eri kojepisteestä, tarvitaan vähintään kolmea yhteistä tähyistä. Mittauksissa päätettiin käyttää neljää liikuteltavaa tähyistä kiinteiden tähyisten sijasta. Koska rakennus on koe-käytössä ja sisältää liikuteltavaa kalustoa, mahdolliset muutokset voivat estää näkymän kiinteille tähyksille. Käyttämällä liikuteltavia tähyksiä, voidaan laserkeilaimen sijainteja muuttaa tarvittaessa laajemmin. Mittauksissa käytet-

tiin neljää tähystä, jotta koordinaatistoon siirrosta saatiin tarkempi. Neljän tähymän käyttö myös varmisti mittauksen onnistumisen, koska yksi tähys olisi voitu poistaa rekisteröinnistä sen mahdollisesti ollessa käyttökelvoton. (Joala 2006, 4.)

Ensimmäisellä ja toisella mittauskerralla keilaus suoritettiin alhaalla sekä ylhäällä yhdeltä koepaikalta. Näitä tuloksia tutkittaessa huomattiin, että pistepilvi ei ollut tarpeeksi kattava. Seuraavilla mittauskerroilla alhaalla käytettiin kolmea kojepaikkaa ja ylhäällä kahta. Ensimmäisen lasermittauskerran jälkeen havaittiin, että laserin teho ei riittänyt sen hetkisillä asetuksilla, koska pistepilvi ei ollut tarpeeksi kattava. Seuraavilla mittauskerroilla laserin teho vaihdettiin tehokkaammalle asetukselle. Yhteensä laserkojepaikkoja kertyi 29.

4.3.3 Ongelmat

Mittausprosessin alkuvaiheessa ongelmaksi muodostui apupisteiden sijainti. Koska apupisteet sijaitsivat koetalon ulkopuolella, ulkopuoliset asiat häiritsivät mittauksia. Häiriötekijöitä olivat esimerkiksi koetalon ja apupisteiden välille kasatut lumipenkat sekä satunnaiset ajoneuvot. Ongelma ratkaistiin mittaamalla kolme apupistettä lisää koetalon toisella puolella sijaitsevan rakennuksen perustuksiin. Ensimmäisen mittauksen aikana lumitilanne oli erittäin vähäinen, joten lumipenkkojen muodostumista juuri koetalon ja apupisteiden väliin ei voitu ennakoida. Alkuperäisiä apupisteitä mitattaessa huomioitiin normaali parkkialue ja oletettiin, ettei ajoneuvoista ole haittaa mittausprosessille. Oletuksissa ei otettu huomioon väärinpysäköintiä, josta koituin harmia muutamalla mittauskerralla.

Koetalon pintojen käsittely aiheutti myös ongelmia ensimmäisellä mittauskerralla. Elementtien pinnan heijastavuus ei ollut tarpeeksi riittävä mitä kaltevimpi pinta oli. Tämän takia ensimmäisessä mittauksessa iso osa katosta jäi mittaamatta. Ongelma saatiin korjattua asettamalla laserin teho isommalle, jolloin keilain kykeni tulkitsemaan pinnasta takaisin heijastuvan signaalin.

4.4 Mittaustulosten käsittely

Laserkeilauksen jälkeen mittaukset sisältävä kansio kopioitiin keilaimen kovalevyllä USB-muistitikulle. Tämän jälkeen takymetrin mittaustiedosto kirjoitettiin GT-formaatissa muistitikulle. Tiedonsiirtojen jälkeen muistitikku liitettiin tietokoneeseen ja mittaukset kopioitiin tietokoneen kovalevylle kahtena kappaleena. Yksi kansio säilytettiin varmuuskopiona ja toista kansiota käytettiin mittaustulosten muokkaamiseen.

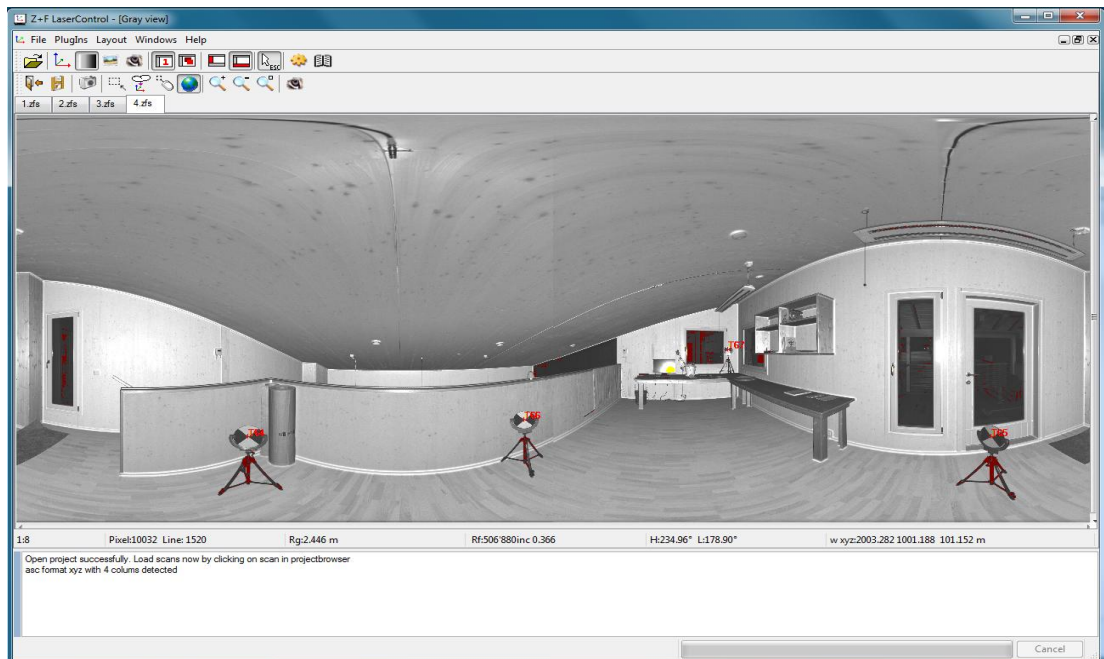
4.4.1 Esikäsittely Zoller+Fröchlich LaserControl-ohjelmistolla

Ennen tarkempaa pistepilven käsittelyä, pistepilvi rekisteröitiin ja suodatettiin keilaimen valmistajan omalla Zoller+Fröchlich LaserControl -ohjelmistolla. Esikäsittely aloitettiin avaamalla laserkeilaimen luoma tiedosto ohjelmassa (Kuvio 6).

Jokaisen keilauksen aikana syntyy turhia haamupisteitä muun muassa ilmassa leijuvien pölyhiukkasten takia. LaserControl -ohjelmisto sisältää pre-processing -toiminnon, jota on mahdollista käyttää kuudella eri suodatusasetuksella. Asetukset sisältävät valmiit parametrit. Edellä mainittuja haamupisteitä syntyi myös tämän opinnäytetyön mittauksen tuloksiin ja ne suodatettiin käyttämällä juuri mainittua preprosessing -toimintoa. Ainoa muutos, mikä parametreihin tehtiin, oli keilauksen etäisyys. Valmiiseen parametriin verrattuna, etäisyys asetettiin kymmeneen metriin. Jotta pistepilven käsittely jatkossa on helpompaa, rekisteröitiin mittaukset aikaisemmin luotuun kuvitteelliseen koordinaatistoon. Takymetrillä mitatut tähyksen koordinaattipisteet täytyi muuntaa Caplan-formaattiin, koska LaserControl -ohjelmiston rekisteröinti tunnistaa vain tämänkaltaisia tiedostoja. Muuntaminen tehtiin 3D-WIN-ohjelmalla.

Tähykset tunnistettiin pistepilvestä fit target -toiminnolla. Toiminto kytkettiin päälle ja kukin tähyys valittiin yksitellen osoittamalla niitä hiirellä. Ohjelma tunnistaa automaattisesti tähyksen keskikohdan, ja jokainen tähyys tulee nimetä samalla nimellä kuin Caplan-tiedostossa. Kun kaikki tähykset oli valittu ja nimetty, otettiin register all scans -toiminto. Kyseisen toiminnon raportista näh-

dään kunkin tähyksen ja lopullisen koordinaatistoon siirron tarkkuus. Jos jokin tähys jostain syystä on epätarkka, voidaan se poistaa havainnosta, jotta lopullisesta koordinaatistosta saadaan mahdollisimman tarkka. Tämän opinäytetyön muutamista mittauksista poistettiin yksi tähys havainnoista, jotta lopullisella koordinaatistoon siirrolla päästiin lähelle tavoiteltua yhden millimetrin tarkkuutta. Rekisteröinnin jälkeen pistepilvistä tehtiin tiedostot projekti-kansioon ASCII-muodossa.

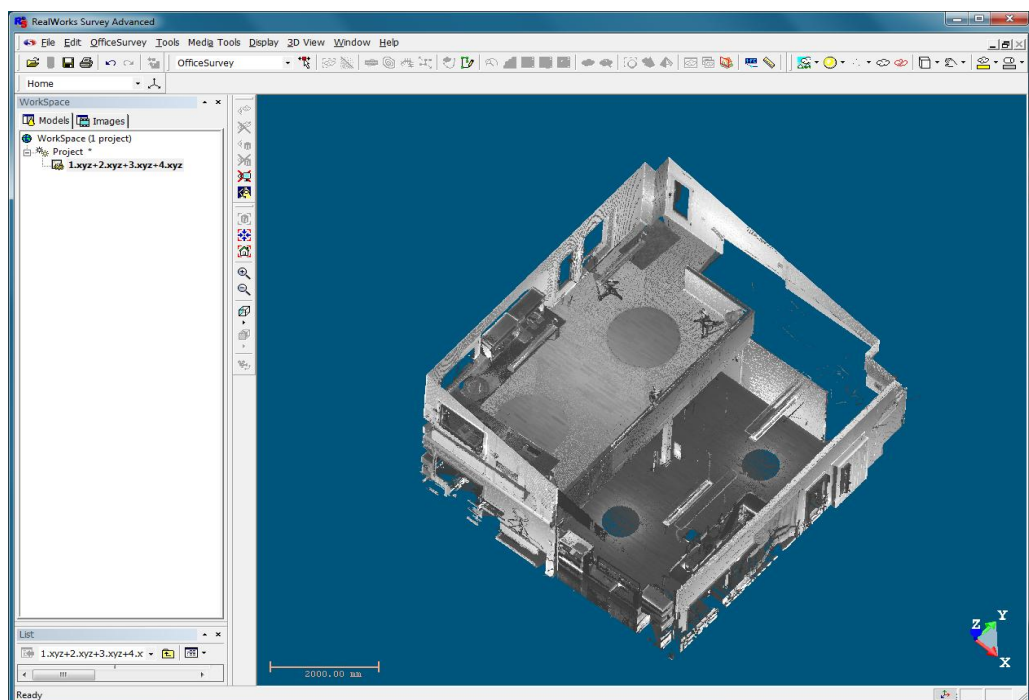


Kuvio 6. Valmiiksi käsitelty mittaus LaserControl-ohjelmassa.

4.4.2 Pistepilven jatkokäsittely

Suodatettujen ja rekisteröityjen pistepilvien käsittelyä jatkettiin Trimblen RealWorks Survey -ohjelmistolla (Kuvio 7). Trimblen ohjelmassa on monipuolisemmat työkalut pistepilven muokkausta varten verrattuna Laser Control -ohjelmistoon. Käsittely aloitettiin avaamalla ASCII-tiedosto ohjelmassa. Seuraava vaihe oli leikata pistepilvestä tarvittavat havaintopinnat käyttämällä segmentation tool -toimintoa. Toiminnolla irrotettiin yläpohja, välipohja sekä alapohja omiksi objekteiksi. Samalla toiminnolla myös putsattiin mahdolliset turhat pisteet jokaisesta pinnasta. Tällaisia turhia pisteitä olivat esimerkiksi johtoniput, kattolamput, tähysten jalat ja muut ylimääräiset tavarat, jotka olisivat saattaneet vaikuttaa vertailussa lopputulokseen.

Kun tarvittavat pinnat oli segmentoitu omiksi objekteiksi ja puhdistettu turhista pisteistä ne harvennettiin sampling tool -toiminnolla. Pisteiden väliseksi etäisyydeksi jäi kolme senttimetriä ja pisteiden määrä väheni sadoistatuhansista kymmeneen tuhansiin. Oli otettava huomioon, ettei tiheämmästä pistevälistä olisi ollut huomattavaa hyötyä vertailua tehdessä. Lisäksi vähemmän pisteitä sisältävä tiedosto toimii sulavammin 3D-WIN -ohjelmassa. Kun jokaisesta pistepilvestä oli leikattu ja putsattu tarvittavat pinnat ne kirjoitettiin DXF-formaatissa projektikansioon.



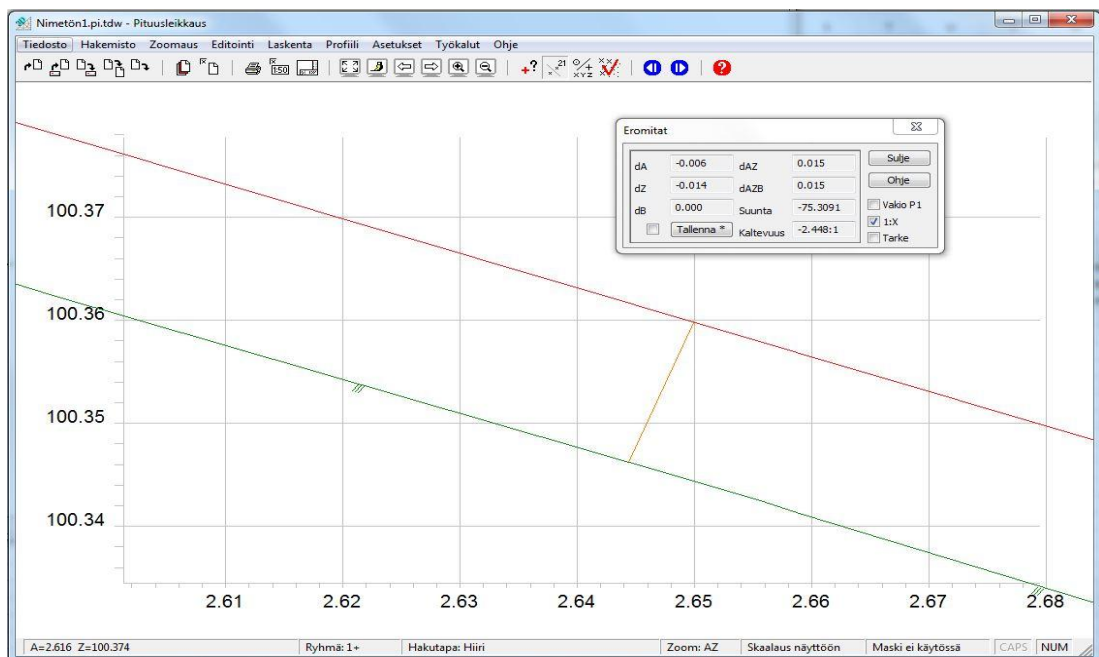
Kuvio 7. Pistepilvi Trimble RealWorks Survey -ohjelmassa

4.4.3 3D-WIN ohjelmistolla tehtävä vertailu

Taipumien laskenta suoritettiin 3D-WIN -ohjelmalla, joka on kotimainen maastomittaustiedon tuottamiseen ja käsittelyyn tarkoitettu Windows-ohjelmisto (3D-WIN, 2015). 3D-WIN -ohjelma on erittäin kevyt ja helppokäyttöinen tämän kaltaisten mittausten käsittelyissä.

Mittausten käsittely aloitettiin avaamalla aikaisemmin DXF-formaattiin kirjoitettu pistepilvi 3D-WIN -ohjelmalla. Ensimmäistä mittausta apuna käyttäen luotiin mittalinja, jota käytettiin jokaisen mittauksen vertailussa. Mittalinja hel-

potti pistepilvien vertailua oikeasta kohdasta. Seuraavaksi pistepilvestä luotiin vertailulinja valitsemalla neljä pistettä pinnan reunasta, kaksi kummaltakin puolelta. Vertailulinjan pisteet ja pistepilvi kolmioitiin käyttämällä tähän tarkoitettua toimintoa. Kolmiointi loi maastomallin jonka avulla voitiin helposti vertailla mittausten korkeuksia. Tämän jälkeen valittiin pituusleikkaus-toiminto. Toiminto avautui uuteen ikkunaan, jossa kahta eri pintaa oli mahdollista vertailla. Kuviossa 8 nähdään pohjan pinta vihreällä ja vertailulinja punaisella. Eromitat-toimintoa käyttämällä mitattiin pinnan ja vertailulinjan välimatka jokaisesta havaintokohdasta. Pintojen väliset erot merkittiin ylös Excel-
taulukon, jossa niitä oli helppo vertailla (taulukot 2-4).



Kuvio 8. Pintojen eromitat 3D-WIN-ohjelmassa

5 TUTKIMUKSEN TULOKSET

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin Kemiin rakennetun CLT-koetalon pohjien taipumia. Mittaukset tehtiin laserkeilaamalla pintoja säännöllisin väliajoin. Jokaisesta pistepilvestä tehtiin vertailulinja, josta pinnan muotoa vertailemalla saatiin mitattua taipumat. Oletuksena oli, että suuria muutoksia ei pinnoissa synny. Olettamukset pitivät hyvin paikkaansa, sillä vertailu osoittaa, ettei suuria muutoksia mittausten välillä ole tapahtunut.

Eniten taipumaa havaittiin yläpohjan pinnassa. Keskikohdassa ensimmäisellä mittauskerralla taipuma oli 1,7 senttimetriä. Taipumat säilyivät koko mittauskauden ajan kahden millimetrin sisällä jokaisessa vertailukohdassa. Laserkeilaimen valmistajan lupaama mittaustarkkuus keilaimelle on plus-miinus yksi millimetri, joten tämä selittää kahden millimetrin erot mittauksissa. Koska taipuma säilyy koko mittauskauden ajan, voidaan olettaa, että taipumat ovat tulleet asennusvaiheessa. Taipumat kapenevat seiniä kohti normaalisti. Tarkemman tutkimuksen taipumista ja vertailun laskettuihin taipumiin tekee Ilkka Rautio omassa opinnäytetyössään, jossa keskitytään enemmän rakennustekniseen puoleen. (Taulukko 2.)

Joillakin mittauskerroilla ei saatu kerättyä täydellistä aineistoa koko mittausalueelta erilaisten ongelmien sekä mittaajan virheiden takia. Taulukossa 2 vihreällä merkityt arvot johtuvat ensimmäisen mittauksen vajaasta mittausaineistosta. Vajaa mittausaineisto johtui liian pienestä laserin tehosta. Sinisellä merkityt tyhjät arvot johtuvat akun loppumisesta kesken mittauksen, jolloin katosta jäi osa pisteistä uupumaan. Viimeisen mittauksen arvot eroavat huomattavasti enemmän verrattuna aikaisempiin arvoihin. Tämä selittyy tähyksen erilaisella mittaustavalla. Mittaus suoritettiin yhden miehen voimin käyttämällä Trimblen S6 takymetriä ja robottimittausta. Näitä tähyksiä käyttämällä pistepilven koordinaatistoon siirron tarkkuus jäi noin viiteen millimetriin. Taipumat ovat samansuuntaisia ja verrattavissa aikaisempiin tuloksiin, mutta mittaus jätettiin pois vertailusta.

Taulukko 2. CLT-koetalon yläpohjan vertailu

| Päivä | Vertailukohta | Itä | | | | | | | | | Länsi | |
|------------|---------------|-------|-------|--------|-------|--------|------------|--------|-------|--------|-------|-------|
| | | -1,5m | -1m | -0,75m | -0,5m | -0,25m | Keskikohta | +0,25m | +0,5m | +0,75m | +1m | +1,5m |
| 31.1.2014 | | 0,08 | 0,011 | 0,013 | 0,015 | 0,015 | 0,017 | 0,016 | 0,016 | 0,019 | 0,022 | 0,017 |
| 14.2.2014 | | 0,011 | 0,013 | 0,014 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,016 | 0,017 | 0,016 | 0,016 | 0,014 |
| 1.3.2014 | | 0,012 | 0,013 | 0,014 | 0,015 | 0,015 | 0,016 | 0,015 | 0,016 | 0,015 | 0,014 | 0,013 |
| 12.4.2014 | | 0,013 | 0,015 | 0,014 | 0,015 | 0,016 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,014 | 0,012 |
| 27.5.2014 | | | | | | | 0,017 | 0,016 | 0,016 | 0,015 | 0,015 | 0,012 |
| 9.8.2014 | | 0,013 | 0,015 | 0,016 | 0,017 | 0,017 | 0,017 | 0,016 | 0,017 | 0,016 | 0,016 | 0,013 |
| 23.11.2014 | | 0,010 | 0,012 | 0,012 | 0,012 | 0,012 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,014 | 0,011 |

Väli­pohjan tuloksissa ei näkynyt johdon­mukaisia taipumia. Mittausten välillä eroja on muutamia millimetrejä. Erot selittyvät mittaustarkkuudella ja puun elämisellä olosuhteiden muuttuessa. Toisen mittaus­kerran puuttuvat tulokset johtuvat huonosta keilaimen sijainnista. Seuraavilla mittaus­kerroilla keilainta käytettiin useammassa kohdassa, jottei puutteellisia pistepilviä pääs­syt syn­ty­mään. (Taulukko 3)

Taulukko 3. CLT-koetalon väli­pohjan vertailu

| Päivä | Vertailukohta | Itä | | | | | | | Länsi | |
|------------|---------------|-------|-------|-------|--------|------------|--------|-------|-------|-------|
| | | -1m | -0,6m | -0,4m | -0,20m | Keskikohta | +0,20m | +0,4m | +0,6m | +1m |
| 31.1.2014 | | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0,003 | 0,001 |
| 14.2.2014 | | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1.3.2014 | | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,000 |
| 12.4.2014 | | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,001 |
| 27.5.2014 | | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,001 | 0,000 |
| 9.8.2014 | | 0,001 | 0,003 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,002 |
| 23.11.2014 | | 0,001 | 0,003 | 0,003 | 0,003 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,002 |

Alapohjan mittaustulosten vertailussa ei löytynyt johdon­mukaisia taipumia. Mittausten erot pysyivät muutamissa millimetreissä kuten aiemmin mainitut väli­pohjan mittaustuloksetkin. Kyseiset erottuvat voidaan jälleen selittää mit­taustarkkuudella ja puun elämisellä (taulukko 4).

Taulukko 4. CLT-koetalon alapohjan vertailu

| | | Itäinen puoli | | | | | | | | |
|------------|--|---------------|-------|-------|--------|------------|-------|-------|--------|--------|
| | | Itä | | | | Keskikohta | | | Länsi | |
| | | -1m | -0,6m | -0,4m | -0,2m | | +0,2m | +0,4m | +0,6m | +1m |
| Päivä | | | | | | | | | | |
| 31.1.2014 | | 0,000 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,001 |
| 14.2.2014 | | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| 1.3.2014 | | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | +0,001 | +0,002 |
| 12.4.2014 | | 0,001 | 0,001 | 0,001 | +0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 |
| 27.5.2014 | | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | +0,002 |
| 9.8.2014 | | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,000 | 0,001 |
| 23.11.2014 | | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |

| | | Läntinen puoli | | | | | | | | |
|------------|--|----------------|-------|-------|-------|------------|-------|--------|--------|--------|
| | | Itä | | | | Keskikohta | | | Länsi | |
| | | -1m | -0,6m | -0,4m | -0,2m | | +0,2m | +0,4m | +0,6m | +1m |
| Päivä | | | | | | | | | | |
| 31.1.2014 | | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,000 |
| 14.2.2014 | | 0,001 | - | - | - | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,001 |
| 1.3.2014 | | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,001 |
| 12.4.2014 | | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,000 |
| 27.5.2014 | | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,000 |
| 9.8.2014 | | +0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | +0,001 | +0,001 | +0,001 |
| 23.11.2014 | | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,000 |

Laserkeilaimen käyttö koetalon mittauksissa osoittautui erittäin hyväksi valinnaksi. Keilain antoi tarkat mittaustulokset sekä laajan pistepilven mitattavasta ympäristöstä. Vaikka tässä opinnäytetyössä keskityttiin vain ala-, väli- ja yläpohjan muutoksiin, saatiin mittausten edetessä paljon aineistoa mahdollisia lisätutkimuksia varten.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimustulosten perusteella voidaan todeta, että koetalon CLT-levyt ovat pysyneet miltein taipumattomina, sillä eroavaisuudet olivat hyvin pieniä. Lisäksi voidaan todeta, että CLT-levyt ovat taipumattomuutensa vuoksi laadultaan jäməköitä. CLT-rakentaminen tulee varmasti lisääntymään kovasti Suomessa ja koetalon tutkimustulokset tulevat palvelemaan monia rakentajia.

Suomessa laserkeilaimen käyttö erilaisissa mittauksissa ja mallintamisissa on lisääntynyt ja kiinnostus tällaista mittaustapaa kohtaan kasvaa kovaa vauhtia. Laserkeilaimen yksi hyvistä ominaisuuksista on laaja mittausaineisto, jota saadaan kerättyä erittäin nopeasti. Tämän opinnäytetyön mittauksiin laserkeilain soveltui erittäin hyvin. Laserkeilaimen huonoihin puoliin lukeutuu keilaimen korkea hankintahinta, jonka vuoksi on tarkkaan harkittava laitteen käyttötarvetta. Erilaiset oppilaitokset ja yritykset vuokraavat kyseisiä laitteita sekä mittauspalveluita, joten vuokraaminen on hyvä vaihtoehto, jos keilaimelle on vähäistä käyttöä.

Yhtenä johtopäätöksenä voidaan myös todeta, että ylimääräisten ja turhien mittauskertojen välttämiseksi tietokoneen mukana pitäminen olisi ollut hyödyllistä. Kun tietokoneella on valmiina oikeanlaiset ohjelmistot pistepilvien käsittelyyn ja tarkasteluun, voi paikan päällä varmistaa, että pistepilvi on kattava ja mittaus onnistunut. Tällöin hyödyttömien mittauskertojen määrä minimoituu. Mittausprojektin hyvän laadun takaamiseksi on tärkeää, että ensimmäisellä mittauskerralla saadaan tarvittavat säädökset tehtyä ja mahdollistetaan kattavan aineiston kerääminen alusta alkaen. Voidaan siis ajatella, että ensimmäisellä kerralla tietokoneen mukana kuljettaminen on todella tärkeää.

Tämän mittausprojektin aikana tuli esille mittaamiseen tarvittavien laitteiden virtalähteiden olemassaolon sekä niiden mukana kuljettamisen tärkeys. Yhden mittauskerran tulokset jäivät vajaiksi, koska mittauslaitteesta loppui akku, eikä akun laturia ollut mukana. Täydet mittatulokset olisi saavutettu, jos mittauslaitteen laturi olisi ollut matkassa. Mittalaitteet kuluttavat yleensä erittäin paljon akkua ja ottaen huomioon, että vanhat akut saattavat kulua oletettua nopeampaa, kannattaa lisävirtaan varautua.

Viimeisenä johtopäätöksenä voidaan todeta, että mittauksia suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon ulkopuoliset tekijät kuten autot, muut alueella liikkujat, mahdolliset lumipenkköjen kertymät ja kasvillisuus. Mittausprojektit voivat ajallisesti kestää pitkiä aikoja, joten esimerkiksi vaihtuvat vuodenaajat tuovat erilaisia haasteita. Lopuksi todettakoon, että mittausprojektin ja -prosessin tarkka suunnittelu on avainasemassa hyvään lopputulokseen.

Olen tyytyväinen opinnäytetyöhön ja koen, että työ kehitti taitojani mittausten suunnittelussa sekä suorittamisessa. Työ oli haastava ja jouduin useasti soveltamaan uutta tietoa sekä aiempaa osaamistani. Koen myös, että sain itsevarmuutta tällaisten projektien suorittamiseen.

LÄHTEET

- 3D-WIN 2015. 3D-WIN. Viitattu 4.3.2015 <http://www.3d-system.fi/index.php/3d-win>
- Ahlavuo, M., Hyyppä, H. & Kukko, A. 2009. Lähilaserkeilauksella kohde kolmiulotteiseksi. *Positio* 1/2009, 18–21.
- Ahlavuo, M. & Hyyppä, H. 2007 Laserkeilaus on tulevaisuuden tarkkaa 4D-paikkatietoa. *Maankäyttö* 4/2007, 50–51.
- Ammattiopisto Lappia 2015. Mikä on CLT?. Viitattu 16.2.2015 <http://www.lappia.fi/Suomeksi/Aikuiskoulutus-ja-tyoelamapalvelut/Tyoelaman-kehittamispalvelut/Hankkeet/Teknologia-ja-teollisuus/CLT/Mika-on-CLT>.
- Arctic Power 2015a. Arctic Power. Viitattu 16.3.2015 <http://www.arcticpower.fi/fi/>.
- Arctic Power 2015b. CLT-Koetalo. Viitattu 3.3.2015 <http://www.arcticpower.fi/fi/clt-koetalo-2013-2015/>
- Arctic Power 2014. Muodonmuutosten raportti.
- Crosslam 2015a. Paikalliset juuret Kuhmossa. Viitattu 16.2.2015 <http://www.crosslam.fi/filosofia/paikalliset-juuret-kuhmossa.html>.
- Crosslam 2015b. CLT-tuotteita suomalaisesta puusta. Viitattu 16.2.2015 http://www.karelia.fi/puurakentaminen/files/CLT-elementtien_tuotanto.pdf.
- Heiska, N. 2010. Maalaserkeilaimet ovat kehittyneet geodeettisiksi mittauslaitteiksi. *Maankäyttö* 4/2010, 14–17.
- Joala, V. 2006. Laserkeilauksen perusteita ja mittauksen suunnittelu. Viitattu 24.2.2015 <https://drive.google.com/file/d/0B3MfAq-wXowIN2Q4MzJIYjktZTA5Ni00ZGM5LTlkOWUtNTQzMDIwZTI3NDVm/view?pli=1>.
- Kiintopuu 2015. Koetalohanke. Viitattu 3.3.2015 <http://www.kiintopuu.fi/fi/koetalohanke.html>
- Kukko, A. 2005. Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetrisiin mittaustehtäviin. Viitattu 24.3.2015 http://foto.hut.fi/opetus/290/julkaisut/Antero_Kukko/Laserkeilaimen_valinta_lahifotogrammetrisiin_mittauksiin.pdf 24.2015.

- Laurila, P. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemi: Ramk University of Applied Sciences.
- Maanmittauslaitos 2015. Laserkeilaustekniikka. Viitattu 26.2.2015 <http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/laserkeilausaineistot/laserkeilaustekniikka>.
- Nordic Geo Center 2015. Ilmassa. Viitattu 26.2.2015 <http://www.geocenter.fi/ilmassa/>.
- Stora Enso 2013a. Vastuullista rakentamista. Viitattu 3.3.2015 <http://www.clt.info/fi/produkt/clt-das-massivholz/okologie-umwelt/>
- Stora Enso 2013b. CLT:n edut. Viitattu 3.3.2015 <http://www.clt.info/fi/produkt/clt-das-massivholz/vorteile/>
- Stora Enso 2013c. Projektit. Viitattu 3.3.2015 <http://www.clt.info/fi/projekte/>.
- Suominen, T 2009. Laserkeilauksesta apua 3D-mallintamiseen. Tierakennusmestari 4/2009, 44–47.
- Yle 2014. Rakentajamessut kotiutuivat Kemiin. Viitattu 10.3.2015 http://yle.fi/uutiset/rakentajamessut_kotiutui_kemiin/7149890
- Zoller+Fröhlich GmbH. 2007. Z+F IMAGER 5006i user manual. Käyttöohje.