

Mikko Peltonen

RISTIINLIIMATUN PUUELEMENTIN VALMISTUKSEN, LIITTÄMISEN JA KESTÄVYYDEN TUTKIMINEN

Opinnäytetyö
Materiaalitekniikka

2018



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Mikko Peltonen	Insinööri (AMK)	Marraskuu 2018
Opinnäytetyön nimi		
Ristiinliimatun puuelementin valmistuksen, liittämisen ja kestävyuden tutkiminen		78 sivua 3 liitesivua
Toimeksiantaja		
Makron Oy		
Ohjaaja		
Hannu Turunen, Olli Heinikainen		
Tiivistelmä		
<p>Tässä opinnäytetyössä tutkittiin ristiinliimatun puuelementin valmistusta, liittämistä sekä kestävyyttä pääasiassa hirsitalorakentamisen näkökulmasta. Ristiinliimatun massiivipuun eli CLT:n käyttö on yleistynyt viime vuosina rakentamisessa muiden insinööripuutuotteiden ohella. Hirsitalotuotantolinjojen toimittajat sekä hirsitalovalmistajat tarvitsevat tietoa CLT:stä ja sen käyttömahdollisuuksista. Painumattomien hirsien valmistaminen ristiinliimaamalla herättää kysymyksiä laitevalmistajien ja hirsitalovalmistajien osalta koskien liimasaumojen kestävyyttä ja korkeiden hirsielementtien liittämistä.</p> <p>Kirjallisuusosuudessa tutkittiin ristiinliimatun puuelementin valmistusta, rakennusfysikaalista toimivuutta sekä nurkkaliitoksia. Painumattomia hirsitä voidaan valmistaa modernilla CLT:n tuotantolinjalla yhdessä CLT-elementtien rinnalla. Ristiinliimatun puuelementin rakennusfysikaalisuutta sekä liitosratkaisuja tarkastellaan CLT-rakentamiselle ominaisesta näkökulmasta, jossa CLT toimii kantavana runkorakenteena. Hirsirakentamiselle soveltuvia valmiita nurkkaliitosratkaisuja on niukasti. Työssä luonnosteltiin mahdollisia ratkaisuja korkeiden hirsien nurkkien liittämiseen soveltaen hyväksi todettuja jiiiriin työstettyjä lohenpyrstöliitoksia.</p> <p>Kokeellisessa osuudessa tutkittiin kahdella eri lamellipaksuudella ja neljällä eri kerrosasettelulla valmistettujen viisikerroksisten CLT-levyjen delaminointia. CLT-levyt valmistettiin syrjäliimatuista liimapuulevyistä, jotka valmistettiin tutkimusta varten rakennetulla kitkapuristimella. Liimasaumojen liimauksenlaatua ja kestävyyttä testattiin standardin EN 16351 liitteen C mukaisella delaminointikokeella. Koekappaleiden pintakerrosten syrjäliimatut liimasaumat eivät osoittaneet delaminointia millään koekappaleella. Kokeen tuloksista kävi ilmi, ettei lamellikerrosten paksuuden vaihtelulla tai kerrosasettelulla ollut vaikutusta minkään liimasauman delaminointiin.</p>		
Asiasanat		
hirret, CLT, delaminointi, liitokset, valmistus		

Author (authors)	Degree	Time
Mikko Peltonen	Bachelor of Engineering	November 2018
Thesis title Research on manufacturing, joining and durability of cross-laminated timber element		78 pages 3 pages of appendices
Commissioned by Makron Oy		
Supervisor Hannu Turunen, Olli Heinikainen		
<p data-bbox="164 768 300 801">Abstract</p> <p data-bbox="164 835 1433 1093">This bachelor's thesis examined the manufacturing, joining and durability of cross laminated timber elements, mainly from the perspective of log house manufacturing. Use of cross laminated timber (CLT) has become more common in recent years together with other engineering wood products. Suppliers of log house manufacturing lines and log house constructors need more information about CLT. Manufacturing of non-settling lamella logs arouses questions for equipment manufacturers and log house manufacturers concerning the durability of the glue lines and joining tall log elements.</p> <p data-bbox="164 1126 1471 1384">Manufacturing, building physics and corner joints of cross laminated timber elements were studied in the literature review. Non-settling lamella logs can be produced in modern CLT manufacturing lines alongside of the traditional CLT- elements. Building physics and joining solutions of cross laminated timber elements were examined from the perspective of CLT-construction, where CLT functions as a supporting frame structure. Corner joint solutions that are suitable for log house construction are limited. Possible solutions for joining tall log-like elements were drafted by applying aspects of mitre dovetail joints to the designs.</p> <p data-bbox="164 1417 1455 1720">In the experimental phase of this thesis five layered CLT- elements with two different lamella thicknesses and four different layer layouts were produced to assess their delamination behaviour. CLT-elements were produced from edge glued wood panels that were prepared with a friction press which was assembled for research purposes. Bonding quality and durability of the glue lines were evaluated according to the CLT standard EN 16351 appendix C. Edge glued glue lines on the top most layers of the tested specimens did not show any signs of delamination on any of the specimens. Variations in the lamella thickness or in the layer layout did not have any effect on the delamination result.</p>		
<p data-bbox="164 1798 323 1832">Keywords</p> <p data-bbox="164 1865 938 1899">building logs, CLT, delamination, joints, manufacturing</p>		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Tutkimuksen tausta.....	6
1.2	Tutkimusongelma, tavoitteet ja tutkimuskysymykset	7
1.3	Tutkimusmenetelmät ja rajaukset	8
2	RISTIINLIIMATTU PUU	9
2.1	CLT.....	10
2.2	Painumaton hirsi.....	12
2.3	CLT:n valmistusprosessi.....	13
2.3.1	Käytettävät liimat	14
2.3.2	Raaka-aineen ominaisuudet ja luokittelu	16
2.3.3	Lamellien sormijatkokset.....	17
2.3.4	Liimapuulevyjen valmistus	18
2.3.5	Kerrostien ladonta, liimaus ja puristus	20
2.3.6	Viimeistely.....	21
3	PUUMATERIAALI.....	23
3.1	Puusolukko	24
3.2	Kosteuseläminen	25
3.3	Puun liimaus ja delaminointi	27
3.3.1	Liimautuminen	28
3.3.2	Delaminointi	29
3.3.3	Liiman vaikutus delaminointiin	30
3.3.4	Kerrosasettelun vaikutus delaminointiin.....	32
4	CLT-RAKENTEEN RAKENNUSFYSIKAALINEN TOIMIVUUS	35
4.1	Lämpötekniikka	35
4.2	Kosteustekniikka	37
5	RISTIINLIIMATTUJEN PUUELEMENTTIEN LIITTÄMINEN	39
5.1	Perinteiset ja vaihtoehtoiset liitosratkaisut	39

5.2	Kehiteltävät liitosratkaisut	46
6	TUTKIMUSMETODIT	49
6.1	Koekappaleiden valmistus ja laitteisto	50
6.2	Delaminointikoe	54
6.3	Tulosten käsittely	56
7	TULOKSET	57
7.1	Delaminointitulokset yleisesti	58
7.2	Ryhmien välisen delaminointikäyttäytymisen vertailu	60
8	POHDINTA	62
8.1	Vertailu aiempaan tutkimukseen	65
8.2	Objektiivisuus	66
8.3	Reliabiliteetti ja validiteetti	67
8.4	Virhe- ja herkkyystarkastelu	68
8.5	Jatkotutkimusaiheet	69
9	YHTEENVETO	70
	LÄHTEET	73
	LIITTEET	

Liite 1. Kuvia CLT-levyjen valmistuksesta ja delaminointikokeesta

Liite 2. Delaminointikokeen tulokset

1 JOHDANTO

Mielenkiinto puurakentamista kohtaan on kasvussa sen ekologisuuden, terveellisyyden ja positiivisten mielikuvien myötä. Yhtenä uusimpana tulokkaana puurakentamisessa on ristiinliimattu massiivipuu, eli cross laminated timber (CLT). CLT-rakenteiden kehitys on alkanut jo 90-luvulla Keski-Euroopassa, mutta alkanut yleistymään rakentamisessa muualla maailmassa vasta viimeisenä kymmenenä vuotena. CLT:tä on aloitettu valmistamaan teollisesti Suomessa vasta vuonna 2014, ja uusia tehtaita on ilmestynyt sen jälkeen muutamia kappaleita. Yleisesti tieto CLT:stä ja sen käyttömahdollisuuksista on ollut vähäistä, minkä vuoksi kohderyhmille on pyritty lisäämään tietoa CLT:stä esimerkiksi pohjoismaisen yhteistyön voimin Future possibilities for CLT (FCLT) -hankkeen myötä, joka jatkuu edelleen. CLT-rakentaminen on verrattavissa hirsirakentamiseen uuden vuonna 2018 ilmestyneen rakentamismääräyskokoelman myötä, joka helpottaa ja lisää CLT rakentamisen mahdollisuuksia Suomessa. Myös uusissa palomääräyksissä on helpotuksia CLT-rakentamista kohtaan. CLT-rakenteiden suunnittelu ja testausmenetelmät vaativat vielä harmonisoitua standardisointia.

1.1 Tutkimuksen tausta

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Makron Oy. CLT herättää mielenkiintoa myös perinteisessä hirsirakentamisessa painumattomien hirsien myötä. Suomi on maailman johtava hirsitalojen tuottaja, ja Makron on johtava integroitujen hirsitalotuotantolinjojen toimittaja. Johtavana hirsitalotuotantolinjojen toimittajana Makronin täytyy pysyä kehityksen mukana ja pystyä tarjoamaan modernia CLT-tuotantolinjaa. CLT:n uudenlaisuus ja nopea tuleminen markkinoille luo haasteita, jonka vuoksi tietoa CLT:stä ja sen valmistuksesta tarvitaan yrityksen sisällä.

Nykyään hirsitaloja valmistetaan liimatusta lamellihirrestä, jossa lautatavara liimataan samansuuntaisesti muodostaen massiivisia hirsiiä. Painumaton hirsi valmistetaan CLT:n tapaan ristiinliimaamalla. Ristiinliimaus herättää kysymyksiä puisten hirsien/elementtien kestävydestä ristiinliimaamisen sekä puun anisotrooppisen kosteuskäyttäytymisen vuoksi. Hirsirakentamisessa ollaan varsinkin kiinnostuneita pintakerrosten syrjäliimatun liimasauman kestävy-

destä. Kantavien ja jäykkien CLT-rakenteiden työstäminen korkeiksi hirsiseinää muistuttaviksi elementeiksi herättää mielenkiintoa hirsitalorakentajissa nopeampien pystytysaikojen vuoksi. Korkeat hirsielementit luovat haasteita nurkkien liittämässä, kun halutaan säilyttää hirsiseinä näkyvänä ulko- ja sisäpuolelta, jolloin näkyvien liitoselinten käyttöä halutaan välttää.

Tämän tutkimuksen tuloksia tullaan käyttämään hyödyksi Makronin sisäisessä toiminnassa ja Makronin omien tuotteiden markkinoinnin apuna. Tutkimuksen tulosten avulla Makron pystyy vastaamaan asiakkaiden yleisimpiin kysymyksiin koskien CLT:n valmistusta ja käyttäytymistä. Markkinoidakseen uutta CLT-linjaa pitää yrityksellä olla riittävä perustieto CLT:hen liittyvistä asioista. Makronilla on vahva asema hirsituotantolinjojen toimittajana ja perinteisten hirsitalotehtaiden siirtyminen kohti painumattoman hirren valmistusta vaatii tuotekehitystä ja uusia ratkaisuja. Siirtyminen kohti modernimpaa hirsirakentamista, jossa perinteiset hirret korvataan korkeilla hirsielementeillä ja ristinurkkaratkaisut korvataan kaupunkiympäristöön sopivalla tasaisesti nousevalla nollanurkalla, luo tarvetta uusille nurkkaliitosratkaisuille. Tutkimuksen tuloksista tulee olemaan hyötyä hirsitalotehtaille.

1.2 Tutkimusongelma, tavoitteet ja tutkimuskysymykset

CLT-rakentamisen ja hirsirakentamisen yhteensovittamista ei ole vielä laajasti tutkittu. Hirsitalorakentaminen on kehittynyt Suomessa, mutta ulkomaisista lähteistä ei löydy juurikaan mainintaa painumattomista hirsistä tai CLT- ja hirsirakentamisen sovittamisesta. Tutkimusongelmana on ristiinliimatun puuelementin käyttäminen hirren tapaan sellaisenaan näkyvänä seinämärakenteena altistettuna ulkoilman kosteus- ja lämpötilan vaihteluille sekä yleisesti ristiinliimatun puuelementin kosteuskäyttäytyminen. Tietoa tarvitaan myös suurten hirsiseinää muistuttavien elementtien nurkkien liittämistä hirsirakentamiselle soveltuvaan tapaan.

Tavoitteena on tutkia ristiinliimatun puuelementin pintakerrosten syrjäliimatun liimasauman delaminointikäyttäytymistä ja tarjota mahdollisia suosituksia kerrosten paksuuden suhteelle. Tuotetaan tietoa ja luonnostellaan seinäliitosta-

poja, jotka soveltuvat hirsirakentamiseen ja CLT-elementtien liittämiseen. Tuotetaan tietoa ristiinliimatun puuelementin valmistuksen vaiheista ja laitteista. Tutkimusongelmasta johdetut tutkimuskysymykset:

- Miten ristiinliimaminen vaikuttaa puuelementin kosteuskäyttäytymiseen?
- Miten ristiinliimatun puuelementin kerrosten paksuus vaikuttaa pintakerrosten syrjäliimatun liimasauman delaminointiin?
- Millaisia on valmistusmenetelmiä CLT:n valmistuksessa käytetään?
- Miten korkeat hirret liitetään hirsirakentamiselle ominaiseen tapaan?

1.3 Tutkimusmenetelmät ja rajaukset

Kvantitatiivisina tutkimusmenetelminä on käytännön kokeet ja tulosten numeerinen tarkastelu ja analysointi. Liimasaumojen kestävyyttä ja delaminoinnin tutkimista varten valmistetaan kuudesta neljä erilaista CLT-levyä, joissa on erilainen kerrosten asettelu. Valmistetuista kappaleista leikataan varsinaiset koe-kappaleet. Delaminointikokeen mittaukset suoritetaan standardin SFS EN 16351 liitteen C mukaisesti. Mittauksissa keskitytään standardin mukaisen delaminoinnin mittauksen lisäksi CLT-levyn pintakerrosten syrjäliimattujen liimasaumojen delaminoinnin tutkimiseen standardia mukaillen.

Kvalitatiivisena tutkimusmenetelmänä tässä työssä käytetään kirjallisuustutkimusta. CLT:n valmistusta koskevaa tietoa käsitellään toteavasti ja selvitetään erilaisia ratkaisuja ja vaihtoehtoja valmistuksen eri vaiheille. CLT:n rakennusfysikaaliseen toimintaan perehdytään aiheesta aikaisemmin tehtyjen tutkimusten pohjalta. Liitostapoihin liittyvän kirjallisuustutkimuksen tarkoituksena on tuottaa uutta tietoa, ideoita ja näkökulmia sekä löytää valmiita ratkaisuja, joita voitaisiin soveltaa. Tietoa etsittäessä hakusanoina käytetään englanninkielisiä ja myös suomenkielisiä sanoja, kuten CLT, cross-lamination (ristiinliimaus), timber (puu), delamination (delaminointi), moisture (kosteus), manufacturing (valmistus), connection (liittäminen).

Tietoa etsitään CLT:n valmistuksesta, säännöksistä sekä kosteuskäyttäytymisestä. Tiedon haussa käytetään tietokantoina pääasiassa Elsevieriä (science direct), Springer linkiä, Google scholaria ja Researchgatea. Työssä käytetään lähteinä myös kohderyhmille tuotettua aineistoa, kuten esimerkiksi CLT-val-

mistajien tuottama aineisto, CLT-handbook sekä FCLT-projektin tuottama aineisto. Nurkkaliitoksista haetaan tietoa myös tavanomaisia hakukoneita hyödyntäen, koska tarkoituksena on systemaattisesti kehittää erilaisia vaihtoehtoja ja ideoita, joita arvioidaan ja pisteytetään jälkikäteen rajaehtojen mukaisesti.

Tutkimuksen viitekehys on ristiinliimatun puuelementin valmistaminen, joka rajataan koskemaan tarkemmin kerrosten ladontaa ja liimausta sekä CLT:n jälkiöstöä nurkkaliitosten näkökulmasta. Tutkimuksen ulkopuolelle jätetään tarkempi tarkastelu koskien CLT:n lujuusominaisuuksia, rakenteiden suunnittelua ja määräyksiä.

2 RISTIINLIIMATTU PUU

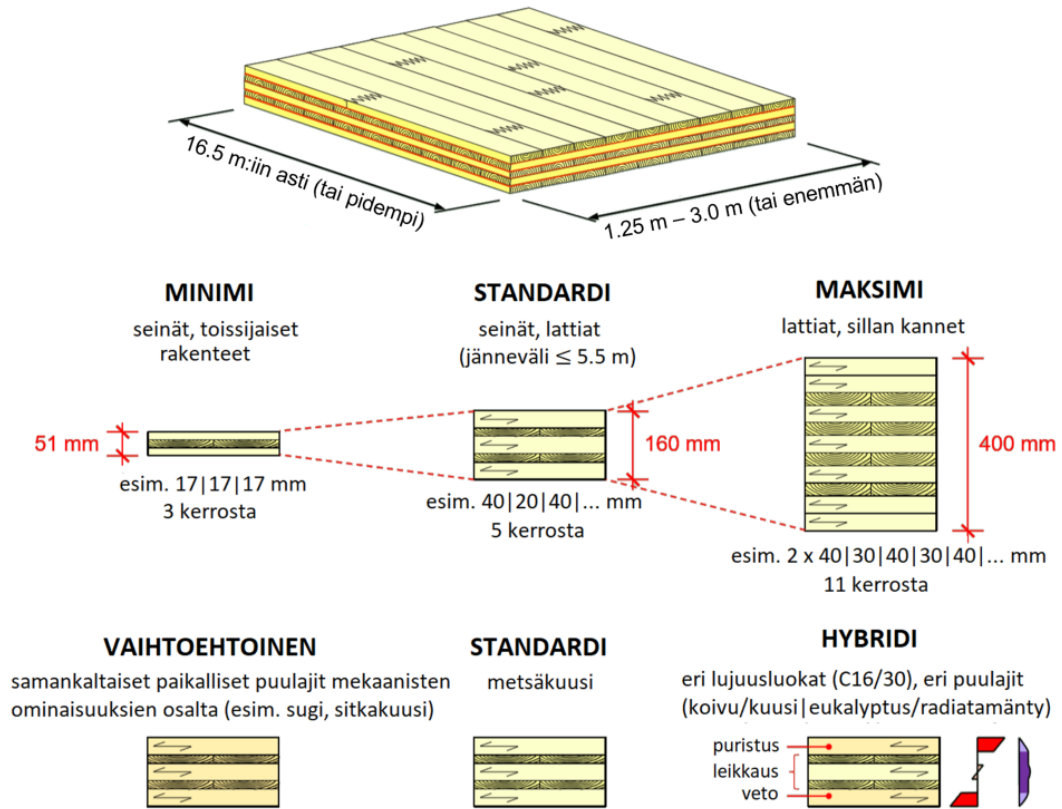
Ristiinliimattu puuelementti tunnetaan Suomessa yleisesti nimellä massiivipuu, kiintopuu, monikerroslevy tai kansainvälisemmin termillä CLT, eli Cross Laminated Timber. Tässä työssä käytetään terminä ristiinliimattu puuelementti tai pelkästään puuelementti, koska yleisesti CLT:stä puhuttaessa viitataan yleensä pelkästään vain levymäiseen rakennuspuutuotteeseen. Nykyaikaisella CLT-teknologialla kyetään valmistamaan valmiita elementtejä, joihin ei tarvitse enää jälkikäteen työstää esimerkiksi ovi ja ikkuna aukkoja. CLT:stä voidaan valmistaa myös painumattomia hirsiiä ja hirsiseinää muistuttavia elementtejä.

Nykyisen CLT:n kehitys on alkanut Keski-Euroopassa Itävallan ja Saksan alueilla 1990-luvulla, ja 2000-luvulle tultaessa CLT rakentaminen on kasvanut merkittävästi. CLT-rakentamisen suosio on ollut nousujohteista niin asuin- kuin julkisrakentamisessa. Kasvuun ovat vaikuttaneet CLT-rakentamisen ekologisuus ja tehokkuus sekä erilaiset tuotehyväksynät ja parantunut markkinointi. CLT-elementeistä rakentaminen tarjoaa monia etuja rakennusalalla. Sen helppo käsiteltävyys ja korkea esivalmistusaste nopeuttaa rakennusten pysytysaikoja, varsinkin kerrostalorakentamisessa. Massiivinen puurakenteen hyötyjä ovat myös hyvä lämmöneristys, hyvä äänieristys sekä kohtalaisen hyvä palonkesto. /1, s. 1./

Keski-Euroopasta löytyy jo useita CLT:n valmistajia, ja uusia valmistajia on alkanut hiljalleen ilmestyä myös Suomeen. Stora Enso valmistaa CLT:tä Itävaltan yksiköissä 2950 x 16000 mm:n suuruisina levyinä 140 000 kuutiometrin vuosituotannolla ja on edistänyt CLT-rakentamista Suomessa. Ensimmäisiä CLT-levyjä alettiin valmistaa Suomessa vasta vuoden 2014 joulukuussa Oy CrossLam Kuhmo Ltd:n toimesta. Crosslam valmistaa syrjäliimaamattomia CLT-levyjä, joiden maksimikoko on 3200 x 12000 mm ja paksuus välillä 60–300 mm. Kuhmossa toimii myös CLT-tasoelementtejä valmistava Elementtisampo. Suomen suurin CLT-tehdas on tällä hetkellä Hoisko CLT Finlandin Alajärvellä sijaitseva tehdas. Hoiskon valmistamat CLT-levyt ovat ulommaisilta kerroksilta reunaliimattuja ja kooltaan maksimissaan 3500 x 12000 mm ja paksuudeltaan 60–400 mm. Uusimpana tulokkaana Suomen CLT- markkinoilla on Kauhajokelainen Clt-Plant Oy, joka aloittaa toimitukset vuonna 2018. /2, s. 59; 3./

2.1 CLT

CLT koostuu parittomasta määrästä puulevykerroksia, jotka ovat liimattu lappeellaan päällekkäin 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden. Valmistustavasta riippuen puulevykerrokset voidaan liimata etukäteen syrjistä kiinni muodostaneen paneelimaaisia liimapuulevyjä tai jättää syrjät kokonaan liimaamatta. Kerrosten määrä vaihtelee vähintään kolmesta kerroksesta aina seitsemään kerrokseen asti tai jopa sen yli. Erityistapauksissa voidaan liimata myös kaksi päällekkäistä kerrosta samansuuntaisesti luoden erityisiä rakenteellisia ominaisuuksia. CLT:llä on korkeat lujuus- ja jäykkyysominaisuudet tason suuntaisesti ja tasoa kohti molempiin suuntiin. Kerrosten välinen jatkuva liimaus luo jäykän, yhtenäisesti toimivan ja monipuolisen rakenteen. CLT:stä voidaan valmistaa suuria seinä- ja lattiaelementtejä sekä muita suurikokoisia kantavia rakenteita. CLT on avannut uudenlaisia ulottuvuuksia puutekniikassa sekä mahdollistanut arkkitehdeille ja insinööreille uuden tavan suunnitella yhtenäisiä rakennuksia. CLT-rakentaminen on verrattavissa perinteiseen betoni -ja tiilirakentamiseen. Tämä uudellinen rakennustapa mahdollistaa ennennäkemättömät ulottuvuudet ja mittakaavat puurakentamisessa. Kuvassa 1 on esimerkki perinteisen CLT:n päämitoista, rakenteesta, kerrosten asettelusta, erilaisista yhdistelmistä ja ratkaisuista. /4, s. 1; 1, s. 4, 6./



Kuva 1. CLT:n tavanomaiset päämitat, kerrosrakenne, paksuudet, yhdistelmät, ja ratkaisut /5, s. 14–15/

Kantavana ja kuormitusta vastaanottavana rakenteena toimivaa CLT:tä käytetään yleisesti rakennuksen vaipassa runkoelementtinä. CLT:stä on rakennettu siltoja, kerrostaloja, omakotitaloja ja julkisrakennuksia ympäri maailmaa, mikä todistaa CLT:n monipuolisen käytettävyyden ja toimivuuden eri käyttökoh-teissa ja olosuhteissa. CLT:stä voidaan rakentaa nopeasti mittatarkkoja keski-kokoisia kerrostaloja helpon käsiteltävyyden ja korkean esivalmistusasteen ansiosta. CLT:tä voidaan käyttää kantavan ja jäykistävän rakenteensa ansiosta rakennuksen seinissä, välipohjissa ja katossa ilman erillisiä jäykistäviä rakenteita. CLT-elementtien käyttö onnistuu myös yhdessä muiden rakennusmateriaalien kuten betonin ja teräksen kanssa. CLT-levy toimii rakenteessa ilman- ja höyrynsulkuna sekä suhteellisen hyvänä lämmöneristeenä. CLT-rakentamisen hyödyksi voidaan laskea seuraavat asiat:

- Puun termiset ja kosteutta tasaavat ominaisuudet
- Rakenteellinen vahvuus ja stabiilius
- Rakentamisen nopeus, keveys, kuivuus ja tiiviys
- Puun positiiviset terveysvaikutukset
- Monipuoliset käyttö- ja yksilöintimahdollisuudet
- Ekologisesti kestävä runkomateriaali, CO₂- tasapaino
- Korkea esivalmistusaste ja pieni materiaalihukka. /2, s.12./

CLT:n valmistaminen on kasvanut pienen mittakaavan laitoksista aina teollisiin mittakaavoihin viimeisen kymmenen vuoden aikana. CLT:n ominaisuuksia ja suunnitteluprosesseja on säännelty kansallisilla standardeilla ja kansainvälisillä eurooppalaisilla teknisillä hyväksynnöillä (ETA). Ensimmäiset toimet CLT:n standardoimiseksi Euroopassa aloitettiin vuonna 2008. Ensimmäinen eurooppalainen standardi CLT:lle, EN 16351 otettiin käyttöön vuonna 2015. EN 16351 -standardissa on säännelty CLT:n valmistusta ja rakentamista, mutta yhtenäinen suunnitteluprosessi jää uupumaan. Lisästandardisointia tarvitaan testauksen ja suunnittelun säännöstelyyn. CLT:n suunnitteluprosessia ei ole vielä sisällytetty Eurokoodi 5 -Puurakenteiden suunnitteluohjeisiin. /6, s. 333; 7, s. 1./

2.2 Painumaton hirsi

Hirret ovat teollisesti höyläämällä tai sorvaamalla puusta valmistettuja, massiivisia, pääasiassa seinähirtenä käytettäviä rakennustarvikkeita, joiden nimellis-paksuus on vähintään 68 mm /8, s. 6/. Tavallisesta hirrestä rakennetun talon seinät painuvat ajan myötä. Painumisen aiheuttaa rakennuksen massasta aiheutuva puun ja saumojen painuminen sekä puun kuivumisesta aiheutuva kutistuminen. Hirren laatu vaikuttaa hirsiseinän painumaan. Lamellihirrestä rakennettu seinä painuu vähiten ja pyöröhirsiseinä painuu eniten. Laadusta riippuen hirsiseinä painuu noin 10–50 mm seinän korkeusmetriä kohti. Painuma tulee ottaa huomioon paikoissa, joissa painuva hirsirakenne yhdistyy painumattomiin rakenteisiin, kuten ikkunoihin, oviin, muurattuihin rakenteisiin, portaisiin jne. Kantamattomien rakenteiden liitoksiin jätetään painumavara ja kantavissa rakenteissa käytetään kierrejalkaa, jota säädetään painauman mukaan. /9./

Uusimpana innovaationa hirsirakentamisessa on painumaton hirsi tai CLT-hirsi. Painumaton hirsi on verrattavissa lamellihirteen sillä eroavaisuudella, että painumattomassa hirressä kerrokset ovat ristiinliimattu CLT-levyn tapaan. Painumattomia hirsiiä voidaan liittää kantaviin rakenteisiin, koska niiden painuma on vähäistä. Painumattomat hirret eivät ole täysin painumattomia, sillä niiden painuma on verrattavissa muuhun puurakentamiseen /9/. Ominaisuuksiltaan painumaton hirsi on verrattavissa CLT-levyyn.

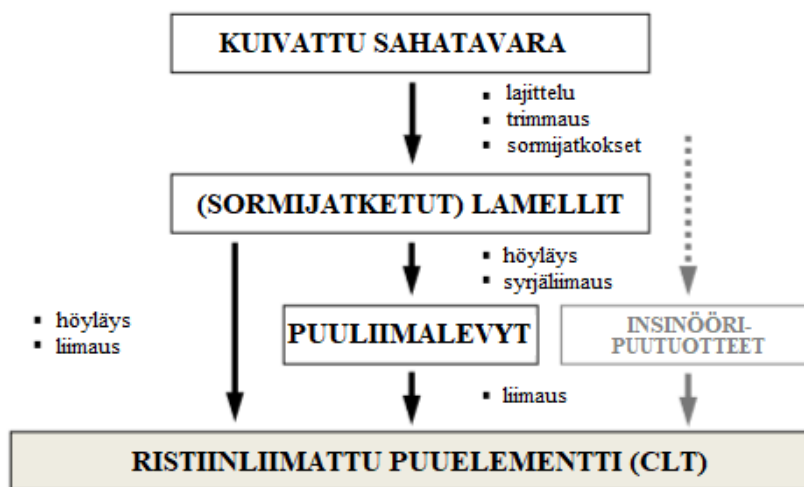


Kuva 2. Painumattoman hirren poikkileikkauksen profiili

Innovatiivisilla CLT:n tuotantolinjoilla painumattoman hirren valmistus on mahdollista leikkaamalla ja työstämällä suoraan CLT:stä sopivan kokoisia kappaleita. CLT:stä voidaan työstää myös korkeita ulkonäöltään hirsiseinää muistuttavia elementtejä, jotka nopeuttavat hirsitalon pystytysaikoja. Kuvassa 2 on esitetty painumattoman hirren profiili.

2.3 CLT:n valmistusprosessi

Valmistettavien ristiinliimattavien puuelementtien koko ja käyttötarkoitus vaikuttaa valmistusprosessissa käytettävän tekniikan ja valmistuslaitoksen layoutin suunnitteluun ja valintaan. CLT:n valmistusprosessi on verrattavissa perinteisen liimapuun valmistukseen. Kuvassa 3 on esitetty yksinkertaisesti CLT-raakalevyn valmistuksen olennaisimmat vaiheet. /10, s. 4; 4, s. 4./



Kuva 3. CLT:n valmistuksen vaiheet /4, s. 4/

CLT:n valmistusprosessi jakautuu pohjimmiltaan seuraaviin vaiheisiin:

1. Valmiiksi kuivatun sahatavaran lajittelu. Suoritetaan visuaalinen lajittelu ja myös mahdollisesti vaihtoehtoinen lujuuslajittelu.
2. Sormijatkokset. Poistetaan sahatavarasta mahdolliset paikalliset huonot kohdat, jotka eivät täytä lujuusvaatimuksia ja tehdään sormijatkokset.
3. Lamellien jaottelu ja katkaisu määrämittaen.
4. Lamellien höyläys neljältä sivulta.
5. Lamellien liimaus liimapuulevyksi.
6. Liimapuulevyjen tai yksittäisten lamellien ladonta ja liiman levitys.
7. Puristus. Kerrosten puristus hydraulisella, pneumaattisella- tai alipainepuristimella.
8. Valmiin CLT:n viimeistely. Leikkaus, työstöt ja mahdollinen hionta.

Kuhunkin vaiheeseen voi liittyä myös useita lisävaiheita. Valmistajasta riippuen voi valmistusprosessin vaiheet olla järjestykseltään hieman poikkeavia. Niin kuin kuvasta 3 on havaittavissa, liimapuulevyjen valmistus on vaihtoehtoista. Avaimet onnistuneeseen CLT:n valmistukseen ovat sahatavaran laadun yhtenäisyys ja liimattavuuteen vaikuttavien parametrien hallinta. /10, s. 6./

Tässä kappaleessa käydään läpi CLT:n perinteinen valmistusprosessi. Painumattomien hirsien valmistus on samankaltainen verrattuna CLT:n valmistukseen. Eroavaisuudet CLT:n ja painumattomien hirsien välillä syntyvät valmiiden CLT-levyjen viimeistelyssä ja käyttökohteissa.

2.3.1 Käytettävät liimat

Standardin EN 16351 mukaan CLT:n valmistuksessa on ensisijaisesti käytettävä seuraavia liimoja:

- fenoli- ja aminohartsit (esim. MF, MUF, PRF, UF)
- kosteuskovetteiset yksikomponentti polyuretaani liimat (PUR)
- emulsio polymeeri isosyanaatti liimat (EPI).

Liimojen tulee täyttää standardin EN 15425 tai EN 301 vaatimukset tai teknisten hyväksyntöjen vaatimukset, jotka todistavat liiman soveltuvuuden kantaville puurakenteille, erityisesti CLT:lle käyttöluokissa yksi tai kaksi. /11, s. 18./

Fenoli- ja aminohartseista käytetään pääasiassa resorsinoli- ja resorsinolifenoliliimoja (PRF) sekä melamiiniureaformaldehydiliimoja (MUF). PRF- ja MUF-liimojen käyttö CLT:n valmistuksessa ei ole kovin yleistä. PRF-liiman käyttö liimapuun valmistuksessa on yleistä Pohjois-Amerikassa. PRF-liiman muodostama liimasauma on väriltään tumma, ja se kestää hyvin vettä sekä vaihtelevia sääolosuhteita. PRF-liimat soveltuvat sormijatkosten, syrjien ja kerrosten liimaukseen. /12, s. 1; 10, s. 3./

MUF-liimaa käytetään pääasiassa sormijatkosten, syrjien ja kerrosten liimaukseen. MUF-liiman etuina on korkeiden lämpötilojenkesto ja välyksen täyttö. Kovettumisreaktiota voidaan nopeuttaa lämpötilaa kasvattamalla. Haittapuolina ovat formaldehydipäästöt sekä 1K-liiman rajallinen varastointi ja 2K-liiman tarkka hartsin ja kovettimen sekoitussuhde. Formaldehydipohjaiset PRF ja MUF-liimat muodostavat korkean ristosilloittumisen takia hauraita liimasaumojia. /4, s. 9, 19–20; 13, s. 415./

Kosteuskovetteisten yksikomponentti polyuretaani liimojen (1K-PUR) käyttöä suositetaan insinööripuutuotteiden valmistuksessa monesta syystä. Yksikomponentti systeemi ei vaadi sekoittamista, sitä on helppo käsitellä, se säilyy varastossa pitkään ja se kovettuu nopeasti huoneenlämmössä. 1K-PUR-liimat eivät sisällä liuottimia, haihtuvia orgaanisia yhdisteitä tai formaldehydiä. Liimasauma on joustava ja väriltään vaalea, minkä vuoksi liimasaumat on näkymättömiä. Liima turpoaa kovettuessaan, ja sillä on välyksentäyttöominaisuuksia. Liimalla on heikko lämpötilan kesto $T < 60$ °C. Liima soveltuu hyvin metsäkuusen (*Picea abies*) ja muiden havupuiden liimaamiseen, mutta tarkempaa tutkimusta soveltuvuudesta lehtipuiden liimaamiseen tarvitaan. CLT:n valmistuksessa käytetään lähes yksinomaan 1K-PUR-liimaa. 1K-PUR soveltuu pääasiassa sormijatkosten sekä syrjien ja kerrosten liimaukseen. Liimasauman pakkuuden tulisi olla pienempi tai yhtä suuri kuin 0,3 mm. PUR-liiman liimattavuutta voidaan parantaa vesipohjaisilla primereillä. /4, s. 9, 20; 13, s. 406–416./

Liimapuun valmistukseen tarkoitettut EPI-liimat ovat kaksikomponenttisiä liimoja, jotka asettuvat nopeasti ja kovettuvat alhaisissakin lämpötiloissa. Kovettumis- ja puristus aikaa voidaan lyhentää entisestään radiotaajuudella. Liiman

muodostama liimasauma on joustava, vedenpitävä ja väriltään vaalea. Liimasauma kestää hyvin kosteutta ja korkeita lämpötiloja täyttäen vaatimukset kantaville rakenteille. CLT:n valmistuksessa käytetään EPI-liimoja, joilla liimaseoksen viskositeetti on alhainen. Liima on joustavaa, ja sillä saavutetaan hyvä adheesio ilman primereita, jonka vuoksi liima soveltuu myös lehtipuulajien sekä puun ja metallien väliseen liimaukseen. Liima on formaldehydivapaa, mutta liima ja kovetin sisältävät kemikaaleja, jotka voivat aiheuttaa allergisia reaktioita. EPI-liima soveltuu periaatteessa sormijatkosten, syrjien ja kerrosten liimaamiseen, mutta ei suurten kokonaisten CLT-levyjen välisiin sormijatkoksiin. Liimasauman paksuuden tulisi olla pienempi tai yhtä suuri kuin 0,2 mm. /4, s. 20; 14, s. 355–363./

2.3.2 Raaka-aineen ominaisuudet ja luokittelu

Valmiiksi kuivatun sahatavaran kosteuspitoisuus voi yleisesti olla luokkaa 19 %, ja se voi vaihdella vuodenajan mukaan. Valmiiksi kuivattu sahatavara sellaisenaan ei välttämättä sovellu suoraan CLT:n valmistukseen. Kosteuspitoisuus vaikuttaa eri liimoihin ja liimausprosesseihin eri tavoin, jonka vuoksi on hyvä suorittaa koe-eriä eri kosteuspitoisuuksilla. Suositeltu kosteuspitoisuus sahatavaralle on 12 ± 2 %, mutta myös suosituksia 8 ± 2 % kosteuspitoisuudelle on löydettävissä joillekin tapauksille. Kosteuspitoisuuden vaihtelu on hyvä pitää pienenä, jotta voidaan minimoida sisäisten jännitysten syntyminen kerrosten välille. Sisäisiä jännityksiä syntyy eroavan kosteuskäyttäytymisen, syykuvion ja puulajin vaikutuksesta. /10, s. 6; 4, s. 6./

Standardin EN 16351 mukaan CLT koostuu lamellikerroksista, joiden paksuus on vähintään 6 mm ja pienempi tai yhtä suuri kuin 45 mm. Kolmikerroksisen CLT:n keskimäinen kerros voi kuitenkin olla 60 mm paksu. CLT:n kokonaispaksuuden ei tulisi olla yli 500 mm. Keski-Euroopassa yleisesti hyväksytyt ja käytössä olevat kerrosten paksuudet ovat 20 mm, 30 mm ja 40 mm. Yksittäisen lamellin leveys on oltava suurempi tai yhtä suuri kuin 40 mm ja pienempi tai yhtä suuri kuin 300 mm. Suositeltava lamellin leveys on 150 mm. Lamellin leveyden suositellaan olevan vähintään neljä kertaa lamellin paksuus, jotta kerrosten välillä säilyy sopiva vastustus vierintäleikkausta vastaan. /4, s. 5; 11, s. 20./

CLT:n valmistuksessa käytetään yleisesti keveitä ja pehmeitä havupuulajeja. Kansainvälisesti CLT:n tuotannossa käytetään paikallisia puulajeja, joiden mekaaniset ominaisuudet voivat olla perinteisesti käytettäviä puulajeja alhaisemmat. Yleisimmin käytetyt puulajit ovat metsäkuusi (*Picea abies*) ja pienemmissä määrin saksanpihta (*Abies alba*). Muita käytettäviä havupuulajeja ovat mänty (*Pinus sylvestris*), euroopanlehtikuusi (*Larix decidua*), douglaskuusi (*Pseudotsuga menziesii*) ja sembramänty (*Pinus cembra*). Mäntyä, etenkin sembramäntyä, käytetään usein vain CLT:n päällimmäisessä kerroksessa, joka jää näkyville. Myös raskaampia ja kovempia lehtipuulajeja voidaan käyttää pelkästään tai yhdessä kevyempien havupuulajien kanssa CLT:n valmistuksessa. Käyttämällä pehmeitä ja kovia puulajeja yhdessä voidaan optimoida CLT:n mekaaniset ominaisuudet. Jäykempien poikittais- tai pintakerrosten valmistaminen esim. koivusta tai saarnista kasvattaisi CLT:n taivutusjäykkyyttä ja vastusta vierintäleikkaukseen lisäämättä kuitenkaan CLT-elementin paksuutta. /4, s. 5./

CLT:n valmistuksessa on käytettävä sahatavaraa, joka täyttää ympäristösertifikaatin vaatimukset. Sahatavara lajitellaan visuaalisesti tai mekaanisesti lujuusluokkiin standardin EN 14081-1 tai DIN 4074-1 mukaan. Samassa kerroksessa olevien lamelleilla tulee olla samanlaiset ominaisuudet ja kuulua samaan laatuluokkaan. Kerros luokitellaan alimman laatuluokituksen omaavan lamellin mukaan, jos saman kerroksen sisällä lamellien laatuluokitus vaihtelee. Näkyviin jäävät lamellit voidaan lajitella myös visuaalisiin laatuluokkiin. On suositeltavaa, että kaikilla samansuuntaisilla kerroksilla olisi samat tekniset ominaisuudet. Yleisimmin käytetty lujuusluokka samasta puutavarasta koostuvalle CLT-rakenteelle on C24 standardin EN 338 mukaan. CLT:n poikittaiset kerrokset voivat koostua alemman lujuusluokan C16/C18 tavarasta. /4, s. 6; 10, s. 7; 15, s. 12./

2.3.3 Lamellien sormijatkokset

Sormijatkosten avulla lamellit jatketaan tarvittavaan pituuteen ja lamelleista poistetaan huonot kohdat, jotka eivät täytä lujuusluokan vaatimuksia. Jäljelle jääneet lamellikappaleet liitetään takaisin yhtenäiseksi sormijatkoksilla. Näin saadaan taloudellisesti liitettyä lamellit pitkittäisesti yhteen säilyttäen pääosa

alkuperäisestä lamellista. Sormijatkos on profiililtaan itsekeskittyvä, joka mahdollistaa nopean ja yksinkertaisen muotosulkeisen liitoksen lamellien välille maksimoiden liimauspinta-alan ja minimoiden materiaalihäviöt pituussuunnassa. CLT:n valmistuksessa käytettävien lamellien sormijatkoksissa käytetään sormipituuksina 15 tai 20 mm, jos lamellit on jo valmiiksi optimoitu ja hyväksytty liimapuun valmistukseen. Sormijatkokset voidaan tehdä syrjän suuntaisesti, jolloin sormikuvio on näkyvässä lappeen puolella, tai lappeen suuntaisesti, jolloin sormikuvio on näkyvässä syrjässä. Lappeen suuntaisen sormijatkoksen etuna on parempi ilmatiiviyys sekä parempi pinnanlaatu, koska sormikuvio ei ole näkyvässä CLT:n pinnassa. /4, s. 7–8; 15, s. 14./

Sormijatkosten tuotannon vaatimukset on säännelty standardeissa EN 385 ja EN 15497. Sormijatkokset tulee sijoittaa virheettömälle puualueelle ja käytettävän liimausmenetelmän soveltuvuus pitää varmistaa. Tekniset vaatimukset käytettävälle liimausmenetelmälle, jotka on määritetty asiaan liittyvissä standardeissa ja liiman valmistajan vaatimuksissa tulee täyttää. Puristuspaineen on oltava soveltuva käytettävälle liimamäärälle ja puulajille. Liian pienellä puristuspainella liima ei kykene kostuttamaan pintoja riittävästi ja adheesio jää liian pieneksi lamellien kuljetukseen. Liian suuri puristusaine voi aiheuttaa kohtuutonta puun halkeilua. Parametrit, jotka vaikuttavat puristusaineen valintaan, ovat sormijatkoksen profiili, puulaji, kiinnitettävien kappaleiden kosteuspitoisuus ja kiinnitettävien kappaleiden poikkileikkausten pinta-ala. CLT:n valmistuksessa käytettävien lamellien sormijatkoksia koskevat määräykset ovat samanlaiset kuin perinteisen massiivi- ja liimapuuta koskevat määräykset. /4, s. 8./

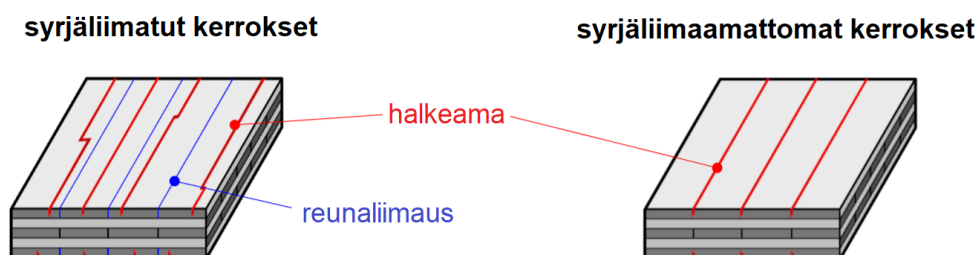
Liimausmenetelmä on säädettävä rakenteelle ja puulajille sopivaksi, jotta voidaan taata sormijatkosten optimaalinen toimivuus. Ainoastaan liimausmenetelmiä, jotka on sallittu kantaville rakenteille standardien EN 301 ja EN 15425 mukaan, voidaan käyttää. Yleisimmin käytetyt liimat ovat MUF ja 1K-PUR. /4, s. 8–9./

2.3.4 Liimapuulevyjen valmistus

Ennen liimapuulevyjen valmistamista lamellit höylätään. Lamellien höyläyksellä on saavutettava vaadittu tarkkuus optimaalisen liimattavuuden kannalta.

Höyläyksellä vähennetään lamellin pinnalla olevan hapettuman määrää. Kevyt höyläys lamellien pinnalta parantaa lamellien liimattavuutta. Lamellit höylätään neljältä sivulta, jotta saavutetaan yhdenmukainen mittatarkkuus. Lamellien höyläys neljältä sivulta on tärkeää yksittäisten liimapuulevyjen valmistuksessa. Kun CLT:n kerrokset valmistetaan valmiista liimapuulevystä, saavutetaan rakennusfysikaalisia hyötyjä paloteknisyydessä, ääniteknisyydessä ja ilmatiiveydessä. /10, s. 8; 4, s. 10./

Liimapuulevyt ovat syrjistään liimattuja lamelleja, jotka muodostavat yksittäisen, paneelimaisten kerroksen. Liimapuulevyt voidaan valmistaa erissä levittämällä liima lamellien syrjään ja puristaa kokonainen levy valmiiksi reuna ja päältäpäin puristuksella. Lamellit voidaan puristaa jatkuvalla syötöllä levyiksi kitkapuristimella. Liimapuulevyt voidaan tasoittaa myöhemmin oikeisiin mittoihin, jotka vaaditaan pitkittäisiltä ja poikittaisilta kerroksilta. Liimapuulevyt voidaan höylätä tai hioa ennen päällekkäispuristusta, jotta voidaan taata tasainen puristusaine ja mittatarkkuus. Syrjäliimaukselle ei ole erityisiä mekaanisia vaatimuksia, koska CLT:tä voidaan valmistaa ilman syrjäliimausta. Liimapuulevyt nostetaan alipainenostimella ja ladotaan ristikkäisesti päällekkäin CLT:n jokaiseen kerrokseen tai pelkästään tietyille kerroksille, kuten esimerkiksi vain päällimmäisille kerroksille. CLT:n valmistaminen tasaisista liimapuulevy kerroksista onnistuu alhaisemmalla puristusaineella kuin mitä vaaditaan yksittäisistä lamelleista valmistetussa CLT:ssä. /16, s. 20; 4, s. 10./



Kuva 4. Kerrosten syrjäliimauksen vaikutus pintojen halkeiluun /17, s. 30/

Useat tekniset hyväksynnät sallivat syrjäliimattujen lamellien leveyden ja paksuuden suhteeksi alle neljä, koska syrjäliimaus parantaa vastustusta vierintäleikkaukseen. Puun kosteuskäyttämisen aiheuttama puun turpoaminen ja kutistuminen aiheuttavat sisäisiä jännityksiä, jonka vuoksi CLT:n pinnalle muodostuu halkeamia. Jos syrjäliimaus on tehty onnistuneesti, muodostuvat hal-

keamat lamellisaumojen väliin. Epäsäännölliset halkeamat voivat vaikuttaa negatiivisesti näkyvän pinnan esteettisyyteen. Syrjäliimaamisella tavoitellut ja saadut hyödyt rakennusfysiikassa heikkenevät halkeamien myötä. Syrjäliimaamaton tai heikosti syrjäliimattu CLT halkeilee lamellien saumojen kohdalta. CLT-levyjen halkeilukäyttäytyminen on esitetty kuvassa 4. /4, s. 11./

2.3.5 Kerrosten ladonta, liimaus ja puristus

Liimauksessa tulee noudattaa liiman valmistajan suosituksia ja vaatimuksia. Kerrosten liimauksessa yleisimmin käytetty liima on kosteuskovetteinen 1K-PUR ja vähenemässä määrin PRF-liima. Liima levitetään kerrosten päälle liimaportaalilla. Liimaportaali liikkuu liimattavan kerroksen yli ja levittää suutinpäistä liiman raitoina kerroksen päälle. Liimattavan kerroksen päälle voidaan sumuttaa kevyesti vettä helpottamaan kosteuskovetteisen 1K-PUR-liiman kovettumista. Liima tulisi levittää 24 tunnin sisällä höyläyksestä, kun puun pinta on vielä tasainen eikä vanhenemista ja pinnan hapettumista ole päässyt tapahtumaan. Liimattavat pinnat tulee pitää puhtaina öljyistä, rasvoista ja irrotusaineista, jotka vaikuttavat pinnan liimattavuuteen. Kerrokset on hyvä puhdistaa paineilmalla mahdollisesta roskista ennen liimausta. /10, s. 8./

Perinteisesti CLT:n valmistuksessa yksittäiset lamellit ladotaan lappeellaan aihioon vierekkäin kerros kerrallaan siten, että päällekkäiset kerrokset ovat 90 asteen kulmassa toisiinsa nähden syyn suunnassa. Valmiit liimapuulevyt ladotaan ristikkäisesti päällekkäin alipainenostimella. Kerrosten välillä tulisi saavuttaa vähintään 80 % tehollinen liimausala. Liimausalaan vaikuttaa puun ominaisuudet ja paikalliset viat. Lamellit voidaan latoa siten, että ydinpuu- ja pintapuupuoli vaihtelevat vierekkäisillä lamelleilla. Näin vähennetään kerrosten taipumusta käyristymiseen. /10, s. 9./

CLT:n valmistuksessa käytetään puristimena joko alipainepuristinta, hydraulipuristinta tai pneumaattista puristinta. Hydrauli- ja pneumaattisella puristimella saadaan aikaiseksi 0.1- 1.0 MPa:n tai hieman korkeampi puristusaine. Alipainepuristimella päästään korkeimmillaan 0.1 MPa:n suuruisiin puristusaineisiin. Reunapuristusta tarvitaan, jos CLT rakentuu yksittäisistä lamelleista. Reunapu-

ristuksella saadaan erillään olevat lamellit puristettua syrjiltään yhteen minimoiden lamellien väliin jäävän raon leveyden. Valmiista liimapuulevyistä kootulla CLT:llä reunapuristusta ei tarvita. /10, s. 14; 4, s. 13./

Vaadittavista puristusaineista CLT:n valmistuksessa ei ole tarkkoja määräyksiä. Pinnaltaan tasaisten ja tasapaksujen liimapuulevyjen päällekkäin liimauksessa ei teoriassa vaadita ollenkaan puristusainetta. Käytännössä liimattavien kappaleiden välillä esiintyy aina huonoa pinnanlaatua, kaartumia, taipumia ja paksuus eroja. Minimipuristusaineen valintaan vaikuttaa myös käytettävä liimausmenetelmä. Raitoina levitetty liima vaatii tietyn minimipuristusaineen, jotta liimattavat kappaleet kostuvat täysin. Myös sallittu liimakerroksen paksuus tulee ottaa huomioon minimipuristusainetta määrittäessä. Käytettävissä liimoissa on myös eroja, jotka vaikuttavat puristusaineen valintaan. Muodostuvan liimakerroksen paksuuteen vaikuttaa eri liimojen, kuten kontaktiliimojen, välykset täyttävien liimojen, turpoavien liimojen (esim. PUR) ja kutistuvien liimojen (esim. MUF) käyttäytyminen. Määritetyn liimasauman paksuuden saavuttamiseen vaikuttaa käytännössä liiman laatu ja määrä sekä puristusaine. /4, s. 13./

Puristusaine ei saa myöskään kasvaa liian suureksi. Liian suuri puristusaine vahingoittaa liimattavien kappaleiden pintoja murskaamalla puun solurakennetta. Suurella puristusaineella liimaa voi pursuta saumoista kohtuuttomasti, joka aiheuttaa riittämättömän tarttuvuuden. Puristusaine vaikuttaa myös liiman läpäisevyyteen ja leikkauslujuuteen. Puristusaineen valintaan vaikuttaa olennaisesti valmistuksessa käytettävä puulaji. Kuuselle suositeltava puristusaine on välillä 0.4 – 0.6 N/mm² /56, s.33/. Voidaan todeta, että vaaditun puristusaineen valintaan vaikuttavat liima, puulaji, liimattavien kappaleiden geometria, liiman levitystapa sekä levitettävän liiman määrä. /4, s. 13–14./

2.3.6 Viimeistely

Puristuksen jälkeen CLT-levyt trimmataan reunoista tasaisiksi määramittaan. Elementin pinta on mahdollista vielä hioa tai höylätä elementin käyttökohdeesta tai asiakkaan vaatimuksesta riippuen. Hionta tai höyläys eivät ole pakollisia toimenpiteitä, mutta niiden avulla voidaan saavuttaa rakennusprojektien vaatimat tiukemmat toleranssit. Käyttökohteesta riippuen voidaan elementin pinnalle lisätä ei-kantavia kerroksia, kuten esimerkiksi OSB-levyä, akustisia

paneeleita ja kipsilevyjä. Elementteihin tehdään tarvittavat CNC-työstöt, kuten ikkuna ja oviaukot sekä erilaiset poraukset, jyrinnät, jiirit ja muotoleikkaukset. /4, s. 18; 10, s. 10./

Valmistuslaitoksesta riippuen CLT-levyt voidaan työstää valmiiksi runkoelementeiksi paikan päällä tai hoitaa runkoelementtien valmistus alihankintana erilliseltä CLT-runkoelementtien suunnittelu ja/tai työstöpalvelukeskukselta. CLT-runkoelementit ovat CLT-levyjä, jotka on suunniteltu ja työstetty asennusvalmiiksi. Kantaviin runkoelementteihin on työstetty ikkuna- ja oviaukot, liitoslovet sekä talotekniikkaupotukset. Käyttökohteesta riippuen CLT-runko voidaan lämpöeristää ja verhoilla ulkoapäin. CLT-levyt voidaan myös jatkojalostaa suurelementeiksi tai tilaelementeiksi. CLT-suurelementteihin on asennettu valmiiksi ikkunat, ikkunapellitykset, sähköpistorasiat -ja vedot sekä mahdolliset eristykset ja verhoilu. CLT-runkoelementeistä tai CLT-suurelementeistä voidaan valmistaa CLT-tilaelementtejä. CLT-tilaelementeissä kaikki runkorakenteet voidaan valmistaa CLT:stä. /18, s. 3–4./

Suurten CLT-levyjen työstämiseen käytetään ensisijaisesti CNC-työstöportaalilla. Työstökeskus voi kokonaisuudessaan liikkua työstettävän CLT-kappaleen yläpuolella y-suunnassa tai vaihtoehtoisesti työstettävää kappaletta liikutetaan portaalin pysyessä paikallaan. Yksinkertaisimmillaan 2,5-akselinen työstö riittää tasaisten CLT-levyjen upotusten ja aukkojen rouhintaan. Modernin ja joustavan CLT-tuotantolinjan tarpeisiin vaaditaan 5-akselista työstöportaalilla. Moderneilla työstöportaaleilla on mahdollista suorittaa kaikki tarpeelliset työstöt ja poraukset CLT-levyn molemmilta puolilta ja kaikilta neljältä sivulta, joita vaaditaan mitoitukseen, asentamiseen ja elementtien liittämiseen. Työstöportaalien työkalumakasiinissa on käytettävissä eri työstöihin vaadittavat työkalut. kuten esimerkiksi varsijyrin, kehäjyrin, porat, ketjusaha, pyöröterä jne. /4, s. 18; 18, s. 23./

Painumattomien hirsien valmistus painottuu CLT-levyjen viimeistelyyn. Valmiista CLT-levystä voidaan sahata erikokoisia hirsiiä erilaisten tarpeiden mukaan. Jos CLT-levystä sahataan perinteisen kokoisia hirsiiä, onnistuu hirsien profiiliin höyläys perinteisillä hirsihöylälinjoilla. CLT-levyn työstäminen korkeaksi hirsiseinäjä muistuttavaksi elementiksi onnistuu modernilla 5-akselisella työstöportaalilla.

3 PUUMATERIAALI

Puu on monimutkainen biologinen rakenne, joka sisältää monenlaisia kemiallisia yhdisteitä ja solutyppejä, jotka toimivat yhdessä palvelleen elävän puun tarpeita. Puut ovat kehittyneet miljoonien vuosien aikana palvelemaan puun kolmea tärkeintä päätoimintoa: veden johtaminen juurista lehdille, puun rungon mekaaninen tukeminen ja biokemikaalien varastoiminen. Kaikki puun fysikaaliset, mekaaniset, biologiset ja tekniset ominaisuudet ovat muodostuneet elävän puun tarpeiden mukaan. Puiden solut toteuttavat puun tärkeimmät päätoiminnot. Puiden kolmeen päätoimintoon vaikuttavien edellytysten ymmärtäminen ja päätoimintoja säätelevien puunrakenteiden tunnistaminen avaa näkökulmia puun mahdollisuuksista teknisenä materiaalina. /19, s. 1./

Makroskooppisessa mittakaavassa tarkasteltuna puunrungon poikkileikkaus koostuu ulkopuolelta puun sisälle edetessä ulkokuoresta, sisäkuoresta, jällestä, pintapuusta, sydänpuusta ja ytimestä. Ulkokuori eli kaarna suojelee puuainesta ja pehmeämpää sisäkuorta ulkoisilta vaurioilta ja estää samalla nesteiden haihtumista. Sisäkuori eli nila/floeemi on johtosolukon osa, joka johtaa vettä, ravinteita ja lehtien tuottamia yhteyttämistuotteita puun muille osille. Jälsi eli kambium on ohut solukerros, joka sijaitsee puun sisäkuoren ja puuaineen välissä. Jälsi vastaa puun paksuuskasvusta tuottaen solu jakautumisella uutta puuainesta ja kaarnaa. Pintapuu eli manto sisältää elävää ja kuollutta solukkoa, ja se vastaa veden ja ravinteiden kuljettamisesta juuristosta lehdille. Sydänpuu on kuollutta solukkoa, joka sisältää paljon uuteaineita ja on usein pintapuuta tummempaa. Ydin sijaitsee keskellä runkoa, ja se on jäännös puun aikaisemmasta kasvusta. Kasvukauden aikana jälsi synnyttää uutta puuainesta, jolloin puu kasvattaa ympärilleen vuosirenkaan eli vuosiluston. Kasvukauden alussa muodostuneita soluja kutsutaan kevätpuuksi tai varhaispuuksi, ja kasvukauden loppupuolella syntyneitä soluja kutsutaan kesäpuuksi tai myöhäispuuksi. Kevätpuu on yleisesti vaaleaa ja suurionteloista ja kesäpuu tummaa ja pienionteloista. /19, s. 2–4; 20./

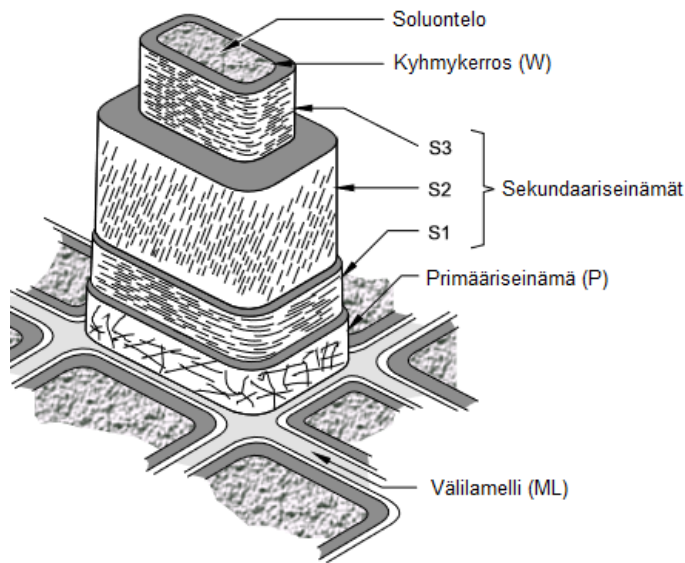
Puut jaotellaan kahteen pääryhmään, havupuihin ja lehtipuihin. Havupuut ja lehtipuut eroavat toisistaan solutyypeiltään. Havupuut ovat rakenteeltaan yksinkertaisempia lehtipuihin verrattuna. Havupuissa on vain kahta erilaista solu-

tyyppiä, joiden rakenteissa ei ole suuria eroavaisuuksia. Lehtipuut ovat rakenteeltaan monimutkaisempia, koska lehtipuilla on enemmän solutyyppejä ja solut ovat erikoistuneempia. Huomattava eroavaisuus solutasolla lehti- ja havupuiden välillä ovat putkilosolut, joita on lehtipuissa, mutta ei havupuissa. Täyskasvuisten havu- ja lehtipuiden solut ovat suurimmalta osalta kuolleita, myös pintapuussa. Tässä kappaleessa tarkastellaan lähemmin havupuita. /19, s. 2./

3.1 Puusolukko

Havupuiden puuaines koostuu yli 90-prosenttisesti trakeideista. Rungonsuuntaiset trakeidit ovat pitkiä, ohuita ja onttoja soluja, jotka kuljettavat nesteitä ja tukevat puuta mekaanisesti. Trakeideja on myös ydinsäteen suuntaisesti. Trakeidit ovat kevätpuussa ohutseinäisiä ja kesäpuussa paksumpi seinäisiä. Vesi kulkeutuu trakeidien välillä soluseinämässä sijaitsevien huokosten välityksellä. Pääasiassa tylppysoluista koostuvat ydinsäteet kuljettavat ja varastoivat ravinteita rungon säteen suuntaisesti. Havupuun solukossa esiintyy myös rungon pituus- ja säteensuuntaisia pihkatiehyitä. Pihkatiehyt on putkimainen tyhjä tila puuaineksessa, jota ympäröi pihkaa erittävät rauhassolut. /19, s. 9./

Puun soluseinät määräävät suurimman osan puun ominaisuuksista. Soluseinä on säännöllinen rakenne, joka on samankaltainen havu- ja lehtipuiden sekä eri solutyyppeiden ja puulajien välillä. Soluseinä koostuu kolmesta pääalueesta: välilamellista, primääriseinämästä, ja sekundaariseinämästä. Soluseinä rakentuu selluloosasta, hemiselluloosasta, ligniinistä ja pektiinistä. Selluloosa on puun päärakennusaine sekä yleisin luonnonpolymeeri. Selluloosa esiintyy luonnossa pitkinä molekyyliketjuina järjestäytyneenä rinnakkaisesti toisiinsa nähden. Järjestäytyneitä pitkiä selluloosa molekyyliketjuja nimitetään mikrofibrilleiksi. Hemiselluloosa yhdistää ligniinin ja selluloosan yhtenäiseksi kokonaisuudeksi soluseinän jokaiseen kerrokseen. Ligniini toimii hauraana matriisi materiaalina. /19, s. 7; 21, s. 4./



Kuva 5. Soluseinän rakenne. Mikrofiibrillikulmat on havainnollistettu viivoilla soluseinämissä /21, s. 5/

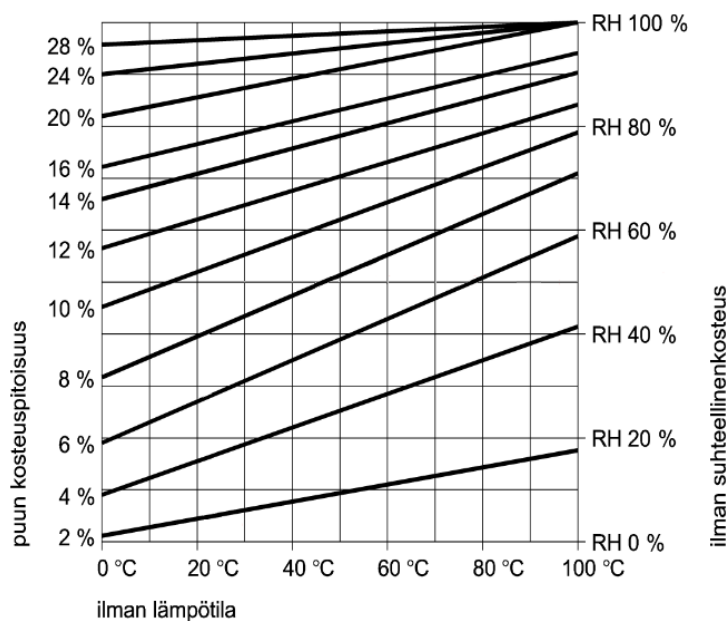
Välilamelli sitoo yksittäiset solut ja kuidut toisiinsa. Primääriseinä on ohut, ja se on vaikea erottaa välilamellista, minkä vuoksi käytetään termiä yhdistetty välilamelli, joka käsittää välilamellin ja primääriseinän. Sekundaariseinä koostuu kolmesta kerroksesta: S1, S2 ja S3. Sekundaariseinämän S2-kerros määrittää solun ominaisuudet ja täten koko puun ominaisuudet makroskooppisella tasolla. S2-kerros on sekundaariseinämän paksuin kerros, jossa ligniinin osuus on alhainen ja mikrofiibrillikulma on pieni. Pieni mikrofiibrillikulma, joka on lähes kuidun pituusakselin suuntainen määrittää puulle hyvän veto- ja puristuslujuuden syyn suunnassa. Soluseinän rakenne on esitetty kuvassa 5. /19, s. 7–8./

3.2 Kosteuseläminen

Puu on hygroσκοoppinen materiaali, eli se sitoo kosteutta lähiympäristöstä ja kutistuu ja turpoaa kosteuden vaikutuksesta. Ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila vaikuttavat kosteuden vaihtumiseen puun ja ilman välillä. Kosteudella on suuri vaikutus puunominaisuuksiin ja käyttäytymiseen. /22, s. 1./

Kosteus esiintyy puuaineessa vapaana nestemäisenä vetenä tai höyrynä soluonteloissa tai sidottuna vetenä soluseinämissä. Kun soluseinämät ovat täynnä vettä ja soluontelossa ei esiinny vettä ollenkaan, puhutaan puunsyiden kyllästymispisteestä. Puunsyiden kyllästymispiste on noin 30-prosentin kos-

teuspitoisuudessa puulajista riippuen. Kosteuden ollessa puunsyiden kyllästymispisteen yläpuolella, ei puun fyysiset ja mekaaniset ominaisuudet enää muutu. Puun ollessa auringolta ja nestemäiseltä vedeltä suojattuna puun kosteuspitoisuus puunsyiden kyllästymispisteen alapuolella määräytyy ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mukaan. Puulla on jokaista lämpötilaa ja ilman suhteellista kosteutta vastaava tasapainokosteus, jolloin puun kosteuspitoisuus ei kasva tai pienene (kuva 6). /22, s. 2–3./



Kuva 6. Puutavaran kosteuspitoisuuden riippuvuus lämpötilasta ja ilman suhteellisesta kosteudesta /23/

Puu adsorboi kosteutta ympäröivästä ilmasta. Adsorptiossa vesihöyry tai neste muodostaa kalvon kiinteän aineen pintaan. Puussa vesihöyry adsorboituu mikrofibrillien hemiselluloosaan ja amorfiseen selluloosaan. Vesi tunkeutuu solun sekundaariseinämän S2-kerroksen selluloosaketjujen väliin ja pakottaa ketjut erilleen, joka aiheuttaa puun turpoamisen säteen ja tangentin suunnassa. Turpoaminen pituussuunnassa on pientä S2-kerroksen pienestä mikrofibrilli kulmasta johtuen. /21, s. 4, 10./

Desorptiossa puu luovuttaa kosteutta ympäröivään ilmaan, eli puu kuivuu. Vesi alkaa poistumaan puun soluista puunsyiden kyllästymispisteen alapuolella. Kun kosteus poistuu solunseinämistä, solurakenne kutistuu ja mikrofibrillit tulevat lähemmäksi toisiaan. Kuivumisessa ei tapahdu suurta muutosta puun pituussuunnassa. Kosteuseläminen on erilaista eri puulajien välillä. Puu on anisotrooppinen materiaali, jonka vuoksi puun kosteuseläminen on erilaista

eri suunnissa. Puu kutistuu ja turpoaa eniten tangentinsuunnassa. Kosteuseläminen säteensuunnassa on noin puolet pienempi verrattuna tangentinsuuntaan. Pituussuunnassa kosteuseläminen on pientä. Esimerkiksi kun kuusi kuivuu puunsyiden kyllästymispisteestä (kosteus 30 %) täysin kuivaksi, tapahtuu kutistumista 0,3 % pituussuunnassa, 3,6 % säteensuunnassa ja 7,8 % tangentin suunnassa (kuva 7). /21, s. 6–7; 22, s. 5./



Kuva 7. Kuivauksen aiheuttamat vääristymät ja kutistumat /24/

Kuivumisen aikana sahatavaraan syntyy sisäisiä jännityksiä, jotka aiheutuvat sahatavaran pintakerroksen ja sisäosan eroavasta kuivumisesta ja kutistumisesta. Kuivumisen alussa pintakerroksen kuidut kuivuvat ja alkavat kutistua. Kappaleen sisäosa on vielä kostea, joka vastustaa pintakerroksen kutistumista. Tämä aiheuttaa pintakerrokseen vetoa ja sisäosiin puristusta. Pintakerroksen liian nopean kuivumisen aiheuttamat vetojännitykset johtavat pinnan halkeamien muodostumiseen. Kuivumisen edetessä sisäosa alkaa kuivua ja kutistua. Tässä vaiheessa pintakerros on pysyvästi laajentuneessa tilassa ja estää sisäosan normaalin kutistumisen. Tämä muuttaa jännitys jakauman päinvastaiseksi aikaisempaan tilaan verrattuna. Nyt sisäosaan kohdistuu vetoa ja pintakerrokseen vetoa. Suuret sisäiset jännitykset voivat aiheuttaa sisähalkeamia. /25, s. 7./

3.3 Puun liimaus ja delaminointi

Liimaliitoksen syntymiseen vaaditaan molekyylitason vuorovaikutusta liiman ja liimattavien kappaleiden välillä. Liiman tulee virrata liimattavan kappaleen pinnalla täyttämällä pinnankarheudesta aiheutuneet kolot ja epätasaisuudet. Liimattavan pinnan vettymiseen vaikuttaa esimerkiksi liiman ja liimattavan pinnan pintaenergiat, liiman viskositeetti, liimauksen aikainen lämpötila, liimasauman puristus sekä monet muut tekijät. Puu liimattavana pintana on monimutkainen

johtuen puun anisotrooppisuudesta. Eroavaisuudet sydänpuun, pintapuun, keväät, kesäpuun, reaktiipuun sekä syynsuunnan välillä lisäävät puun monimutkaisuutta liimattavana materiaalina. On suositeltavaa, että liimasauma on kestävämpi kuin itse puumateriaali. Tässä kappaleessa käsitellään liimausta lähinnä havupuiden näkökulmasta, joiden liimaus on yleisesti yksinkertaisempaa kuin lehtipuiden. /26, s. 221./

3.3.1 Liimautuminen

Adheesiolla tarkoitetaan vuorovaikutusta liiman pinnan ja liimattavan pinnan välillä. Adheesiolle ei ole yksiselitteistä teoriaa, jolla voitaisiin kuvata yhtenäisesti vuorovaikutusta adheesion, liiman ja liimattavan fyysisten ominaisuuksien sekä liimasauman lujuuden välillä. Helpon ymmärrettävissä oleva teoria on mekaaninen adheesio, jonka mukaan liima tunkeutuu liimattavan kappaleen pinnan epätasaisuuksiin muodostaen muotosulkeisia liitoksia liiman kovettuessa. Puun tapauksessa liima tunkeutuu puun aukinaiisiin soluonteloihin. Muita teorioita adheesiolle ovat esimerkiksi sähköstaattinen-, diffuusio-, adsorptio ja kemiallinen teoria, joita ei käydä läpi sen tarkemmin tässä työssä. Adheesio muodostuu useimmiten useamman teorian summasta, minkä vuoksi adheesiota ei voida selittää yhdellä teoriolla. /26, s. 221–224./

Liimattavan puun pinnanlaadulla on suuri merkitys riittävän kestävästi liimattavan sauman syntyyn. Pinnan mekaaniset ja kemialliset ominaisuudet vaikuttavat syntyvän liimattavan sauman laatuun. Puun uuteaineet tai liiallinen kuivaus saavat aikaan kemiallisesti heikkoja rajapintoja. Mekaanisesti heikoissa pinoissa solut puun pinnassa ovat murskautuneet tai haljonneet, jolloin solut ovat heikot, eikä liima pääse kunnolla kostuttamaan pintaa tai tunkeutumaan puuhun. Paras mahdollinen pinnanlaatu liimaamiseen on sileä, tasainen sekä vapaana mahdollisista koneistamisesta aiheutuneista jäljistä tai muista epä säännöllisyyksistä. Terävillä, tasomaisilla terillä saadaan aikaan liimaamisen kannalta paras pinnanlaatu. Höyläämällä tai otsajyrsimällä liimattava puun pinta 24 tunnin sisällä ennen liimausta poistaa epätasaisuudet ja uuteaineet. Sahaaminen, hiominen tai tylsillä terillä höylääminen murskaa pinnan solurakennetta, joka johtaa huonoihin liimattavoihin. Käsin hiominen karkeusasteen 60–80 hiomapaperilla on yleisesti sallittua, koska se aiheuttaa vähemmän vahinkoa soluille. /27, s. 2–3; 26, s. 225–226./

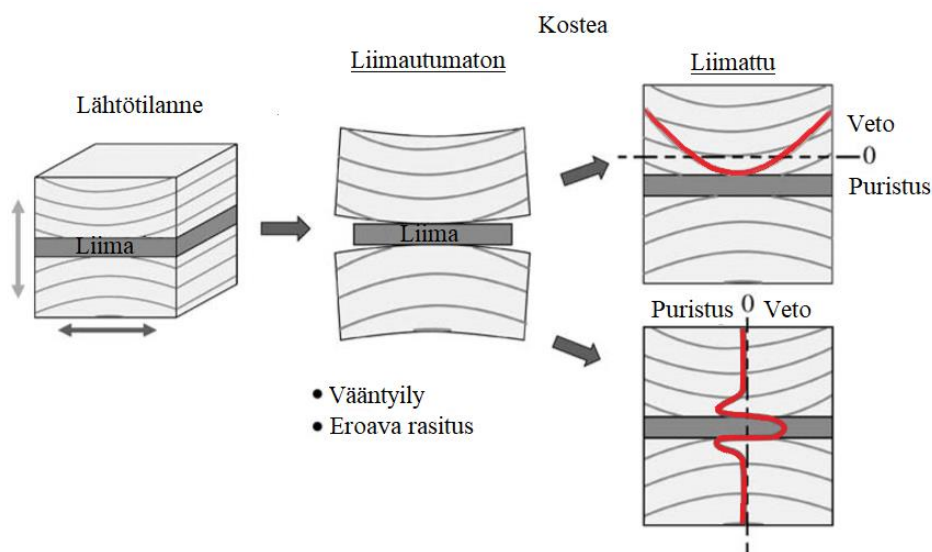
Hyvän liimasauman muodostumiseksi liiman tulee kostuttaa liimattava pinta sekä virrata tasaisesti liimattavan pinnan yli. Puuta liimattaessa on tärkeää, että liima tunkeutuu puun soluonteloihin. Kostumisella tarkoitetaan liimapi-saran kykyä muodostaa alhainen kontaktikulma liimattavalle pinnalle. Virtauk-sella tarkoitetaan liiman kykyä levittäytyä tasaisesti liimattavalle pinnalle koh-tuullisessa ajassa. Tunkeumalla tarkoitetaan liiman kykyä tunkeutua liimatta-van pinnan aukkoihin tai itse liimattavaan kappaleeseen. Liima voi tunkeutua puun soluonteloiden lisäksi myös soluseinämiin. /26, s. 230–231./

3.3.2 Delaminointi

Köyhtyneet liimasaumat ovat yksi osatekijä liimasaumojen delaminoinnissa. Köyhtyneellä liimasaumalla tarkoitetaan liimaliitosta, jossa suuri osa liimasta on pursunnut saumasta pois, tai liimaa on liian vähän, jolloin liima ei muodosta yhtenäistä kalvoa liimattavien puukappaleiden välille. Liimasaumasta muodos-tuu epäjatkua ja sauman kestävyys riippuu niistä kohdista, missä liima ulot-tuu puunpinnalta toiselle. Köyhtyneiden liimasaumojen muodostumiseen vai-kuttaa pääasiassa kolme tekijää: puulaji, liiman koostumus ja puristus-paine. Näistä tekijöistä voidaan hallita liiman koostumusta ja puristus-painetta. Liiman on oltava tarpeeksi juoksevaa, että se leviää epätasaiselle pinnalle levitysvai-heessa ja tunkeutuu pintaan puristettaessa. /28, s. 1./

Puun kostuseläminen vaikuttaa liimasaumojen delaminointiin. Puun kutistu-minen ja turpoaminen saa aikaan riittävän voiman liitospinnalle, joka voi ai-heuttaa joidenkin liimojen pettämisen. Delaminointikokeessa alipaineella pois-tetaan puun sisältä mahdollinen ilma ja paineella pakotetaan neste tunkeutu-maan puunsoluihin, jolla kiihdytetään puun turpoamista. Puun turpoamisen ai-heuttamat jännitykset eivät välttämättä laukea puun halkeilun seurauksena sa-malla tavalla kuin puun kuivuessa ja kutistuessa. Puun turpoaminen aiheuttaa huomattavan rasituksen puun ja liiman rajapinnalle. Epätasaisesti jakautunut rasitus aiheuttaa suuren jännityksen rajapinnalle. Kuvassa 8 on havainnollis-tettu rajapinnassa esiintyvät voimat. Kuvassa esitetään puun taipumus kuper-tua, joka aiheuttaa liimasaumaan vetoa ja puristusta. Kupertuminen aiheuttaa liimasaumaan puristusta keskelle ja vetoa ulkoreunoille pystysuunnassa. Sivu-

suunnassa puun pintaan kohdistuu puristusta, kun liima estää puuta turpoamasta ja liimaan kohdistuu vetoa, kun puu pyrkii turpoamaan. /29, s. 604–606./



Kuva 8. Liimasaumaan kohdistuvat voimat pysty ja sivusuunnassa /29, s. 606/

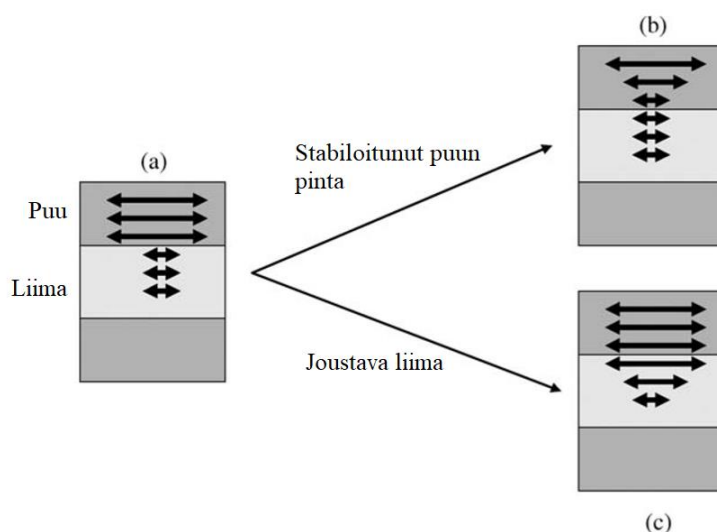
Ristiinliimatun puuelementin tapauksessa ulommaisii kerroksiin syntyy vetojännitystä, kun puu kuivuu ja kutistuu syitä vastaan kohtisuorasti ja alempi ristiinliimattu kerros rajoittaa ulommaisien kerroksen muodonmuutosta. Kun vetojännitys ylittyy, syntyy ulommaisille kerroksille halkeamia lamellien välille tai reunaliimattuun liimasaumaan. Puun turvotessa ristiinliimauksesta johtuva eroava kosteuskäyttäytyminen aiheuttaa liimasauman suuntaisesti suuria jännityksiä.

3.3.3 Liiman vaikutus delaminointiin

Puun liimaamiseen käytettävät liimat voidaan jakaa kahteen erilliseen ryhmään, in situ -polymeroituneisiin (in situ polymerized) ja pre-polymeroituneisiin (pre-polymerized) niiden polymeerisen morfologian, puusolujen vuorovaikutuksen ja mekaanisten ominaisuuksien perusteella. Näiden kahden eri ryhmän liimat ovat eri tavalla vuorovaikutuksessa puun kanssa, ja niiden muodostamat liimasaumat reagoivat eri tavalla rasitusten aiheuttamiin muodonmuutoksiin puussa. /29, s. 607–609./

In situ -polymeroituneet liimat ovat kovia ja jäykkiä aromaattisen luonteen sekä korkean ristosilloittumisasteen johdosta, minkä vuoksi niiden muodon

muutoskyky on rajoittunut, joka voi johtaa suuriin jännityksiin puun ja liiman rajapinnalle puun turvotessa ja kutistuessa. Kuitenkin jäykät liimat, kuten yleisesti käytetty puuliima PRF, ovat kestäviä, koska fenoliliimoilla on kyky tunkeutua puun soluseinämiin ja rajoittaa niiden turpoamista. Liiman molekyyli-paino vaikuttaa liiman kykyyn tunkeutua soluseinämiin. Pienen molekyyli-painon omaavat in situ -liimat tunkeutuvat soluseinämiin parhaiten. Soluseinämiin tunkeutunut liima estää puun turpoamista puun ja liiman rajapinnalla, jolloin suuret jännitykset siirtyvät kauemmaksi rajapinnasta, joka lisää liimasauman vastustusta delaminointiin. Soluseinämiin tunkeutuneen liiman ja puun rajapinnan käyttäytyminen on havainnollistettu kuvassa 9(b). /29, s. 609–610./



Kuva 9. Rajapinnan jännitysten jakautuminen. Nuolet havainnollistavat jakautuneet jännitykset /29, s. 611/

Pre-polymeroituneet liimat eivät pysty tasoittamaan jännityksiä puun ja liiman rajapinnalla samalla tavalla kuin in situ -polymeroituneet liimat. Korkean molekyyli-painon vuoksi pre-polymeroituneet liimat eivät pysty tunkeutumaan puun soluseinämiin. Nämä liimat voivat kuitenkin tunkeutua puun soluonteloihin. Pre-polymeroituneet liimat ovat joustavia, minkä vuoksi ne voivat paikallisilla muodonmuutoksilla jakaa puun ja liiman rajapinnan jännitykset tasaisesti liimaan. Tämän ryhmän liimoihin kuuluu CLT:n valmistamiseen soveltuvat polyuretaani liimat ja EPI-liimat. Joustavan liiman käyttäytyminen puun ja liiman rajapinnassa on havainnollistettu kuvassa 9 (c-kohta). /29, s. 611–612./

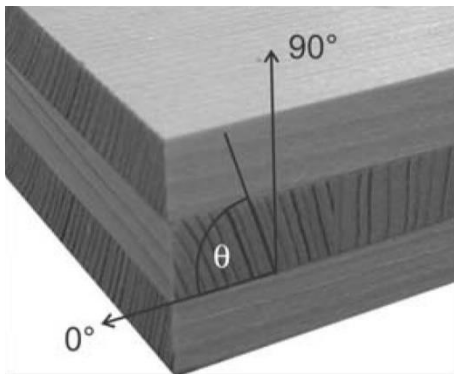
3.3.4 Kerrosasettelun vaikutus delaminointiin

Kirjallisuudesta ei löydy suoraa tutkimustietoa siitä, kuinka ristiinliimatun puuelementin kerrosten lamellien paksuuden vaihtelu vaikuttaa pintakerrosten syrjäliimatun liimasauman delaminointiin. Kosteusvaihtelun aiheuttamaa CLT:n halkeilu- ja jännityskäyttäytymistä sekä niiden vähentämistä eri keinoin on tutkittu laajemmin. Tutkimuksissa on harvemmin eritelty, mihin halkeamat syntyvät. Yleisesti on kuitenkin todettu, että syrjäliimaamattomissa CLT-levyissä halkeamat esiintyvät lamellien saumoissa ja syrjäliimatuissa kappaleissa halkeamat muodostuvat satunnaisemmin lamellien välille. Voidaan olettaa, että CLT-levyn pintojen halkeilutaipumusta vähentämällä voidaan vaikuttaa myös syrjäliimattujen liimasaumojen delaminointiin vähentävästi.

Knorz ym. /30/ ovat tutkineet kuudesta teollisesti tuotetun CLT:n liimauksen laatua standardin EN 16351 liitteen C mukaisella delaminointikokeella. Kokeessa tutkittiin lamellien kerrospaksuuden, kerrosten määrän, puristuspuheen sekä koekappaleen muodon vaikutusta delaminointikäyttäytymiseen. Kokeissa ei otettu kantaa syrjäliimatun liimasauman kestävytyteen, koska se ei sisälly standardin mukaiseen delaminointikokeeseen. Kokeissa käytettiin kappaleita, jotka muodostuivat kokonaan 20 mm tai 40 mm paksuisista lamelleista ja kolmesta tai seitsemästä kerroksesta. Tutkimuksessa todettiin, että puristuspuhalla tai kerrosten paksuudella ei ollut vaikutusta delaminointituloksiin. Kerrosten määrän lisääntyessä vastustus delaminointiin laski. Testattavan koekappaleen muoto vaikutti myös olennaisesti delaminointituloksiin. Standardin EN 16351 mukaan koekappale voi olla pyöreä tai neliö. Pyöreiden koekappaleiden delaminointi oli huomattavasti vähäisempää verrattuna neliön muotoisiin koekappaleisiin. Tutkimuksessa esitettiin parannuksia standardin testausmenetelmiin.

Gereke ja Niemz /31/ ovat tutkineet kosteuden aiheuttamia rasituksia kuudesta valmistetuissa kolmikerroksisissa CLT-levyissä ja mahdollisia tapoja niiden pienentämiseen. Kosteuden aiheuttamat rasitukset saavat aikaan halkeamia pintakerroksissa, jotka esiintyvät myös syrjäliimatuissa liimasaumoissa. Tutkimuksessa todettiin, että lamellien syykuvion kulmalla (kuva 10) ja ulommaisissa kerroksissa esijännittämällä voidaan vaikuttaa halkeamien

syntyyn. Syykuvion kulman ollessa noin 45 astetta kosteuden aiheuttamat rasiushalkeamat pintalamelleissa ja levyn vääntyily ovat vähäistä. Toisaalta syykuvion ollessa 45 astetta levyn staattiset ominaisuudet heikkenivät jäykkyyden osalta. Syykuvion ollessa 90 astetta, eli pystysuorassa, rasiukset ja vääristymät ovat kohtuullisia ja jäykkyys on suuri, minkä vuoksi 90 asteen syykuvio on suositeltavin. 0 asteen syykuviota eli vaakasuoraa syysuuntaa ei suositella, koska suuri turpoaminen sekä alhainen jäykkyys ja lujuus tangentin suunnassa lisäävät jännityksiä ja taipumusta pinnanhalkeiluun.



Kuva 10. Lamellin syykuvion suunta /32, s. 342/

Gereke ja Niemz /31/ tutkivat teoksessaan myös esijännitettyjen pintakerrosten vaikutusta halkeamien syntymiseen. Pintakerrokseen saatiin aikaan esijännitys kahdella eri menetelmällä, mekaanisesti syrjäpuristamalla pintakerrosta liimauksen aikana ja valmistamalla CLT-levyn pintakerrokset keskimmäistä kerrosta kuivemmasta puutavarasta. Esijännitetyillä kerroksilla oli huomattavasti pienempi taipumus halkeiluun ja vääristymiin, koska kerrosten välillä oleva puristava jännitys pintalamellien syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa vähensi vetojännityksiä puun kuivuessa. Myös CLT-levyt, jotka olivat valmistettu puutavarasta, joka oli tasaannutettu lähellä käyttökohteen olosuhteita, halkeili vain vähäisesti. Gereke ym. /32/ ovat myös aiemmin tutkineet kosteuden aiheuttamaa vääntymistä ja vääristymistä kolmekerroksisilla kuusesta valmistetuilla CLT-levyillä. Vääntyilyyn vaikutti aiemmin mainitun syykuvion kulman lisäksi myös pintakerrosten paksuus. Vääntyilyn havaittiin olevan pientä, kun pintakerrosten yhteenlasketun paksuuden suhde koko levyn paksuuteen oli mahdollisimman pieni.

Nairn /33/ on tutkinut CLT:n halkeilukäyttäytymistä numeerisesti analysoimalla murtumismekaniikan avulla. Tutkimuksessa päädytään samanlaisiin suosituksiin halkeilun vähentämiseksi kuin aiemmin läpi käydyissä tutkimuksissa. Tulosten perusteella suositellaan käyttämään ohuita kerroksia kuivaamalla puutavara riittävästi, syrjäliimaamaan reunat (ainoastaan jos käytetään ohuita kuivattuja kerroksia) sekä optimoimalla syykuvio. Esijännitettyjen pintakerrosten todettiin olevan mahdollinen keino pinnalla esiintyvien halkeamien ehkäisyyn, mutta jännittyneet pintakerrokset aiheuttavat vetojännityksiä sisimmille kerroksille. Vetojännitysten aiheuttamat halkeamat sisimmissä kerroksissa alentaisivat CLT-levyn mekaanisia ominaisuuksia.

Jansson /34/ on diplomityössään tutkinut CLT-rakennuskomponentin halkeilun hallintaa urittamalla. Koemateriaalina toimi Stora Enson CLT100-levy, joka oli viisikerroksinen ja lamellipaksuudeltaan 20 mm. Kokeessa testattiin kolmen erilaisen uritusmuodon (suora ura, vino ura ja pyöreä ura) työstämistä levyn pintaan ja niiden vaikutusta pinnan halkeilukäyttäytymiseen. Koekappaleille tehtiin kolme tasaannutus-kuivatussykliä. Pintakerroksen syrjäliimatun liimasauman kohdalle työstetty vino ura toimi testauksissa parhaiten poistaen näkyvät halkeamat lähes kokonaan. Syyksi vinon uran toimivuuteen esitetään vinon uran aikaan saama parempaa syykuvion jatkuvuutta lamellien välillä, joka vähentää vetojännityksiä liimasauman alueella. Mahdolliset halkeamat muodostuivat uran pohjalle, joka hankaloittaa halkeamien havaitsemista.

Tässä kappaleessa esitetyt aikaisemmat tutkimukset keskittyvät jännityksiin, muodonmuutoksiin ja halkeamiin, joita muodostuu ristiinliimatuille puuelementeille kosteusvaihtelun, tilavuuden muutoksen ja puun ortotrooppisuuden vuoksi. Tutkimuksissa esitettiin ja testattiin vaihtoehtoja, joilla ei-toivottuja jännityksiä ja halkeamia voitaisiin vähentää tai kokonaan ehkäistä. Tutkimuksissa ei ollut suoraa viittausta pintakerrosten liimasaumojen delaminoinnin vähentämiseen, mutta vaikuttamalla pintakerrosten halkeilutaipumukseen, joka johtuu pintalamellien vetojännityksistä, voidaan vaikuttaa myös liimasaumojen kestävyteen. Tehokkaimmat tavat halkeamien vähentämiseen on syykuvion optimointi, riittävästi kuivatut kerrokset, esijännitetyt pintakerrokset sekä pintakerrosten uritus. Pintakerrosten paksuuden vaikutuksesta pintakerrosten halkeiluun tai liimasauman delaminointiin ei ollut suoraa vastausta. Kerrosten eri

paksuus ei vaikuttanut lapeliimattujen liimasaumojen delaminointiin. Ohuempien pintakerrosten käyttöä suositeltiin kosteuden aiheuttaman levyjen vääntäilyyn vähentämiseksi. Tuotannollisesti on helpointa vaikuttaa kerrosten paksuuteen. Syykuvion optimointi, kerrosten esijännittäminen tai erillinen kuivaus lisäävät välivaiheita ja kustannuksia tuotantoon ja näin ollen nostavat valmiiden CLT-levyjen hintaa.

4 CLT-RAKENTEEN RAKENNUSFYSIKAALINEN TOIMIVUUS

Kemin Digipolis Oy ja Lapin ammattikorkeakoulu ovat toteuttaneet CLT-koetalo hankkeen 1.4.2013–30.4.2015, jonka aikana tutkittiin ja testattiin CLT-rakentamista ja toimivuutta arktisella alueella. Hankkeessa suunniteltiin ja toteutettiin rakennusmääräykset täyttävä CLT-runkoinen pientalo. Talolle toteutettiin rakennusfysikaaliset mittaukset, joissa tutkittiin koetalon vaipparakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Koetalon rakenteissa oli 48 mittausanturia, joilla mitattiin lämpötilaa ja suhteellista kosteutta. Tutkimuksesta julkaistiin vuoden 2014 aikana neljä analysointiraporttia, jotka sisälsivät analysoinnin ja tulokset kolmen kuukauden pituisilta mittausjaksoilta. /35, s. 7–11./

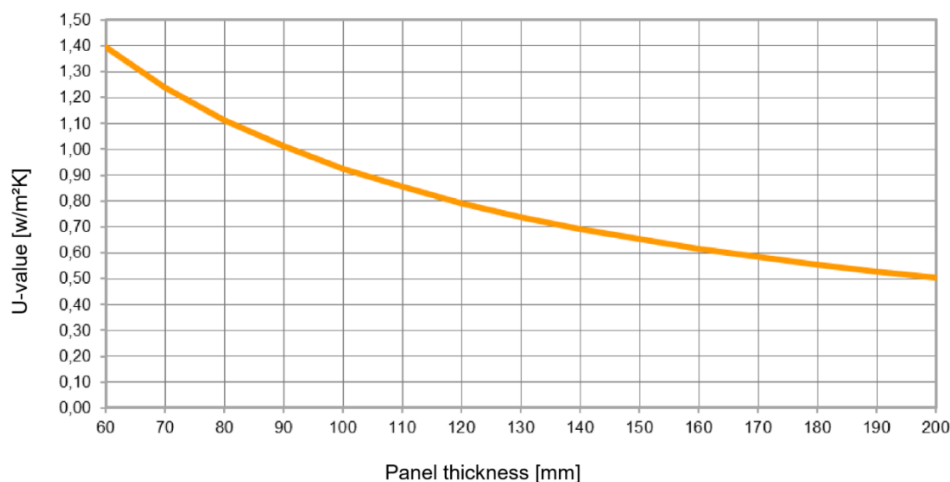
Tutkimuksessa varmistettiin CLT:n rakennusfysikaalinen toimivuus Suomen olosuhteissa. Hankkeessa tutkittiin myös sitä, miten ilmansuunta, julkisivun väri ja eristemateriaali vaikuttavat koetalon lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. CLT-koetalon vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta todettiin mittausten perusteella hyväksi. CLT-levyn todettiin toimivan rakenteessa höyrysulkuina kosteus mittausten perusteella. Koetalon kaltaisissa CLT-rakenteissa ei mittausten perusteella tarvita erillistä ilman- ja höyrynsulkuja. Ilman suunnalla ja julkisivun värillä oli merkitystä seinärakenteen lämpötekniseen toimintaan etenkin kevät- ja kesäkuukausina. Ilmansuunnalla ja julkisivun värillä ei ollut huomattavaa merkitystä kosteustekniseen toimintaan. /36, s. 27./

4.1 Lämpötekniisyys

Ristiinliimatun puuelementin lämpötekniset ominaisuudet ovat normaalin, käsittelemättömän puun kaltaiset. Puulla on hyvä lämmönvaraamiskyky eli lämpökapasiteetti. Lämpökapasiteetti, eli terminen massa, kuvaa materiaalin kykyä luovuttaa ja sitoa lämpöä itseensä. Esimerkiksi tiili on 2/3 tiheämpää kuin

mänty, mutta lämpökapasiteetti on suunnilleen sama männyn kanssa. Hyvän lämpökapasiteetin ansiosta ristiinliimattu puuelementti toimii jo sellaisenaan melko hyvänä ulkoseinärakenteena. Puuaineksen huokoisuudesta johtuen puun lämmönjohtavuus on heikko. Lämmönjohtavuudella kuvataan materiaalin kykyä johtaa lämpöä. Eristävillä materiaaleilla lämmönjohtavuuden lukuarvo on pieni. Lämmönjohtavuuden (λ) yksikkö on watti kelviniä ja metriä kohti, W/mK. Tiheämmät puulajit johtavat lämpöä paremmin kuin huokoisemmat lajit. Puun lämmönjohtavuutta lisää myös puun kosteuden lisääntyminen. Puun lämmönjohtavuus syiden suunnassa on noin kaksinkertainen verrattuna syitä vastaan kohtisuorassa olevaan lämmönjohtavuuteen. Esimerkiksi männyllä lämmönjohtavuus syitä vastaan on 0,14 W/mK ja syiden suunnassa 0,22 W/mK. 12 % kosteuspitoisuuden omaavan CLT-elementin lämmönjohtavuus on välillä 0,11-1,13 W/mK. Ruotsin teknillinen tutkimuslaitos sekä Itävallan standardi ÖNORM EN 12524 ovat vahvistaneet CLT:n lämmönjohtavuuden arvoksi 0,11 W/mK. /37; 38, s. 1; 35, s. 12./

Rakennuksen ulkoseinälle on määritetty vertailuarvot eri rakennustyyppien lämmönläpäisykerroimelle eli U-arvolle Suomen rakentamismääräyksissä. ”Lämmönläpäisykerroin kuvaa lämpövirran tiheyttä, joka jatkuvuustilassa läpäisee rakennusosan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien tilojen välillä on yksikön suuruinen” /39, s. 3/. Lämmönläpäisykerroimen yksikönä käytetään watti kelviniä ja neliometriä kohti, W/m²K.



Kuva 11. CLT-levyn U-arvo levyn paksuuden funktiona 200 mm:iin asti /38, s.2/

Vuoden 2018 alussa voimaan tulleessa uudessa rakennusten energiatehokkuusasetuksessa on annettu helpotuksia massiivipuurakentamiselle. Aikaisemmin vähintään 180 mm paksulle hirsiseinälle sallittu U-arvo 0,40 W/m²K on uusissa määräyksissä laajennettu koskemaan massiivipuuta. Aikaisemmin CLT:n U-arvona käytettiin seinille määritettyä arvoa 0,17 W/m²K. Todellisuudessa 180 mm paksuisen CLT:n U-arvo on 0,57, joka on korkeampi kuin vertailuarvo 0,4. 180 mm:n paksuinen eristämätön CLT-elementti kuitenkin läpäisee energiamääräykset, jos tiiveyttä tai ilmanvaihtoa parannetaan. CLT-elementti täyttää nykyisten määräysten asettaman U-arvon 260 mm:n paksuisena ilman lisäeristystä. Loma-asunnoissa vähintään 130 mm:n paksulle massiivipuulle käytetään vertailuarvona 0,80 W/m²K. 130 mm:n CLT-elementti läpäisee nämä vaatimukset sellaisenaan ilman lisäeristystä. Kuvassa 11 on esitetty CLT-levyn U-arvo levyn paksuuden funktiona. /40, s. 11–12; 41./

4.2 Kosteusteknisyys

Puumateriaali on hygroskooppista eli vettä imevää. Käyttämällä puuainesta rakennuksen lämmöneristeenä voidaan tasata kosteuden kulkua rakenteissa, koska puulla on kyky sitoa ja luovuttaa kosteutta. Puun kosteuspitoisuus vaikuttaa puun mekaanisiin ominaisuuksiin. Puun puristus-, taivutus- ja vetolujuus ovat suurimmillaan puun kuivuessa tuoreesta 6–12 %:n kosteuteen. Puutavaran kosteuspitoisuus on riippuvainen lämpötilasta ja ilman suhteellisesta kosteudesta. Ilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 80–90 %:n alle 40 °C asteen lämpöiloissa on puun kosteus tällöin yli 20 %, jolloin puu alkaa vaurioitua, jos kosteus pysyy pitkiä aikoja tällä tasolla. Puu alkaa homehtua yli 80 %:n ilmankosteudessa ja lahota yli 90 %:n ilmankosteudessa, jos olosuhteet pysyvät pitkään muuttumattomina sekä lämpötila 0 ja 40 °C asteen välillä. Home ei vaikuta puun lujuusominaisuuksiin, koska se ei pysty tunkeutumaan puun pintaa syvemmälle. /23./

Rakennuksen CLT-runko toimii höyrysulkuuna, jota voidaan pitää kosteusteknisen toimivuuden kannalta CLT-rakenteen tärkeimpänä tekijänä. Yhtenäisellä ja massiivisella CLT-elementillä höyrynsulku voidaan toteuttaa varmemmin verrattuna muihin rakennusvaihtoehtoihin. Höyrynsululla tarkoitetaan ainekerrosta, joka pääasiallisesti estää haitallisen vesihöyryn diffuusion rakenteeseen

tai rakenteessa. Vesihöyryn diffuusiolla tarkoitetaan kaasuseoksessa vakio-paineessa tapahtuvaa vesimolekyylien liikettä, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksen höyrypitoisuutta tai höyryn osapaine-eroja. Rakenteissa diffuusiota aiheuttaa sisä- ja ulkoilman välinen vesihöyrypitoisuuksien ero. Kaasumolekyylit liikkuvat suuremmasta pitoisuudesta pienempään pitoisuuteen, yleisesti lämpimästä tilasta kylmempään päin. Höyrysulkuun toimiva vesihöyrytiivis kerros estää vesihöyryn liiallisen tunkeutumisen seinärakenteisiin ja siitä aiheutuvat mahdolliset kosteusvauriot. /35, s. 16; 36, s. 5–6./

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) on tutkinut laskennallisella simuloinnilla ristiinliimatuista puuelementeistä valmistettujen seinärakenteiden kosteusteknistä toimivuutta Suomen ilmastossa. Tutkimuksessa tarkasteltiin 95, 145 ja 245 mm:n paksuisia ristiinliimattuja puuelementtejä. Elementtien ulkopuolelle oli liitetty 12 mm paksu tuulensuoja sekä lämmöneriste, jonka paksuus oli määritetty seinärakenteen tavoite U-arvon 0,17 W/m²K mukaan. Tarkastelussa ei otettu huomioon liimasaumojen vaikutusta, joka lisäsi tarkastelun varmuutta, koska liimasaumat lisäävät kerrosten vesihöyryn vastusta. Tarkastelussa ei esiintynyt riskiä homeen kasvulle. CLT-rakenne todettiin kesä-kondenssiriskin oloissa kosteusteknisesti toimintavarmemmaksi kuin betonikuorirakenne tai höyrysulullinen puurunkoseinä. Tarkastelussa todettiin ristiinliimattujen rakenteiden kosteusteknisen toimintavarmuuden Suomen ilmastossa olevan hyvä tai osittain parempi kuin perinteisten höyrysulullisten puurakenteiden. /42, s. 16–18./

Homeen kasvun mahdollisuutta on tutkittu myös CLT-koetaloprojektissa hyödyntämällä VTT:n kehittämää homeen kasvun laskentamallia. Laskentamallilla pystytään arvioimaan homeen kasvun riskiä erilaisten rakennusmateriaalien pinnalla vaihtuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa sekä selvittämään, kuinka kauan ja miten paljon rakenteet ja materiaalit sietävät kosteutta ennen homeen kasvun alkamista. CLT-koetaloprojektin aikana mitatut lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot syötettiin homeindeksilaskuriin. Homeindeksin maksimiarvot pysyivät kaikilla mittaussektoreilla erittäin pieninä. Tutkimuksen tuloksena voitiin todeta, että homehtumisen vaaraa ei ilmennyt CLT-koetalon rakenteissa. /35, s. 20./

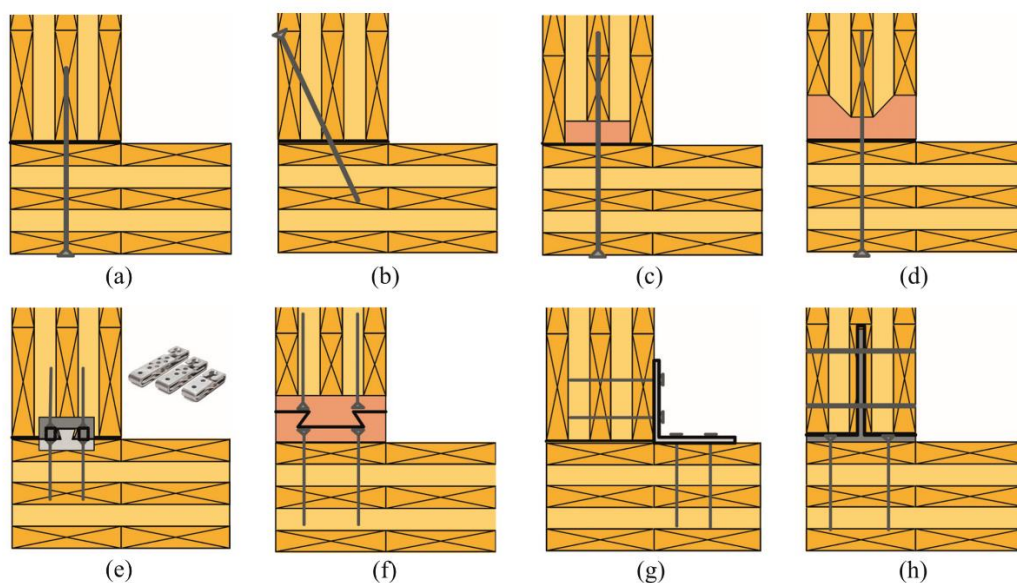
5 RISTIINLIIMATTUJEN PUUELEMENTTIEN LIITTÄMINEN

Ristiinliimattujen puuelementtien korkean jäykkyyden ja kuorman kantokyvyn johdosta CLT:stä rakennettujen puisten runkorakenteiden toimintakyky määrytyy rakenteissa käytettävistä liitoksista. Liitosten aiheuttamat epäjatkuvuus kohdat sekä epäasianmukainen liitosten suunnittelu voi johtaa rakennuksen lujuuden ja jäykkyyden heikkenemiseen. Liitoksia tehdään seinän ja seinäelementtien, lattian ja lattiaelementtien, seinän ja lattiaelementtien sekä seinäelementtien ja perustusten välille. Liitostavan valintaan ja suunnitteluun vaikuttaa olennaisesti, minkä elementtien välille liitosta ollaan tekemässä. Tässä työssä keskitytään tarkemmin kahden seinäelementin välisiin nurkkaliitoksiin. /43, s. 3; 16, s. 346./

CLT:n liittämiseen on tarjolla monenlaisia liitosratkaisuja. Yleisesti käytetään metallisia kiinnittimiä ja kannattimia yhdessä mekaanisten ruuviliitosten kanssa. CLT:n liittämisessä suositetaan yleisesti pitkien, itseporautuvien ruuvien käyttöä elementtien välisissä liitoksissa tai kun liitetään erilaisia metallisia kiinnittimiä elementtiin. Liittämisessä käytetään myös perinteisiä kiinnittimiä, kuten puuruuveja, nautoja, lagruuveja, niittejä, pultteja ja tappeja. CLT-levyjen esikäsitteily ja työstäminen CNC-teknologialla mahdollistaa uudenlaisten ja innovatiivisten liittämiskäytösten nopean kehittämisen ja käyttöönoton. /43, s. 4; 16, s. 346./

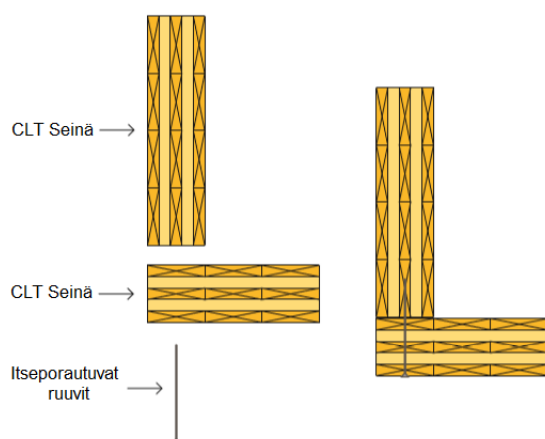
5.1 Perinteiset ja vaihtoehtoiset liitosratkaisut

Tässä kappaleessa käydään läpi jo olemassa olevia ratkaisuja CLT-seinäelementtien välisiin nurkkaliitoksiin. Liitosratkaisut on esitetty visuaalisesti, ja joitain ratkaisuja on selvennetty sanallisesti, jotta saadaan laaja käsitys valmiista ja mahdollisista liitostavoista. Yleisesti lähes kaikki markkinoilla olevat liitosratkaisut vaativat metallisten liitoselinten, ruuvien ja/tai pulttien käyttöä. Opinnäytetyön kannalta ollaan kiinnostuneita naulattomista ja ruuvittomista CLT-seinäliitoksista. Lähes kaikissa olemassa olevissa liitosratkaisuissa kiinnikkeet, nautat tai ruuvit jäävät näkyviin CLT:n pinnalle jommallekummalle tai molemmille puolille. Kuvassa 12 on esitetty perinteisiä käytössä olevia kulmaliitostapoja.



Kuva 12. (a) itseporautuvat ruuvit ulkopuolelta, (b) itseporautuvat ruuvit kulmassa, (c) piilotettu puuprofiili, (d) reunaan suojaava puuprofiili, (e) ripustinliitin, (f) lohenvyöstiöliitos puisilla tai metallisilla profiileilla, (g) kulmarauta, (h) piilotettu palkinkannatin /43, s. 11–15; 44, s. 13/

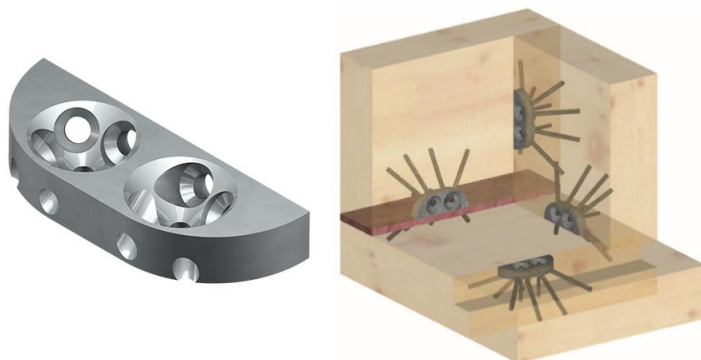
Itseporautuvat ruuvit tarjoavat yksinkertaisimman tavan liittää kaksi seinäelementtiä toisiinsa. Suoraliitos seinän kapeaan sivuun voi aiheuttaa ongelmia, jos ruuvi porautuu suoraan poikittaisen lamellin pätyyn. Tämä liitostapa ei sovellu välttämättä suurille tuuli- ja maanjäristyskuormille. Liitoksen kestävyyttä voidaan parantaa poraamalla ruuvit pienessä kulmassa, jolloin vältytään ruuvien suoralta porautumiselta seinänä kapeampaan sivuun. Kuvassa 13 on esitetty yksinkertainen ruuviliitos. /43, s. 10./



Kuva 13. Itseporautuvan ruuvien ruuvaaminen ulkopuolelta /43, s. 11/

Standardoitujen puuliitinjärjestelmien valmistukseen ja kehittämiseen erikoistunut SHERPA Connection Systems on kehittänyt universaalin ratkaisun CLT-elementtien liittämiseen. Liitin soveltuu nurkkaliitosten lisäksi lähes jokaiseen

elementtien väliseen liitostapaukseen. Kiinnike asennetaan elementtiin jyrkistyyn hahloon. Elementit liittyvät toisiinsa 45 asteen kulmaan ruuvatuilla kiinnitysruuveilla. Kiinnike ja liitostavat on havainnollistettu kuvassa 14. /45./



Kuva 14. SHERPA CLT-liitin /45/

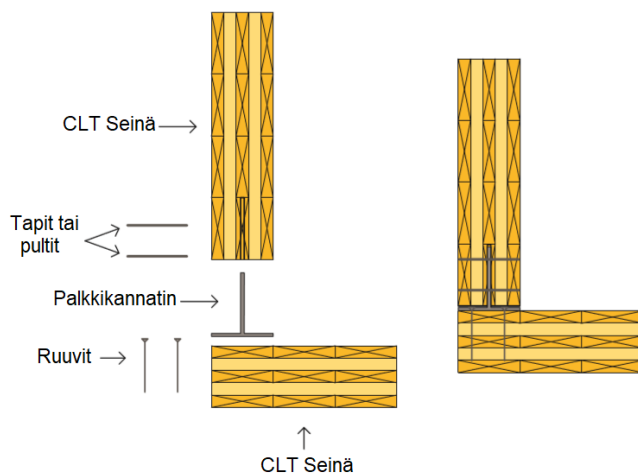
TeknoWoodin kehittämällä Fix CLT Fitting -kiinnitysjärjestelmällä nurkkaliitos tehdään ankkuroimalla kierretanko toisessa seinässä olevaan vastakappaleeseen. Kiinnitysjärjestelmällä saadaan aikaiseksi tiivis liitos elementtien välille. Kiinnitysjärjestelmä tarjoaa kestävä ja lujan ratkaisun nurkkien liittämiseen. Kiinnike on havainnollistettu kuvassa 15. Samankaltaisen liitoksen voi myös toteuttaa liimaamalla kierretanko toisen seinän sisälle. /46./



Kuva 15. TeknoWood fix CLT fitting kiinnitysjärjestelmä /46/

Metalliset levyt ja palkinkannattimet voidaan piilottaa CLT-levyjen sisälle, joka vaatii etukäteen tehdyt tarkat CNC-koneistukset. Piilotetut kannattimet ovat paloturvallisempia verrattuna CLT:n ulkopuolelle jääviin levyihin ja kannattimiin. Palkinkannatin kiinnitetään ruuveilla seinään ja liitettävä seinä kiinnite-

tään kannattimeen itseporautuvilla vaarnaruuveilla tai tapeilla. Tiivistämättömällä liitoksella ei saavuteta riittävää ilmatiiveyttä. Kiinnitystapa on esitetty kuvassa 16. /43, s. 15; 47, s. 2./



Kuva 16. Piilotettu palkkikannatin /43, s.15/

Puurakenteiden kiinnitysjärjestelmien valmistaja Rothoblaas on kehittänyt X-Rad kiinnitysmenetelmän. CLT-elementin kulmiin työstetään viisteet, joihin metalliset kiinnikkeet asennetaan ruuveilla. Kiinnikkeet voidaan liittää toisiin kiinnikkeisiin metallilevyillä ja pulteilla. Kiinnitysjärjestelmällä elementit voidaan liittää helposti myös perustuksiin. Kiinnike koostuu metallisesta kotelosta, jonka sisällä puinen ohjauspala, johon on esiporattu reiät. Liitoskohdat joudutaan eristämään jälkikäteen. Kiinnike ja kiinnitysjärjestelmä on esitetty kuvassa 17. /48./



Kuva 17. X-Rad CLT -kiinnitysjärjestelmä /48/

CLT:n nurkkaliitoksissa voidaan käyttää lohenpyrstöliitoksen kaltaisia metallisia kannattimia, kuten päätykiila kiinnikkeitä sekä ripustinliitintyyppisiä kiinnikkeitä. Useita uros-naarastyypisiä liitoksia voidaan suunnitella kestämään ta-sonsuuntaisia kuormia ja tasoa kohti kohdistuvia kuormia. Kuvassa 18 on esi-

tetty ETB-päätykiilakiinnike ja Knapp Walco -ripustinliitin. Kannattimet kiinnitetään seinän lyhyeen sivuun tai jiiriin ruuveilla. Useita kannattimia voidaan asentaa seinämän korkeussuunnassa tai käyttää yhtä jatkuvaa kannatinta. Päätykiilakiinnikkeellä voidaan saada aikaan tiivis liitos kiilautuvuuden ansiosta. Lohenpyrstön kaltaisissa liitoksissa tulee huomioida sopivat välykset ja toleranssit seinien asennuksen helpottamiseksi. /43, s. 14; 47, s. 3./



Kuva 18. ETB-päätykiilakiinnike vasemmalla /47, s. 2/ ja Knapp Walco -ripustinliitin oikealla /49/

Schilcher Trading & Engineering on kehittänyt CLT-seinäelementtien kiinnittämiseen ulospäin näkymättömän täysin metallisista liitoselimistä vapaan X-fix L-liitosratkaisun. X-fix L koostuu kahdesta lohenpyrstön muotoisesta, suipenevasta viilupuusta valmistetusta kiilasta. Liitettävien seinäelementtien päihin työstetään lohenpyrstön malliset urat. Puset kiilat asennetaan ylhäältä käsin ja vasaroidaan tiukasti paikoilleen. Liitos on nopea asentaa, ja liitoksesta tulee erittäin ilmatiivis. Koko seinän korkeuden kattavalla liitoksella on hyvät mekaaniset ominaisuudet. Liitos voi olla jopa kolme kertaa lujempi verrattuna perinteisiin puuruuviliitoksiin. Seinäelementteihin työstettävät urat vaativat tarkkaa CNC-jyrsintää. Puset kiilat ja liitostapa on esitetty kuvassa 19. /50; 44, s. 8./



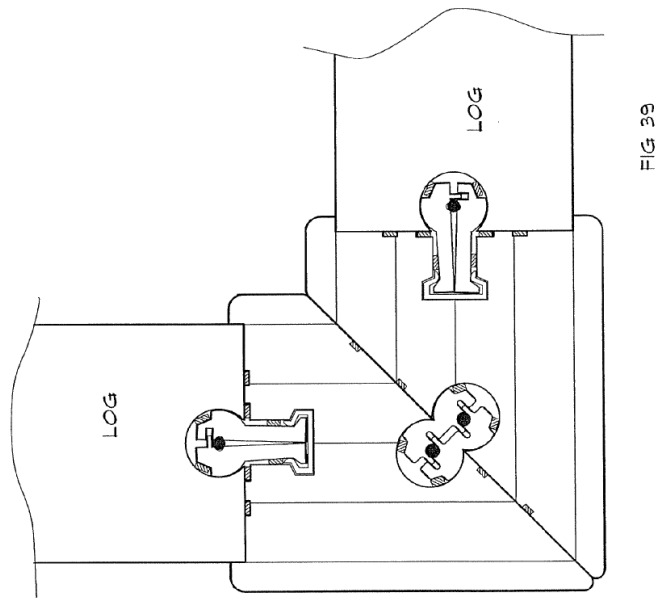
Kuva 19. X-fix L puinen kiilaliitos /50/

Puisten kiilojen tapaan voidaan seinämät, joihin on työstetty naaraslohenpyrstöt jiiriin, liittää yhdellä muotosulkeisella puisella soirolla, joka voi olla myös kii-lamainen. Kuvassa 20 on esitetty yksi tämän kaltainen liitos kahden hirren vä-lillä, mutta periaatetta voidaan soveltaa myös korkeammille hirsielementeille.



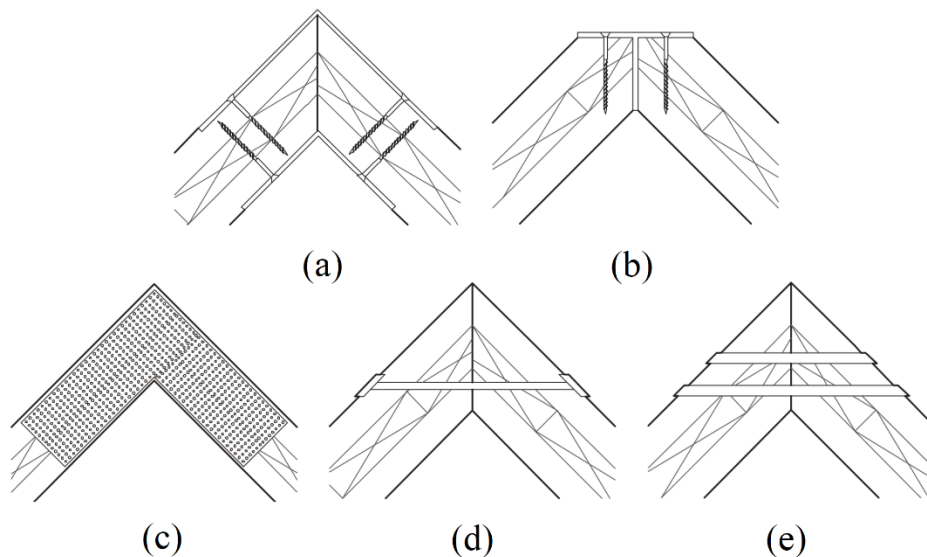
Kuva 20. Naaras-naaras-lohenpyrstöliitos /51/

True north log homes on patentoinut keyspline- ja buttspline-järjestelmät hirsien kiinnittämiseen toisiinsa. Tavalliset hirret voidaan kiinnittää painumatto-miin rakenteisiin sekä myös painumattomat rakenteet voidaan liittää toisiinsa. Polypropeenista valmistetut kiinnikkeet asetetaan porattuihin uriin, ja niiden väliin vasaroidaan naula, jolla kiinnikkeet saadaan kiristymään. Kuvassa 21 on esitetty järjestelmien mahdolliset kiinnitysratkaisut. Tämänkaltaista ratkaisua voidaan mahdollisesti hyödyntää myös korkeammille hirsille. /52/.



Kuva 21. Keyspline- ja buttspline-kiinnitysjärjestelmät /52, s. 45/

Perinteiset ja vaihtoehtoiset liitosratkaisut voidaan toteuttaa liittämällä seinän lyhyt sivu pidempään sivuun tai tekemällä jiiriliitos. Liitoksissa käytetään myös yleisesti puoliponttia kummassakin tai vain toisessa seinässä. Jiiriliitos on luonteva ratkaisu hirsiseinäelementtien liittämiseen, koska nurkkiin ei synny epäjatkuvuus kohtia, jotka vaikuttavat näkyvän nurkan esteettisyyteen.



Kuva 22. (a) jiiriliitos seinän sisä- ja ulkopuolisilla kulmarauodoilla, (b) jiiriliitos metallisella T-palkilla, (c) naulalevyt, (d) pultattu jiiriliitos, (e) jiiriliitos liimatuilla tangoilla /53, s. 28–29/

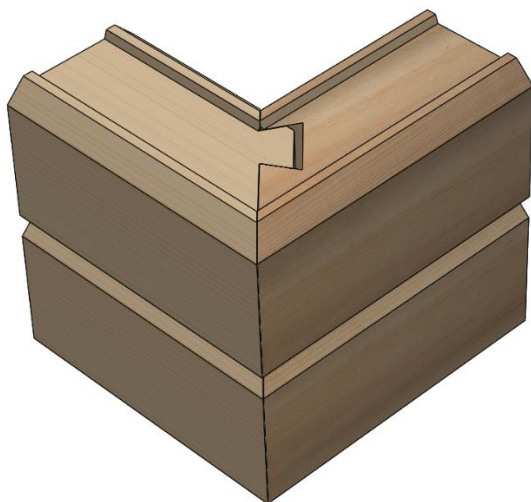
Kuvassa 22 on esitetty jiiriliitosratkaisuja, jotka eivät kuitenkaan ole ihanteellisia hirsien liittämiseen. Kaikkia aikaisemmin esiteltyjä liitosratkaisuja voidaan soveltaa myös jiiriliitoksissa.

5.2 Kehiteltävät liitosratkaisut

Kehiteltävässä liitosratkaisussa tärkeintä on helppo asennettavuus ja liitoksen toteuttaminen siten, että liitettävien elementtien pinnalle ei jää näkyviin liitoselimiä. Liitoksen toteuttamiseen käytettävä esivalmistus ja CNC-jyrsintä on hyvä pitää mahdollisimman yksinkertaisena, nopeana ja helppona toteuttaa. Liitoksessa tulisi hyödyntää ja kehittää valmiita ratkaisuja.

CLT toimii nykyään usein vain talon runkorakenteena, joka verhoillaan jälkikäteen. Puupinta jätetään näkyväksi vain talon sisätiloissa, jolloin elementtien liittäminen on helppo suorittaa perinteisillä menetelmillä, jossa kiinnikkeet ja ruuvit kannat jäävät verhoiltavalle ulkopinnalle. Aikaisemmin päästäkseen Suomen rakentamismääräysten määrittelemään lämmönläpäisykertoimen arvoon piti CLT-elementit eristää, jolloin CLT:n ulkopinta jäi piiloon vaipparakenteeseen. Nykyään CLT:tä koskee samantyyppiset helpotukset kuin hirsirakentamista, mutta päästäkseen energiatehokkaisiin rakennusratkaisuihin on CLT-runkorakenne kuitenkin järkevä eristää ja verhoilla ulkopuolelta. Tämä tarjoaa kuitenkin mahdollisuuksia lomarakentamiseen ja perinteiseen hirsirakentamiseen, jossa seinärakenteina pelkän CLT:n käyttö olisi perusteltua.

Varsinkin suurten painumattomien, hirsiseinää muistuttavien elementtien liittäminen vaatii ratkaisun, jossa elementtien päädyt ovat piilossa ja seinämien pintaan ei jää näkyviä liitoselimiä. Yksittäisten hirsien ja painumattomien hirsien nurkkien liittämiseksi on käytetty perinteisiä nurkkatyyppisiä, kuten ristinurkkia. Hirsitalojen rakentaminen kaupunkiympäristöön vaatii tasaisen nurkan, koska ristinurkkia ei yleisesti sallita. Hirret voidaan kasata päällekkäin siten, että hirret nousevat tasaisesti ilman perinteistä hirsilimitystä. Hirret ovat tällöin usein liitetty toisiinsa jirissä olevalla lohenpyrstöliitoksella, kuten kuvassa 23. Lyhytnurkka tai tasanurkka voidaan toteuttaa myös vuorottain nousevalla lohenpyrstö/tirolin-nurkalla, hammas/haka/lukkonurkalla tai tappinurkalla. Suurten yli metrin korkuisten hirsielementtien vuorottainen liittäminen tai liittäminen jirissä olevalla lohenpyrstöllä ei välttämättä onnistu ongelmitta. Yksi järkevin olemassa oleva ratkaisu hirsielementtien liittämiseen olisi X-fix L-puukiilaliitoksen tapainen menetelmä. /18, s. 4./



Kuva 23. Nollanurkka jiirissä olevalla lohenpyrstöliitoksella

Uudet kehiteltävät liitosratkaisut on jätetty luonnostelun tasolle, ja eri ratkaisujen arviointi on jätetty avonaiseksi. Liitosratkaisujen lopullinen kehittäminen ja testaaminen on jätetty tämän opinnäytetyön ulkopuolelle. Tarkoituksena on luoda uusia ideoita ja näkökulmia hirsitalovalmistajille. Taulukkoon 1 on listattu vaatimuksia, joiden mukaan uusia liitosratkaisuja on lähdetty kehittelemään ja luonnostelemaan.

Taulukko 1. Vaatimukset nurkkaliitokselle

Geometria	Yksinkertainen, soveltuu matalille ja korkeille hirsille	Liian innovatiivisia muotoja tulisi välttää	Sovellettava ja kehitettävä valmiita ratkaisuja
Valmistus	Mahdollisimman helppo, nopea ja yksinkertainen	Valmistus mahdollista olemassa olevilla laitteilla	Mahdollisuus erikokoisiin liitoksiin
Työstöt	Saatavissa olevien työkalujen hyödyntäminen	Erikoistyökalujen välttäminen	Vähäiset työkalun vaihdot
Kustannukset	Kustannustehokas		
Liittäminen/asennus	Seinien yhteen tuominen useasta kulmasta	Vähän liitoselimiä, näkyvämmässä	Nopea ja yksinkertainen, vähän tarvittavia työkaluja
Materiaalit/tarvikkeet	Helposti saatavilla	Standardi materiaalien ja tarvikkeiden käyttö	

Kehiteltäviä liitosratkaisuja on luonnosteltu taulukossa 2. Ratkaisuvaihtoehdot on numeroitu 1-5. Kaikki kehitellyt liitosratkaisut voidaan työstää jiiriin, hirren pätyyn tai käyttää pystypalkkia/pilaria nurkkakappaleena. Kahden hirren mahdolliset yhteensaattamisvaihtoehdot on aakkostettu a-e.

Taulukko 2. Kehitetyjä liitosratkaisuja

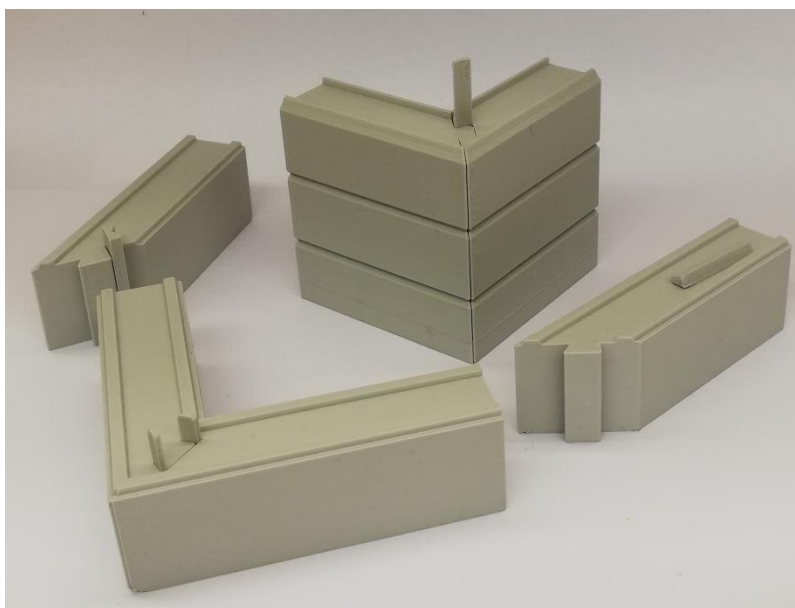
Ratkaisut	1	2	3	4	5
Vaihtoehdot					
	a	b	c	d	e
Yhdistettävyyden					
Yhdistettävyyden	3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4	1,2,3,4,5

Ratkaisuvaihtoehdossa 1 liitos on perinteisen lohenpyrstöliitoksen kaltainen. Lohenpyrstön urospan puoli on naaraspuolta kapeampi, jolloin liitos voidaan tuoda yhteen muutenkin kuin ylhäältäpäin pujottamalla. Liitoksen yhteen saattaminen ei onnistu kohtisuorasti, jos liitos on työstetty jiriin. Liitos lukitaan paikalle kahdella kiilalla, jotka pujotetaan liitoksen molemmille puolille. Kiiloilla on mahdollista keskittää liitosta.

Ratkaisuvaihtoehdot 2 ja 3 ovat samankaltaisia vaihtoehdot yhden kanssa. Vaihtoehdossa 2 on vain yksi kiila kahden sijasta, mutta ratkaisu voidaan toteuttaa myös kahdella kiilalla. Liitoksessa on vähemmän liitoseliä, mutta vaatii tarkempaa työstöä kuin vaihtoehto yksi. Liitoksen yhdistettävyyden on samanlainen kuin vaihtoehdolla 1. Vaihtoehto 3:ssa lohenpyrstöön on tehty viisteet naaras- ja urospan puolelle, joka mahdollistaa liitoksen yhteen tuomisen myös kohtisuorasti, kun liitos on jirissä.

Ratkaisuvaihtoehdossa 4 hirret liitetään toisiinsa I-palkin kaltaisella kiinnikkeellä, joka kiristetään paikalleen toiselta puolelta laippojen alle laitettavilla kiiloilla. Hirsiiin jysyttävät T:n muotoiset urat vaativat tarkkaa työstöä. Liitoksen kiinnittämiseen vaaditaan paljon liitoseliä. Liitoksen yhdistettävyydellä ei ole rajoituksia.

Ratkaisuvaihtoehdossa 5 on korkeaan hirsielementtiin työstetty kaksi suippenevaa lohenpyrstöä. Kahdella lohenpyrstöllä elementtiä ei tarvitse pujottaa kiinni toiseen elementtiin niin korkealta, mutta liittämässä voi olla hankaluksia, koska elementit on tuotava yhteen tietyllä korkeusvälillä ennen pujottamista. Perinteinen suippeneva lohenpyrstö voisi toimia myös hyvin, koska sillä saadaan aikaiseksi tiivis liitos.



Kuva 24. 3D-tulostetut mallikappaleet luonnostelluista liitoksista

Luonnostelluista jiiiriin työstettävistä lohenpyrstö kiilaliitoksista 3D-tulostettiin pienet mallikappaleet (kuva 24). Fyysiset mallikappaleet helpottavat liitosratkaisuiden hahmottamista ja niiden toteutettavuuden arviointia.

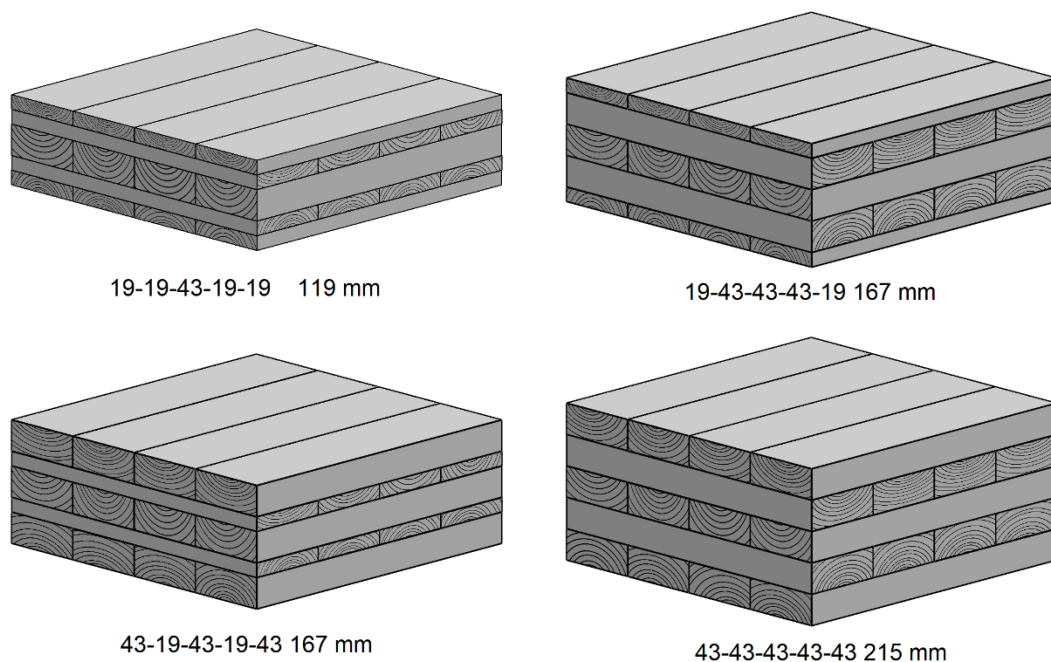
6 TUTKIMUSMETODIT

Opinnäytetyön kokeellisessa osuudessa tutkitaan ristiinliimattujen puuelementtien pintakerrosten syrjäliimatun liimasauman kestävyyttä erilaisten koekappaleiden avulla. Kokeet suoritettiin mukailien standardin EN 16351 liitteen C mukaista delaminointikoetta, joka on tarkoitettu CLT-levyjen liimasaumojen kestävyuden arviointiin. Delaminointikoe valittiin, koska se on nopea suorittaa ja se antaa selkeät ohjeet delaminoinnin arvioimiseen. Tässä kappaleessa käydään läpi koekappaleiden valmistuksen vaiheet, käytetty laitteisto, käytännön koe ja mittausjärjestelyt sekä tulosten käsittely.

6.1 Koekappaleiden valmistus ja laitteisto

Koekappaleet valmistettiin kahdessa eri vaiheessa kahdessa eri kohteessa. Ensiksi valmistettiin liimapuulevyt, jotka liimattiin ristikkäin päällekkäin ja puristettiin valmiiksi CLT-levyksi. Liimapuulevyt valmistettiin Makronin Hollolan konepajalla prototyypikitkapuristimella. Valmiit liimapuulevyt puristettiin valmiiksi CLT-levyksi Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Mikkelin kampuksen puulaboratoriolla Har-Ko MTM130/135 -muotopuristimella. CLT-levyistä sahattiin varsinaiset koekappaleet delaminointikoetta varten.

Koetta varten valmistettiin eri kerrosasettelulla neljä erilaista CLT-levyä, kutakin neljä kappaletta, eli yhteensä 16 levyä. Jokainen CLT-levy koostui viidestä liimapuulevykerroksesta. Liimapuulevyt koostuivat neljästä syrjäliimatusta lamellista. Liimapuulevyissä lamellit olivat liimattu siten, että päädyn syykuvio oli kaikilla lamelleilla saman suuntaan ja päällimmäisissä kerroksissa syykuvion sydänpuoli oli ylöspäin. CLT-levyt olivat päältäpäin lapetta vastaan katsottuna neliskulmaisia ja kooltaan 480 mm x 480 mm. Kerrospaksuudet höyläyksen jälkeen olivat 19 mm ja 43 mm. Kerrokset aseteltiin siten, että päällimmäisille kerroksille saatiin erilainen asettelu lamellien paksuuksista. Eri kerrosasettelulla pyritään tutkimaan, miten kerrosten paksuus vaikuttaa pintakerrosten syrjäliimattujen liimasaumojen delaminointiin, esimerkiksi jos päällimmäinen lamelli on ohuempi kuin alempi tai päällimmäinen lamelli on paksumpi kuin alempi tai kaksi päällimmäistä kerrosta ovat saman paksuisia. Valmistettujen CLT-levyjen kerrosasettelu on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Valmistettujen CLT-levyjien kerrosasettelu

Puumateriaalina käytettiin lujuusluokittelematonta vähäoksaista ympärihöylättyä kuusta. Puutavara oli sydänpuusta 2 ex log, eli sydän halkaistu, kosteus pitoisuus toimitettuna oli n. 16–18 % eli höyläyskuiva. Puutavaraa säilytettiin liimapuulevyjen valmistuksen aikana konepajan tiloissa, jossa lämpötila ja suhteellinen kosteus vaihteli välillä 20–25° C ja 35–60 %. Puutavaran leveys oli 120 mm ja paksuuksina käytettiin kahta eri lamellipaksuutta 21 mm ja 45 mm. Puutavara oli katkottu 480 mm pitkiksi lamelleiksi. Lamellien syrjät hiottiin kevyesti ennen syrjäliimausta hiomapaperilla, jonka karkeusaste oli 120. Lamelleista puristetut liimapuulevyt höylättiin lappeellaan molemmin puolin ennen päällekkäispuristusta.

Liimana käytettiin Kiillon Kestopur G10 -kosteuskovetteista 1-komponentti-polyuretaaniliimaa. Liima täyttää EN 15425 normin vaatimukset, ja se on hyväksytty EN 14080 -normin mukaiseen CE-merkityn liimapuun valmistukseen sekä EN 16351 -normin mukaiseen CLT:n valmistukseen. Liiman avoinaika on maksimissaan 10 min ja puristus aika minimissään 20 min. Puristus paineen tulee olla välillä 0,6–1,0 N/mm². Liimaa levitettiin lamellien syrjille ja lappeelle 200 g/m².

Liimapuulevyjen valmistusta varten valmistettiin prototyyppi kitkapuristimesta Makronin Hollolan konepajalla (kuva 26). Prototyyppikitkapuristin on toimintaperiaatteeltaan samanlainen kuin täyden mittakaavan puristin. Kitkapuristimessa puutavarasta määrämittaan katkotut lamellit työnnetään lappeellaan kahden teräslevyn väliin. Levyjen välinen rako on hieman pienempi kuin lamellien paksuus. Toinen levyistä päästetään joustamaan, jolloin lamellien välille syntyy puristusta lapetta vastaan kohtisuorasti. Kun levyjen väliin työnnetään lamelleja peräjälkeen, säilyy puristuksen ja kitkan ansiosta puristusaine myös syrjien välillä kohtisuorasti.



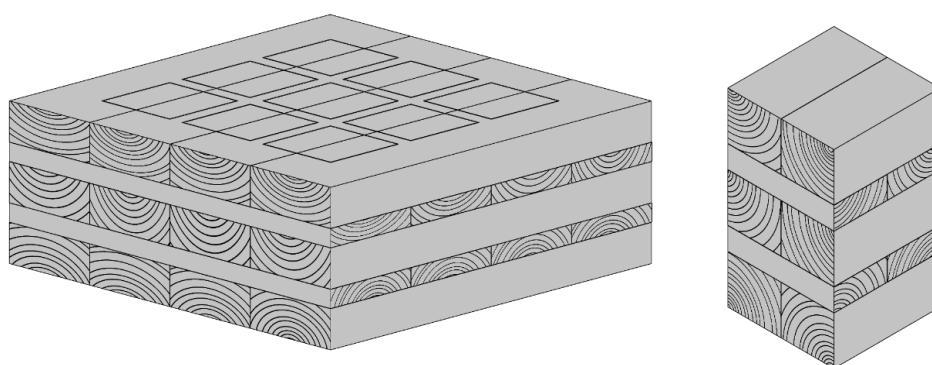
Kuva 26. Liimapuulevyjen valmistuksessa käytetty kitkapuristin

Valmistetussa kitkapuristimessa teräslevyt, joiden väliin lamellit puristettiin, olivat kooltaan 650 mm x 550 mm ja 550 mm x 550 mm. Ylempään levyyn oli työstetty loiva viiste helpottamaan lamellien syöttöä levyjen väliin. Ylempi levy oli kiinnitetty kuudella vaarnaruuvilla roikkumaan puristimen ylärunkoon. Vaarnaruuvien välissä oli neljän lautasjousen jousipaketit, jotka sallivat ylemmän levyn joustamisen. Työntörauta oli kiinnitetty kahteen Rehobootin CFC108-hydraulisyliinteriin. Yhden sylinterin maksimitoimintapaine on 70 MPa ja maksimivoima 111 kN.

Liimapuulevyjen valmistuksessa lamellit hiottiin syrjiltään ja puhdistettiin paineilmailla ennen liiman levitystä. Liima levitettiin lamellin syrjälle lamellin ollessa vaakana päällä, jotta saatiin levitettyä oikea määrä liimaa. Lamellit puristettiin kitkapuristimeen polyeteeni muovikalvon välissä, jotta liimapuulevyt eivät tarttuisi teräslevyihin kiinni, koska kitkapuristimen pienestä koosta johtuen

liimapuulevyt jouduttiin jättämään paikoilleen liiman kovettumisen ajaksi. Puristus aika oli liiman toimittajan suosittama minimiaika eli 20 min. Mittauspöytäkirjaan merkattiin ylös liiman levityksen aloitus- ja lopetus aika, levitetyn liiman määrä, puristus aika, paine ennen sylintereitä, mikä vaadittiin lamellien liikkuttamiseen, lautasjousten jousto sekä vallitseva lämpötila ja suhteellinen kosteus. Lamellien syrjien välinen puristus paine saatiin arvioitua sylinterien määntien halkaisijoiden, ennen sylintereitä olevan hydraulipaineen sekä puristettavan lamellin syrjän mitoilla. Puristus paine lamellien välillä oli 0,6 ja 0,8 MPa välillä.

Valmiit liimapuulevyt ladottiin päällekkäin ja käärittiin pakkausmuoviin ennen kuljetusta. Valmiita levyjä säilytettiin Makronin Hollolan konepajan tiloissa vaihtelevissa olosuhteissa. Valmiit liimapuulevyt kuljetettiin Mikkeliin puutekniikan laboratorion tiloihin, jossa valmistettiin CLT-levyt ja koekappaleet. Liimapuulevyt höylättiin lappeellaan molemmilta puolilta SCM S630 -tasohöylällä ennen liimausta ja puristusta. Liimaa levitettiin lastalla tasaisesti levyille noin 200 g/m^2 levyn ollessa vaakana päällä. Liimapuulevyt kasattiin lappeellaan päällekkäin ristikkäisesti ja puristettiin Har-Ko MTM 130/135 -muotopuristimella valmiiksi CLT-levyiksi. Puristus paineeksi määriteltiin $0,8 \text{ N/mm}^2$. Puristus aika oli 20 min viimeisen levyn asettelun jälkeen. Valmiiden CLT-levyjen liimasaumojen annettiin kovettua kaksi päivää.



Kuva 27. CLT-levystä sahattu koekappale

Valmiista CLT-levyistä sahattiin vannesahalla varsinaiset koekappaleet, joille tehtiin standardin EN 16351 mukainen delaminointikoe. Yhdestä CLT-levystä sahattiin yhteensä 9 koekappaletta, joista valittiin 5 koekappaletta testaukseen. Koekappaleet sahattiin CLT-levyn reunoilta ja keskeltä siten, että koe-

kappaleen keskelle jäi päällimmäinen liimasauma. Koekappaleet olivat kooltaan 100 x 100 mm paksuuden ollessa kyseisen testattavan CLT-levyn paksuus. Yhteensä testattavia koekappaleita oli 80 kappaletta, 20 kappaletta jokaisella eri kerrosasettelulla. CLT-levyistä sahatut koekappaleet on esitetty kuvassa 27. Kuvia CLT-levyjen valmistuksesta sekä delaminointikokeesta on liitteessä 1.

6.2 Delaminointikoe

Delaminointikoe suoritettiin standardin EN 16351 liitteen C mukaisesti. Testaus suoritettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Mikkelin kampuksella puutekniikan laboratoriossa. Kyllästysvaiheessa koekappaleet asetetaan painepönttöön, joka täytetään 10-20-asteisella vedellä siten, että kappaleet ovat täysin upoksissa. Painepönttöön imetään alipaine 30 minuutin ajaksi, joka on suuruudeltaan välillä 70 kPa ja 85 kPa (absoluuttinen paine 15 kPa ja 30 kPa). Alipaine vapautetaan, jonka jälkeen painepönttö paineistetaan kahden tunnin ajaksi välille 500 kPa ja 600 kPa (absoluuttinen paine 600 kPa ja 700 kPa). Alipaine-paineekyllästyksen jälkeen koekappaleet kuivatetaan tuulitunnelissa 65–75 °C asteen lämpötilassa suhteellisen kosteuden ollessa 8–10 % välillä ja ilmavirtauksen ollessa 2–3 m/s. Koekappaleet asetetaan tuulitunneliin vähintään 50 mm etäisyydelle toisistaan koekappaleen päädyn syykuvion ollessa kohtisuorasti ilmavirtausta kohti. Koekappaleita kuivatetaan niin kauan, että koekappaleiden massa on palautunut 100–110 % tasolle alkuperäisestä massasta. /11, s. 53, 55./

Testauksen jälkeen koekappaleista mitataan auenneiden liimasaumojen pituudet koekappaleiden sivuilta ja päältä. Standardin EN 16351 mukaan koekappaleiden pintakerrosten liimasaumoja ei tarvitse huomioida delaminointia arvioidessa, koska CLT:tä voidaan valmistaa ilman syrjäliimausta, ja koekappaleet voidaan sahata kohdista, joissa päällimmäistä liimasaumaa ei jää koekappaleeseen. Opinnäytetyön kannalta ollaan kuitenkin kiinnostuneita pintakerrosten liimasaumojen delaminointikäyttäytymisestä, joten niitä arvioitiin erikseen samalla tavalla kuin kappaleen sivuilla olevia liimasaumoja. Jokaiselle koekappaleelle lasketaan kokonaisdelaminointi ($Delam_{tot}$) kaavan 1 mukaisesti

sekä maksimidelaminointi ($Delam_{max}$) kaavan 2 mukaisesti. Kokonais- ja maksimidelaminoinnit lasketaan erikseen päällimmäisille ja sivulla oleville liimasaumoille. /11, s. 55–56./

Koekappaleen kokonaisdelaminointiprosentti $Delam_{tot}$ lasketaan kaavalla 1.

$$Delam_{tot} = 100 \frac{l_{tot,delam}}{l_{tot,glue\ line}} \% \quad (1)$$

jossa	$l_{tot,delam}$	aukeamien kokonaispituus	[mm]
	$l_{tot,glue\ line}$	koekappaleen kaikkien liimasaumojen pituuksien yhteen laskettu summa	[mm]

Koekappaleen yksittäisen liimasauman maksimidelaminointiprosentti $Delam_{max}$ lasketaan kaavalla 2.

$$Delam_{max} = 100 \frac{l_{max,delam}}{l_{glue\ line}} \% \quad (2)$$

jossa	$l_{max,delam}$	maksimiaukeama pituus	[mm]
	$l_{glue\ line}$	koekappaleen yhden liimasauman kokonaispituus	[mm]

Auenneet liimasaumat mitataan tunnin sisällä kuivauksen jälkeen. Auenneiden liimasaumojen arvioinnissa suositellaan suurennuslasin ja 0,08–0,10 mm paksuisen rakotulkin käyttämistä. Liimasaumat luokitellaan tarpeeksi lujiksi, jos maksimidelaminointi ei ylitä 40 % yksittäisen liimasauman kokonaispituudella ja kokonaisdelaminointi ei ylitä 10 % kaikkien liimasaumojen summasta. Jos maksimidelaminointipituus tai kokonaisdelaminointipituus ylittää aiemmin mainitut rajaehdot tai delaminointipituutta ei kyetä määrittämään huonon pinnanlaadun vuoksi, tulee liimasaumat halkaista. Liimasaumat halkaistaan vasaralla ja taltalla, jotta voidaan määrittellä puunmurtumisprosentti. Puunmurtumaksi määritellään halkeamat, jotka ovat poikkeuksetta yli kahden solukerroksen päässä liimakerroksesta ja joissa syyn kulma sekä vuosirenkaan rakenne ovat vaikuttaneet murtuma-alueeseen. Aukeamat liimasaumassa, jotka ovat oksien

tai pihkataskujen kohdalla. lasketaan puunmurtuma-alueiksi. Halkaistun liimasauman minimi puunmurtumisprosentti ei saa olla alle 50 %. Jokaisen liimasauman yhteenlaskettu puunmurtumisprosentti ei saa olla alle 70 %. /11, s. 26, 54./

Seuraavanlaiset aukeamat liimasaumassa katsotaan delaminoinniksi: koheesiivinen murtuma liimakerroksessa, liimasauman murtuma täsmälleen liimakerroksen ja puun välillä sekä puunmurtuma, joka on poikkeuksetta ensimmäisen tai toisen solukerroksen päässä liimakerroksesta eikä murtumisen etenemiseen ole vaikuttanut syykuvion kulma tai vuosirenkaan rakenne. Delaminoinniksi ei katsota seuraavanlaisia aukeamia liimasaumassa: kiinteä puunmurtuma, joka on yli kahden solukerroksen päässä liimakerroksesta ja jossa syykuvion kulma ja vuosirenkaan rakenne on vaikuttanut murtuman etenemiseen, yksittäiset aukeamat liimasaumassa, jotka ovat alle 2,5 mm pitkiä ja yli 5 mm:n päässä lähimmästä delaminoinnista, sekä aukeamat liimasaumassa, jotka ovat oksien tai pihkataskujen kohdalla. tai aukeamat liimasaumassa, jotka ovat aiheutuneet oksista, jotka ovat piilossa liimasaumassa. Piilossa olevien oksien olemassaolo vahvistetaan halkaisemalla liimasauma jälkikäteen. /11, s. 54–55./

Ylimääräisille koekappaleille tehtiin vielä epävirallinen kuivatustestaus delaminoinnin arvioimiseksi. Yhteensä 36 koekappaletta kuivattiin 50 C-asteisessa uunissa yhteensä 123 h. Koekappaleille ei tehty tarkempia mittauksia delaminoinnin suhteen. Tarkoituksena oli arvioida, voidaanko kuivattamalla saada aikaan pintakerroksille aikaan suuria vetojännityksiä, jotka johtaisivat syrjäliimatujen saumojen delaminointiin.

6.3 Tulosten käsittely

Valmistetut CLT-levyt jaetaan neljään ryhmään, A, B, C ja D, niiden kerrosasettelun mukaan. Ryhmää vastaava kerrosasettelu on esitetty taulukossa 3. Ryhmän sisäiset CLT-levyt jaotellaan numeroin 1-4, esim. A1, A2, A3 ja A4. CLT-levystä sahatut koekappaleet merkataan sarjan, levynumeron ja koekappaleen numeron mukaisesti 1-5, esim. A1.1, A1.2, A1.3... A4.5. Tuloksissa tarkastellaan eroavaisuuksia delaminoinnissa vain eri ryhmien välillä.

Kerrosten asettelun ja paksuuden suhteen vaikutusta ulommaisten kerrosten syrjäliimatun liimasauman delaminointiin arvioidaan CLT-levyn päällimmäisen ja ristikkäisen lamellin yhteen lasketun paksuuden suhteena päällimmäisen lamellin paksuuteen sekä ulommaisten lamellien paksuuden suhteena koko CLT-levyn paksuuteen.

Taulukko 3. CLT-levyjen sarjat sekä lamellipaksuuksien suhdeluvut

Ryhmä	Kerrokset	LS	KS
A	19-19-43-19-19	0,5	0,32
B	19-43-43-43-19	0,31	0,23
C	43-19-43-19-43	0,69	0,52
D	43-43-43-43-43	0,5	0,4

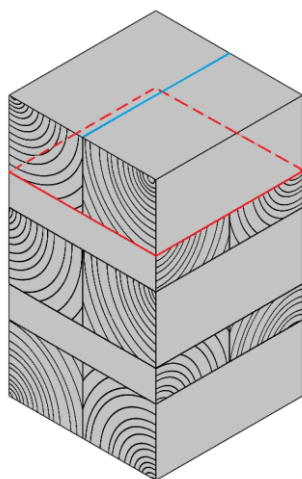
Jokaisesta koekappaleesta lasketaan erikseen ulommaisten syrjäliimattujen liimasaumojen sekä kappaleen sivuilla olevien liimasaumojen aukeamat. Delaminointia arvioidaan standardin EN 16351 mukaisesti. Neljän eri koesarjan tuloksia vertaillaan erikseen ulommaisten ja sivulla olevien liimasaumojen osalta.

Tuloksia vertaillaan tilastollisella analyysillä käyttäen yksisuuntaista varianssi-analyysiä merkitsevyystasolla 0,05. Varianssianalyysillä voidaan tutkia eroavatko kahden tai useamman ryhmän keskiarvot toisistaan tilastollisesti merkittävästi. Ryhmien välisiä eroja varianssianalyysissä testataan F-testillä, johon liittyvä p-arvo kuvaa ryhmien välisten erojen tilastollista merkitsevyyttä. Varianssianalyysin käyttämisen edellytyksenä on, että otoskeskiarvot ovat peräisin normaalijakaumasta. Otosten normaalijakautuneisuutta arvioidaan laatikko- ja jana kaaviolla sekä otosten normaalijakautuneisuus testataan Kolmogorov-Smirnov-testillä ja Shapiro-Wilk-testillä.

7 TULOKSET

Delaminointikokeen jälkeen liimasaumojen delaminointia arvioitiin standardin EN16351 liitteen C mukaisesti. Tässä kappaleessa esitetään kokeen tulokset ja tarkastellaan tuloksia tilastollisesti. Millään koekappaleella ei havaittu liimasauman aukeamia päällimmäisissä liimasaumoissa, joten päällimmäisten lii-

masaumojen delaminointia ei voida tarkemmin tarkastella tilastollisesti. Yhden koekappaleen toisen pintakerroksen liimasauma esitetty kuvassa 28 sinisellä. Kaikista koekappaleista kyettiin mittaamaan delaminoinnit koekappaleiden sivuilla olevista liimasaumoista. Yhden koekappaleen sivulla oleva yksi liimasauma on esitetty kuvassa 28 punaisella.



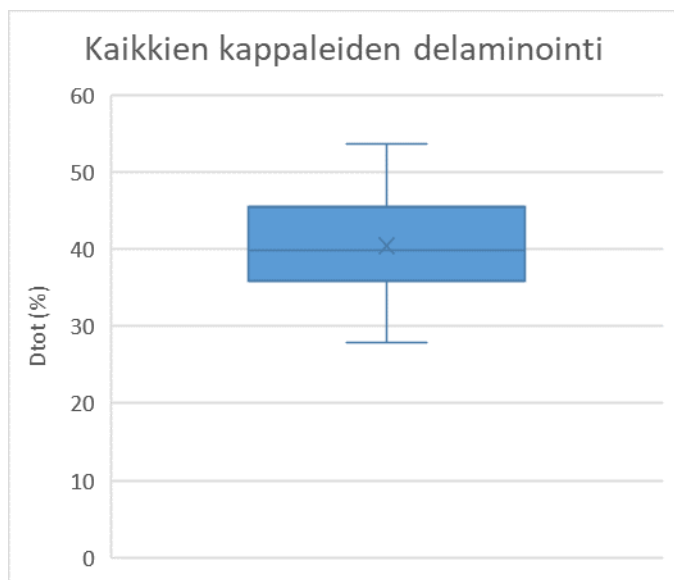
Kuva 28. Koekappaleen tutkittavat liimasaumat

Kaikissa koekappaleissa oli havaittavissa aukeamia sivuilla olevissa liimasaumoissa jo ennen delaminointikokeen kuivatusvaihetta. Osassa koekappaleista oli selkeästi nähtävillä delaminointikokeen painekyllästyksestä seuranneen puun turpoamisesta johtuneet liimasauman pettämiset. Aukeamia ei mitattu ennen koekappaleiden kuivaamista, mutta koekappaleista oli selkeästi havaittavissa, että delaminointikokeen painekyllästys aiheutti suurimman osan delaminoinnista.

7.1 Delaminointitulokset yleisesti

Kaikkien koekappaleiden kokonaisdelaminoinnin aritmeettinen keskiarvo oli 40,4 % ja mediaani 39,8 %. Kokonaisdelaminointiprosentti oli suurimmillaan 53,6 % ja pienimmillään 27,9 % keskihajonnan ollessa 6,3 %. Mikään koekappaleista ei olisi läpäissyt standardin EN 16351 mukaista delaminointikoetta, jossa kokonaisdelaminaation tulee olla alle 10 %. Tarkempi mittaustieto kaikkien koekappaleiden kokonaisdelaminoinnista on esitetty liitteessä 2. Kaikkien koekappaleiden kokonaisdelaminoinnin tulokset delaminointikokeen jälkeen on esitetty kuvassa 29 ruutu- ja janakaaviona. Ruudun yläreuna vastaa ylänel-

jännestä ja alareuna alaneljännestä. Ruudun sisällä oleva viiva kuvaa mediaania ja rasti keskiarvoa. Ruudusta lähtevät janat kuvaavat suurinta ja pienintä arvoa.



Kuva 29. Kaikkien koekappaleiden kokonaisdelaminointi

Kuvasta 29 nähdään selkeästi, että delaminoinnin arvot ovat jakautuneet taiseisesti. Tulosten mediaani ja keskiarvo ovat lähellä toisiaan. Ala- ja ylaneljännes sekä pienimmän ja suurimman arvon ja ruudun väliin jäävät neljännekset ovat kooltaan lähes yhtä suuria. Tulosten voidaan ruutu- ja janakaavion avulla arvioida noudattavan normaalijakaumaa. Koska testattavat ryhmät olivat pieniä (alle 20), testataan otosten normaalijakautuneisuus Kolmogorov-Smirnov-testillä ja Shapiro-Wilk-testillä. Testientulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Jakauman normalisuuden testaus ryhmien välillä

Jakauman normalisuuden testaus						
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
Sarja	Statistic	va	p-arvo	Statistic	va	p-arvo
A	0,142	19	,200*	0,927	19	0,174
B	0,120	20	,200*	0,968	20	0,759
C	0,110	18	,200*	0,958	18	0,557
D	0,130	19	,200*	0,976	19	0,902
*. This is a lower bound of the true significance.						
a. Lilliefors Significance Correction						

Kolmogorov-Smirnov- ja Shapiro-Wilk-testien nollahypoteesina oleva muuttuja noudattaa normaalijakaumaa. Taulukosta 4 nähdään testien p-arvot, jotka ovat suurempia kuin 0,05 jokaisen ryhmän kohdalla. Merkitsevyytasolla 0,05 nollahypoteesi jää voimaan, eli otokset noudattavat normaalijakaumaa.

7.2 Ryhmien välisen delaminointikäyttäytymisen vertailu

Pintakerrosten liimasaumojen delaminointikäyttäytymistä sekä kerrosasettelun vaikutusta niiden delaminointiin ei voida arvioida tilastollisesti tarkemmin, koska mikään koekappaleista ei osoittanut delaminointia pintakerrosten liimasaumoilla. Kerrosasettelun vaikutusta koekappaleen sivuilla oleviin liimasaumoihin tarkasteltiin tilastollisesti yksisuuntaisella varianssianalyysillä. Yksisuuntaisella varianssianalyysillä testattava nollahypoteesi oli seuraava: kokonaisdelaminoinnin jakauma on samanlainen kaikilla kerrosasetteluilla. Merkitsevyytasolla 0,05 kaikkien eri kerrosasettelulla valmistettujen koekappaleiden välisen testauksen p-arvo oli 0,866, jolloin nollahypoteesia ei voida hylätä. Tulos tarkoittaa, että kokonaisdelaminoinnin jakauma on samanlainen kaikilla kerrosasetteluilla, eli eri kerrosasettelulla valmistettujen koekappaleiden välillä ei havaittu merkittäviä eroja. Taulukosta 5 nähdään, kuinka ryhmien välinen vaihtelu (10,026) on selvästi pienempi verrattuna ryhmien sisäiseen vaihteluun (41,304). Koska ryhmien välinen vaihtelu on pientä verrattuna ryhmien sisäiseen vaihteluun, ei ryhmien välillä silloin ole merkittäviä eroja.

Taulukko 5. Yksisuuntaisen varianssianalyysin tulokset

Yksisuuntainen varianssianalyysi						
Vaihtelun lähde	NS	va	KN	F	P-arvo	F-kriittinen
Ryhmien välissä	30,079	3	10,026	0,243	0,866	2,732
Ryhmissä	2973,859	72	41,304			
Yhteensä	3003,938	75				

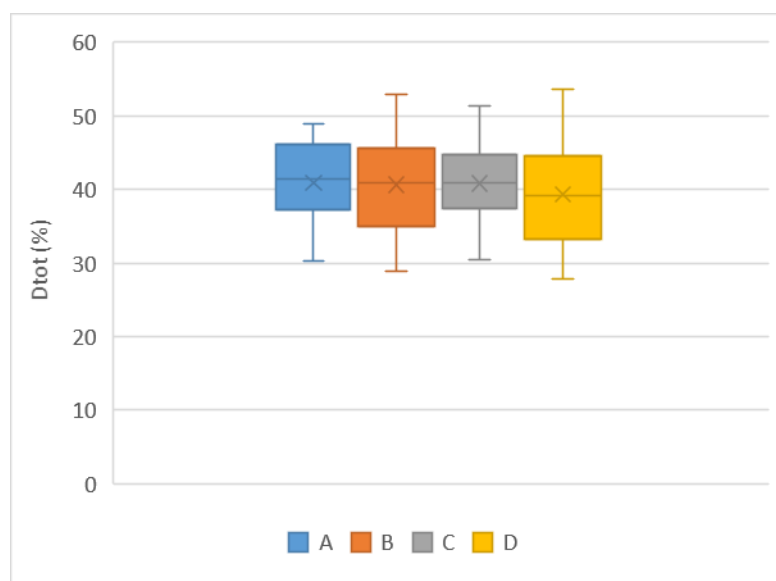
Taulukossa 6 on esitetty eri koekappaleiden keskiarvot, mediaanit ja keskihajonnat. Tuloksista on havaittavissa, että koekappaleiden välillä ei ole suuria eroja keskiarvojen ja keskihajontojen välillä. Delaminointikäyttäytyminen kaikkien koekappaleiden välillä on ollut samanlaista, eikä eri koekappaleiden delaminoinnissa ole merkittäviä eroja. Delaminointikokeen tulokset ovat olleet tasaisia, ryhmien sisäinen vaihtelu on ollut pientä, eikä ryhmissä ole esiintynyt

koekappaleita, jotka poikkeaisivat huomattavasti ryhmän muista koekappaleista.

Taulukko 6. Ryhmien keskiarvot, mediaanit ja keskihajonnat

Ryhmä	Keskiarvo (%)	Mediaani (%)	Keskihajonta (%)
A	40,866	41,349	5,721
B	40,643	40,921	6,377
C	40,796	40,879	5,797
D	39,325	39,171	7,010

Kokonaisdelaminoinnin tulokset eri ryhmien välillä on esitetty ruutu- ja janakaaviona kuvassa 30. Ruutu- ja janakaaviosta havaitaan selkeästi, että ryhmien välillä ei esiinny huomattavia eroja. Vaihtelu ryhmien välillä on tasaista. Pienin vaihtelu on ryhmän A koekappaleiden välillä ja suurin vaihtelu ryhmän D koekappaleiden välillä. Jakaumat ovat symmetriset eri ryhmien välillä, joka on selkeästi näkyvissä ruutu- ja janakaaviosta, koska mediaanit ja keskiarvot ovat jokaisella ryhmällä lähellä toisiaan.



Kuva 30. Kokonaisdelaminointi eri ryhmillä

Epävirallisessa testauksessa, jossa koekappaleita kuivatettiin uunissa alkukosteudesta 50 C-asteessa 123 h ajan, ei aiheuttanut delaminointia päällimmäisillä liimasaumoilla. Muutamassa koekappaleessa oli havaittavissa halkeamia pintakerroksissa. Kuivatus aiheutti delaminointia koekappaleen sivuilla

oleville liimasaumoille. Tulosten tarkempi tilastollinen vertailu jätettiin tekemättä, koska standardin mukainen delaminointikoe antoi yhdenmukaiset tulokset, eikä kuivatuksella saatu aikaan huomattavia eroavaisuuksia.

Koekappaleista ei mitattu maksimidelaminointia, koska mikään testatuista koekappaleista ei läpäissyt delaminointikoetta kokonaisdelaminoinnin osalta. Jos jotkin koekappaleista olisivat alittaneet kokonaisdelaminoinnin rajan, olisi maksimidelaminoinnilla tarkemmin voitu arvioida liimasauman liimautumisen laatua. Jos koekappaleet eivät läpäise delaminointikoetta kokonaisdelaminoinnin tai maksimidelaminoinnin osalta, voidaan liimauksen laatua arvioida halkaisemalla liimasaumat ja arvioida puunmurtumisprosentti. Tämän kokeen osalta ei määritelty puunmurtumisprosenttia koekappaleilta, koska suurimassa osassa kappaleista oli havaittavissa silmämääräisesti ainakin yksi sauma, jonka puunmurtumisprosentti ylitti 50 %. Kokeen tarkoituksena ei muutenkaan ollut käytettävän liiman verifiointi CLT:n liimaukseen kuusen osalta, koska liima täyttää kaikki standardin vaatimukset ja liima on hyväksytty sekä testattu soveltuvaksi CLT:n valmistukseen. Muutamilta koekappaleilta puunmurtumisprosentti yhdeltä liimasaumalta tarkistettiin halkaisemalla liimasauma, joka varmisti silmämääräiset havainnot ja arviot liimasauman laadusta.

8 POHDINTA

Opinnäytetyön kokeellisessa osuudessa tutkittiin ristiinliimatun puuelementin eripaksuisten kerrosten asettelun vaikutusta elementin pintakerrosten liimasaumojen delaminointikäyttäytymiseen. Kokeiden perusteella ei kyetty toteamaan minkäänlaista eroavaisuutta pintakerrosten liimasaumojen delaminointikäyttäytymisessä, koska minkään testatun koekappaleen pintakerroksen liimasauma ei auennut tai osoittanut minkäänlaisia merkkejä delaminoinnista. Tulos on hirsitalovalmistajien kannalta hyvä, koska ristiinliimaamalla valmistetut painumattomat hirret ovat nostaneet esiin kysymyksiä hirressä ulospäin näkyvien liimasaumojen kestävydestä. Opinnäytetyössä tehdyn kokeen mukaan ulomman lamellin paksuudella tai kerrosten lamellien paksuuden vaihteluilla ei ole mitään merkitystä delaminoinnin kannalta.

Mikään testatuista koekappaleista ei läpäissyt standardin EN 16351 mukaisia vaatimuksia delaminoinnin osalta standardin mukaan mitattavissa liimasaumoissa. Opinnäytetyön tutkimuskysymyksenä ei ollut tarkoitus kokeellisesti tutkia ristiinliimauksen toimivuutta tai soveltuvuutta käytännön rakentamisessa, koska ristiinliimaaminen on todettu jo kymmenien vuosien kokemuksella toimivaksi ratkaisuksi. Aikaisemmat tutkimustulokset ristiinliimaamisen ja delaminointikokeen osalta osoittavat, että huolellisesti valmistetut CLT-levyt läpäisevät standardin mukaisen testauksen. Vaikka mitkään testatuista koekappaleista ei läpäissyt standardin mukaista testausta, ei eri kerrosasetteluilla valmistettujen kappaleiden välillä siitä huolimatta esiintynyt tilastollisia eroavaisuuksia. On todennäköistä, että vaikka koekappaleet olisivat läpäisseet standardin vaatimukset, ei eri kappaleiden välillä silti olisi havaittu eroja delaminointikäyttäytymisessä. Kerrosasettelu ei kokeellisen testauksen tai kirjallisuustutkimuksen perusteella vaikuta ristiinliimatussa puuelementissä minkään liimasauman delaminointikäyttäytymiseen. Lapeliimattujen liimasaumojen liimauksen osittaista epäonnistumista ja vertailua aikaisempiin tutkimuksiin pohditaan tässä kappaleessa myöhemmin lisää.

Opinnäytetyön kokeellisessa osuudessa pääpaino oli pintakerrosten liimasaumojen delaminoinnin tutkimisessa, mutta koska liimapuulevyjen ristiinliimaus ei onnistunut standardin delaminointi vaatimuksia täyttävällä tavalla, on syytä pohtia asioita, mitkä johtivat lapeliimattujen saumojen huonoon liimautuvuuteen. Lähtökohtaisesti olosuhteet ja aikataulu liimapuulevyjen valmistukseen sekä niiden ristiinliimaamisen eivät olleet optimaaliset. Tutkimuksen kannalta on tärkeää, että koekappaleiden valmistusolosuhteet ovat muuttumattomat tai lähes samankaltaiset koko valmistuksen aikana, jotta tutkimuksen toistettavuus säilyy. Kun kyseessä on vielä puumateriaali, joka reagoi ympäröivän ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihteluihin, on erityisen tärkeää, että olosuhteet pysyvät samanlaisina koko valmistuksen aikana. Tässä opinnäytetyössä ei pystytty valmistamaan koekappaleita kontrolloiduissa olosuhteissa. Valmistuksessa haluttiin kokeilla kitkapuristimen toimivuutta liimapuulevyjen valmistuksessa, jonka vuoksi liimapuulevyt jouduttiin valmistaa konepajan tiloissa, jossa olosuhteet vaihtelivat vuorokauden mukaan. Liimapuulevyjen syrjät olivat kuitenkin liimautuneet hyvin, koska ne kestivät delaminointikokeen rasituksen.

Ensimmäisen liimapuulevyn valmistumisesta ensimmäisen CLT-levyn valmistamiseen kului aikaa lähes kuukausi. Koska liimapuulevyt olivat liimattu siten, että puun syykuvio oli jokaisella syrjäliimatulla lamellilla samansuuntainen, aiheutti se jonkin verran kaareutumia ja vääristymiä levyissä. Vääristyneet liimapuulevyt oikenerivät, kun ne ristiinliimattiin ja puristettiin päällekkäin. Valmiisiin CLT-levyihin jäi kuitenkin varmasti kuitenkin sisäisiä jännityksiä vääristyneistä levyistä, jotka voivat osalta vaikuttaa delaminointiin. Puumateriaali ja sen vaihtelevuus on todennäköisemmin ollut suurin vaikuttava tekijä huonojen liimasaumojen syntymiseen. Puumateriaali oli toimitettuna höyläyskuiva 16 % - 18 %, joka soveltuu vielä liimaukseen käytettäessä kosteuskovetteista yksikomponentti polyuretaaniliimaa. Valmiissa liimapuulevyissä esiintyi kuitenkin lähes 20 % kosteuspitoisuuksia joillakin lamelleilla.

Liimauksessa pyrittiin noudattamaan liimatoimittajan suosituksia mahdollisimman tarkasti olosuhteisiin nähden. Lämpötila liimauksen aikana oli yli 20 C° ja ilman suhteellinen kosteus yli 35 % ja alle 70 %. Liimattavat pinnat olivat höylätty 24 h ennen liimausta eikä liiman avointa aikaa ylitetty liimauksen aikana. Puristusaine pysyi suositetuissa rajoissa välillä 0,6–10 N/mm² ja puristusaika reilu 20 min. Leikatuista koekappaleista tarkistettuna liimasaumat vaikuttivat hyviltä. Liimasaumojen paksuutta ei tarkemmin tarkistettu, joka osaltaan voi vaikuttaa tuloksiin, sillä jos alle 0,1 mm paksu liimasauma ei ole taattu, puristusajan tulee olla 4 tuntia. Testauksen aikataulun osalta valmistuslaitteiston rajallisuudesta ja valmistettavien CLT-kappaleiden määrästä johtuen pidättydyttiin 20 min puristusajassa.

Kuten aikaisemmin tämän tutkimuksen kirjallisuuskatsauksessa on todettu, avaimet onnistuneeseen CLT:n valmistukseen ovat sahatavaran laadun yhtenäisyys ja liimattavuuteen vaikuttavien parametrien hallinta. Opinnäytetyön kohteellisessa osuudessa ei päästy toteuttamaan CLT:n valmistusta aivan näiden suositusten puitteissa. CLT:n onnistunut valmistus vaatii alussa kokeiluja ja valmistukseen vaikuttavien parametrien optimointia, joita ei kyetty tämän opinnäytetyön puitteissa toteuttamaan. Suurin todennäköinen syy lapeliimattujen saumojen huonoon liimautuvuuteen on ollut liian korkea puun pintakosteus, joka on estänyt liiman tunkeutumista puuhun. Liimapuulevyjen kuivattaminen olisi todennäköisesti parantanut liimattavuutta, mutta myös aiheuttanut lisää

vääristymiä ja luonut valmiita halkeamia levyihin. Tämän vuoksi liimapuulevyjen valmistus yhtäläisestä puutavarasta ja valmistusolosuhteiden hallitseminen on tärkeää. Liima määrän vähentäminen voi myös olla ratkaisuna liimasaumojen parempaan kestävyYTEEN.

Kokeellisessa osuudessa pyrittiin vastaamaan tutkimusongelmasta määriteltyyn tutkimuskysymykseen, miten ristiinliimatun puuelementin kerrosten paksuus vaikuttaa ulommaisten kerrosten syrjäliimatun liimasauman delaminointiin. Kokeellisella testauksella saatiin selvä tulos, jonka mukaan kerrosten paksuus ei vaikuta syrjäliimattujen liimasaumojen delaminointiin. Tulosta vahvistaa myös aikaisemmat tutkimukset, joita käsitellään seuraavassa luvussa. Hyvin liimattu liimasauma kestää aina paremmin kuin puuaines.

8.1 Vertailu aiempaan tutkimukseen

Ristiinliimattujen puuelementtien pintakerrosten liimasaumojen kestävyYdestä ei löytynyt aikaisempia tutkimuksia. Tämä johtunee osin siitä, että CLT:n valmistuksessa syrjäliimaus ei ole pakollista, eikä CLT-levyä jätetä näkyville, vaan se toimii runkoelementtinä, joka verhoillaan jälkikäteen. Aikaisempia tutkimuksia on tehty ristiinliimattujen puuelementtien päällimmäisten kerrosten halkeilu taipumuksesta, joka sisältää yhtäläisyyksiä syrjäliimattujen liimasaumojen kestävyYTEEN. Joissain tutkimuksissa on todettu halkeamien esiintyvän liimasaumojen läheisyydessä. Eri valmistusparametrien ja koekappaleiden vaikutusta delaminointiin on myös aikaisemmin tutkittu.

Opinnäytetyössä suoritettujen testauksien tuloksilla on yhtäläisyyksiä Knorzin ym. /30/ suorittamaan tutkimukseen, joka koski teollisesti tuotetun CLT:n liimasaumojen liimauksen laatua. Tutkimuksessa tutkittiin lamellien kerrospaksuuden, kerrosten määrän, puristuspaineen sekä koekappaleen muodon vaikutusta delaminointikäyttäytymiseen standardin EN 16351 delaminointikokeella. Kokeessa käytetyt koekappaleet oli valmistettu kokonaan 20 mm tai 40 mm paksuista lamellikerroksista. Kerrosten paksuus ei vaikuttanut tilastollisesti merkittävästi liimasaumojen delaminointiin. Opinnäytetyössä suoritettussa delaminointikokeessa päädyttiin osittain samanlaiseen tulokseen. Vaikka koekappaleen sisällä kerrosten paksuus vaihteli, ei silläkään ollut vaikutusta koekappaleiden delaminointikäyttäytymiseen.

Aikaisemmat tutkimukset ovat keskittyneet päällimmäisten pintakerrosten halkeamien estämiseen. Aikaisempia tutkimuksia, jotka liittyvät ristiinliimattujen puuelementtien kosteuskäyttäytymisen, halkeilun ja delaminoinnin tutkimiseen on käsitelty tarkemmin luvussa 3.3.4. Tämän tutkimuksen osalta on hankala löytää yhtäläisyyksiä näihin tutkimuksiin. Pintakerrosten liimasaumoja ei yleisesti huomioida, koska hyvin liimatun liimasauman tapauksessa pintalamellit halkeavat satunnaisesti keskeltä liimasaumojen pettämisen sijasta. Ratkaisuja pintakerrosten halkeilun estämiseksi on esitetty useita, ja ne osin vähentävät myös huonommin liimattujen pintakerrosten liimasaumojen delaminointia. Halkeamien estämiseen esitellyt menetelmät ovat tuotannollisesti melko hankalasti toteutettavissa. Hirsien tapauksessa halkeamat eivät vaikuta huomattavasti seinärakenteen esteettisyyteen, koska halkeilu on hirsiseinälle ominaista.

8.2 Objektiivisuus

Tämä tutkimus on tehty yritykselle, jolla on tarkoituksena lisätä tietoa CLT:stä yrityksen sisällä sekä myös käyttää tutkimuksen tuloksia omien tuotteiden markkinoinnissa. Tutkimuksen kirjallisessa osuudessa on käytetty lähteitä, jotka ovat syntyneet osana projektia, jolla halutaan lisätä CLT:n tietoisuutta ja käyttöä positiivisten mielikuvien myötä. Kirjallisessa osuudessa ei tuoda esille negatiivisia mielikuvia koskien CLT:tä ja sen käyttöä. Kirjallisuusosuuden voidaan nähdä puhuvan positiivisesti ristiinliimaamisen puolesta, mutta tutkimukseen liittyvät kokeelliset testaukset on suoritettu siten, että positiivisilla mielikuvilla ei ole vaikutusta testattavien kappaleiden valmistukseen tai tulosten analysointiin.

Kokeellisessa osuudessa on pyritty tuomaan esille selkeästi testauksen kulku koekappaleiden valmistuksesta niiden testaamiseen. Tuloksiin vaikuttavat tekijät on selostettu ja mitattu niin tarkasti kuin on resurssien puitteissa ollut mahdollista. Olosuhteiden vaikutukset koekappaleiden valmistuksessa on tuotu esille, eikä metodien kuvauksessa olla peitelty osittaista kykenemättömyyttä tutkimuksen toistettavuuteen vaikuttavien asioiden hallitsemiseen. Suoritettu testi on tehty standardin ohjeiden mukaisesti, jolloin testaus on helposti toistettavissa, eikä tulosten arvioinnissa synny epäselvyyksiä. Testauk-

nessa kävi ilmi ristiinliimaamisesta aiheutunut eroava käyttäytyminen eri kerrosten välillä, joka johti suurimpiin delaminointiin. Saaduilla tuloksilla on myös yhtäläisyyksiä aikaisempiin tutkimuksiin.

8.3 Reliabiliteetti ja validiteetti

Opinnäytetyössä tutkittiin, miten eripaksuisten kerrosten erilainen asettelu vaikuttaa ristiinliimatun puuelementin pintakerrosten liimasaumojen delaminointiin. Delaminointia tutkittiin myös muiden liimasaumojen osalta. Delaminoinnin mittauksessa käytettiin apuna digitaalista työntömittaa, jonka tarkkuus oli $\pm 0,02$ mm. Työntömitta oli liitetty tietokoneeseen, joka mahdollisti mittausdatan välittömän kirjaamisen. Digitaalisen työntömitan käyttö eliminoi mittajan havaintotarkkuudesta ja kirjaamisesta johtuneet virheet. Delaminointipituudet merkattiin lyijykynällä koekappaleisiin tunnin sisällä testauksesta hyödyntäen 0,1 mm paksua rakotulkkaa delaminoinnin päätekohtien arviointiin. Delaminoinnin tulkinta hankaloituu ajan myötä ympäristön vaikutuksesta puumateriaaliin. Mittaukset koekappaleiden välillä antoi samankaltaisia tuloksia, eikä mittauksesta mahdollisesti aiheutuneet virheet vaikuttaneet lopullisiin tuloksiin. Toistettavuus standardin mukaisella testillä on hyvä. Erilaisiin tuloksiin vaikuttaa käytetty puumateriaali ja liimausmenetelmä.

Tämän tutkimuksen osalta eri tutkija päätyy todennäköisesti samanlaiseen tulkintaan eri kerrospaksuuksien vaikutuksesta ristiinliimatun puuelementin delaminointi käyttäytymiseen. Kokonaisdelaminointi todennäköisesti tulee antamaan eroavat tulokset tähän tutkimukseen verrattuna, mutta samalla menetelmällä valmistetut koekappaleet eivät tule näyttämään eroavaisuuksia kokonaisdelaminoinnin osalta eri koekappaleiden välillä.

Tutkimuksessa käytetty testausmenetelmä, eli standardin EN16351 mukainen delaminointikoe, on tarkoitettu liimasaumojen kestävyys- ja delaminoinnin arviointiin. Testillä kyettiin mittaamaan hyvin delaminointia, josta tässä tutkimuksessa oltiin kiinnostuneita. Toisaalta voidaan arvioida standardin EN 16351 liitteen C mukaisen delaminointikokeen soveltuvuutta pintakerrosten liimasaumojen delaminoinnin tutkimiseen. Standardissa ei oteta kantaa pintakerrosten liimasaumoihin, koska CLT:tä voidaan valmistaa ilman syrjälii-

mausta. Standardin mukaiset koekappaleet ovat myös pieniä, jolloin tutkittavien pintakerrosten liimasaumojen pituus jää lyhyeksi. Delaminointikokeella ei välttämättä saada aikaan riittäviä vetojännityksiä pintakerrosten liimasaumoille, jotka aiheuttaisivat aukeamia liimasaumoissa. Pintakerrokset pääsevät pienissä koekappaleissa elämään voimakkaammin, kun taas suuremmissa CLT-levyissä muodonmuutokset ovat rajoitetumpia. Tämän vuoksi pintakerroksille ei saatu syntymään edes kunnolla halkeamia koekappaleita kuivaamalla. Suoritettussa delaminointikokeessa standardin mukaisesti tarkastetut lapeliimatut liimasaumat eivät läpäisseet standardin vaatimuksia, joka voi myös olla osatekijänä pintakerrosten liimasaumojen kestävyys. Suuri osa sisäisistä jännityksistä laukesi jo delaminointikokeen vesikyllästysvaiheessa, kun monen lapeliimatut liimasaumat aukesivat puun eroavan kosteuskäyttämisen myötä. Tämä voi osalta vaikuttaa myös jännityksiin, joita syntyy pintakerrosten liimasaumoille. Standardin EN 16351 liitteen C mukainen delaminointikoe valittiin, koska se oli opinnäytetyön puitteissa nopeinta suorittaa ja koe voitiin tehdä monelle eri koekappaleelle saatavilla olevalla laitteistolla.

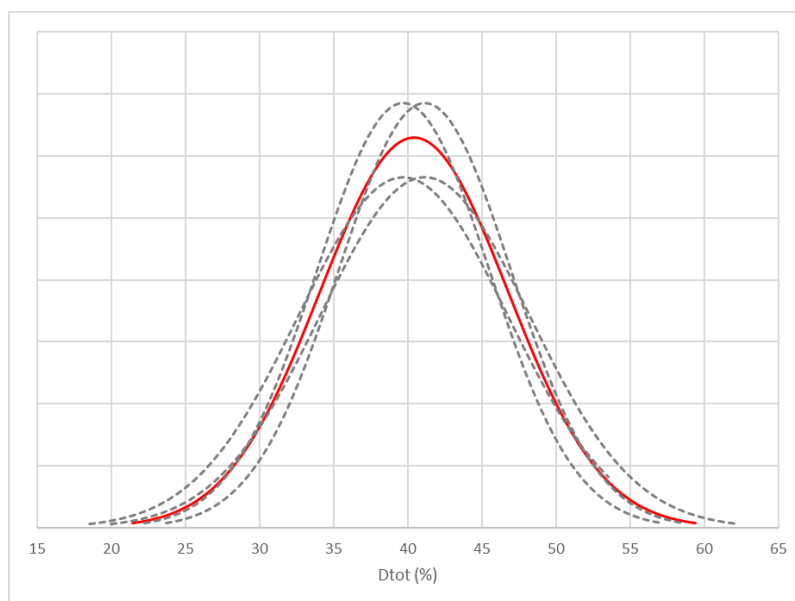
8.4 Virhe- ja herkkyystarkastelu

Delaminointikokeen tuloksille voidaan tehdä virhetarkastelut laskemalla keskiarvon keskivirhe ja hajonnan keskivirhe, koska tulokset noudattivat normaali-jakaumaa. Kaikkien ja yksittäisten ryhmien kokonaisdelaminoinnin keskiarvon keskivirhe sekä hajonnan keskivirhe on esitetty taulukossa 7. Keskivirheet ovat melko pieniä ja samansuuruisia ryhmien välillä.

Taulukko 7. Virhetarkastelu

Ryhmä	Kaikki	A	B	C	D
Keskiarvon keskivirhe	0,726	1,349	1,463	1,406	1,652
Hajonnan keskivirhe	0,513	0,954	1,035	0,994	1,168

Kuvasta 31 nähdään kaikkien ryhmien keskiarvon keskivirheen ja hajonnan keskivirheen avulla lasketut jakaumat harmailla katkoviivoilla. Jakaumat rajaa-
vat alueen, missä virherajoissa kokonaisdelaminoinnin tulos vaihtelee. Keskiarvon keskivirhe vaikuttaa jakauman paikkaan ja hajonnan keskivirhe jakauman leveyteen.



Kuva 31. Virhetarkastelun rajat esitetty jakaumakuvaajina

Delaminointia tutkittiin standardin esittämän yksinkertaisen laskukaavan mukaisesti, joka laskee delaminointiprosentin liimasauman aukeamien pituuden suhteessa koekappaleen kaikkien liimasaumojen yhteenlaskettuun pituuteen. Lähtödatan eli liimasauman aukeamien ja liimasaumojen pituudet toimivat ainoana mitattavana muuttujana delaminointi prosenttia laskiessa. Vaihtelevat mittaustulokset vääristävät tuloksia, mutta jos mittaus suoritetaan asianmukaisesti, pysyy lähtödatan tarkkuus tarpeeksi herkällä tasolla. Liimasaumojen ja kokonaisdelaminoinnin pituudet ainoana muuttujina ovat keskeisimmässä asemassa delaminoinnin arviointiin. Koekappaleiden ollessa liimasaumojen kokonaispituuksien osalta samanlaisia vaikuttaa päätöksentekoon liimasauman aukeamien pituuksien vaihtelu. Yksinkertaisen mittauksen ja laskentakaavan ansiosta päätöksentekoon delaminoinnin arvioinnissa vaikuttaa vain liimasaumojen aukeamien eri pituudet eri koekappaleilla.

8.5 Jatkotutkimusaiheet

Ristiinliimaamisen vaikutus painumattomasta hirrestä valmistettujen hirsitalojen käyttäytymiseen vaatii vielä tutkimusta liimasaumojen ja hirsien ulospäin näkyvien pintakerrosten osalta. Ristiinliimattujen puuelementtien tutkiminen vaatii pitkäaikaisia syklisiä kokeita suurilla koekappaleilla, jolloin voidaan tutkia tarkemmin pintakerrosten halkeilua, liimasaumojen delaminointia sekä jännityksiä. Nurkkaliitosten tutkiminen vaatisi oikean kokoisten liitosten valmistamisen mekaanisen kestävyden ja tiiveyden testaamisen.

Uusien liimojen ja puulajien verifiointi CLT:n valmistamiseen sopivaksi vaatii vielä paljon tutkimuksia tulevaisuudessa. CLT:n valmistamiseen hyväksytyt liimat ja puulajit eivät vaadi tutkimusta niiden soveltuvuudesta ristiinliimaamiseen, mutta jokainen CLT valmistajan tuotantolinjasto ja valmistusprosessi on hieman erilainen, joka vaatii itsessään kokeita ja testauksia oikeiden parametrien löytämiseksi.

9 YHTEENVETO

Ristiinliimaus on ollut tunnettua puurakentamisessa jo parinvuosikymmenen ajan lähinnä CLT:n osalta. CLT:n käyttö on osoittautunut varteenotettavaksi vaihtoehdoksi perinteisten rakennusmenetelmien rinnalle. Puunkäyttöä halutaan jatkuvasti lisätä sen alhaisen hiilijalanjäljen ja uusiutuvuuden johdosta. Puurakentamisella on kuitenkin ollut aina vahva jalansija hirsitalorakentamisen puolella. Perinteinen hirsirakentaminen on Suomessa siirtynyt lähes kokonaisuudessaan liimapuusta valmistettavien lamellihirsien käyttöön. Seuraava uusi askel hirsirakentamisessa on siirtyminen kohti painumatonta hirttä. Painumaton hirsi yhdistää CLT:n ja hirren tavalla, joka luo uusia ulottuvuuksia hirsirakentamisessa. Painumattomuuden ansiosta painumavaraa ei tarvitse ottaa huomioon, voidaan rakentaa entistä korkeampia rakennuksia sekä voidaan valmistaa suurempia hirsielementtejä. Painumattoman hirren uudellaisuus herättää kuitenkin kysymyksiä korkeiden hirsien nurkkien liittämistä sekä ristiinliimauksen soveltuvuudesta hirsirakentamiseen. Tässä työssä keskityttiin ristiinliimaukseen painumattomien hirsien näkökulmasta.

Painumattomia hirsiiä voidaan valmistaa perinteisen levymäisen CLT:n tapaan. Modernit CLT-tuotantolinjat mahdollistavat CLT:n valmistuksen lisäksi myös erikokoisten painumattomien hirsien valmistuksen. Korkeiden hirsielementtien käyttäminen hirsitalojen rakentamisessa nopeuttaisi pystytysaikoja ja luo samalla tarvetta uusille nurkkien liittämiskäytännöille, jotka soveltuvat hirsirakentamiseen. CLT-elementtien nurkkien liittämiseen löytyy useita erilaisia ratkaisuja, mutta harva niistä soveltuu suoraan hirsiseinien liittämiseen. CLT-rakentamisessa CLT-elementit jäävät usein piiloon eristysten ja verhoilun alle, minkä vuoksi CLT:n pinnalle jäävien metallisten liitoselinten käyttö on yleistä. Kun halutaan pitäytyä perinteisessä hirsirakentamisessa, ei metallisille lii-

toselimille ole sijaa. Tässä työssä pidättäydettiin uusia liitosratkaisuja ideoissa luonnostelun tasolla ja liitosten jatkokehittely jätettiin työn ulkopuolelle. Luonnostelun tuloksena syntyneet liitosratkaisut soveltavat jo hyväksi todettuja ja testattuja jiiriin työstettyjä lohenpyrstöliitoksia. Luonnostelluista liitosratkaisuista 3D-tulostetut mallikappaleet toimivat visuaalisena ja fysikaalisena apuna liitosratkaisujen toteutuskelpoisuutta arvioiessa.

Painumattomat hirret toimivat sellaisenaan näkyvänä rakenteena, mikä erottaa sen perinteisestä CLT-rakentamisesta. Hirsiseinä on altistettuna ulkoilman olosuhteiden vaihteluille toisin kuin perinteiset CLT-elementit, jotka yleisesti verhoillaan ainakin ulkopuolelta. Puun anisotrooppisen ja hygroskooppisen luonteen vuoksi ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelut aiheuttavat jännityksiä ristiinliimatussa rakenteessa, kun puu turpoaa ja kutistuu eri tavalla eri suunnissa. Perinteiset liimapuusta valmistetuissa hirsissä lamellit on ladottu ja liimattu samansuuntaisesti, jolloin eri lamellikerrosten välinen kosteuskäyttäytyminen on samankaltaista, eikä suuria jännityksiä pääse syntymään. Ristiinliimaaminen puun luontaisen kosteuskäyttäytymisen vuoksi nostaa esiin kysymyksiä liimasaumojen kestävydestä. Ristiinliimatun puuelementin pintakerroksille syntyy auttamatta halkeamia, jotka eivät saisi ilmetä syrjäliimattujen liimasaumojen kohdalla delaminointina.

Työssä tutkittiin kahdella eri lamellipaksuudella ja neljällä eri kerrosasettelulla valmistettujen viisikerroksisten CLT-levyjen delaminointikäyttäytymistä. CLT-levyt valmistettiin omatoimisesti kahdessa vaiheessa. Syrjäliimatut liimapuulevyt valmistettiin CLT-levyjen valmistusta varten rakennetulla kitkapuristimen prototyypillä. Liimapuulevyt liimattiin lappeellaan ristikkäisesti päällekkäin kokonaiseksi CLT-levyksi. CLT-levystä sahatuille koekappaleille suoritettiin standardin EN 16351 liitteen C mukainen delaminointikoe. Kokeella pyrittiin arvioimaan myös pintakerrosten syrjäliimattujen liimasaumojen delaminointia sekä kerrosten eri lamellipaksuuksien ja asettelun vaikutusta kaikkien koekappaleissa esiintyvien liimasaumojen delaminointiin. Kokeen tuloksista kävi ilmi, ettei lamellikerrosten paksuuden vaihtelulla tai kerrosasettelulla ollut vaikutusta minkään liimasauman delaminointiin. Pintakerrosten liimasaumat eivät delaminoituneet ollenkaan. Kokonaisdelaminoinnin tarkastelu nosti kuitenkin

esille CLT:n valmistukseen vaikuttavien olosuhteiden sekä parametrien hallitsemisen tärkeyden, sillä mikään koekappaleista ei läpäissyt standardin mukaista testausta lapeliimattujen liimasaumojen osalta.

Työ oli katsaus CLT-rakentamiseen hirsitalorakentamisen näkökulmasta. Työssä perehdyttiin ristiinliimattuihin puuelementteihin ja pyrittiin vastaamaan laitevalmistajia sekä hirsitalovalmistajia askarruttaviin kysymyksiin. Työssä käytiin läpi CLT:n valmistusprosessi sekä hirsielementtien nurkkien liitosratkaisut siinä laajuudessa kuin opinnäytetyön puitteissa oli mahdollista. Kokeellisessa osuudessa yhdistyi kirjallinen osuus ja käytäntö CLT:n valmistuksen osalta.

LÄHTEET

1. FPInnovations. Introduction to cross-laminated timber. Teoksessa Gagnon, S. & Pirvu, C. (eds.) CLT Handbook. Canadian edition. Quebec: FPInnovations, 2011. S. 1–36.
2. Sirkka, A. & Pirttinen, V. CLT – monipuolinen, nopea ja ekologinen rakennusmateriaali. Lapin ammattikorkeakoulu. Sarja B. Tutkimusraportit ja kokoomateokset. 2017. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-316-169-6> [viitattu 17.5.2018].
3. CLT Plant Oy. Puuosaamista Pohjanmaalta. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.cltplant.com/fi/yritys.link> [viitattu 17.5.2018].
4. Brandner, R. Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report. Focus Solid Timber Solutions – European Conference on Cross Laminated Timber (CLT). The University of Bath, Graz, Itävalta. 2013.
5. Schickhofer, G. Glued Wood Products for Structural Use. Cross Laminated Timber -Idea, Product, Building Technique. Presentation in the frame of the 3rd EUROPEAN FOREST WEEK - SILVA2015. Engelberg, 2.11.2015.
6. Brandner, R., Flatscher, G. & Ringhofer, A. Cross laminated timber (CLT): overview and development. European Journal of Wood and Wood Products, Vsk. 74 (3). 2016. S. 331–351. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0999-5> [viitattu 20.5.2018].
7. Fink, G., Kohler, J. & Brandner, R. Application of European design principles to cross laminated timber. Engineering Structures. 2018. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.081> [viitattu 20.5.2018].
8. Hirsirakentamisen perusteet. Itseopiskelumateriaali. Hirsitaloteollisuus. 2014. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://www.hirsikoti.fi/assets/images/Koulutusmateriaali/Hirsirakentamisen_perusteet.pdf [viitattu 13.6.2018].
9. Hirsitalon suunnittelu. Puuinfo. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puurakenteet/hirsitalon-suunnittelu> [viitattu 17.5.2018].

10. Wang, B., Pirvu, C. & Lum, C. Cross-laminated timber manufacturing. Teoksessa Gagnon, S. & Pirvu, C. (eds.) CLT Handbook. Canadian edition. Quebec: FPInnovations, 2011. S. 1–15.
11. SFS-EN 16351:en. Timber structures. Cross laminated timber. Requirements. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 2015.
12. Pizzi, A. Resinol Adhesives. Teoksessa Pizzi, A. & Mittal, K.L. (toim.) Handbook of Adhesive Technology. New York: Marcel Dekker, 2003. S. 593–607.
13. Lehringer, C & Gabriel, J. Review of Recent Research Activities on One-Component PUR-Adhesives for Engineered Wood Products. Teoksessa Aicher S., Reinhardt H. W. & Garrecht H. (eds.) Materials and Joints in Timber Structures. Dordrecht: Springer RILEM Bookseries, 9/2014. S. 405–420.
14. Grøstad, K. & Bredesen, R. EPI for Glued Laminated Timber. Teoksessa Aicher S., Reinhardt H. W. & Garrecht H. (eds.) Materials and Joints in Timber Structures. Dordrecht: Springer RILEM Bookseries, 9/2014. S. 355–364.
15. CLT-raakalevyn valmistusprosessi. Kiintopuu. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://www.kiintopuu.fi/media/kiintopuu/clt-raakalevy-info-4.4.14-pak.pdf> [viitattu 20.5.2018].
16. Schickhofer, G. Cross Laminated Timber (CLT) in Europe – from Conception to Implementation. University of British Columbia. Department of Wood Science. Presentation in Vancouver 22.3.2010.
17. Schickhofer, G. CLT – European Experience Idea & Development Technology & Applications. Presentation in the frame of the CLT Forum 2013 in TOKYO. CLT. Tokio 24.10.2013.
18. CLT-runkoelementtien valmistusprosessi. Kiintopuu. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://www.kiintopuu.fi/media/kiintopuu/clt-runkoelementti-info-20.5.2014.pdf> [viitattu 16.6.2018].
19. Wiedenhoef, A. Structure and Function of Wood. Teoksessa United States Department of Agriculture Forest Service (toim.) Wood Handbook. Wood as an Engineering Material. Centennial Edition. Madison: Forest Products Laboratory, 2010. S. 1–16.

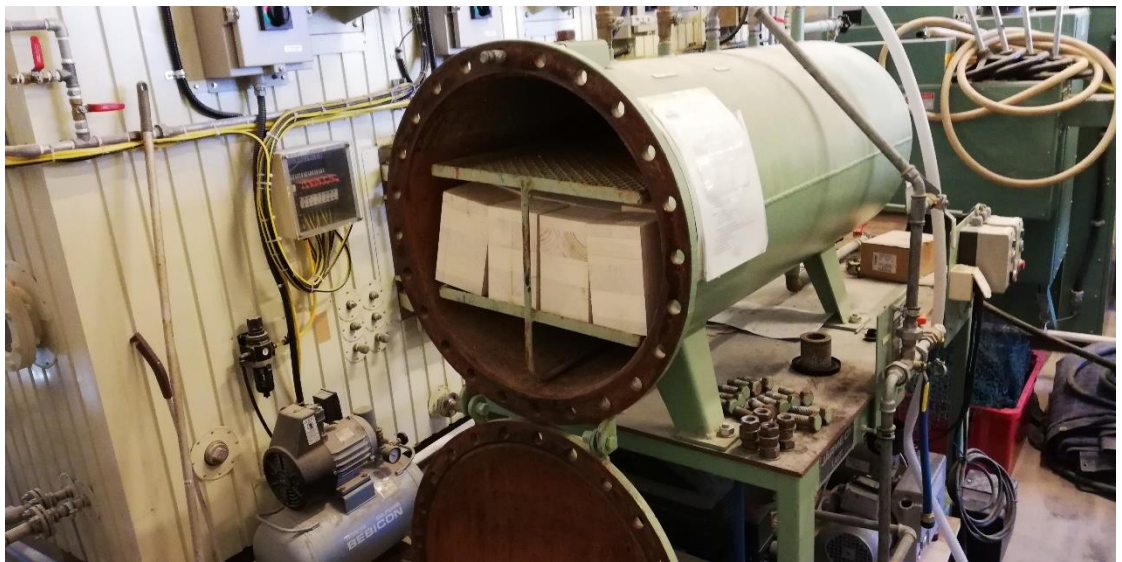
20. Puun rakenne. Puu Proffa. WWW-dokumentti. Saatavissa: http://www.puuproffa.fi/PuuProffa_2012/fi/puun-rakenne/puun-rakenne [viitattu 23.5.2018].
21. Time, B. Hygroscopic moisture transport in wood. Norjan teknis-luonnontieteellinen yliopisto. Rakennustekniikan osasto. Väitöskirja. 1998.
22. Glass, S. V. & Zelinka, S. L. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. Teoksessa United States Department of Agriculture Forest Service (toim.) Wood Handbook. Wood as an Engineering Material. Centennial Edition. Madison: Forest Products Laboratory, 2010. S. 1–19.
23. Kosteusteknisiä ominaisuuksia. Puuinfo. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/kosteusteknisiä-ominaisuuksia> [viitattu 8.5.2018].
24. Puunrakenne. Puuproffa. WWW-dokumentti. Saatavissa: http://www.puuproffa.fi/PuuProffa_2012/fi/puun-rakenne [viitattu 9.5.2018].
25. Bergman, R. Drying and Control of Moisture Content and Dimensional Changes. Teoksessa United States Department of Agriculture Forest Service (toim.) Wood Handbook. Wood as an Engineering Material. Centennial Edition. Madison: Forest Products Laboratory, 2010. S. 1–19.
26. Frihart, C.R. Wood Adhesion and Adhesives. Teoksessa Rowell, R. M. (ed.) Handbook of wood chemistry and composites. Florida: CRC Press, 2005. S. 215–273.
27. Frihart, C. R. & Hunt, C. G. Adhesives with Wood Materials. Bond Formation and Performance. Teoksessa United States Department of Agriculture Forest Service (toim.) Wood Handbook. Wood as an Engineering Material. Centennial Edition Madison: Forest Products Laboratory, 2010. S. 1–23.
28. River, B & Okkonen, A. Delamination of Edge-Glued Wood Panels: Moisture Effects. FPL-RN-0259. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1991.
29. Frihart, C. R. Adhesive Groups and How They Relate to the Durability of Bonded Wood. Journal of Adhesion Science and Technology, Vsk. 23 (4). 2009. S. 601–617.

30. Knorz, M., Torno, S. & van de Kuilen, J-W. Bonding quality of industrially produced cross-laminated timber (CLT) as determined in delamination tests. *Construction and Building Materials*, 133/2017. S. 219–225. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.057> [viitattu 1.8.2018].
31. Gereke, T. & Niemz, P. Moisture-induced stresses in spruce cross-laminates. *Engineering Structures*, Vsk. 32 (2). 2010. S. 600–606. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.11.006> [viitattu 1.8.2018].
32. Gereke, T., Gustafsson, P. J., Persson, K. & Niemz, P. Experimental and numerical determination of the hygroscopic warping of cross-laminated solid wood panels. *Holzforschung*, Vsk. 63 (3). 2009. S. 340–347. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1515/HF.2009.061> [viitattu 1.8.2018].
33. Nairn, J. What Causes Cross Laminated Timber to Crack? *European Journal of Wood and Wood Products manuscript*. 2018.
34. Jansson, E. CLT-rakennuskomponentin halkeilun hallinta urittamalla ja toiminta pientalon sisäilmastossa. Aalto-yliopisto. Kemian tekniikan korkeakoulu. Diplomityö. 2015. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201506303428> [viitattu 8.8.2018].
35. Tytti, A., Tuomas, A., Juha, A., Antti, N., Kari, P., Valtteri, P. & Mikko, V. CLT-koetalon rakennusfysikaaliset tutkimukset. Lapin ammattikorkeakoulu. Sarja B. Raportit ja selvitykset. 2016. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-316-136-8> [viitattu 6.5.2018].
36. Autioniemi, J., Pirttinen, V. & Vatanen, M. CLT-koetalon lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan analysointiraportti Q4/2014. Lapin ammattikorkeakoulu. Sarja B. Raportit ja selvitykset 6/2015. 2015. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-316-079-8> [viitattu 7.5.2018].
37. Lämpötekniisiä ominaisuuksia. *Puuinfo*. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.puuinfo.fi/node/1499> [viitattu 7.5.2018].
38. Stora Enso. Building physics. Thermal protection. 2015. PDF-Dokumentti. Päivitetty 19.10.2015. Saatavissa: <http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/Thermal-protection-EN.pdf> [viitattu 9.5.2018].

39. RakMk C3, Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten lämmöneristys. 2010
40. RakMK-21763, Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Suomen säädöskokoelma. 2017
41. Kempainen, J. Massiivipuुरakentamisen saamien helpotusten vaikutus energiankulutukseen ja päästöihin. Kiinteistö & rakentamisfoorumi. 2017. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://kirafoorumi.fi/wp-content/uploads/2017/11/2017-11-Massiivipuुरakentamisen-saamien-helpotusten-vaikutus-energiankulutukseen.pdf> [viitattu 10.5.2018].
42. CLT-rakenteiden rakennusfysikaalinen toimivuus. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Tutkimuslöstus Nro VTT-S-08847-11. 2011.
43. Mohammad, M. & Munoz, W. Connections in cross-laminated timber buildings. Teoksessa Gagnon, S. & Pirvu, C. (eds.) CLT Handbook. Canadian edition. Quebec: FPInnovations, 2011. S. 1–53.
44. Roche, S. Semi-Rigid Moment-Resisting Behavior of Multiple Tab-and-Slot Joint for Freeform Timber Plate Structures. Lausannen teknillinen korkeakoulu. Arkkitehtuurin, rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. Väitöskirja. 2017. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.5075/epfl-thesis-8236> [viitattu 15.6.2018].
45. Technical data sherpa clt connector. SHERPA Connection Systems GmbH. 2018. PDF-dokumentti. Päivitetty 1.6.2018. Saatavissa: http://en.sherpa-connector.com/dl/082017_cltconnector.pdf [viitattu 3.6.2018].
46. Construction techniques. CLT structures. Tekno Wood. 2017. WWW-dokumentti. Päivitetty 6.9.2017. Saatavissa: <http://www.tekno-wood.com.tr/en/pages/construction-techniques.html> [viitattu 15.5.2018].
47. Hyvärilä, J. & Saarela, E. FCLT-Hanke. CLT-Liitokset. Centria ammatti-korkeakoulu oy. Tutkimus ja kehitys. Raportti. 2018. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://projekti.centria.fi/data/liit-teet/78fadc5f00cf42049eb6814c00be88cepdf> [viitattu 18.5.2018].
48. Naskali., J. Rothoblaas: CLT-kiinnitysjärjestelmät. 2015. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://2015.puupaiva.com/sites/default/files/Sali%20C_Naskali%20Jarno_Liitokset%20ja%20akustiikka%20CLT-rakenteissa.pdf [viitattu 16.5.2018].

49. WALCO® 40 – Wall Connector. Knapp GmbH. WWW-dokumentti. Saata-vissa: <https://www.knapp-verbinder.com/en/product/walco-40-wall-connector/> [viitattu 16.5.2018].
50. X-fix L type. X-fix Greenethic. Schilcher Trading & Engineering GmbH. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.x-fix.at/en/x-fix-l-type/> [viitattu 16.5.2018].
51. Lumi Polar - talojen eritysominaisuudet. Lumi Polar. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://lumipolar.com/fi/honkatalot/honkatalot11> [viitattu 27.6.2018].
52. Wrightman, R. A. Log wall connector system. 2009. U.S. Pat. US20090199497A1.
53. Tannert, T., Meyboom, A., Neumann, O. & Macdonald, I. Shell structures in wood, technical research & testing final report. Brittiläisen Kolumbian yliopisto. Centre for Advanced Wood Processing. Department of Wood Science. Department of Civil Engineering. School of Architecture and Landscape Architecture. Raportti. 2015.

KUVIA CLT-LEVYJEN VALMISTUKSESTA JA DELAMINOINTIKOKEESTA



DELAMINOINTIKOKEEN TULOKSET

A		B	
Liimasaumat (mm)	Delamtot (%)	Liimasaumat (mm)	Delamtot (%)
1566,04	47,28295574	1587,56	39,49897957
1597	37,17595492	1599,4	43,74077779
1581,36	39,19664087	1602,96	33,98899536
1603,12	48,98011378	1594,6	46,22413144
1592,4	44,8015574	1580,2	33,27490191
1611,12	43,34314018	1586,72	39,84571947
1597,68	33,11676932	1594,64	46,15649927
1574,04	31,86196031	1617,88	28,79447178
1611,2	39,99875869	1612,28	34,72969956
1600,48	38,80523343	1600,08	43,1359682
1589,64	46,45705946	1614,04	33,65468018
1594,4	46,16344706	1600,24	49,22011698
1615,44	45,62967365	1590,48	52,84379558
1592,84	32,25936064	1583,36	42,4685479
1628,84	44,26831365	1583,76	42,38584129
1586,92	37,96032566	1597,6	41,99674512
1594,76	41,34916853	1577,68	35,7157345
1601,84	47,46479049	1590,08	51,82254981
1590,16	30,33405443	1606,96	36,62941206
		1591,16	36,73294955
C		D	
Liimasaumat (mm)	Delamtot (%)	Liimasaumat (mm)	Delamtot (%)
1587,32	42,67066502	1612,08	47,45794253
1602,76	43,18737678	1587,68	39,49158521
1587,6	37,22663139	1607,96	36,68685788
1596,32	51,37002606	1602,88	53,57543921
1593,16	31,37286902	1617,12	39,29825863
1597,68	46,75466927	1599,24	36,09089317
1588,32	39,04376952	1610,84	27,87986392
1592,04	47,74503153	1605,4	34,17092313
1584,88	30,96890616	1609,76	38,38149786
1588	48,52959698	1611,48	33,16826768
1589,64	39,81907853	1598	44,02690864
1588,32	42,95041302	1605,32	30,22512645
1595,84	41,93904151	1608,76	48,23466521
1589,32	43,96345607	1586,24	32,0808957
1590,12	37,41604407	1610	48,40310559
1591,76	39,56815098	1583,56	39,17123443
1598,36	39,35283666	1594,64	44,01808559
1585,96	30,44339075	1595,76	44,54617236
		1601,92	30,26555633