

Jaakko Salminen

CLT-RAKENNELEVYN KORJAUSRAKENTAMINEN

Opinnäytetyö

Rakennustekniikka

Huhtikuu 2015

Tekijä (tekijät)	Tutkinto	Aika
Jaakko Salminen	Insinööri (AMK)	Toukokuu 2015
Opinnäytetyön nimi CLT-rakennelevyn korjausrakentaminen		36 sivua 20 liitesivua
Toimeksiantaja Kymenlaakson Ammattikorkeakoulu		
Ohjaaja lehtori Anu Kuusela		
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella CLT-puuelementtilevyn (Cross Laminated Timber) korjausrakentamismenetelmiä ja arvioida eri menetelmien kustannustehokkuutta. Opinnäytetyön lähtökohtana oli tutkimuksen tekijän tekemä havainto, ettei CLT-rakenteiden korjausrakentamisesta ole vielä mitään dokumentoitua tutkimusta, eikä alan osaajilla ole varmaa tietoa, miten menetelmät toimisivat käytännössä. Työn tavoitteena on tehdä yleinen ohje CLT:n vahinkosaneeraukselle, jotta tarpeen vaatiessa tieto on löydettävissä.</p> <p>Työssä tehdyt kokeet toteutettiin osin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun rakennustekniikan laboratoriossa ja osin tutkijan omissa tiloissa. CLT-levyt kokeita varten saatiin Stora Enson Hartolan tehtaalta, ja tarvittavat työvälineet olivat tutkijan omia tai lainattuja. Paloaltistus toteutettiin nuotiopaikalla. Työssä tehtiin havaintoja puuelementtilevyn käyttäytymisestä palo- ja vesivahinkotilanteessa ja tutkittiin eri korjaus- ja kuivaustoimenpiteitä käytännön kokeilla.</p> <p>Tutkimuksessa havaittiin CLT-levyn kestävän hyvin palo-, sekä vesivahinkoja. Mahdollisia ongelmia aiheuttavat kuitenkin mikrobikasvustot suljetuissa rakenteissa, sekä tarvittaessa elementtien vaihtotyön vaikeus ja suuret kustannukset. Palosaneerauskokeissa saatiin hyviä tuloksia pintakäsittelyn osalta, mutta savun hajun poistaminen rakenteesta havaittiin erittäin vaikeaksi.</p>		
Asiasanat CLT, korjausrakentaminen, puuelementti, elementtirakentaminen		



KYAMK

University of Applied Sciences

Author (authors) Jaakko Salminen	Degree Bachelor of Engineering	Time May 2015
Thesis Title Renovation of CLT, Precast Wood Element		36 pages 19 pages of appendices
Commissioned by Kymenlaakson University of Applied Sciences		
Supervisor Anu Kuusela, Senior Lecturer		
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to examine various renovating methods of CLT-elements (Cross Laminated Timber) and to assess the cost-effectiveness of those methods. The thesis was based on the author's observation that the CLT renovation has yet no documented research and that experts of the fields have no certainty how the methods would work in practice. The aim of the thesis was to make a general guideline for renovation of CLT so that the information can be found.</p> <p>Experiments were carried out in the laboratory of Kymenlaakso University of Applied Sciences and in the examiner's own premises. CLT plates were obtained from Stora Enso's factory in Hartola and the necessary tools were the researcher's own or borrowed. Fire exposure was carried out at bonfire site. Observations of CLT's behavior in damage cases and the effect of various renovation and drying methods were made during the experiments.</p> <p>CLT was found to be very sustainable material in every way. However, risks in microbial growth in closed structures were noted, and replacement of elements, if needed, would result high costs. In fire renovation experiments, good results were obtained for surface processing, but removal of smoke odor was found extremely difficult.</p>		
Keywords CLT, renovation, precast wood element, element installation work		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	CLT–RAKENNELEVY	6
	2.1 Tietoa CLT:stä	6
	2.2 CLT:n hyödyt verrattuna betonirakenteisiin	7
3	VAHINKOSANEERAUS	8
	3.1 Palovahingot	8
	3.2 Vesivahingot	10
4	CLT:N ONGELMAKOHDAT	11
	4.1 Pinnan käsittely	11
	4.2 Liitosten tiiveys	13
	4.3 Suljetut rakenteet	14
	4.4 Liiman ominaisuudet	16
	4.5 Jälleenrakentaminen	16
5	TUTKIMUKSET	17
	5.1 Rakenteen kuivaaminen, vesivahinkosaneeraus	18
	5.2 Nokilaskeuman ja hiiltymän poisto sekä palovahinkosaneeraus	21
	5.3 CLT–levyn kuivaaminen	23
6	TULOKSET	24
	6.1 Palosaneeraus	24
	6.2 Vesivahinkosaneeraus	27
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	31
8	LÄHTEET	34

1 JOHDANTO

Tutkimuksessa perehdytään CLT–rakennelevyn ominaisuuksiin korjausrakentamisen näkökulmasta, erityisesti palo- ja vesivahinko tapauksissa. Tutkimuksen lähtökohtana on eri korjausmenetelmien tarkastelu ennakoimalla esimerkiksi tapauksen mahdollisen vesi-, tai palovahingon aiheuttamat vauriot ja vaurioiden laajuus. Tutkimuksen rakennemateriaaliksi valittiin CLT-levyt, koska ne ovat voimakkaasti yleistymässä betonirakenteiden rinnalle kerrostalorakentamisessa, mutta CLT:n vahinkosaneeraukseen liittyvästä korjaamisesta ei ole vielä dokumentoitua, julkista tietoa. Tämä tutkimus pyrkii toimimaan ohjeena tulevien vahinkojen korjaustoimenpiteille, ja antamaan uusia näkökulmia uudisrakentamisessa jo toimiville ratkaisuille.

Koska CLT:tä käytetään lähinnä suurten rakennusten, kuten kerrostalojen materiaalina, keskitetään tutkimus myös enemmän kerrostalorakenteiden tarkasteluun. Kerrostaloissa vesivahinkojen ja palovahinkojen laajuudet ovat ongelmallisempia, koska rakennuksissa on useita erilaisia tiloja (toimistotiloja, liiketiloja) ja asuntoja. Vesivahingot leviävät herkästi yläkerroksista alaspäin, jolloin vahinko on yleensä sitä suurempi mitä korkeammalla vahingonaiheuttaja on. Vastaavasti palovahingot laajenevat herkästi korkeissa rakennuksissa ylöspäin ja niiden sammuttaminen on yleensä hankalaa. Rappukäytävät, talotekniikan hormit ja suuret ilmanvaihtojärjestelmät edesauttavat merkittävästi palon laajenemista. Palo-osastoinnista vuoksi kerrostalopalot rajautuvat huoneistokohtaisesti, mikäli ovi- ja ikkunalasit säilyvät ehjänä sammutustöiden alkuun asti. Jos ikkunat hajoavat ja palo saa happea suoraan ulkoilmasta, sen sammutus vaikeutuu, ja palo saattaa levitä aukon yllä oleviin rakenteisiin ja aiheuttaa julkisivulle suurta vauriota. (1.)

Tutkimuksen tekijä on toiminut noin kuusi vuotta vesi- ja palovahinkosaneerauksissa työntekijänä ja työnjohtotehtävissä. Tutkimuksen tekijän työkokemuksen, koulutuksen, ja asiantuntijoiden haastatteluiden perusteella pyrittiin aikaansaamaan kokeellisesti samankaltaiset olosuhteet, kuin oikeissa vahinkokohteissa. Vahingoittuneet koepalat yritettiin sen jälkeen korjata, ja lopuksi analysoitiin eri menetelmien toimintaa käytännössä, lopputulosta sekä kustan-

nustehokkuutta. Kustannustehokkuutta arvioitiin teoreettisesti työmäärän, tarvittavan kaluston, purkujätteen ja työn nopeuden perusteella.

Tutkimuksessa vertaillaan lisäksi puuelementin toimivuutta betonirakenteisiin verrattuna. Lähtökohtana palosaneeraukselle pidettiin hirsirakenteille tehtyjä työmenetelmiä, koska CLT-rakenteille ei ole vielä tehty mitään julkista, dokumentoitua korjaustyötä. Vertailukohtana elementtien vaihtotyöhön pidettiin ontelolaatoille tyypillisiä työmenetelmiä.

2 CLT-RAKENNELEVYT

2.1 Tietoa CLT:stä

CLT (Cross Laminated Timber) on maailmanlaajuisesti voimakkaasti yleistynvä rakennejärjestelmä. CLT-levyt soveltuvat pientalojen lisäksi kerrostalojen kantaviksi rakenteiksi, jolloin niitä käytetään vastaavasti kuin betonielementtejä on käytetty jo vuosikymmeniä. Puumateriaalin käyttö etenkin kerrostalojen runkorakenteena on mielenkiintoinen niin arkkitehtuurin, rakennetekniikan kuin ekologisuudenkin näkökulmasta. (2.)

CLT-levyt ovat massiivipuisia elementtejä, jotka koostuvat ristikkäin liimatuista lamelli- eli puulevykerroksista. CLT-levyt kasataan samalla periaatteella, kuin normaalitkin liimapuurakenteet. Käyttökohteesta riippuen kerroksia (lamelleja) voi olla 3, 5, 7 tai 8. Suuriin jänneväleihin ja kantavuuksiin voidaan käyttää useita levyjä päällekkäin. Suurin osa lamelleista on kantavaan suuntaan suunnattuja, ja osa vaakasuuntaan suunnattuja. Ristiinliimauksen ansiosta CLT on luja, tiivis, jäykkä ja muotopysyvä rakennusmateriaali. CLT-levyt valmistetaan suurina, korkeintaan 2,95 x 16 metrin levyinä, mikä mahdollistaa nopean, kustannustehokkaan rakentamisen ja minimoi levyjen välisten pusku-liitosten määrän. Liimauksessa käytetään ympäristöystävällisiä liimoja, jotka eivät sisällä formaldehydejä. Puuelementti on betonielementtiin verrattuna kevyt, jolloin se ei vaadi yhtä suurta nostokalustoa asennettaessa. (2; 3.)

CLT sopii käytettäväksi niin seinien, kattojen kuin välipohjienkin runkorakennusmateriaaliksi. CLT soveltuu myös pintamateriaaliksi, sillä CLT-pinta voidaan jättää näkyviin sellaisenaan. Suomessa CLT-levyihin tehdään tehtaalla aukotus valmiiksi tilaajan arkkitehtisuunnitelmien mukaan. CLT:n erinomainen jäykkyys mahdollistaa korkeat rakenteet sekä suuret aukot ilman lisäjäykisteitä. (2; 4.)

Vaakarakenteisiin voidaan toteuttaa lisäksi pilarittomia uloke-, katos- ja rappuratkaisuja. Runkomateriaalin voi jättää näkyviin tai verhoilla. Ulkopuolelta CLT-rakennukset voidaan verhoilla puulla, rapattavilla eristeillä tai ohutrappauslevyillä. Minimialisen elämisensä (työstötarkkuus jopa ± 1 mm) ansiosta CLT-levy on helppo yhdistää muihin rakennusmateriaaleihin kuten lasi tai teräs, mikä tarjoaa lukuisia mahdollisuuksia arkkitehtuurille, rakenteille ja tyyliille. (2.)



Kuva 1. Kaksi 3-lamellista CLT-levyä päädyistä kuvattuna (4.)

2.2 CLT:n hyödyt verrattuna betonirakenteisiin

CLT on kehitetty alun perin Sveitsissä parikymmentä vuotta sitten. Tällä hetkellä CLT-levy on nopeasti yleistynyt puurakentamisen materiaali varsinkin Keski-Euroopassa, ja siellä onkin jo useita valmistajia ja tehtaita. Stora Enso tuo Suomeen Itävallan tehtailla valmistamia CLT-elementtejä. Kuhmoon on

avattu vuonna 2014 Suomen ensimmäinen varsinainen CLT-tehdas, Cross-Lam Oy. (4.)

Stora Enso on jo toteuttanut useita CLT-kohteita Suomessa. Tunnetuin on kenties Suomen luontokeskus Haltia Espoon Nuuksiossa, joka on Suomen ensimmäinen CLT-puuelementtitekniikalla toteutettu julkinen rakennus. Tulevista kohteista ehkä merkittävin on puukaupunkikortteli Wood City, jonka Stora Enso toteuttaa yhdessä SRV Oyj:n kanssa Helsingin Jätkäsaareen. (4.)

CLT:n etuja rakentamisessa ovat muun muassa seuraavat: (2).

- ekologisuus
- energiataloudellisuus
- jäykkyys, lujuus
- jäykistävä rakenne
- rakentamisen nopeus
- ilmatiivis rakenne ilman muovia
- paloturvallisuus
- terveellinen sisäilma
- hyvä äänieristävyys
- suunnittelun joustavuus
- korkea laatu, mittatarkkuus

3 VAHINKOSANEERAUS

3.1 Palovahingot

Palovahingot syntyvät Suomessa yleisimmin sähkölaitteiden tai sähköjohtojen rikkoutumisesta, tai tulen varomattomasta käsittelystä. Rakennusten palovahinkojen laajuudet vaihtelevat aina rakennuksen koon ja tulipalon rajautumisen mukaan. Tulipalossa rakennus vaurioituu rakenteellisesti, ja savukaasut ja noki aiheuttavat pieninäkin määrinäkin esteettistä muutosta sekä hajuhaittaa. Voimakkaassa tulipalossa usein vesiputket rikkoutuvat, mikä aiheuttaa sa-

manaikaisesti laajan vesivahingon kohteessa. Rakenteiden kastumista aiheuttaa myös sammutustyössä käytettävä vesi. (5.)

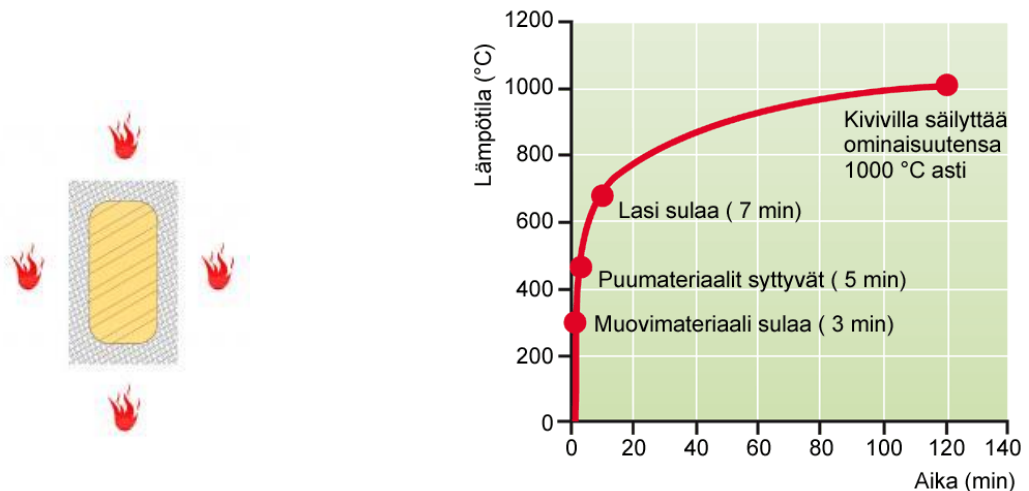
Pienimmät palot saattavat olla niin sanottua kyttemistä, jolloin ilmaan vapautuu vähän nokea ja palokaasuja, vaikka varsinaista liekehtimistä ei esiinnykään. Palo saattaa rajautua huonekohtaisesti polttaen lähestulkoon kaiken palavan aineksen huoneesta, mutta seinien ja aukkojen kestäessä lämmön vaikutuksen, happi loppuu huoneesta ja palo sammuu itsestään. Usein tällaisissa tapauksissa betonirakenteisissa huoneistoissa riittää pinnoitteiden uusinta. Jos runkorakenteet ovat kärsineet vaurioita, niiden kestävyys täytyy tarkastuttaa ammattilaisella ja tehdä tarvittavat vahvistustoimenpiteet. (1.)

Suuremmat tulipalot syntyvät tyypillisesti tilanteissa, joissa palo saa happea suoraan ulkoilmasta ja palavan materiaalin aiheuttama kuumuus riittää laajentamaan paloa aina seuraavaan tilaan, aukoista tai seinien läpi. Suurpalot saattavat kattaa kokonaisia kerrostaloja, ja erityisesti hallirakennukset ovat alttiita laajoille vahingoille suuren tilavuutensa ja heikon osastoitavuutensa takia. Palossa vahingoittuneiden irtaimien ja rakenteiden vaurioiden laajuus vaihtelee paljon pintamateriaalien, paloajan ja jopa paloaineksen mukaan. Erityisesti muovit, rasvat ja kemikaalit levittävät palaessaan ilmaan haitallisia yhdisteitä ja niiden aiheuttama nokilaskeuma on vaikeampi käsiteltävä, kuin esimerkiksi puhtaan puun palamisen aiheuttama laskeuma.

Taulukko 1. Sähköpalojen osuus vuotuisista rakennuspaloista (8.)

Vuosi	2008	2009**	2010	2011	2012
Sähköpalot (kpl)	1255	960	630	592	570***
Sähköpalokuolemat (kpl)	17	22	21	15	11
Kaikki palokuolemat (kpl)	103	97	80	67	75
Rakennuspalot (kpl)	4485	2736	2786	2543	2413

Puun lämpötilan noustessa 100 asteeseen alkaa siitä höyrystyä kemiallisesti sitoutumaton vesi. Kuivan puun terminen pehmeneminen alkaa noin 180 °C:n lämpötilassa ja saavuttaa maksiminsa 320 - 380 °C:ssa. Tällöin puun ligniinin, selluloosan ja hemiselluloosan sidokset alkavat hajota. Kostean puun pehmeneminen alkaa aikaisemmin, jopa 100 °C:ssa. Puun syttymislämpötilaan vaikuttaa se, kuinka kauan puu on lämmölle alttiina. Yleensä puu syttyy 250 - 300 °C:ssa. Räjähdysmäinen palon leviäminen tapahtuu noin 600 °C:n lämpötilassa. (5; 7.)



Kuva 2. Puun hiiltyminen ja tulipalon eteneminen (4; 8.)

3.2 Vesivahingot

Vesivahingot syntyvät tavallisimmin käyttö- ja lämmitysvesiputkien sekä viemäreiden vuodoista tai kodinkoneiden rikkoutumisesta. Vesivahinkoja aiheuttaa lisäksi viemärien tukkeutuminen ja käyttäjien toimintojen aiheuttamat roiskevedet. Vahingon laajuus vaihtelee paljon vesimäärästä, kyllästyskestävyydestä ja rakenteista, mutta usein vaurioita syntyy ainakin pintarakenteisiin (parketit, laminaatit, tapetit, maalit), jotka ovat herkkiä kastumiselle. Vesi vaikuttaa haitallisesti myös eristekerrokseen, koska ne menettävät eristävyytensä kastuessaan. Vesivahingon laajuus todetaan erilaisilla mittausmenetelmillä, rakenteita avaamalla ja aistinvaraisten tutkimuksin. (1; 10; 11.)

Vesivahingon aiheuttamat vauriot korjataan yleensä poistamalla kastunut tai märkä pinnoite sekä kastuneet eristeet ja kuivaamalla runkorakenteet, joita ei ole kustannustehokasta tai teknisesti järkevä poistaa. Eri rakennusmateriaalien kuivumisajat vaihtelevat koosta, solurakenteesta, haihtumispinta-alasta ja lämpötilasta riippuen. Tavallisesti rakenteiden perusteellinen kuivaus kestää koneellisestikin usean viikon ajan. Kaikkia rakenteita ei voi kuivata liian nopeasti, koska se aiheuttaa esimerkiksi betonissa halkeilua. (1; 11.)

Vesivahinkosaneerauksessa merkittävä tekijä on olosuhdehallinta, koska vesivahinkojen yhteydessä rakenteisiin muodostuu mikrobien ja homeen kasvuille otolliset olosuhteet. Rakenteissa homeet löytävät kasvualustaa, jos materiaalin pinnan kosteus pysyy pidempiä aikoja 75-80 %:n yläpuolella ja rakenne sisältää tai sen pinnalla on orgaanista materiaalia. Jos rakenteen kosteus pysyy kuukausia 90-95 %:n yläpuolella, homesienten lisäksi alkaa esiintyä lahoitajasieniä. (1; 10; 11.)

4 CLT:N ONGELMAKOHDAT

4.1 Pinnan käsittely

CLT-levyt aiheuttavat joissakin tapauksissa ominaisuuksiensa vuoksi ongelmia korjausrakentamiselle. Koska CLT-levyt toimivat joskus sekä pinta- että runkorakenteena, edellyttää se erityisesti palosaneerauksen kannalta tarkkaan harkittuja toimenpiteitä. Raaka puupinta antaa tilalle tietynlaisen ilmeen ja sitä on alettu lisätä erityisesti kattopintojen arkkitehtuurisena tehokeinona toimisto- ja asuintiloissa (kuva 5.).



Kuva 3. CLT säilytetty sisäkaton pintamateriaalina (4.)

Tulipalossa noki, hajupartikkelit ja kaasut tarttuvat ja imeytyvät raakaan puupintaan jopa 10 mm syvälle jo ilman varsinaista hiiltymää ja niiden poistaminen on toisinaan erittäin vaikeaa. Puuta ei pystytä juuri kemiallisesti pesemään tai käsittelemään, koska lisäämällä siihen lämmintä vettä, puun huokokset avautuvat ja noki imeytyy entistä syvemmälle puuhun. Puurakenteen kapselointikaan ei onnistu, koska puun tulee säilyttää sille ominainen hengittävyys. Kapseloinnissa haitalliset yhdisteet suljetaan peittämällä ne ilmatiiviillä rakenteella, yleensä erilaisilla pinnoitteilla. Kapselointia käytetään kosteussulkuna, hajusulkuna, pohjusteena ja eri haitta-aineiden sulkuna. Erilaisia haitta-aineita ovat esimerkiksi asbesti, kaseiini, PAH-, VOC-, ja PCP-yhdisteet. (1; 4; 7.)

Puurakenteiden tavallisin saneerausmenetelmä on poistaa mahdollisimman paljon vahingoittunutta puuta, ja tarvittaessa vahvistaa rakennetta liittämällä uutta puuta tilalle. Tämä menetelmä toimii hyvin pientaloissa ja varsinkin rakenteissa, joissa esteettisillä seikoilla ei ole merkitystä, kuten esimerkiksi yläpohjissa. Julkisivuja käsitellä voimakkaillakin puhdistusmenetelmillä, koska niiden pinnoitteet on yleensä suunniteltu kestämaan hyvin erilaisia rasiuksia. Savunhaju kuitenkin tarttuu ja imeytyy CLT:n tapauksessa raakapaiseen pin-

taan hyvin, ja levystä voidaan joutua poistamaan paksukin kerros puuta, että hajunlähde saadaan poistettua. Palomitoituksessa CLT:n todetaan hiiltyvän n. 15 mm, mutta palosaneeraustyössä joudutaan usein poistaa riittävän lopputuloksen aikaansaamiseksi jopa 10 mm paksumpi kerros, vaihdellen puun käyttötarkoituksen ja sijainnin mukaan. Esimerkiksi tuulettuvissa yläpohjissa voidaan hyväksyä lievät noki- ja hajujäämät, muttei näkyvissä sisärakenteissa. Poistettaessa huomattava kerros kantavasta rakenteesta, on suoritettava rakenteelle uusi lujuuslaskenta varmistuakseen siitä, että rakenne kestää sille aiheutuvat rasitukset myös jatkossa. Rakenteen kestävyys arviointi sekä vastuu korjauksen vaikutuksista kuuluvat korjausrakentajalle. (1.)

CLT:n kestävyys palotilanteessa on kuitenkin tavallista puutavaraa parempi. Laattamainen, massiivinen rakenne estää normaalille suorakulmaiselle puurungolle tavanomaisen hiililymisen joka suunnasta ja tiivis pinta hiillyttyään suoja puuta hyvin tulipalolta. Esimerkiksi hiillyttyään 15 mm, ehjän puun lämpötila on enää vain noin 100 °C. CLT:n hiililymisnopeus on 0,7 mm minuutissa, kun taas normaalilla sahatavaralla vastaava luku on 0,8 mm minuutissa. (4; 8; 12.)

4.2 Liitosten tiiveys

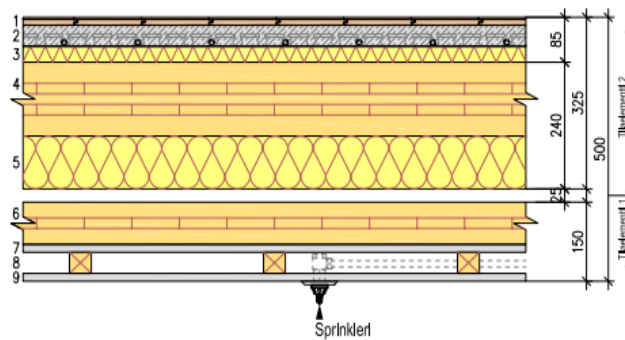
Liitosten tiiveys vaikuttaa paljon veden, noen, savun ja hajupartikkeleiden siirtymiseen osastoista toiseen. CLT:n liitokset ovat yleensä hyvin tiiviitä asennustarkkuuden ja pienen elämisen takia (4.). Kuitenkin ilmatiiviiltäkin vaikuttava rakenne usein päästää veden läpi jos vesi ei imeydy sitä ennen rakenteisiin. Esimerkiksi betonirakenteissa käytettävät juotosvalut, akryylimassat ja neopreeninauhat eivät täysin estä veden läpäisyä. Vesi kuljettaa mukanaan likaa, mikä ilmenee usein tummentumina eri rakenteissa.

Noki leviää vettä heikommin läpi rakenteista, mutta leviää savukaasujen mukana nopeasti suuriinkin ilmatilavuuksiin ja pieniinkin rakoihin. Puurakenteet pyritään samaan kaikilta osin diffuusioavoimiksi kosteustasapainon saavuttamiseksi, joten rakenteiden väliin jäävät ilmaraot kuljettavat nokea ja savukaasuja laajalle, vaikka varsinainen tulipalo rajautuisikin melko pienelle alueelle.

Palosaneerauksessa joudutaan usein purkamaan rakennetta esiin, jotta päästään käsiksi nokilaskeumaan. Vaikka rakenne suljettaisiin uudestaan välittämättä noesta, haju tunkeutuu jossain määrin läpi rakenteista. Tällöin otetaan riski, että rakenne joudutaan myöhemmin avaamaan ja nokilaskeuma poistamaan. Hajun voimakkuuden ja haitallisuuden kokeminen vaihtelee paljon eri henkilöiden välillä eikä siihen ole mahdollista käyttää yleispätevää mittaria. Esimerkiksi asunnon seuraava asukas saattaa kokea hajun sietämättömäksi ja reklamoida asiasta korjaustoimenpiteen virheenä. (1; 12.)

4.3 Suljetut rakenteet

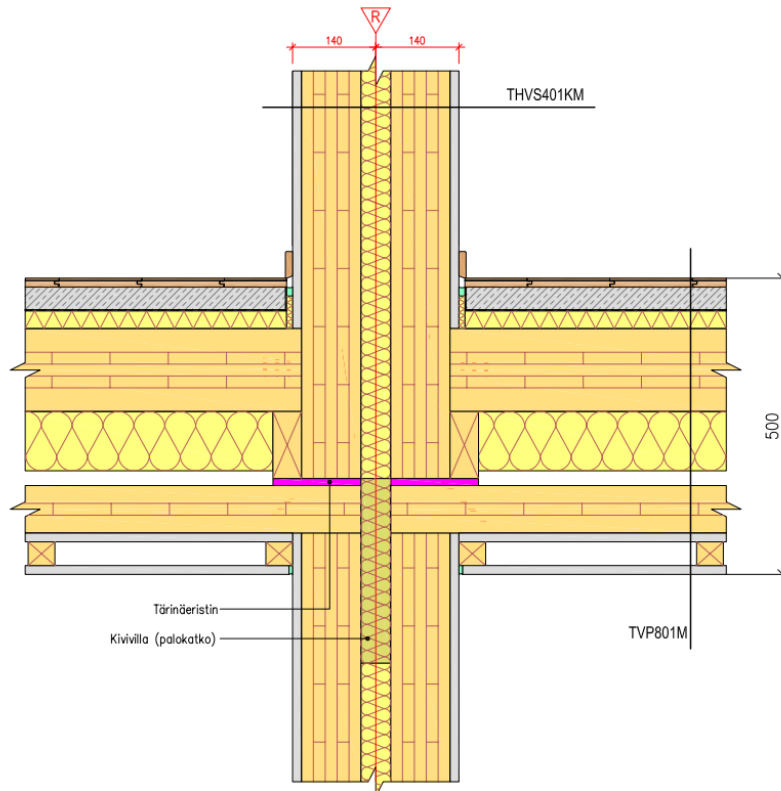
Rakenteiden kuivauksen kannalta CLT:n kanssa aiheuttaa ongelmia sen käyttö suljettuina, ja samalla kantavina, rakenteina esimerkiksi kerrostalojen välipohjana. Tällöin eriste on suljettu kantavien CLT-levyjen väliin ääni-, palo- tai lämmöneristeeksi. CLT:n ominaisuudet antavat sille hyvä lujuusarvot, mutta ääni-, palo- ja värähtelymitoituksessa joudutaan usein lisäämään rakenteiden väliin lisäeristeitä, ilmarakoja ja useita eri kerroksia. Haasteita korjausrakentamiselle tuovat myös alemman runkorakenteen liittyminen kantavien seinien alle.



NRO	TARKOITUS	TUOTE	MITTA [mm]
1	Lattiapinnoite	Parketti ARK mukaan	15
2*	Palosuojaus (A2-s1, d0) Valusuoja/Lämmitysputkien kiinnitys	Pikaplaano RAK mukaan Asennuslevy	40
3	Ääneneristys (A2-s1, d0)	Askelääneneristevilla	30
4	Kantava rakenne	CLT-levy RAK mukaan	140
5	Ääneneristys (A2-s1, d0)	Mineraalivilla	100
6	Alakaton kannatus	CLT-levy RAK mukaan	80
7*	Palosuojaus (A2-s1, d0)	Palokipsilevy	15
8	Installaatiotila	Puurangat k400	40
9*	Palosuojaus (A2-s1, d0)/Sisäverhous	Palokipsilevy	15

*) Toimii myös rakenteen ääniteknisenä massana

Kuva 4. Rakenneleikkaus, suljettu CLT + eriste + CLT –rakenne (13.)



Kuva 5. Rakenneleikkaus, suljettu CLT + eriste + CLT–liitos (13.)

Korjausrakentamisen kannalta yllä esitetty rakenne on varsin vaikea, sillä mikäli eristetilaan pääsee kosteutta tai nokea, on sen poistaminen erittäin hankalaa rakenteen vaikea purettavuuden vuoksi. Varmin ratkaisu olisi tässä tilanteessa avata rakenne ja poistaa eriste, korvata se uudella, ja kasata rakenne taas kasaan sen kuivuttua. Kyseisessä esimerkkitapauksessa ongelmana on CLT:n laattamainen rakenne ja sen toimiminen kantavana rakenteena. Aukon tekeminen levyyn aiheuttaa väistämättä muutoksia kantavuudessa ja vaatii näin uudet laskelmat tai varman ymmärryksen rakenteen kestävydestä ja statiikasta. Mikäli asiaan perehtymätön lähtisi purkamaan rakennetta ilman suunnitelmia, seuraukset voisivat olla katastrofaaliset. Varomattomuus saattaisi johtaa rakenteiden romahtamiseen ja jopa hengenvaaraan.

Tapauskohtaisesti eristetila joudutaan avaamaan miltei koko elementin alueelta, jolloin työnaikaisen tuennan tekeminenkin tulee hankalaksi. Tällöin tuentaa tulisi siirtää ja rakennetta korjata vaiheittain etenemällä alueen toisesta reu-

nasta toiseen, tai poistaa koko alueen elementti kokonaan pois. Laajimmillaan tässä tilanteessa voidaan puhua koko huoneistojen välisen välipohjan purkamisesta. Levyyn aukon tekeminen on työlästä. CLT on massiivista puuelementtiä, minkä vuoksi sen leikkaaminen on vaikeaa.

4.4 Liiman ominaisuudet

Joskus liimat ja lakat reagoivat voimakkaasti sammutusveteen, koska sammutusveteen lisätään aineita, jotka parantavat sen sammutuskykyä. Tällaisia aineita ovat esimerkiksi saippuat ja vedenpehmenneaineet. Aineet vähentävät veden pintajännitystä, jolloin se tunkeutuu palavaan rakenteeseen tehokkaammin. CLT:n liiman ominaisuudet saattavat muuttua myös tulipalon vaikutuksesta, liian nopeasta kuivumisesta tai ylipäättään kastumisesta. (1.)

4.5 Jälleenrakentaminen

CLT:n vahinkosaneeraus voi koitua hankalaksi sen työmaaoloissa vaikean työstettävyytensä vuoksi. Levyt ovat painavia ja kookkaita, sekä liitokset hankalia jälleenrakentamisvaiheessa. Varsinkin sisäseinä- ja välipohjaelementtejä on käytännössä mahdoton vaihtaa kustannustehokkaasti kokonaisina elementteinä, joten paikkakorjaus on todennäköisin vaihtoehto kyseisten elementtien vaurioiden korjaamiselle. Betonirakentamiseen ja ontelolaattoihin verrattuna CLT-levyt ovat mitoiltaan jopa suurempia.

Mikäli levyyn tehdään aukkoja, on vaikeaa määrittää työmaalla, kuinka paljon tämä vaikuttaa rakenteiden kantavuuteen, koska osa levystä on todennäköisesti vielä piilossa. Avattujen rakenteiden jälleenrakentaminen on ongelmallista, sillä työmaalla on vaikeaa toteuttaa tehdasmaiset olosuhteet ja prässätä levyn liimaus riittävällä voimalla kiinni. Käytännössä rikottu levy ei korjattunaakaan voi enää koskaan saavuttaa vastaavaa lujutta kuin ehjä. Työmaaoloissa ei pystytä luomaan tehdaslaatua vastaavaa liimaliitosta levyyn ja mekaaniset liittimet siirtävät levyn kuormaa käytännössä paljon huonommin kuin massiivinen elementti siirtäisi. Mikäli aukko korjataan muulla kuin vastaavalla puuelementillä, kuten esimerkiksi puukoolauksella, rakenteen rasitukset eivät väli-

ty yhtä tasaisesti kuin levyssä. Aukon vahvikkeeksi joudutaan tapauskohtaisesti lisäämään rakenteen alle tukevia osia, pilareita tai palkkeja.

Aukkojen lisäksi erilaiset liitoskohdat saattavat koitua ongelmallisiksi jälleenrakennuksessa. Elementtilevyt liittyvät monissa Puuinfon julkaisemissa, valmiissa leikkauksissa, kantavan seinärakenteen alle, mikä tekee elementtien vaihtamisesta erittäin työlästä ja kallista. Tässä tapauksessa jouduttaisiin todennäköisesti soveltamaan hirsirakenteille ominaista kengittysmenetelmää, jossa ylös tunkilla nostetusta, kantavasta rakenteesta puretaan vain pieni osa kerrallaan ja ennen seuraavan osan purkua, kasataan edelliseen kohtaan uusi rakenne kantamaan seuraavan osan kuorma. Työmenetelmänä kengitys, tai vastaavanlainen toimenpide on hidas ja työläs toteuttaa. (3: 11; 6.)

CLT:n leikkaaminen on työlästä ja vaikeaa, koska levyn rakennepakkuus on suuri ja puun syyt ohjaavat sahan terää sivuun. Tasaisen reunan leikkaaminen on vaikeaa ja epätasaisen reunan liittäminen uuteen rakenteeseen lisää työvaiheen pituutta ja vaativuutta. Leikkaaminen vaatii todennäköisesti tehokkaan, jäykän terän ja suuren kierrosnopeuden, mutta esimerkiksi tavallisen käsisirkkelin terän leikkaussyvyys (maksimi leikkaussyvyys noin 50 mm), ei riitä koko levyn läpäisyyn. Tällöin leikkaamiseen vaaditaan erikoistyökaluja, joita ei välttämättä muissa rakenteissa tarvittaisi lainkaan. Parhaiten työssä toimiva saha olisi todennäköisesti keskikokoinen polttomoottorikäyttöinen moottorisaha, mutta koska sahaustarkkuus riippuu paljon sahan käyttäjän kokemuksesta, saattaa reuna tulla helposti epätasaiseksi.

5 TUTKIMUKSET

Korjausrakentamismenetelmiä ja -tapoja tutkittiin erilaisin tutkimuksin. Tutkimukset suoritettiin koepaloilla, jotka altistetaan tulelle, savulle tai vedelle. Koepalat ovat 3-lamellista, 120 mm ja 80 mm Stora Enson CLT-levyä ja leikattu noin 0,5 m x 0,5 m paloiksi. Paloa imitoivat altistamiset suoritettiin turvallisuussyistä ulkona, ja kosteusaltistukset ja pintakäsittelykokeet toteutettiin Kymenlaakson ammattikorkeakoulun rakennustekniikan laboratoriossa. Kokeita suoritettaessa noudatettiin turvallisuusmääräyksiä, käytettiin tarvittavia suo-

javarusteita (suojalasit, kuulosuojaimet, työkasineet, hengityssuojaimet, työvaatetus, turvakengät) ja varattiin paikalle alkusammutuskalustoa (jauhesammutin 5 kg, vesiämpäri). Erikoiskalusto, kuten kastelukokeessa käytettävä tip-päämpäri valmistettiin omatoimisesti. Palosaneeraus-kappaleiden koepoltto suoritettiin nuotiopaikalla.

Kappale	Altistus	Menetelmä
PALO 1	Palo	Soodapuhallus
PALO 2	Palo	Jyrsintä
PALO 3	Palo	Mekaaninen työstö
SAVU 1	Savu	Kevyt hionta (paperi)
SAVU 2	Savu	Höyrypesu
SAVU 3	Savu	Nokisienipyyhintä
LEVY 1	Vesi	Lämpölevy
LEVY 2	Vesi	Tilakuivaus
LEVY 3	Vesi	Mikrokuivaus

Taulukko 2. Koepalataulukko

5.1 Rakenteen kuivaaminen, vesivahinkosaneeraus

Puurakenteena CLT-levyn kuivaus on helppoa, koska raaka puu (sahatavara-pinta) on erittäin hygroskooppinen materiaali. Puuhun imeytynyt kosteus siirtyy näin ollen tehokkaasti pois rakenteesta haihtumalla. Koska tässä tutkimuksessa paneudutaan erityisesti CLT:n kaltaisten elementtilevyjen ongelmiin korjausrakentamisessa, keskitytään kuivaamistarkasteluissa eristetilan mahdolliseen kuivaamiseen.

Käytännön kokeilla testattiin kolmea (3) mahdollista kastumistapausta, kolmella (3) eri kuivausmenetelmällä. Ensimmäisessä kokeessa koekappale kasteltiin **kyllästäväällä**, eli kappale upotettiin täysin veden alle ja sitä säilytettiin siellä noin kuusi viikkoa. Tällä kokeella simuloitiin pitkäaikaisen kastumisen aiheuttamia reaktioita levyssä ja tarkasteltiin levyn kestävyysmuutosta verrattuna kyllästäättömiin levyihin. Samalla todettiin kuinka paljon vettä on sitoutunut kappaleisiin.

Toisessa kokeessa kappaletta kasteltiin **tiputtamalla** vettä levyn päälle koetta varten erikoisvalmistetun ”tippaämpäriin” avulla. Tippaämpäri valmistettiin niin että ämpäri vuotaa levyn päälle vettä noin kymmenen litraa kahdessatoista tunnissa. Tällä kokeella simuloitiin pienen, mutta pitkäaikaisen vuodon aiheuttamaa vauriota levyssä ja tutkittiin, kuinka helposti levy päästää vettä imeytymään suoraan läpi pystysuunnassa (LIITE 2, kuva 26.). Veden kastelema alue rajattiin ja tiivistettiin huolellisesti, jotta vesi ei päässyt leviämään liian suurelle alueelle. Samalla kokeella pystyttiin myös arvioimaan levyn pinnan herkkyyys pienille roiskevesille. Koekappaleita kasteltiin noin kuusi viikkoa.

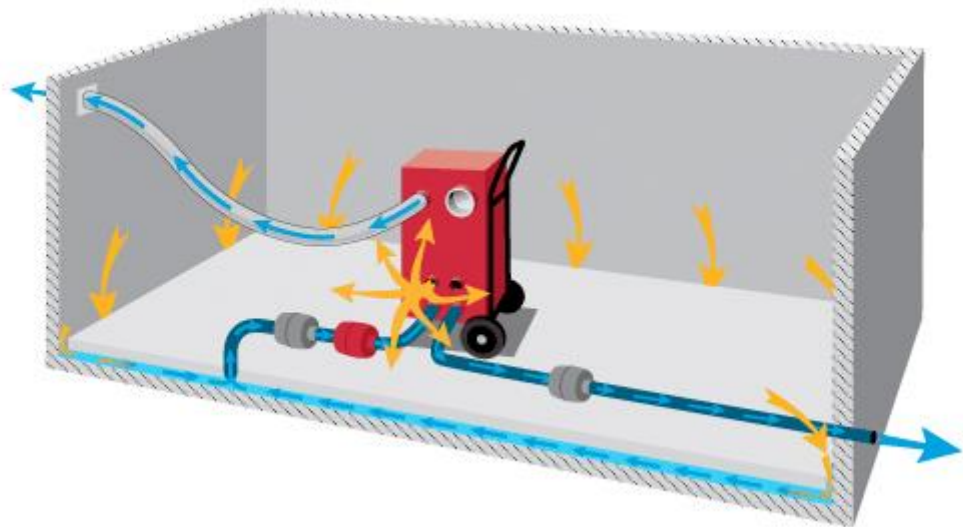
Kolmannessa kokeessa kappaleista kasattiin pienikokoinen Runko Pes 2.0 TDV402KM-ohjeen mukainen rakenne, missä askeläänieriste oli suljettu kahden CLT-levyn väliin. Kokeessa kappaleet kasteltiin **valuttamalla** vettä levyn päälle niin, että se virtasi kohti levyn reunaa. Reuna oli suljettu vanerilla pystysuunnassa ja tiivistetty alareunasta ja sivuista silikonilla. Kokeella simuloitiin rakenteiden liitosten vedenpitävyyttä ja kastuneen eristetilan kuivausta (LIITE 2, kuva 26.). Rakenteiden väliin ja eristetilaan päässyt kosteus voidaan pyrkiä poistamaan myös erilaisilla kuivausmenetelmillä, jotka eivät vaadi rakenteen laajamittaista avaamista ja eristeenpoistoa.

Tilakuivausmenetelmässä rakenteiden kuivaus perustuu kostuneista rakenteista haihtuvan kosteuden kuivaamiseen ilmankuivaimilla ja puhaltimilla. Tilakuivaus soveltuu hyvin suurten pinta-alojen, vaikeamuotoisten pintojen ja esimerkiksi puurunkojen kuivaukseen. Tilakuivauksella ei saada tehokkaasti kuivattua rakenteita pintaa syvemmältä, koska absoluuttisen kosteuspitoisuuden eroa syvemmällä rakenteessa ja rakenteen pintaosien välillä ei saada kasvatettua yhtä hyvin kuin verrattaessa rakenteen lämmittämiseen täsmäkuivaimien, kuten lämpölevyjien avulla. (7.)

Lämpölevykuivaus perustuu rakenteen lämmittämiseen ja veden haihduttamiseen pois rakenteesta. Menetelmä soveltuu varsin hyvin kuumuutta kestäville rakenteille, kuten betonille, mutta puulle sovellettuna on oltava tarkkana, ettei puu tummu tai pala levyn kuumuuden vaikutuksesta. Väärin käytettynä lämpölevyt saattavat esimerkiksi sulattaa jopa EPS-eristeen betonilaatan alta.

Lämpölevy lämpenee jopa 150 asteeseen. Rakenteen lämpötilaa voidaan kuitenkin säädellä käyttämällä ajastinta, tai lämpötilanohjausta, joka automaattisesti katkaisee virran lämpölevystä rakenteen saavuttaessa tietyn lämpötilan. (1; 7.)

Imukuivausmenetelmällä rakennekerrokseen porataan tulo- ja poistoilmakaukkoja, ja koneellisesti kierrätetään turbiinikuivaimella kostea ilma pois rakenteista samanaikaisesti kuivaten huonetilassa olevaa korvausilmaa. Imukuivaus soveltuu kaikille rakenteille, joissa ilma saadaan liikkumaan eristetyssä tarpeeksi hyvin. Imukuivauksen haittapuolia on myös sen käytännön toteutuksen suunnittelu. Imukuivausta asennettaessa tulee huolehtia ilman riittävästä liikkumisesta. Erityisesti ongelmakohtia ovat kulmat, nurkat ja rakenteiden liitoskohdat. Näissä kohdissa ilman virtaaminen on vaikeampaa ja kuivuminen hitaampaa, koska ilmavirta saattaa kokonaan kiertää kastuneen kohdan. (12; 14.)



Kuva 6. Imukuivausmenetelmä (14.)

Säteilykuivausmenetelmä kuivaa rakennetta samaan tapaan kuin mikroaaltouuni toimii. Mikroaaltosäteily on sähkömagneettista aaltoliikettä, joka imeytyy tehokkaasti vesipitoisiin aineisiin ja muuttuu niissä lämmöksi. Mikroaallot

liikuttavat vesiatomeja, vesi lämpenee ja lopulta höyrystyy pois rakenteesta. Säteilykuivaus on hyvin nopeaa verrattuna tavanomaiseen tilakuivaukseen, mutta säteilyyn liittyy turvallisuusriskejä. Koneiden ollessa käynnissä tulee noudattaa säteilyturvakeskuksen ohjeita turvallisuuden takaamiseksi. Menetelmä ei aukottomasti sovellu sellaisten rakenteiden kuivaamiseen, jotka eivät kestä koneiden aiheuttamaa lämpösäteilyä. Puurakenteita kuivatessa tulee paikalle aina järjestää vartiointi mahdollisen paloriskin vuoksi. Säteilykuivausmenetelmää käytettäessä ei voida kuitenkaan olla täysin varmoja rakenteen kuivumisesta, vaan sen lopputulos tulee todeta paikallismittauksilla. Kuitenkaan tällöinkään ei saada täyttä varmuutta mikrobikasvun kehittymisestä. Säteilykuivaus toimii toisaalta imukuivausta paremmin, koska se kuivatessaan rakennetta samalla tappaa osan mikrobeista. (15.)



Kuva 7. Mikrokuivausmenetelmä (15.)

5.2 Nokilaskeuman ja hiiltymän poisto sekä palovahinkosaneeraus

Nokilaskeuman ja hiiltymän poistoon puurakenteista on monia eri menetelmiä. Pinnoitteet sekä erilaiset peittävät rakenteet estävät hyvin altistumisen noelle ja lämmölle, joten tässä tutkimuksessa keskitytään lähinnä pinnoittamattoman

CLT-levyn käsittelyyn. Samalla menetelmällä voidaan myös tarkastella rakenteiden sisälle kertynyttä nokilaskeumaa.

Käytännön kokeet suoritettiin altistamalla kolme (3) kappaletta kovalle kuumuudelle (palotilanne) ja kolme (3) kappaletta savulle. Altistus suoritettiin polttamalla puuta puunpolttopaikalla ja siirtämällä koekappaleet lähelle tulta. Kappaleiden altistumista säädeltiin etäisyyttä ja tulen voimakkuutta (paloaika) säätämällä. Altistamisen päätteeksi koekappaleet sammutettiin vedellä, johon oli lisätty vedenpehmenysainetta.

Tutkimuksessa tarkasteltiin CLT-levyn palosaneerausta. Puun palosaneerauskäsittelyyn käytetyt yleisimmät menetelmät suoritettiin kevyimmästä käsittelystä raskaimpaan. Raskas käsittely poistaa paksun kerroksen puuta ja vaurioittaa helposti puun pintaa, jättäen pinnan ruman näköiseksi. Kevyt käsittely pyrkii aiheuttamaan mahdollisimman vähän muutosta puun ulkonäössä, kuitenkin samalla poistamaan hajua aiheuttava aines. Käsittelyn jälkeen tulos analysoitiin silmämääräisesti tarkastelemalla ja mittaamalla työstösyvyttä erilaisilla mitoilla.

Koekappaletta SAVU 1 työstettiin hiomapaperilla. Hiomapaperilla voidaan poistaa erittäin pieni kerros puun pinnasta, ja kuitenkin tarpeen vaatiessa lisätä työstösyvyttä käyttämällä enemmän aikaa ja voimaa työn suorittamiseen. Kokenut hiomapaperin käyttäjä pystyy ennakoimaan lopputuloksen ja saavuttamaan hyvinkin vaikeilla pinnoitteilla kohtuullisen tyylikkään, ellei jopa uutta vastaavan lopputuloksen. Hiomapaperin haittapuoli on työn raskaus ja hitaus, eikä se sovellu suurien pinta-alojen käsittelyyn. Koneellinen hionta paperilla, esimerkiksi tasohiomakoneella, helpottaa ja nopeuttaa työtä, mutta tarkkuus kärsii, jolloin ei saavuteta yhtä hyvää lopputulosta. Tutkimuksessa tarkasteltiin, voisiko lievän savu- tai palovaurion levyn pinnassa poistaa hiomalla pinta-kerros puhtaaksi. Raskas hionta suoritettiin koekappaleille PALO 2 ja PALO 3 kulmahiomakoneeseen kiinnitetyllä kovametallisella hiomalaikalla. Tämä hiontamenetelmä on nopea ja tehokas, mutta jättää pinnan epätasaiseksi ja työstetyn näköiseksi. Pinta pitäisi vielä viimeistellä kevyemmällä hiontamenetelmällä, ainakin näkyvissä rakenteissa.

Koekappaleen SAVU 2 puhdistukseen käytettiin höyrypesuria. Koneellinen höyrypesu suoritetaan puhaltamalla kuumaa höyryä paineella rakenteeseen ja imuroimalla vesi, höyry ja irronnut lika saman tien pois. Lämpö ja kosteus avaavat puun huokokset, höyry tunkeutuu syvälle huokosiin ja irrottaa noen tehokkaasti.

Koekappaletta SAVU 3 yritettiin puhdistaa nokisienipyyhinnällä. Nokisieni on vaahdotettua melamiinihartsia, joka on mikroskooppiselta koostumukseltaan erittäin tiheää ja kovaa. Se toimii hiekkapaperin tavoin ja puhdistaa pienimmätkin kolot ja uurteet. Nokisienipyyhintä poistaa irtonoen puun pinnasta, minkä jälkeen puu on helpompi käsitellä hiontamenetelmillä. Mikäli noki on peräisin muovien palamisesta, kuten erittäin usein rakennuspalojen kohdalla on, nokisienien käyttö voi olla hyödytöntä, koska muovien palamisen aiheuttama nokilaskeuma on koostumukseltaan rasvaisempaa kuin esimerkiksi puun palassa muodostuva pölymäinen noki.

5.3 CLT-levyn kuivaaminen

Vesivahingon tutkimukset suoritettiin kolmelle eri kappaleelle, joista kahta oli kasteltu viisi (5) viikkoa kastelulaitteen, eli ”tippäämpäriin” avulla. Kappaleet oli pyritty kastelemaan vain ympyrän muotoiselta, n. 300 mm halkaisijaltaan olevalta alueelta. Alueen reunat tiivistettiin korkealla seinämällä saniteettisilikonia. Silikoni ei pidä täysin vettä, mutta estää sen leviämisen tarpeeksi kauan, että vesi ehtii imeytyä puuhun. Yksi kappale oli lisäksi upotettu kokonaan veteen, jolloin siihen imeytyisi niin paljon vettä kuin mahdollista.

Levyn kuivaamiseen kokeiltiin eri menetelmiä ja arvioitiin niiden tehokkuutta, vaikka tutkimuksen tarkoitus ei ole kuitenkaan määrittää eri menetelmien kuivaamisnopeuksia. Osa menetelmistä toteutettiin samoille koekappaleille. Kokeilla pyrittiin määrittämään kuivausmenetelmien aiheuttamat mahdolliset vauriot CLT-levyssä. Mahdollisina vaurioina pidettiin ennen kokeen suoritusta pinnan halkeilua, puun hiiltymistä, liiman koostumuksen muutoksia ja leikkeiden irtoamista.

Vedellä kyllästetyt koepalat pyrittiin kuivaamaan kolmella eri menetelmällä: **lämpölevyllä, mikrokuivaimella ja tilakuivauksella**. Lämpölevy- ja mikrokuivaus sisältävät paloriskin, joten niiden suorittamisen aikana ylläpidettiin tarkkaa valvontaa. Lämpölevyn kuumuutta säädeltiin ajastamalla se olemaan päällä puoli tuntia joka toinen tunti, jolloin rakenteella olisi aikaa jäähtyä, ettei kuumuus vaurioittaisi rakenteen pintaa. Rakenteen jäähtymistä voidaan parantaa puhaltimella sekä ajastimien sekä termostaattien käytöllä. Mikrokuivauksessa käytettiin erillistä lämpötilaa mittaavaa anturia, joka katkaisee virran kuivaimesta, mikäli puun lämpötilat nousevat liian korkeaksi (raja noin 92 °C).

Tilakuivaus suoritettiin huputtamalla koekappale ja tilakuivain muovilla, jotta saavutettiin vaadittava tehokkuus. Huputuksen tilavuus oli noin 2,1 kuutiometriä. Koekappale peitettiin muovilla myös alapuolelta jolloin saatiin tarkempi käsitys siitä, kuinka hyvin tilakuivaus kuivaa rakennetta vain yhdeltä puolelta. Kuivausmenetelmien päämääränä ei ollut saada rakennetta täysin kuivaksi, vaan ainoastaan saada tietoa siitä, mikä kuivausmenetelmä toimisi parhaiten juuri CLT:n kaltaisen rakenteen kuivaamiseen. Rakenteen kuivaamisen nopeus on erittäin tapauskohtaista ja riippuu kuivattavan rakenteen koosta, sekä esimerkiksi tilakuivauksessa huonetilavuudesta. Käytännössä kuivattavia rakenteita kuivataan niin kauan, että kosteusmittaukset osoittavat ne kuiviksi, ja rakenne saadaan rakentaa kasaan.

6 TULOKSET

6.1 Palosaneeraus

Kokeessa käytettyjä laitteita (LIITE 1, kuva 9.):

- Polttomoottorikäyttöinen moottorisaha
- Kulmahiomakone ja kovametallilaikka

- Erikokoisia tasohiomakoneita
- Kompressori sekä soodapuhalluskello, puhallussoodaa
- Eri karheuksisia hiomapapereita
- Kirves
- Puukko
- Vasara

Polttokoe suoritettiin polttamalla 80 mm paksuja, 3-leikkeisiä n. 0,5 neliömetrin CLT-kappaleita. Koekappaleet valittiin sen mukaan, että ne olivat pinnaltaan tarpeeksi hyvälaatuisia toimiakseen näkyvänä rakenteena, kuten esimerkiksi sisäkattona (kuva 5.). Koekappaleita altistettiin eripituisilla ajanjaksoilla, joilla simuloitiin tulipalon aiheuttamaa eriasteisia vauriota laajalla alueella. Polttokokeilla saavutettiin CLT-levyn 5-20 mm:n hiiltymä (LIITE 1, kuva 12.). Savuvauriokoe toteutettiin polttokokeen jälkeen vastaavalla tavalla, asettaen koepalat kuitenkin edellistä koetta huomattavasti kauemmas lämmönlähteestä (LIITE 1, kuva 16.). Polttokokeessa havaittiin vaikeaksi säädellä levyn hiiltymisen määrää, koska lämmitessään kuumaksi levy alkoi syttyä myös reuna-alueilta. Tällöin levy olisi päässyt palamaan joka suunnasta, mikä ei vastaisi todellista palotilannetta, jossa levy palaa vain toiselta puolelta.

Koekappaleeseen PALO 3 lisättiin 2 kpl 6 x 120 ja 2 kpl 5 x 70 kuumasinkittyjä ruuveja, jolloin voitiin tarkastella liittimien puuhun aiheuttamaa vaikutusta tulipalotilanteessa (LIITE 1, kuva 11.). Koekappale sahattiin liittimien kohdalta poikki, jotta voitaisiin helposti todeta liittimen vaikutuksen puun palamiseen (LIITE 1, kuva 13.). Sahatessa havaittiin CLT-levyn sisältävän pieniä, naulamaisia liittimiä. Kyseiset liittimet aiheuttivat levyä sahatessa jonkin verran vauriota moottorisahan terään. Levyn lisättyjen liittimien vaikutus puun palamiseen todettiin kuitenkin hyvin pieneksi (alle 1 mm lisää hiiltymää liittimen koh-

dalla), eikä tarkempia tarkasteluja liittimien vaikutukselle tarvinnut tehdä. Liittimen pää kuitenkin kärsi huomattavaa vauriota kuumuudesta ja kantaosa oli vääntynyt selvästi sivuun (LIITE 1, kuva 12.). Tämä vaikeutti huomattavasti liittimen poistamista rakenteesta. Oikeassa palotilanteessa, missä lämpötilat ovat huomattavasti koetta suuremmat, liittimien poistaminen rakenteesta olisi vielä vaikeampaa.

Koekappaleessa PALO 3 kokeiltiin poistaa puuta yhden lamellin paksuudelta (n. 30 mm). Päällimmäinen lamelli sahattiin poikki, ja irroitettiin keskileikkeestä puukolla ja vasaralla (LIITE 1, kuva 14.). Kokeessa havaittiin, että lamellien välinen liimaus on niin luja, että puut ovat käytännössä samaa kappaletta. Yhden lamellin poistaminen vaatii siis miltei samat toimenpiteet ja työmäärän kuin massiivisen puun halkaiseminenkin vaatisi. Paksunkin kerroksen hionta on tutkimuksen perusteella parempi ratkaisu kuin lamellin poistaminen.

Nokisienipyyhintä ja erilaiset pesumenetelmät eivät toimineet odotetulla tehokkuudella, eikä niiden käyttöä voida suositella CLT-rakenteille. Nokisienipyyhintä poisti irtonoen levyn pinnasta, mutta pyyhintää ei ole järkevä suorittaa, koska levy on kuitenkin hiottava pyyhinnän jälkeen täysin puhtaaksi (LIITE 1, kuva 22.). Pesumenetelmät eivät poistaneet savunhajua rakenteesta, vaan kastuessaan levy alkoi haista jopa entistä voimakkaammin. Hajunpoistoaineet lievittivät hajua jonkin aikaa, mutta noin viikon kuluttua käsittelystä lähes kaikki koekappaleet haisivat edelleen yhtä voimakkaasti.

Soodapuhallus poisti noen ja palaneen aineksen, sekä puhdisti levyn pinnan vaurioittamatta levyä lähes lainkaan (LIITE 1, kuva 18.). Kuitenkin verrattuna hiontamenetelmiin soodapuhallus osoittautui erittäin hitaaksi ja työlääksi. Hiomalla saavutettiin lähes yhtä hyvä tulos miltei kolme kertaa nopeammin ja pienemmällä kalustolla. Soodapuhalluksessa käytettävä sooda leviää hionnassa aiheutuvaa pölyä paljon laajemmalle alueelle ja sen poistaminen on vaikeampaa, etenkin jos se altistuu kosteudelle. Tällöin soodan koostumus muuttuu tahmeaksi ja se tarttuu helposti erilaisiin pintoihin.

Hionta havaittiin kaikkia muita menetelmää nopeammaksi ja kevyemmäksi käyttää sekä sillä saavutettiin paras lopputulos. Hionta toimi lisäksi eriasteisille palovaurioille hyvin säätelämällä hionnan tehokkuutta. CLT-levyä oli helppo työstää, sillä puu on tarpeeksi kovaa, eikä siihen jää merkittäviä lovia tehokkaillakaan hiontamenetelmillä. Esimerkiksi lievä savuvaurio (LIITE 1, kuva 21.) saatiin puhdistettua yhtä hyvin kuin voimakkaimmin palanut koekappale (LIITE 1, kuva 24.). Koneellisesti suoritettu raskas hionta jätti pinnan paikoin erittäin epätasaiseksi ja halkaisi puiden päätysaumamat (LIITE 1, kuva 19.). Loppuun asti toteutettu hionta poisti puuta noin 5 mm hiiltymää syvemmillä jolloin levy oheni enimmillään noin 25 mm, eli miltei yhden lamellin verran. Riittävän lopputuloksen saavuttamiseksi suurin ohenema havaittiin kohdassa, missä myös hiiltymä oli ollut voimakkainta (levyn keskellä).

6.2 Vesivahinkosaneeraus

Kastelujärjestelmänä käytettiin kolmea tavallista kymmenen litran muoviämpäriä, jonka pohjaan tehtiin reikä. Reikää tiivistettiin ilmastointiteipillä niin, että veden virtausta saatiin hieman hillittyä. Muutaman yrityksen jälkeen ämpärit saatiin vuotamaan tyhjäksi tasaisesti n. 12 tunnin aikana, eli n. 20 litraa vuorokaudessa. Koe suoritettiin 9.3.2015 – 6.4.2015.

Kosteusvaurioiden määrittämiseen käytettiin:

- Silmämääräisiä havaintoja (LIITE 2, kuva 31.)
- Gann Hydromette RTU 600 kosteusmittari (LIITE 2, kuva 37.)
- Havaintoja kappaleiden painon muutoksissa (LIITE 2, kuva 27.)

Kuivauskokeeseen käytettiin:

- Lämpölevy: IP55 Matalalämpöpaneeli 300W (LIITE 2, kuva 34.)

- Mikroaaltokuivain: 1,1 kW (LIITE 2, kuva 35.)
- Imukuivain (Turbiinikuivain)
- Tilakuivain (Absorbtiokuivain): Munters MH270
- Lämpötila-anturi (LIITE 2, kuva 35.)

Kosteusmittauksessa mitattiin puun kosteus painoprosentteina [p-%], joka sahatavaralla normaaleissa oloissa vaihtelee 8–15 p-%:n välillä. (18.) Koska CLT:ssä käytetään laatuluokiteltua ja hyvin varastoitua puuta, voidaan olettaa sen normaalin kosteuden olevan hieman pienempi, eli n. 8–12 p-%. Näitä arvoja saatiin myös CLT:n kuivien alueiden mittauksissa. Vesivahinkokohteissa koneellinen kuivaus suoritetaan yleensä puurakenteille, joiden kosteus painoprosentti on enemmän kuin 17-20, riippuen vahingon laajuudesta, rakenteesta ja mittausten epätarkkuuden arvioinnista. Tutkimuspaikan lämpötila oli noin 21 °C ja huoneilman suhteellinen kosteus noin 37 %.

Kasteltuja kappaleita tarkasteltiin koko tutkimuksen aikana, ja osa vaikutuksista ilmeni vasta suljetun rakenteen purkuvaiheessa kuivaamisen jälkeen. Kaikkien koekappaleiden pinnassa havaittiin selvää turpoamista, mikä on raakapuiselle rakenteelle hyvin tyypillistä. Voimakkain turpoaminen havaittiin levyjen reuna-alueilla sekä kohdissa missä liimatut saumat olivat jo valmiiksi hieman auki tai koholla. (LIITE 2, kuva 31.)

Koekappaleet alkoivat kerätä mikrobikasvustoa noin kahden viikon jälkeen kastelun aloittamisesta (LIITE 2, kuva 31.). Kasvustoa löytyi lähes joka puolelta kasteltuja levyjä, myös suljetun rakenteen eristetilasta. Levyjen kuitenkin voidaan olettaa kontaminoituneen jo varastoinnin aikana, tai kokeen aikaisen puutteellisen olosuhdehallinnan lisänneen levyjen alttiutta kasvustolle. Normaalioloissa mikrobikasvusto vaatii tavallisesti edellä mainittua pidemmän ajan kasvaakseen, joten näistä tuloksista ei voida tehdä yksiselitteisiä johtopäätöksiä CLT:n alttiudelle.

Keskeltä kastellun koekappaleen LEVY 1 pinta oli selvästi poimuuntunut kosteuden vaikutuksesta n. 10 mm. Koekappaleen ylä- ja alapinnasta mitattiin kosteus painoprosentti kuivasta pinnasta, märästä pinnasta ja kastuneesta kohdasta eri syvyyksiltä 10 mm välein (LIITE 4). Mittauksessa todettiin kosteuden edenneen kauttaaltaan n. 30 mm syvyydelle, ja paikoitellen jopa 80 mm syvyydellä mitattiin hieman kohonneita arvoja. Kosteus ei kuitenkaan imeytynyt levyn läpi eristetilaan. Alapinnasta levy mitattiin kuivaksi. Levyn sivussa kuitenkin havaittiin kostea alue, mikä osoittautui märäksi myös syvemmältä mitattuna. Kostunut kohta oli noin 20 x 50 cm, eli yhden lankun kokoinen, ja alueen ympäriltä mitattiin kuivia arvoja. Kokeessa kosteus siis kulkeutui keskimmäisen lamellin kohdalla vaakasuunnassa reunaa kohti.

Koekappaleessa LEVY 2 tarkasteltiin eristetilan kuivaamista (LIITE 2, kuva 29.). Koska kosteus ei edennyt imeytymällä eristetilaan asti, koetta jatkettiin valuttamalla vettä eristetilaan kahdesta n. 16 mm aukosta. Nämä aukot tulivat myöhemmin toimimaan imukuivauksen korvausilmareikinä. Kun vettä oli valuttettu yläpinnan aukoista eristetilaan, rakennetta purettaessa todettiin veden leviävän villan päällä ainakin n. 50 mm myös sivusuunnassa, ylemmän levyn alapintaa myöten (LIITE 2, kuva 33.). Veden eteneminen sivusuunnassa tarkoittaa, että villa estää jonkin verran veden kulkeutumisen eristetilan pohjalle, josta se imeytyisi alempaan CLT-levyyn. Eristetilakuivaus on syytä kosteusmitata kaikissa tapauksissa, kun epäillään veden päässeen läpi rakenteesta.

Reunasta kastellun koekappaleen LEVY 3 (LIITE 2, kuva 30.) pintavauriot olivat keskeltä kasteltua LEVY 1 huomattavasti rajummat. Levyn saumakohdassa havaittiin jo ensimmäisen viikon jälkeen turpoamista, mikä aiheutti sauman repeämisen. Repeämä levisi levyn reunasta keskelle päin silikonirajaukseen asti n. 3 - 5 mm leveänä ja siitä eteenpäin kuivaan reunaan saakka n. 2 mm leveänä (LIITE 2, kuva 31.). Levyssä mitattiin kohonneita arvoja (>17 p-%) noin 50 mm syvyydeltä. Levystä mitattiin kuitenkin korkeita arvoja (>20 p-%) vain noin 30 mm syvyyteen asti, eli voidaan olettaa veden päässeen virtaamaan reunalitoksesta läpi, eikä kosteus ole imeytynyt puuhun yhtä tehokkaasti kuin keskeltä kastellussa levyssä (LEVY 1). Levyn kastuneesta sivusta mitattiin samanlaisia arvoja kuin yläpinnasta (LIITE 5).

Tilakuivaus toteutettiin huputtamalla levy ja kuivain muovin alle, jolloin kuivain erottelee kosteuden ilmasta ja puhaltaa sen letkun kautta ulos huputuksesta. Huputuksen tilavuus oli noin 2,1 m³. Tutkimuksessa oli tarkoitus selvittää, aiheuttaako tehostettu kuivaaminen halkeilua levyn pintarakenteessa, liiman vaurioita tai muita muutoksia. Koekappaletta kuivattiin noin kolme tuntia, jonka aikana levyn pinta (noin 3 mm syvyydelle) kuivui täysin kuivaksi. Syvemmältä mitattuna levy osoittautui kuitenkin vielä kosteaksi. Tilakuivaaminen ei koeksessa aiheuttanut minkäänlaisia vaurioita rakenteelle. Käytännössä tilakuivaus asennetaan usein myös paljon laajempiin tilavuuksiin, jolloin vastaavan pinta-alan kuivuminen on hitaampaa ja näin rakenteeseen aiheutuvat rasitukset vielä pienempiä. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta tilakuivauksen olevan toimiva tapa kuivata CLT-rakenteita.

Imukuivauksessa levyyn porattiin noin 36 mm reikä, johon asennettiin imuletku (LIITE 2, kuva 32.). Turbiinikuivain kytkettiin päälle, jolloin havaittiin heti eristetilän voimakas alipaineistuminen rakennusmuovin kaartuessa sisäänpäin. Ilman kiertäminen rakenteessa todettiin asettamalla kostutettu sormenpää korvausilmareikien lähelle, jolloin tunnettiin selvä ilmavirtaus reiän suulla. Ilmavirta saatiin siis kiertämään eristetilassa halutulla tavalla. Eristetilaa ei kuivattu tällä menetelmällä täysin kuivaksi asti, mutta menetelmää voidaan hyödyntää kyseisen rakenteen kuivaamiseen. (LIITE 2, kuva 32.)

Mikrokuivausmenetelmä oletettiin yhtä riskialttiiksi kuin lämpölevytykin, mutta se ilmeni tutkimuksissa CLT:lle mahdollisesti hyvinkin toimivaksi menetelmäksi. Levyssä ei kokeen jälkeen havaittu palamisen merkkejä, vaikka palamisen hajua todettiin kokeen aikana, kun puun lämpötila oli noin 90 °C (LIITE 3). Käytännössä levyn lämpötilaa pyrittäisiin pitämään kuitenkin paljon tätä koetta alhaisemmissa lämpötiloissa, joten puun palaminen olisi epätodennäköistä. Kokeessa ei kuitenkaan saatu täyttä varmuutta siitä, miten kuivaksi asti kuivattu puu käyttäytyisi mikrokuivauksessa. Turvallisuussyistä mikrokuivausta pystyttiin kokeilemaan vain noin kuuden tunnin ajan, mikä ei riittänyt levyn täydelliseen kuivaamiseen. Mikrokuivaus osoittautui kuitenkin melko tehokkaaksi menetelmäksi, koska levyn pinta kuivui silmämääräisesti kuivaksi noin 15 minuutin kuivaamisen jälkeen. Kosteus kuitenkin vaikutti siirtyvän jonkin verran syvemmälle puuhun kuivauksen edetessä.

Upotuskokeella tarkasteltiin voimakkaan kastumisen ja kuivaamisen aiheuttamia muutoksia noin 100 x 80 x 300 mm kokoisessa CLT-kappaleessa. Koe-kappaleen paino oli kuivana 1704,8 g ja kuuden viikon upotuskokeen jälkeen 2384,1 g. Vettä oli siis imeytynyt kappaleeseen 679,3 g eli noin 40 % kappaleen painosta ja noin 30 % tilavuudesta. Kappale kuivattiin kuivauskaapissa lähes kuivaksi, eikä siinä havaittu muita merkittäviä muutoksia kuin lievää turpoamista reunojen saumakohdissa. CLT vaikuttaa siis kestäväen hyvin myös kovaa kosteuden vaihtumista (LIITE 2, kuva 27.)

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Palosaneerauskokeet osoittivat CLT-levyn hiiltyvän noin 15-20 mm, kuten lähtötietojen perusteella ilmoitettiin. Levy on erittäin sitkeää ja lamellin poistaminen ei onnistu helposti. Lamellien väliseen saumaan on vaikeaa kohdistaa tarpeeksi voimaa ilman, että puu halkeaa hallitsemattomasti. Hionta oli kokeen tulosten perusteella ainut hyvin toimiva vaihtoehto noen ja hiililymän kustannustehokkaalle poistamiselle. CLT:n hionta on helppoa, koska puu on pehmeää ja helposti muokattavissa. Puupinnan saa tarvittaessa entistetyksi alkupepärisen pinnan näköiseksi, eikä levyä tarvitse tulipalon esteettisten vaikutusten vuoksi välttämättä peittää.

Palosaneerauskokeita toteutettaessa havaittiin suurimmaksi ongelmaksi savun hajun poistaminen CLT-levystä. Vaikka levy oli hiottu pinnasta täysin lähtötötilanteen veroiseksi, savun haju oli aistittavissa kohtalaisen voimakkaana. Erityisesti huonosti tuuletettujen tilojen pintoina CLT:tä käytettäessä voidaan kohdata ongelmia savun hajun poistamisessa koska hajupartikkelit säilyvät niissä kauemmin. Haju todennäköisesti lievenee jonkin verran pidemmän ajan kuluessa ja sitä voidaan vähentää hyvällä tuuletuksella ja erilaisilla korvaavilla hajusteilla. Hajun poistamiseksi voitaisiin käyttää myös otsonointimenetelmää. Otsonointi perustuu otsonin kykyyn pilkkoa hajupartikkelit ja sitä käytetään yleisesti muun muassa tupakansavun ja homeen hajun poistamiseksi. Yhdeksi ongelmakohteeksi arvioisin savun hajun lisäksi niin sanotun kalman hajun, mikä aiheutuu muun muassa tuhoeläinten bakteerien tuottamista emissioista raatojen mädäntyessä rakenteiden sisään. Tämä haju on paljon savun hajua erottuvampi sekä vaikeampi poistaa myös betonirakenteista, joten puuraken-

teissa hajun poistaminen voi osoittautua hyvinkin vaikeaksi. Puu absorboi raadosta irtoavat kudosnesteet hyvin ja säilyttää ne syvällä huokosissaan.

Palosaneerauskokeiden yhteydessä havaittiin mahdollisena CLT:n korjauskentämisen ongelmana levyn kantavuuden muuttuminen hiiltymän ja saneeraus käsittelyn seurauksena. Mikäli tutkimuksessa käytetyn kaltaisesta, 3-lamellisesta CLT-levystä poistetaan jopa 25 mm pintaa pois, tarkoittaa se uloimman lamellin lähes koko ainepaksuuden poistamista. CLT:n kestävyys perustuu lamellien ristiin kantavuuteen, jolloin pidempään suuntaan 3-lamellisessa levyssä kantaisi samaan suuntaan vain kaksi lamellia. Palosaneerauksen jälkeen levyn kantavuus pidempään suuntaan siis saattaa jopa puolittua. Tämä vaikuttaa voimakkaasti myös levyn jäykkyyteen pystysuuntaisissa levyissä. Jatkotutkimuksilla olisi hyvä selvittää, miten lamellin ainevahvuuden poistaminen vaikuttaa levyn vahvuuteen, ja kuinka levyä pystytään korjaamaan ja vahvistamaan tarvittaessa. Soveltuvimmaksi korjausmateriaaliksi alustavan rakenteellisen arvion perusteella vaikuttaisi soveltuvan vaneri, joka liimattaisiin kiinni koko levyn matkalta, koska vaneri siirtäisi levyyn kohdistuneita rasituksia mahdollisimman hyvin ehjän levyn kaltaisesti. Samalla tiivis vaneri suojaisi levyä seuraavalta mahdolliselta palolta ja sitoisi lisäksi jonkin verran jäljelle jäänyttä savun hajua taakseen. Tapauskohtaisesti rakenteen alle jouduttaisiin ehkä lisäämään tukirakenteiksi ylimääräisiä pilareita tai palkkeja. Korjaustöissä tulee ottaa huomioon että rakenteen on kestettävä myös seuraava mahdollinen palo sekä sen jälkeisen saneeraustyön mahdollistaminen. Käytännössä 80 mm:n vahvuinen 3-lamellinen CLT-levy kestäisi ilman lisävahvistustoimenpiteitä yhden tulipalon, muttei kenties enää seuraavaa.

Vesivahinkosaneerauksessa ja kuivauskokeissa mielenkiintoiseksi seikaksi osoittautui kosteuden liikkuminen CLT-levyn sisällä. Tämän oletettiin johtuvan syiden suunnan vaihtumisesta keskimmäisen lamellin kohdalla, jolloin kosteus pääsee helpommin etenemään liimaussaumojen suuntaisesti vaakasuunnassa. Kosteus siis pyrki alaspäin levyssä keskimmäiseen lamelliin asti, josta se muuttaisi suuntaansa kohti levyn reunaa. Toisena mahdollisuutena saattaisi olla levyn valmistusprosessissa keskimmäisen lamellin alipaineistuminen kovan puristus-paineen alla. Tällöin paine-ero aiheuttaisi suorastaan imua päällimmäisistä lamelleista keskimmäiseen päin. Tämä voisi koitua vesivahinko-

kohteissa kohtalokkaaksi, sillä kosteusvaurion laajuus saatettaisiin todeta pinnasta mittaamalla paljon pienemmäksi kuin levyn sisällä kulkeutuneen kosteuden vuoksi. Kosteusmittaus tulisi tehdä, paitsi useasta levyn eri kohdasta, mutta myös usealta eri syvyydeltä, sekä vähintään keskimmäisestä lamellista.

Kuivausmenetelmistä toimivammiksi havaittiin tilakuivaus, yhdistettynä kastuneen eristetilan imukuivaukseen, tai tapauskohtaisesti mikrokuivaus. Tilakuivaus todettiin turvalliseksi vaihtoehdoksi, mutta myös mikrokuivaus arvioitiin kokeiden perusteella oikein käytettynä sopivaksi menetelmäksi CLT:n kuivaamiseen. Mikrokuivaukselle haasteita aiheuttavat kuitenkin tarkat säteilyturvamääräykset ja kosteuden epävarma siirtyminen rakenteen sisällä. Eristetila olisi kuivauksen jälkeen syytä desinfioida esimerkiksi savuttamalla, mutta sen onnistumisen todentaminen on rakenteita avaamatta lähes mahdotonta. Eristetilan kuivumisen varmentaminen on vaikeaa avaamatta rakennetta, ja rakenteen avaaminen on itsessään jo vaikeaa levyn painon ja työstämisen hankaluuden vuoksi (kts. 15.).

Tutkimuksessa havaittiin CLT:llä olevan sekä hyviä että huonoja ominaisuuksia korjausrakentamisen kannalta. Mielestäni CLT on erittäin mielenkiintoinen, sekä erityisesti ekologisuutensa, helppokäyttöisyytensä ja hyvän hengittävyytensä ansiosta tulevaisuudessa yleistävä materiaali, etenkin kerrostalokohhteissa. CLT-rakenteita toteutettaessa tulisi kuitenkin kiinnittää huomiota, kuinka rakenteet voidaan tarvittaessa korjata. Näin pystytään välttämään turhia kustannuksia tulevaisissa korjauksissa ja mahdollisesti pienentämään vahinkojen laajuutta. CLT on uusi ja Suomessa vielä melko vähän käytetty materiaali, mutta sen käytöstä ja käsittelystä saadaan varmasti lisää tietoa lähivuosina.

8 LÄHTEET

1. Asiantuntijahaastattelut
2. Brännare, J. 2012 CLT -levyjen soveltaminen suomalaiseen pientalorakentamiseen. Opinnäytetyö. Rovaniemen ammattikorkeakoulu. [viitattu 15.12.2014]
3. Mikä on CLT. 2014 Ammattiopisto Lappia. Saatavissa: <http://www.lappia.fi/Suomeksi/Aikuiskoulutus-ja-tyoelamapalvelut/Tyoelaman-kehittamispalvelut/Hankkeet/Teknologia-ja-teollisuus/CLT/Mika-on-CLT> [viitattu 4.2.2015].
4. Puuinfo. 2014 Saatavissa: http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/kysymyksia-ja-vastauksia/puun_kosteuskayttaytyminen.pdf [viitattu 15.12.2014].
5. Muikku, T. 2013 Puukerrostalo CLT-tekniikalla, rakennesuunnittelijan näkökulma. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. [viitattu 2.1.2015]
6. Vuolle-Apiala, R. 1994. Hirsityöt. Helsinki: Multikustannus Oy
7. Pelastustoimi. 2014 Saatavissa: <http://www.pelastustoimi.fi/turvatietao/ehkaise-palon-syttyminen/tulipalon-vaarallisuus> [viitattu 2.1.2015].
8. Ecophon - paloturvallisuus 2014 <http://www.ecophon.com/fi/ominaisuudet/tekniset-ominaisuudet1/Paloturvallisuus/> [viitattu 15.12.2014].
9. Tukes – paloturvallisuus 2015 Saatavissa: <http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Sahko-ja-hissit/sahkolaitteiden-paloturvallisuus/> [viitattu 2.1.2015].
10. Björkholtz, D. 1990. Rakennuksen kuivattaminen. Helsinki: Rakennustieto Oy

11. Viitanen, H. Betonin ja siihen liittyvien materiaalien homehtumisen kriittiset olosuhteet - betonin homeenkesto VTT, <http://www2.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2004/W6.pdf> [viitattu 1.3.2015].
12. Paroc - paloturvallisuus <http://www.paroc.fi/knowhow/palo/yleista-tietoa-paloista-> [viitattu 2.1.2015].
13. Runko Pes 2.0 2014 Puuinfo. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/runkopes-20> [viitattu 2.3.2015].
14. Torktek Oy – Kuivausmenetelmät 2012 http://torktek.fi/suomeksi/?page_id=10 [viitattu 18.2.2015].
15. Secca 2015 <http://www.secca.fi/seccadry.html> [viitattu 18.2.2015].
16. Stora Enso CLT <http://www.storaenso.com/rethink/facts-about-clt>
17. Korjausrakentamisen viranomaisohjaus <http://www.korvo.fi> [viitattu 5.4.2015].
18. Puuinfo. 2014. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/kosteusteknisi%C3%A4-ominaisuuksia> [viitattu 21.4.2015].
19. Iisalo S. 2015. CLT-talon elementit säästävät monilta työvaiheilta. TM Rakennusmaailma 3/2015
20. Mikroaaltokuivauksen turvallisuus. STUK. Saatavissa: <http://www.stuk.fi/julkaisut/katsaukset/pdf/mikroaaltokuivaus.pdf> [viitattu 22.4.2015]

Vieraskielistä aineistoa:

21. Schmid J. 2010. Fire-exposed Cross-Laminated Timber – Modelling and tests. Thesis. Saatavissa:
http://www.researchgate.net/profile/Joachim_Schmid2/publication/228445300_Fire-exposed_cross-laminated_timbermodelling_and_tests/links/0deec533573884642f000000.pdf
22. Aguanno M. 2013. Fire resistance tests on Cross-Laminated Timber Floor Panels: An Experimental And Numerical Analysis. Thesis. Saatavissa:
<https://curve.carleton.ca/system/files/theses/28637.pdf>
23. Medina Hevia A. R. 2014. Fire resistance of partially protected Cross-Laminated Timber rooms. Thesis. Saatavissa: <https://curve.carleton.ca/system/files/theses/32050.pdf>
24. Langhi G. 2012. Fire safety design of a high-rise timber building. Thesis. Saatavissa:
<http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:4e8b0303-050a-4c37-aedd-2c5a0f9fa953/>



Kuva 8. Ehjä CLT pinta (lähtötilanne)



Kuva 9. Kokeessa käytettyjä työkaluja



Kuva 10. Koekappaleet PALO 1 ja PALO 2 (hiiltymä n. 5-10 mm)



Kuva 11. Koekappaleen PALO 3 liittimet



Kuva 12. Koekappale PALO 3 (hiiltymä keskellä n. 10-20 mm)



Kuva 13. Koekappale PALO 3 (Liittimen kohdan tarkastelu)



Kuva 14. Koekappale PALO 3 (Leikkeen poisto ja korjaus)



Kuva 15. Koekappale SAVU 1 (Hiiltymä 0 – 2 mm)



Kuva 16. Koekappaleet SAVU 2 ja SAVU 3 (Savuvauriota, ei hiiltymää)



Kuva 17. Koekappale PALO 3 (Työstö puukolla/kirveellä)



Kuva 18. Koekappale PALO 1 (Soodapuhallus)



Kuva 19. Koekappale PALO 2 (Työstö jyrsimellä)



Kuva 20. Koekappale PALO 2 (Saumojen halkeamat)



Kuva 21. Koekappale SAVU 1 (Hionta)



Kuva 22. Koekappale SAVU 3 (Nokisienipyyhintä)

Käsittelyn lopputulos:



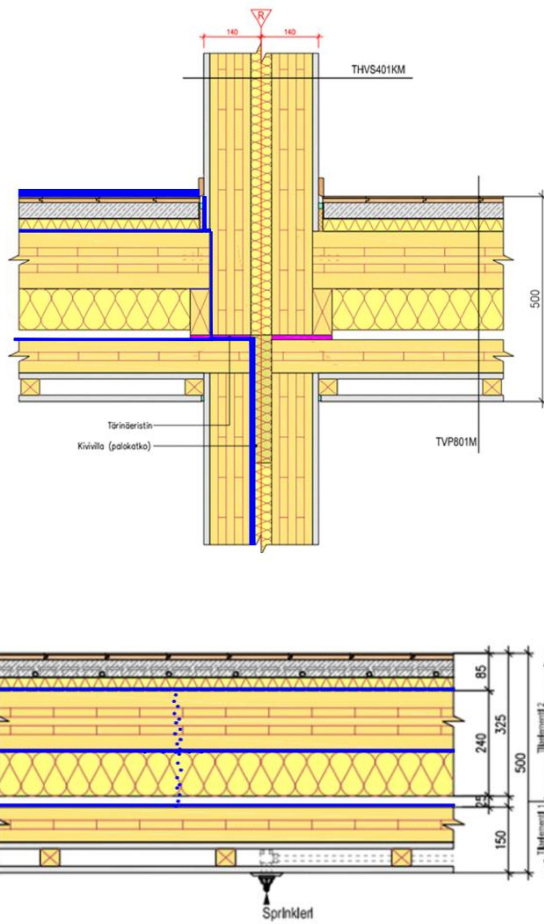
Kuva 23. Koekappaleen PALO 1 lähtötilanne



Kuva 24. Koekappale PALO 1 polton jälkeen



Kuva 25. Koekappale PALO 1 saneerauskäsittelyn jälkeen



Kuva 26. Arvio kosteuden siirtymisestä CLT-rakenteessa



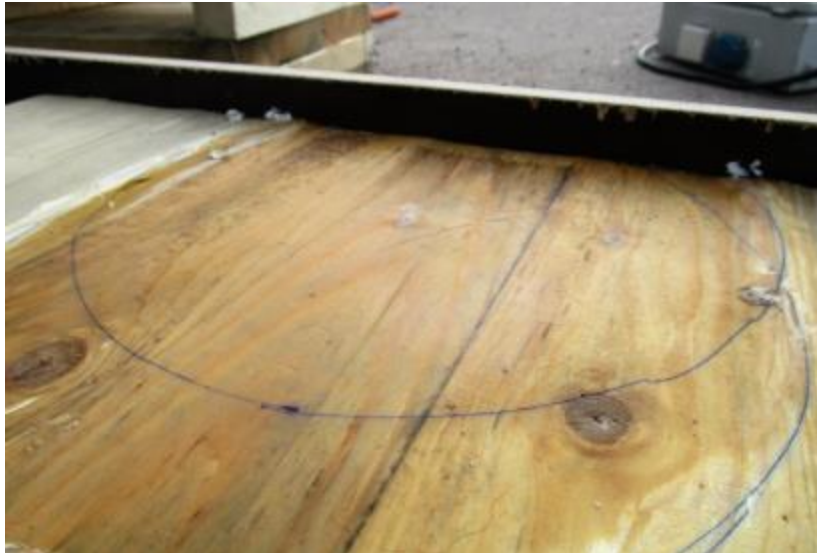
Kuva 27. Uputuskappale punnituksessa kokeen jälkeen



Kuva 28. Koekappale LEVY 1, päältä kasteltu levy



Kuva 29. Koekappale LEVY 2, suljettu rakenne



Kuva 30. Koekappale LEVY 3, reunaliitos



Kuva 31. Koekappale LEVY 3, kosteuden aiheuttamia vaurioita



Kuva 32. Koekappale LEVY 2, imukuivausmenetelmä



Kuva 33. Koekappale LEVY 2, kosteus villan päällä eristetilassa



Kuva 34. Lämpölevy



Kuva 35. Mikrokuivain ja lämpötila-anturi

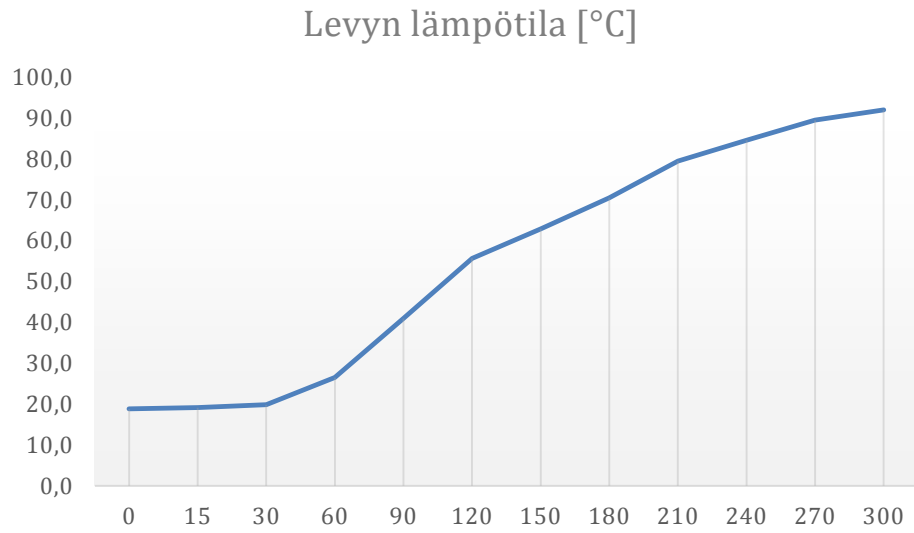


Kuva 36. Vaakasuunnassa kastunut CLT:n reuna (LEVY 1)



Kuva 37. Kosteusmittari GANN Hydromette RTU 600

LIITE 3 Puun lämpötiläkäyrä mikrokuivauksessa



Mikrokuivaus d = n. 40 mm		
Aika [min]	Lämpötilä [°C]	Huomioit a
0	18,8	
15	19,1	Pinta alkoi höyrytä, pintalämpötilä melkein 100 °C
30	19,8	
60	26,5	
90	41,0	
120	55,7	Kosteus alkoi siirtyä pois rakenteesta
150	62,9	
180	70,5	
210	79,5	
240	84,6	Havaittiin lievää palon hajua
270	89,5	
300	92,0	

LIITE 4 Kosteusmittaukset LEVY 1

Kosteusmittaus	LEVY 1					
Yläpinta	Syvyys [mm]	p-%		Sivu	Syvyys [mm]	p-%
KUIVA	0	10...15		KUIVA	0	10...20
MÄRKÄ	0	32		MÄRKÄ	0	32
	10	38		KUIVA	30	10...20
	20	39		MÄRKÄ	30	34
	30	40		KUIVA	50	15...20
	40	27		MÄRKÄ	50	35
	50	24				
	80	18				
	100	15				

LIITE 4 Kosteusmittaukset LEVY 3

	120	14				
Kosteusmittaus	LEVY 3					
Yläpinta	Syvyys [mm]	p-%		Sivu	Syvyys [mm]	p-%
KUIVA	0	10...15		KUIVA	0	10...20
MÄRKÄ	0	32		MÄRKÄ	0	32
	10	34			10	30...35
	20	35			20	25...35
	30	24			30	17...25
	40	19				
	50	18				

Kuvaluettelo

- | | | |
|------|-----|--|
| Kuva | 1. | Kaksi 3-lamellista CLT-levyä päädyistä kuvattuna |
| Kuva | 2. | Puun hiiltymisen ja tulipalon eteneminen |
| Kuva | 3. | CLT säilytetty sisäkaton pintamateriaalina |
| Kuva | 4. | Rakenneleikkaus, suljettu CLT + eriste + CLT –rakenne |
| Kuva | 5. | Rakenneleikkaus, suljettu CLT + eriste + CLT –liitos |
| Kuva | 6. | Imukuivausmenetelmä |
| Kuva | 7. | Mikrokuivausmenetelmä |
| Kuva | 8. | Ehjä CLT pinta (lähtötilanne) |
| Kuva | 9. | Kokeessa käytettyjä työkaluja |
| Kuva | 10. | Koekappaleet PALO 1 ja PALO 2 (hiiltymä n. 5-10 mm) |
| Kuva | 11. | Koekappaleen PALO 3 liittimet |
| Kuva | 12. | Koekappale PALO 3 (hiiltymä keskellä n. 10-20 mm) |
| Kuva | 13. | Koekappale PALO 3 (Liittimen kohdan tarkastelu) |
| Kuva | 14. | Koekappale PALO 3 (Leikkeen poisto ja korjaus) |
| Kuva | 15. | Koekappale SAVU 1 (Hiiltymä 0 – 2 mm) |
| Kuva | 16. | Koekappaleet SAVU 2 ja SAVU 3 (Savuvauriota, ei hiiltymää) |
| Kuva | 17. | Koekappale PALO 3 (Työstö puukolla/kirveellä) |
| Kuva | 18. | Koekappale PALO 1 (Soodapuhallus) |
| Kuva | 19. | Koekappale PALO 2 (Työstö kulmahiomakoneella) |
| Kuva | 20. | Koekappale PALO 2 (Saumojen halkeamat) |
| Kuva | 21. | Koekappale SAVU 1 (Hionta) |
| Kuva | 22. | Koekappale SAVU 3 (Nokisieniäpyyhintä) |
| Kuva | 23. | Koekappaleen PALO 1 lähtötilanne |
| Kuva | 24. | Koekappale PALO 1 polton jälkeen |
| Kuva | 25. | Koekappale PALO 1 saneeraus käsittelyn jälkeen |
| Kuva | 26. | Arvio kosteuden siirtymisestä CLT-rakenteessa |
| Kuva | 27. | Upotuskappale punnituksessa kokeen jälkeen |
| Kuva | 28. | Koekappale LEVY 1, päältä kasteltu levy |
| Kuva | 29. | Koekappale LEVY 2, suljettu rakenne |
| Kuva | 30. | Koekappale LEVY 3, reunaliitos |
| Kuva | 31. | Koekappale LEVY 3, kosteuden aiheuttamia vaurioita |
| Kuva | 32. | Koekappale LEVY 2, imukuivausmenetelmä |
| Kuva | 33. | Koekappale LEVY 2, kosteus villan päällä eristetilassa |
| Kuva | 34. | Lämpölevy |
| Kuva | 35. | Mikrokuivain ja lämpötila-anturi |
| Kuva | 36. | Vaakasuunnassa kastunut CLT:n reuna (LEVY 1) |
| Kuva | 37. | Kosteusmittari GANN Hydromette RTU 600 |