

CLT-koetalon rakennusfysikaaliset tutkimukset



CLT-koetalon rakennusfysikaaliset tutkimukset

Valtteri Pirttinen (toim.)

CLT-koetalon rakennus- fysikaaliset tutkimukset

Sarja B. Raportit ja selvitykset 11/2016

© Lapin ammattikorkeakoulu ja tekijät

ISBN 978-952-316-136-8 (pdf)
ISSN 2342-2491 (verkkajulkaisu)

Lapin ammattikorkeakoulun julkaisuja
Sarja B. Raportit ja selvitykset 11/2016

Rahoittajat: Digipolis, Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto, Lapin Liitto,
Vipuvoimaa EU:lta 2007–2013,
Ammattiopisto Lappia

Toimittaja: Valtteri Pirttinen
Taitto: Lapin AMK, viestintäyksikkö

Lapin ammattikorkeakoulu
Jokiväylä 11 C
96300 Rovaniemi

Puh. 020 798 6000
www.lapinamk.fi/julkaisut

Lapin korkeakoulukonserni



Lapin korkeakoulukonserni LUC
on yliopiston ja ammattikorkeakoulun strateginen yhteenliittymä.
Konserniin kuuluvat Lapin yliopisto
ja Lapin ammattikorkeakoulu.
www.luc.fi

Sisällys

Tytti Ahoranta

ESIPUHE	7
Lähteet.	10

Juha Autioniemi, Mikko Vatanen & Valteri Pirttinen

VAIPPARAKENTEIDEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA	11
Mittaus- ja tiedonkeruujärjestelmä	11
Vaipparakenteiden lämpötekninen toiminta	12
Vaipparakenteiden kosteustekninen toiminta	16
Vaipparakenteiden kosteusturvallisuus.	16
Kesäkondenssitarkastelu	18
Homeriskitarkastelu	20
Lähteet.	22

Tuomas Alakunnas

VAIPPARAKENTEIDEN ILMATIIVEYS	23
Ilmatiiveysmittauksen tarkoitus	23
Tiivysmittausten toteutus CLT-koetaloon	24
Lähteet.	25

Antti Niemelä

PAUKEMELUTUTKIMUS	27
CLT-koetalon paukemelututkimus.	27
Tutkimuksen tausta.	27
Mittaus- ja tiedonkeruujärjestelmä	28
Mittausohjelmisto	29
Mittaustulokset	31
Yhteenveto	37
CLT-elementin laboratoriotutkimus	38
Testausjärjestelyt	38
Mittaustulokset	39
Johtopäätökset	42
Lähteet.	42

Kari Peisa

PAUKEMELUN MITTAUSDATAN ANALYYSI	43
Mittausdatasta analysoidut suureet	43
Tulokset	45
Johtopäätökset	48
Lähteet	48

Valtteri Pirttinen

CLT – KOULUTUSMATERIAALI	49
Koulutusmateriaalin sisältö	49
CLT-rakentamistapa	49
CLT-rakenteiden suunnittelu	51
Rakenteiden mitoitusperusteet	51
Palotekninen suunnittelu	52
Lähteet	54

Mikko Vatanen & Valtteri Pirttinen

OPISKELIJAT MUKANA TEKEMÄSSÄ CLT-TUTKIMUSTA	55
Johdanto	55
CLT-koetalon taipumien mittaus laserkeilaimella	55
Työn tausta	55
Taipumamittausten tulokset	56
CLT-koetalon rakenteiden muodonmuutokset	58
Työn tausta	58
Laskennallisten taipumatarkasteluiden tuloksia	58
CLT-koetalon vaipparakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan analysointi	62
Työn tausta	62
Laskennallisten ja mitattujen tulosten vertailua	62
CLT-koetalon lämpötekniinen simulointi COMSOL Multiphysics ohjelmistolla	64
Työn tausta	64
Simulaatiomallin rakentaminen	64
Simuloinnin tuloksia	66
CLT-rakenteisen ulkoseinän ilmastoinen eristävyys	68
Työn tausta	68
Mittausmenetelmä	68
Mittautulokset	68
Näillä konsteilla onnistut	
CLT-rakentamisessa – ohjevihko	70
Työn tausta	70
Lopputuotos	70
KIRJOITTAJAT	73

Esipuhe

Ilmastonmuutos ja huoli ympäristöstä ovat lisänneet uusiutuvien luonnonvarojen kysyntää ja käyttöä maailmanlaajuisesti. Ilmastonmuutoksen ehkäisemisestä johtuvat vaatimukset rakentamisen resurssitehokkuudesta sekä rakennustuotteiden vähähiilisydestä ja kierrätettävyydestä ovat omalta osaltaan vauhdittaneet puurakennusvaatioiden kehittämistä. Uusiutuvana raaka-aineena puu on noussut yhdeksi potentiaalisimmista materiaaleista maailmassa.

Kaupunkien asuntokannan tihentämistarve on suuri. Seuraavan kahden vuosikymmenen aikana asunto on rakennettava kolmelle miljardille ihmiselle. Näin ollen lähitulevaisuudessa kaupungistumisen ja väestön kasvun myötä 100 000 ihmistä maailmassa tarvitsee uuden kodin joka päivä. Rakentaminen kuluttaa jo nyt puolet käytettävissä olevista luonnonvaroista ja tuottaa 40% kaikista jätteistä. Rakentamisen tarpeen ja asuntotuotannon vähähiilisyysasetelmiin haasteisiin voidaan parhaiten vastata uusiutuvista ja vähähiilisistä raaka-aineista valmistetuilla rakennusmateriaaleilla. Sellaisia voidaan valmistaa puusta.

Kerrostalo tuotantoon ja muuhun nopeaan rakennustuotantoon soveltuvista massiivipuurakenteista nopeimmin on yleistynyt CLT (Cross Laminated Timber). Se on massiivipuulamelleja ristiinliimaamalla rakennuksen kantavaksi rakenteeksi jalostettu tuote. Pääsääntöisesti CLT:stä valmistetaan runkolevyjä suurelementteinä, jotka työstetään asennusvalmiiksi detaljeineen. Mahdollisimman tehokasta asuntotuotantoa varten CLT-levyt kootaan ja varustellaan yleensä sisustuksia myöten valmiiksi tilaelementeiksi – tilamoduuleiksi.

CLT-rakentaminen on yleistynyt nopeasti Keski-Euroopassa ja Kanadassa. Suomessa ensimmäisen ja toistaiseksi ainoan CLT-tuotantolaitoksen avajaisia saatiin odottaa vuoden 2014 loppupuolelle saakka, vaikka metsää Suomessa on eniten asukasta kohden maailmassa ja valtava rakennusmarkkinapotentiaali jo heti länsi- ja pohjoisrajan takana Ruotsissa ja Norjassa.

Rakentamiseen vaikuttavat megatrendit ovat olleet myötävaikuttamassa massiivipuurakentamiseen liittyvien hankkeiden käynnistämiseen myös Lapin maakunnassa. Tämän teoksen aineisto on tuotettu 1.4.2013–30.4.2015 toteutetun CLT-Koetalohankkeen aikana. Hankkeen päätoteuttaja oli Kemin Digipolis Oy ja osatoteuttajina olivat Ammattiopisto Lappia sekä Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu ja Rovaniemen am-

mattikorkeakoulu. Ammattikorkeakoulut yhdistyivät projektin aikana 1.1.2014 alkaen Lapin ammattikorkeakouluksi.

CLT-Koetalohankkeen tavoitteena on ollut tehdä CLT-rakentamista tutuksi Suomessa ja testata rakenteen toimivuutta sekä uudenlaista rakennustapaa arktisella alueella. Hanke oli jatkoa Ammattiopisto Lappian teolliselle CLT-oppimisympäristöhankkeelle, CLT-koetehtäälle. CLT-Koetalohanke kuului Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) innovaatiotoiminnan ja verkostoitumisen edistämisen toimintalinjaan. Tyypiltään se oli investointi- ja kehittämishanke.

CLT-Koetalohankkeen suunnitelman mukainen tavoite oli konkreettinen: Suunnitella ja toteuttaa CLT-runkoinen, rakentamismääräykset täyttävä, 1½-kerroksinen pientalo sekä suunnitella ja toteuttaa talon rakenteiden rakennusfysikaaliset mittaukset. Vastuu hankkeen toteuttamisesta oli jaettu osatoteuttajien kesken siten, että Digipolis Oy vastasi talon rakennuttamisesta, rakennustyön työmaatoiminnoista ja hankehallinnosta. Ammattiopisto Lappia vastasi Koetalon rakenne ja detaljisuunnittelusta ja Lapin ammattikorkeakoulu rakennusfysikaalisten mittausten suunnittelusta ja toteutuksesta sekä mittaustulosten analysoinnista ja virallisesta raportoinnista. Lapin ammattikorkeakoulu vastasi myös mm. rakennuksen materiaaliäänten (paukemelun) mittausten instrumentoinnista ja mittaustulosten visualisointiin tarvittavan käyttöliittymän toteutuksesta.

Rakentaminen on klusteritoimintaa. Rakennusvaiheen aikana hankkeen toteutuksessa oli mukana runsaat 50 henkilöä lähes kolmestakymmenestä eri yrityksestä. Näin ollen Koetalohanke on toiminut myös konkreettisella tavalla CLT rakentamiseen liittyvän tiedon välittämisessä yrityksiin ja yleisesti puurakentamisen klusteritoiminnan kehittämisessä Lapin maakunnassa.

Koetalohanke oli yhtä yritystä lukuun ottamatta kaikille muille sen toteutukseen osallistuneille tahoille ensimmäinen kosketus CLT-rakentamiseen. Toteuttajatiimi toimi tiiviissä ja toistensa osaamiseen luottavassa yhteistyössä koko hankkeen ajan tavoitteenaan mahdollisimman laadukkaan lopputuloksen aikaansaaminen. Vastuualueiden rajat joustivat eri vaiheissa tarvittavan uudenlaisen osaamisen soveltamistarpeen mukaan ja tiukan toteutusaikataulun varmistamiseksi.

Mediassa suurta mielenkiintoa herättäneen CLT-osaamiskeskuksen avajaisia vietettiin keväällä 2014 opetusministeri Krista Kiurun vihkiessä käyttöön sekä CLT-oppimisympäristön että CLT-Koetalon. Keväällä 2015 Kemissä pidetyn valtakunnallisen CLT-seminaarin puurakentamisen arvovaltaiset luennoitsijat ja runsas yleisö saivat toteuttajatiimin vakuuttuneeksi hankkeen toteutuksen tasosta.

Tähän julkaisuun on koottu hankkeen aikana tuotettua aineistoa. Johtopäätöksenä tutkimusten perusteella voidaan pitää lyhyesti sanottuna sitä, että ristiinliimattu massiivipuu on luotettava, jäykkä ja monipuolinen rakennusmateriaali. Näiden ominaisuuksien lisäksi CLT yllätti toteuttajat helpon käsiteltävyytensä ansiosta. Lopputulokseen voimme olla vähintäänkin tyytyväisiä.



Kuva 1. CLT-Koetalo siirrettiin alkuperäiseltä rakennuspaikaltaan Kemin Digipoliksestä kokonaisuena Ajoksen satamaan lokakuussa 2015. Talo on vuokrattu Kemin Matkailu Oy:lle jäänmurtaja Sammon risteilymatkustajien Check in tilaksi. Talvisesongin aikana 2015-2016 Kemissä vierailee n. 18 000 matkailijaa. (Kuva Kimmo Heikka)

CLT-rakentamisen kehitystyö on saanut jatkoa 1.9.2015 alkaneella Interreg Nord-rahoitteisella yhteispohjoismaisella hankkeella. Siinä päätoteuttaja on Luulajan teknillinen yliopisto (S) ja osatoteuttajina Centria-ammattikorkeakoulu (FI), Kemin Digipolis Oy (FI), Lapin ammattikorkeakoulu Oy (FI) ja SP Ruotsin tekninen tutkimuslaitos (S). Hanke kestää 30.5.2018 saakka.

Osatoteuttajien vastuuhenkilöt CLT-Koetalohankkeen toteuttaneessa insinööritiimissämme olivat: Martti Mylly (Ao Lappia), Antti Niemelä (Lapin AMK), Mikko Vatanen (Lapin AMK) ja Matti Yliniemi (Ao Lappia).

Tuloksellisesta ennakkoluulottomuudestanne kiittäen,

TYTTI AHORANTA

CLT-Koetalohankkeen projektipäällikkö

Digipolis Oy

LÄHTEET

Holmen magasin 1/2014: Ulrika Nybäck, Så når byggandet hållbara höjder.
Metsäteollisuus ry:n julkaisu: Metsäteollisuuden visio – Katse vuoteen 2025

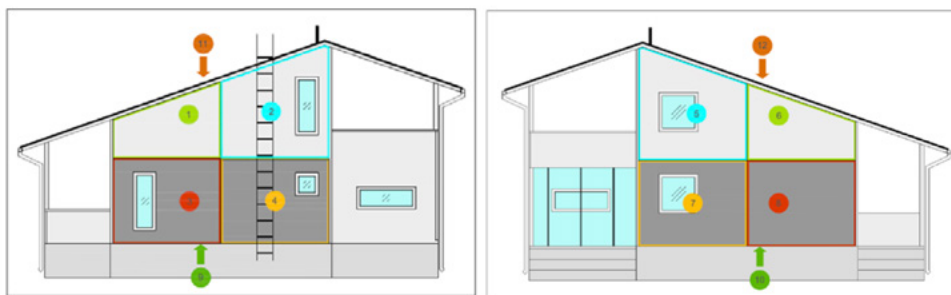
Vaipparakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta

MITTAUS- JA TIEDONKERUUJÄRJESTELMÄ

Lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa tutkitaan Vaisalan HMP 110 -mittapäillä, jotka mittaavat sekä lämpötilaa että suhteellista kosteutta. Mittapäät on suojattu metallikuorella ja membraanikalvolla, koska pitkäaikaistutkimuksen aikana olosuhteet voivat hetkittäin olla erittäin haastavat. Mittapäiden tuottama mittaustieto kerätään, prosessoidaan ja lähetetään tallennettavaksi tietokantapalvelimelle NI cRIO -tiedonkeruulaitteella. Lämpötila- ja kosteustelukemat tallennetaan minuutin välein.

Lisäksi mittausjärjestelmään kuuluu langaton ulkolämpötilan- ja suhteellisen kosteuden mittauspiste. Ulko-olosuhteiden mittauspisteen anturi on myös Vaisala HMP 110 ja se on asennettu säteilysuojan koetalon pohjoisseinälle. Säteilysuojan tarkoituksena on poistaa suoran auringonsäteilyn lämmittävä vaikutus.

Mittapäät on asennettu koetalon vaipparakenteisiin kahteentoista eri sektoriin kuvan 2 mukaisesti. Seinärakenteiden mittaussektoreita on yhteensä 8 kappaletta ja yläpohjan sekä alapohjan molempia 2 kappaletta. Näin ollen mittaussektoreita on yhteensä 12 kappaletta. Jokaisessa mittaussektorissa on rakennuksen poikkileikkauksen suunnassa neljä mittauspistettä, joten mittauspisteitä on yhteensä 48 kappaletta.

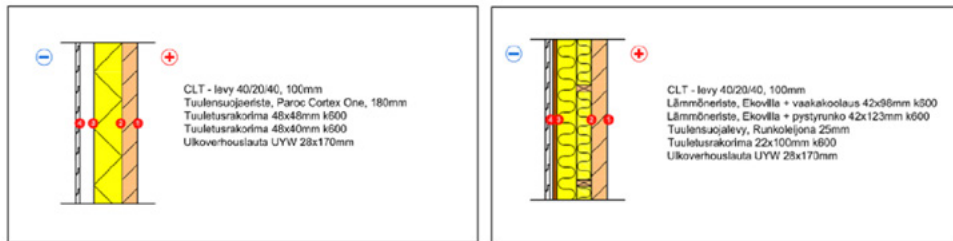


Kuva 2. Mittaussektorit pohjoinen – etelä

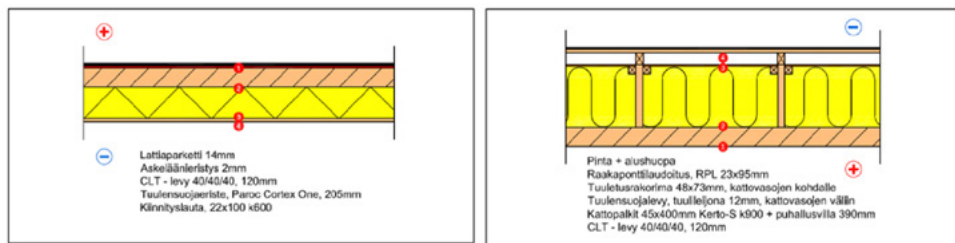
Koetalon vaipparakenteissa on käytetty kahta erilaista seinärakennetta US₁ ja US₂ (kuva 3) sekä yhdentyyppistä alapohja- ja yläpohjarakennetta (kuva 4). Mittaussektorit 2,4,5 ja 7 on toteutettu US₁-seinärakenteella ja mittaussektorit 1,3,6 ja 8 US₂-seinä-

rakenteella. Alapohjan mittaussektorit ovat 9 ja 10. Yläpohjan mittaussektorit ovat 11 ja 12.

Sektoreiden neljä mittauspistettä on sijoitettu eri rakennemateriaalien rajapintoihin (kuvat 3 ja 4). Mittapää on asennettu koetalon rakennusvaiheessa ja poikkileikkausten suuntaisesti rakenteita rikkomatta. Mittauspisteet ovat: CLT-levyn sisäpinta (1), CLT-levynulkopinta/eristetilan sisäpinta (2), eristetilan ulkopinta/tuulensuojan sisäpinta (3) ja ilmarako/ulkoverhouksen takapinta/ryömintätila (4).



Kuva 3. Rakenneleikkaukset ja mittauslayerit US1 ja US2



Kuva 4. Rakenneleikkaukset ja mittauslayerit AP ja YP

VAIPPARAKENTEIDEN LÄMPÖTEKNINEN TOIMINTA

CLT-vaipparakenteen toteutustapa, jossa yhtenäinen runkorakenne on sijoitettu sisimmäksi kerrokseksi, mahdollistaa hyvin yhtenäisen ja tiiviin eristekerroksen toteutuksen. Yhtenäisen vaipparakenteen vuoksi mahdollisten *kylmäsiltojen* määrä on vähäinen. Vähäinen kylmäsiltojen määrä parantaa omalta osaltaan talon energiataloutta sekä varmistaa myös rakenteen kosteusteknistä toimintaa, sillä juurikin kylmäsiltojen ovat kriittisiä kohtia kosteuden tiivistymiselle. (Björkholtz, 1997)

Materiaalina puulla on keveydestään huolimatta hyvä lämpökapasiteetti [C] eli *terminen massa*. Termisellä massalla tarkoitetaan materiaalin kykyä luovuttaa ja sitoa lämpöä itseensä. CLT-rakenteinen runko voi toimia ylimääräisen lämpöenergian puskurina ja näin pienentää huoneilman liiallista lämmön nousua. Vastaavasti rakennuksen sisälämpötilan laskiessa CLT-rakenteinen runko luovuttaa varastoimaansa lämpöä ja tasaa siten asumisen lämpöolosuhteita. Korkean termisen massan omaavat rakenteet parantavat rakennuksen asumisen lämpöolosuhteita ja samalla parantavat rakennuksen energiataloutta. (Björkholtz, 1997)

CLT-levyn lämpötekniset ominaisuudet ovat melkein samanlaiset kuin puulla. Itävaltalaisissa standardeissa Stora Enson CLT-levyn lämmönjohtavuuden arvoksi (lambda-arvoksi) on määritelty 0,11-0,13 [W/mK]. Tässä raportissa on käytetty CLT:n laskennallisena lämmönjohtavuuden lambda-arvona 0,11W/mK. (Stora Enso, 2012)

CLT-koetalon vaipparakenteiden laskennalliset U-arvot on esitetty kuvissa 5, 6, 7 ja 8. U-arvo eli lämmönläpäisykerroin kuvaa sitä lämpövirtaa, joka kulkee 1 m² – kokoisen rakenteen osan läpi lämpötilaeron ollessa 1 °C. Todellisissa rakenteissa U-arvo ei pysy vakiona, vaan se vaihtelee olosuhteiden muutosten mukaan. (Björkholtz, 1997) Matalan lämmönjohtavuutensa vuoksi CLT-levy toimii rakenteessa omalta osaltaan myös lämmöneristeenä. CLT-levyn laskennalliset prosenttiosuudet kokonaislämmönvastuksesta esitetään alla olevissa kuvissa.

US1		
	R	%-osuus kokonaislämmönvastuksesta
Sisäpuolinen pintavastus R _{si}	= 0,13	2 %
CLT-elementti 100mm → $R = \frac{0,1 \text{ m}}{0,11 \text{ W/mK}}$	= 0,91	14 %
Paroc Cortex One 180mm → $R = \frac{0,18 \text{ m}}{0,033 \text{ W/mK}}$	= 5,455	83 %
Ulkopuolinen pintavastus R _{se}	= 0,040	1 %
Yht. RT	= 6,535 $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$	100 %
(huom. %-osuudet pyöristetty)		
$U\text{-arvo} = \frac{1}{RT} \rightarrow \frac{1}{6,535 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}\right)}$	U-arvo = 0,153 W/m²K	
RAKMK MÄÄRÄYS 0,17 W/m ² K		

Kuva 5. US1 laskennallinen U-arvo

US2		
	R	%-osuus kokonaislämmönvastuksesta
Sisäpuolinen pintavastus R _{si}	= 0,13	2 %
CLT-elementti 100mm → $R = \frac{0,1 \text{ m}}{0,11 \text{ W/mK}}$	= 0,91	14 %
Ekovilla 100mm (sis. koolauksen k600) → $R = \frac{1}{\left(\frac{48 \cdot 10^{-6}}{0,098 \text{ m}} \frac{\text{W}}{\text{mK}}\right) + \left(\frac{552 \cdot 10^{-6}}{0,1 \text{ m}} \frac{\text{W}}{\text{mK}}\right) + 0,039 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}$	= 2,19	34 %
Ekovilla 125mm (sis. koolauksen k600) → $R = \frac{1}{\left(\frac{48 \cdot 10^{-6}}{0,125 \text{ m}} \frac{\text{W}}{\text{mK}}\right) + \left(\frac{552 \cdot 10^{-6}}{0,125 \text{ m}} \frac{\text{W}}{\text{mK}}\right) + 0,039 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}$	= 2,74	42 %
Tuulensuojalevy 25mm → $R = \frac{0,025 \text{ m}}{0,052 \text{ W/mK}}$	= 0,48	7 %
Ulkopuolinen pintavastus R _{se}	= 0,04	1 %
Yht. RT	= 6,49 $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$	100 %
(huom. %-osuudet pyöristetty)		
$U\text{-arvo} = \frac{1}{RT} \rightarrow \frac{1}{6,49 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}\right)}$	U-arvo = 0,155 W/m²K	
RAKMK MÄÄRÄYS 0,17 W/m ² K		

Kuva 6. US2 laskennallinen U-arvo

YLÄPOHJA

	R	%-osuus kokonaislämmönvastuksesta
Sisäpuolinen pintavastus R _{si}	= 0,10	1 %
CLT-elementti 120mm → $R = \frac{0,12 \text{ m}}{0,11 \text{ W/mK}}$	= 1,09	10 %
Puhallusvilla 390mm (sis. koolauksen k900) → $R = \frac{1}{\left(\frac{45 \text{ mm}}{0,039 \text{ m}}\right) \left(\frac{0,12 \text{ W}}{\text{mK}}\right) + \left(\frac{855 \text{ mm}}{0,090 \text{ m}}\right) \left(\frac{0,39 \text{ W}}{\text{mK}}\right)}$	= 9,43	87 %
Tuulensuojalevy 12mm → $R = \frac{0,012 \text{ m}}{0,052 \text{ W/mK}}$	= 0,23	2 %
Ulkopuolinen pintavastus R _{se}	= 0,04	0 %
	+	
Yht. RT	= 10,89 $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$	100 %
		(huom. %-osuudet pyöristetty)
U-arvo = $\frac{1}{RT} \rightarrow \frac{1}{10,89 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}\right)}$	U-arvo = 0,092 W/m²K	
	RAKMK MÄÄRÄYS 0,09 W/m ² K	

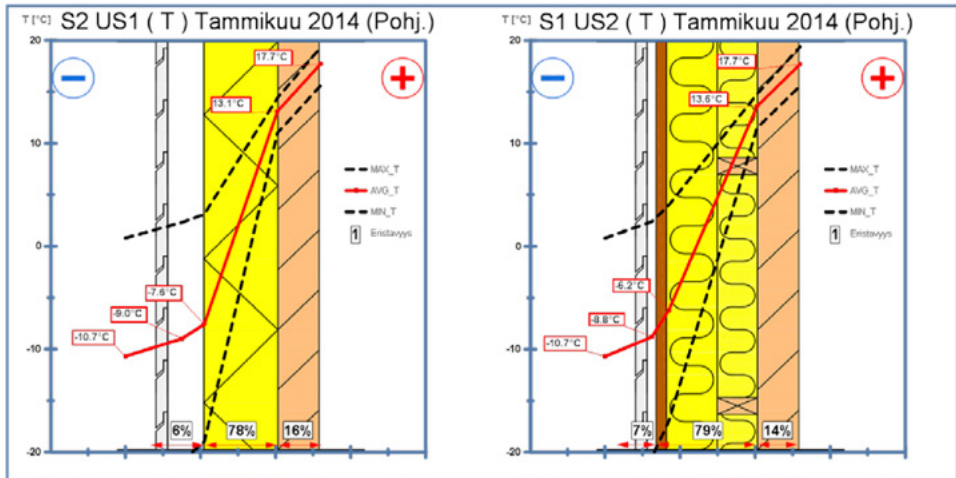
Kuva 7. Yläpohja laskennallinen U-arvo

ALAPOHJA

	R	%-osuus kokonaislämmönvastuksesta
Sisäpuolinen pintavastus R _{si}	= 0,17	2 %
CLT-elementti 120mm → $R = \frac{0,12 \text{ m}}{0,11 \text{ W/mK}}$	= 1,09	15 %
Paroc Cortex One 205mm → $R = \frac{0,205 \text{ m}}{0,033 \text{ W/mK}}$	= 6,2	82 %
Ulkopuolinen pintavastus R _{se}	= 0,04	1 %
Yht. RT	= 7,5 $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$	100 %
		(huom. %-osuudet pyöristetty)
U-arvo = $\frac{1}{RT} \rightarrow \frac{1}{7,5 \left(\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}\right)}$	U-arvo = 0,134 W/m²K	
	RAKMK MÄÄRÄYS 0,17 W/m ² K	

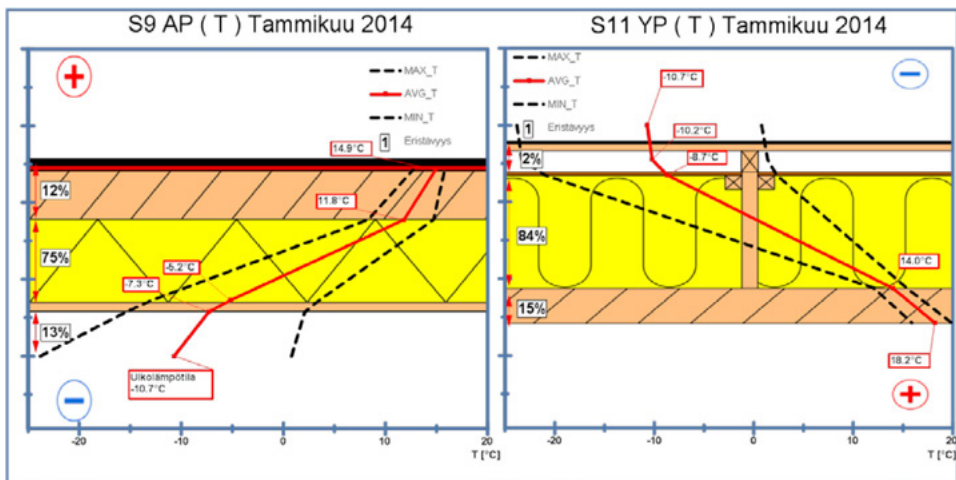
Kuva 8. Alapohja laskennallinen U-arvo

Kuvissa 9 ja 10 esitetään mittaussektoreiden 1 (US2), 2 (US1), 9 (AP) ja 11 (YP) lämpöteknistä toimintaa tammikuussa 2014. Kuvan 9 alareunassa ja kuvan 10 vasemmalla laidalla on esitetty ns. lämpötilajakauma, joka on pakkaskaudella hyvin lähellä eri rakennekerrosten osuutta eristävydestä. Eristetilan osuus lämpöjakaumasta pystyrakenteilla on tammikuussa ollut keskimäärin 78–79 % ja CLT-elementin osuus 14–16 %. Jäljelle jäävä 6–7 % osuus lämpöjakaumasta on tuuletusvälin olosuhteiden erotus ulkolämpötilasta.



Kuva 9. Lämpötekninen toiminta tammikuu 2014: seinärakenteet

Eristetilan osuus lämpöjakaumasta kuvassa 10 vaakarakenteilla on tammikuussa ollut keskimäärin 75–84 % ja CLT-elementin osuus 12–15 %. Jäljelle jäävä 2–13 % osuus lämpöjakaumasta on tuuletusvälin ja ryömintätilan olosuhteiden erotus ulkolämpötilasta



Kuva 10. Lämpötekninen toiminta tammikuu 2014: ylä- ja alapohjarakenteet

Laskennallisten ja koetalolla mitatun datan (kuvat 9 ja 10) perusteella voidaan todeta CLT-levyn eristävä vaikutus. Kuvista huomataan, että tammikuun aikana CLT-levyn eristävytykset ovat hyvin lähellä laskennallisia eristävytyksiä. Tammikuun kuvaajat valettiin tähän tarkasteluun, koska tammikuussa auringon säteiden lämmittävä vaikutus on lähes olematon.

Tutkimusten tulosten perusteella voidaan todeta, että CLT-koetalon rakenneratkaisut toimivat lämpötekniisesti hyvällä tasolla

VAIPPARAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNINEN TOIMINTA

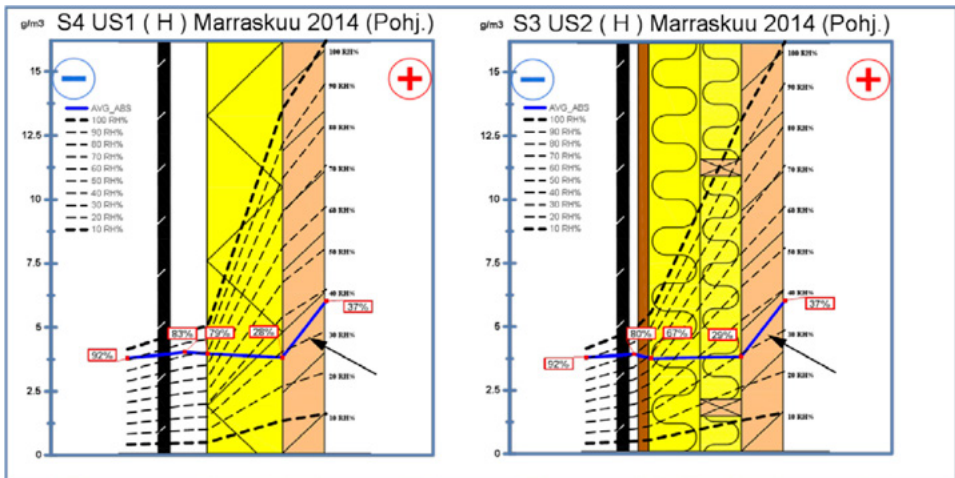
Vaipparakenteiden kosteusturvallisuus

CLT-rakenteiden kosteusteknisen toimivuuden kannalta tärkein tekijä on CLT-rungon toiminta *höyrynsulkuna*. Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan lämmöneristyksen lämpimällä puolella olevien ainekerrosten yhteenlaskettu vesihöyrynvastus tulee olla vähintään viisinkertainen tuulensuojan vesihöyrynvastukseen. Esimerkiksi 100 mm:n paksuisella CLT-elementillä vesihöyrynvastus on noin 25-kertainen tyypilliseen tuulensuojaan verrattuna. Massiivisen rakenteensa ansiosta CLT-rakennuksissa höyrynsulku onnistutaan toteuttamaan yhtenäisenä varmemmin kuin monissa muissa rakennevaihtoehdoissa.

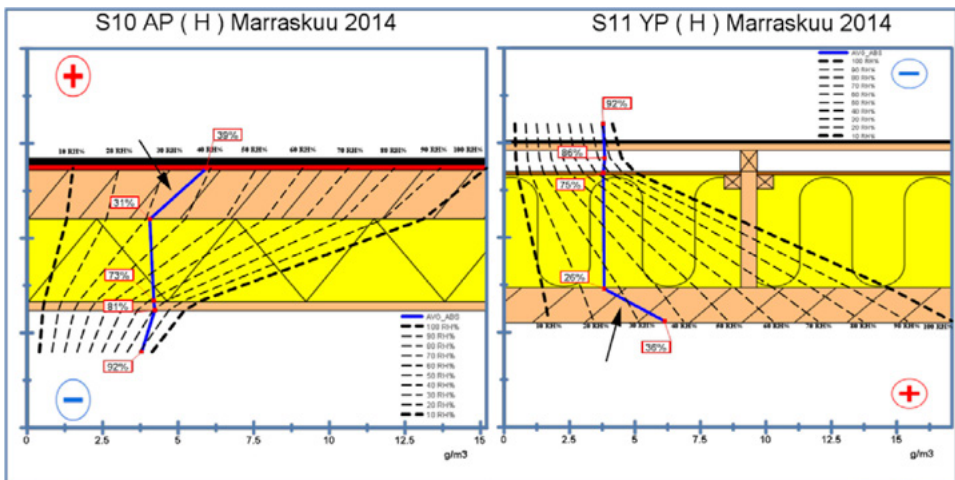
Vesihöyrypitoisuuksien ero sisä- ja ulkoilman välillä aiheuttaa *diffuusiota*. Vesihöyry diffuusio on kaasun molekyylien liikettä suuremmasta pitoisuudesta pienempään pitoisuuteen. Yleisimmin diffuusion suunta on lämpimästä tilasta kylmempään päin. Vesihöyryn liiallinen tunkeutuminen seinärakenteisiin ja samalla mahdolliset kosteusvauriot estetään suunnitteleamalla seinämä siten, että lämmöneristeen ja lämpimän sisätilan väliin tulee riittävän vesihöyrytiivis kerros (*höyrynsulku*). (Siikanen, 2014)

Vesihöyry tiivistyminen vedeksi (*kondensoituminen*) voi tapahtua joko rakenteen pinnassa tai sen sisällä, kun suhteellinen kosteus on 100 %. Rakenteissa vesihöyry tiivistyy aina ympäröivää ilmaa kylmemmälle, kovalle pinnalle (esim. kylmä ikkunalasi), mikäli vesihöyry kyllästymiskosteus eli *kastepiste* ylittyy. (Björkholtz, 1997)

Mittaustuloksista voidaan päätellä, että CLT-levy rakenteen sisäpinnassa toimii rakenteellisena höyrynsulkuna tehokkaasti ja estää diffuusion vaikutuksesta siirtyvän kosteusvirran sisäilmasta rakenteen ulompiin osiin (osoitettu kuvissa 11 ja 12 mustin nuolin). Lähellä kastepistettä olevia tai muutoin haitallisia suhteellisen kosteuden arvoja ei vuoden 2014 seurannassa esiintynyt koetalon rakenteissa.



Kuva 11. CLT-levyn toiminta höyrynsulkuna marraskuussa 2014 mittaussektoreissa 4 (US1) ja 3 (US2).



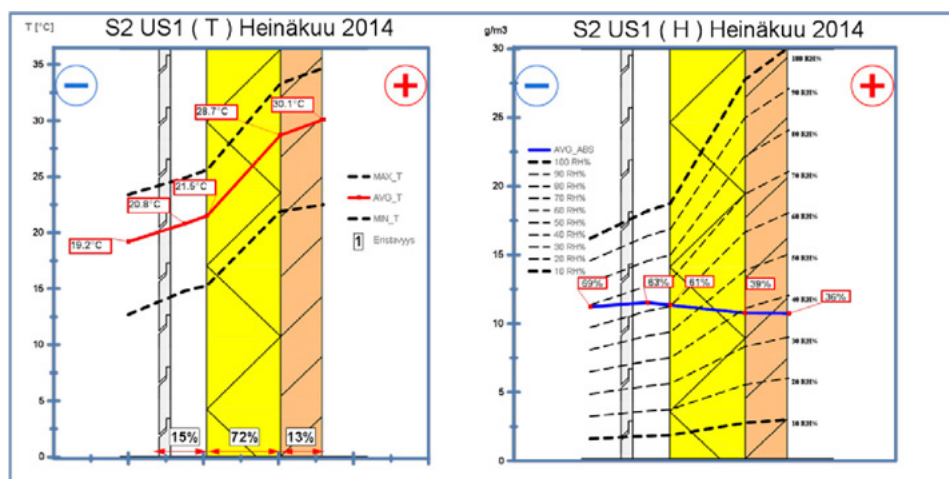
Kuva 12. CLT-levyn toiminta höyrynsulkuna marraskuussa 2014 mittaussektoreissa 10 (AP) ja 11 (YP)

Tutkimusten tulosten perusteella voidaan todeta, että CLT toimii rakenteessa höyrynsulkuna riittävän tehokkaasti, estääkseen haitallisen vesihöyryn pääsyn rakenteisiin.

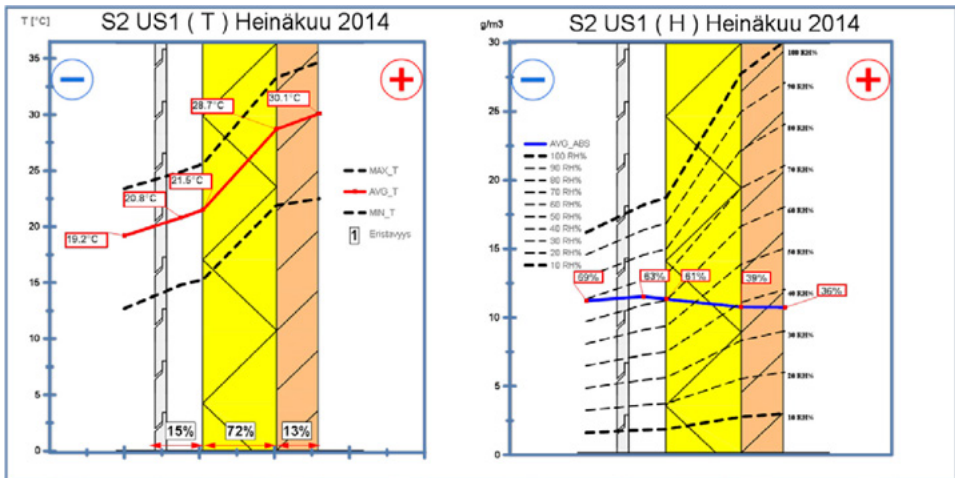
Kesäkondenssitarkastelu

Koetalolla tutkittiin myös vuoden 2014 mittausajanjaksolla *kesäkondenssin* mahdollisuutta. Kesäkondenssilla tarkoitetaan diffuusion vaikutuksesta siirtyvän kosteusvirran siirtymistä ulkoa sisäänpäin, sekä mahdollista kondensoitumista tiiviin rakeneosan ulkopintaan. Kuumat kosteat kesäpäivät yhdistettynä rakennuksen sisätilojen voimakkaaseen jäähdyttämiseen, voivat antaa edellytykset kesäkondenssille. (Siikaniemi, 2014)

CLT-koetalon mittauksista huomattiin, ettei koetalon rakenteissa ollut kesäkondenssin vaaraa. Koetalon kosteusteknistä toimivuutta paransi myös koetalolla vallinneet korkeat sisälämpötilat. Sisätilojen jäähdytystä ei koetalolla toteutettu, jonka vuoksi kesäkondenssin vaaraa ei ollut. Kuvissa 13 ja 14 esitetään sektoreiden 2 ja 1 lämpötila- ja kosteusjakaumat heinäkuussa. Kuvaajista huomataan, että mahdollisuuksia kesäkondenssille ei ollut heinäkuussa. Kuvissa esiteltyjen US1- ja US2-rakenteiden lisäksi, myöskään AP- ja YP-rakenteissa ei ollut riskiä kesäkondenssille.



Kuva 13. Lämpötila- ja kosteusjakaumat US1-rakenteessa heinäkuussa 2014 mittaussektorissa 2



Kuva 14. Lämpötilajakaumat US2-rakenteessa heinäkuussa 2014 mittaussektorissa 1

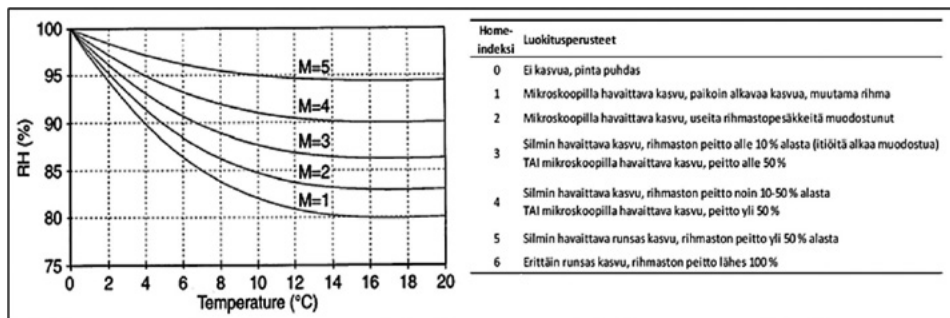
Tutkimusten tulosten perusteella voidaan todeta, että CLT-koetalon rakenteissa ei ollut kesäcondenssin vaaraa.

Homeriskitarkastelu

CLT-koetaloprojektissa tutkittiin myös mahdollista homeen kasvua rakenteissa alun perin Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) kehittämällä homeen kasvun laskentamallilla, jonka kehitystyö aloitettiin 1980-luvulla. Homemallin kehitystyötä on jatkettu Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) ja VTT:n toimesta yhteisprojektissa vuosina 2005–2008 sekä VTT:n ja TTY:n yhteisessä jatkokehityshankkeessa (ENERSIS v.2010–2013), joissa mallin tarkkuutta on pyritty parantamaan entisestään. Kehitystyön tuloksena on saatu aikaan VTT-TTY homeriskimalli. (VTT, 2011)

VTT-TTY homeriskimallia käyttämällä voidaan arvioida homeen kasvun riskiä eri rakennusmateriaalien pinnalla muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa. Mallin avulla voidaan selvittää kuinka kauan ja paljon rakenteet ja materiaalit kestävät kosteutta ennen kuin hometta alkaa kasvaa. Mallia voidaan käyttää myös apuna rakennusten home- ja kosteusongelmien ehkäisyyn sekä arvioimaan home- ja kosteusvaurioiden laatua ja niiden korjaustarpeen laatua. (VTT, 2011)

Homeen kasvulle suosiolliset olosuhteet riippuvat ympäristössä vallitsevista lämpö- ja kosteusolosuhteista. Matalampi lämpötila vaatii suuremman suhteellisen kosteuden, jotta homeen kasvu on mahdollista alkaa. (VTT, 2011) Kuvassa 15 esitetään olosuhteet, jolloin homeenkasvu on mahdollista sekä homeindeksin luokitusperusteet.



Kuva 15. Homeen kasvulle suotuisat olosuhteet ja homeindeksin luokitusperusteet (VTT, 2011)

CLT-koetalon vuoden 2014 sektoreiden lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot haettiin tietokannasta ja sijoitettiin VTT-TTY homeindeksilaskuriin. Excel-pohjaiseen laskuriin sijoitettiin kaikkien mittauspisteiden mitatut lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot tunnin välein. Kuvista 16 ja 17 nähdään, että laskennalliset homeindeksin maksimiarvot pysyivät koko vuoden aikana erittäin pieninä, eikä riskiä homeen kasvulle ollut. Kuvassa 17 kuvaaja on skaalattu välille 0 – 0,1, jotta sektoreiden homeindeksin maksimiarvot olisivat paremmin luettavissa. Suurin homeindeksin arvo koetalolla oli 0,056 (sektori 10, layer 4).



Kuva 16. Homeindeksin maksimi-arvot sektoreittain 2014, asteikko 0-6



Kuva 17. Homeindeksin maksimi-arvot sektoreittain 2014, huomaa skaalattu asteikko 0-0,1

CLT-koetalojen sektoreiden homeindeksin maksimi-arvot pysyvät siis reilusti alle yhden, jolloin homeen kasvun alkaminen on mahdollista.

Tutkimusten tulosten perusteella voidaan todeta, että CLT-koetalon rakenteissa ei ollut homehtumisen vaaraa.

LÄHTEET

- Björkholtz, D. 1997. Lämpö ja kosteus rakennusfysiikka. Helsinki: Rakennustieto Oy
- Stora Enso. 2012. Building Solutions. [Online] 2012. [Viitattu: 2.3.2015] <http://www.ct.info/en/media-downloads/brochures/brochures/>
- Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka perusteet ja sovelluksia. Helsinki: Rakennustieto Oy.
- VTT. (2011). Homeen kasvun mallin kehitystyö. [Online] 2011. [Viitattu: 15.1.2015] <http://www.rakennusteollisuus.fi/frame>

Vaipparakenteiden ilmatiiveys

ILMATIIVEYSMITTAUKSEN TARKOITUS

Ilmatiiveydellä tarkoitetaan rakenteen kykyä vastustaa ilman liikettä rakenteen läpi. Mitattaessa ilmatiiveyttä, mitataan vaipan läpäisevää ilmavirtausta. Vaipalla tarkoitetaan käytännössä rakennuksen sisätilojen erottavia rakennekerroksia kylmästä ulkoilmasta.

Ilmatiiveysmittauksen tulos ilmoitetaan n50- ja q50-luvulla. Ilmavuotoluku kuvaa rakennusvaipan ilmanpitävyyttä. Ilmavuotoluku n50 [1/h] kertoo montako kertaa rakennuksen ilmatilavuus vaihtuu tunnissa rakennusvaipan vuotoreittien kautta, kun rakennuksen vaipan yli aiheutetaan 50 Pascalin paine-ero. Mitä pienempi n50-luku, sitä tiiviimpi rakennus on. Ilmavuotoluku q50 [m³/hm²] määrittää vaipan pinta-alaa kohti, luku kuvaa paremmin ulkovaipan todellista ilmanpitävyyttä varsinkin suuremmissa rakennuksissa. (Paloniitty, 2013, Rakennusten tiiviysmittaus)

Rakennuksen ilmatiiviys vaikuttaa:

- Rakennuksen energiankulutukseen
- Rakennuksen kosteustekniseen toimintaan
- Rakennuksen asumismukavuuteen (Vedon tunne, kylmät pinnat)
- Epäpuhtauksien leviämiseen rakenteista sisäilmaan

Rakennukset luokitellaan tiiviiden perusteella A-G-luokkaan oheisen kuvan (kuva 18) arvojen mukaisesti.

TIIVIYSMITTAUSLUOKITUS	n50	q50
≤ 0,6 A		
0,7-1,0 B		
1,1-1,5 C		
1,6-2,0 D		
2,1-3,0 E		
3,1-4,0 F		
Yli 4,1 G		

Kuva 18. Tiiviysmittausluokitus (Paloniitty, 2013.)

TIIVIYSMITTAUSTEN TOTEUTUS CLT-KOETALOON

Tiiviysmittaukset toteutettiin kolmena erillisenä mittauskertana maaliskuun 2014 ja maaliskuun 2015 välisenä aikana. Mittausten yhteydessä talossa suoritettiin lämpökuvaus, jolla paikannettiin vuotokohtia. Ilmavuotoluvun mittauksissa käytettiin tutkimusmenetelmänä standardissa SFS EN 13829 esitettyä mittaussuunnitelmaa B (rakennuksen vaipan testaus). Tiiviysmittaus tehtiin koko rakennukseen.

Mittaus toteutettiin Minneapolis Blower Door -tiiviysmittauslaitteistolla. Rakennukseen ajettiin alipaine 5 Pascalin porrastuksella välillä -25...-70 Pa. Ylipainemittaus suoritettiin vastaavilla, positiivisilla ylipainearvoilla.

Rakennuksen ilmanvaihtokoneen kanavat ulos suljettiin tulppaamalla. Ulko-ovet ja ikkunat suljettiin ja väliovet avattiin mittauksen ajaksi. Viemäreiden hajulukot täytettiin vedellä sekä WC-istuin suljettiin teippaamalla. Kyseinen WC-istuin polttaa jätteet ja poistaa hajut IV-kanavan kautta.

Ilmatiiveystutkimuksissa käytettiin seuraavia mittalaitteita:

- Fluke 32 TiR-lämpökamera
- Fluke AirMeter 975-ilmansuuremittari
- Paine-eromittari Swema 300
- Minneapolis Blower Door-puhallin + ohjausyksikkö S/N 5080

Tiiviysmittausten tulokset

	18.3.2014	3.12.2014	24.3.2015	Keskiarvo	Tiiviy.luokitus
n50	0,8	0,6	0,7	0,7	B
q50	1,1	0,9	1,0	1,0	B

Tiiviysmittauksilla saatiin keskiarvotulokseksi tiiviysmittausluokka B. Tuloksissa on havaittavissa pientä vaihtelua eri kertojen välillä, mutta tutkimuksellisesti kyse ei ole merkittävästä muutoksesta. Erot selittyvät olosuhteiden vaihtelulla ja mittaustarkkuudella. Virheprosentti laitteistolla on yleensä n. 3-10 %. (Paloniitty, 2013.)



Tiiviysmittauksilla ja lämpökuvauksella pystyttiin todentamaan CLT-elementtien muodostavan käytännössä tiiviin ulkovaipan. Kolmella mittauskerralla elementtisaumojen, ala- tai yläpohjan liitoksissa ei havaittu vuotokohtia. Myöskään kylmäsiltoja ei havaittu nurkissa tai elementtiliitoksissa. Rakennuksessa havaitut vuotokohdat paikannettiin läpivienteihin, ovien tiivisteisiin tai rakenneosien ja elementtien liitoksiin. Tietenkin rakennus on kokonaisuus ja osiensa summa, jonka kaikki edellä mainitut asiat muodostavat.

LÄHTEET

Paloniitty, S. 2013. Rakennusten tiiviysmittaus. Helsinki: Suomen Rakennusmedia Oy

Paukemelututkimus

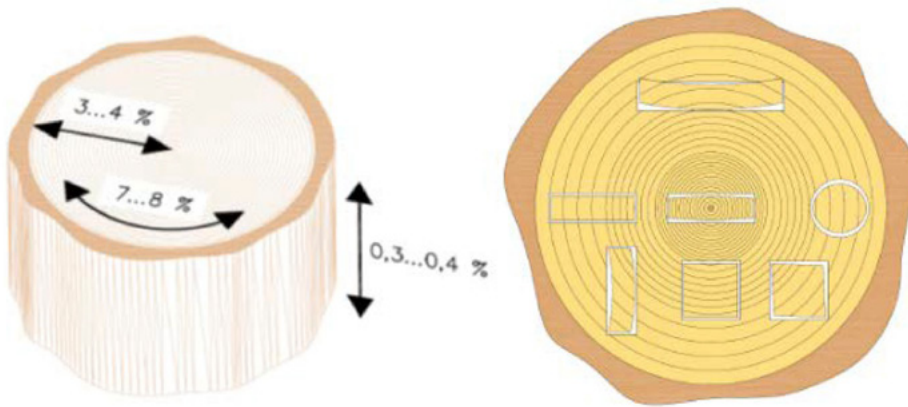
CLT-KOETALON PAUKEMELUTUTKIMUS

Tutkimuksen tausta

CLT-koetalohankkeessa suoritettiin rakennuksen sisällä rakenteiden äänimaailmaa kartoittava paukemelumittaus. Paukemelua ei tiettävästi ole koskaan tutkittu tieteellisellä tasolla, mutta yleinen käsitys on, että hirsi- tai puutalot ”paukkuvat” pakkasella. CLT-koetalo tarjosi mahdollisuuden mitata tätä ilmiötä sen ollessa tyhjillään. Paukemelumittauksella oli tarkoitus tutkia, kuinka paljon rakennus todellisuudessa paukkuu ja millä äänitasolla. Lisäksi mittaus tarjosi mahdollisuuden selvittää mitkä olosuhteet sisäilmassa mahdollisesti vaikuttavat paukemelun syntyyn ja esiintymistiheyteen.

Paukemelua syntyy, kun jokin CLT-levyn kerroksissa olevista laudoista muuttaa muotoaan olosuhteiden muutoksien aiheuttamana, usein johtaen halkeamiin. Tarkemmin sanottuna lautojen muodonmuutokset aiheuttavat jännitteitä elementin rakenteessa ja näiden jännitetilojen purkautuminen aiheuttaa terävän, paukemaisen äänen. Havaittuja syntymekanismeja on kaksi: laudan halkeaminen tai liimasauman ratkeaminen. Näiden lisäksi on mahdollista, että lauta irtoaa lappeen liimapinnasta, mutta tätä on vaikea havaita purkamatta elementtejä.

Hygroskooppisuus aiheuttaa puussa muodonmuutoksia, jonka suunta ja määrä riippuu siitä miten lautatavara on sahattu puun syihin nähden. Puun muodonmuutokset tulee ottaa huomioon puurakenteiden suunnittelussa. Kotimainen havupuu muuttaa muotoaan pituussuunnassa 0,3 – 0,4 prosenttia, leveyssuunnassa 3 – 4 prosenttia ja tangentialisesti 7 – 8 prosenttia. Kuvassa 19 on esitetty edellä mainitut muutokset sekä eri osista sahatun laudan muodonmuutokset. Joidenkin lähteiden mukaan on olemassa nyrkkisääntö: ”Kosteusasteen muutos neljällä prosenttiyksiköllä vastaa yhden prosentin muodonmuutosta”.



Kuva 19. Puun muodonmuutokset kosteuden muuttuessa sekä puiden eri osien käyttäytyminen kosteusolosuhteiden muuttuessa (Puuinfo Oy, 2011)

Mittaus- ja tiedonkeruujärjestelmä

CLT-koetalossa syntyvää pauketta mitattiin monisuuntamikrofoneilla, joilla äänen syntysuunnan paikantaminen on mahdollista. Mikrofoneja on CLT -koetalossa kaksi: yksi yläkerrassa ja toinen alakerran katossa. Mikrofonit ovat kytketty USB -kaapeleilla tietokoneeseen, johon on asennettu sovellus, joka monitoroi mikrofonien keräämien ääniä ja tallentaa ne mikäli äänenpaine ylittää sovelluksessa asetetut rajat. Mikrofonit ovat pyritty asentamaan mahdollisimman keskelle rakennusta.

Äänet tallennetaan sekä paikalliselle koneen kovalevyllä että verkon ylitse Rovaniemellä sijaitsevalle palvelimelle. Sovellus osaa automaattisesti merkitä äänet, jotka eivät ole impulssimaisia aaltomuodoltaan ja olettaa, että nämä eivät ole seinärakenteista kuuluvia paukeääniä. Tallenteet käytiin manuaalisesti läpi, jotta niistä voitiin poistaa muut äänet, jotka eivät ole rakenteissa syntyviä, kuten mahdolliset releäänet ja ulkoa kantautuvat äänet. Virheelliset äänet ensiksi merkittiin virheellisiksi, jonka jälkeen ne poistettiin kun kaikki äänet oli käyty läpi.

Äänen lisäksi tallennetaan äänen suunta ja äänenpaine desibeleissä. Äänenpaine-mittaus on suuntaa antava, eikä se ole tarkoitettu tieteelliseksi mittausarvoksi. Desibeli on suhteellinen mittaussuure ja vaatisi laitteiston tarkan kalibroinnin, jotta äänenpaine-mittauksista saataisiin luotettavia sekä tarkkoja. Mutta koska tämän tutkimuksen tarkoituksena ei niinkään ollut itse paukeäänien voimakkuuden analysointi, vaan tutkimuksessa keskityttiin äänien esiintymisfrekvenssiin sekä suuntaan. Desibeleillä kuitenkin voidaan osoittaa mitkä äänet ovat olleet merkittävästi voimakkaampia kuin toiset ja mikä näiden voimakkaampien äänien esiintymisfrekvenssit ovat.

Mittaukset suoritettiin talon ollessa tyhjiällä, siksi sovelluksessa on ajoitusmahdollisuus. Arkipäiväisin tallennus alkoi kuudelta ja päättyi puoli kahdeksalta seuraavana aamuna. Viikonloppuna tallennus oli päällä koko vuorokauden.

Mittausohjelmisto

Paikallisesti CLT-koetalossa on käytettävissä CLT-meas sovellus joka suorittaa itse mittaukset ja jonka kautta on mahdollista kuunnella tallennettuja ääniä. Sovelluksen kautta on tarkoitus seuloa mitatut äänet. Ohjelmistopäätarkoitus on kuitenkin monitoroida ääniä ja tallentaa ne tietokantaan.

Ohjelmisto toimii siten että se tallettaa jatkuvasti bufferiin äänidataa mikrofoneilta. Mikrofonit sisältävät ADC -muuntimen joka muuttaa äänisignaalin digitaaliseen muotoon. Sovellus seuraa tätä digitaalista äänisignaalia verraten sitä määriteltyihin raja-arvoihin. Mikäli äänisignaali ylittää määritellyt arvot tallennetaan bufferista 2 sekuntia tiedostoon, muussa tapauksessa bufferi tyhjenetään.

Sovellus jaoittelee äänet karkeasti. Analysoimalla mitattua ääntä sovellus merkkää äänet jotka ovat suurella todennäköisyydellä jotain muita, ei rakenteellisia ääniä. Analysointi tapahtuu vertailemalla tallenteen FFT-muunnettuja amplitudeja eri kohdista tallennetta. Mikäli amplitudeissa ei havaita eroja, voidaan olettaa että ääni on tasainen eikä impulssimainen ja todennäköisesti lähtöisin muusta kuin rakenteista. Tässä tapauksessa ääni luokitellaan muuksi ääneksi eikä sitä oteta huomioon esimerkiksi mittausportaalissa olevissa tilastoissa. Ääniä ei kuitenkaan poisteta vaan ne on käytävä manuaalisesti läpi. Joissain tilanteissa luokittelu ei toimi, vaan osa muuksi ääneksi luokitelluista äänistä onkin rakenteista syntyvää pauketta.

Sovellus paikantaa äänen vertaamalla äänentasoja eri mikrofonianavilla reaaliajassa. Mikrofonikanavilta tuleva ääni muunnetaan FFT-muunnoksella (Fast Fourier Transform) aika-alueelta taajuusalueelle jolloin äänisignaali voidaan purkaa taajuuskomponentteihin. Vertaamalla eri kanavien äänitasoja voidaan hakea karkea sijainti äänelle. Sijaintia tarkennetaan vertaamalla voimakkaimman kanavan vieressä olevia kanavia keskenään. Kuvassa 20 on esitetty kuvankaappaus CLT meas -sovelluksen käyttöliittymästä.

CLT Meas

Settings: Audio Menu | Screenshot | History | Vibration charts | Mouse

File	Origin	Device	dB
2014-12-14 07:29:25.mpg	5.91		42
2014-12-14 07:29:35.mpg	5.84	SPS2AC000481200	42
2014-12-14 07:32:39.mpg	4.00		39
2014-12-14 08:47:37.mpg	5.66		43
2014-12-14 09:02:50.mpg	5.51		42
2014-12-14 09:04:58.mpg	5.66		39
2014-12-14 09:06:21.mpg	11.42		61
2014-12-14 09:14:41.mpg	0.95	SBS1AC000481200	10
2014-12-14 09:42:21.mpg	5.12		45
2014-12-14 09:51:11.mpg	5.06		40
2014-12-14 10:29:53.mpg	2.88	SBS1AC000481200	41
2014-12-14 10:30:11.mpg	3.01		39
2014-12-14 11:15:38.mpg	8.85		58
2014-12-14 12:17:52.mpg	10.75		57
2014-12-14 12:54:18.mpg	5.79		43
2014-12-14 12:55:54.mpg	11.85		62
2014-12-14 13:14:18.mpg	1.67	SBS1AC000481200	15
2014-12-14 13:28:42.mpg	2.7	SDS1AC000481200	37
2014-12-14 13:29:09.mpg	10.89		66
2014-12-14 15:22:02.mpg	11		47
2014-12-14 15:40:23.mpg	5.88		48
2014-12-14 16:01:49.mpg	0.59		36
2014-12-14 17:17:52.mpg	4.3		40
2014-12-14 18:09:38.mpg	8.59		50
2014-12-14 19:03:09.mpg	0.94		18
2014-12-14 20:22:11.mpg	5.02		42
2014-12-14 21:40:20.mpg	11.08		58
2014-12-14 22:29:49.mpg	6.89		36
2014-12-14 22:44:18.mpg	1.99	SPS2AC000481200	45
2014-12-14 22:56:38.mpg	1.96	SPS2AC000481200	20
2014-12-14 23:00:27.mpg	3.9	SPS2AC000481200	43
2014-12-14 23:03:03.mpg	4.03	SDS1AC000481200	43
2014-12-14 23:09:38.mpg	4.05		45
2014-12-14 23:58:25.mpg	8.87		35
2014-12-15 00:13:18.mpg	5.1		37
2014-12-15 00:13:21.mpg	26.97		37
2014-12-15 01:40:13.mpg	5.97		39
2014-12-15 03:19:02.mpg	3.17		53
2014-12-15 03:25:11.mpg	5.32		40
2014-12-15 04:25:28.mpg	3.88		53
2014-12-15 04:43:11.mpg	11.05		36
2014-12-15 05:17:24.mpg	4.11		41

Play | Stop | Auto Play | Clear

Options

Tagging

Ignore tagged Untag

Ignore untagged

Ask for tagging

Ask for untagging

Recording

Recording length: 2 s Apply filtering

dB threshold: 5 dB Recordings folder: Clicker/alt Set

dB reference: 35 dB

Calibration: Set +33 dB

Visual

1 Background 2 Remotes

MicroCone Rotation

Save settings | Hide Options

Remove tagged

Mute Mic

Test mode Save to DB Hide old <35 events

Filtering: 0.00221 moving; 0.52079Hz 0.79366 sector calc; 0.36884 recording; 0.00244

DIGIPOLIS

LAPIN AMK

LAPIN LIITTO

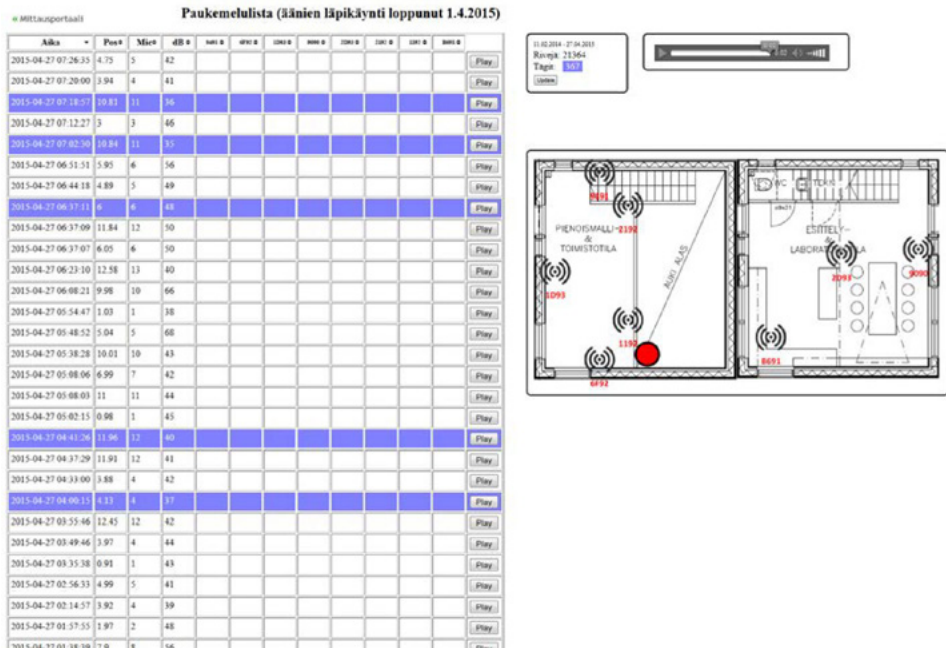
LAPPILA

EUROSTEELI-VERKOSTO

Vyöryntä EU:Ita

Kuva 20. Kuvankaappaus CLT meas –sovelluksesta

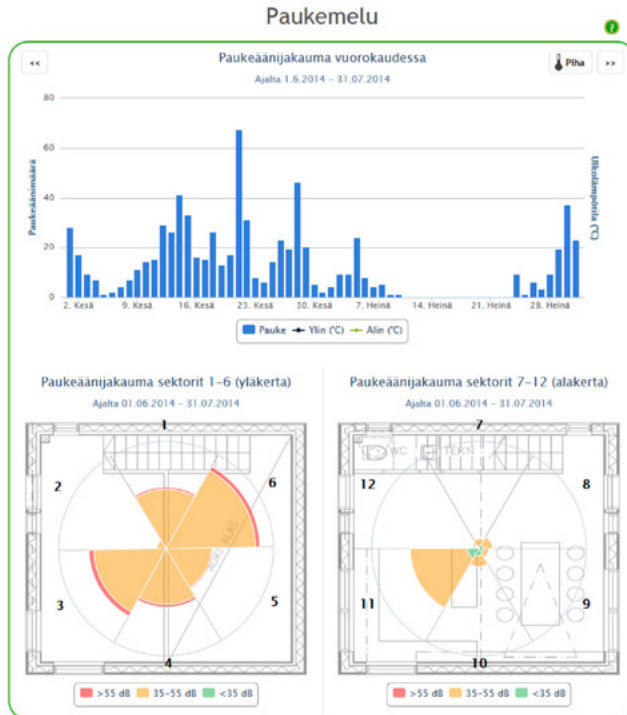
Paikallisen sovelluksen lisäksi ohjelmointiin erillinen web-käyttöliittymä paukeäänien kuuntelua varten. Tämä mahdollisti etäkuuntelun paukemelulle sekä yleisön pääsyn kuuntelemaan rakennuksessa syntyvää paukemelua internet-selaimella. Kuvassa 21 on esitetty kuvankaappaus kuuntelukäyttöliittymästä.



Kuva 21. Paukemelun kuuntelukäyttöliittymä

Mittaustulokset

Paukemelun ja muiden mittausten reaaliaikaseurantaa varten toteutettiin Internetissä toimiva mittaasportaalit (Kuva 22). Mittaasportaalit kautta on mahdollista seurata paukemelumittauksia Internet -selaimella. Paukemelumittaussivustolta on mahdollista tarkastella paukeilastoja mittaussivustolta kahden kuukauden jaksoissa. Sivulla esitetään päiväkohtainen määrä pylväsdiagrammeilla sekä suunta- ja äänenpainejakaumaa ylä- ja alakerrassa.



Kuva 22. Paukemelun reaaliaikainen mittausportaali

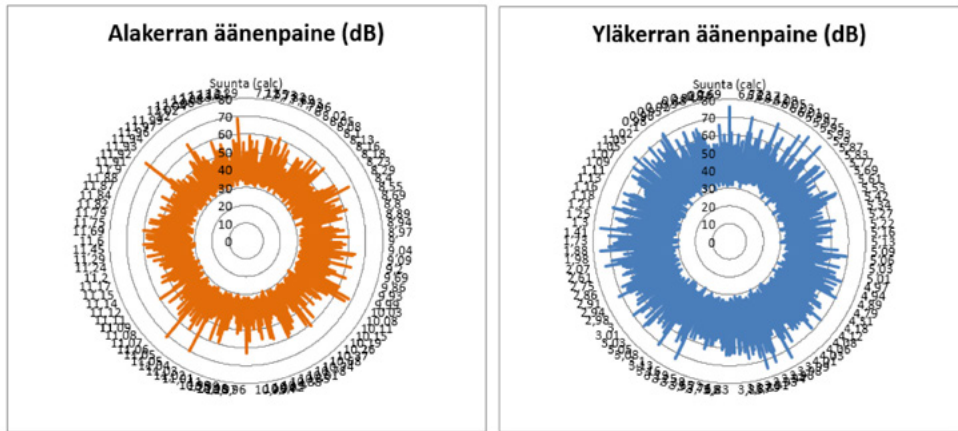
Mittaukset on jaoteltu karkeasti kolmeen luokkaan: alle 35dB, 35 – 55dB ja yli 55dB, joista yli 55dB ääniä voidaan pitää öiseen aikaan häiritsevinä. Äänenpaine on hieman ongelmallinen mittaussuure, sillä se on hyvin suhteellinen ja sen koettu häiritsevyys on subjektiivista johon vaikuttaa vahvasti myös äänen taajuus.

Absoluuttisen kosteuden muutokset on havaittu vaikuttavan paukkeiden määrään. Koetalon sisäilman lämpötila on melko stabiili samoin suhteellinen kosteus. Kesällä talon sisälämpötilat nousivat merkittävästi ja olivat lämpimimmillään yli 30 astetta suhteellisen kosteuden pysyessä 40 %:n molemmin puolin. Absoluuttinen kosteus on tuolloin suurempi, n. 14 g/m³ kuin esimerkiksi elokuun puolessa välissä, jolloin lämpötila putosi 25 asteeseen, mutta suhteellinen

kosteus pysyi samana. Tuolloin absoluuttinen kosteus on ollut 9 g/m³. Tämä 5 g/m³ pudotus absoluuttisessa kosteudessa aiheutti merkittävästi enemmän paukemelua.

Mitään selkeää jakaamaa kovien äänien esiintymistiheyden välillä ei ole havaittavissa. Paukkeen kokonaismäärässä on kuitenkin selkeästi havaittavissa, että pitkään

jatkonut kostea ja lämmin sisäilma on harventanut paukkeiden esiintymistiheyttä. Ulkoilman jäähtyessä ja absoluuttisen kosteuden pudotessa on havaittavissa merkittävä kasvua paukkeiden esiintymistiheydessä. Elokuun loppupuolella jopa voimakkaita, yli 70 dB:n paukkeita oli havaittavissa.

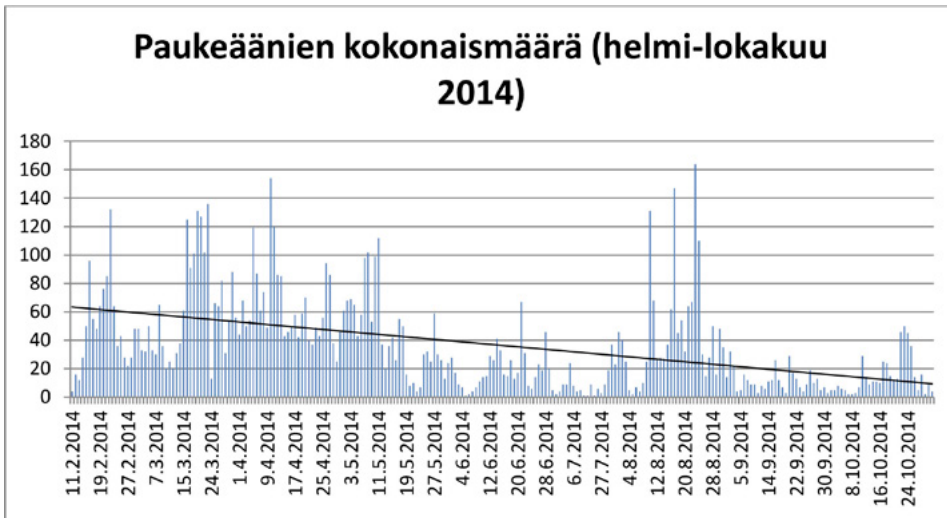


Kuva 23. Äänenpainemittauksien jakauma ala- ja yläkerrassa

Kuvassa 23 on esitetty maksimiäänepainemittaus suuntaa kohden ala- ja yläkerrassa. Kuvaajan kehällä olevat arvot ovat suuntasektoreita monisuuntamikrofoneilta. Yläkerran mikrofoni on sijoitettu siten että sektori 1 on suunnattu pohjoisseinää päin ja mikrofoniin sektoriorientaatio on vastapäivään. Alakerrassa, koska mikrofoni on asennettu kattoon, sektoriorientaatio on myötä päivään ja sektori 7 on suunnattu pohjoisseinään. Itse kuvaaja kummassakin kuvaajassa osoittaa maksimiäänepaineen sektorille. Sektorin tarkka suunta on laskettu erillisellä kaavalla ja on osoitettu kahden desimaalin tarkkuudella.

Kuvaajista on havaittavissa, että suurin osa yli 70 dB:n äänistä on nauhoitettu yläkerran mikrofoneista. Sekä ylä- että alakerran mittauksissa on havaittavissa, että sektoreilla 5 ja 9 esiintyy vähemmän kovia ääniä kuin muissa sektoreissa. Tätä tukee myös havainto, ettei sektoreilla sijaitseviin seinäelementteihin ole tullut runsaasti havaittavia halkeamia tai muita merkkejä muodonmuutoksista. Sektorilla sijaitseva eteläinen seinäelementti on käsitelty mustalla pintakäsittelyaineella, jossa mahdolliset halkeamat ovat erittäin selkeästi nähtävillä. Toisaalta sektori sisältää rakennuksen suurimman yhtenäisen ikkunan, jonka voi olettaa vaikuttavan osittain paukemelun vaimentumaan. Ikkuna sijaitsee itäisellä seinällä.

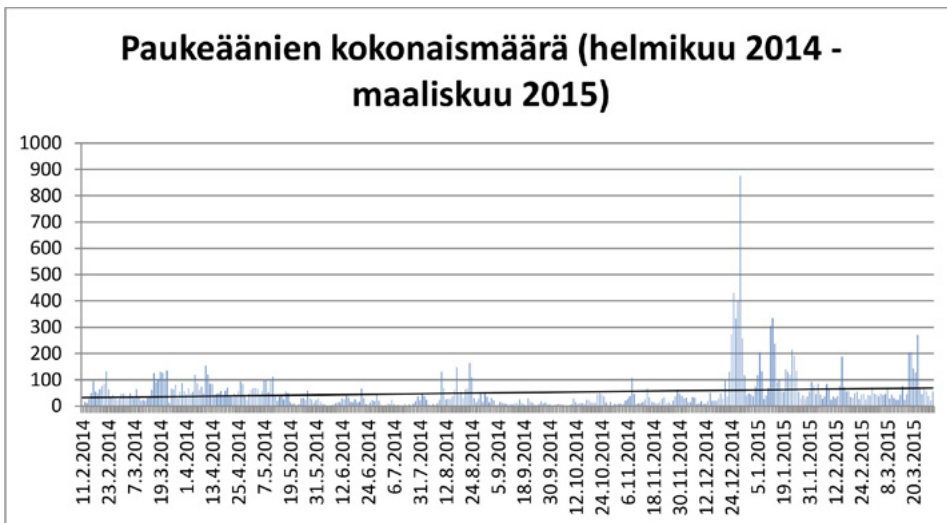
Kuvassa 24 on esitetty ala- ja yläkerran yhteenlaskettu kokonaispaukemäärä aikavälille 11.2.2014 – 30.10.2014. Kuvaajan trendiviivasta on havaittavissa kuinka merkittävästi paukkeen kokonaismäärä on vähentynyt ajan kanssa ja että sen määrä on laskevaa.



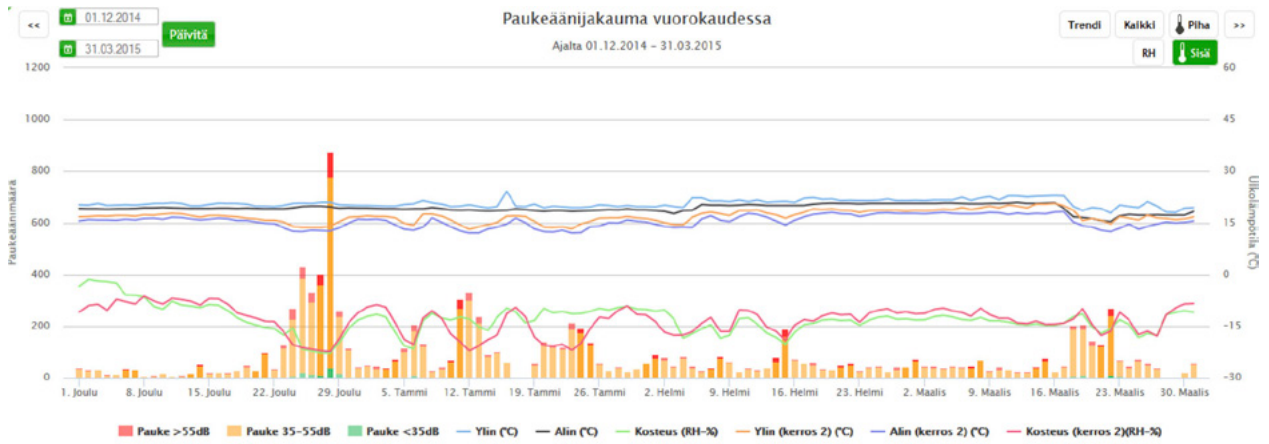
Kuva 24. Paukkeiden kokonaismäärä ja trendiviiva helmi-lokakuu 2014

Kuvassa 24 on esitetty mittaustiedot koko projektin keston ajalta. Tässä kuvassa näkyy kuinka valtavan piikin vuoden 2014 loppuun osunut kuiva pakkasjakso aiheutti. Parin vuorokauden aika mitattiin tuhansia paukkeita joista osa oli todella voimakkaita. Voimakkain pauke mitattiin 23.12.2014 joka oli 79dB.

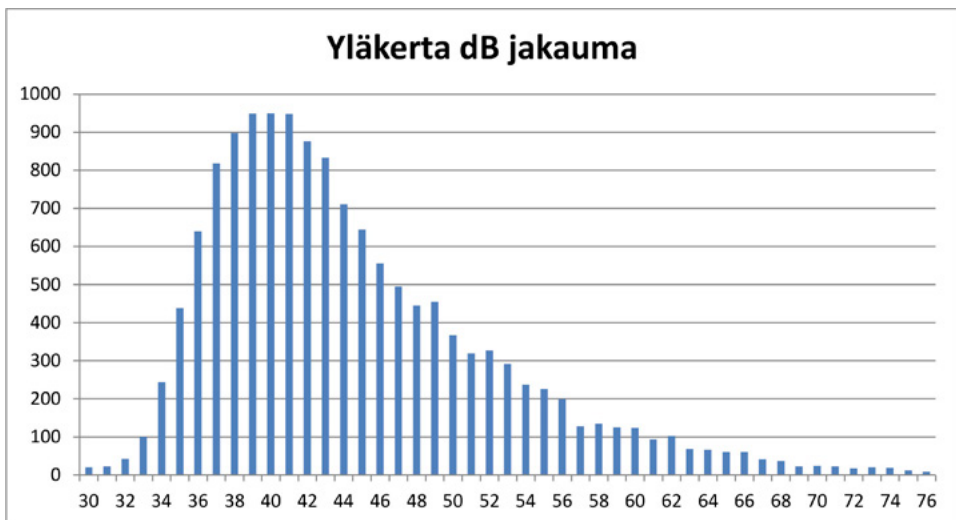
Kuva 26 on kuvankaappaus mittausportaalin jakaumatyökalusta. Se esittää vuorokausitasolla paukkeiden jakauman eri äänenpainetasoihin. Kuvassa on otettu tarkasteltavaksi joulukuu 2014 – maaliskuu 2015 välinen aika. Kuvioissa 1 - 4 on esitetty paukkeiden esiintyminen ja jakauma eriteltynä rakennuksen eri kerroksiin. Niistä on havaittavissa, että valtaosa paukkeista oli erittäin vaimeita.



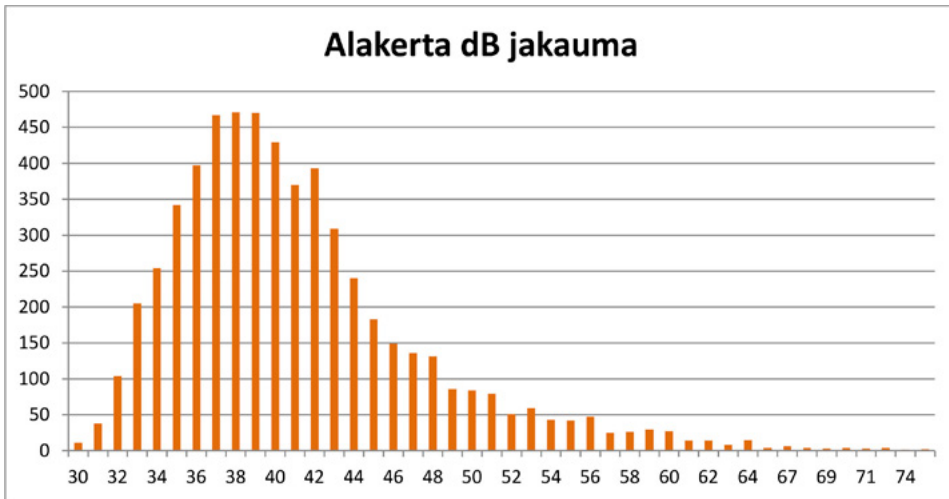
Kuva 25 Paukkeiden kokonaismäärä koko projektin ajalta



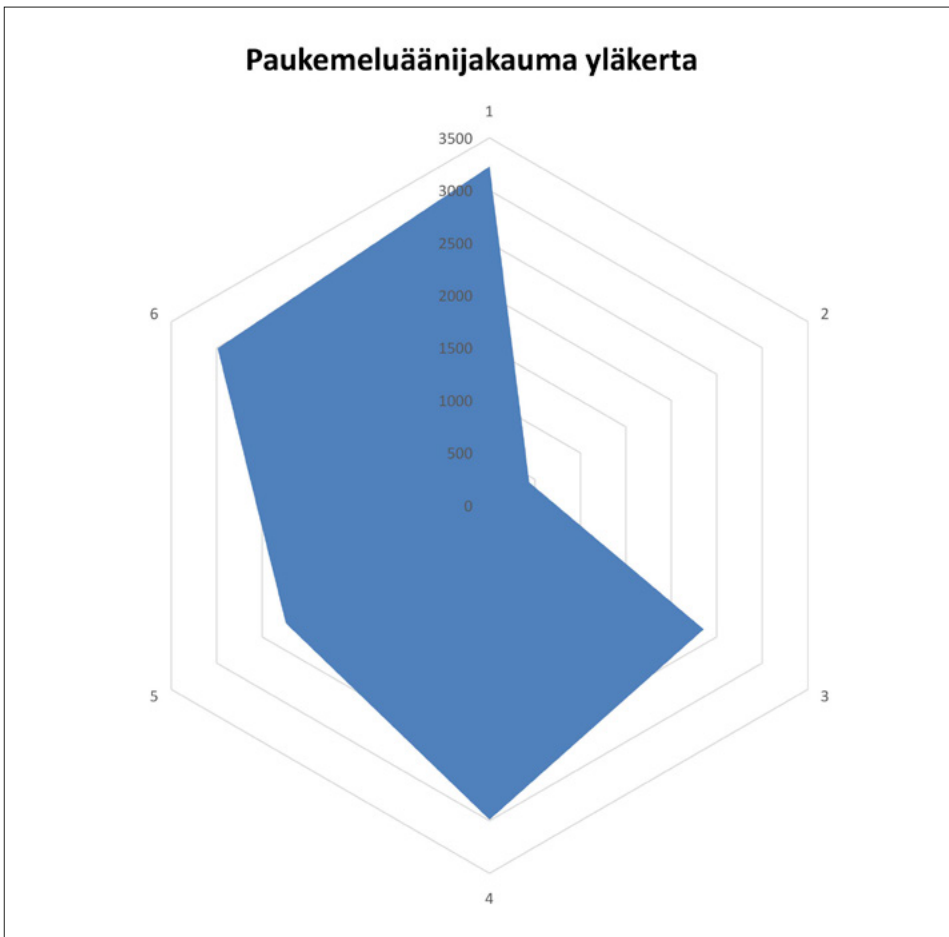
Kuva 26 Paukeäänijakauma ajalle 1.12.2014 - 31.3.2015.



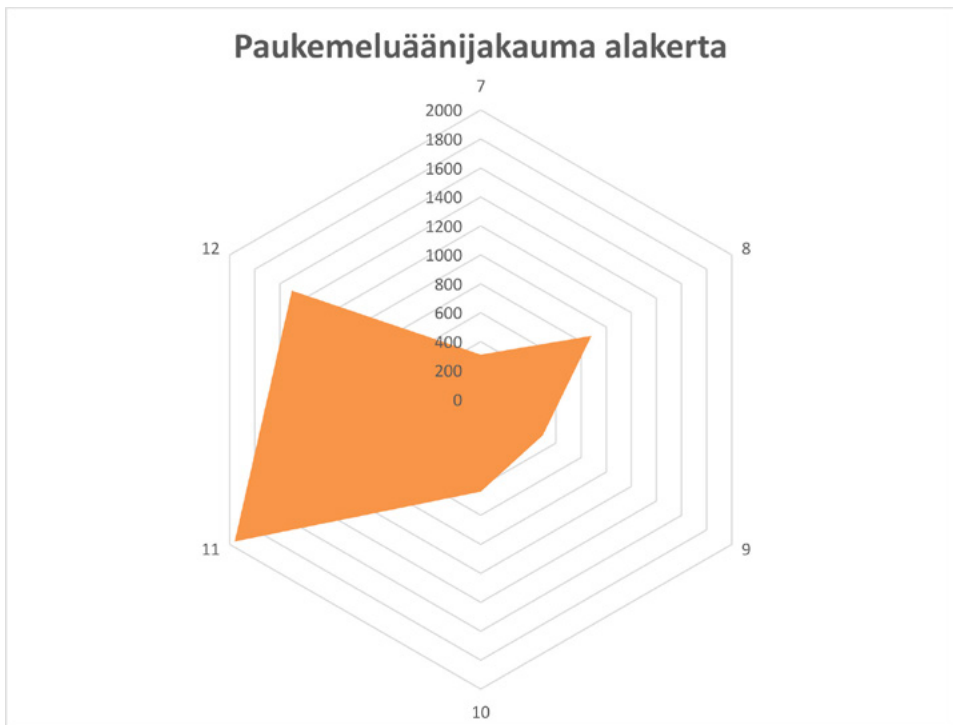
Kuva 27 Yläkerran dB-mittauksien jakauma



Kuva 28 Alakerran dB-mittauksien jakauma



Kuva 29 Paukemääräjakauma yläkerran sektoreissa



Kuva 30 Paukemeluäänijakauma alakerran sektoreissa

Yhteenveto

Koska tutkimukselta puuttuu verrokki esimerkiksi tavanomaisesta hirsitalosta, on mahdotonta todeta, onko CLT-rakenteiden ääntelyssä poikkeavia eriäväisyyksiä. Mittaustuloksista on kuitenkin mahdollista havaita että sis- ja ulkoilmalla, tai tarkemmin niiden muutoksilla, on merkittävä vaikutus paukkeen esiintymistiheyteen ja voimakkuuteen. Pitkään jatkuneen kuuman ja kostean kauden aikana mittauksia tuli muutamia päivässä, mutta ulkoilman jäähtyttyä merkittävästi mittauksia tuli useita kymmeniä päivässä. Vaikka osa mittauksista menetettiin heinäkuussa 2014, on silti havaittavissa selkeä esiintymistiheyden harveneminen lämpötilan ja kosteuden pysyessä stabiilina. Nopeat muutokset lämpötilassa ja etenkin kosteudessa sen sijaan vaikuttaa esiintymistiheyteen merkittävästi, joskin noin vuorokauden viiveellä.

Talvi 2013–2014 ei suoraan osoittanut, että talvi, tai tarkemmin pakkanen aiheuttaisi suuria muutoksia ääntelyssä. Tuloksista on nähtävissä, että mittausjakson paukelukumäärä painottuu mittauskauden alkuun, mutta tämä voi hyvin johtua siitä, että talo oli vielä tuolloin melko uusi eikä kosteusolosuhteet olleet normalisoituneet. Mittausjärjestelmä otettiin käyttöön vasta helmikuussa 2014, joten alkutalven vaikutuksia ei mitattu. Talvi 2014–2015 ja etenkin vuoden vaihde, osoitti että ulkoilman kuivuudella sekä lämpötilan jyrkillä muutoksilla on merkittävä vaikutus paukkeen määriin. Ennen joulukuuta 2014 ääniä oli kertynyt noin 10 000 kappaletta, maaliskuuta 2014 jälkeen noin 1000 kappaletta.

kuussa 2015 ääniä oli jo lähemmäs 20 000 kappaletta. Merkittävä esiintymäpiikki oli joulun tienoilla, jolloin ulkoilma jäähdyi ja kuivui nopeasti.

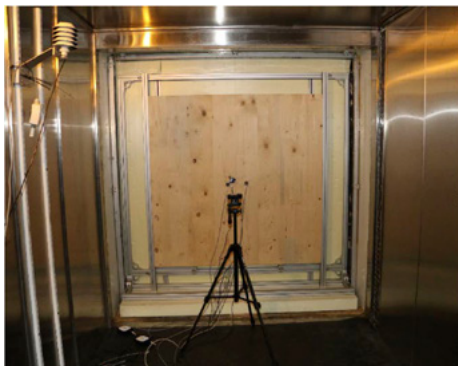
Tuloksia analysoitaessa on muistettava myös se, ettei CLT-koetalo ollut missään vaiheessa mittausjaksoa asuttu. Kosteuskuormaa rakennuksen sisällä pidettiin yllä kostuttimella, jolla pyrittiin simuloimaan mahdollisten asukkaiden tuottama kosteuskuorma ja myös siksi että kosteus- ja lämpötekniset mittaukset saatiin suoritettua. Todellisuudessa kosteuskuorma vaihtelee asutussa asunnossa ulkoilman mukaan. On myös täysin mahdollista, että asutussa, CLT-elementein rakennetuissa asunnoissa, havaittuja ääniä esiintyy huomattavasti harvemmin kuin CLT-koetalossa. CLT-koetalossa on huomattavasti vähemmän kodin tekstiilejä, huonekaluja ja muita sisustuksellisia elementtejä kuin asutussa talossa.

Tekstiilit ja huonekalut vaimentavat ääniä, etenkin korkeita taajuuksia. Vaikka koetalossa oli matot lattiasa ja joitain kodintekstiilejä sekä huonekaluja, on sen varustelu normaaliin asuttuun taloon puutteellinen. Koetalosta puuttuu esimerkiksi sängyt ja sohvut sekä seinät olivat tarkoituksella jätetty paljaiksi. Normaaliin asumiseen liittyvät tekstiilit ja muut sisustukselliset elementit mahdollisesti vaimentaisi paukkeita.

CLT-ELEMENTIN LABORATORIOTUTKIMUS

Testausjärjestelyt

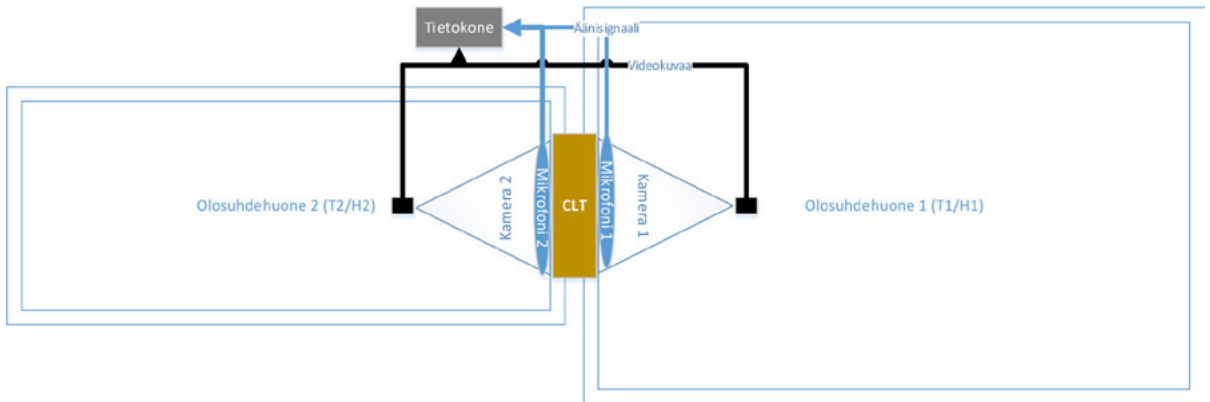
Hankkeessa toteutettiin myös paukemelututkimus CLT-levylle Arctic Powerin laboratoriotiloissa. Testikokoonpano koostuu kahdesta olosuhdehuoneesta, joiden väliin mitattava CLT-levy asennettiin. CLT-levyä varten rakennettiin alumiininen kehikko, johon levy asennettiin. CLT-levyn ympäristö eristettiin Finnfoam-levyillä, uretaani-vaahdolla sekä rakennusteipillä. Toinen olosuhdehuoneista toimi ”sisätilana” ja toinen ”ulkotilana”. Sisätilana toimivan olosuhdehuoneen lämpötila ja kosteus pidettiin vakiona ja sisäilmalle ominaisena. Ulkotilana toimivaa olosuhdehuonetta säädettiin testaussuunnitelman mukaisesti. Kuvissa 31 ja 32 esitetään olosuhdehuoneiden mittausjärjestelyt sekä CLT-levyä kannatteleva alumiinikehikko. Kuvassa 33 on esitetty piirroksena mittausjärjestelyjen kokoonpano.



Kuva 31. Mittausjärjestelyt "ulkotilana" toimivassa pienemmässä olosuhdehuoneessa



Kuva 32. Mittausjärjestelyt "sisätilana" toimivassa suuremmassa olosuhdehuoneessa



Kuva 33 Mittausjärjestelyt diagrammina

CLT-elementtiin asennettiin molemmille puolille kaksi kappaletta puun pintakosteuden mittalaitteita sekä paukemelusensori. Lisäksi molempien olosuhdehuoneiden lämpötilaa ja kosteutta monitoroitiin koko testin ajan. Paukemelujärjestelmään kuuluu myös kamera, joka tallentaa kuvaa elementin pinnasta paukemelusensorin rekisteröidessä pauketta. Tällä tavalla saadaan tallennettua hetket, jolloin mahdollinen halkeama syntyy CLT-elementtiin ja se voidaan todentaa visuaalisesti. Lämpö- ja kosteusdataa kerättiin NI cRIO -tiedonkeruujärjestelmällä, johon liitettiin Vaisalan sekä Delmhorstin valmistamia mittapäitä. Paukemeludatan ja kameroiden kuvien keräämiseen käytettiin PC-pohjaista tiedonkeruusovellusta.

Paukemelua kuunneltiin CLT-elementin pinnasta kontaktimikrofoneilla, jotka muuttavat pinnan liikkeitä piezo-elementillä sähkösignaaliksi joka voidaan sitten tulkitä audiosignaaliksi. Mikrofoneja asetettiin elementtiin kaksi kummallekin puolelle. Tarkoituksena havaita kummalta puolelta elementtiä pauke syntyi. Tämä tunnistettiin vertaamalla signaalin voimakkuutta kummaltakin mikrofonilta. Lisäksi kamerat kuvasivat elementtejä. Paukeimpulssin yhteydessä järjestelmä kuvasi lyhyen videon, jolla yritettiin havaita mahdolliset halkeamiset. PC:llä toimiva sovellus ohjelmointiin laboratoriotestejä varten Kemissä. Videokuva kerättiin kahdella Logitechin FullHD USB-kameralla. Mittaustilannetta monitoroitiin etättyöpöydän kautta.

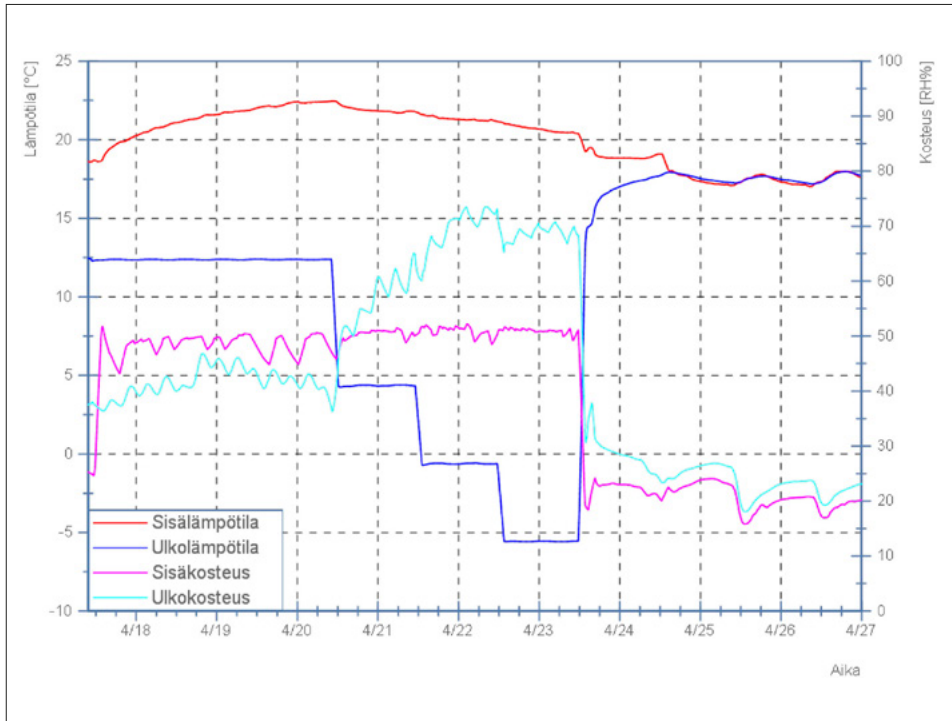
Mittaustulokset

Taulukossa 1 on esitetty laboratoriotestin asetuslämpötilat joilla simuloitiin ulkoilman kosteuden ja lämpötilojen muutoksia. Kuvassa 34 on esitetty mittausajan lämpö- ja kosteusmittaukset kummastakin olosuhdekammioista ja kuvassa 35 on esitetty kosteusmittaukset CLT-elementin pinnoista. Kuvassa 36 on esitetty vihreällä paukemittauksien kokonaismäärät yhdistettynä olosuhdegraafeihin. Paukemelujen

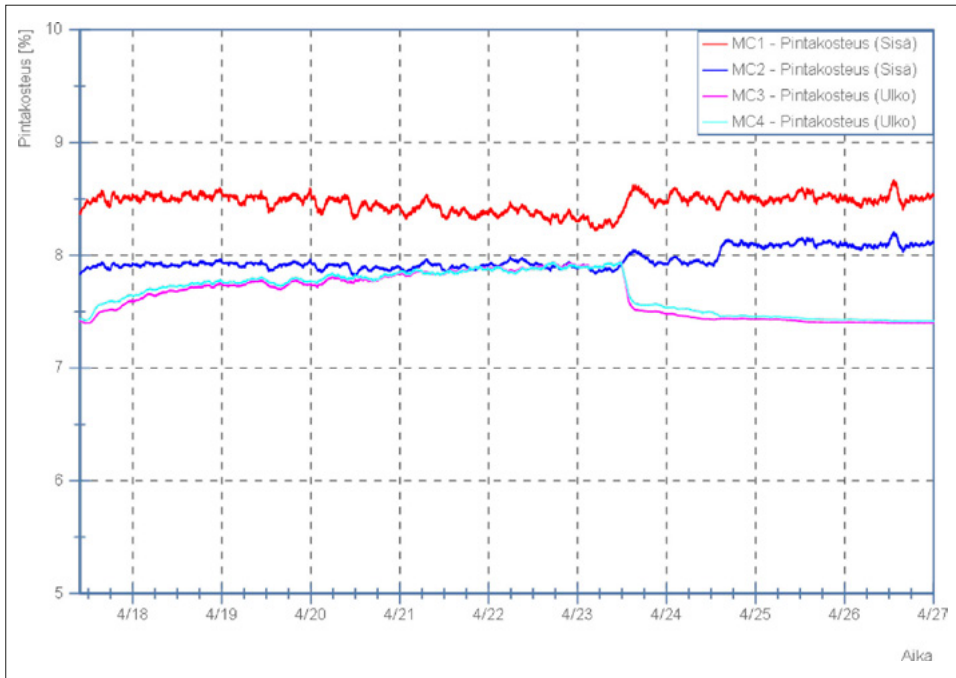
lukumäärä on esitetty graafin oikeassa reunassa. Paukemäärät olivat melko vähäisiä. Vähäisestä paukemäärästä johtuen yhdistettiin vasemman ja oikean kontaktimikrofonien mittaukset yhdeksi.

Taulukko 1. Laboratoriotestauksen asetuslämpötilat.

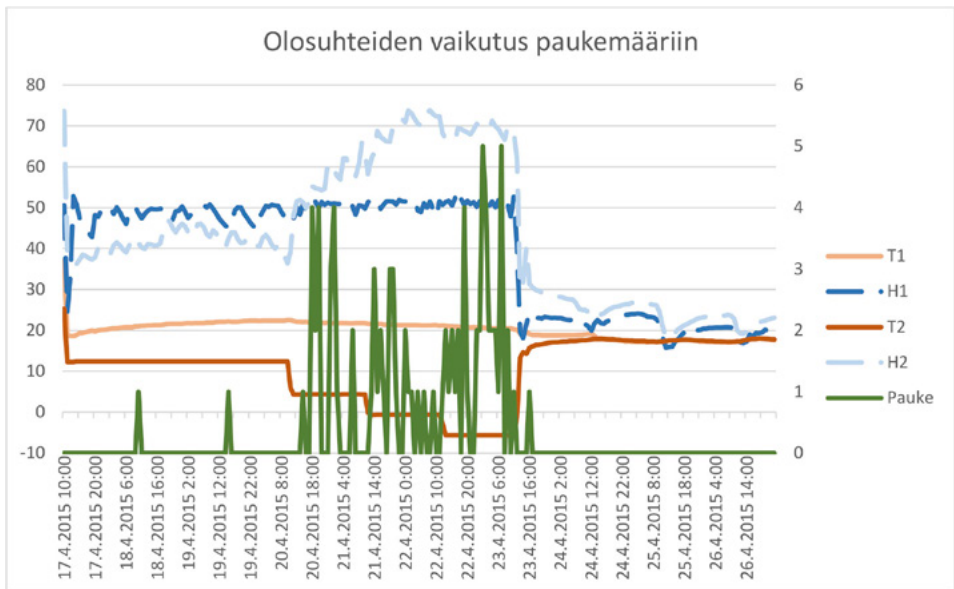
Segmentti	Päivä	Aika	Asetuslämpötila	Asetuskosteus
1	17.4.2015	9:00	13 °C	-
2	17.4.2015	13:15	13 °C	53 RH%
3	20.4.2015	11:05	3 °C	53 RH%
4	21.4.2015	12:03	0 °C	53 RH%
5	22.4.2015	12:27	-5 °C	53 RH%
6	23.4.2015	12:33	-	-



Kuva 34. CLT-elementin testauksen olosuhdegraafit.



Kuva 35. Pintakosteuskäyrät.



Kuva 36 Paukemittaustulokset (vihreällä) yhdistettynä kosteus- ja lämpötilamittauksiin

Johtopäätökset

Laboratoriotestaus jäi melko lyhyeksi ja sen perusteella on vaikea sanoa mitään definiivistä. Mittausdatasta voidaan kuitenkin havaita, että olosuhteiden muuttuessa paukemelussa on havaittavissa selkeää muutosta.

Teknisesti mittausjärjestelmä toimi kuten oli suunniteltukin, vaikka mikrofonien vasemman ja oikean kanavien erottelu voimakkuuksien perusteella osoittautui paljon vaikeammaksi. On myös otettava huomioon, että ei voida olla täysin varmoja siitä syntyivätkö mikrofonien mittaamat paukkeet puusta vai oliko niiden taustalla jokin ulkopuolinen tekijä. Esimerkiksi puuelementtiin on mahdollisesti voinut siirtyä ulkoisia impulsseja elementin kiinnitysrakenteiden kautta.

Testausta tulisi jatkaa ja mittauslähestymistä vielä parannella, jotta voitaisiin varmuudella todeta olosuhteiden vaikutukset paukemeluun laboratorio-olosuhteissa.

LÄHTEET

- Puuinfo 2011. Puun kosteuskäyttäytyminen. Tekninen tiedote. Osoitteessa <http://www.puuinfo.fi/rakentaminen/suunnitteluohjeet/puun-kosteuskayttaytyminen>
- Hämäläinen M. 2013. Johdatus sahatavaraan ja höylätyn puutavaran laatuluokkiin. Aalto-Yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu Rakennustekniikan laitos
- VillaRa – Sisäpinnat. Web-sivu. Instra Oy. Osoitteessa <http://www.omaankotiin.fi/sis%C3%A4pinnat>
- Melun terveysvaikutukset ja ympäristömelun häiritsevyys, Anu Haahla ja Marja Heinonen-Guzejev, Helsingin kaupungin ympäristökeskus (ISBN (PDF) 978-952-272-324-6)

Paukemelun mittausdatan analyysi

Paukemelun mittausdatasta analysoitiin koetalossa mitatun paukemelun esiintymisen ajallista yhteyttä CLT-massiivipuu-elementtien molemmilta pinnoilta mitattuun lämpötilaan ja ilman suhteelliseen kosteuteen. Paukeäänä on mitattu siten, että arkisin mittauksen keruu on päällä klo 0.00 – 7.30 sekä 18.00 – 24.00 ja lauantaisin ja sunnuntaisin 24 h. Tämä aiheutti ongelmia, kun haluttiin tutkia paukeäänien esiintymisfrekvenssien ajallista vaihtelua lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaihtelujen kanssa, joita mitattiin koko ajan. Mittausdatan paukeäänit onkin graafisissa tarkasteluissa arvioitu spline-interpoloinnilla niiltä osin, jolloin mittalaite on ollut pois päältä. Mittausaika kesti maaliskuulta 2014 tammikuulle 2015.

MITTAUSDATASTA ANALYSOIDUT SUUREET

Mittausdatasta on konstruoitu kuukausittaiset graafiset esitykset, joissa nähdään *paukemelun* esiintymisen ajalliset yhteydet CLT-elementin ulko- ja sisäpinnoilta mitattuihin *lämpötilan*, ilman *suhteellisen kosteuden* sekä myös lasketun *vesihöyryn osapaineen* vaihteluihin. Osoittautuu, että *absoluuttisen kosteuden ja vesihöyryn osapaineen vaihtelut korreloivat samalla tavalla paukeäänien esiintymisfrekvenssin vaihtelun kanssa*. Tämä on perusteltua, kun tarkastelee näiden suureiden keskinäistä riippuvuutta.

Ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus määrittävät ilmassa olevan vesihöyryn absoluuttisen kosteuden ρ ($\frac{kg}{m^3}$) eli ilmassa olevan vesihöyryn massan tilavuusyksikköä kohden. Toisaalta ne määrittävät myös ilmassa olevan vesihöyryn osapaineen yhtälön (1) mukaisesti.

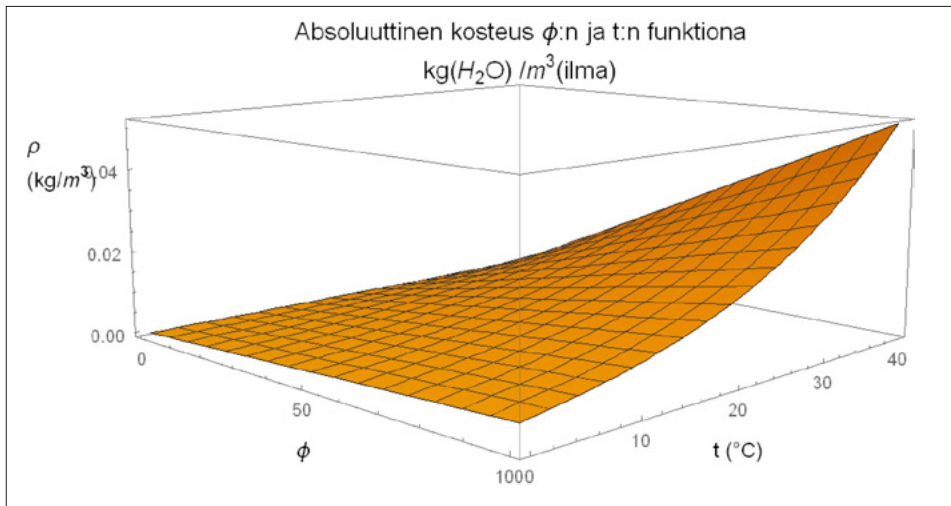
$$p_v(\phi, t) = \phi p_{sat}(t), \quad (1)$$

missä ϕ = suhteellinen kosteus ja p_{sat} = kylläisen ilman vesihöyryn osapaine, joka riippuu vain lämpötilasta t . Kylläisen ilman vesihöyryn osapaine on kokeellisesti taukkoitu ja se voidaan muuttaa malliksi käyttämällä esimerkiksi polynomifunktion sovitusta. Suhteellisen hyvä malli saadaan jo 3. asteen polynomifunktiolla, mutta korkeamman asteisilla polynomeilla voidaan sovitusta tarkentaa lisää.

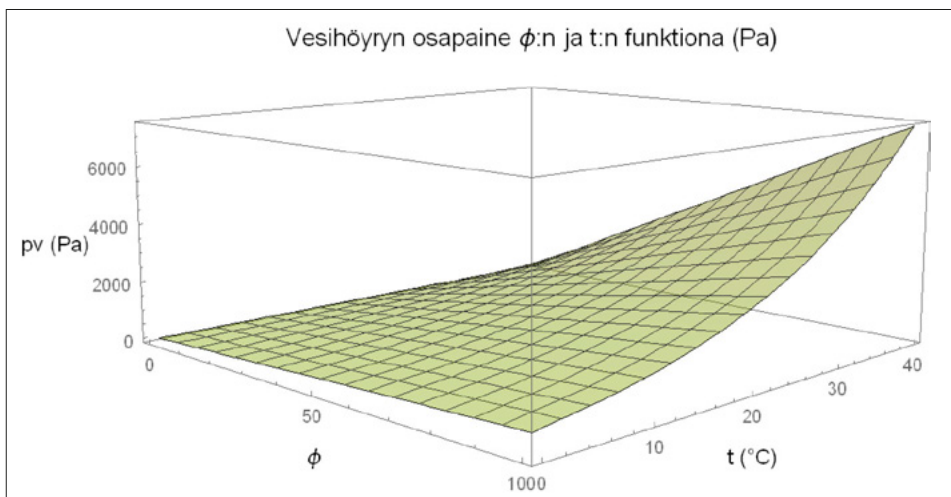
Käyttämällä ideaalikaasun tilanyhtälöä voidaan absoluuttiselle kosteudelle johtaa seuraava riippuvuus vesihöyryn osapaineesta (Hautala M., Peltola H., 2002)

$$\rho(\phi, t) = \frac{p_v(\phi, t)}{461.4 (t+273.15) \frac{J}{kg}} = \frac{\phi p_{\text{sat}}(t)}{461.4 (t+273.15) \frac{J}{kg}}, \quad (2)$$

missä lämpötila t annetaan Celsius-asteina. Yhtälöt (1) ja (2) osoittavat, että vesihöyryn osapaine ja absoluuttinen kosteus ovat molemmat suoraan verrannollisia suhteelliseen ilmankosteuteen ϕ . Lämpötilariippuvuus noudattaa molemmilla samanlaista konveksin polynomifunktion mallia kuin kylläisen ilman vesihöyryn osapaineella $p_{\text{sat}}(t)$. Absoluuttisella kosteudella polynomi on kaavan (2) nojalla yhtä astetta alempi kuin vesihöyryn osapaineella.



Kuva 37. Absoluuttinen kosteus suhteellisen kosteuden ja lämpötilan funktiona

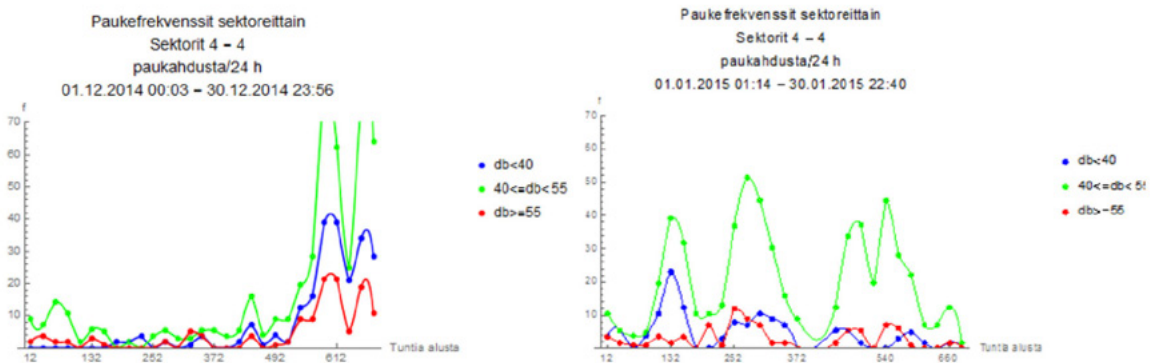


Kuva 38. Vesihöyryn osapaine suhteellisen kosteuden ja lämpötilan funktiona

Lineaarinen riippuvuus suhteellisesta kosteudesta ilmenee suorina vakioilämpötilassa ja käyräviivainen riippuvuus lämpötilasta näkyy siirryttäessä pinnalla vakioilmankosteudessa. Kuvan 37 mallinnuksessa kylläisen ilman vesihöyryn osapaine P_{sat} on laskettu spline-interpoloinnilla taulukkotiedoista (Y.A. Çengel, M.A. Boles, 2011).

TULOKSET

Paukemelun esiintymisfrekvensseistä on tehty kuukausittaiset ja sektorikohtaiset desibelijakaumien graafit (esimerkkinä *Kuva 39*). Niissä on kuvattu vuorokautiset paukeäänien esiintymisfrekvenssit kolmella desibelialueella $db < 40$, $40 \leq db < 55$ ja $db \geq 55$. Kaikkiin kuvauksiin on liitetty tieto sektorista, paukeäänien laskentavälistä sekä mittausjaksosta.



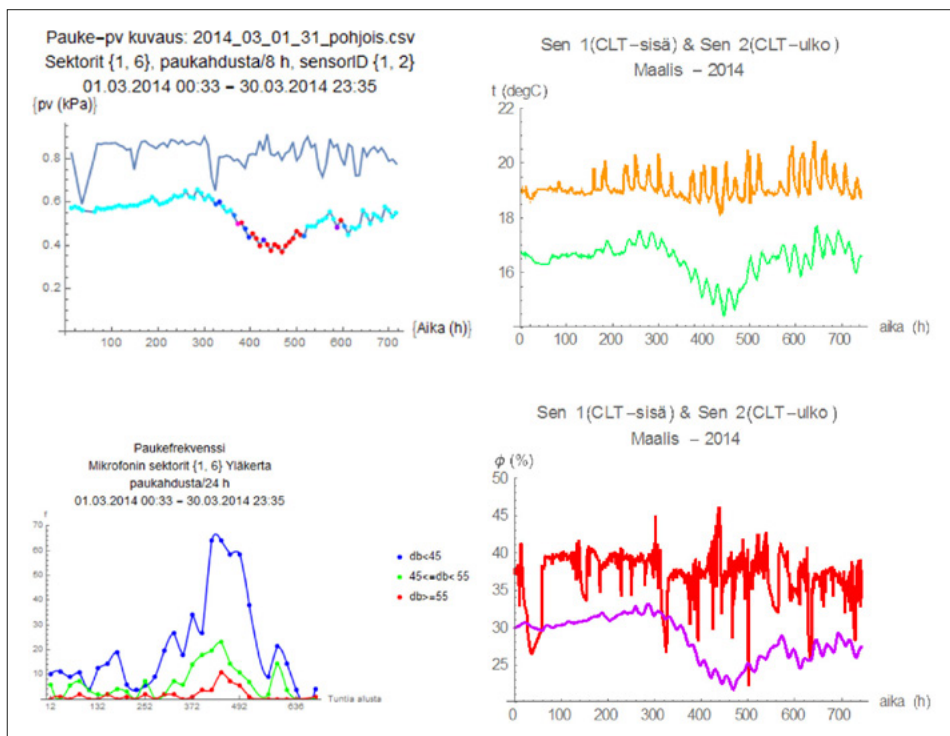
Kuva 39. Joulukuun 2014 ja tammikuun 2015 paukeäänien jakaumat eri desibelialueilla sektorilla 4

Sektorikohtaisista graafeista voidaan havaita selvästi mm.

- Paukeäänien esiintymisfrekvenssien ”piikit” ajoittuvat kaikilla desibelialueilla muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta samalle mittausajanjaksolle
- Pitempään jatkuvat suuret esiintymisfrekvenssit ilmenivät lähes kaikilta seinäsektoreilta samalla mittausajanjaksolla. Seinäsektoreissa sekä ylä- että alakerrassa esiintyi aika suuriakin eroja.
- Yleisesti paukemelun esiintymisfrekvenssit olivat korkeita vain talvikuukausina maaliskuussa ja joulukuussa 2014 sekä tammikuussa 2015.

Paukeäänien mahdollista ajallista riippuvuutta ilman suhteellisen kosteuden, lämpötilan ja lasketun vesihöyryn osapaineen vaihteluista on tutkittu mittausdatasta edellisten lisäksi kolmen muun kuukausittaisen ja sektorikohtaisen kuvaajan avulla (*Kuva 40*).

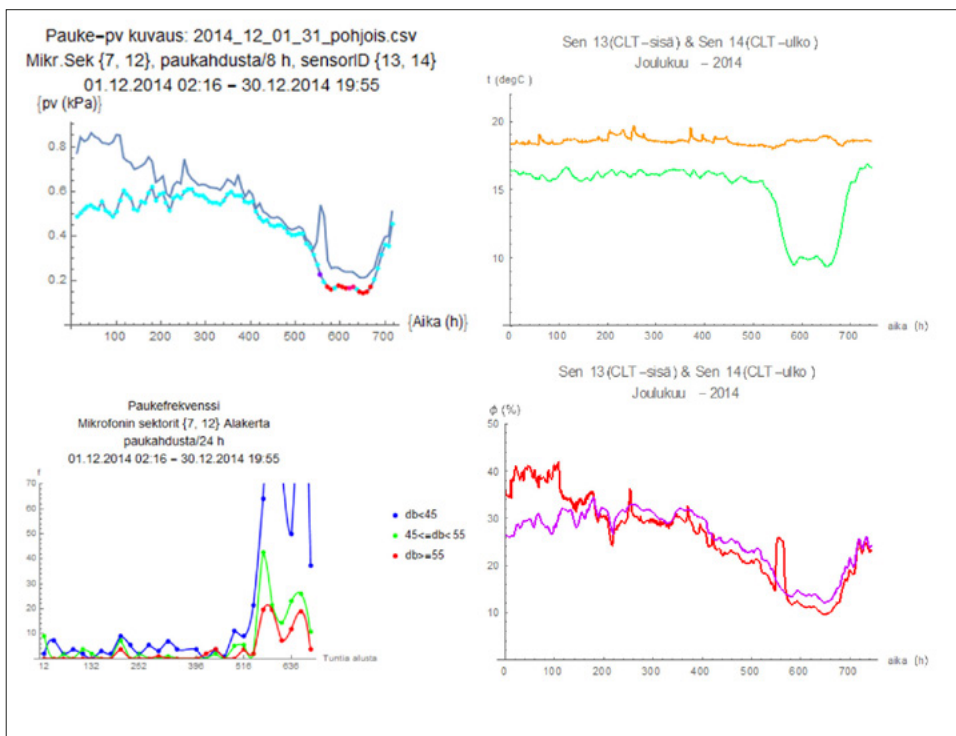
- *Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden* ajalliset vaihtelut kunkin CLT-elementin sisä- ja ulkopinnalla. Mittaukset oli tehty minuutin välein, mutta graafeihin on laskettu tuntikeskiarvot.
- Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvoista lasketun *vesihöyryn osapaineen* vaihtelut CLT-elementin sisä- ja ulkopinnalla. Ulkopinnan murtoviivaan on liitetty väritetyt pisteet, jotka kuvaavat kyseisillä ajankohdilla vallitsevan *paukeäänien esiintymistiheyden suhteellista voimakkuutta* kyseisellä mittausjaksolla laskentavälinä 8 h. Vaalean sininen merkitsee korkeintaan 50%:sta arvoa mittausjakson maksimista, josta asteittain muuttuen punaiseksi, joka vastaa maksimia.



Kuva 40. Maaliskuun 2014 mittaustulokset pohjoisseinän sisä- ja ulkopinnalta. a) (vasen ylä) CLT-elementin vesihöyryn osapaine sekä paukemelun esiintymisfrekvenssit (merkitty ulkopinnan murtoviivaan pisteillä). b) (vasen ala) Paukeäänien jakaumat eri desibelialueilla c) Lämpötilan ja d) suhteellisen kosteuden vaihtelu.

Mittausdatan graafisten tarkastelujen tuloksena saadaan seuraavaa:

- Merkittävää paukemelua näyttäisi syntyvän tilanteessa, jossa CLT-elementin ulko- tai sisäpinnan lämpötila (vihreä) ja suhteellinen kosteus (violetti) molemmat saavuttavat hyvin alhaisen tason, jolloin vesihöyryn osapaine elementin pinnalla samalla pienenee voimakkaasti. Tämä tapahtui elementin ulkopinnalla maaliskuussa 2014 ja tammikuussa 2015, jolloin elementin sisäpinnan ja ulkopinnan välillä oli selkeä vesihöyryn osapaineen ero. Edellisten lisäksi joulukuussa 2014 vesihöyryn osapaine laski alhaiseksi myös sisäpinnalla ollen samaa suuruusluokkaa ulkopinnan kanssa, mikä johtui siitä, kun ilmastokostutin oli pois päältä (Kuva 41). Tämä viittaisi siihen, että elementin sisä- ja ulkopinnan välinen jännite ei olisi paukeäänien ensisijainen aiheuttaja, vaan äänet syntyvät pinnan olosuhdemuutoksista.



Kuva 41. Joulukuun 2014 mittaustulokset pohjoisseinän sisä- ja ulkopinnalta. a) (vasen ylä) CLT-elementin vesihöyryn osapaine sekä paukemelun esiintymisfrekvenssit (merkitty ulkopinnan murtoviivaan pisteillä). b) (vasen ala) Paukeäänien jakaumat eri desibelialueilla c) Lämpötilan ja d) suhteellisen kosteuden vaihtelu.

- Kesäkuukausina paukeäänien esiintymisfrekvenssit ovat matalia, vaikka elementin ulkopinnan lämpötila ja samalla vesihöyryn osapaine vaihtelevat merkittävästi niin lyhytkestoisesti kuin myös pitkäkestoisesti. Syksyllä CLT-elementin ulkopinnan lämpötilan ja suhteellisen kosteuden keskimääräiset tasot alkoivat hiljalleen laskea, mutta paukemelua ei esiintynyt runsaammin. Kesällä ja syksyllä suhteellisen kosteuden ja vesihöyryn osapaineen keskimääräiset tasot ovat kuitenkin vielä suhteellisen korkeita talvikuukausiin nähden.
- Lyhytkestoiset vuorokauden sisällä tapahtuvat lähinnä suhteellisen kosteuden vaihtelujen aiheuttamat vesihöyryn osapaineen laskut eivät aiheuta merkittävästi paukemelua.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Aikavälillä tammikuu, 2014 – tammikuu, 2015 CLT-koetalon massiivipuuelementeissä suoritettujen mittaustulosten analyysin perusteella voimakkaamman paukemelun esiintyminen liittyy elementin pinnalla tapahtuviin lämpötila- ja kosteusolosuhteiden muutoksiin. Tyypillisesti runsasta paukemelua esiintyi, kun elementin pinnalle muodostui poikkeuksellisen kylmät ja kuivat olosuhteet, jolloin vesihöyryn osapaine ja samalla absoluuttinen kosteus laskevat hyvin alhaiselle tasolle.

Mittausjakson aikana vesihöyryn osapaineen keskimääräinen taso CLT elementin ulkopinnalla kasvoi maaliskuusta 2014 keskimääräisestä arvosta 0.5 kPa elokuuhun arvoon 1.5 kPa , josta se taas aleni asteittain joulukuun kuivempiin ajanjaksoihin arvoon 0.2 kPa saakka ja tammikuussa 2015 alimmillaan jopa arvoon 0.15 kPa saakka. Vastaavat suhteellisen kosteuden tasot runsaamman paukemelun yhteyksissä olivat 10 % - 20 %.

LÄHTEET

Hautala M., Peltola H., 2002, Insinöörin (AMK) FYSIIKKA, Osa 1
 Y.A. Çengel, M.A. Boles, 2011, Thermodynamics 7th ed., ISBN 978-0-07-352932-5

CLT – Koulutusmateriaali

KOULUTUSMATERIAALIN SISÄLTÖ

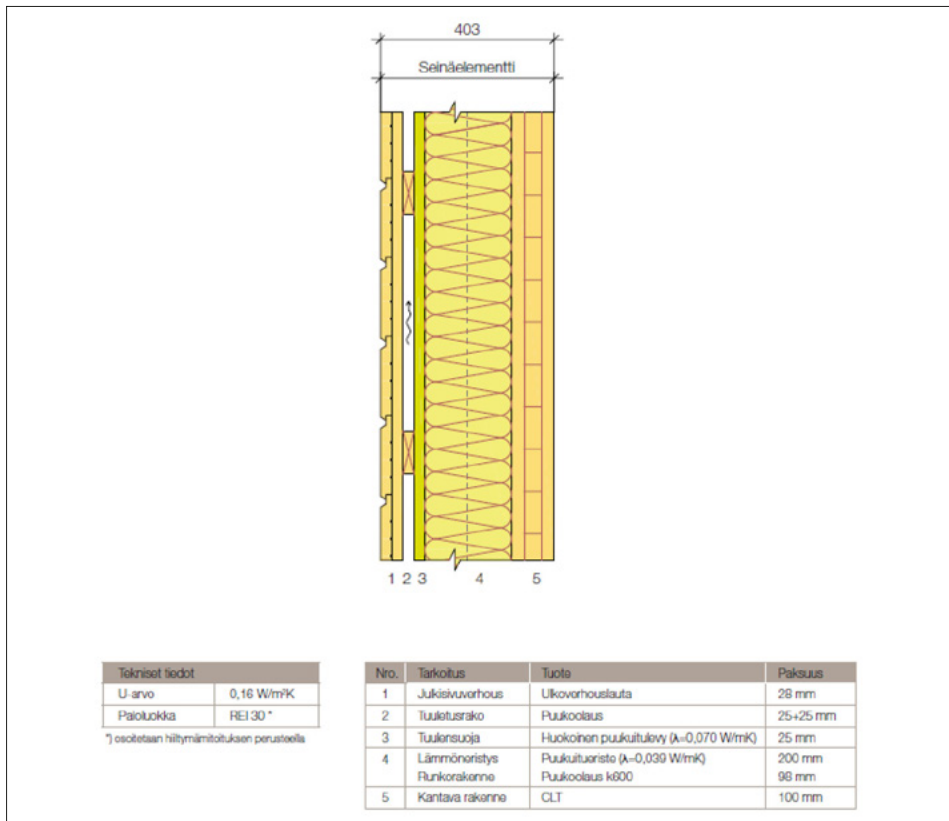
Yhtenä CLT-koetalohankkeen tavoitteena oli tuottaa koulutusmateriaalia CLT:stä ammattikorkeakoulun insinööriopetusta varten. Hankkeessa tuotetussa koulutusmateriaalissa keskityttiin CLT-rakenteiden suunnitteluun. Koulutusmateriaalissa käsiteltäviä aiheita ovat:

- CLT-levyn ominaisuudet
- CLT-rakennetyyppiratkaisut
- CLT-rakenteiden liitokset
- CLT-rakenteiden rakennusfysikaalinen suunnittelu
- CLT-rakennesuunnittelun mitoitusperusteet
- CLT-rakenteiden palotekninen mitoitus

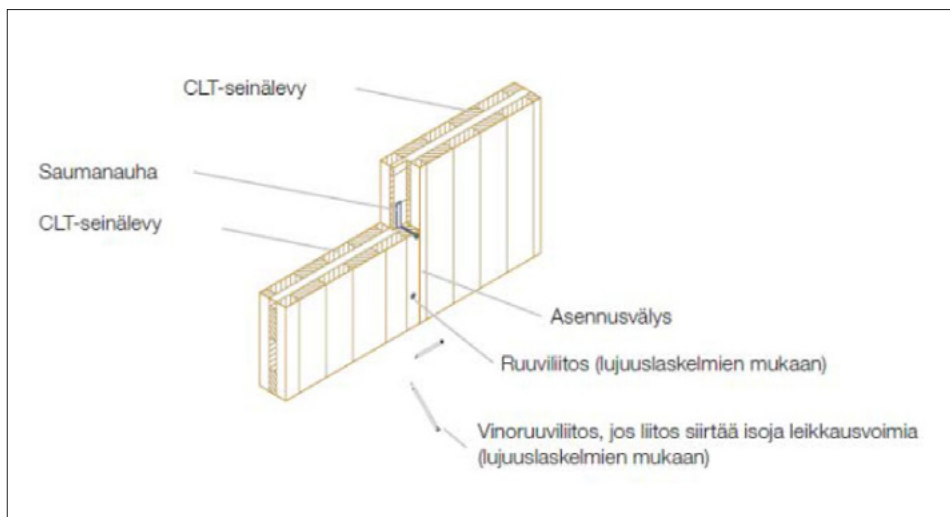
Koulutusmateriaalia laadittaessa tehtiin laaja kirjallisuuskatsaus CLT-rakentamisen kirjallisuuteen sekä internetlähteisiin. Tärkeimmät tietoperustat koulutusmateriaalin koonnissa olivat Stora Enson materiaali sekä kanadalaisen tutkimuskeskuksen FP Innovationsin tekemä CLT-käsikirja. Seuraavissa kappaleissa esitellään lyhyesti koulutusmateriaalin sisältöä.

CLT-RAKENTAMISTAPA

Koulutusmateriaalissa esitellään useita CLT-rakennetyyppejä ja liitosratkaisuja. Materiaalissa esiteltävät CLT-rakentamisen ratkaisut ovat noudettu Stora Enson Building Solutions ohjeesta. Seuraavissa kuvissa esitellään esimerkit CLT-rakenneratkaisuista (kuva 42) sekä CLT-seinien välisestä liitoksesta (kuvat 43 ja 44).



Kuva 42. Kantava CLT-ulkoseinä puujulkisivulla (Stora Enso 2012.)



Kuva 43. CLT-seinän pystyliitos uraliitoksella (Stora Enso 2012.)



Kuva 44. Toteutettu seinän pystyliitos uraliitoksella (Stora Enso 2012.)

CLT-RAKENTEIDEN SUUNNITTELU

Rakenteiden mitoitusperusteet

CLT-rakentaminen alkoi Euroopassa muutama vuosikymmen sitten ja suunnittelussa on käytetty useita eri menetelmiä. Osa käytetyistä laskentatavoista perustuu kokeellisiin testeihin ja osa on analyttisiä. Muut laskentatavat sisältävät sekä kokeellisia että analyttisiä lähestymistapoja mallitestaukseen perustuen. Euroopan CLT-valmistajat ja –suunnittelijat eivät ole vielä hyväksyneet mitään tiettyä analyttistä laskentateoriaa kansainvälisesti käytettäväksi. (FP Innovations 2013.)

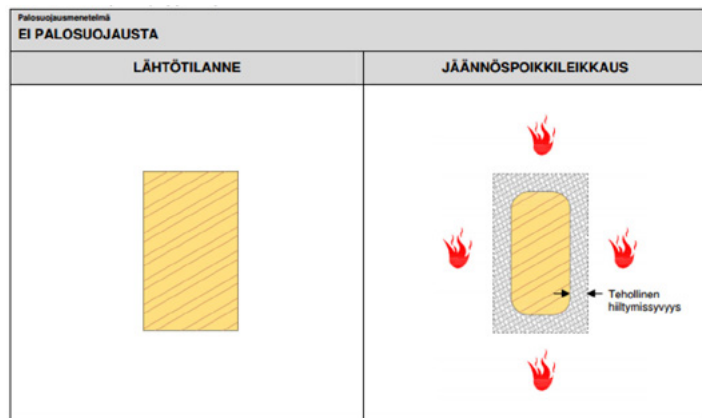
Euroopassa laajimmin käytetty teoria on *mekaanisesti liitettyjen palkkien teoria*. Mekaanisesti liitettyjen palkkien teoria löytyy Eurokoodi 5:n liitteestä, B (RIL ry. 2009.). Teoria esittelee tehollisen jäykkyyden konseptin ja liitoshyötysuhdekertoimen (γ_i), jonka avulla otetaan huomioon pystysuoran kerroksen leikkausmuodonmuutos. Kertoimen, γ ollessa 1, tarkoittaa se kokonaan liimattua lamellien välistä liitosta ja γ :n ollessa 0, liitosta ei ole kiinnitetty ollenkaan. Tämä teoria tarjoaa ratkaisun vain sinimuotoisesti kuormitettujen ja yksinkertaisesti tuettujen palkkien/paneelien ratkaisemiseksi tarkoitettuun differentiaaliyhtälöön. Kuitenkin erot tarkan ratkaisun ja pistekuormien tai tasaisesti jakautuneen kuorman välillä on minimaalinen ja hyväksyttävä insinöörin laskentojen kannalta. (FP Innovations 2013.)

Koulutusmateriaalia varten luotiin myös esimerkkilaskenta Mathcad-ohjelmalla CLT-vaakarakenteiden mitoittamista varten. Esimerkkilaskelman tuottamisessa käytettiin tietoperustana Stora Ensolta saatuja esimerkkimitoituskalkelmia. Koulutusmateriaalin tuottamisen jälkeen Stora Enso on julkaissut ilmaisen CLT-rakenteiden suunnitteluohjelman, jonka voi ladata yrityksen sivuilta osoitteesta: <http://www.clt.info/fi/media-ladattavat/cltengineer-suunnitteluohjelma/>.

Palotekninen suunnittelu

Suomen rakentamismääräyskokoelman osa E1 uudistettiin 15.4.2011. Määräysten uudistukset mahdollistavat puurunkoisten ja puulla verhottujen kerrostalojen rakentamisen taulukkomitoituksella P2-luokassa aina kahdeksaan kerrokseen saakka. Määräyksissä uutta ovat ns. kaupunkipientalot, joilla tarkoitetaan 3-4 kerroksisia taloja, joissa kaikki kerrokset ovat samaa asuinhuoneistoa. Näitä kaupunkipientaloja koskevat P2-luokkaisen puukerrostalon määräykset lukuun ottamatta automaattista sammutusjärjestelmää. Uudistetut palomääräykset mahdollistavat puun käytön D-s2, d2 – luokkaisena myös P2-luokan kivikerrostalojen julkisivuissa aina neljään kerrokseen saakka sekä myös silloin, kun talo on varustettu automaattisella sammutusjärjestelmällä aina kahdeksaan kerrokseen saakka RakMK E1:n edellytyksin. Enintään seitsemänkerroksisiin betonikerrostaloihin voidaan rakentaa puurunkoinen ja puujulkisivuinen lisäkerros ilman automaattista sammutusjärjestelmää. Lisäkerroksessa voidaan käyttää D-s2, d2 – luokan puumateriaaleja niin kantavissa rakenteissa, sisäpintoissa kuin julkisivuverhouksissa. Sisäpinnat on suojattava K2 – luokan suojaverhouksin. Seuraavissa kuvissa esitetään P2-luokkainen puukerrostalo, rakennuksen sisäpintojen ja pintojen suojaverhusten luokkavaatimukset sekä yli 2-kerroksisten P2-luokkaisten rakennusten puun käytön mahdollisuudet. (Tolppanen–Karjalainen–Lahtela–Viljakainen 2013.)

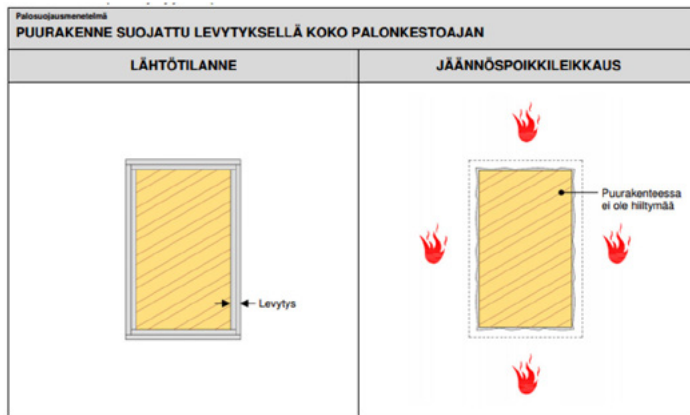
Puurakenteiden palomitoituksessa aluksi tulee selvittää puurakenteen käyttäytymisen palotilanteessa. Yleensä palotilanteessa puurakenneosat hiiltyvät ja niiden alkuperäinen poikkileikkaus muuttuu (jäännöspoikkileikkaus). Puurakenteen palokäyttäytymisen lisäksi tärkeä selvitettävä asia on rakenneosien ja koko rakennuksen stabiileetti palotilanteessa, sillä esimerkiksi jäykistäviä levyrakenteita saattaa palaa pois. Joissakin mitoitustapauksissa palotilannetta varten joudutaan suunnittelemaan kokonaan oma rakenneosien stabiileettituenta. (Tolppanen–Karjalainen–Lahtela–Viljakainen 2013.)



Kuva 45. Palo-
suojausmenetelmä:
ei palosuojausta
(Tolppanen–
Karjalainen–Lahtela–
Viljakainen 2013.)

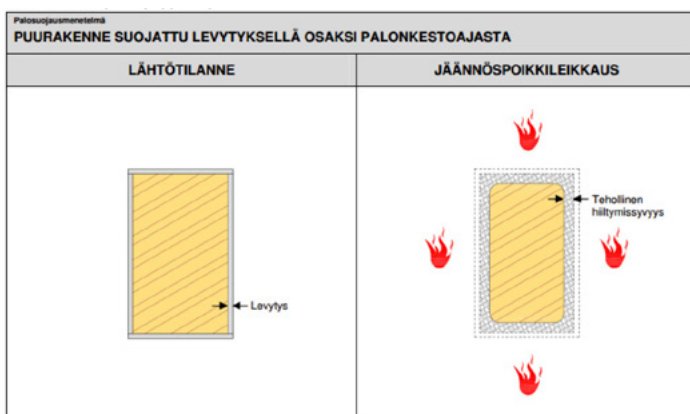
Puurakenteiden palomitoituksessa osoitetaan laskelmin, että vaaditun palonkeston jälkeen rakenteella on riittävä kantokyky palotilanteen kuormituksille. Puurakenteen voidaan antaa hiiltä, jolloin laskelmilla osoitetaan, että rakenteen jäännöspoikkileikkaus pystyy kantamaan palotilanteen kuormitukset. (kuva 45.) (Tolppanen–Karjalainen–Lahtela–Viljakainen 2013.)

Puurakenne voidaan myös suojata koko palonkestoajaksi, jolloin puurakenne ei hiilly ollenkaan vaaditun palonkeston aikana. (kuva 46.) (Tolppanen–Karjalainen–Lahtela–Viljakainen 2013.)



Kuva 46. Palo-
suojausmenetelmä:
suojattu koko palon-
kestonajan
(Tolppanen–
Karjalainen–Lahtela–
Viljakainen 2013.)

Puurakenne voidaan myös suojata osaksi vaaditusta palonkestoajasta, jolloin puurakenne hiiltyy palosuojauksen murtumisen jälkeen. (kuva 47.) (Tolppanen–Karjalainen–Lahtela–Viljakainen 2013.)



Kuva 47. Palo-
suojausmenetelmä:
suojattu osaksi
palonkeston-
ajasta (Tolppanen–
Karjalainen–Lahtela–
Viljakainen 2013.)

Mikäli puurakenteen kantavuutta palotilanteessa ei osoiteta laskelmien avulla, voidaan se osoittaa kokeellisesti tai laskelmien ja kokeiden yhdistelmällä. (Tolppanen–Karjalainen–Lahtela–Viljakainen 2013.)

LÄHTEET

FP innovations. CLT-Handbook. 2013

RIL ry. Eurokoodi 5 Puurakenteiden suunnittelu. 2009.

Stora Enso. Building solutions. 2012. [Online] Noudettu osoitteesta: <http://www.clt.info/fi/media-ladattavat/esitteet/rakentamisen-ratkaisut/>

Tolppanen, J. – Karjalainen, M. – Lahtela, T. – Viljakainen, M. 2013. Suomalainen puukerrostalo - Rakenteet, suunnittelu ja rakentaminen. Helsinki: Opetushallitus.

Opiskelijat mukana tekemässä CLT-tutkimusta

JOHDANTO

CLT-koetalohankkeen yhteydessä toteutettiin viisi opinnäytetyötä sekä kolme opiskelijaa suoritti opiskeluihinsa kuuluneen harjoittelun projektin puitteissa. Tässä osiossa esitellään referaatit opinnäytetöistä sekä referaatti yhden opiskeluharjoittelun lopputuotoksesta.

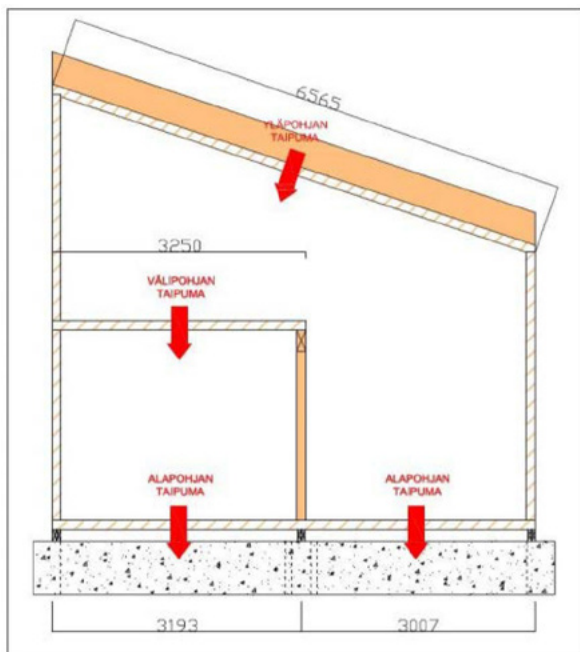
CLT-KOETALON TAIPUMIEN MITTAUS LASERKEILAIMELLA

Työn tausta

CLT-koetaloprojektin yhtenä tutkimusaiheena olivat rakenteiden muodonmuutosten mittaukset. Joni Hakolan toteuttaman CLT-koetalon taipumien mittaus laserkeilaimella opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia rakenteiden muodonmuutoksia laserkeilaimella ja käytetyn tutkimusmenetelmän soveltuvuutta vaakarakenteiden taipumien mittauksessa. Opinnäytetyö toteutettiin yhteistyössä Ilkka Raution CLT-koetalon rakenteiden muodonmuutokset opinnäytetyön kanssa.

Mittauslaitteena tutkimuksessa käytettiin Lapin ammattikorkeakoulun Z+F IMAGER 50061 – vaihe-erolaserkeilainta. Olettamus oli, että rakenteiden taipumat ovat vähäisiä, jonka vuoksi mittaustavaksi valikoitui laserkeilain, jolla saadaan tuotettua erittäin tarkkoja mittaustuloksia. Koetalon mittaustoimenpiteet suoritettiin vuoden 2014 tammikuun ja joulukuun välisenä aikana, seitsemänä eri mittaussajankohtana.

Jokainen tutkittava vaakarakenne koostui kolmesta rinnakkain asennetusta 120 mm vahvasta kolmelamelisesta CLT-elementistä. Tutkittavien taipumien kohdat on esitetty kuvassa 48.



Kuva 48. Tutkittavien taipumien kohdat

Taipumamittausten tulokset

Taipumamittausten tulokset ja mittausajankohdat esitetään kuvissa 49, 50 ja 51. Suurimmat taipumatulokset (17 mm) havaittiin yläpohjan alapinnassa, mittausalueen keskikohdassa ensimmäisellä mittauskerralla.

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

Kuva 49. CLT-koetalon yläpohjan vertailu

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

Kuva 50. CLT-koetalon välipohjan vertailu

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

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

Kuva 51. CLT-koetalon alapohjan vertailu

Tutkimustulosten perusteella voitiin todeta, että CLT-koetalon vaakarakenteiden CLT-levyt pysyivät miltein taipumattomina, koska mitatut eroavaisuudet säilyivät hyvin pieninä. Laserkeilain todettiin hyvin soveltuvaksi tämän tyyppiseen tutkimukseen.

CLT-KOETALON RAKENTEIDEN MUODONMUUTOKSET

Työn tausta

Ilkka Raution opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella CLT-koetalon vaakarakenteiden laskennallisia *maksimitaipumia* normaalikuormituksilla neljästä eri tarkastelukohdasta sekä vertailla niitä Joni Hakolan laserkeilaimella mitattuihin vastaaviin tuloksiin. CLT-koetalon tarkastelukohdat olivat samat kuin Joni Hakolan opinnäytetyössä (kuva 48).

Laskennallisten taipumatarkasteluiden tuloksia

Yläpohjan taipumatarkasteluissa tuloksiksi saatiin:

- Hetkellinen taipuma kuolleesta kuormasta

$$W_{inst,G} = \frac{5g_k L^4}{384E_{mean}I_y} \quad W_{inst,G} = \frac{5 * 0,6 * 6365^4}{384 * 11000 * 144000000} = 8,10 \text{ mm}$$

- Hetkellinen taipuma hyötykuormasta

$$W_{inst,Q} = \frac{5q_k L^4}{384E_{mean}I_y} \quad W_{inst,Q} = \frac{5 * 0,6 * 6365^4}{384 * 11000 * 144000000} = 8,10 \text{ mm}$$

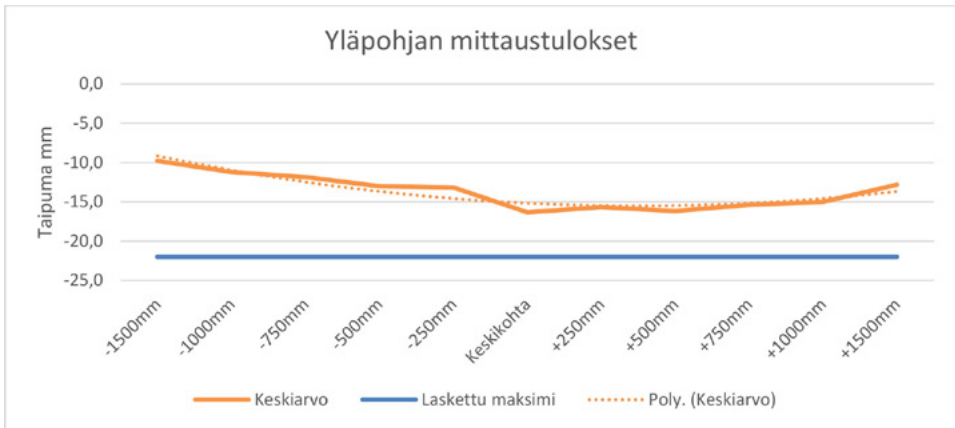
- Kuormituksista johtuva lopullinen taipuma

$$W_{fin} = [(1 + k_{def})W_{inst,G} + (1 + 0,2k_{def})W_{inst,Q}]$$

$$W_{fin} = [(1 + 0,6)8,10\text{mm} + (1 + 0,2 * 0,6) * 8,10\text{mm}] = 22,02 \text{ mm}$$

Hetkellisten kuormien laskelmissa käytettiin samaa kuormituslukua kuin pysyvissä kuormissa, sillä yläpohjarakenteessa CLT-levyn yläpuolella on kertopuupalkit, jotka on suunniteltu kantamaan vesikatosta aiheutuvat kuormitukset. Tämän vuoksi CLT-levylle jää kannettavakseen vain lämmöneristeistä johtuvat kuormat.

Kuvassa 52 esitetään yläpohjan sekä laskennalliset maksimitaipumat sekä laserkeilaimella mitatut taipumat.



Kuva 52. Yläpohjan yhdistyt tulokset

CLT-koetalon *välipohja* on tuettu toisesta päästä liimapuupalkin päälle ja ulkoseinien puoleinen pää on asennettu alakerroksen ulkoseinien CLT-levyjen päälle. Välipohjan taipumatarkasteluissa tuloksiksi saatiin:

- Hetkellinen taipuma kuolleesta kuormasta

$$W_{inst,G} = \frac{5g_k L^4}{384E_{mean}I_y} \quad W_{inst,G} = \frac{5 * 0,6 * 3000^4}{384 * 11000 * 144000000} = 0,40 \text{ mm}$$

- Hetkellinen taipuma hyötykuormasta

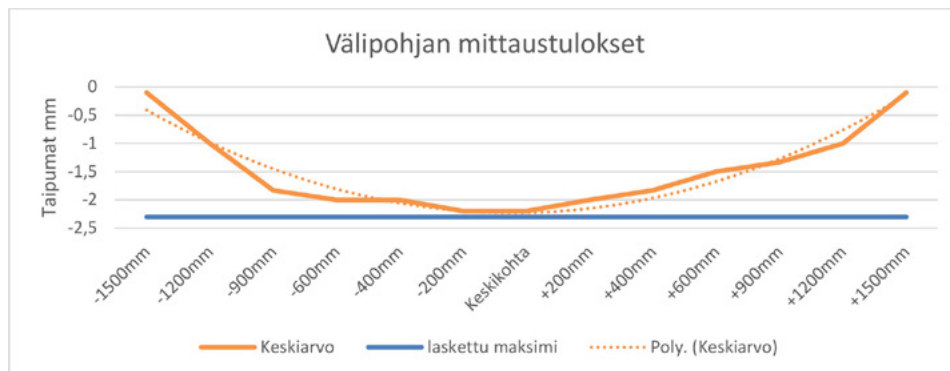
$$W_{inst,Q} = \frac{5q_k L^4}{384E_{mean}I_y} \quad W_{inst,Q} = \frac{5 * 2,0 * 3000^4}{384 * 11000 * 144000000} = 1,33 \text{ mm}$$

- Kuormituksista johtuva lopullinen taipuma

$$W_{fin} = [(1 + k_{def})W_{inst,G} + (1 + 0,2k_{def})W_{inst,Q}]$$

$$W_{fin} = [(1 + 0,6)0,40 \text{ mm} + (1 + 0,2 * 0,6) * 1,33 \text{ mm}] = 2,13 \text{ mm}$$

Kuvassa 53 esitetään välipohjan sekä laskennalliset maksimitaipumat sekä laserkeilaimella mitatut taipumat.



Kuva 53. Välipohjan yhdistetyt tulokset

CLT-koetalon *alapohjarakenne* on tuettu rakenteen keskeltä anturalla, jonka vuoksi kumpikin puoli tarkasteltiin erillisinä kokonaisuuksina. Alapohjan taipumatarkaste- luissa tuloksiksi saatiin:

- Hetkellinen taipuma kuolleesta kuormasta

$$W_{inst,G} = \frac{5g_k L^4}{384E_{mean}I_y} \quad W_{inst,G} = \frac{5 * 0,805 * 3000^4}{384 * 11000 * 144000000} = 0,54 \text{ mm}$$

- Hetkellinen taipuma hyötykuormasta

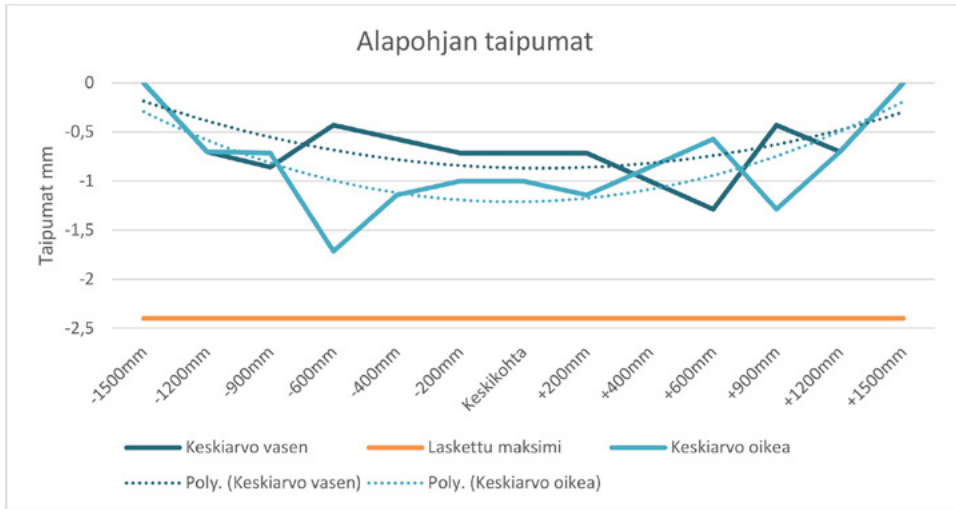
$$W_{inst,Q} = \frac{5q_k L^4}{384E_{mean}I_y} \quad W_{inst,Q} = \frac{5 * 2,0 * 3000^4}{384 * 11000 * 144000000} = 1,33 \text{ mm}$$

- Kuormituksista johtuva lopullinen taipuma

$$W_{fin} = [(1 + k_{def})W_{inst,G} + (1 + 0,2k_{def})W_{inst,Q}]$$

$$W_{fin} = [(1 + 0,6)0,40 \text{ mm} + (1 + 0,2 * 0,6) * 1,33 \text{ mm}] = 2,35 \text{ mm}$$

Kuvassa 54 esitetään alapohjan sekä laskennalliset maksimitaipumat sekä laserkeilaimella mitatut taipumat.



Kuva 54. Alapohjan yhdistetyt tulokset

Tuloksista huomataan, että sekä laskennalliset maksimitaipumat, että mitatut taipumat pysyivät sallituissa rajoissa. Opinnäytetyössä toteutettiin myös taipuma tarkastelu Storan Enson CLT-mitoitusohjelmalla, jonka tulosten perusteella CLT-koetalon CLT-vaakarakenteiden vahvuudeksi olisi riittänyt 80 mm vahvuinen CLT-levy, 120 mm sijaan. Yläpohjan tuloksista huomataan, että laserkeilaimella mitatut taipumat ovat suurempia keskikohdan oikealla puolella, tämä johtuu siitä että yläpohja laskee oikealle päin (kuva 48). Rakenteen ollessa vinossa, taipuman keskipiste siirtyy kohti alemmaa tukipistettä. Yläpohjan muita vaakarakenteita suuremmat taipumat muodostuivat todennäköisesti jo CLT-koetalon rakennusvaiheessa, sillä yläpohjajaelementtien asennusvaiheessa CLT-levyjä ei tuettu lainkaan ennen kiinnitystä vaan ne olivat vapaasti tukien varassa.

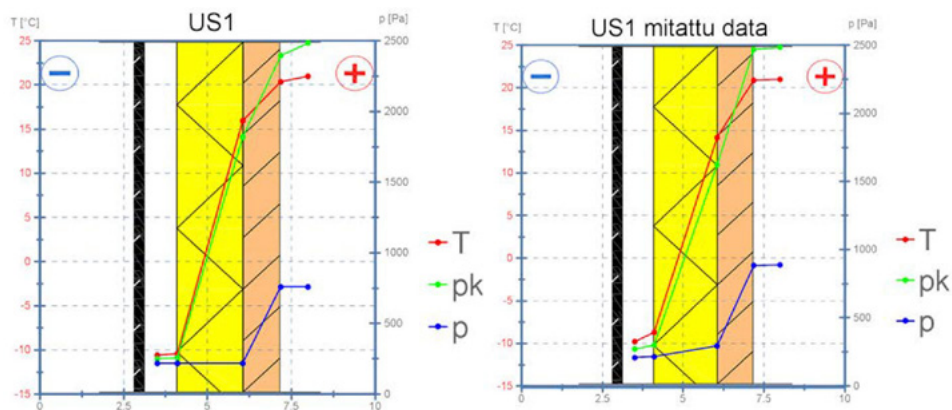
CLT-KOETALON VAIPPARAKENTEIDEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNISEN TOIMINNAN ANALYSOINTI

Työn tausta

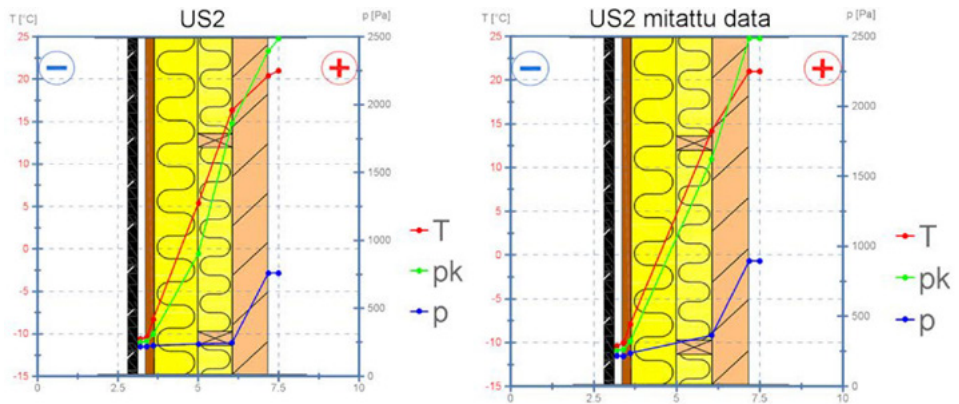
Valtteri Pirttisen opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia laskennallisesti CLT-koetalon vaipparakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Opinnäytteessä verrattiin laskennallisia tuloksia CLT-koetalolla mitattuihin tuloksiin. Työssä tehtyjen tarkasteluiden tavoitteena oli todentaa, että CLT-rakenne on toimiva vaihtoehto Suomen ilmasto-olosuhteissa.

Laskennallisten ja mitattujen tulosten vertailua

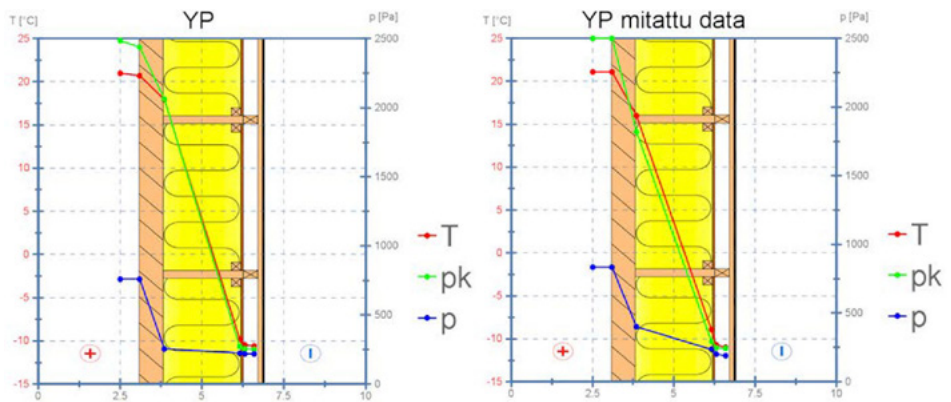
Opinnäytetyössä selvitettiin rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisen laskennan teoriaa alan kirjallisuudesta. Laskelmat toteutettiin Excelillä, laskennallisen ja mitatun datan vertailussa käytettiin DIAdem-ohjelmaa. Kuvissa 55, 56, 57 ja 58 esitellään rinnakkain laskennalliset tulokset sekä koetalolla mitatut tulokset. Kuvaajissa punainen käyrä (T), kuvaa lämpötilaa, sininen käyrä (p) rakenteessa vallitsevaa vesihöyryn osapainetta ja vihreä käyrä (pk), lämpötilaa vastaavaa vesihöyryn kyllästysosapainetta. Jotta rakenteessa olisi kosteuden tiivistymisvaara, tulee rakenteessa vallitsevan vesihöyryn osapaineen (p) käyrän leikata lämpötilaa vastaavan vesihöyryn kyllästysosapaineen (pk) käyrä.



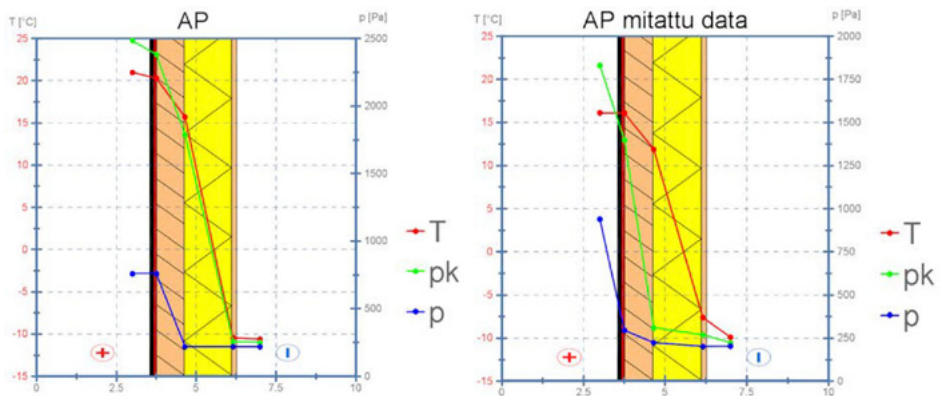
Kuva 55. Lämpötila, kyllästys- ja osapaine US1-rakenteessa (laskennallinen ja mitattu)



Kuva 56. Lämpötila, kyllästys- ja osapaine US2-rakenteessa (laskennallinen ja mitattu)



Kuva 57. Lämpötila, kyllästys- ja osapaine YP-rakenteessa (laskennallinen ja mitattu)



Kuva 58. Lämpötila, kyllästys- ja osapaine AP-rakenteessa (laskennallinen ja mitattu)

Opinnäytetyön laskennallisten tarkasteluiden ja mitattujen tulosten perusteella, voidaan todeta, että CLT-rakenne on toimiva ratkaisu Suomen ilmasto-olosuhteissa. Laskennallisissa sekä mitatuissa tuloksissa ei todettu riskiä haitalliselle kosteuden tiivistymiselle rakenteessa. Laskennallinen tarkastelu todettiin onnistuneeksi, sillä lasketut arvot olivat samansuuntaisia todellisten mitattujen tulosten kanssa.

CLT-KOETALON LÄMPÖTEKNINEN SIMULOINTI COMSOL MULTIPHYSICS OHJELMISTOLLA

Työn tausta

Petri Määtän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia lämmönsiirtymistä CLT-rakenteessa. Analyysin tekemisen työkaluksi työssä valikoitui COMSOL Multiphysics -ohjelmisto. Simuloinnin tulokset antavat mahdollisuuden verrata simulointimallin toimintaa sekä teoreettiseen malliin että kenttämittausten tuloksiin. Määtän opinnäytetyössä tutkittiin kahta erilaista seinä- ja nurkkamallia, käsiteltiin niiden lämpötiloja ja esiteltiin niiden lämpöarvoja. Seinä- ja nurkkamallien simuloinnissa rakennetyyppeinä työssä käytettiin CLT-koetalon toteutuksessa käytössä olleita rakenteita.

COMSOL Multiphysics on simulointiohjelma, jolla pystytään ratkaisemaan laaja skaala erilaisia tieteellisiä ja käytännön tehtäviä. Ohjelmalla voidaan yhdistää erilaisia fysiikkamalleja monifysiikkamalliksi. Sisäänrakennetun fysiikkakäyttöliittymän avulla mallit voidaan rakentaa käyttäen aineiden todellisia fysikaalisia ominaisuuksia. COMSOL muodostaa määrittelyiden perusteella laskentamallin, joka kuvastaa koko rakennetyyppejä. Esimerkiksi rakennusten rakennusfysikaalisessa suunnittelussa voidaan ottaa huomioon lämmön- sekä kosteuden siirtyminen ja kuormitukset yhdessä mallissa, samanaikaisesti.

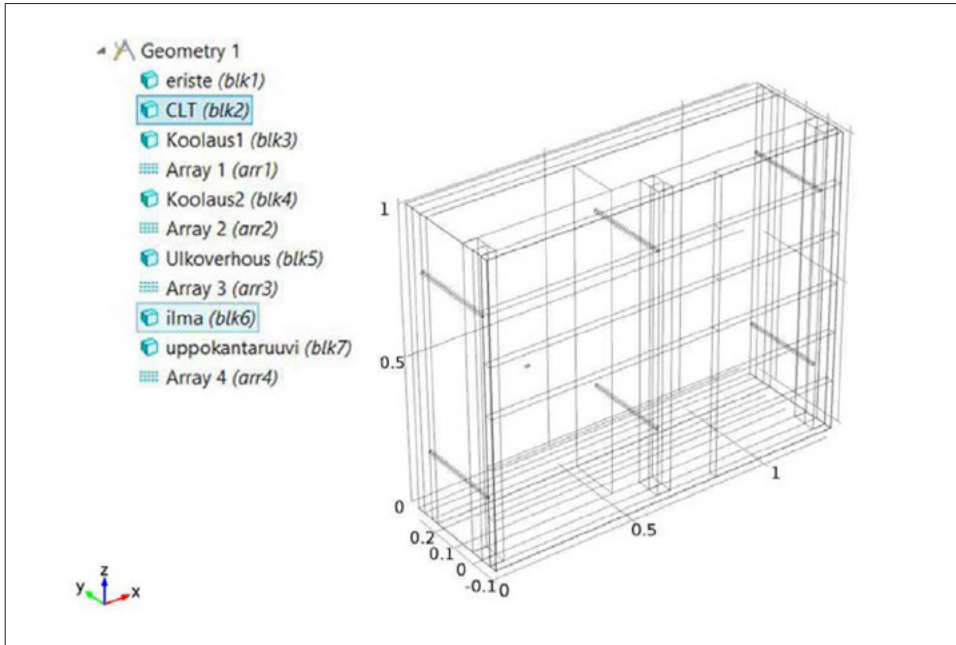
Simulaatiomallin rakentaminen

Opinnäytetyössä päädyttiin käyttämään kolmiulotteista simulaatiomallia, jotta nähtäisiin hyvin myös naulojen ja muiden kiinnikkeiden toiminta kylmäsiltoina ja niiden vaikutus lämmönsiirtymiseen. Mallinnuksessa käytettiin niin sanottua stationääritilaa, eli vakioituja sisä- ja ulkolämpötiloja. Sisälämpötilaksi oletettiin 20 °C ja ulkolämpötilaksi -10 °C, eli tarkastelu vastasi hyvin normaalia pohjoisen alueen talvipäivän tilannetta. Mitatun datan tuominen COMSOL-malliin olisi myös ollut mahdollista, jolloin myös muuttuvien olosuhteiden vaikutusta oltaisiin voitu arvioida. Tässä työssä päädyttiin kuitenkin yksinkertaistamaan tilannetta olosuhteiden vakioimisella.

Mallin rakentaminen aloitettiin soveltuvan fysiikkamoduulin valinnalla. Koska CLT-koetalon rakennetyypeissä sekä puu että eristemateriaalit olivat kaikki huokoisia materiaaleja, valittiin käytettäväksi fysiikaksi *Heat Transfer in Porous Media*. Kyseinen fysiikkamoduuli sisältää tarvittavat lämmönsiirtymisen mallit fluideissa ja kiinteissä aineissa, mutta se on paremmin optimoitu nimenomaan huukoisille materiaaleille.

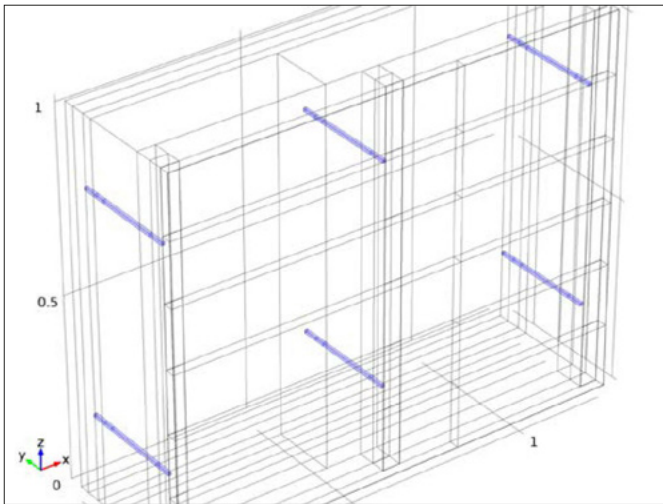
Mallinnuksessa käytettävän fysiikan valinnan ja tärkeimpien muuttujien valinnan jälkeen työssä ryhdyttiin määrittelemään varsinaista 3D-rakennemallia. Mallintami-

sessä pyrittiin mahdollisimman todenmukaiseen tulkintaan, joten CLT -levy mallinnettiin kolmikerroksisena, koolauksia mallinnettiin kaksi jne. Näin ohjelma saatiin ottamaan huomioon materiaalien välisiä rajapintoja oikealla tavalla. Osien lisääminen todettiin helpoksi, ensin valittiin haluttu kappale ja annettiin sille ulkomitat ja sijainti XYZ-koordinaatistossa. Kappaleita voitiin myös lisätä kätevästi ”array” komennolla. Esimerkiksi uppokantaruuveja määriteltiin yksi ja loput viisi saatiin ”array” komentoa käyttäen. Samoin toimittiin koolauksen ja ulkoverhouksen kanssa. Alla olevassa kuvassa on esitettyä mallinnuksessa käytetty geometria. (kuva 59.)



Kuva 59. Esimerkki mallinnuksessa käytetystä geometriasta

COMSOL-ohjelmistossa on runsaasti sisäänrakennettuja materiaaleja ja lisäksi materiaaliominaisuuksia on mahdollisuus määrittellä itse. *Material Contents* -valikosta materiaalille voidaan asettaa ominaisuuksia, kuten lämpöarvo, lämmönjohtavuus tai tiheys. Alla olevassa kuvassa (kuva 60.) on esitettyä malliin määritellyt teräskiinnikkeet, joihin määriteltiin materiaaliominaisuudet.

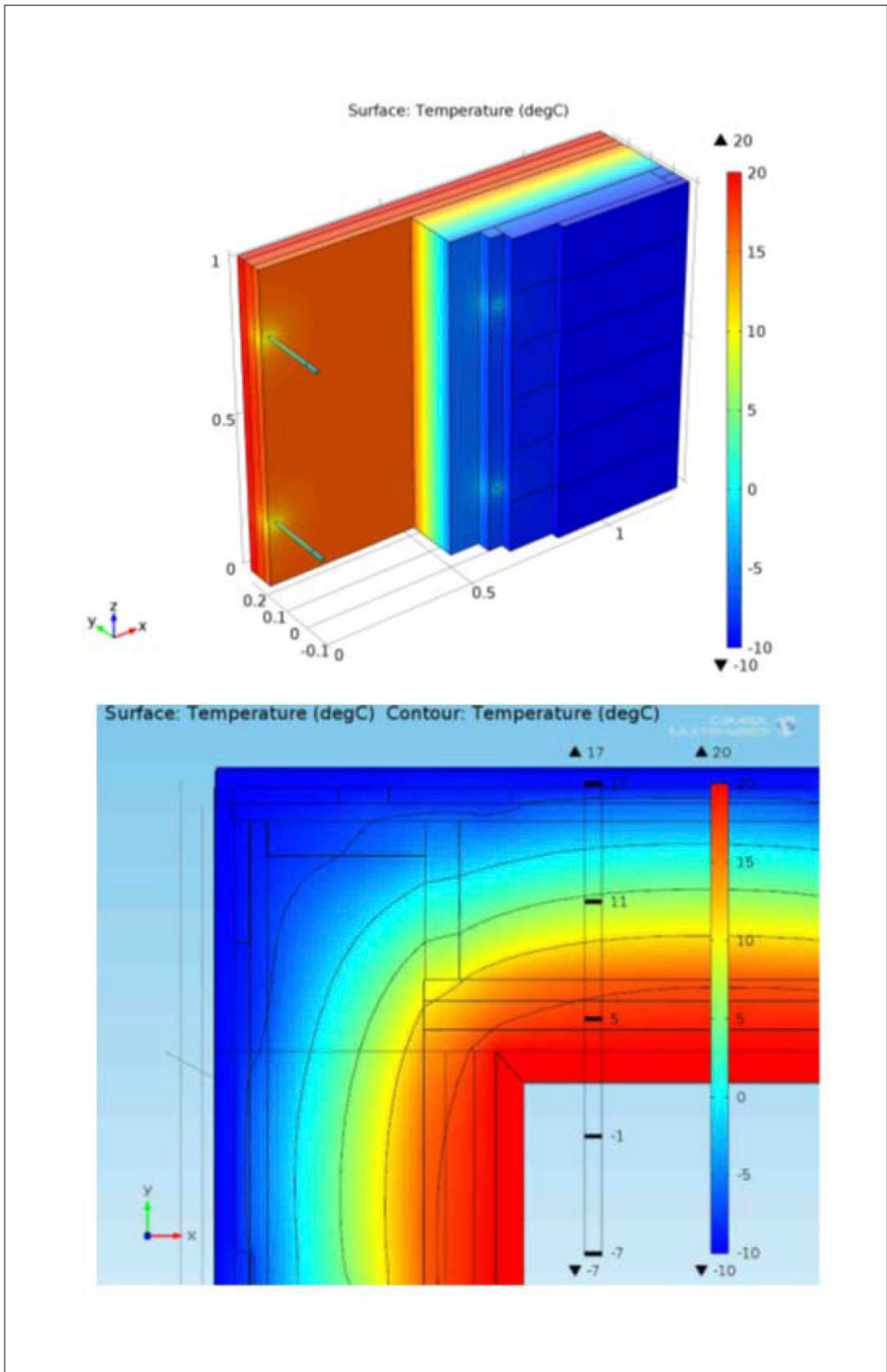


Kuva 60.
Teräskiinnikkeet
määriteltynä

Jotta ohjelmisto pystyi analysoimaan luotua 3D -mallia, siitä luotiin niin sanottu laskentaverkko eli mesh. Verkko muodostuu pienistä kolmioista, jotka ohjaavat laskennan edistymistä. Tietokone laskee kunkin kolmion alueelle haluttujen suureiden arvot. Mitä pienempiä kolmiot ovat, sitä enemmän laskentatehoa vaaditaan. Verkkoa säätämällä voidaan malli priorisoida siten, että tärkeämmille alueille lasketaan enemmän arvoja, kun vähemmän tärkeille. Tässä tapauksessa materiaalien rajapinnat määriteltiin tärkeimmiksi alueiksi.

Simuloinnin tuloksia

Opinnäytetyössä tehdyn simuloinnin perusteella todettiin, että ruuvien ja koolauksen merkitys on mallinnuksen perusteella rakenteessa vallitsevalle lämpötilalle. Esimerkiksi, kun CLT levyn toisen kerroksen lämpötila on ilmarakojen kohdalla normaalisti $19.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, on se ruuvien ja koolauksen kohdalla $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Opinnäytetyössä tehdyn mallinnuksen mukaan kiinnitykset myös heikentävät rakenteen U-arvoa. Alla olevassa kuvassa on esitetty mallinnuksen tuloksena määritellyt materiaalikerrosten pintalämpötilat sekä lämpötilajakauma nurkassa.



Kuva 61. Havainnekuva pintalämpötiloista ja nurkan lämpöjakauma

CLT-RAKENTEISEN ULKOSEINÄN ILMAÄNENERISTÄVYYS

Työn tausta

Samuli Tuomikummun opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia CLT-koetalon ulkoseinien ilmaääneneristävyyttä. Opinnäytetyössä selvitettiin CLT-rakennetekniikan äänitekniisiä vaatimuksia, suunnitteluvaiheessa huomioitavia CLT-rakenteen ominaisuuksia sekä CLT-koetalon ulkovaipan ääneneristysluku.

Mittausmenetelmä

Mittaukset suoritettiin Lapin ammattikorkeakoulun Norsonic Nor140 äänitasomittarilla, joka on suunniteltu erityisesti käytettäväksi rakennuksissa tapahtuviin mittauksiin. Laitteesta löytyvillä ominaisuuksilla voidaan suorittaa ympäristön melun mittaamista, rakennuksen akustiikan ja äänenvoimakkuuksien mittaamista sekä melun kartoittamista. Äänenlähteenä mittauksissa käytettiin MIP Oy:n valmistavaa kaiuttimelementtiä, jolla pystytään tuottamaan yli 100 dB vahvuista vaalenpunaista kohinaa (pink noise).

Mittaukset suoritettiin jokaiselta CLT-koetalon neljältä julkisivulta. Mittaukset toteutettiin ISO140 5 standardin (*Akustiikka, rakennusten ja rakennusosien äänieristävyyden mittaaminen*) ohjeiden mukaisesti. Mittaukset aloitettiin merkitsemällä julkisivujen keskikohdat. Äänenlähteen sijainti oli keskikohdasta 6,5 metriä kohtisuoraan pois päin ja äänenlähde asetettiin 45° kulmaan seinää kohti, mittauspiste sijaitsi 2 metriä julkisivun keskikohdasta äänenlähdettä kohti.

Vastaanottohuoneen ulkopuolella mittaukset suoritettiin julkisivun keskeltä, sekä 0,5 metriä vasemmalle ja 0,5 metriä oikealle keskipisteestä. Jokaisessa mittauspisteessä suoritettiin kolme tallennusta.

Vastaanottohuoneen sisäpuolella suoritettiin vähintään viisi tallennusta siten, että etäisyys kalusteisiin ja seiniin oli vähintään 0,5 metriä lattiaan, ja kattoon vähintään 1 metrin. Mittauspisteiden välinen etäisyys oli vähintään 0,7 metriä.

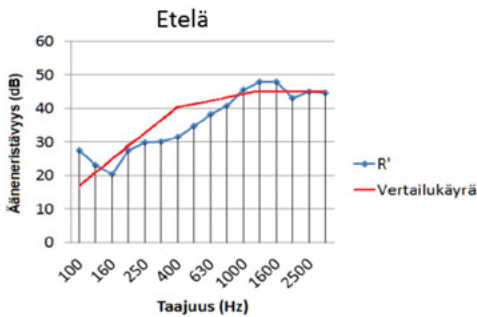
Kyseiset toimenpiteet suoritettiin jokaisen julkisivun kohdalla, jonka lisäksi otettiin yhdeksän tallennusta sisäpuolen taustamelusta ja yhdeksän tallennusta jälkikaiunta-ajasta eri menetelmin.

Mittaustulokset

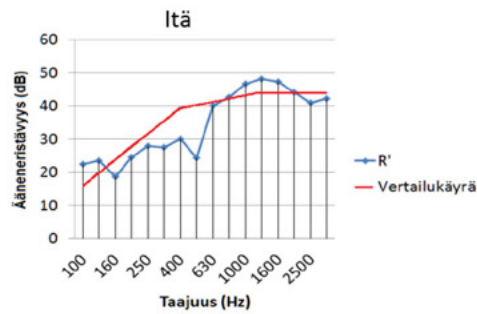
Mittaustuloksiksi saatiin seuraavat arvot CLT-koetalon julkisivuille:

- Eteläsivu $R'w = 42$ dB
- Itäsivu $R'w = 41$ dB
- Pohjoissivu $R'w = 37$ dB
- Länsisivu $R'w = 38$ dB.

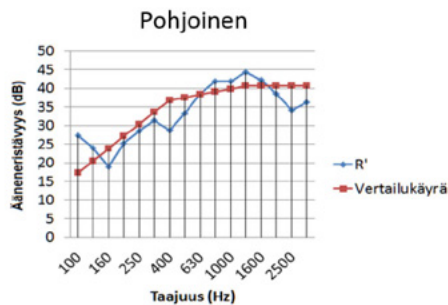
Etelä	
R _w = 42 dB	
Taajuus	R'
Hz	dB
50	
63	
80	
100	27,5
125	23,2
160	20,8
200	27,6
250	29,8
315	30
400	31,5
500	34,8
630	38,2
800	40,9
1000	45,6
1250	48
1600	48
2000	41,1
2500	45
3150	44,5
4000	
5000	



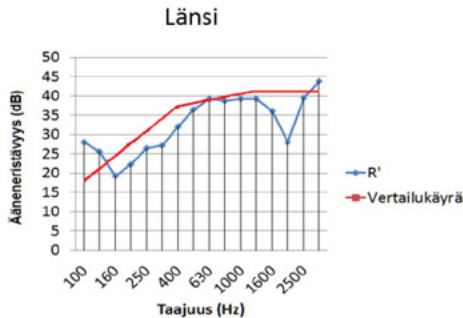
Itä	
R _w = 41 dB	
Taajuus	R'
Hz	dB
50	
63	
80	
100	22,5
125	23,5
160	18,8
200	24,7
250	27,9
315	27,5
400	30
500	28,4
630	40,2
800	47,6
1000	46,8
1250	48,2
1600	47,4
2000	44,2
2500	41,1
3150	42,3
4000	
5000	



Pohjoinen	
R _w = 37 dB	
Taajuus	R'
Hz	dB
50	
63	
80	
100	27,1
125	24
160	19
200	25,2
250	28,5
315	31,3
400	29,8
500	33,1
630	38,5
800	41,9
1000	41,9
1250	44,4
1600	42,1
2000	38,5
2500	34,2
3150	36,2
4000	
5000	



Länsi	
R _w = 38 dB	
Taajuus	R'
Hz	dB
50	
63	
80	
100	28
125	25,7
160	19,2
200	22,2
250	26,6
315	27,1
400	32,2
500	36,5
630	39,1
800	38,8
1000	39,2
1250	39,3
1600	38,2
2000	28,1
2500	39,4
3150	44
4000	
5000	



Kuva 62. Ilmääneneristävyyttä mittaustulokset

Vaadittu yhteisääneneristysluku CLT-koetalon julkisivuille on:

- $R_{tr,vaadittu} = 30 - 1 + 7 = 36 \text{ dB}$

Tutkimuksissa saatujen tulosten perusteella CLT-elementin käyttö ulkoseinärakenteissa on mahdollista, kun ulkomelutasot eivät poikkea suuresti sallituista ohjeista. Käytettäessä CLT-elementtejä asuinhuoneistojen väliseinärakenteissa, joudutaan huomioimaan elementtien valmistuskustannukset ja taloudellisuus, sillä korkeiden ilmasteneristävyyttävaatimusten vuoksi elementteihin joudutaan lisäämään puukerrosia.

NÄILLÄ KONSTEILLA ONNISTUT CLT-RAKENTAMISESSA – OHJEVIHKKO

Työn tausta

Ilkka Rautio toteutti työharjoittelunsa aikana ohjevihkosen CLT-rakentamisesta. Ohjevihkon nimeksi muotoutui ”Näillä konsteilla onnistut CLT-rakentamisessa”. Työn tarkoituksena oli tuottaa tiivis tietopaketti CLT-materiaalista rakentamista suunnitteleville tahoille. Ohjevihkosta ensimmäistä CLT-materiaalista tehtävää rakennushanketta toteuttava tai suunnitteleva pystyy tarkistamaan, mitä asioita pitää huomioida hankkeen eri vaiheissa.

Lopputuotos

Ohjeen alussa esitellään CLT-materiaalin ominaisuuksia sekä esitellään CLT:n etuja verrattaessa muihin yleisiin rakennusmateriaaleihin. Ohjevihkoon on laadittu omat osiot jokaiselle rakennushankkeen toimijalle. Rakennuttajan osiossa on perusteltu, miksi rakennus kannattaisi rakennuttaa CLT:stä, ja mitä etuja siitä on rakennuttajalle. Suunnittelijalle suunnatussa osiossa kerrotaan, että mitä asioita tulee huomioida, kun rakennusta suunnitellaan CLT-materiaalista. CLT-rakenteiden suunnittelussa tulee ottaa huomioon CLT-levyjen mitat, rakenteisiin vaikuttavat kuormat, rakenteiden jäykistys ja värähtelyiden vaikutukset. Rakenteiden liitoksista esiteltiin esimerkki liitostapoja. Vihkossa annetaan myös ohjeet, miten paloturvallisuus huomioidaan ja miten kosteudenhallinta pitää huomioida rakentamisessa.

Rakennusurakoitsijan osuudessa esitellään asioita, joita rakennusurakoitsijan tulee ottaa huomioon CLT-materiaalista rakentaessa. CLT-levyt valmistetaan pääosin Keski-Euroopassa, jonka vuoksi niiden saaminen työmaalle kestää kauemman kuin perinteisillä materiaaleilla. CLT-levyjen kuljetus työmaalle tapahtuu isoilla rekka-autoilla, joten kulkureitti työmaa-alueelle tulee olla kunnossa. CLT:n varastoinnissa työmaalla ja rakentamisen aikana tulee kiinnittää erityistä huomiota CLT-levyjen säältä suojaamiseen. CLT-levyjen nostoissa voidaan käyttää kantavuudeltaan pienempiä nostureita kuin betonista valmistetuilla elementeillä, koska CLT-materiaali on betonia kevyempää. CLT-materiaalista tehtyihin elementteihin on mahdollista tehdä työstöjä työmaalla helposti tiettyyn rajaan saakka, elementin kantavuuden siitä kärsimättä. Elementtien liitoksiin tulee kiinnittää erityistä huomiota, sillä CLT-materiaali itsessään on lähes ilmatiivis, jonka vuoksi liitoksetkin tulee tehdä tiiviiksi. Tiivistyksessä käytetään yleensä elastisia tiivistysmassoja ja erityisiä tiivistysnauhoja.

Näillä konsteilla onnistut CLT- rakentamisessa



Ohjeita ja vinkejä ammattilaisille kuin amatöörielle.

Kuva 63. Näillä konsteilla onnistut CLT-rakentamisesta ohjevihkosen kansilehti

Kirjoittajat

AHORANTA, TYTTI

Insinööri (AMK), projektipäällikkö
Digipolis

ALAKUNNAS, TUOMAS

Insinööri (AMK), projektipäällikkö
Arctic Civil Engineering (ACE),
Lapin AMK

AUTIONIEMI, JUHA

Insinööri (AMK), projekti-insinööri
Arctic Power
Lapin AMK

NIEMELÄ, ANTTI

Insinööri (AMK), projektipäällikkö
Käynnissäpidon tutkimusryhmä
Lapin AMK

PEISA, KARI

FL, Lehtori
Teollisuus ja luonnonvarat
Lapin AMK

PIRTTINEN, VALTTERI

Insinööri (AMK), projekti-insinööri
Arctic Civil Engineering (ACE),
Lapin AMK

VATANEN, MIKKO

Insinööri (AMK), projektipäällikkö
Arctic Civil Engineering (ACE),
Lapin AMK

CLT-pientalon kokeellisessa rakennushankkeessa testattiin CLT-rakenteiden toimivuutta, kerättiin tietoja ja esiteltiin CLT-rakentamista. Koetalossa tehdyt tutkimukset osoittivat, että CLT-rakenteinen pientalo soveltuu hyvin suomalaisiin olosuhteisiin. Hankkeen aikana tuotettiin paljon lisätietoa CLT-rakentamisesta.

CLT-koetalo-hanke oli luonteeltaan investointi- ja kehittämishanke. Se toteutettiin 1.4.2013–30.4.2015. Hanke oli Euroopan aluekehitysrahaston osittain rahoittama, rahoittajaviranomaisena toimi Lapin liitto. Muina rahoittajina toimivat Digipolis Oy, Lapin ammattikorkeakoulu, Ammattiopisto Lappia, Kemi-Tornio-alueen kehittämiskeskus, Lapin muut kunnat sekä yritykset ja yhteisöt.

Lapin AMKin ja Digipoliksien yhteistyö CLT-rakentamisen tutkimuksen saralla jatkuu Future possibilities for CLT -Interreg-hankkeessa.

DIGIPOLIS

AMMATTIOPISTO
LAPPIA



Vipuvoimaa
EU:lta
2007–2013

LAPIN AMK⁷
Lapland University of Applied Sciences

www.lapinamk.fi

ISBN 978-952-316-136-8