



CLT:N KÄYTÖN LISÄÄMINEN NOPEIDEN KOKEILUJEN AVULLA



Jari Hyvärilä, Pauliina Mattila, Arto Myllyniemi, Elisa Saarela

CLT:N KÄYTÖN LISÄÄMINEN NOPEIDEN KOKEILUJEN AVULLA

JULKAISIJA:

Centria-ammattikorkeakoulu
Talonpojankatu 2, 67100 Kokkola

JAKELU:

Centria kirjasto- ja tietopalvelu
kirjasto.kokkola@centria.fi, p. 040 808 5102

Taitto: Centria-ammattikorkeakoulun markkinointi- ja viestintäpalvelut
Kannen kuva: Adobe Stock -kuvapalvelu

Centria. Raportteja ja selvityksiä, 39
ISBN 978-952-7173-47-3 (PDF)
ISSN 2342-933X

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	4
2. NOPEAN KOKEILUN TOIMINTAMALLI	5
3. CLT-LIITOKSET	6
3.1 Tausta ja tavoite	6
3.2 Testaus	7
3.3 Tulokset	10
4. PALOSUOJAUS	13
4.1 Tausta ja tavoite	13
4.2 Testaus	13
4.2.1 Testatut palosuoja-aineet	13
4.3 Tehdyt testit	14
4.3.1 Taivutuslujuustestin kuvaus	14
4.3.2 Kartiokalorimetrikokeen kuvaus	16
4.4 Tulokset	17
4.4.1 Taivutuslujuustestien tulokset	17
4.4.2 Kartiokalorimetrikokeen tulokset	22
5. VÄLIAIKAISET SILLAT	26
5.1 Tausta ja tavoite	26
5.2 Taustatyö	26
5.3 Perustusten valmistus	28
5.4 Elementin pinnoitusmateriaalin testaus	30
5.5 Elementin pinnoitus ja paikalleen asennus	36
5.6 Testitapahtuma	37
5.7 Tulokset ja pohdinta	39
6. CLT-HIRSIRAKENTEEN TUTKIMUS	42
6.1 Tausta ja tavoite	42
6.2 Koetalo, rakenne ja mittaussuureet	42
6.2.1 CLT-hirsi	42
6.2.2 Mittauslaitteisto	43
6.2.3 Mittaussuureet	44
6.2.4 Koetalo ja mittauspisteet	45
6.3 Tulokset	48
6.3.1 Rakenteiden kosteuspitoisuus sekä ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila ..	48
6.3.2 Painumamittaukset	65
6.3.3 Halkeilu	68
6.4 Pohdinta	77

LÄHTEET

KUVALUETTELO

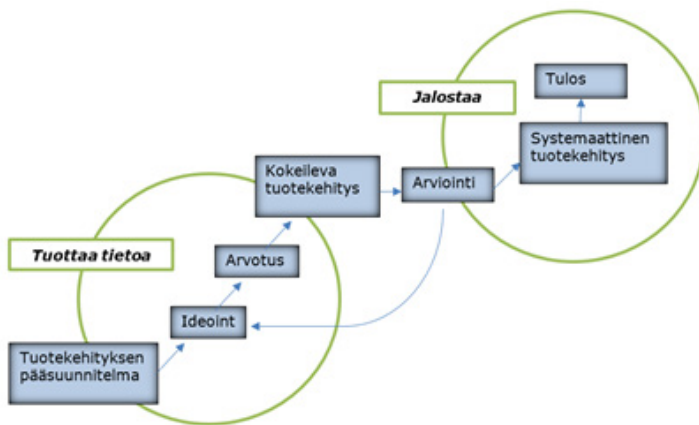
1. JOHDANTO

Tämä tutkimus oli osa kansainvälistä Future possibilities for CLT -hanketta. FCLT-hanke oli Euroopan aluekehitysrahasto Interregin rahoittama kansainvälinen hanke, jonka toimialueena oli Suomen ja Ruotsin pohjoisosat. Hankkeen tavoitteena oli lisätä CLT:n (Cross Laminated Timber) ja yleisesti puun monipuolista käyttöä rakentamisessa hankkeen toimialueella. Hankkeen kokonaisbudjetti oli 1,3 miljoonaa euroa ja siinä olivat mukana Centria Tutkimus ja kehityksen lisäksi Kemin Digipolis Oy, Lapin ammattikorkeakoulu Oy, Luulajan teknillinen yliopisto (SE) ja Ruotsin tekninen tutkimuslaitos RISE (SE). Hankeaika oli 1.9.2015–30.6.2018. Tässä raportissa on esitelty hankkeessa suoritettuja nopeita kokeiluita sekä toimintamallia, jonka avulla kokeiluja vietiin eteenpäin.

2. NOPEAN KOKEILUN TOIMINTAMALLI

Hankeen tavoite oli tukea yritysten nopeita tuotekehitysprojekteja ja madaltaa kynnystä kokeilla CLT-materiaalia. Nopean kokeilun toimintamallia kehitettiin ja sovellettiin koko hankkeen toteutuksen ajan. Nopean kokeilun toimintamallin haaste on keskeneräisyyden ja epäonnistumisen sietäminen. Tavoite oli nopealla syklillä saavuttaa selkeä näkemys siitä, onko kokeiluun kannattavaa panostaa lyhyttä kokeilua enemmän ja näin säästää resursseja.

Iso osa nopean kokeilun toimintamallia on vapaamuotoisuus, mutta onnistuakseen myös tällaiset nopeat tuotekehitysprojektit vaativat prosessin ohjausta. Jokainen tuotekehitysprojekti käynnistyykin pääsuunnitelman laatimisella loogiseen viitekehukseen. Tähän kehykseen kirjattiin päävaiheet otsikkotasolla sekä vastuut. Tuotekehityksen aikana konkreettinen työsuunnitelma tehtiin aina seuraavan pääotsikkotason alle projektin edetessä. Ilman konkreettista työsuunnitelmaa ketterä tuotekehitys on hallitsematon kaaos. Tuotekehityksen arviointi ja päätös jatkamisesta tehtiin jokaisen päävaiheen jälkeen.



Kuva 1. Nopean kokeilun toimintamalli (Saarela 2018)

Tuotekehitysprojektit lähtivät liikkeelle vapaamuotoisella osuudella, jolle luontaista oli tiedon kerääminen ja vapaa ideointi. Vapaat tuotekehitysosuudet olivat lyhyitä yhden päivän mittaisia työjaksoja, jolloin tuotekehitystiimi vei asiaa eteenpäin parityöskentelyllä. Hyvin nopeasti matalalla kynnyksellä lähdettiin tekemään ensimmäinen kokeilu, jonka avulla saatiin tietoa tutkittavasta uudesta aiheesta tai materiaalista. Näin syntyi käsitys siitä, mitä asiaa tulee tutkia ja kehittää systemaattisesti. Osa tuotekehitysprojekteista päättyi tähän vaiheeseen, koska todettiin että kerätyn tiedon tai kokemuksen valossa, ei tuoteidean kehitystä ollut kannattavaa jatkaa eteenpäin.

Toimintamallille haasteita luo aktiivisen viestinnän tarve eri osapuolien välillä. Testauksen suunnittelu, toteutus ja suoritus sekä näistä viestintä on tehtävä aiempaa nopeammin. Kokeilujen avulla on mahdollisuus tarttua nopeasti riskitekijöihin, jos viestintä toimii toimijoiden välillä.

Nopea kokeilun toimintamallissa tuotekehityksen suunnitelmaa jouduttiin usein muokkaamaan. Toimintamallin mukainen tuotekehitys olikin hyvin syklistä. Onnistunut toimintamallin käyttö edellytti erityisesti luovaa ajattelua yksinkertaisten testimenetelmien hahmottamiseen ja löytämiseen. Lyhyiden tuotekehitysjaksojen ja kokeilujen jälkeen ideoita arvioitiin kriittisesti. Jos idea todettiin arvioinnissa toimivaksi kokeilevan nopean tuotekehityksen aikana, sen kehittämistä jatkettiin systemaattisesti. Seuraavissa luvuissa on esitelty hankkeen pilottikohteita, joissa testaus vietiin lähemmäs systemaattista kehittämistä nopean kokeilun jälkeen.

3. CLT-LIITOKSET

3.1. Tausta ja tavoite

CLT-liitosten pilotti käynnistyi keväällä 2017 asiakasyrityksen kontaktista, jolla oli tarve selvittää naulaton ja ruuviton CLT-seinäliitos uuteen rakennustuotteeseen. Puuliitoksista tehtiin taustatutkimus, jonka perusteella testiin valittiin kolme liitosta: BTALU-palkkikannatin (kuva 2), ETB-päätykiilakiinnike (kuva 3) ja puinen kiilaliitos (kuva 4). Testauksen tavoite oli selvittää puisen kiilaliitoksen ilmanpitävyyss- ja vesitiiviys sekä mitata vertailuarvot palkkikiinnitykseen tarkoitetuilla kiinnikkeillä. Liitosten valintaan vaikutti liitosten oletettu käyttäytyminen testissä. Kaikki kolme liitosta testattiin ilman tiivistettä sekä puinen kiilaliitos myös tiivistettynä.

Rakennuksen ilmanpitävyys koostuu yksittäisten rakennusosien ominaisuuksista. Ilmapitävyydellä on vaikutusta rakennuksen fysikaaliseen käyttäytymiseen. CLT-levyn kerroksittainen rakenne tekee itse materiaalista syrjäliimattuna hyvin ilmatiiviin. Oleellinen ilmapuodon kohde on levyjen liitoskohta.



Kuva 2. BTALU-palkkikannatin (Hyvärilä 2017)



Kuva 3. ETB-päätykiilakiinnike (Hyvärilä 2017)

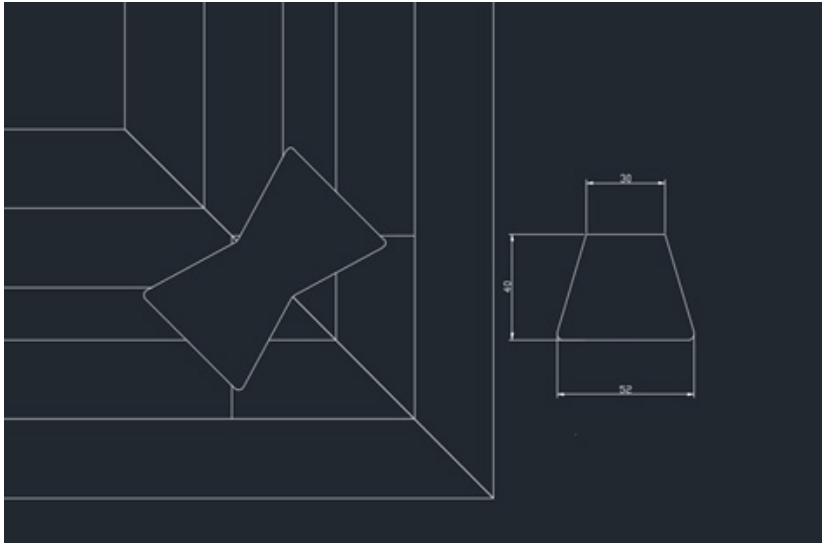


Kuva 4. Puinen kiilaliitos (Hyvärilä 2017)

Liitosten materiaali tilattiin CLT Finland Oy:ltä. Levytyyppi oli 140 mm vahva, syrjäliimattu 5-kerroksinen levy, jonka lamellien paksuudet olivat 30-30-20-30-30 mm. Levyt työstettiin CNC-koneella kokoon 950 mm x 630 mm, jonka yhteydessä niihin työstettiin tarvittavat urat ja upotukset. BTALU-palkkikannattimelle työstettiin myös kiinnitystappien reiät. BTALU-kannattimen liitos ei tiivistynyt, koska liitoksella ei ollut kiilaavaa vaikutusta ja poikkiesi näin oleellisesti ETB-kiinnikkeestä sekä puisesta kiilaliitoksesta. BTALU-kannattimia asennettiin korkeussuunnassa 950 mm:n matkalle kolme kappaletta.

ETB-päätykiilakiinnike vaikutti asennettaessa tiiviiltä kiilautuvuuden ansiosta. Kiinnikkeitä asennettiin 950 mm:n matkalle kaksi kappaletta. Myös ETB-kiinnikettä käytettäessä kiinnikkeiden väliin jäi tyhjää ilmatilaa, mutta saumassa ei ollut suoraa ilmarakoa sisältä ulospäin. Liitoksen kiilautuvuuden ansiosta oletus oli, että liitoksen ilmanpitävyys on hyvä.

Puinen kiilaliitos (kuva 5) mukaili X-fix L -kiilaliitosta, joka on itävaltalaislähtöinen seinäliitosta- pa. Liitoksessa ei käytetä ruuveja tai muita vastaavia menetelmiä CLT-levyjen kiinnittämiseen toisiinsa. Liitettävien seinäelementtien päihin työstettiin lohopenyrstön mallinen ura. Seinäelementit kiinnitettiin toisiinsa kahdella, kiilamuotoon työstetyllä vanerista valmistetulla soirolla.



Kuva 5. Puinen kiilaliitos (Hyvärilä 2017)

3.2. Testaus

Jokaiselle liitokselle suoritettiin ilmanläpäisevyyden- ja vesitiiveyden testaus noudattaen standardeja SFS-EN 1026 (IKKUNAT JA OVET. ILMANLÄPÄISEVYYS. TESTIMENETELMÄT) ja SFS-EN 1027 (IKKUNAT JA OVET. VESITIIVIYS. TESTIMENETELMÄ). Testit suoritettiin Centria-ammattikorkeakoulu Oy:n olosuhdelaboratoriossa. Testitilan lämpötila vaihteli välillä 20-22 °C, suhteellinen kosteus välillä 30-42 % ja ilmanpaine 995-1000 hPa. Testilaitteistona käytettiin ikkuna- ja ovitestauksiin tarkoitettua laitteistoa (kuvat 6–8).

Paine-erolähtetiminä käytössä olivat Satron HD3SD27SHD sekä Satron VD3SD27SHo -nimiset laitteet, jotka on kalibroitu toukokuussa 2016. Lineaariantureina käytössä oli kolme eri LT-M 0050-S -nimistä laitetta, jotka on kalibroitu joulukuussa 2015.

Testikappaleille valmistettiin sovite (kuva 9) testikammioon. Sovitteeseen työstettiin 400*950 mm kokoinen aukko testikappaleita varten. Testikappaleet kiinnitettiin sovitteeseen tukipuiden ja ruuvien avulla. Sovitteen ja testikappaleiden välinen liitos tiivistettiin silikonilla, samoin kuin ruuvien kannat (kuvat 10–12). Kiinnityksen ja tiivistämisen jälkeen silikonin annettiin kuivua vuorokausi ennen testin aloittamista. Liitoksen vaakasuorat saumat suojattiin. Testin kokonaiskesto oli 2–3 tuntia riippuen rakenteen tiiveydestä. Testin päätyttyä testikappale vaihdettiin ja liitokset tiivistettiin uudelleen.



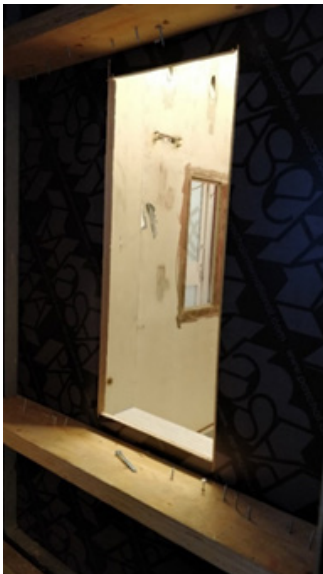
Kuva 6. Testilaitteisto
(Hyvärilä 2017)



Kuva 7. Testilaitteisto
(Hyvärilä 2017)



Kuva 8. Testilaitteisto
(Hyvärilä 2017)



Kuva 9. Sovite sisäpuolelta
(Hyvärilä 2017)



Kuva 10. Liitos asennettuna sovitteeseen
(Hyvärilä 2017)

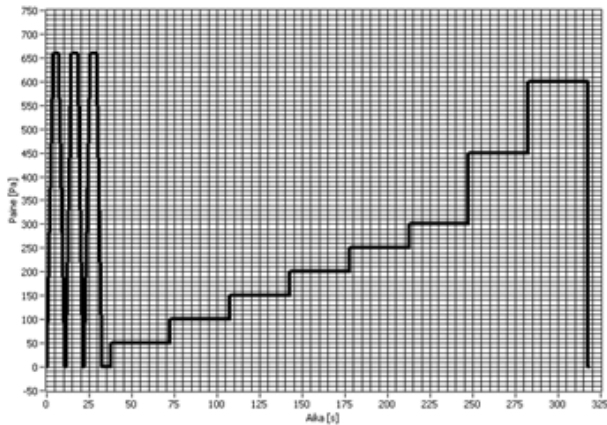


Kuva 11. Liitoksen saumat tiivistettynä (Hyvärilä 2017)



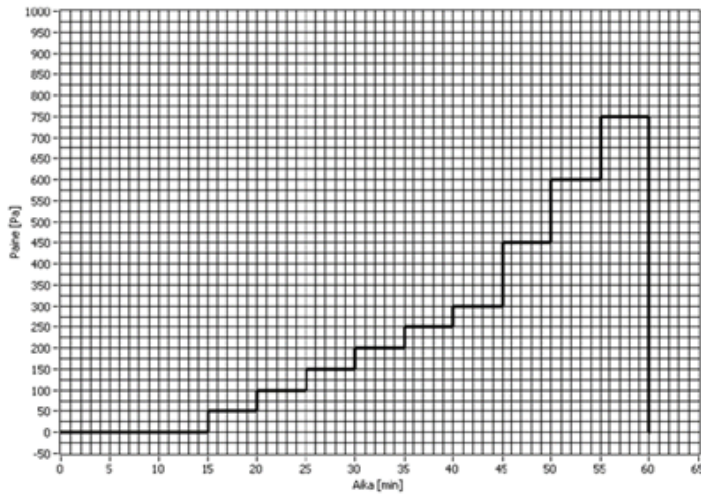
Kuva 12. Sovitteen saumat tiivistettynä (Hyvärilä 2017)

Ilmavuodot rakennuksissa aiheutuvat sisä- ja ulkopuolen paine-eroista. Ilmanläpäisevyyden testimenetelmässä käytettiin maksimi ilmanpaine-erona 600 Pascalia. Testi suoritettiin paineistamalla liitos positiiviseen (ulkoa sisäänpäin) ja negatiiviseen (sisältä ulospäin) suuntaan. Testin alussa testikappaleet altistettiin kolmelle 10 % testin maksimipainetta suuremmalle painepulssille laitteen toimintavarmuuden todentamiseksi. Testissä käytetty paine-eron muutos ajan funktiona on esitetty alla olevassa kuvassa 13.



Kuva 13. Paine-eron muutos ajan funktiona ilmanläpäisevyyden testissä (SFS-EN 1026 2016)

Vesitiiviuden testimenetelmässä käytetty maksimi paine-ero oli 600 Pascalia. Paine-eron muutos ajan funktiona on esitetty alla olevassa kuvassa 14.



Kuva 14. Paine-eron muutos ajan funktiona vesitiiviuden testissä (SFS-EN 1027 2016)

Käytetty ikkunoiden ja ovien vesitiiviuden testilaitteisto (standardi SFS-EN 1027 IKKUNAT JA OVET. VESITIIVIYS. TESTIMENETELMÄ) poikkeaa seinäelementtien vesitiiviuden testaukseen tarkoitetusta testilaitteistosta (standardi SFS-EN 12155 JULKISIVUJÄRJESTELMÄT. VESITIIVIYS. LABORATORIOTESTI STAATTISELLA PAINEELLA) siten, että siinä suuttimet sijaitsevat 700 mm sijasta 400 mm:n etäisyydellä toisistaan. Molemmissa standardeissa suutinten veden tuotoksi on määritetty 2 litraa minuutissa suutinta kohden. Ikkunoiden ja ovien vesitiiviuden standardin mukaisesti suutin asetettiin avautuvat sauman (tässä tapauksessa liitossauman) ylälaidan korkeudelle 24 asteen kulmaan 40 cm pinnasta. Suuttimista avautuva vesisuihkun kulma on 120 astetta, jolloin koko testikappale altistui kosteudelle. Liitosten vedenpitävyyden luokittelu on tehty seinäelementeille arviointiin tarkoitetun standardin SFS-EN 12154:1999 (CURTAIN WALLING. WATERTIGHTNESS. PERFORMANCE REQUIREMENTS AND CLASSIFICATION) mukaisesti aiemmin esitetyistä testimenetelmien poikkeamista huolimatta.

3.3. Tulokset

Testikappaleiden ilmanpitävyyden luokittelu tehtiin standardin SFS-EN 12152 (CURTAIN WALLING. AIR PERMEABILITY. PERFORMANCE REQUIREMENTS AND CLASSIFICATION) mukaisesti. Standardissa annetaan luokitusohjeistus rakenteen ilmanpitävyydelle testatun ilmanläpäisevyyden perusteella. Luokituksessa huomioidaan rakenteen saumojen pituus. Luokitus on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Ilmanpitävyysluokitus huomioiden rakenteen saumojen pituus (SFS-EN 12152 2002)

Maksimipaine P_{max} (Pa)	Ilmanläpäisevyys $m^3/m \cdot h$	Luokka
150	0,5	A1
300	0,5	A2
450	0,5	A3
600	0,5	A4
> 600	0,5	AE

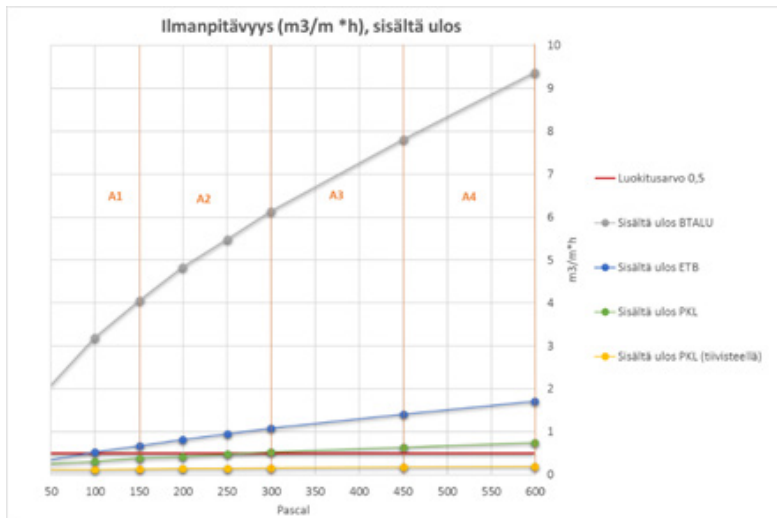
Taulukossa 2 on esitettyä ilmanläpäisevyyden mittausarvot. Mittausarvot on suhteutettu testikappaleen korkeuteen (0,950 m), jotta arvoa voidaan suoraan verrata luokitusarvon yksikköön (m³/m³*h). Ilman tiivistettä BTALU- ja ETB-kiinnikkeet eivät saavuttaneet alinta ilmanpitävyyden luokitusarvoa. Puinen kiilaliitos (PKL) saavutti ilman tiivistystä luokituksen A1 molempiin paineistussuuntiin, mutta oli tiiviimpi paineistaessa sisältä ulospäin. Käytettäessä tiivistenauhaa HBD XL 20/2 puinen kiilaliitos kesti yli 600 Pascalin paineen molempiin paineistussuuntiin.

Taulukko 2. Ilmanläpäisevyydsmittauksen arvot tuotteittain sekä ilmanpitävyyden luokitus (Saarela 2017)

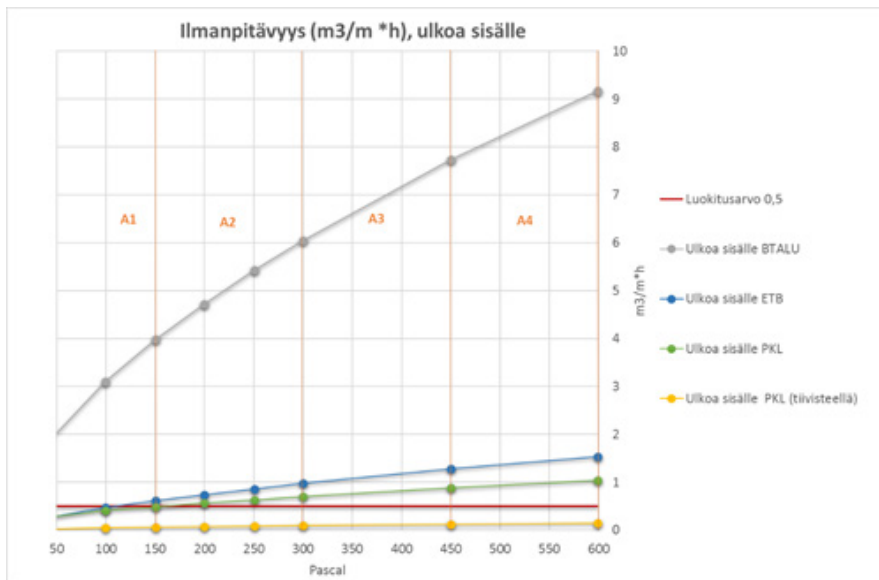
	Paine	Ulkoa sisälle BTALU	Sisältä ulos BTALU	Ulkoa sisälle ETB	Sisältä ulos ETB	Ulkoa sisälle PKL	Sisältä ulos PKL	Ulkoa sisälle PKL (tiivisteellä)	Sisältä ulos PKL (tiivisteellä)
Ei luokitusta	49,7	2,011	2,085	0,296	0,352	0,291	0,254	0,029	0,112
	99,53	3,106	3,196	0,470	0,529	0,409	0,316	0,050	0,123
A1	150,61	3,984	4,058	0,614	0,676	0,489	0,382	0,060	0,128
	199,58	4,723	4,836	0,739	0,815	0,567	0,424	0,076	0,136
	250,44	5,429	5,488	0,860	0,951	0,629	0,474	0,084	0,144
A2	299,89	6,046	6,136	0,974	1,086	0,700	0,523	0,094	0,150
A3	450,25	7,741	7,812	1,275	1,410	0,879	0,639	0,119	0,176
A3	599,31	9,175	9,376	1,533	1,712	1,037	0,747	0,143	0,196

BTALU-liitoksen kannattimien väliin jäänyt ilmatila heikensi ilmanpitävyyden luokitusarvoa. Liitoksessa olisi tullut käyttää kiinnittimien välissä tiivistettä tiiviimmän rakenteen saavuttamiseksi.

Kuvissa 15 ja 16 on esitettyä ilmanpitävyys sauman pituuden suhteen eri liitoksilla ja paineistus suunnan mukaan. Raja-arvo on merkitty punaisella vaakaviivalla (0,5 m³/m³*h).



Kuva 15. Ilmanpitävyys sisältä ulos (m³/m³*h), huomioiden rakenteen saumanpituus (Saarela 2017)



Kuva 16. Ilmanpitävyys ulkoa sisälle ($\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{h}$), huomioiden rakenteen saumanpituus (Saarela 2017)

Testiliitosten vedenpitävyyden luokittelu tehtiin standardin SFS-EN 12154 (CURTAIN WALLING. WATERTIGHTNESS. PERFORMANCE REQUIREMENTS AND CLASSIFICATION) mukaisesti. Standardin mukainen luokittelu on esitetty alla olevassa taulukossa 3 ja taulukossa 4 on esitettyä testikappaleiden saavuttamat vedenpitävyyden luokitusarvot.

Taulukko 3. Vedenpitävyyden luokitteluarvot (SFS-EN 12154 2001)

Maksimi testipaine P_{max} Pa	Luokitus
150	R4
300	R5
450	R6
600	R7
Yli 600	RE XXX

Taulukko 4. Testikappaleiden vedenpitävyyden luokittelu (SFS-EN 12154 2001)

Liitos	Vedenläpäisyypaine (Pa)	Luokituspaine (Pa)	Luokka
BTALU	300 Pa	300 Pa	R5
ETB	450	450 Pa	R6
Puukiilaliitos	1200 Pa	1050 Pa	E1050
Puukiilaliitos tiivisteellä	750 Pa	600 Pa	R7

Huomionarvoista testissä on, että tiivistetty puinen kiilaliitos sai heikomman vedenpitävyyden luokitusarvon kuin puinen kiilaliitos ilman tiivistettä. Nopean kokeilun tuloksena yritys lähti jatkokokehttämään kiilaliitosta omassa tuotteessaan.

4. PALOSUOJAUS

4.1 Tausta ja tavoite

Puurakentamiseen ja sen edistämiseen liittyvät vahvasti rakennuksille ja rakenteille asetetut palomääräykset. Vuoden 2018 alussa Rakentamismääräyskokoelma E1 uudistui ja puumateriaalien palosuojausvaatimuksille tuli tässä yhteydessä joitakin helpotuksia. Puurakenteiden, kuten CLT-levyjen ja liimapuiden, palokäyttäytymisestä on jo aikaisemmin tehty sekä kotimaassa että ulkomailla runsaasti tutkimustyötä. Centria tutkimus ja kehityksen Tehokas Puuteollisuus-hankkeessa on tehty julkaisu ”Kantavien rakenteiden palosuojaus”. Tässä julkaisussa koottu yhteenvetomainen tiivistelmä toimi pilotin lähtökohtana.

Tämän pilotin tarkoitus oli selvittää markkinoilta saatavilla olevilla palosuoja-aineilla suojakäsiteltyjen puumateriaalien taivutuslujuuden muutokset. Näiden testien lisäksi teetettiin kartiokalorimetrikoe, jolla saatiin pienellä näytemäärällä käsitys materiaalin käyttäytymisestä palotilanteessa. Kartiokalorimetrikoea käytetään yleisesti tutkimuksen ja tuotekehityksen tukena juuri edellä mainitusta syystä.

Saatujen tulosten on tarkoitus toimia pohjana mahdollisille jatkotutkimuksille, joissa selvitetään mahdollisuutta pienentää kantavien liimapuiden ja CLT-rakenteiden poikkileikkausta ja dimensioita paremman palonkestävyyden ansiosta. Tällainen systemaattisen tuotekehityksen projekti on järkevää tehdä, jos tutkimuksen tulokset ovat riittävän lupaavia jatkoa ajatellen. Poikkileikkausten pienentäminen tuo säästöjä materiaali- ja logistiikkakustannuksissa, mikä puolestaan antaa puulle kilpailuetua muita materiaaleja kohtaan. Tämän pilotin yhteydessä jatkotutkimuksia ei kuitenkaan tehty, mutta saadut tulokset ovat vapaasti käytettävissä ja hyödynnettävissä.

4.2 Testaus

4.2.1. Testatut palosuoja-aineet

Testausta varten markkinoilta etsittiin useita puun palosuojaukseen tarkoitettujen aineiden valmistajia ja toimittajia. Osa valmisteista jouduttiin hylkäämään soveltumattomina, koska ne olivat tarkoitettuja painekyllästykseen, jota ei ollut tässä yhteydessä mahdollista tehdä. Lopulta päädyttiin valitsemaan neljä ainetta, joista osa oli tarkoitettu pelkästään sisä- ja osa myös ulkokäyttöön. Tästä syystä koekappaleita ei altistettu säärasitukselle. Testattavista kaksi oli pelkästään teollisuuskäyttöön ja toiset kaksi sekä kotiin että teollisuuteen. Valmisteiden keskeisimmät ominaisuudet on kerrottu taulukossa 5, mutta tarkemmat ominaisuudet ja käyttöohjeet löytyvät valmistajien internetsivustoilta.

Taulukko 5. Testeihin valitut palosuoja-aineet (HR PROF Oy 2019; Nordtreat AS 2018; Renotech Oy 2018; Teknos Oy 2018)

Valmistaja/toimittaja	Tuotenimi	Palosuojaluokitus	Käyttökohde	Levitysmäärä (g/m ²)
Teknos Oy	Teknosafe 2457-00	B-s1,do	sisä, teollisuuskäyttö	250
HR PROF Oy	HR-Prof	B-s1,do	sisä/ulko, teollisuus- ja kotikäyttö	300
Nordtreat AS	NT Deco kirkas	B-s1,do	sisä/ulko, teollisuuskäyttö	300-350
Renotech Oy	MP FR ULTRA kirkas	B-s1,do	sisä, teollisuus- ja kotikäyttö	300-350

Osa käytetyistä palosuoja-aineista olivat värittömiä ja osa aiheutti kappaleeseen värimuutoksia. Joillakin tuoteselosteen mukaan värittömilläkin aineilla värimuutoksia oli havaittavissa, mikä täytyy ottaa huomioon käyttökohteen ja aineen valinnassa (kuva 17). Kaikki valmisteet ovat kuitenkin joko säilytettävissä tai päälle maalattavissa.

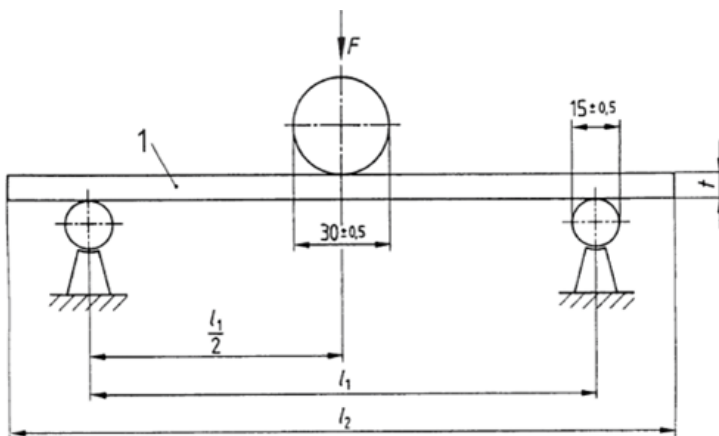


Kuva 17. Aineiden aiheuttamat värimuutokset. Vasemmalta oikealle: Teknosafe, HR Prof, NT Deco, MP FR Ultra ja käsittelemätön puu. (Myllyniemi 2018)

4.3. Tehdyt testit

4.3.1. Taivutuslujuustestin kuvaus

Taivutuslujuustesti tehtiin kolmipistetaivutuksena standardin SFS-EN 310:1993 mukaisesti ja näytteenotossa noudatettiin soveltuvin osin standardia SFS-EN 326. Testilaitteisto on periaatteiltaan kuvan 18 mukainen. Taivutuskokeessa kappaletta rasitetaan voimalla F , jota kasvatetaan hitaasti, kunnes testattava kappale murtuu. Murtumiseen tarvittu voiman avulla saadaan laskettua taivutuslujuus N/mm^2 .



Kuva 18. Kolmipistetaivutuksen periaate (SFS-EN 310 2001)

Taivutuslujuus laskettiin alla olevalla standardissa ilmoitetulla kaavalla:

$$f_m = \frac{3 F_{\max} l_1}{2 b t^2}$$

jossa: F_{\max} = murtumiseen tarvittu kuorma (N)
 l_1 = taivutuksen jänneväli $20 \times t$ (mm)
 b = kappaleen leveys (mm)
 t = kappaleen paksuus (mm)
 $l_2 = l_1 + 50$ mm

Testeissä käytetyn testikappaleen paksuus oli 20 mm, joten jänneväliksi määräytyi 400 mm ja kappaleen kokonaispituudeksi näin 450 mm, leveys oli 69 mm. Testikappaleet katkottiin oikeaan pituuteen 20 mm x 69 mm höylätystä kuusitavarasta, jonka jälkeen ne sekoitettiin ja sattumanvaraisesti jaettiin viiteen eri kasaan. Tiheys määritettiin punnitsemalla ja mittaamalla työntömitalla kappaleiden paksuus ja leveys molemmista päistä ja keskeltä. Tilavuuden laskennassa käytettiin mittoina mittaustulosten kappalekohtaisia keskiarvoja.

Jokaisella palosuoja-aineella käsiteltiin kuusi kappaletta noudattaen kyseisen aineen käyttöohjetta ja kuusi jätettiin käsittelemättä referenssikappaleiksi. Levitys tehtiin käsiruiskulla ja levitysmäärä pyrittiin punnitsemalla saamaan tarkkuuteen $\pm 5\%$ valmistajan suosittelimesta määrästä. Ruiskutuskertoja tehtiin tarpeen mukaan, jotta saatiin riittävä levitys neliometriä kohden. Valmistajan antamassa käyttöohjeessa mainittua levityskertojen määrää ei kuitenkaan ylitetty. Tästä johtuen joillakin tuotteilla suositeltuun levitysmäärään ei tarkalleen päästy, koska yksittäisellä ruiskutuskerralla levitetty laskennallisesti oikeansuuruinen määrä aiheutti jo aineen valumista ja tippumista.

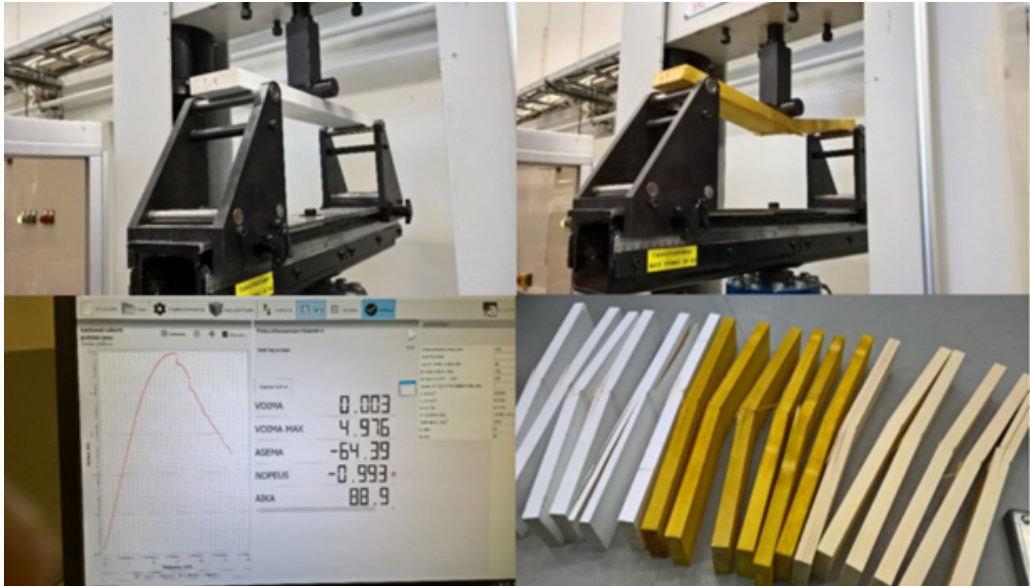
Ruiskutuksen jälkeen kappaleet jätettiin tasaantumaan huonetilaan, jossa olosuhdevaatimuksina oli suhteelliselle kosteudelle $65 \pm 5\%$ ja lämpötilalle 20 ± 2 °C (kuva 19). Kappaleet punnittiin noin 24 tunnin välein ja laskettiin mittauskertojen välillä tapahtunut massan muuttuminen. Standardin mukaan tasaantuminen katsotaan tapahtuneeksi, kun punnitusten välillä massan muutos on pienempi kuin $\pm 0,1\%$.



Kuva 19. Taivutustestikappaleita tasaantumassa pintakäsittelyn jälkeen (Myllyniemi 2018)

Seuraavaksi kappaleille tehtiin kolmipistetaivutus ja laskettiin taivutuslujuus noudattaen standardin vaatimuksia. Oikean jännevälin säätämisen lisäksi oli huomioitava koetilanteessa, että suositeltava aika kuormitukselle on 60 ± 30 s, jonka aikana murtumisen tulisi tapahtua. Taivutuskokeita tehtäessä koneen arvot, lähinnä taivutusnopeus, säädettiin siten, että varsinainen murtuminen tapahtui noin minuutin kohdalla, ja koe päättyi, kun voima oli pudonnut 50 %:en maksimista. Jokaisen taivutuksen jälkeen testiohjelma näytti maksimivoiman ja taipuman mur-

tumishetkellä, jotka kirjattiin ylös. Testisarjan tulokset myös tallentuivat tietokoneen muistiin. Taivutuskokeen vaiheita on esitettyä kuvassa 20.



Kuva 20. Taivutuslujuuden mittaamisen vaiheita (Myllyniemi 2018)

4.3.2. Kartiokalorimetrikokeen kuvaus

Kartiokalorimetrikokeella tutkitaan pienellä näytemäärällä tuotteen erilaisia palo-ominaisuuksia. Menetelmässä koekappale altistetaan lämpösäteilylle ja kipinäsytytykselle. Kokeessa mitataan tuotteen syttymisaikaa, lämmönvapautumisnopeutta, savuntuoton vapautumisnopeutta, kokonaislämmöntuottoa, savuntuottoa ja massahäviötä. Testattavat kappaleet ovat mitoiltaan 100 x 100 mm ja paksuudeltaan maksimissaan 50 mm. Noudatettava standardi on ISO 5660. (VTT 2018.)

Testikappaleet valmistettiin 20 mm paksusta mäntylaudasta ja ruiskutettiin käsiruiskulla suoja-aineilla jokaiselta sivultaan aineitoimittajien ohjeiden mukaan ja annettiin kuivua (kuva 21). Testausta varten jokaisella valmisteella käsiteltiin kolme kappaletta ja kolme jätettiin puupinnalle referenssiä varten. Levitysmäärissä noudatettiin $\pm 5\%$ tarkkuutta verrattuna käyttöohjeen suosituksiin. Tarvittavan levitysmäärän saamiseksi ilmeni samanlaisia haasteita kuin taivutus-kappaleidenkin osalta. Varsinaisen kartiokalorimetrikokeen teki Savonia-ammattikorkeakoulu Kuopiossa, jonne pintakäsitellyt kappaleet lähetettiin.



Kuva 21. Kartiokalorimetrikoe-kappaleiden pintakäsittelyä (Myllyniemi 2018)

4.4. Tulokset

4.4.1. Taivutuslujuustestien tulokset

Taivutuslujuustestien tulokset koottiin aine- ja kappalekohtaisesti taulukkoon (taulukot 6–11). Testauslaitteen ohjelmisto piirsi myös taipuma-voima-kuvaajan, jotka näkyvät kuvissa 22–26. Taivutuslujuuksissa ei havaittu suuria poikkeamia palonsooja-aineiden välillä, ainoastaan HR Prof-aineen arvojen olivat keskimäärin noin 10 % huonompia kuin muilla. Eroavaisuudella ei välttämättä ole merkitystä käytännön laskennassa, sillä lujuuslaskennassa käytössä olevat varmuuskertoimet tuovat rakenteille todennäköisesti riittävän varmuuden kuormitusta vastaan. Tässä kokeessa otoskoko oli verrattain pieni, joten lisätestien ja suurempien testisarjojen avulla voisi jatkossa tutkia tulosten eroavaisuutta tarkemmin. Tilastollisestikin tarkasteltuna ero osoittautui melko merkitseväksi, mikä tarkoittaa sitä, että ero ei välttämättä ole pelkkää sattumaa, vaan se on oikeasti olemassa. Tästäkin syystä jatkotestit suuremmilla sarjoilla olisivat tarpeellisia.

Tiheyden ja taivutuslujuuden välistä korrelaatiota tutkittiin matemaattisin menetelmin. Kaikilla testikappaleilla korrelaatiokertoimeksi R saatiin 0,49 ja selityskertoimeksi R^2 0,24 (kuva 27). Korrelaatiokerroin voi vaihdella -1 ja 1 välillä. Vaihteluvälin ääripäissä korrelaatio on täydellinen (positiivinen tai negatiivinen) ja 0 tarkoittaa, että riippuvuutta ei ole lainkaan. Käytännössä korrelaatio tarkoittaa sitä, kuinka tarkasti y -akselin arvo voidaan ennustaa, kun tiedetään x -akselin arvo. Tässä saatu arvo 0,49 tarkoittaa kohtalaista taivutuslujuuden riippuvuutta tiheydestä. Puun lujuuteen vaikuttaa luonnollisesti muitakin tekijöitä kuin tiheys, esimerkiksi oksat ja syy rakenne, joten osittainen riippuvuus on hyvin ymmärrettävissä. Selityskertoimeksi saatu arvo 0,24 merkitsee sitä, että 24 % taivutuslujuuden vaihtelusta voidaan selittää puumateriaalin tiheyden vaihtelulla. Pelkkien käsittelemättömien kappaleiden korrelaatiokertoimeksi saatiin 0,85, joka on jo vahva korrelaatio ja käsiteltyjen kappaleiden kertoimeksi saatiin 0,46. Tulosten valossa näyttää selvästi siltä, että palonsooja-aineilla käsitellyn puun tiheyden ja taivutuslujuuden välinen korrelaatio heikkenee voimakkaasti, vaikka lujuus itsessään ei heikkenekään. Lisäksi on huomattava, että käsittelemättömän puun tulosten keskiahjonta on pienin.

Johtuen HR Profin heikommista tuloksista teimme kyseisellä aineella lisätestejä. Puutavarainpusta valittiin sattumanvaraisesti neljä lisäkappaletta, jotka käsiteltiin palonsooja-aineella. Tasaannutus tehtiin samalla tavalla kuin aikaisemmassakin testissä. Tämän jälkeen testikappaleille tehtiin kolmipistetaivutus samoilla koneen säätöarvoilla kuin aikaisemminkin. Tulokset on koottu taulukkoon 11. Tälläkin kertaa taivutuslujuus jäi heikommaksi kuin muilla valmisteilla, tällä kertaa vielä selvemmin kuin ensimmäisellä kerralla. Tulos oli noin 20 % huonompi verrattuna muihin, joten ero on jo huomattava. Lisätettiin otettujen kappaleiden tiheys oli pienempi kuin ensimmäisen testijakson kappaleilla keskimäärin. Tiheyden muutos johtuu todennäköisesti puun kuivumisesta testijaksojen välillä, mikä ei aiheuta tai muutenkaan selitä taivutuslujuuden heikkenemistä. Silmä määräisesti tarkasteltuna vuosirenkaiden väliä ja syy rakenne eivät näyttäneet harvemmalta kuin ensimmäisissä testikappaleissa, joten tiheyden ja taivutuslujuuden pienenemistä ei näillä syillä voi suoraan selittää. Tulosten perusteella näyttää selvästi siltä, että HR Prof -valmiste heikentää puun taivutuslujuutta jossain määrin. Eron merkittävyyttä käytännön lujuuslaskennan kannalta on tässä yhteydessä vaikea arvioida.

Taulukko 6. Teknosken taivutustestitulokset (Myllyniemi 2018)

Teknos kpl nro	tiheys (kg/m ³)	taipuma maks. voimalla (mm)	tarvittu voima (N)	taivutuslujuus (N/mm ²)
1.1	470	15,9	4742	103,1
1.2	472	14,9	4853	105,5
1.3	456	15,3	4870	105,9
1.4	492	17,6	5224	113,6
1.5	499	15,0	4806	104,5
1.6	488	10,5	4384	95,3
ka	480		ka	104,6
keskihaj	16		keskihaj	5,9

Taulukko 7. HR Profin taivutustestitulokset (Myllyniemi 2018)

HR Prof kpl nro	tiheys (kg/m ³)	taipuma maks. voimalla (mm)	tarvittu voima (N)	taivutuslujuus (N/mm ²)
2.1	516	14,3	4050	88,0
2.2	481	14,4	4485	97,5
2.3	440	16,8	3816	83,0
2.4	430	15,4	4327	94,1
2.5	474	16,6	4188	91,0
2.6	455	14,5	4804	104,4
ka	466		ka	93,0
keskihaj	31		keskihaj	7,5

Taulukko 8. NT Decon taivutustestitulokset (Myllyniemi 2018)

NT Deco kpl nro	tiheys (kg/m ³)	taipuma maks. voimalla (mm)	tarvittu voima (N)	taivutuslujuus (N/mm ²)
3.1	469	14,6	4829	105,0
3.2	487	13,3	4562	99,2
3.3	495	16,1	5090	110,7
3.4	423	16,1	4620	100,4
3.5	469	15,3	4999	108,7
3.6	508	15,7	4646	101,0
ka	475		ka	104,2
keskihaj	30		keskihaj	4,73

Taulukko 9. MP FR:n taivutustestitulokset (Myllyniemi 2018)

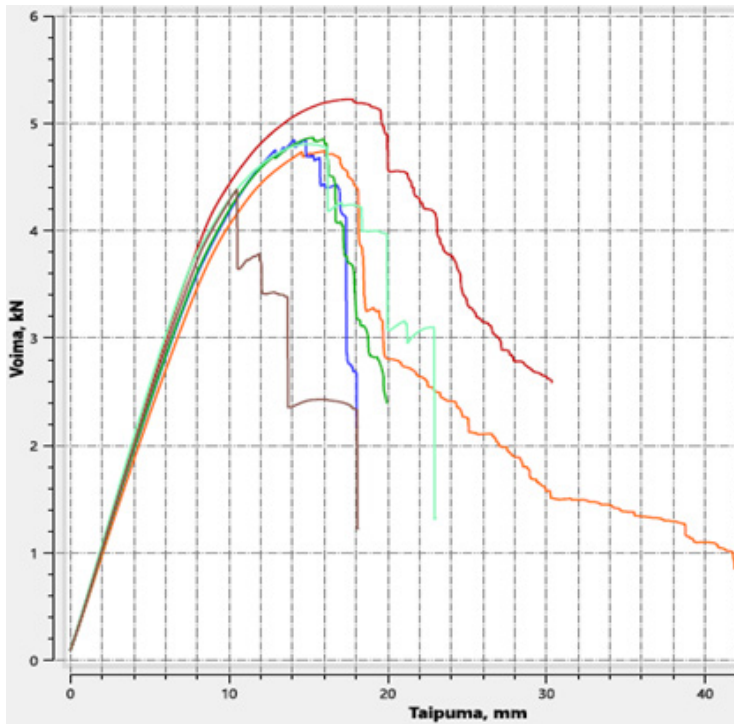
MP FR kpl nro	tiheys (kg/m ³)	taipuma maks. voimalla (mm)	tarvittu voima (N)	taivutuslujuus (N/mm ²)
4.1	500	14,0	5064	110,1
4.2	477	15,9	5020	109,1
4.3	502	15,2	5311	115,5
4.4	428	11,9	4091	88,9
4.5	506	16,5	5346	116,2
4.6	445	12,2	3982	86,6
ka	476		ka	104,4
keskihaj	33		keskihaj	13,22

Taulukko 10. Käsittelemättömän puun taivutustestitulokset (Myllyniemi 2018)

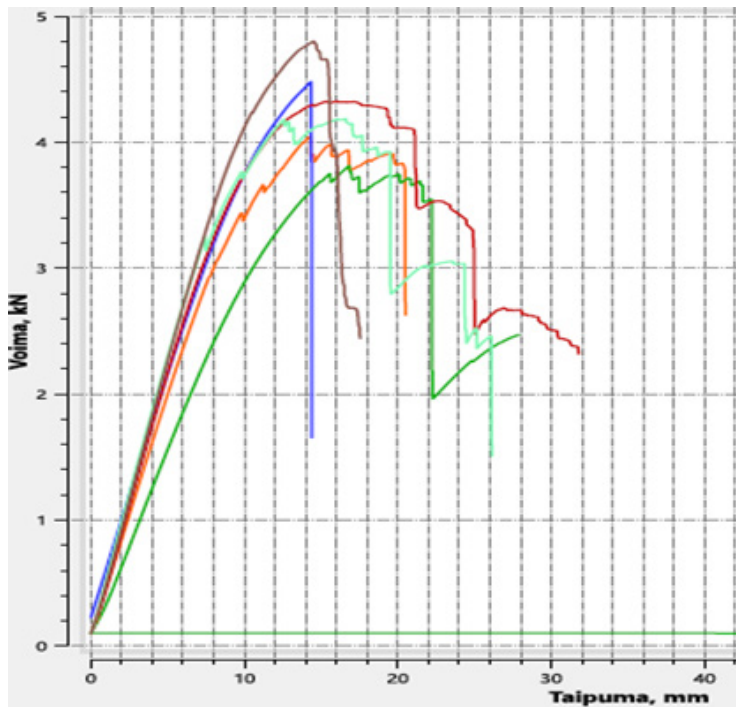
Käsittel. kpl nro	tiheys (kg/m ³)	taipuma maks. voimalla (mm)	tarvittu voima (N)	taivutuslujuus (N/mm ²)
5.1	491	16,5	4609	100,2
5.2	451	17,0	4496	97,7
5.3	436	14,3	4403	95,7
5.4	502	14,7	4976	108,2
5.5	477	15,6	4824	104,9
5.6	481	16,6	4717	102,5
ka	473		ka	101,5
keskihaj	25		keskihaj	4,61

Taulukko 11. HR Profin lisätestien tulokset (Myllyniemi 2018)

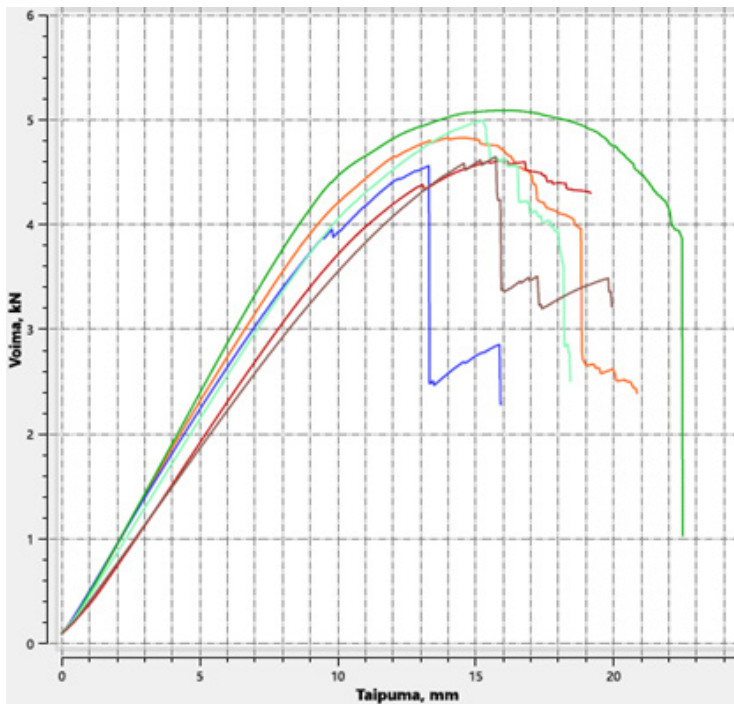
HR Prof lisätesti	tiheys (kg/m ³)	taipuma maks. voimalla (mm)	tarvittu voima (N)	taivutuslujuus (N/mm ²)
6.1	455	13,1	3565	77,5
6.2	431	10,0	3474	75,5
6.3	453	12,9	4150	90,2
6.4	444	19,8	4044	87,9
ka	446		ka	82,8
keskihaj	11		keskihaj	7,35



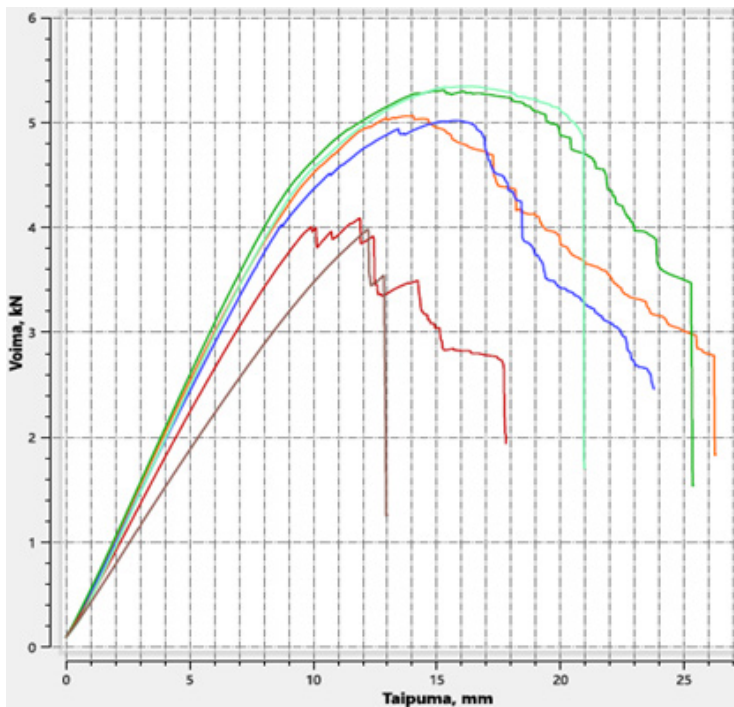
Kuva 22. Teknosafen voima/taipuma -kuvaaja (Myllyniemi 2018)



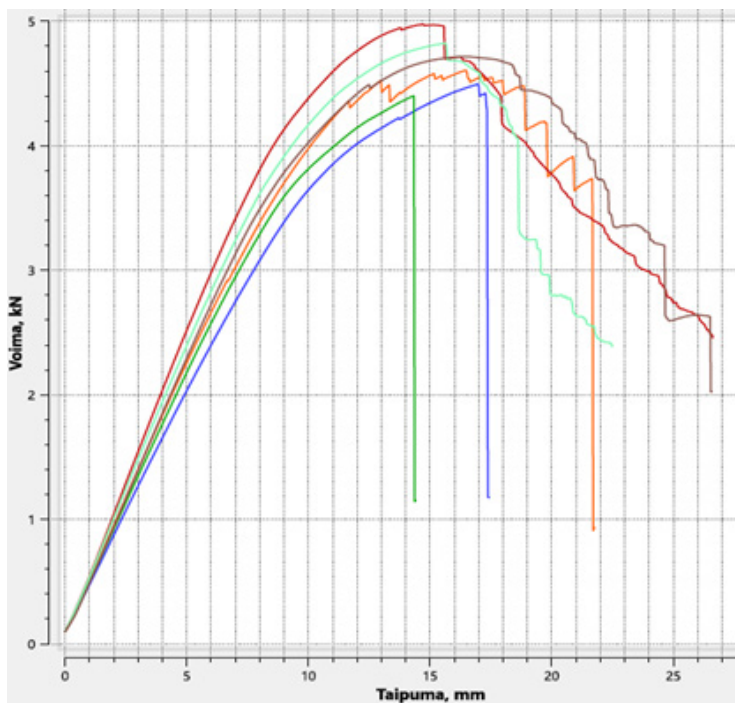
Kuva 23. HR Profin voima/taipuma -kuvaaja (Myllyniemi 2018)



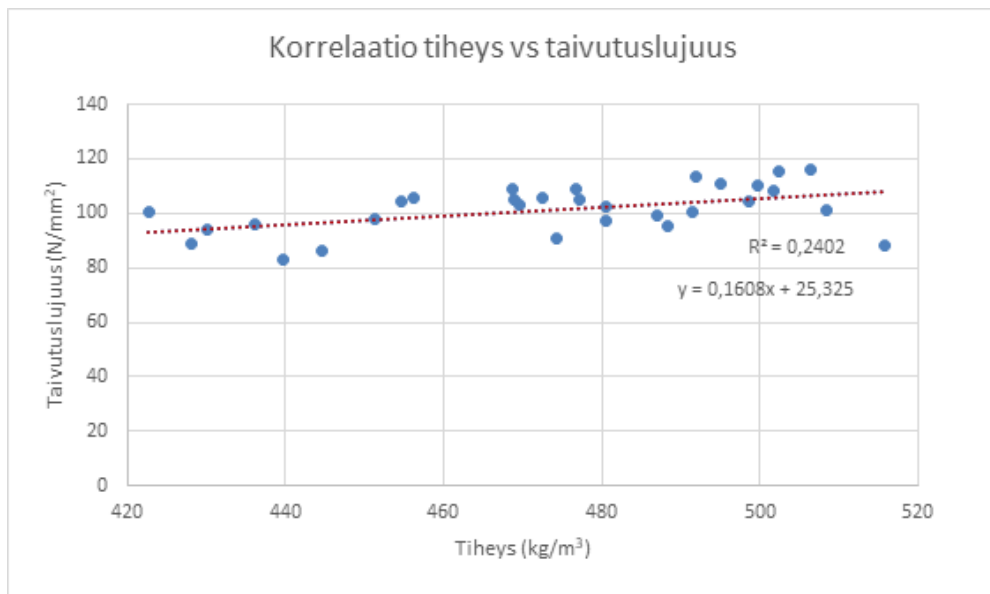
Kuva 24. NT Decon voima/taipuma -kuvaaja (Myllyniemi 2018)



Kuva 25. MP FR:n voima/taipuma -kuvaaja (Myllyniemi 2018)



Kuva 26. Käsittelemättömän puun voima/taipuma -kuvaaja (Myllyniemi 2018)



Kuva 27. Taivutuslujuuden riippuvuus tiheydestä (Myllyniemi 2018)

Saatuisten tulosten perusteella palosuoja-aineet eivät yleisesti heikennä puun lujuusominaisuuksia. Ainakin VTT on aiemmin tutkinut joidenkin palosuoja-aineiden vaikutusta puun taivutuslujuuteen. Näiden tutkimusten yhteenvedossa on todettu, että tutkitut palosuoja-aineet eivät aiheuta pitkäaikaiseen lämpörasitukseenkaan yhdistettynä niin merkittäviä muutoksia

sahatavaran taivutuslujuuteen ja kimmomoduuliin, että niitä tulisi ottaa suunnittelussa erikseen huomioon (VTT 2010). VTT:n tekemässä vertailussa oli käytössä eri valmisteet kuin tämän tutkimuksen yhteydessä testatut, joten tuloksia ei voi suoraan verrata toisiinsa.

Taivutuslujuustestin tulokset eivät olleet kaikilta osin täysin loogisia. Esimerkiksi tiheyden ja taivutuslujuuden välisen korrelaation heikkeneminen käsitellyillä kappaleilla on vaikeasti selitettävissä. Käsittelemättömillä kappaleilla korrelaatio oli selvä ja tulosten keskihajonta pienin, joten voisi ajatella ilmiön liittyvän jollakin tavalla palosuoja-aineiden vaikutukseen puumateriaalissa. Lisävarmuuden saamiseksi ja palosuoja-aineiden välisien erojen vahvistamiseksi olisi aiheellista tehdä vastaavanlaiset testit huomattavasti suuremmilla testisarjoilla, jolloin mahdollisuudet sattuman vaikutukseen minimoituisivat.

4.4.2. Kartiokalorimetrikokeen tulokset

Kartiokalorimetrikokeet teki Savonia ammattikorkeakoulun materiaalitestauksen asiantuntijapalvelut. Taulukossa 12 on esitelty koekappaleiden käsittelyt ja tunnuksat. Tulokset on koottu ainekohtaisesti taulukkoihin 13–17. Taulukoissa esitetään mitattavan tuotteen syttymisaika, lämmönvapautumisnopeus, savuntuoton vapautumisnopeus, kokonaislämmöntuotto, savuntuotto ja massahäviö.

Taulukko 12. Koekappaleiden käsittelyt ja sarjojen tunnuksat (Myllyniemi 2018)

Käsittely	Tunnus
Teknos 2457-00	1.1...1.3
HR Prof	2.1...2.3
NT Deco	3.1...3.3
MP FR Ultra	4.1...4.3
Käsittelemätön	5.1...5.3

Taulukko 13. Teknoksen kartiokalorimetrikokeen tulokset (Savonia 2018)

Späcimen no	1	10	11
Näytteen mitti Inclination level from core	1.1	1.2	1.3
Späcimen orientat-ion Späcimen orientat-ion	90°	90°	90°
Späcimen surface area Späcimen surface area	0.01	0.01	0.01
Späcimen mass C - value	126.21	133.28	132.26
	0.04	0.04	0.04
Time to extinction (SOB) (Time at termination of tests -)	367.00	319.00	352.00
Duration of test Mass remaining after test	6:06.00	6:02.00	1:03.00
	107.49	113.64	44.28
Total mass loss (g)	16.71	21.64	88.54
Mass loss per square meter Mass loss rate per square meter	0/m ²	2070.00	2291.00
	4.63	4.08	5.26
Total heat released Maximum heat release rate	191.23	27.35	145.26
	147/m ²	17.41	143.11
A.v. heat release rate 60 s after ignition A.v. heat release rate 300 s after ignition	147/m ²	34.33	6.33
	32.33	14.33	33.64
A.v. heat release rate 300 s after ignition Total heat released 300 s after ignition	147/m ²	3.07	27.35
	3.07	7.35	2.21
Max heat release rate, 30s sliding average Efficiency met heat of combustion	147/m ²	33.04	27.35
	19.81	11.92	14.85
Total smoke production Average smoke production	m ²	0.99	2.34
	0.0268	0.0268	0.0268
Average specific smoke production Total CO ₂ production	m ² /kg	52.86	113.14
	0.02	0.03	0.03
Total CO ₂ produced per mass unit burnt	kg	0.51	0.75

Taulukko 14. HR Profin kartiokalorimetrikokeen tulokset (Savonia 2018)

Späcimen no	1	10	11
Näytteen mitti Inclination level from core	2.1	2.2	2.3
Späcimen orientat-ion Späcimen orientat-ion	90°	90°	90°
Späcimen surface area Späcimen mass	0.01	0.01	0.01
	138.31	117.00	125.53
C - value	0.04	0.04	0.04
Time to extinction (SOB) (Time at termination of tests -)	33.33	32.00	32.33
Duration of test Mass remaining after test	6:01.00	6:46.00	1:03.00
	72.54	69.23	31.28
Total mass loss (g)	45.74	47.80	106.25
Mass loss per square meter Mass loss rate per square meter	0/m ²	5030.00	5300.00
	8.61	8.40	6.31
Total heat released Maximum heat release rate	147/m ²	70.41	71.60
	176.71	159.19	150.11
A.v. heat release rate 60 s after ignition A.v. heat release rate 300 s after ignition	147/m ²	154.31	143.50
	143.61	136.50	152.51
A.v. heat release rate 300 s after ignition Total heat released 300 s after ignition	147/m ²	133.41	126.70
	133.41	126.70	124.91
Total heat released 300 s after ignition Max heat release rate, 30s sliding average	147/m ²	36.61	36.61
	20.41	21.64	19.81
Efficiency met heat of combustion Total smoke production	147/m ²	13.51	13.51
	3.21	2.87	14.41
Average smoke production	0.0268	0.0268	0.0268
Average specific smoke production Total CO ₂ production	m ² /kg	71.74	59.94
	0.03	0.03	0.03
Total CO ₂ produced per mass unit burnt	kg	0.04	0.04

Taulukko 15. NT Decon kartio-
kalorimetrikokeen tulokset (Savonia 2018)

Specimen no		4	3	2
Näytteen nimi		3.1	3.2	3.3
Irradiance level from cone	kW/m ²	50	50	50
Specimen orientation	H/V	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Specimen surface area	m ²	0.05	0.05	0.05
Specimen mass	g	124.23	131.79	118.59
C - value		0.04	0.04	0.04
Time to ignition	s	25.02	14.21	25.44
Time to extinction (Still flames at termination of tests -)	s			
Duration of test	s	602.00	605.00	207.00
Mass remaining after test	g	75.22	85.85	82.97
Total mass loss (g)	g	45.02	45.94	50.62
Mass loss per square meter	g/m ²	4190.00	5093.00	960.00
Mass loss rate per square meter	g/m ² s	8.60	8.50	8.20
Total heat released	MJ/m ²	70.10	76.60	77.90
Maximum heat release rate	kW/m ²	236.60	285.35	174.50
A.v. heat release rate 60s after ignition	kW/m ²	199.80	175.60	140.40
A.v. heat release rate 180s after ignition	kW/m ²	142.30	153.10	128.60
A.v. heat release rate 300s after ignition	kW/m ²	133.30	140.50	121.10
Total heat released 300s after ignition	MJ/m ²	37.75	40.58	34.31
Max heat release rate, 30s sliding average	kW/m ²	75.00	76.58	77.50
Effective net heat of combustion	MJ/kg	34.06	25.04	33.80
Total smoke production	m ²	4.17	6.16	3.34
Average smoke production	m ² /s	0.0064	0.0103	0.0149
Average specific smoke production	m ² /kg	92.66	134.17	65.51
Total CO-production	g	0.05	0.05	0.05
Total CO ₂ produced per mass unit burnt	g/g	0.95	0.98	0.91

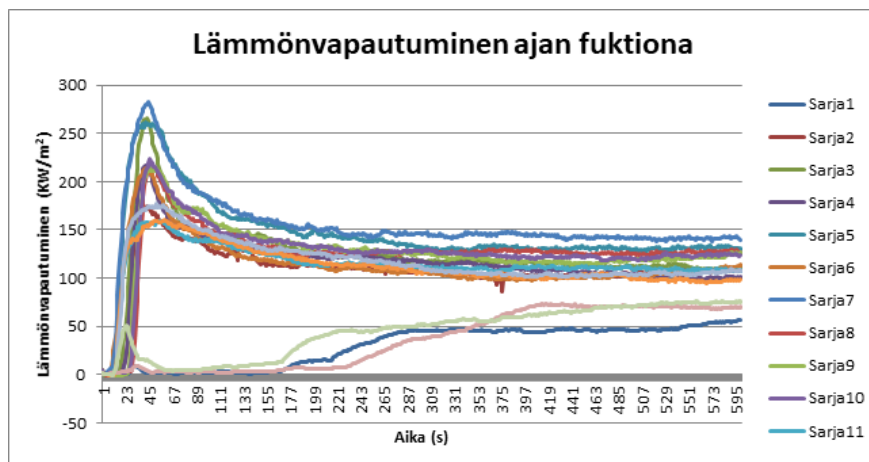
Taulukko 16. MP FR Ultran kartio-
kalorimetrikokeen tulokset (Savonia 2018)

Specimen no		7	6	5
Näytteen nimi		4.1	4.2	4.3
Irradiance level from cone	kW/m ²	50	50	50
Specimen orientation	H/V	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Specimen surface area	m ²	0.05	0.05	0.05
Specimen mass	g	141.97	119.63	145.42
C - value		0.04	0.04	0.04
Time to ignition	s	5.00	7.26	11.22
Time to extinction (Still flames at termination of tests -)	s			
Duration of test	s	602.00	603.00	603.00
Mass remaining after test	g	93.22	76.06	94.60
Total mass loss (g)	g	48.75	43.57	46.72
Mass loss per square meter	g/m ²	5400.00	4830.00	5180.00
Mass loss rate per square meter	g/m ² s	9.10	8.10	8.80
Total heat released	MJ/m ²	93.20	68.50	88.00
Maximum heat release rate	kW/m ²	281.90	213.00	263.60
A.v. heat release rate 60s after ignition	kW/m ²	219.90	157.60	216.00
A.v. heat release rate 180s after ignition	kW/m ²	187.40	138.10	183.30
A.v. heat release rate 300s after ignition	kW/m ²	171.30	126.50	165.60
Total heat released 300s after ignition	MJ/m ²	51.05	37.17	48.33
Max heat release rate, 30s sliding average	kW/m ²	93.20	68.45	88.00
Effective net heat of combustion	MJ/kg	17.26	14.18	17.00
Total smoke production	m ²	14.83	5.27	11.43
Average smoke production	m ² /s	0.0246	0.0087	0.0189
Average specific smoke production	m ² /kg	304.34	121.07	243.80
Total CO-production	g	0.05	0.05	0.05
Total CO ₂ produced per mass unit burnt	g/g	1.06	0.94	1.08

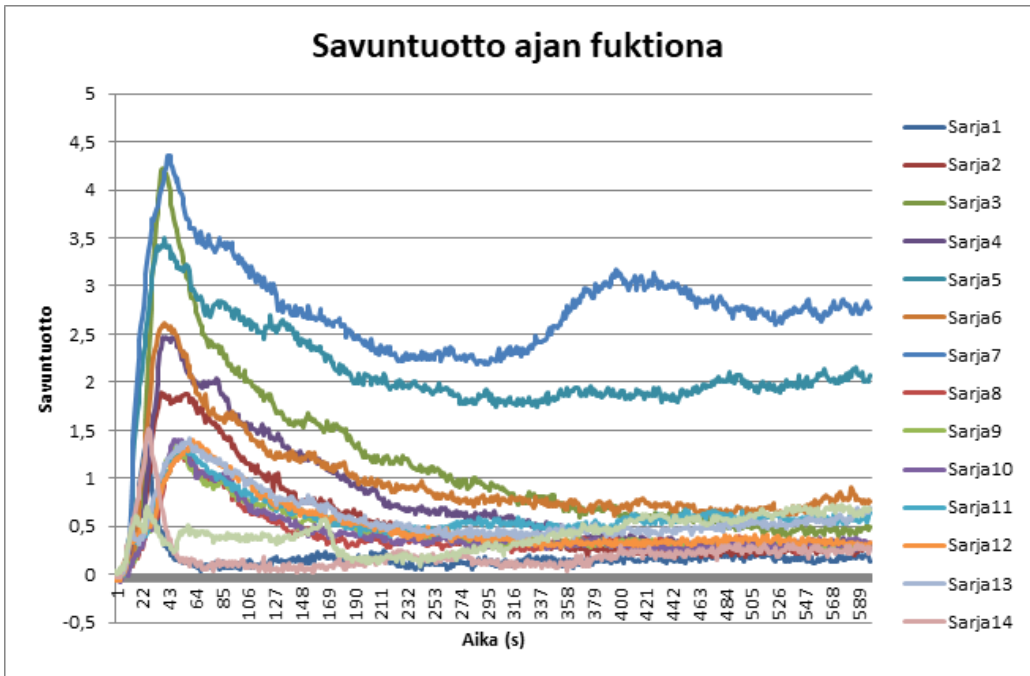
Taulukko 17. Käsittelemättömän puun
kartiokalorimetrikokeen tulokset (Savonia 2018)

Specimen no		10	8	9
Näytteen nimi		5.1	5.2	5.3
Irradiance level from cone	kW/m ²	50	50	50
Specimen orientation	H/V	Horizontal	Horizontal	Horizontal
Specimen surface area	m ²	0.05	0.05	0.05
Specimen mass	g	116.05	124.59	117.90
C - value		0.04	0.04	0.04
Time to ignition	s	24.35	26.25	24.86
Time to extinction (Still flames at termination of tests -)	s			
Duration of test	s	715.00	708.00	658.00
Mass remaining after test	g	57.87	71.30	38.10
Total mass loss (g)	g	58.28	53.49	99.72
Mass loss per square meter	g/m ²	6470.00	6930.00	1970.00
Mass loss rate per square meter	g/m ² s	9.10	8.20	7.20
Total heat released	MJ/m ²	94.90	90.50	190.00
Maximum heat release rate	kW/m ²	212.35	236.20	235.20
A.v. heat release rate 60s after ignition	kW/m ²	175.40	173.00	174.20
A.v. heat release rate 180s after ignition	kW/m ²	153.60	147.00	156.40
A.v. heat release rate 300s after ignition	kW/m ²	143.30	130.30	144.20
Total heat released 300s after ignition	MJ/m ²	39.80	38.34	40.24
Max heat release rate, 30s sliding average	kW/m ²	94.87	90.50	190.00
Effective net heat of combustion	MJ/kg	14.87	15.27	17.20
Total smoke production	m ²	2.84	2.65	7.70
Average smoke production	m ² /s	0.0039	0.0037	0.0117
Average specific smoke production	m ² /kg	46.82	40.52	77.23
Total CO-production	g	0.00	0.00	0.00
Total CO ₂ produced per mass unit burnt	g/g	0.97	1.00	1.00

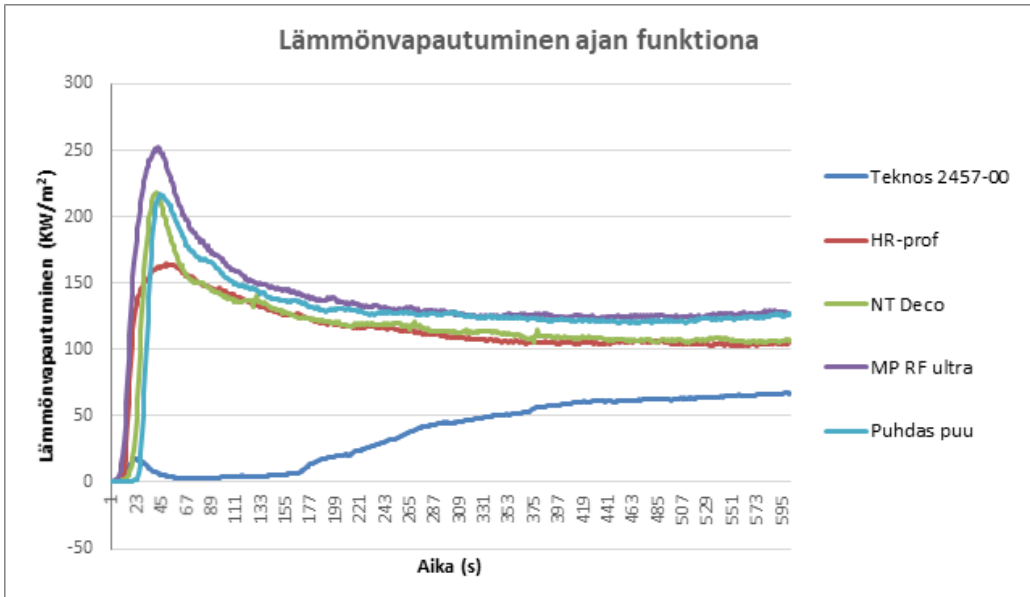
Kuvissa 28 ja 29 esitetään kappalekohtaiset kuvaajat ja kuvissa 30 ja 31 esitettävät kuvaajat ovat kolmen tuotekohtaisen näytteen keskiarvoja.



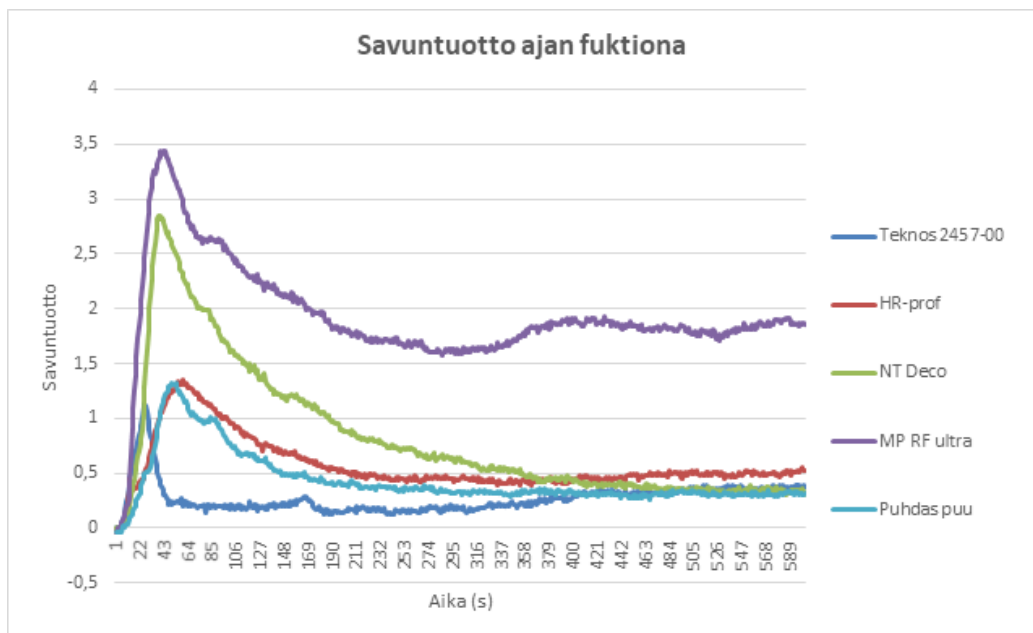
Kuva 28. Koekappaleiden lämmönvapautuminen kuvaajana (Mattila 2018)



Kuva 29. Koekappaleiden savuntuotto kuvaajana (Mattila 2018)



Kuva 30. Koekappaleiden ainekohtainen lämmönvapautuminen kolmen tuotekohtaisen näytteen keskiarvona (Mattila 2018)



Kuva 31. Koekappaleiden ainekohtainen savuntuotto kolmen tuotekohtaisen näytteen keskiarvona (Mattila 2018)

Pienin lämmönvapautuminen ja savuntuotto ajanfunktiona oli Teknos 2457-00 -tuotteella. Verrattaessa painonmuutos arvoa neliometriä kohti ($\text{g}/\text{m}^2\text{s}$) puhtaalla puulla ja parhaalla palonsooja-aineella, on se palonsooja-aineella 40 % pienempi. Tämä tukee näkemystä siitä, että vertailutesti suuremman mittakaavan dimensiolla kuormitettuna on kannattavaa tehdä. Tällöin pystytään luotettavasti toteamaan, onko mahdollista pienentää kantavien liimapuiden ja CLT-rakenteiden poikkileikkausta ja dimensioita paremman palonkestävyyden ansiosta.

5. VÄLIAIKAISET SILLAT

5.1 Tausta ja tavoite

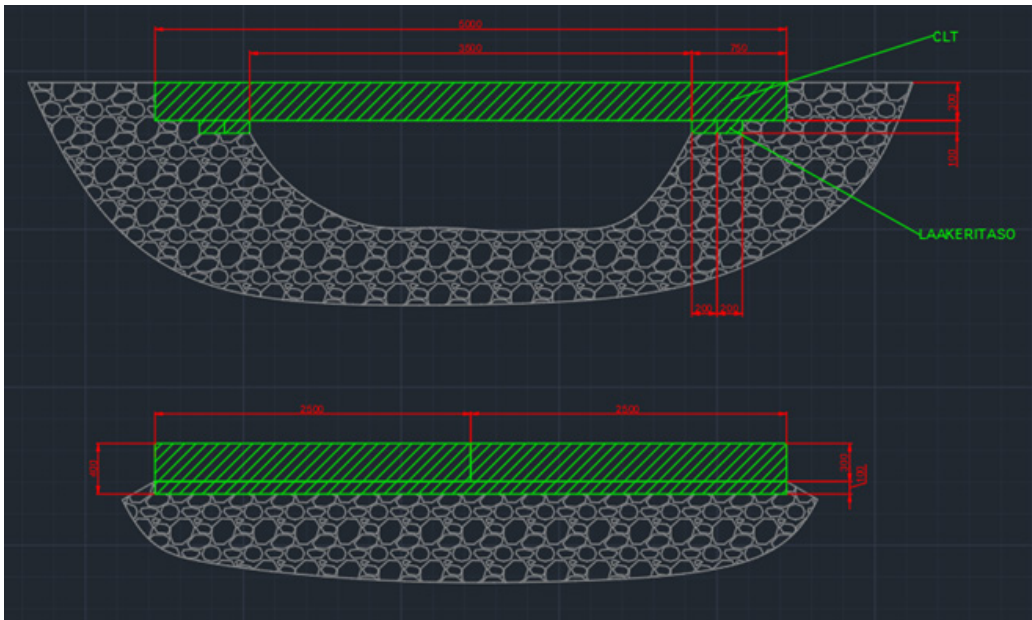
Testaustarve CLT:n käytöstä metsien talviteiden väliaikaisien siltojen materiaalina nousi esiin syksyllä 2017 Lapin liiton järjestämässä puurakentamisen teemaryhmän kokouksessa. Oletuksena oli, että CLT-levyistä valmistetut väliaikaissillat ovat keveitä ja helpposiirtoisia. Yleisesti väliaikaissiltoina käytetään mm. rumpuja, mutta puurakenteisten siirrettävien siltojen ympäristökuormituksen oletettiin olevan pienempi keveiden rakennustoimenpiteiden vuoksi.

Väliaikaissiltojen pituudet metsäteillä ovat 2–20 metriä. Kehityspilotissa tarkasteltavana oli 5 metrin pituinen siltarakenne, koska pienten jokien ja purojen ylittäviin siltoihin on olemassa pitkiä siltarakenteita suurempi tarve. Kehityspilotin tavoitteena oli saada tietoa CLT:stä valmistetun sillan toimivuudesta käytännössä. Pilotissa tavoiteltiin kevyttä, helppoa ja kustannustehokasta siltarakennetta talviteille ja muihin soveltuviin väliaikaiskohteisiin. Pilottia varten suunniteltiin koesilta ja sen taipuminen, kestävyys ja käyttökelpoisuus testattiin. Koesillan perustamistavalle selvitettiin vaihtoehtoja. Silta ja sen perustukset rakennettiin ja testattiin Centria-ammattikorkeakoulun puulaboratorion pihalla Joutsentiellä Ylivieskassa.

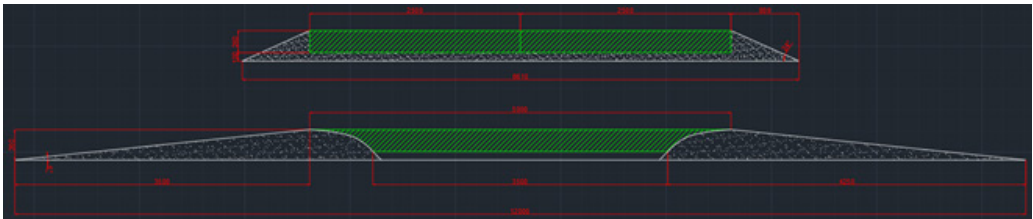
5.2 Taustatyö

Väliaikaisten siltojen tuotekehityksessä toteutettiin ja kehitettiin nopean kokeilun tuotekehityksellisiä. Pilotti käynnistyi yhteydenotoilla metsäalan yrityksiin, joiden kanssa määritettiin kehityspilotin tarve, tavoite ja toimenpiteet. Pilotille laadittiin toimenpidesuunnitelma, joka sisälsi aikataulun, tavoitteet ja resurssisuunnitelman.

Metsänhakkuut suoritetaan yleensä talvella maan/lumen antaessa kantavuutta ja tasaisuutta koneiden siirtymiseen. Sillan suunnittelu käynnistyi joulukuussa 2017 ja siltamateriaalin tilaus toteutettiin helmikuussa 2018. Siltarakenne oli mahdollista testata kevään 2018 aikana. Väliaikaisten talviteiden sesonkiaika on joulukuusta maaliskuuhun ja siihen nähden kehityspilotti oli hieman myöhässä, koska metsätiet hakkuita varten olivat jo käytännössä valmiina. Tästä syystä sillan sijoituspaikaksi valikoitiin Centria-ammattikorkeakoulun Joutsentien toimipisteen asfaltoitu piha-alue, johon suunniteltiin kiilamaiset, jäädytettävät murskeesta valmistetut siltaperustukset (kuvat 32 ja 33). Kun siltaelementit olivat valmiina, ne asennettiin paikoilleen ja kohteen tarkastelu aloitettiin välittömästi.



Kuva 32. Suunnitelma perustuksista (Myllyniemi 2018)



Kuva 33. Käyttöön otettu suunnitelma perustuksista (Myllyniemi 2018)

Murskeesta valmistetuilla perustuksilla tavoiteltiin vastaavuutta metsäolosuhteiden asennukseen. Murskepedit vahvistettiin jäädyttämällä ne vedellä. Tähän ohjeistus saatiin projektin ohjaukseen osallistuneilta asiantuntijoilta. Metsäolosuhteissa perustuksiin käytettävää materiaalia on hankala tuoda kohteeseen muualta, joten sellaisissa tapauksissa käytetään yleisesti perustusten tiivistämistä ja jäädyttämistä.

Sillan lujuustekninen tarkastelu toteutettiin kokeneen CLT- ja siltarakentamisen asiantuntijan toimesta. Siltarakenteeksi valikoitui laskelmien pohjalta 260 mm paksu 7-lamellinen CLT-levy (kuva 34). Laskennallinen taipuma oli 17,8 mm ja nettotaipuma 8,7 mm. Laskenta suoritettiin 50 kN hetkellisellä pistekuormalla. Testissä tärkeimpänä toimenpiteenä oli tarkastella todellista taipumaa. Testissä käytettiin 10,5 tonnin telikuormaa.



Kuva 34. CLT Finland Oy:ltä (Hoisko) tilattu CLT-elementti (levytyyppi H7) (Hyvärilä 2018)

5.3 Perustusten valmistus

Lujuusteknisen tarkastelun valmistuttua ja CLT-elementin tilauksen jälkeen testikohteeseen tilattiin murskekuorma. Murske oli kooltaan 0–32 mm ja sitä tilattiin 9 m³. Kiilaperustuksia varten laskettu menekki oli n. 7 m³, mutta tiivistystä ja hävikkiä varten varattiin muutama ylimääräinen kuutio.

Perustusten teon helpottamista varten valmistettiin puutavarasta muotti, jonka avulla perustukset oli mahdollista tehdä tarkasti siltarakennetta varten (kuvat 35–39). Muotin avulla jänneväli saatiin tarkasti suunnittelussa käytettyyn 3,5 metriin. Perustukset valmistettiin kaivinkoneella muokaten ja tiivistäen (kuva 35). Perustusten valmistuttua kantavuutta pyrittiin lisäämään jäädyttämisen avulla (kuva 39).



Kuva 35. Perustukset muotoiltiin kaivinkoneen avulla kiilamaiseksi (Hyvärilä 2018)



Kuva 36. Perustuksiin muotoiltiin paikka CLT-elementille (Hyvärilä 2018)



Kuva 37. Jäädystystä vaille valmis perustus (Hyvärilä 2018)



Kuva 38. Jäädystä vaille valmis perustus ja silta-alue eristetty huomionauhalla (Hyvärilä 2018)



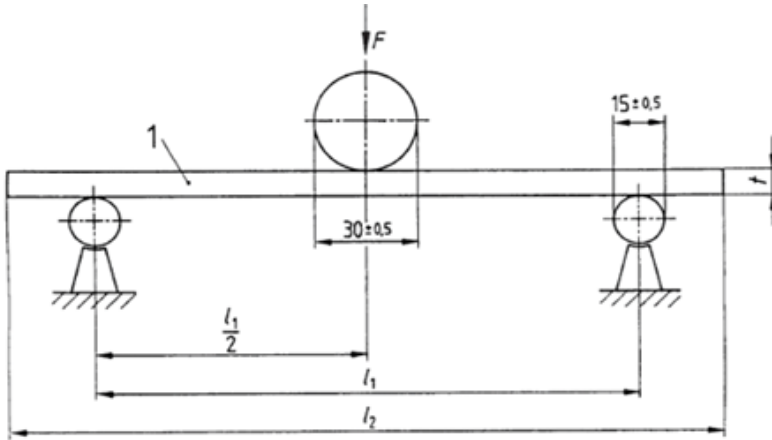
Kuva 39. Siltarakenteen jäädytys (Hyvärilä 2018)

5.4 Elementin pinnoitusmateriaalin testaus

Pinnoitusmateriaalin testauksen tarkoituksena oli varmistaa Teknopur 300-pinnoitteen soveltuvuus puupinnalle ja todentaa sen vaikutus puurakenteen lujuuteen.

Elastomeeripinnoitteen vaikutusta puumateriaalin taivutuslujuuteen tutkittiin kolmipistetäivutuksella, joka tehtiin standardin SFS-EN 310:1993 mukaisesti. Testattavan kappaleen mitat olivat 20 mm x 69 mm x 450 mm (paksuus x leveys x pituus). Jänneväliksi määräytyi 400 mm

paksuuden ollessa edellä mainittu 20 mm. Taivutuskokeessa kappaletta rasitetaan voimalla F , jota kasvatetaan hitaasti, kunnes testattava kappale murtuu. Testilaitteisto on periaatteiltaan kuvan 40 mukainen.



Kuva 40. Kolmipistetäivutuksen periaate (SFS EN 310:1993)

Taivutuslujuus laskettiin alla olevalla standardissa ilmoitetulla kaavalla:

$$f_m = \frac{3 F_{\max} l_1}{2 b t^2}$$

jossa: F_{\max} = murtumiseen tarvittu kuorma (N)

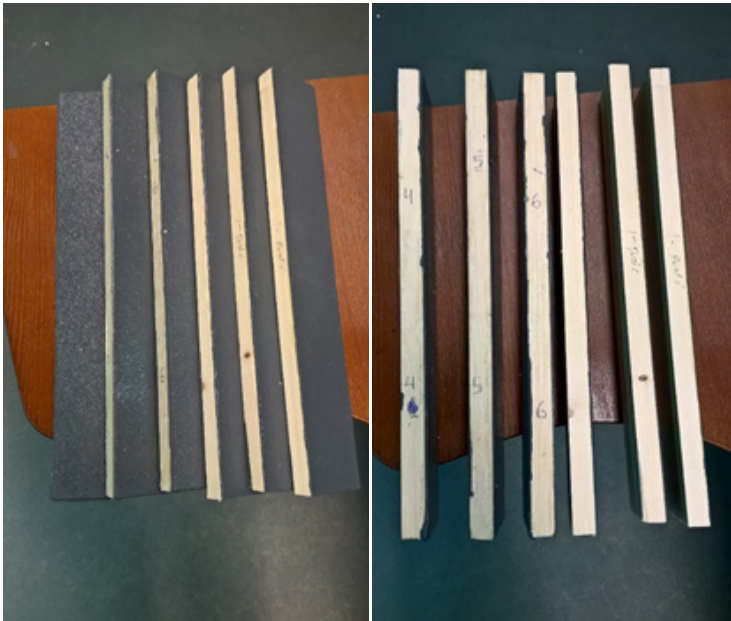
l_1 = taivutuksen jänneväli $20 \times t$ (mm)

b = kappaleen leveys (mm)

t = kappaleen paksuus (mm)

$l_2 = l_1 + 50$ mm

Kappaleet pohjustettiin Teknopur Sealer 100: -pohjustusaineella ja pinnoitettiin Teknopur 300 8-00 -pinnoitteella Kotek Factory Servicen tiloissa Kokkolassa. Pinnoituksen paksuus oli noin 2 mm. Kolme kappaletta pinnoitettiin vain toiselta lappeelta ja toiset kolme molemmilta, syrjät jätettiin pinnoittamatta (kuva 41). Pinnoituksen jälkeen kappaleet tasaannutettiin Centrian puulaboratorion tiloissa, joissa olosuhdevaatimuksina oli ilman suhteelliselle kosteudelle 65 ± 5 % ja lämpötilalle 20 ± 2 °C. Kappaleet punnittiin noin 24 tunnin välein ja laskettiin mittauskerrojen välillä tapahtunut massan muuttuminen. Standardin mukaan tasaantumisen katsotaan tapahtuneeksi, kun punnitusten välillä massan muutos on pienempi kuin $\pm 0,1$ %.



Kuva 41. Teknopurilla pinnoitetut kappaleet. Kolme vasemmanpuoleista 2-puoleisesti ja loput kolme 1-puoleisesti pinnoitettuja. (Myllyniemi 2018)

Seuraavaksi kappaleille tehtiin kolmipistetaivutus ja laskettiin taivutuslujuus noudattaen standardin laskentakaavaa. Oikean jännevälän säätämisen lisäksi oli huomioitava, että suositeltava aika kuormitukselle on 60 ± 30 s, jonka aikana murtumisen tulisi tapahtua. Taivutuskokeita tehtaessä koneen arvot, lähinnä taivutusnopeus, säädettiin siten, että varsinainen murtuminen tapahtui noin minuutin kohdalla, ja koe päättyi, kun voima oli pudonnut 50 prosenttiin maksimista (kuvat 42 ja 43). Yksipuoleisesti pinnoitetut kappaleet asetettiin testikoneeseen siten, että pinnoitus oli yläpinnalla. Jokaisen taivutuksen jälkeen testiohjelma näytti maksimivoiman ja taipuman murtumishetkellä, jotka kirjattiin ylös. Murtumiseen tarvittun voiman avulla saadaan laskettua taivutuslujuus N/mm². Testisarjan tulokset myös tallentuivat tietokoneen muistiin.



Kuva 42. Taivutuslujuustestin alkutilanne (Myllyniemi 2018)



Kuva 43. Taivutuslujuustestin lopputilanne (Myllyniemi 2018)

Pinnoitettujen kappaleiden taivutuslujuutta verrattiin aikaisemmissa testeissä saatuihin käsittelemättömän puun arvoihin (taulukko 18). Taulukoissa 19 ja 20 ovat Teknopurilla pinnoitettujen kappaleiden tulokset.

Taulukko 18. Käsittelemättömän puun taivutuslujuus.

Käsittel. kpl nro	tiheys (kg/m ³)	taipuma maks. voimalla (mm)	tarvittu voima (N)	taivutuslujuus (N/mm ²)
5.1	491	16,5	4609	100,2
5.2	451	17,0	4496	97,7
5.3	436	14,3	4403	95,7
5.4	502	14,7	4976	108,2
5.5	477	15,6	4824	104,9
5.6	481	16,6	4717	102,5
ka	473		ka	101,5
keskihaj	25		keskihaj	4,61

Taulukko 19. Yksipuoleisen pinnoituksen taivutuslujuus.

Teknopur 1-puo ylä	tiheys (kg/m ³)	taipuma maks. voimalla (mm)	tarvittu voima (N)	taivutuslujuus (N/mm ²)
1		15,4	5138	111,7
2		11,3	4092	89,0
3		15,1	5046	109,7
			ka	103,4
			keskihaj	12,59

Taulukko 20. Kaksipuoleisen pinnoituksen taivutuslujuus.

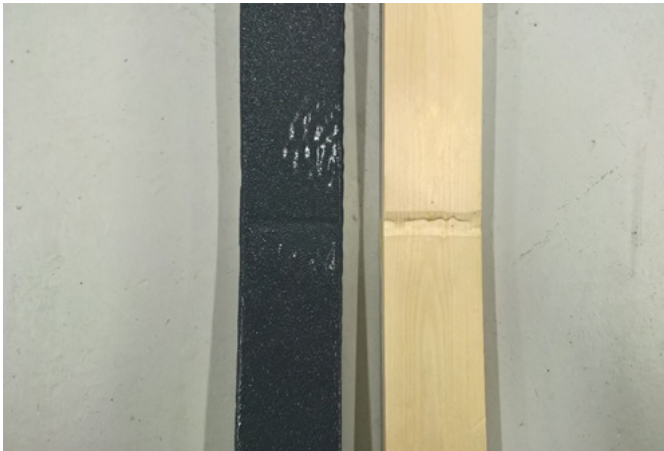
Teknopur 2-puol	tiheys (kg/m ³)	taipuma maks. voimalla (mm)	tarvittu voima (N)	taivutuslujuus (N/mm ²)
4		11,1	4691	102,0
5		15,2	5086	110,6
6		16,9	5283	114,8
			ka	109,1
			keskihaj	6,55

Tulosten perusteella sekä yksi- että kaksipuoleinen pinnoitus Teknopurilla nostaa puun taivutuslujuusarvoja jonkin verran. Kaksipuoleisen pinnoituksen arvot ovat 7,5 % korkeammat kuin pinnoittamattoman puun. On myös huomattava, että ero yksi- ja kaksipuoleisen pinnoituksen lujuuksien välillä johtuu pääosin yhdestä heikosta kappaleesta numero 2. Muut arvot ovat varsin lähellä toisiaan eikä merkittävää eroa ole.

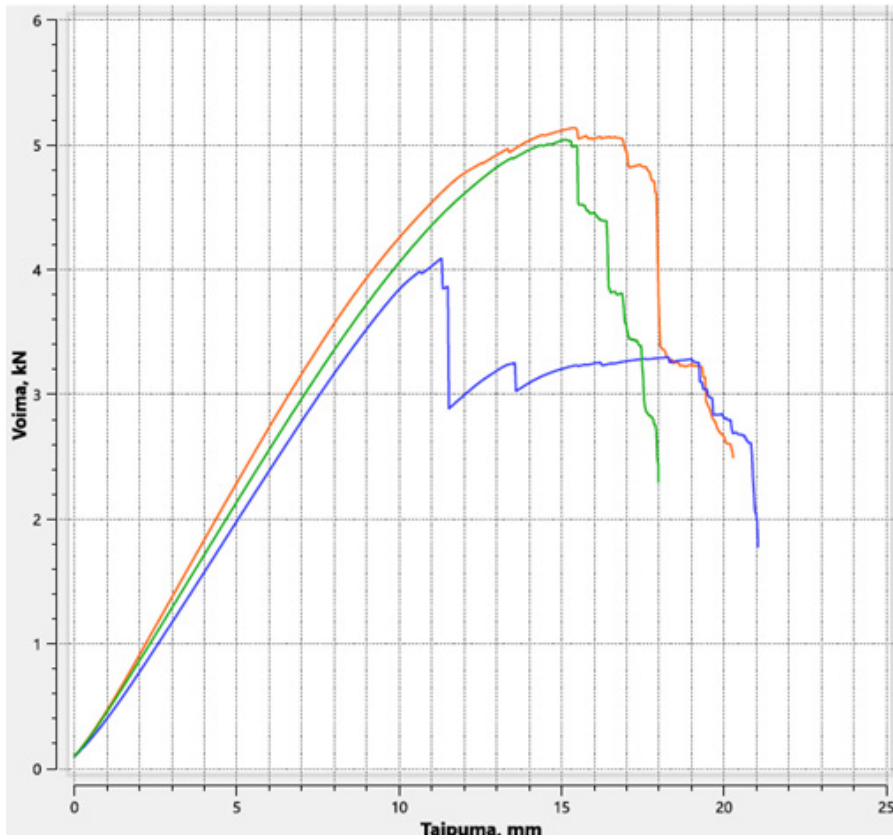
Taivutustestin aikana huomattiin, että varsinkin kaksipuoleisella pinnoituksella testikappale pysyy koossa huomattavasti paremmin kuin käsittelemätön puu. Lujutensa menettänyt puukappale ei säröillyt ala- eikä yläpinnaltaan samalla tavalla kuin pinnoittamaton puu. Joillakin kappaleilla pinnoitteen muodonmuutoksista oli nähtävissä, että puun pinta oli rikkoutunut, mutta pinnoite peitti säröilyt. Kappaleelle numero 6 muutettiin koneen arvoja siten, että taivutus päättyi vasta, kun kappaleen taivuttamiseen tarvittava voima oli pudonnut 80 %:a maksimista normaalin 50 %:n sijaan. Tarkoituksena oli saada aikaiseksi suurempi taipuma ja siten suurempi venymä alapinnalla, jotta nähtäisiin, rikkoutuuko pinnoitus venymän vaikutuksesta jossakin vaiheessa. Kuvasta 44 voidaankin havaita, että pinnoite on rikkoutunut. Verrokkina kuvassa on kappale numero 4. Jostakin syystä kappale numero 4:n pinnoite ei ole rikkoutunut, vaikka sen taipuma on ollutkin suurempi, kuten taipuma/voima -kuvaajista voidaan havaita (kuvat 46 ja 47). Myöskään puristuspuolella (yläpinnalla) pinnan muodonmuutos jää pienemmäksi kuin pinnoittamattomalla testikappaleella eikä pinnoite ole rikkoontunut puristuksen vaikutuksesta (kuva 45). Visuaalisten havaintojen perusteella pinnoite näyttää kestävän hyvin muodonmuutoksia rikkoontumatta.



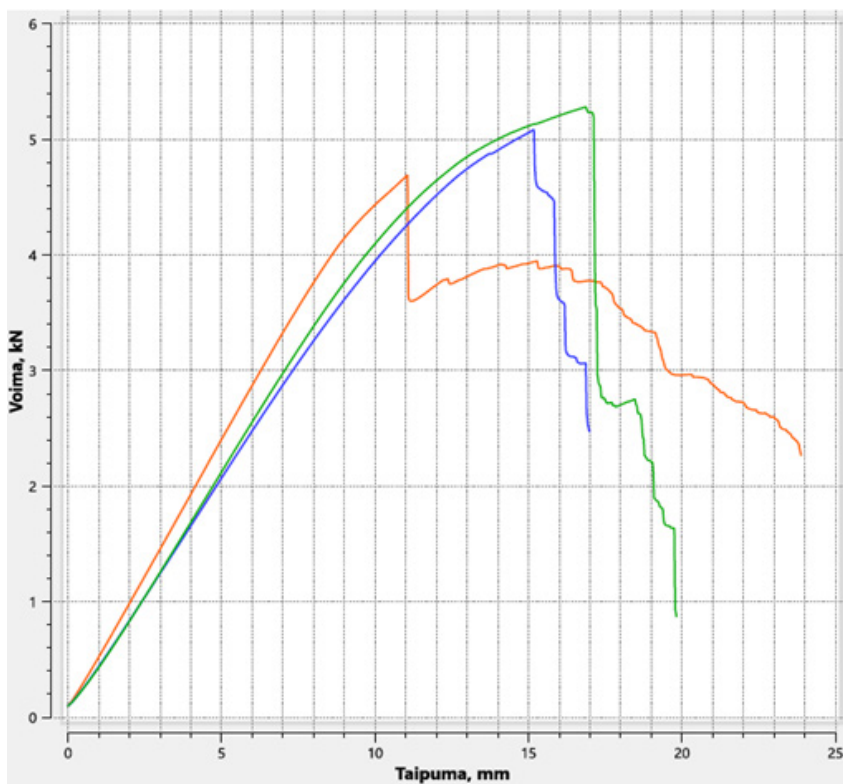
Kuva 44. Pinnoitteen rikkoutuminen alapinnalla suurella taipumalla (testikappaleet 6 ja 4) (Myllyniemi 2018)



Kuva 45. Taivutuskappale yläpinnalta, vertailu pinnoittamattomaan puuhun (Myllyniemi 2018)



Kuva 46. 1-puoleisesti pinnoitettujen kappaleiden voima/taipuma -kuvaaja (Myllyniemi 2018)



Kuva 47. 2-puoleisesti pinnoitettujen kappaleiden voima/taipuma -kuvaaja (Myllyniemi 2018)

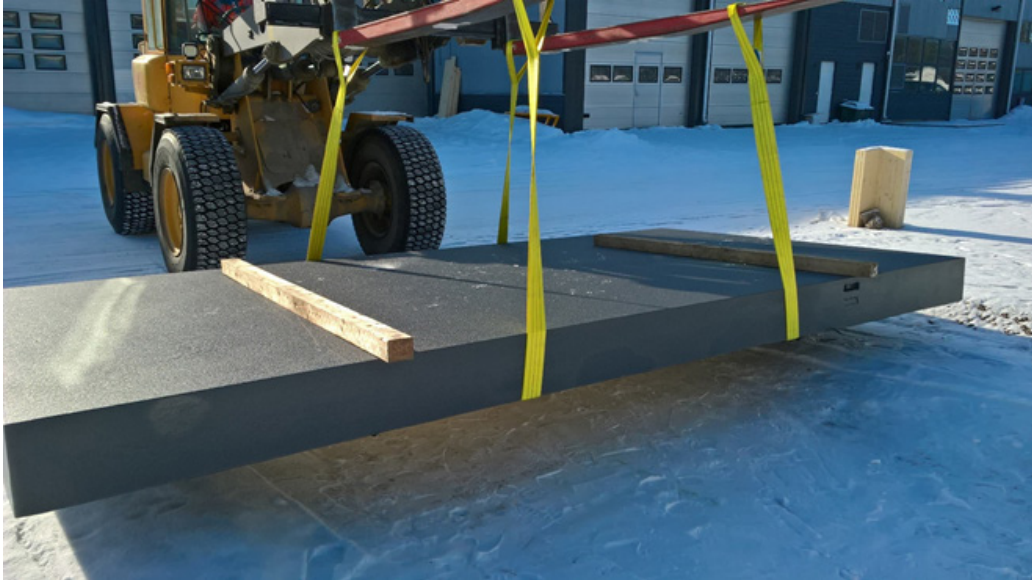
5.5 Elementin pinnoitus ja paikalleen asennus

Ennen asennusta CLT-elementit pinnoitettiin Kotek Servicen toimesta Kokkolassa. Pohjakäsittelyyn käytettiin Teknoksen Teknopur Sealer 100-00 –polyuretaanilakkaa. Se on 1-komponenttinen, kosteuskovettava ja joustava lakka, joka sopii useille eri alustoille. Pintakäsittelyyn käytettiin Teknoksen Teknopur 300 8-00 –elastomeeripinnoitetta. Pohjustus suoritettiin telaamalla (kuva 48) ja pintakäsittely ruiskulla. Pinnoituksella elementeille tavoiteltiin suojaa säärasitusta vastaan ja lisäksi Teknopurin oletettiin hieman jopa kasvattavan elementin taivutuslujuutta.



Kuva 48. Teknopur Sealer 100-00 –pohjustusaineen levitys (Hyvärilä 2018)

CLT-elementit asennettiin perustusten päälle pyöräkuormaajaa ja kuormaliinoja avuksi käyttäen (kuvat 49–50). Elementtien paino oli hieman yli 1500 kg/kpl, joten nostoihin vaadittiin järeämpää kalustoa. Levyjen paikoilleen noston jälkeen kiilan ja elementin välinen sauma täytettiin lumella ja murskeella, tiivistettiin ja lopuksi jäädytettiin veden avulla.



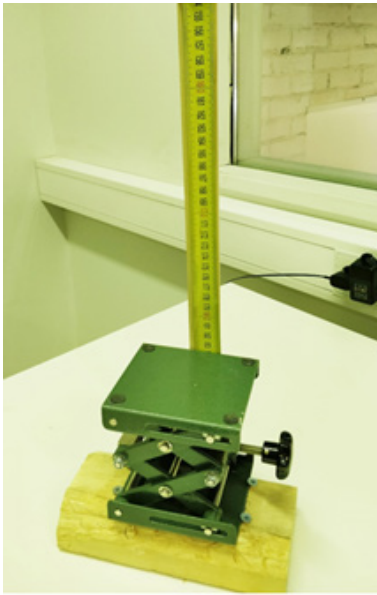
Kuva 49. CLT-elementit nostettiin paikoilleen pyöräkuormaajan avulla (Hyvärilä 2018)



Kuva 50. CLT-elementit asennettuna paikoilleen (Hyvärilä 2018)

5.6. Testitapahtuma

Testiä varten varattiin kaksi kameraa, joilla tapahtuma tallennettiin videolle. Toinen kameroista asennettiin puolaboratorion katolle, josta tapahtuma taltioidiin lintuperspektiivistä esitettävään muotoon. Toisella kameralla, joka sijoitettiin siltarakenteen viereen, tallennettiin todennukainen sillan taipuma. Taipuman mittauksia varten siltarakenteen viereen valmistettiin mittanauha, jonka avulla taipuma saatiin millin tarkkuudella tallennettua videolle (kuva 51).



Kuva 51. Mittausta varten rakennettu yksinkertainen mittanauha (Hyvärilä 2018)

Testitapahtumaa varten tilattiin puukuorma-auto täydellä kuormalla ajamaan sillan yli muutamia kertoja (kuvat 52–53). Pienen jännevälinsä takia sillan maksimikuormaksi määriteltiin telipaino täydellä kuormalla, joka tarkoittaa 16 tonnin kuormaa. Testiä varten saadun kuorma-auton maksimikuorma ei kuitenkaan riittänyt 16 tonniin, vaan telipaino testissä oli 10,5 tonnia.



Kuva 52. Kuorma-auto ylittämässä siltaa (Hyvärilä 2018)



Kuva 53. Kuorma-auto ylittämässä siltaa (Hyvärilä 2018)

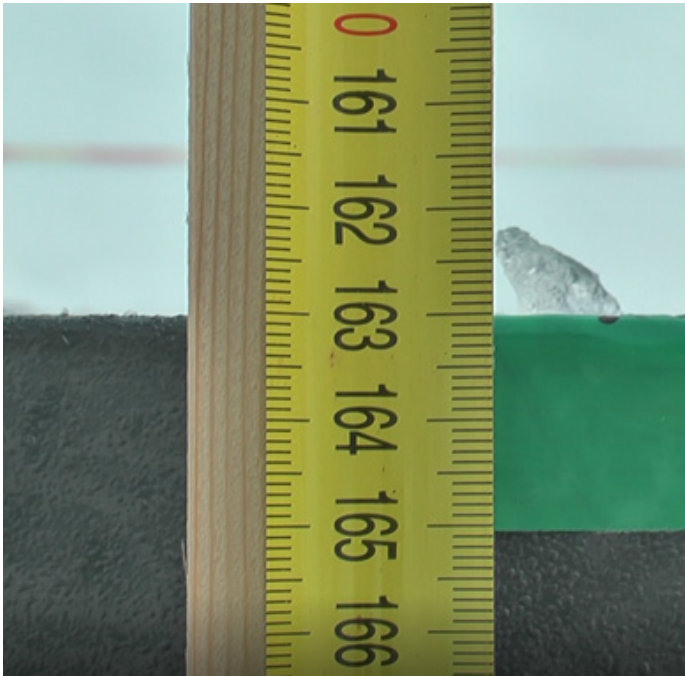
5.7. Tulokset ja pohdinta

Testin aikana kuorma-auto ajoi sillan yli neljä kertaa. Videoanalysoinnissa todettiin todellisen taipuman olleen 2 mm (kuvat 55–56). Pieni virhemarginaali taipumaan voidaan olettaa, koska mittanauhaa ei voitu asettaa täysin kiinni siltarakenteen. Todenmukainen taipuma kyseisellä siltarakenteella oli 2–3 mm 10,5 tonnin telikuormalla.

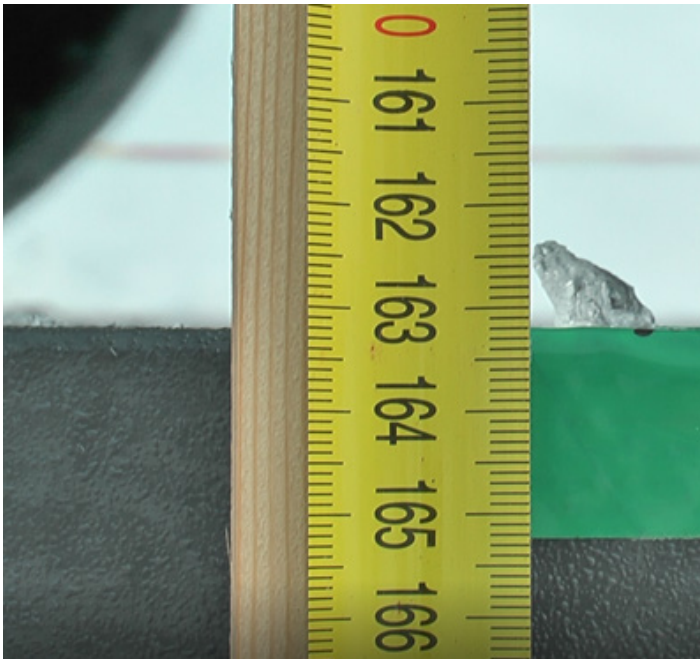
CLT-elementit olivat järeitä. Niiden yhteispinta-ala oli 25 m² ja kokonaispaino hieman yli 3000 kg. Siltojen asentaminen tässä koossa metsäteillä vaatii nostamiseen kaivinkoneen tai muun ulkopuolisen nostimen, koska metsäkoneiden nostovoima ei riitä näin massiivisten kappaleiden siirtämiseen. Siltalevyjen siirtäminen eri työmaakohteiden välillä vaatii myös nostopisteiden määrittämisen ja nostolenkkien asentamisen siltalevyjen sivuille siirtojen helpottamiseksi.



Kuva 54. Kuorma-auto sillan päällä suurimman taipuman hetkellä (Hyvärilä 2018)



Kuva 55. Silta ilman kuormitusta. Mittanauha näyttää siltarakenteen pinnan olleen 163,0 kohdalla. (Hyvärilä 2018)



Kuva 56. Siltarakenne suurimman kuorman rasituksessa. Mittanauha näyttää siltarakenteen pinnan käyneen 163,2 kohdalla. (Hyvärilä 2018)

Testitapahtuma sujui suunnitellusti ja se oli kokonaisuudessaan onnistunut. Todenmukainen taipuma maksimikuormalla 16 tonnia jäi todistamatta, mutta siltarakenne toimii kuitenkin testatulla 10,5 tonnin telikuormalla. Teknopur-pinnoite tarttui puuhun hyvin. Pinnoitteella oli vaikutus testikappaleiden taivutuslujuuteen, mutta pinnoitteen vahvuus suhteessa valmiin siltarakenteen vahvuuteen on pieni. Siltarakenteen kestävyys arviointia jatketaan sen lopullisessa asennuspaikassa. Siltalevyt sijoitetaan Ylivieskan kaupungin alueelle ja ne tulevat toimimaan väliaikaisina kulkusiltoina. Tämän tyyppiset siltarakenteet soveltuvat hyvin suunniteltuun käyttöön väliaikaisina siltoina talviteillä.

6. CLT-HIRSIRAKENTEN TUTKIMUS

6.1. Tausta ja tavoite

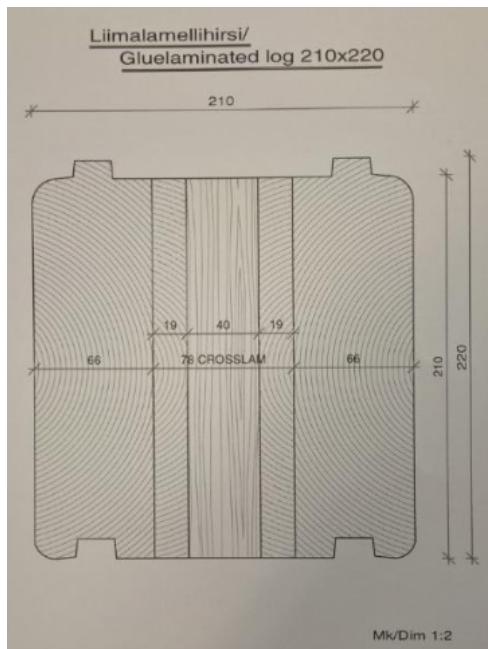
Pilotti lähti käyntiin syyskuussa 2016, jolloin pidettiin aloituspalaveri pilottiyrityksen ja Centria Tutkimus ja kehityksen kesken. Ajatuksena oli valmistaa koetalo painumattomasta hirrestä, jonka keskiosassa on CLT-elementti. Hirren paksuus oli 210 mm, josta CLT:n osuus oli 80 mm. Hirret työsti puunjalostukseen erikoistunut nivalalainen Tolliwood Oy. Koetalo rakennettiin Haapavedelle Nahkurinkujalle Rakennusliike Pekka Hänninen Oy:n toimesta. Kehitystyöhön liittyi ennen rakennusvaihetta tehdyt CLT-hirren olosuhdetestaukset. Tulokset on julkaistu opinnäytetyössä CLT-hirsirakenteen rakennusfysikaalinen esitutkimus.

Koetalolla mitattiin Centrian toimesta hirren painumista, rakenteen kosteutta 11 eri pisteestä sekä ilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa. Lisäksi hirren halkeilua seurailtiin silmämääräisesti. Alkuperäinen suunnitelma oli mitata myös lattian kosteutta ja lämpötilaa kodinhoito- ja makuuhuoneissa, mutta vesikiertoisien lattialämmityksen vuoksi porattavia antureita ei asennettu. Alkuperäisen tutkimussuunnitelman mukaan koetalon mittauksien oli tarkoitus kestää kesäkuusta 2017 toukokuuhun 2018.

6.2. Koetalo, rakenne ja mittaussuureet

6.2.1. CLT-hirsi

Koetalon runkorakenteena käytettiin Timber-hirren uutta CLT-vahvisteista hirttä. Hirren paksuus oli 210 mm, jossa CLT:n osuus oli 80 mm (kuva 57). CLT:n kolmesta lamellista keskimäinen oli syysuunnaltaan pystyssä, jonka oletettiin tekevän hirrestä lähes painumattoman. Painumattomuudella tavoiteltiin stabiilia rakennetta, jota voi helposti yhdistää muihin materiaaleihin, kuten lasiin tai teräkseen.

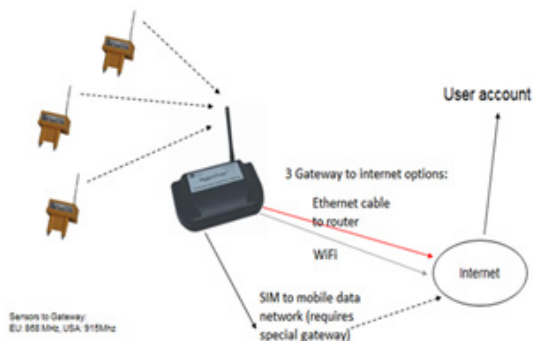


Kuva 57. Leikkauskuva CLT-hirrestä (Pohjan Timber-hirsi Oy 2017)

6.2.2. Mittauslaitteisto

Tutkimuksessa käytettiin OmniSensen langatonta mittausjärjestelmää. Mittausjärjestelmään kuului tukiasema ja siihen liitettävät langattomat OmniSense S-2 ja OmniSense S-16 –sensorit sekä web-pohjainen tietokanta mittaustulosten tallentamiseen ja esittämiseen.

Järjestelmä rakentuu tukiaseman ympärille (kuva 58), joka vastaanottaa sensoreiden lähettämät mittaustulokset ja lähettää ne edelleen tietokantaan. Tätä varten tukiasemaan täytyy saada internet-yhteys. Tukiasema tarvitsee virtalähteen, mutta sensorit toimivat litium-paristoilla. (OmniSense LLC 2018a.)



Kuva 58. OmniSensen mittausjärjestelmä (OmniSense LLC 2018a)

Erilliseen S-2 –sensoriin (kuva 59) on yhdistettävissä kaksi ulkoista lämpökosteusanturia ja johdosarja vastusmittauselektrodeille. Tällä yksiköllä voidaan suorittaa kosteus- ja lämpömittaukset esimerkiksi porareiästä tai muusta ahtaasta paikasta. (OmniSense LLC 2018b.) Tästä syystä sensori valittiin lattialaatan kosteuden ja lämpötilan mittaukseen.



Kuva 59. S-2 –sensori (OmniSense LLC 2018b)

S-16 –sensoreilla (kuva 60) on mahdollista mitata ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta sekä rakenteen sisäistä kosteuspitoisuutta. Rakenteen kosteudenmittaus on toteutettu vastusmittauksella sensorin porautuvien kiinnitysruuvien kautta. Sensorit on mahdollista upottaa rakenteisiin tai sillä voi tehdä lyhytaikaisempia mittauksia eri kohteissa. (OmniSense LLC 2018c.) Koetalolla neljä näistä sensoreista asennettiin sisäpuolelle väliseinien kohdalle, yksi vapaaseen huonetilaan ja yksi välikatolle.



Kuva 60. S-16–sensori (Hyvärilä 2017)

Sensoreissa käytettyjen litium-paristojen itsepurkautuvuus on erittäin pientä, jolloin pariston kesto riippuu lähinnä mittaustapahtumien määrästä ja ympäröivästä lämpötilasta. Harvalla mittaustaajuudella sensorin toiminta-ajan voi olettaa olevan vuosia. Paristo on tarvittaessa myös vaihdettavissa. (OmniSense LLC 2018c.)

S-16–sensorin ominaisuudet:

- Lämpötila ($\pm 0,3^{\circ}\text{C}$), suhteellinen kosteus ($\pm 2,0\% \text{RH}$), rakenteen kosteus (8-40 %)
- Rakenteen kosteuden vastusmittaus kiinnitysruuvien kautta
- Mittausten tallennus sensorin muistiin (65 535 tallennusta)
- Vaihdettava litium-akku, valmistajan testeissä kestänyt 1 milj. latausta
- Voidaan sijoittaa pysyvästi rakenteen sisään
- Maksimi lähetysetäisyys noin 46 metriä (OmniSense LLC 2018c.)

S-2–sensorin mittatarkkuus on sama, kuin S-16:lla. (OmniSense LLC 2018b.)

6.2.3. Mittaussuureet

Koetalolla mitattiin rakenteen painumista ja rakenteen kosteuspitoisuutta sekä sisä- ja ulkoilman lämpötilaa. Painumista vertailtiin massiivihirren ja lamellihirren painumaan. Hirsien painuminen on voimakkainta kahden ensimmäisen vuoden aikana ja painuminen kestää vähintään kolme vuotta. Viiden vuoden aikana suurin osa painumisesta on loppunut.

Hirsitalon seinät painuvat laadusta riippuen yhdestä viiteen senttiä korkeusmetriä kohden. Painuminen tapahtuu kuormituksen ja puun kosteuskäyttäytymisen (kuivuminen) vuoksi. Niin kutsutun painumattoman hirren painumaa voi verrata rankarakenteisen rakennuksen painumaan. (Puuinfo Oy 2018.)

6.2.4. Koetalo ja mittauspisteet



Kuva 61. Koetalo Haapavedellä elokuussa 2017 (Hyvärilä 2017)

Koetalo (kuva 61) pystytettiin Haapavedellä taajama-alueella sijaitsevalle Nahkurinkujalle. Talon rakentamisesta vastasi Rakennusliike Pekka Hänninen Oy.

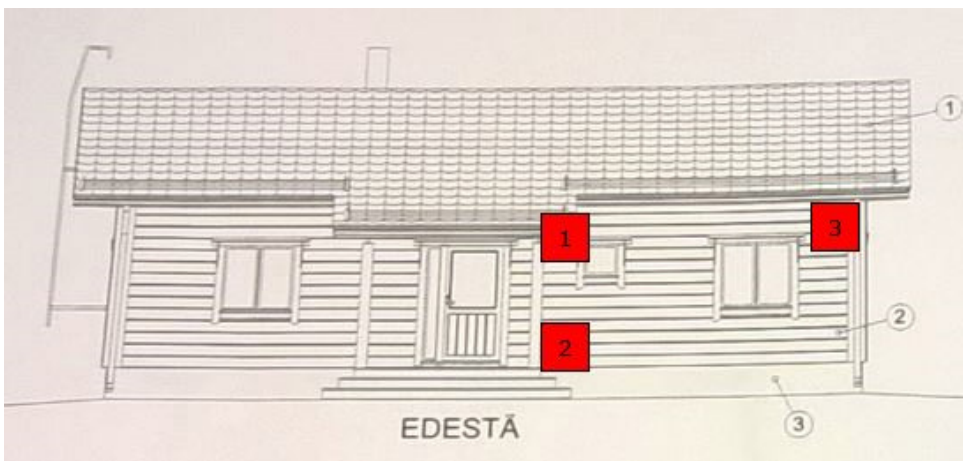
Koetalon runkorakenne on aiemmin mainittua CLT-hirttä. Hirret on pintakäsitelty ulkopuolelta ruskealla kuultomaalilla (kuvat 60–61) ja sisäpuolelta valkoisella öljymaalilla (kuva 62). Väliseiniissä on kertopuurunko mineraalivillaeristeellä ja molemmin puolin asennettu kipsilevy. Yläpohjarakenne sisältä ulospäin on:

- 8 mm MDF-kattopaneeli
- 2x20 mm ristikoolaus
- 0,3 mm Ekovilla X5 -ilmansulkupaperi
- Kattoristikot + 100 mm Paroc-kovavilla + 400 mm Ekovilla-puhallusvilla
- Aluskate
- Tuuletusrimat
- Ruodelaudoitus
- Vesikate, pelti

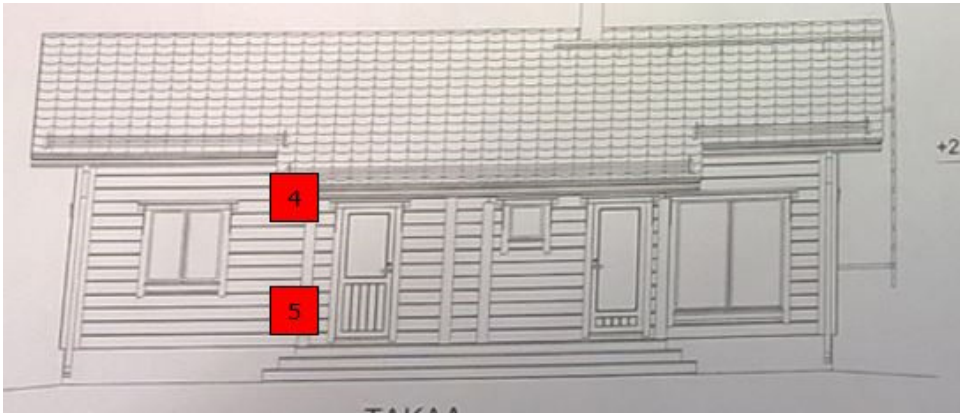


Kuva 62. Seinät pintakäsiteltiin sisäpuolelta valkoisella öljymaalilla (Hyvärilä 2017)

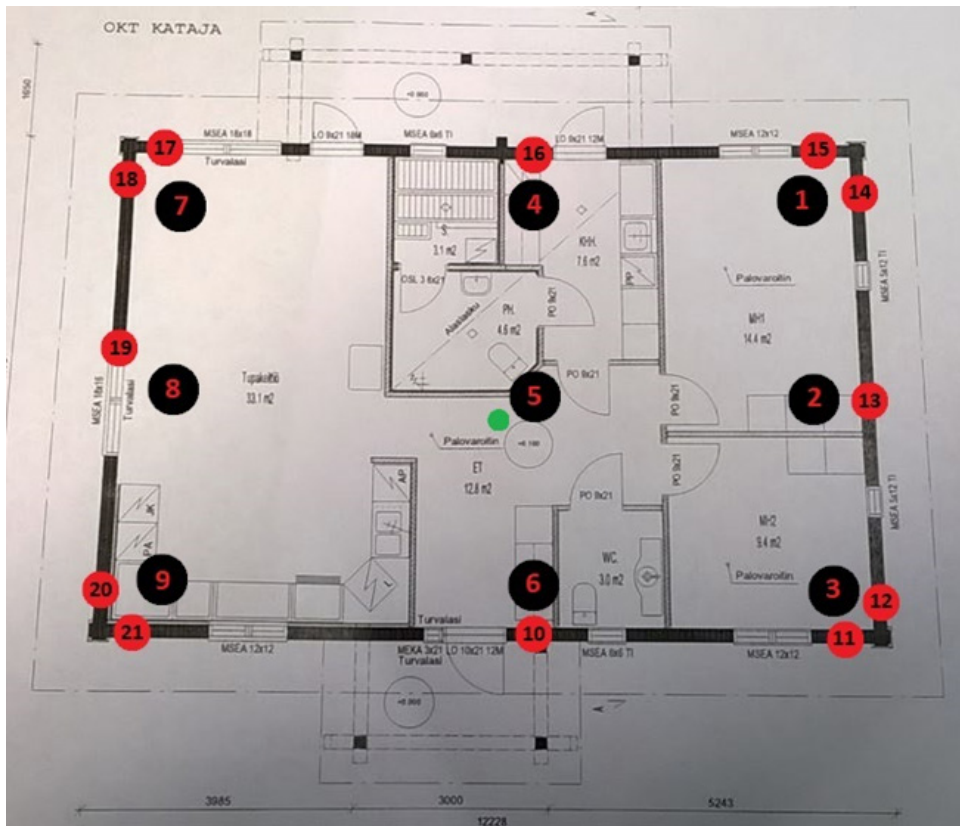
Kuvissa 63 ja 64 näkyy ulkoseinille molemmin puolin sijoitettujen sensoreiden paikat. Kuvassa 64 on merkitty yläpohjaan asennettu sensori (vihreä), painumamittauspisteet laserilla (musta) ja painumamittauspisteet rullamitalalla (punainen).



Kuva 63. Sensoreiden paikat eteläseinällä (mukaillen Pohjan Timber-hirsi Oy 2017)



Kuva 64. Sensoreiden paikat pohjoisseinällä (mukaillen Pohjan Timber-hirsi Oy 2017)



Kuva 65. Yläpohjaan asennetun sensorin (vihreä) paikka sekä painumamittauspisteet (lasermittaus = musta, rullamittaus = punainen) (mukaillen Pohjan Timber-hirsi Oy 2017)

6.3. Tulokset

6.3.1. Rakenteiden kosteuspitoisuus sekä ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila

Elokuu

Koetalolle asennettiin elokuun lopussa 2017 rakenteen kosteuspitoisuutta sekä ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaavat sensorit. Sensoreita asennettiin etelä- ja pohjoisseinille yhteensä 10 kappaletta sekä yläpohjaan kattotuolin kylkeen yksi kappale. Aiemmasta suunnitelmasta poiketen makuu- ja kodinhoitohuoneen lattioihin kaavailtuja sensoreita ei asennettu. Tarkoituksena oli odottaa lattiapinnan ja kalusteiden asennusta. Lopulta kuitenkin näitä sensoreita ei asennettu.

Eteläseinälle asennetuista sensoreista (pisteet 1–3 kuvassa 63) pisteisiin 1 ja 2 sensorit kiinnitettiin 120 mm pitkällä ruuvilla ja pisteeseen 3 80 mm pitkällä ruuvilla. 120 mm pitkä ruuvi uppoutuu 75 mm syvyydelle hirren pinnasta ja 80 mm pitkä ruuvi 35 mm:n syvyydelle.

Mittausten alkaessa koetalolla oli asennettu runko, vesikatto, ikkunat sekä väliaikaiset ovet (kuvat 66–68). Mitään eristyksiä ei tuossa vaiheessa vielä ollut asennettu.



Kuva 66. Koetalo sisältä elokuussa 2017 (Hyvärilä 2017)

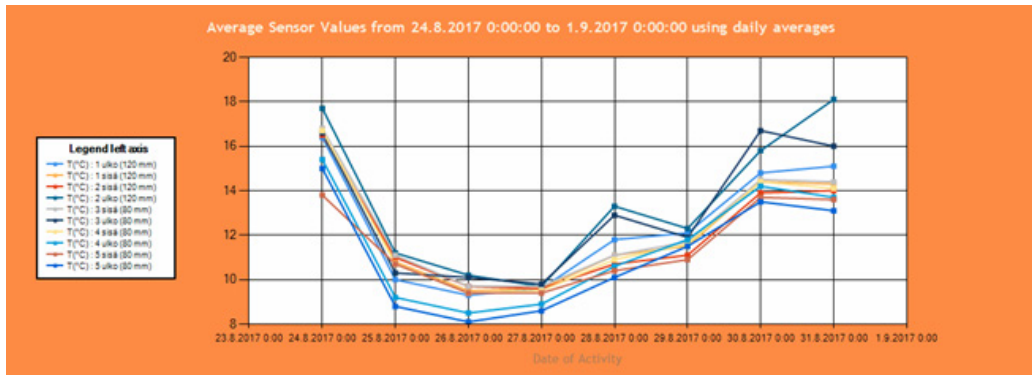


Kuva 67. Koetalo sisältä elokuussa 2017 (Hyvärilä 2017)

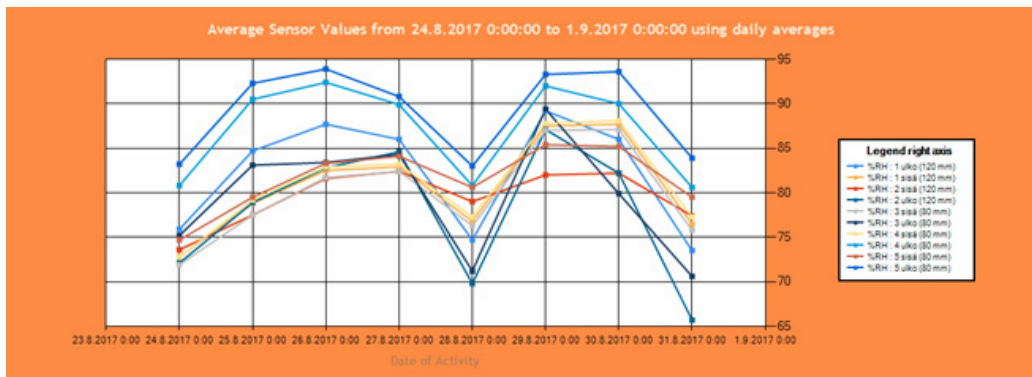


Kuva 68. Koetalo sisältä elokuussa 2017 (Hyvärilä 2017)

Elokuun lopussa (mittausdataa 24.8. eteenpäin) lämpötila oli päiväkeskiarvoltaan ulkona +8...18 °C ja sisällä +9...17 °C välillä (kuva 69). Ulkona pohjoisseinällä lämpötila oli muutaman asteen eteläseinää matalampi. Ilman suhteellinen kosteus ulkona oli päiväkeskiarvoltaan 66–94 %RH välillä, kun taas sisällä vaihtelu oli hieman pienempää %RH:n ollessa 72–88 (kuva 70). Ulkona pohjoisseinällä kosteus oli 5–10 % suurempi kuin eteläseinällä.



Kuva 69. Lämpötilan päiväkeskiarvot ulkona ja sisällä elokuun lopulla. Vielä tässä vaiheessa lämpötilaerot olivat lähes olemattomat talon eristysten puuttuessa. (Hyvärilä 2018)

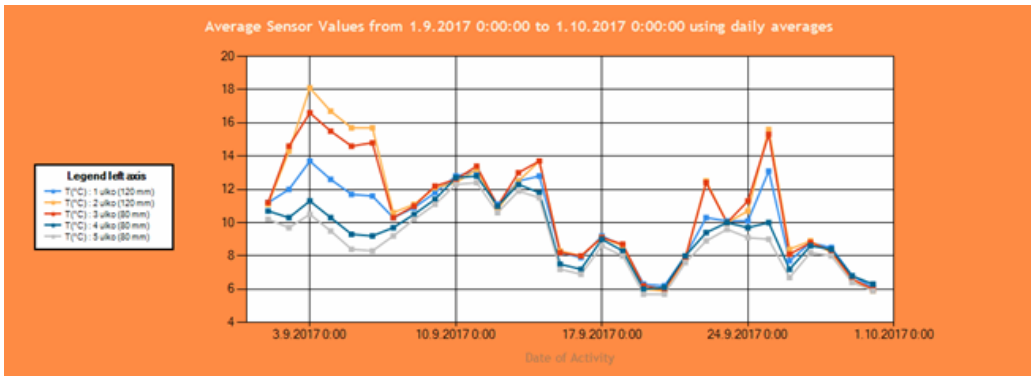


Kuva 70. Ilman suhteellisen kosteuden päiväkeskiarvot ulkona ja sisällä elokuun lopulla (Hyvärilä 2018)

Rakenteen kosteuspitoisuus oli alimmillaan pisteissä 2 ja 3, eli eteläseinän eniten auringolle alttiit mittauspisteet. Niissä kosteuspitoisuus pysyi 11–13 % välissä, kun taas muut sensorit ilmoittivat kosteuspitoisuuden 14,5–16 % välille. Rakenteen sisäpuolella kosteuspitoisuus oli pienempi, kun pisteet 2 ja 3 antoivat päiväkeskiarvoiksi 11,5–13 % ja muut 12,5–14 %.

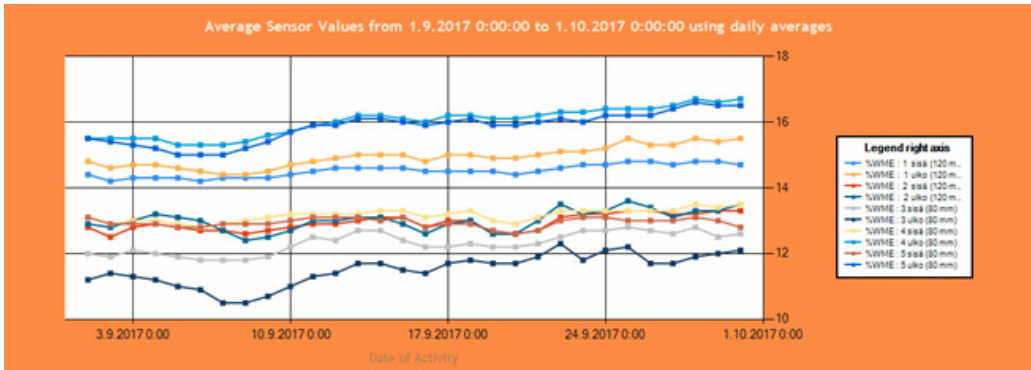
Syyskuu

Syyskuun alkupuolella ulkolämpötila pysytteli +10 °C yläpuolella (kuva 71). Aurinkoisimpina päivinä eteläpuolella päivän keskilämpötilat nousivat kuitenkin paikoin lähelle +20 °C. Syyskuun loppupuolella lämpötila alkoi pikkuhiljaa laskea ja keskilämpötilat putosivatkin pysyvästi alle +10 °C muutamaa aurinkoista päivää lukuun ottamatta. Sisällä lämpötila noudatti samaa kaavaa, kuin ulkona, auringonpaisteen aiheuttamia poikkeuksia lukuun ottamatta.



Kuva 71. Lämpötilan päiväkeskiarvot ulkopuolen sensoreilla syyskuussa (Hyvärilä 2018)

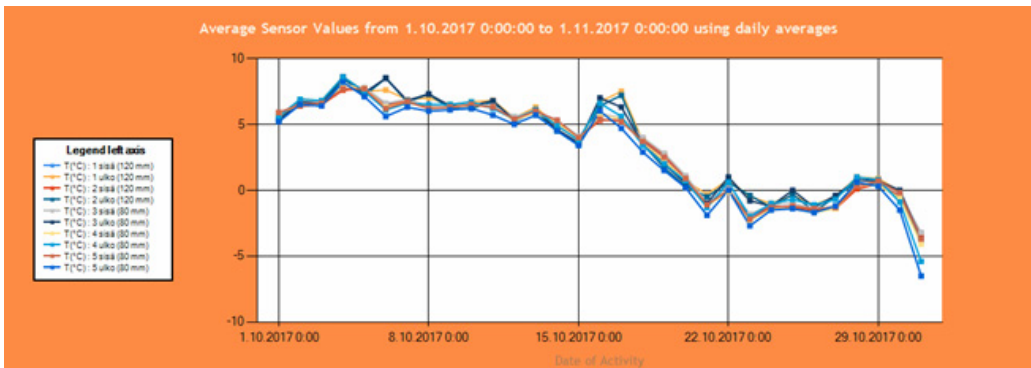
Ilman suhteellisen kosteuden kuukausikeskiarvot olivat eri pisteissä 84–94 välillä, kuun alussa %RH pysytteli 60–90 välillä ja loppukuusta yli 90 %. Rakenteen kosteus pysytteli turvallisissa lukemissa, ulommalla puolella 10,5–17 % ja sisemmällä puolella 12–15 % välillä (kuva 72).



Kuva 72. Rakenteen kosteuspitoisuuksien päiväkeskiarvot sisä- ja ulkopuolella syyskuussa (Hyvärilä 2018)

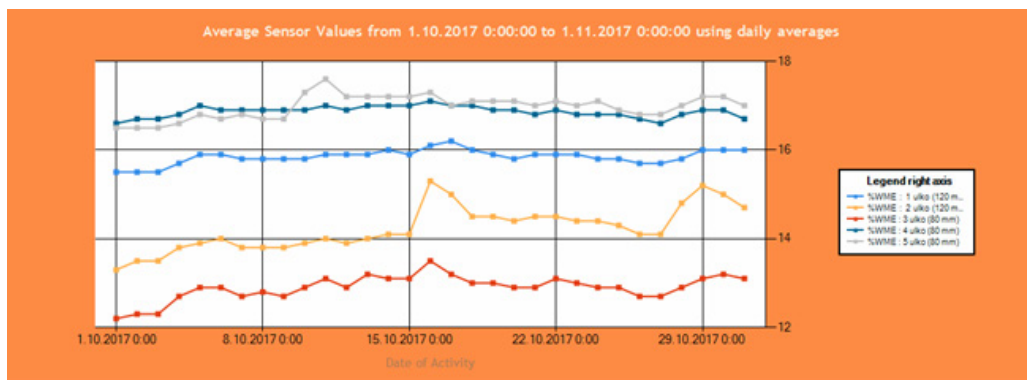
Lokakuu

Lokakuun alussa ulkolämpötila pysytteli +5...10 °C välissä (kuva 73). Ensimmäiset pakkaspäivät tulivat nopean lämpötilojen laskun jälkeen kuun puolessavälissä ja loppukuusta lämpötilakeskiarvot olivatkin -6...0 °C välissä. Sisällä lämpötilat olivat yhä samat kuin ulkona, koska talon rakentamista ei hetkeen oltu jatkettu ja eristys uupui vielä.

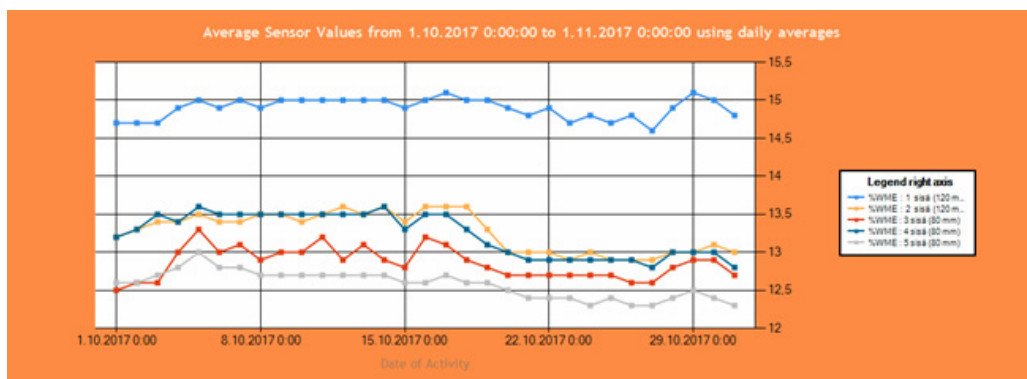


Kuva 73. Sisä- ja ulkolämpötilojen päiväkeskiarvot lokakuussa (Hyvärilä 2018)

Ilman suhteellinen kosteus oli lokakuussa keskimäärin 90–95 %. Rakenteen kosteuspitoisuus oli seinärakenteen ulommalla puolella eteläpuolella 12–16 % ja pohjoispuolella 16,5–17,5 % välillä (kuva 74). Rakenteen sisäpuolella kosteuspitoisuus oli selvästi alempi, 12–13,5 % ja hieman poikkeavana tapauksena pisteessä 1 noin 15 % tuntumassa (kuva 75).



Kuva 74. Rakenteen kosteuspitoisuuksien päiväkeskiarvot ulommalla puolella lokakuussa (Hyvärilä 2018)



Kuva 75. Rakenteen kosteuspitoisuuksien päiväkeskiarvot sisemmällä puolella lokakuussa (Hyvärilä 2018)

Marraskuu

Marraskuun aikana koetalolle asennettiin väliseinät ja lisäksi kattoon ilmansulkupaperi ja kooausrimat (kuvat 76–78). Sisäpuolella pisteissä 1, 2, 4 ja 5 olevat sensorit suunniteltiin väliseinien kohdalle, joten marraskuusta eteenpäin ne sijaittivat väliseinärakenteen sisällä ja näin eivät anna todellista kuvaa sisäilman suhteellisesta kosteudesta tai lämpötilasta. Lisäksi marraskuun aikana taloon saatiin lämmitys sisälle.



Kuva 76. Väliseinien valmistumista (Hyvärilä 2017)



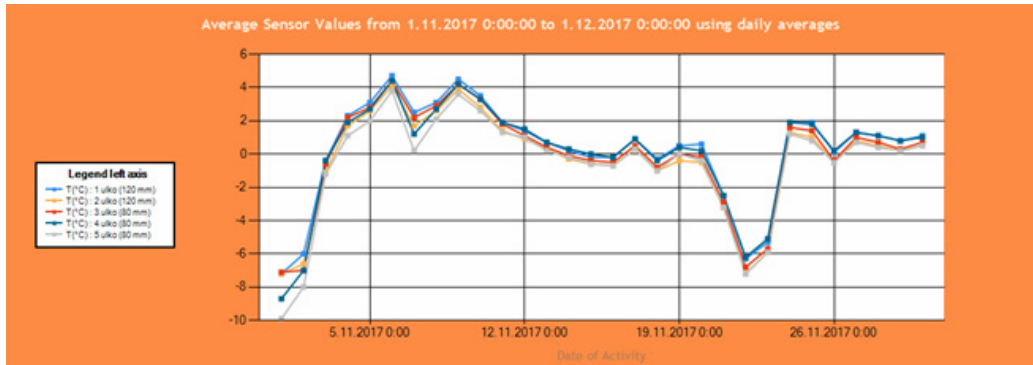
Kuva 77. Väliseinien valmistumista. Väliseinän kohdalla seinällä näkyy pisteen 1 sensori. (Hyvärilä 2017)



Kuva 78. Ilmansulku ja koolausrimat asennettuna (Hyvärilä 2017)

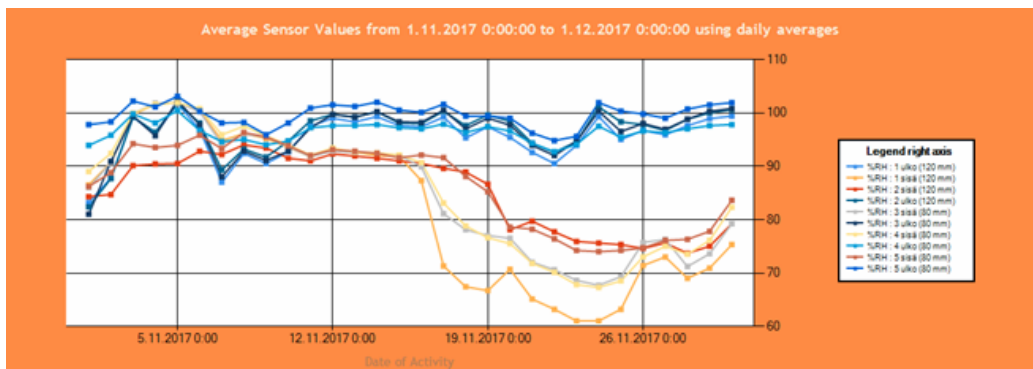
Marraskuussa ulkona päiväkeskilämpötilat kävivät alimmillaan $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja ylimmillään $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (kuva 79). Kuukauden keskilämpötila oli nollan tienoilla. Marraskuun puolen välin tienoilla saadun

lämmityksen ansiosta sisälämpötilat nousivat. Ainoana sensorina, joka ei jäänyt seinärakenteen sisään, toimi pisteessä 3 sijaitseva sensori. Se antoi ennen lämmitystä keskilämpötilaksi -0,9 °C ja loppukuun keskilämpötilaksi +13 °C.



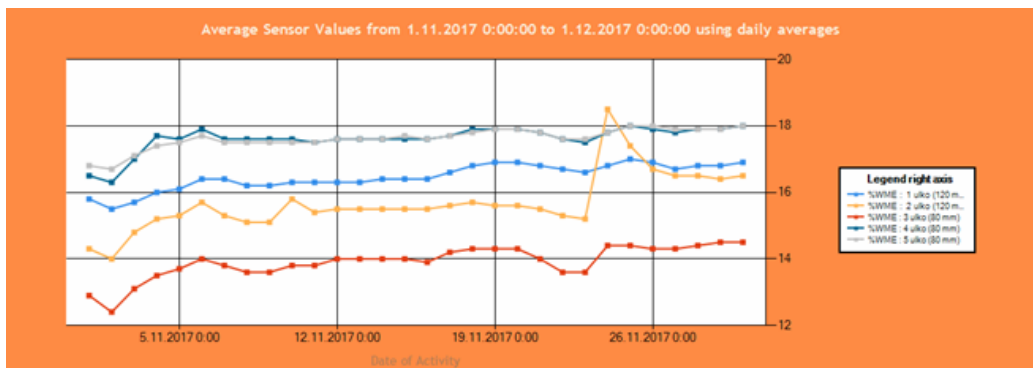
Kuva 79. Marraskuun ulkolämpötila päiväkeskiarvoina (Hyvärilä 2018)

Ulkona suhteellinen kosteus oli lähellä 100 RH% lähes koko kuun ja sisällä alkukuusta yli 90 RH%, mutta loppukuusta lämmityksen ja väliseinien johdosta se putosi 70–80 prosenttiin (kuva 80).



Kuva 80. Marraskuun ulko- ja sisäilman suhteellinen kosteus päiväkeskiarvoina (Hyvärilä 2018)

Ulkopuolella rakenteen kosteus oli pohjoisseinällä hieman alle 18 % ja eteläseinällä 12,4–17,0 % – tosin pisteessä 2 (eteläseinässä alhaalla) on nähtävissä muutaman päivän kestänyt poikkeama, jolloin kosteuspitoisuus käväisi 18,5 prosentissa (kuva 81).

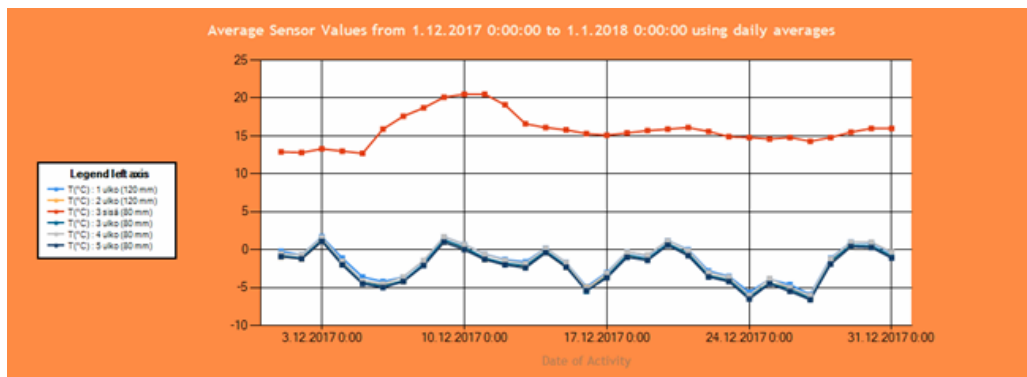


Kuva 81. Rakenteen kosteuspitoisuuden päiväkeskiarvot ulkopuolella marraskuussa (Hyvärilä 2018)

Sisäpuolella rakenteen kosteuspitoisuus ei muuttunut lämmityksen tai väliseinien johdosta käytännössä mihinkään suuntaan. Päiväkeskiarvot olivat 12–15,4 % välillä.

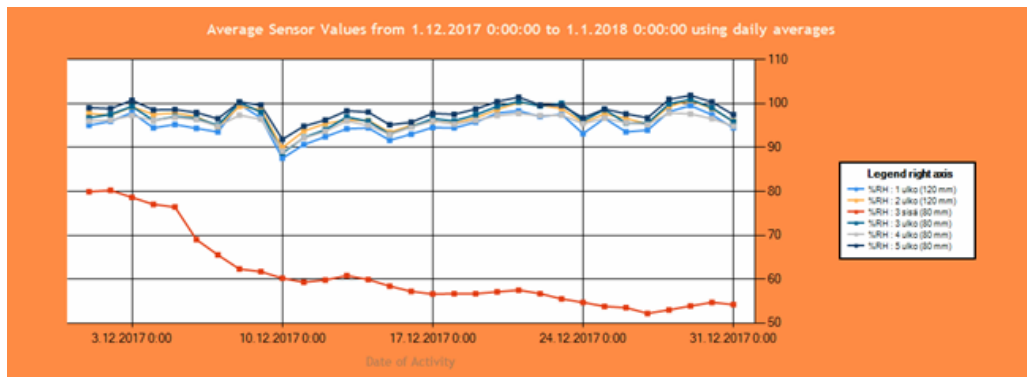
Joulukuu

Joulukuussa lämpötila heitteli pakkaselta plussan puolelle useasti. Ylimmillään joulukuussa ulkona oli päiväkeskiarvoltaan +1,7 °C ja alimmillaan -6,6 °C. Sisälämpötila oli koko kuun keskiarvoltaan +16 °C (kuva 82).



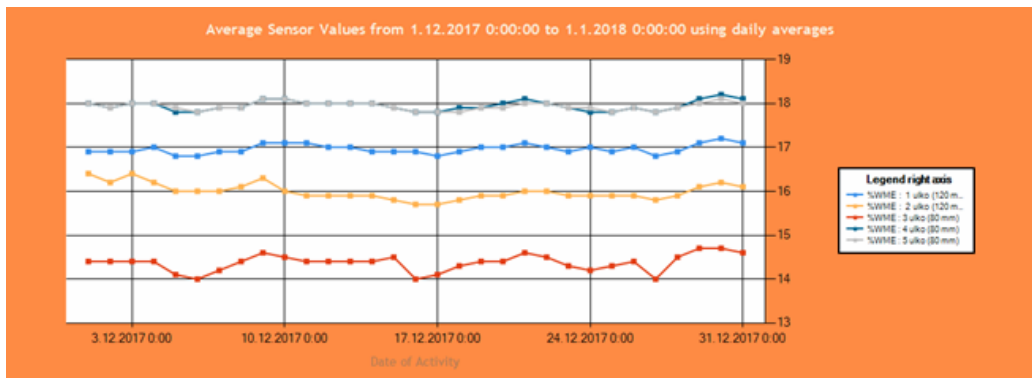
Kuva 82. Punaisella merkitty joulukuun ajalta sisälämpötila päiväkeskiarvoina. Muut viivat osoittavat ulkolämpötilan päiväkeskiarvoina. (Hyvärilä 2018)

Suhteellinen kosteus oli ulkona yhtä päivää lukuun ottamatta yli 90 %RH ja keskimäärin koko kuussa noin 96,5 %RH. Sisällä suhteellinen kosteus pisteessä 3 (ainoa, joka ei ole väliseinän sisällä) oli kuun alussa 80 %RH ja laski siitä tasaisesti ollen kuun lopussa alimmillaan hieman yli 50 %RH (kuva 83).

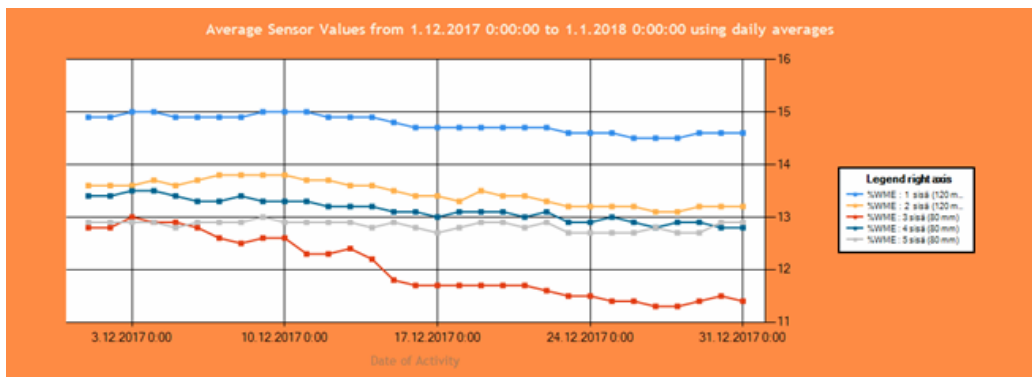


Kuva 83. Punaisella merkitty joulukuun ajalta suhteellinen kosteus sisällä päiväkeskiarvoina. Muut viivat osoittavat ulkoilman suhteellista kosteutta päiväkeskiarvoina. (Hyvärilä 2018)

Ulkopuolella rakenteen kosteuspitoisuus oli lähes sama kuin marraskuussa (kuva 84). Sisäpuolella väliseinien kohdalla kosteuspitoisuuden muutosta ei juurikaan tapahtunut. Pisteestä 3 mitatut tulokset puolestaan näyttävät, että rakenteen kosteuspitoisuus laski kuukauden aikana lähes 2 % (kuva 85).



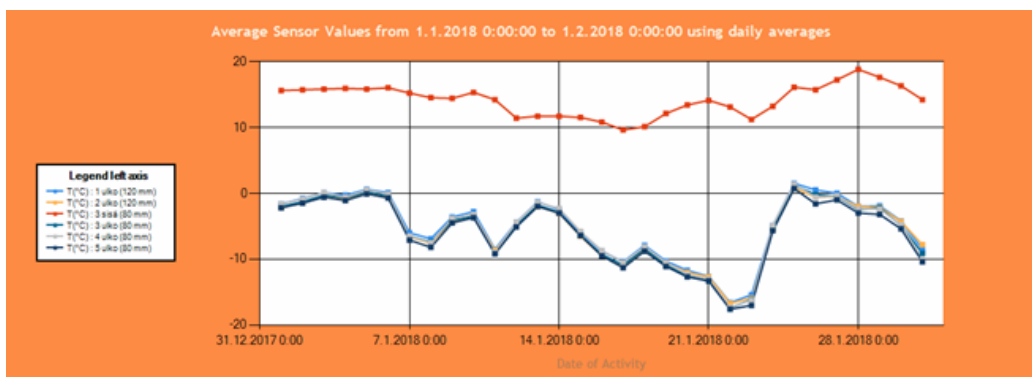
Kuva 84. Rakenteen kosteuspitoisuus ulkopuolella joulukuun ajalta päiväkeskiarvoina (Hyvärilä 2018)



Kuva 85. Sisäpuoliset rakenteen kosteuspitoisuudet joulukuussa päiväkeskiarvoina. Punainen viiva näyttää pisteestä 3 saadut tulokset. (Hyvärilä 2018)

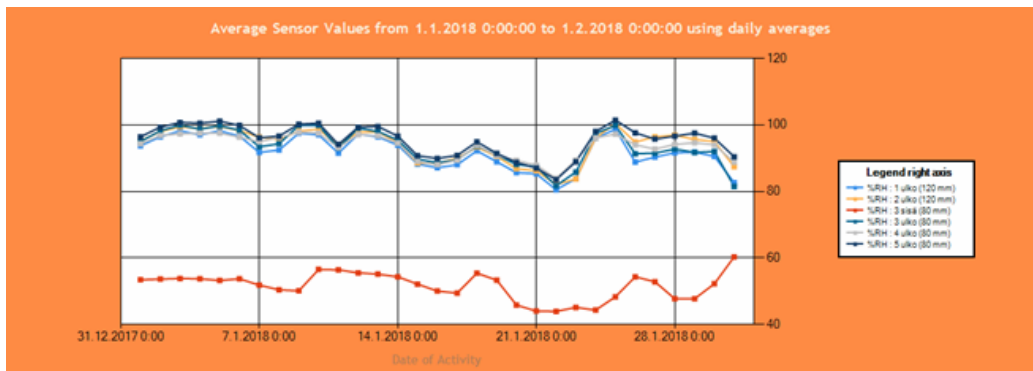
Tammikuu

Tammikuussa ulkolämpötila pysytteli reilummin pakkasen puolella. Ylin mitattu päivän keskilämpötila oli $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja alin $-17,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (kuva 86). Koko kuukauden keskilämpötila ulkona oli $-5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sisällä lämpötila oli $+10...+19\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä, koko kuukauden keskilämpötilan ollessa $+14,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.



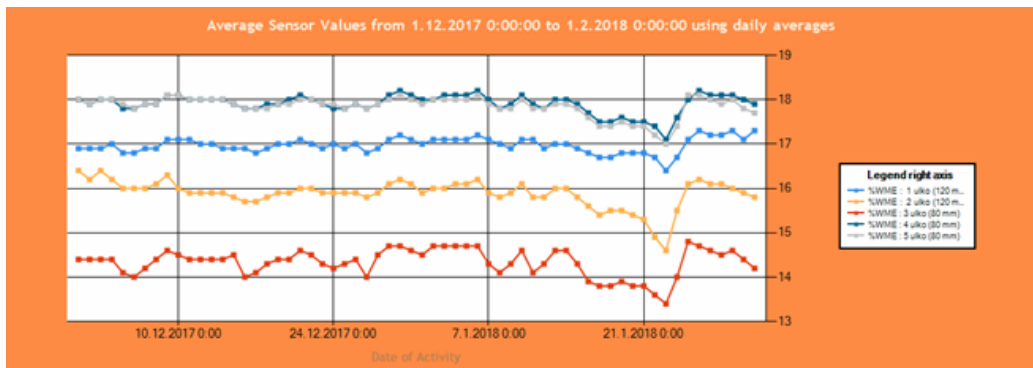
Kuva 86. Tammikuun päiväkohtaiset keskilämpötilat. Punainen viiva osoittaa sisälämpötilaa ja muut ulkolämpötilaa. (Hyvärilä 2018)

Ulkoilman suhteellinen kosteus vaihteli huomattavasti reilummin, kuin esimerkiksi joulukuussa. Alin mitattu suhteellinen kosteus päiväkeskiarvoltaan oli 80,5 ja ylin 100 % (kuva 87). Koko kuukauden keskiarvo oli 93 %. Sisällä ilman suhteellinen kosteus vaihteli tammikuun aikana 44–64,5 % välillä.



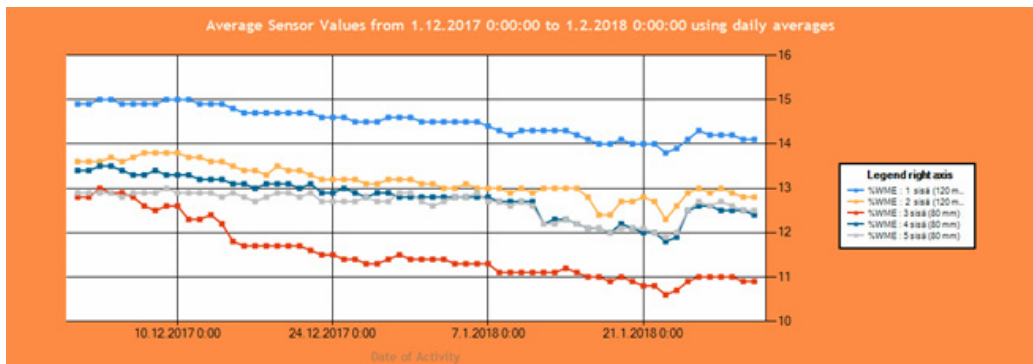
Kuva 87. Ulko- ja sisäilman suhteellinen kosteus päiväkeskiarvoina tammikuussa. Punainen viiva osoittaa sisäilman ja muut viivat ulkoilman suhteellista kosteutta. (Hyvärilä 2018)

Rakenteen kosteuspitoisuus pysyi samana kuin joulukuussa (kuva 88). Ainoa poikkeus oli kuun loppupuolella, jolloin kosteuspitoisuus kävi hetkellisesti noin 1 prosentin verran alempana.



Kuva 88. Rakenteen kosteuspitoisuudet joului- ja tammikuussa ulkopuolella (Hyvärilä 2018)

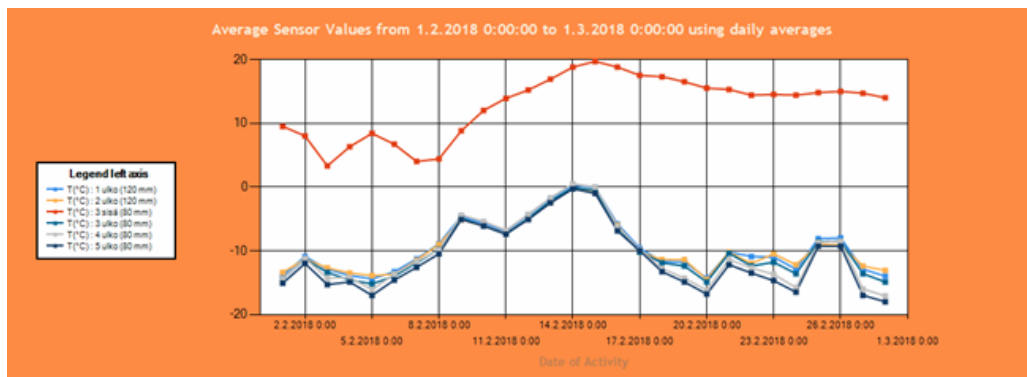
Sisäpuolella rakenteen kosteuspitoisuus jatkoi hieman laskuaan. Rakennuksen lämmittämisen ja eristämisen vaikutukset näkyivät joulukuun alun ja tammikuun lopun välisenä aikana noin 1,5 % pienempinä kosteuspitoisuuksina (kuva 89).



Kuva 89. Rakenteen kosteuspitoisuudet joului- ja tammikuussa sisäpuolella (Hyvärilä 2018)

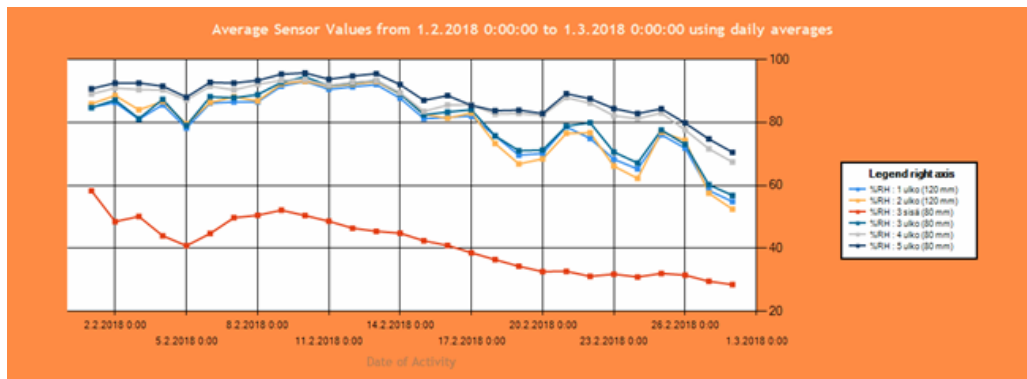
Helmikuu

Helmikuu oli mittausajanjakson kylmin kuukausi. Kuukauden keskilämpötila oli ulkona $-10,1$ °C, vaikka kuun puolesta välissä päiväkeskilämpötilat olivatkin 0 °C molemmin puolin. Ylin mitattu päivän keskilämpötila oli $+0,5$ °C ja alin -18 °C (kuva 90). Sisällä lämpötila oli alkukuusta alle $+10$ °C. Syynä tähän oli rakennustyön väliaikainen keskeytys ja lämmityksen puute. Korkeimmillaan keskilämpötilat kävivät kuitenkin $+20$ °C, jonka jälkeen sisälämpötila tasoittui $+15$ °C tietämille.



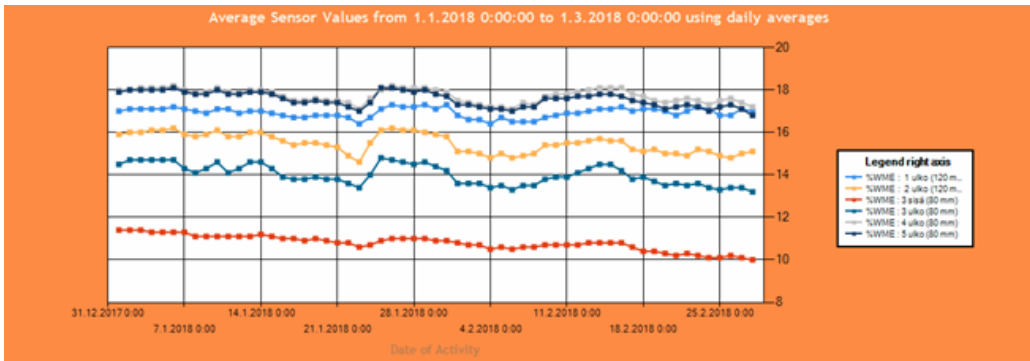
Kuva 90. Sisä- ja ulkolämpötilan päiväkeskiarvot helmikuussa. Punainen viiva on sisälämpötila, muut ulkolämpötilaa esittäviä viivoja. (Hyvärilä 2018)

Ulkoilman suhteellisessa kosteudessa tapahtui iso muutos kuun puolesta välistä lähtien. Alkukuussa %RH oli 80 – 95 välillä, mutta kuukauden loppua kohden se pieneni, ollen helmi-maaliskuun vaihteessa mittauspisteestä riippuen 52 – 70 %RH välillä (kuva 91). Myös sisäpuolella suhteellinen kosteus pieneni maaliskuuta lähestyessä. Korkeimmillaan %RH oli sisällä hieman alle 60 % ja tasaisen laskun jälkeen loppukuusta se oli $28,5$ %.



Kuva 91. Ulko- ja sisäilman suhteellinen kosteus päiväkeskiarvoina helmikuussa. Punainen viiva osoittaa sisäilman ja muut viivat ulkoilman suhteellisen kosteuden. (Hyvärilä 2018)

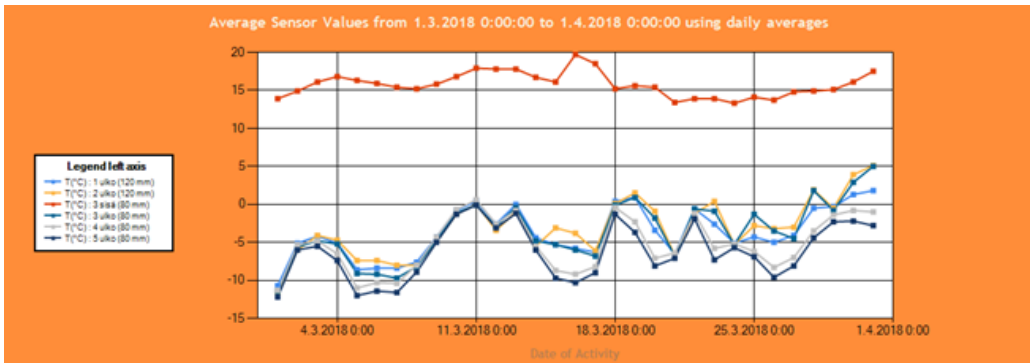
Rakenteen kosteuspitoisuudet eivät muuttuneet aiempien kuukausien tuloksista. Ulkopuolella kosteuspitoisuus oli keskimäärin 16 % ja sisäpuolella $10,5$ % (kuva 92).



Kuva 92. Rakenteiden kosteuspitoisuudet päiväkeskiarvoina tammi- ja helmikuussa. Punainen viiva osoittaa sisäpuolen ja muut viivat ulkopuolen mittauspisteiden kosteuspitoisuusarvot. (Hyvärilä 2018)

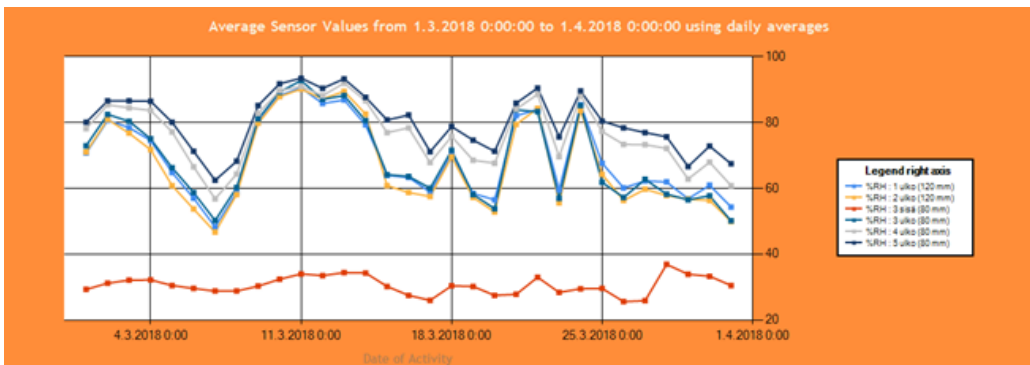
Maaliskuu

Maaliskuussa ulkona päiväkeskilämpötila oli vielä suurimman osan kuukaudesta pakkasen puolella. Maalis-huhtikuun vaihteessa eteläpuoleisella seinällä mitatut päiväkeskilämpötilat nousivat jo plussan puolelle, mutta pohjoispuoleisella seinällä lämpötila jäi vielä hieman pakkasen puolelle (kuva 93).



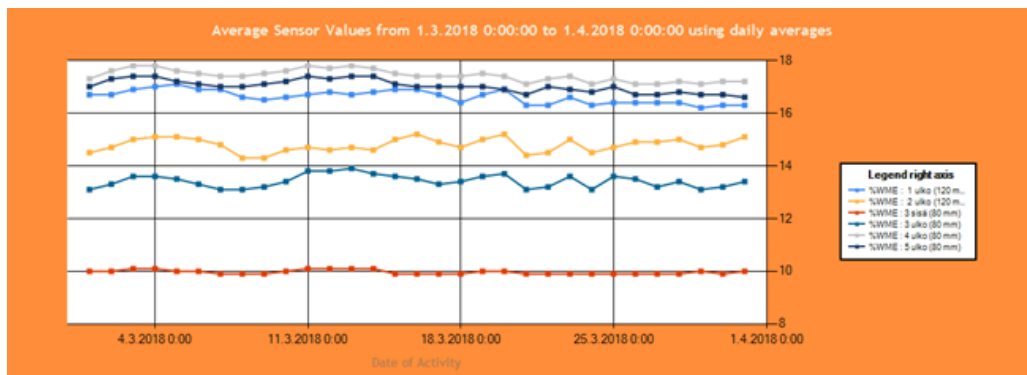
Kuva 93. Päiväkeskilämpötilat ulkona ja sisällä maaliskuussa. Punainen viiva osoittaa sisälämpötilaa ja muut viivat ulkolämpötilaa. (Hyvärilä 2018)

Ilman suhteellinen kosteus ulkona liikkui 50–90 %RH välillä (kuva 94). Sisäilman suhteellinen kosteus oli koko kuukauden ajan keskimäärin 30 %RH.



Kuva 94. Päiväkeskiarvot ilman suhteellisen kosteuden osalta maaliskuussa ulkona ja sisällä. Punainen viiva osoittaa sisäilman arvot ja muut viivat ulkoilman arvot. (Hyvärilä 2018)

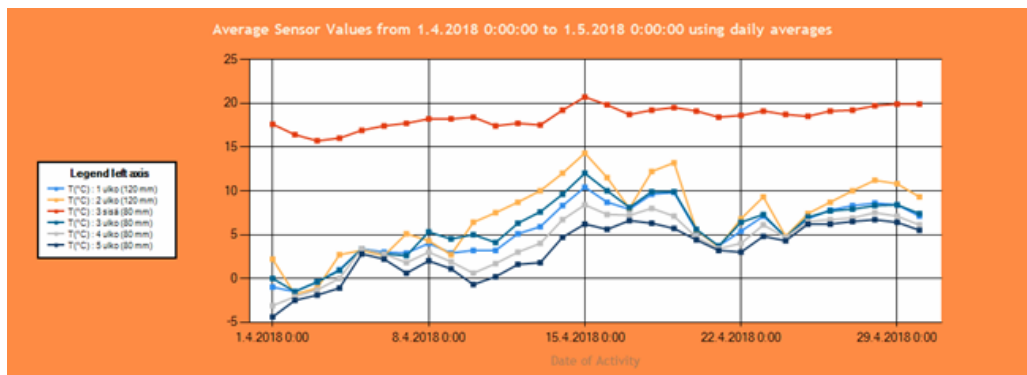
Rakenteen kosteuspitoisuus ei muuttunut helmikuun tuloksista. Ainoana huomiona voidaan todeta, että sisäpuolelta mitattu kosteuspitoisuus pysyi tasaisesti 10 prosentissa, johon se laski helmikuun lopussa (kuva 95). Puun alhainen kosteuspitoisuus johtaa yleisesti puun kutistumiseen ja tämä taas voi vaikuttaa painumamittaustuloksiin, kun painumaa mitataan betonilaatan pinnalta x verran hirsii ylöspäin.



Kuva 95. Rakenteen kosteuspitoisuus päiväkeskiarvona ulkopuolella ja sisäpuolella maaliskuussa. Punainen viiva osoittaa rakenteen kosteuspitoisuutta sisäpuolella (pisteestä 3) ja muut viivat rakenteen kosteuspitoisuutta ulkopuolisten mittauspisteiden kohdalta. (Hyvärilä 2018)

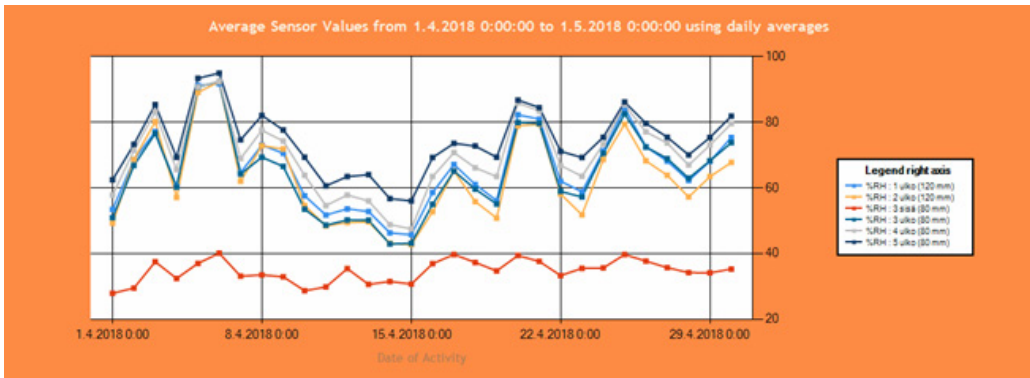
Huhtikuu

Huhtikuun alussa lämpötila alkoi kylmähkön alkukevään jälkeen nousta plussan puolelle (kuva 96). Päiväkeskiarvoltaan pakkaslukemia mitattiin kuun ensimmäisinä päivinä, jonka jälkeen lämpötilat lähtivät nousuun. Kuun puolen välin jälkeen ulkona keskilämpötila vakiintui 5...10 °C välille. Sisällä päiväkeskilämpötilat olivat koko huhtikuun 15...21 °C välillä.



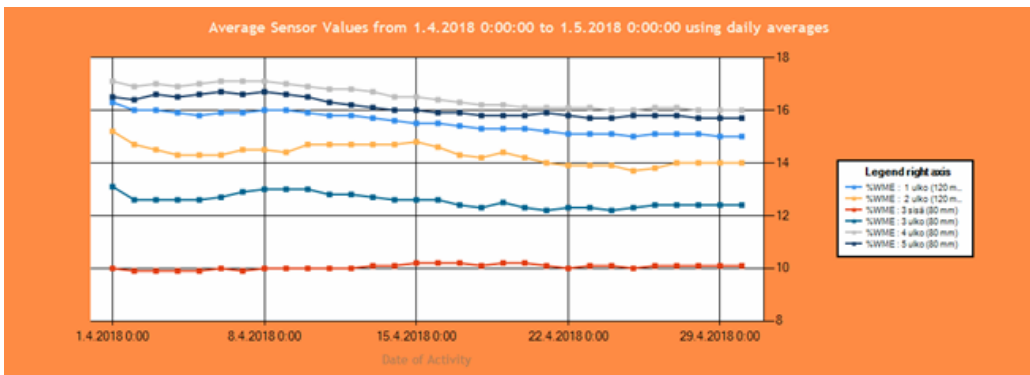
Kuva 96. Päiväkeskilämpötilat huhtikuussa. Punainen viiva osoittaa sisälämpötilaa ja muut viivat ulkolämpötilaa. (Hyvärilä 2018)

Ulkona suhteellinen kosteus vaihteli huhtikuussa 42–95 %RH välillä (kuva 97). Kuukauden lämpimimpinä päivinä kuun puolessa välissä kaikissa pisteissä mitattiin alle 60 % suhteellinen kosteus. Sisällä ilman suhteellinen kosteus pysyi koko kuun alle 40 %RH. Alimmillaan sisällä mitattiin 28 % suhteellinen kosteus.



Kuva 97. Ilman suhteellinen kosteus päiväkeskiarvoina huhtikuussa. Punainen viiva osoittaa sisäilman suhteellista kosteutta ja muut viivat ulkoilman suhteellista kosteutta. (Hyvärilä 2018)

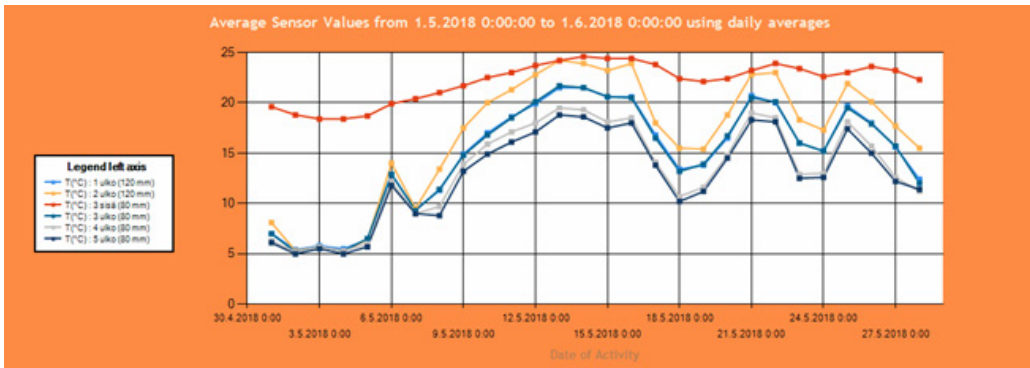
Rakenteen kosteus lähti ilmojen lämpenemisen ansiosta laskuun kaikissa muissa pisteissä, paitsi sisällä sijaitsevassa mittauspisteessä (kuva 98), jossa rakenteen kosteus pysyi tasaisesti 10 %. Ulkona sijaitsevilla mittauspisteillä rakenteen kosteuspitoisuus laski n. 1 prosenttiyksikön kuukauden aikana.



Kuva 98. Rakenteiden kosteuspitoisuudet huhtikuussa päiväkeskiarvoina. Punainen viiva osoittaa sisällä sijaitsevan mittauspisteen arvoa, muut viivat ulkona sijaitsevien mittauspisteiden mittaamaa rakenteen kosteuspitoisuutta. (Hyvärilä 2018)

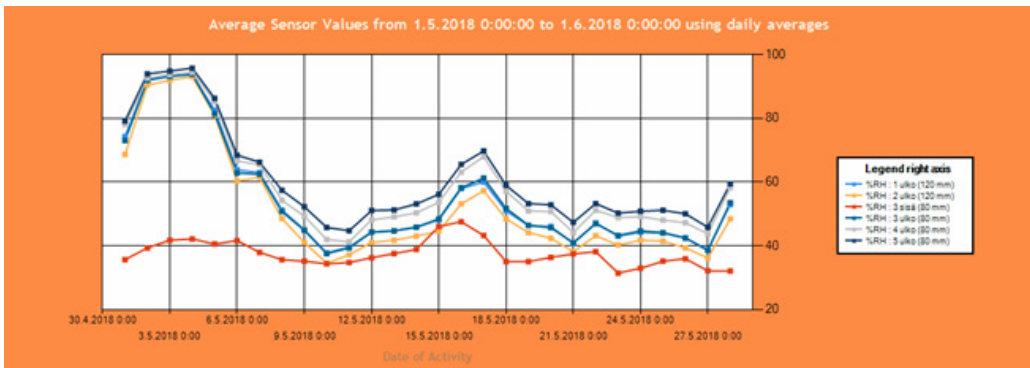
Toukokuu

Toukokuun alussa ulkona päiväkeskilämpötilat olivat huhtikuun lopun tapaan 5...10 °C välillä. Viikon jälkeen lämpötilat lähtivät nousuun ja käytännössä loppukuun ajan päiväkeskilämpötila pysyi yli 10 °C. Auringolle alttiimmassa mittauspisteessä (eteläpuoleinen seinä, piste 2) päiväkeskilämpötilat olivat lämpimänä ajanjaksona 15...25 °C välillä. Vähiten auringolle alttiit mittauspisteet (pohjoispuolen seinä, pisteet 4 & 5) näyttivät päiväkeskilämpötiloiksi 10...20 °C (kuva 99).



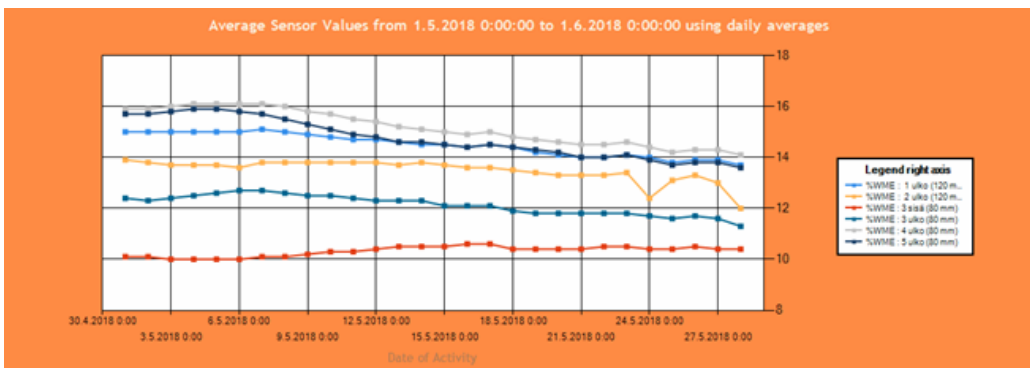
Kuva 99. Ulko- ja sisäilman päivakeskilämpötilat toukokuun ajalta. Punainen viiva osoittaa sisäilman ja muut viivat ulkoilman lämpötilaa. (Hyvärilä 2018)

Ulkoilman suhteellinen kosteus oli viileimpinä päivinä, eli kuun ensimmäisen viikon aikana 60–95 %RH tietämillä, mutta sen jälkeen %RH vakiintui 40–60 % välille. Sisällä ilman suhteellinen kosteus oli samaa luokkaa kuin huhtikuussakin, keskiarvoltaan hieman korkeampi (kuva 100).



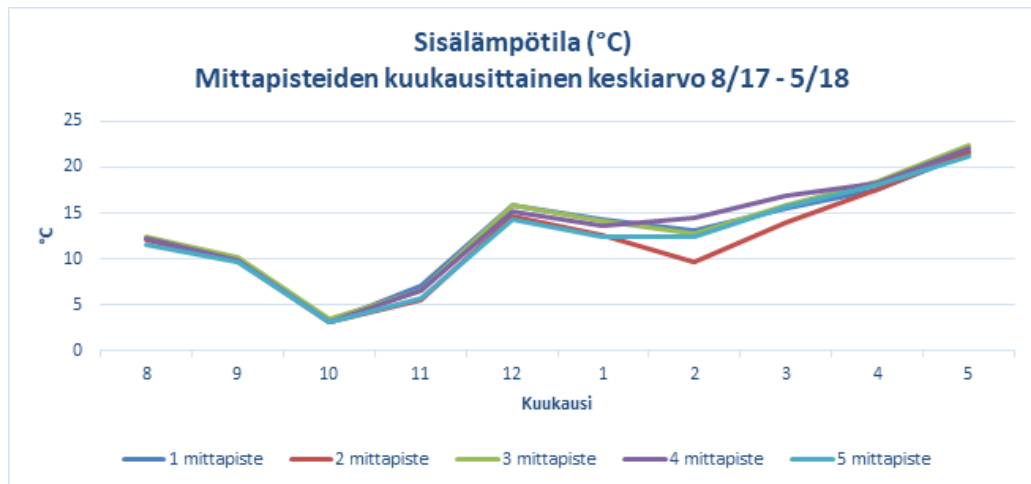
Kuva 100. Ulko- ja sisäilman suhteellinen kosteus päivakeskiarvoina toukokuussa. Punainen viiva osoittaa sisäilman ja muut viivat ulkoilman suhteellista kosteutta. (Hyvärilä 2018)

Rakenteiden kosteuspitoisuudet laskivat toukokuun aikana lämpimän ilman ansiosta keskimäärin 2 % ulkopuolen mittauspisteissä. Sisäpuolelta mitattuna kosteuspitoisuus pysyi 10 % tietämillä (kuva 101).



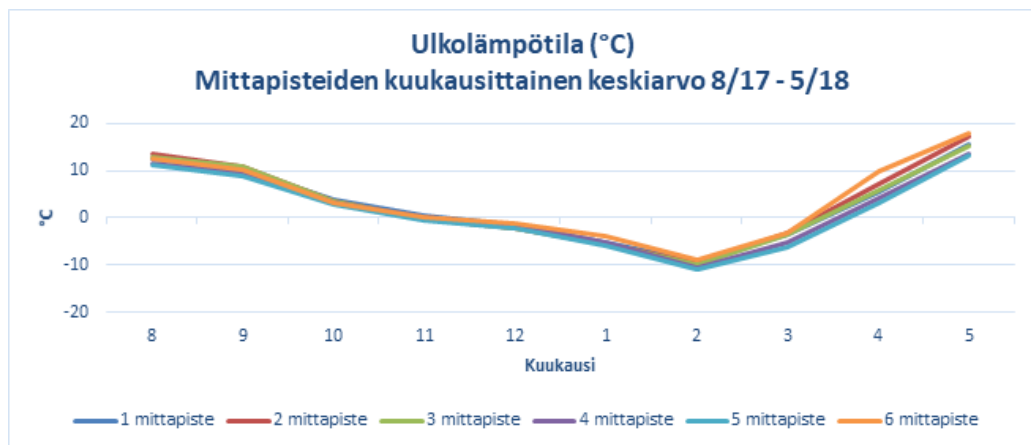
Kuva 101. Seinärakenteiden kosteuspitoisuudet toukokuussa. Punainen viiva osoittaa sisäpuolelta mitattua kosteuden ja muut viivat ulkopintaa lähellä mitattua kosteuden. (Hyvärilä 2018)

Kuvissa 102–107 on esitettyä kuukausittainen mittausarvojen keskiarvot. Sisällä mittauspisteet 1, 2, 4 ja 5 sijaitsivat väliseinien sisällä joulukuusta lähtien. Kuvassa 102 on havaittavissa helmikuussa sisälämpötilassa poikkeama mittauspisteessä 2. Mittauspiste sijaitsee ulko-oven läheisyydessä. Tällä on todennäköisesti vaikutusta mittapisteiden lämpötilaan.



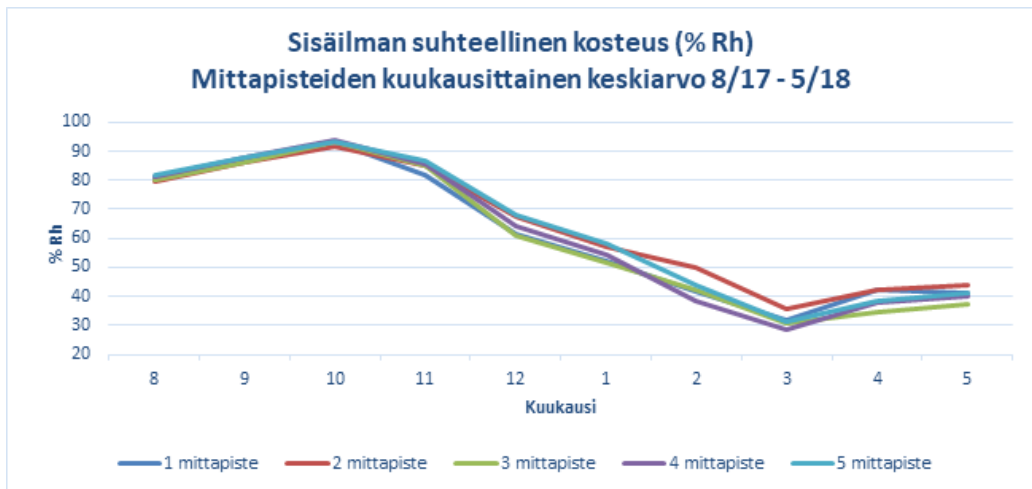
Kuva 102. Sisälämpötilan (°C) kuukausittainen keskiarvo seurantajaksolla eri mittauspisteissä (Saarela 2018)

Ulkolämpötilan muutos on esitetty kuvassa 103. Mittauspiste 6 sijaitsi välikatolla, mikä näkyy kevään aikana korkeampana lämpötilana. Kevään tarkastelujaksolla on nähtävissä, miten pohjoisseinän mittauspisteissä 4 ja 5 on matalampi lämpötila kuin eteläseinällä olevissa mittauspisteissä 1, 2 ja 3.



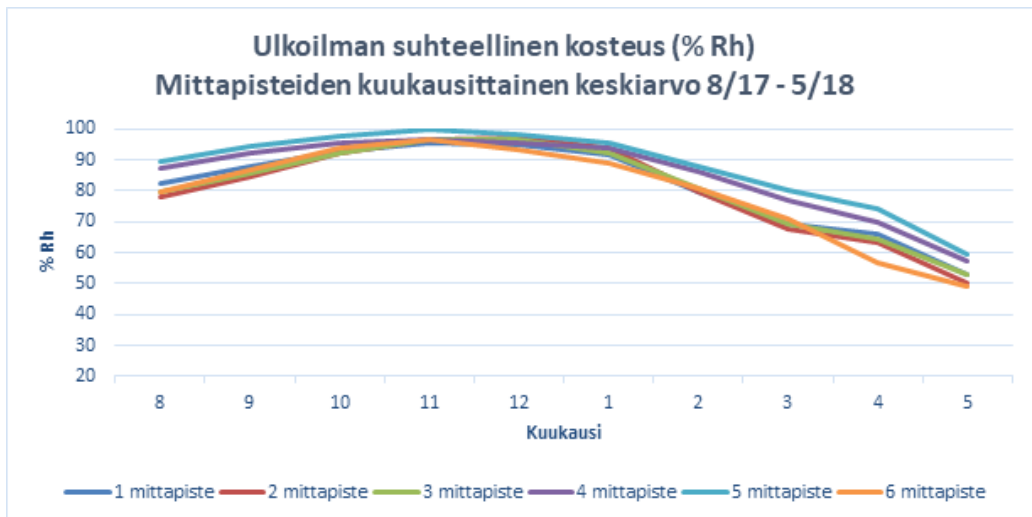
Kuva 103. Ulkolämpötilan (°C) kuukausittainen keskiarvo seurantajaksolla eri mittauspisteissä (Saarela 2018)

Sisäilman suhteellisen kosteuden mittauksessa huonetilan suhteellinen kosteus on nähtävissä mittauspisteessä 3 tuloksissa. Muut mittauspisteet olivat rakenteiden sisällä joulukuusta lähtien. Tämä näkyy mittaustulosten hajontana. Mittaustulos on seurantajakson päättyessä korkeampi väliseinärakenteiden sisällä kuin huoneilmassa.



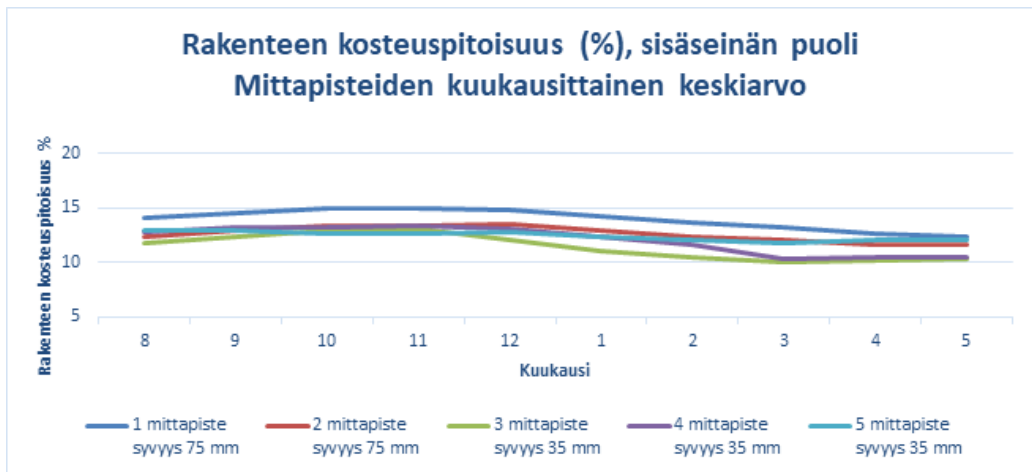
Kuva 104. Sisäilman suhteellisen kosteuden (% Rh) kuukausittainen keskiarvo seurantajaksolla eri mittauspisteissä (Saarela 2018)

Kuvassa 105 on esitettyä ulkoilman suhteellinen kosteus mittauspisteiden kuukausittaisina keskiarvoina. Pohjoisseinällä ulkoilman suhteellinen kosteus oli korkeampi eteläseinään verrattuna. Vastaavasti molemmilla seinillä ilman suhteellinen kosteus oli korkeampi seinän alaosissa.



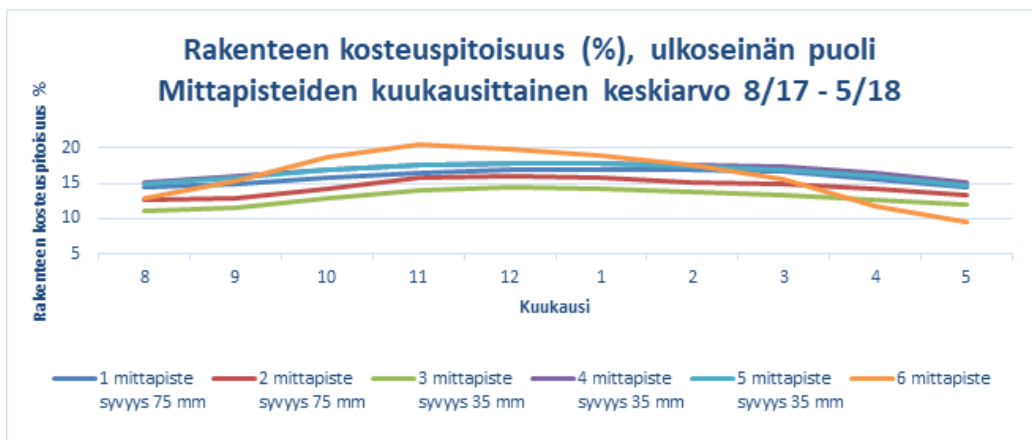
Kuva 105. Ulkoilman suhteellisen kosteuden (% Rh) kuukausittainen keskiarvo seurantajaksolla eri mittauspisteissä (Saarela 2018)

Ero etelä- ja pohjoisseinän rakenteen kosteuspitoisuudessa (%) rakenteen sisäpuolelta tarkasteltaessa on nähtävissä kuvan 106 mittauspisteissä 3 ja 4. Nämä anturit mittasivat samalta syvyydeltä vastakkaisia seiniiä. Ero oli havaittavissa väliseinien rakennusvaiheen jälkeen, mutta ero oli tasoittunut mittausjakson päättyessä. Mittauspisteistä 1 ja 3 on nähtävissä kosteusero samalla seinällä eri syvyydeltä rakennetta. Ero kosteudessa säilyi saman suuruisena koko mittausjakson ajan.



Kuva 106. Rakenteen kosteuspitoisuuden (%) kuukausittainen keskiarvo seurantajaksolla eri mittauspisteissä. Tarkastelu rakenteen sisäpuolelta. (Saarela 2018)

Ero etelä- ja pohjoisseinän rakenteen kosteuspitoisuudessa (%) rakenteen ulkopuolelta tarkasteltaessa on nähtävissä kuvan 107 mittauspisteissä 3 ja 4. Myös ulkopuolelta tarkasteltaessa korkeampi suhteellinen kosteus oli pohjoisseinällä sekä molempien seinämien alaosissa. Pohjoisseinällä ero ylä- ja alaosan välillä ei ollut niin huomattava, kuin eteläseinällä.



Kuva 107. Rakenteen kosteuspitoisuuden (%) kuukausittainen keskiarvo seurantajaksolla eri mittauspisteissä. Tarkastelu rakenteen ulkopuolelta. (Saarela 2018)

6.3.2. Painumamittaukset

Koetalon painumamittausten tarkoituksena oli tarkastella pilotin ajanjakson (kesäkuu 2017-kesäkuu 2018) aikana tapahtunutta painumaa ja verrata sitä perinteisen hirren ja lamellihirren painumaan samassa ajassa.

Painumamittauksia suoritettiin kahdella eri tavalla, perinteisen rullamitan sekä etäisyyslaserin avulla. Rullamitalla painumaa mitattiin betonin pinnalta etelä- ja pohjoisseinillä 7,5 hirren korkeuteen sekä itä- ja länsiseinillä 8 hirren korkeuteen. Myöhemmässä vaiheessa, kun raken-

taminen eteni, tuli mittatarkkuutta heikentäviä asennuksia (mm. lattian tasoitus ja laatoitus). Etäisyyslaserilla mitattiin aluksi betonin pinnasta kattoristikon alapintaan. Myöhemmässä vaiheessa myös lasermittauksiin tuli mittatarkkuutta heikentäviä asennuksia, kuten lattian tasoitus, sisäkaton koolaus ja panelointi.

Painumamittaukset aloitettiin syyskuussa 2017. Tuolloin rullamitalla suoritettut mittaukset tehtiin eri tavalla, kuin myöhemmässä vaiheessa, joten niitä ei otettu mukaan painumamittauksiin.

Painumamittausten ensimmäiset tulokset saatiin lokakuussa. Laserilla tulokset olivat ensimmäisellä mittauskerralla -3...+2 mm. Eniten painumaa löytyi pisteistä 3 ja 9 (eteläseinän nurkat). Rullamitalla mittaukset aloitettiin uudella tavalla, joten lokakuussa sen osalta saatiin tietoon lähtömitat.

Marraskuussa painumamittaukset suoritettiin kahdesti, 3.11. painumat mitattiin rullamitalla ja 27.11. sekä rullamitalla että laserilla. Ensimmäisellä mittauskerralla rullamitalla saatiin ensimmäiset vertailtavat tulokset. 12 pisteestä mitattuna kaikissa tulos oli 0, eli rakenteessa ei havaittu painumaa. Toisella mittauskerralla rullamitalla mitatut painumat olivat 0...-4 mm. Lasermittauksissa painumaksi mitattiin +3...-5 mm. Suurimmat painumat (5 mm) mitattiin pisteistä 5 (joka sijaitsee keskellä taloa) ja 9 (joka sijaitsee etelä- ja länsiseinien liittymäkohdassa).

Joulukuun mittauksissa laserilla tulokset osoittivat millimetrin heittoja marraskuun mittauksiin verrattuna yhtä poikkeusta lukuun ottamatta. Pisteessä 5 (keskellä taloa) mitattiin painumaksi -7 mm, joka on 2 mm enemmän kuin edelliskuussa. Rullamitalla mitattuna painumat olivat lähes täysin samat kuin edellisellä mittauskerralla.

Tammikuun mittaukset osoittivat, että lasermittauksen perusteella painumaa oli syntynyt kuukauden aikana 0–2 mm ja rullamittauksella 0–2 mm. Kokonaispainumat olivat tammikuun mittauksessa 0–7 mm. Keskimääräinen painuma oli tuolloin 2 mm.

Helmikuun painumamittauksissa oli suuria heittoja. Lasermittauksissa todettiin 2–8 mm painumaa, mutta rullamitalla painumia ei käytännössä ollut ollenkaan. Todennäköisenä syynä lasermittauksen antamista suurista painumista oli osittainen mittauspisteiden siirtyminen ja kattopaneelin sekä osittaisen keittiön laatoituksen asennus aiemmin helmikuussa. Rakentamistoimenpiteiden (katossa koolausrimat ja paneeli, lattiaa hiottu, keittiöön asennettu osittain laatoitusta) vuoksi mittatarkkuus oli heikentynyt. Lisäksi kolme mittauspistettä oli kalusteiden väliaikaisen varastoinnin takia mahdotonta mitata.

Painumamittaukset suoritettiin maaliskuussa kaikista pisteistä, paitsi aiemmin mahdottomiksi osoittautuneiden pisteiden (7, 17, 18) kohdalta. Lisäksi maaliskuussa ei kyetty mittaamaan painumia pisteistä 9, 20 ja 21. Syynä tähän oli aiemmin tehty keittiökaluisten asennus. Mittaustuloksia tarkasteltaessa huomataan, että painumaa ei ollut edelliseen mittauskertaan verrattuna käytännössä ollenkaan. Joissain pisteissä oli yhden tai kahden millin painumaa, mutta lähes kaikki olivat samoissa lukemissa, kuin helmikuussa.

Huhtikuussa painumaa mitattiin ainoastaan pisteistä 10–15 ja 19. Kuukauden takaisista mittauksista painumaa oli tullut lisää 0–1 mm kussakin pisteessä.

Painumamittausten osalta viimeinen mittauskerta oli toukokuun lopussa 2018. Rakentamisen aikana mittauspisteiden kohdalla on tapahtunut muutoksia, joiden takia painumaa ei osittain

pystytty mittaamaan tai mittatarkkuus heikentyi. Ensimmäisenä mittatarkkuutta heikentävänä asiana esiintyi marraskuussa 2017 kattoon asennettu ilmansulkupaperi sekä koolausrimat. Mittauspisteitä siirtämällä koolausrimojen vuoksi tuleva mittatarkkuuden heikentymä olisi voinut estää, mutta toisaalta siinä vaiheessa mittatarkkuus olisi heikentynyt betonin mahdollisen epätasaisuuden vuoksi. Helmikuussa koetalolle asennettiin kattopaneeli, jonka paksuus oli 8 mm ja keittiökalusteiden kohdalle laatoitus, jonka arvioitu paksuus oli keskimäärin 10 mm. Eri-tyisesti laatoituksen kohdilla (pisteet 9, 20 & 21) painumamittaukset alkoivat tuossa vaiheessa olla hyvinkin epäluotettavia. Lisäksi tuolloin pisteet 4 ja 16 jäivät lämminvesivaraajan alle. Niitä pisteitä siirrettiin hieman, jolloin painuma saatiin mitattua. Olohuoneessa pisteitä 7, 17 ja 18 ei pystynyt mittaamaan kalusteiden ollessa tiellä. Maaliskuussa asennetut keittiökalusteet peittivät pisteet 9, 20 ja 21 sekä makuuhuoneissa lattian tasoite peitti pisteet 1–3 ja 11–15. Huhtikuun mittauksiin pisteissä 11–15 tuloksiin otettiin huomioon noin 5 mm paksu tasoite + lattiamateriaali.

Huhtikuun ja toukokuun aikana esiintyneiden liiallisten muuttujien takia seuraavana esitettävissä lopullisissa painumissa loppumitaksi on merkitty muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta maaliskuussa mitatut arvot. Mittausajanjaksoksi jäi näin ollen lasermittaustavalla seitsemän (7) kuukautta ja rullamittaustavalla kuusi (6) kuukautta.

Taulukko 21. Lopulliset painumat eri pisteissä (etäisyyslasermittaus)

Mittaus-piste	Alkumitta (mm)	Loppumitta (mm)	Painuma (mm)	Painuma/korkeusmetri (mm)
1	2655	2651	- 4	2
2	2659	2655	- 4	2
3	2653	2646	- 7	3
4	2658	2659	+ 1	0
5	2657	2647	- 10	4
6	2654	2647	- 7	3
7	2659	2656*	- 3	1
8	2656	2653	- 3	1
9	2653	2650**	- 3	1

(* = viimeisin saatu mitta tammikuulta)

(** = viimeisin saatu mitta helmikuulta)

Taulukko 22. Lopulliset painumat eri pisteissä (rullamittaus)

Mittaus-piste	Alkumitta (mm)	Loppumitta (mm)	Painuma (mm)	Painuma/korkeusmetri (mm)
1	1595	1595	0	0
2	1591	1586	- 5	3
3	1700	1965	- 5	3
4	1707	1703	- 4	2
5	1704	1701	- 3	2
6	1597	1594	- 3	2
7	1605	1601	- 4	2
8	1603	1601*	- 2	1
9	1700	1699*	- 1	1
10	1695	1695	0	0
11	1697	1699**	+ 2	0
12	1596	1592**	- 4	3

(* = viimeisin saatu mitta tammikuulta)

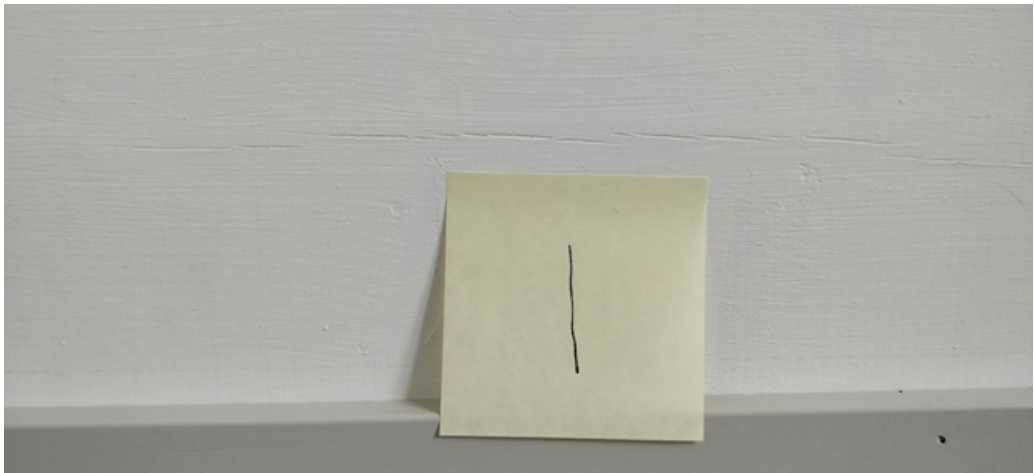
(** = viimeisin saatu mitta helmikuulta)

6.3.3. Halkeilu

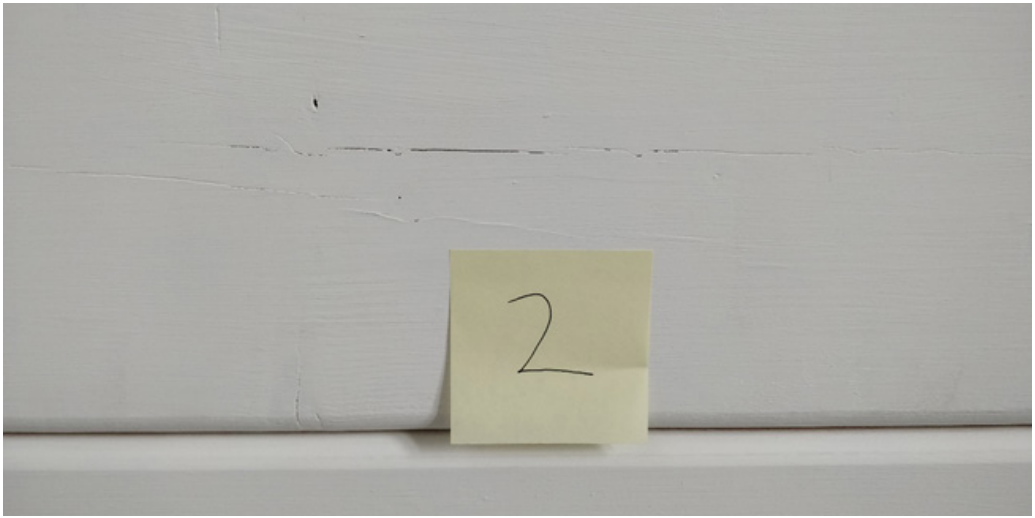
Rakenteen halkeilu seurantajakson aikana dokumentoitiin kuvaamalla rakenteessa havaitut muutokset. Ulkopuolella halkeilun suuruutta ei määritetty, mutta sisäseinien kuviin on merkitty halkeilun suuruus alla olevan taulukon mukaisesti.

Taulukko 31. Halkeilun luokitteluasteikko

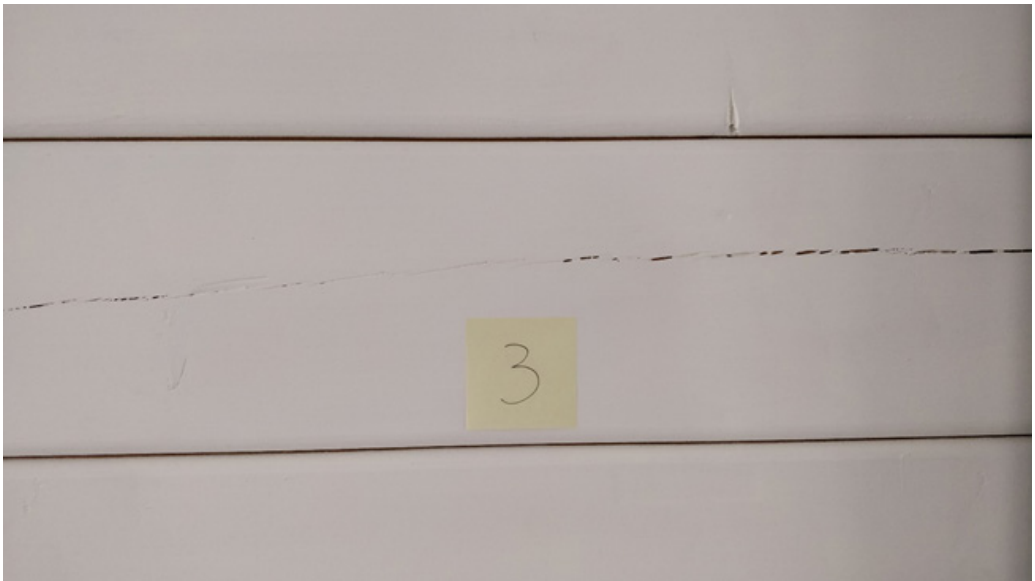
1	minimaalinen halkeama, ei auki
2	pieni halkeama, auki
3	suuri halkeama, selvästi auki



Kuva 108. Halkeamien luokitus – halkeama-arvo 1 (Hyvärilä 2018)



Kuva 109. Halkeamien luokitus – halkeama-arvo 2 (Hyvärilä 2018)



Kuva 110. Halkeamien luokitus – halkeama-arvo 3 (Hyvärilä 2018)

Kuvissa 111–112 on nähtävissä, että auringonsäteily rasittaa rakennuksen idän ja etelän puoleisia seiniä. Seinän alaosat ovat suuremmassa kuormituksessa.



Kuva 111. Auringonsäteilyn rasitus eteläseinällä (Hyvärilä 2018)



Kuva 112. Auringonsäteilyn rasitus itäseinällä (Hyvärilä 2018)

Ulkopuolella hirret halkeilivat tasaisesti. Eri seinien suurimmat halkeamat ulkopuolella on esitetty kuvissa 113–119.



Kuva 113. Eteläseinän suurimpia halkeiluja (Hyvärilä 2018)



Kuva 114. Eteläseinän suurimpia halkeiluja (Hyvärilä 2018)



Kuva 115. Itäseinän suurimpia halkeiluja (Hyvärilä 2018)



Kuva 116. Itäseinän suurimpia halkeiluja (Hyvärilä 2018)



Kuva 117. Pohjoisseinän suurimpia halkeiluja (Hyvärilä 2018)



Kuva 118. Länsiseinän suurimpia halkeiluja (Hyvärilä 2018)



Kuva 119. Länsiseinän suurimpia halkeiluja (Hyvärilä 2018)



Kuva 120. Ensimmäisen makuuhuoneen eteläpuoleinen seinä (Hyvärilä 2018)



Kuva 121. Ensimmäisen makuuhuoneen idänpuoleinen seinä (Hyvärilä 2018)



Kuva 122. Toisen makuuhuoneen pohjoispuoleinen seinä (Hyvärilä 2018)



Kuva 123. Toisen makuuhuoneen idänpuoleinen seinä (Hyvärilä 2018)



Kuva 124. Olohuoneen pohjoispuoleinen seinä (Hyvärilä 2018)



Kuva 125. Keittiö-olohuoneen lännenpuoleinen seinä (Hyvärilä 2018)

6.4. Pohdinta

Pilotin suurimpina tavoitteina oli tutkia CLT-hirsirakenteen painumista sekä kosteuspitoisuutta. Tavoite oli suorittaa mittauksia vähintään vuoden ajan, mutta erinäisistä aikatauluongelmista johtuen rakenteen painumaa mitattiin lopulta 9 kuukauden ajalta ja kosteuspitoisuutta (sekä sisä- ja ulkoilman olosuhteita) 10 kuukautta.

Kosteuspitoisuutta mitannut laitteisto toimi hyvin. Vaikka laitteistolla oli ajoittaisia, välillä jopa toista viikkoa pitkiä yhteysongelmia, kyettiin data silti saamaan ulos sensorien sisäisen muistintallennuksen ansiosta. Kosteuspitoisuutta mittaavien sensorien (S-16) kiinnitysruuvien pituus oli muutamassa pisteessä muista eroava ja sen voikin tulosten perusteella osittain vaikuttaneen kosteuspitoisuuden tuloksiin. Eteläseinälle asennetuista sensoreita pisteissä 1 ja 2 käytettiin 120 mm pitkä ruuvia, joka mittasi kosteuspitoisuutta noin 75 mm syvyydeltä hirren pinnasta. Muissa pisteissä ruuvien pituus oli 80 mm ja mittauspiste oli noin 35 mm syvyydellä hirren pinnasta.

Pisteet 1 ja 3 olivat samalla korkeudella eteläseinällä, osittain auringonpaisteelta suojassa räystäään alla, joten niiden antamilla tuloksilla pystyttiin vertailemaan ruuvien pituuden (mittauspisteen syvyyden hirren pinnasta) vaikutusta tuloksiin. Tuloksia tarkkailemalla niistä nähdään, että pidemmällä ruuvilla asennettu sensori (piste 1) antoi joka kuukauden aikana esimerkiksi puun kosteuspitoisuudessa korkeampia arvoja, kuin lyhyemmällä ruuvilla asennettu sensori (piste 3).

Rakenteiden kosteuspitoisuus ei noussut mittausajanjaksolla liian korkeaksi. Ulkopuolen mittauspisteissä kosteuspitoisuus oli koko mittausajanjaksolla 10,5–18,5 % välillä (päiväkeskiarvo). Sisäpuolen mittauspisteissä kosteuspitoisuus oli koko mittausajanjaksolla 9,9–15,4 % välillä (päiväkeskiarvo). Suositeltavat kosteuspitoisuudet käyttökohteen mukaan ovat: runko <24 %, ulkoverhous <18 %, sisäverhous <16 %) ja lattiaverhous <10 % (Puuinfo Oy 2011.). Tämän ohjeistuksen mukaan kosteuspitoisuus pysyy tarvittavan alhaisissa lukemissa, kun rakennetta kä-

sitellään runkona. Hirren kosteus vakautuu sisätiloissa vajaan 10 prosenttiin ja ulkoseinissä noin 14 prosenttiin. (Puuinfo Oy 2018.)

Painumaa esiintyi suoraan seinärakennetta tarkasteltaessa (rullamittaus) 0–3 mm/korkeusmetri puolen vuoden ajalta. Kun painuman oletetaan jatkuvan vielä ainakin vuoden ja sen ollessa suurimmillaan ensimmäisen kahden vuoden aikana, voi lopullista painumaa olla vähintäänkin useampi millimetri korkeusmetriä kohden ja joissain pisteissä jopa enemmän kuin lamellihirsissä esiintyvä 10 mm painuma korkeusmetriä kohden. Painuman tarkkailua on syytä jatkaa ainakin vuoden ajan, jonka jälkeen painuma hidastuu ja mahdollisesti pysähtyy. Silloin on mahdollista saada selkeää tietoa CLT-hirren painumisesta.

LÄHTEET

1. HR PROF Oy. 2019. Saatavissa: <http://hrprof.eu/tuotteet/>. Viitattu 6.2.2019.
2. Nordtreat AS. 2019. Saatavissa: <https://www.nordtreat.com/fi/palonsuoja-aineet/nt-deco>. Viitattu 6.2.2019.
3. OmniSense LLC. 2018a. G-3 Wireless Gateway. Saatavissa: <https://shop.omnisense.com/g-3-wireless-gateway-with-cellularoptional-wifi-and-ethernet>. Viitattu 5.6.2018.
4. OmniSense LLC. 2018b. S-2 Wireless Sensor. Saatavissa: <https://shop.omnisense.com/s-2-wireless-sensor-with-2-ports-for-t-and-rh-wme-socket-and-64k-reading-datalogging-memory-03c2orh>. Viitattu 5.6.2018.
5. OmniSense LLC. 2018c. S-16 Wireless Sensor. Saatavissa: <https://shop.omnisense.com/s-16-wireless-t-rh-wme-sensor-with-64k-reading-datalogging-memory>. Viitattu 5.6.2018.
6. Puuinfo Oy. 2018. Hirsitalon suunnittelu. Saatavissa: <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puurakenteet/hirsitalon-suunnittelu>. Viitattu 5.6.2018.
7. Puuinfo Oy. 2011. Puun kosteuskäyttäytyminen. Saatavissa: https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/kysymyksiä-ja-vastauksia/puun_kosteuskayttaytyminen_lattia.pdf. Viitattu 7.2.2019.
8. Renotech Oy. 2014. B-s1, do –luokan puunsuoja. Saatavissa: <https://docplayer.fi/20249864-Www-renotech-fi-b-s1-do-luokan-puunsuoja.html>. Viitattu 6.2.2019.
9. SFS-EN 310. 2001. Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
10. SFS-EN 1026. 2016. Windows and doors. Air permability. Test method. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
11. SFS-EN 1027. 2016. Windows and doors. Water tightness. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
12. SFS-EN 12152. 2002. Curtain walling. Air permeability. Performance requirements and classification. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
13. SFS-EN 12154. 2001. Curtain walling. Watertightness. Performance requirements and classification. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
14. Teknos Oy. 2017. Teknosafe 2457-00 palosuojamaali. 2017. Saatavissa: https://www.teknos.com/globalassets/inriver/resources/fi_2457-00_1.pdf. Viitattu 6.1.2019.
15. TTY & VTT. 2018. Suomalainen homemalli. Excel-tiedosto. Saatavissa: <http://www.tut.fi/fi/tutkimus/tutkimusalat/rakennustekniikka/rakennetekniikka/rakennusfysiikka/suomalainen-homemalli/index.htm>. Viitattu 5.6.2018.
16. VTT. 2018. Lämmöntuoton ja savuntuoton mittaus kartiokalometrillä ISO 5660. Saatavissa: <http://www.vttexpertservices.fi/Pages/L%C3%A4mm%C3%B6n-ja-savuntuoton-mittaus-kartiokalometrill%C3%A4-ISO-5660-1-ja--.aspx>. Viitattu 23.1.2018.
17. VTT. 2010. Palosuojattujen rakenteiden pitkäaikaiskestävyys. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2010/W146.pdf>. Viitattu 22.2.2018.

KUVALUETTELO

[1], [15] – [16], [102] – [107]	Saarela Elisa, Centria-ammattikorkeakoulu, 2017
[2] – [12], [34] – [39], [48] – [56], [60] – [62], [66] – [101], [108] – [125]	Hyvärilä Jari, Centria-ammattikorkeakoulu, 2017 & 2018
[13] – [14], [18], [40]	Suomen standardisoimisliitto SFS
[17], [19] – [27], [32] – [33], [41] – [47]	Myllyniemi Arto, Centria-ammattikorkeakoulu, 2018
[19] – [27]	Savonia ammattikorkeakoulu, materiaalitestausta, 2018
[28] – [31]	Mattila Pauliina, Centria-ammattikorkeakoulu, 2017
[57]	Pohjan Timber-hirsi Oy, 2017
[58] – [59]	OmniSense LLC, 2018
[63] – [65]	mukaillen Pohjan Timber-hirsi Oy, 2017

CLT:N KÄYTÖN LISÄÄMINEN NOPEIDEN KOKEILUJEN AVULLA

Tämä tutkimus oli osa kansainvälistä Future possibilities for CLT -hanketta. FCLT-hanke oli Euroopan aluekehitysrahasto Interregin rahoittama kansainvälinen hanke, jonka toimialueena oli Suomen ja Ruotsin pohjoisosat. Hankkeen tavoitteena oli lisätä CLT:n (Cross Laminated Timber) ja yleisesti puun monipuolista käyttöä rakentamisessa hankkeen toimialueella. Hankkeen kokonaisbudjetti oli 1,3 miljoonaa euroa ja siinä olivat mukana Centria Tutkimus ja kehityksen lisäksi Kemlin Digipolis Oy, Lapin ammattikorkeakoulu Oy, Luulajan teknillinen yliopisto (SE) ja Ruotsin tekninen tutkimuslaitos RISE (SE). Hankeaika oli 1.9.2015–30.6.2018. Tässä raportissa on esitelty hankkeessa suoritettuja nopeita kokeiluita sekä toimintamallia, jonka avulla kokeiluja vietiin eteenpäin.

Hankkeen tavoite oli tukea yritysten nopeita tuotekehitysprojekteja ja madaltaa kynnystä kokeilla CLT-materiaalia. Nopean kokeilun toimintamallia kehitettiin ja sovellettiin koko hankkeen toteutuksen ajan. Nopean kokeilun toimintamallin haaste on kesken­eräisyyden ja epäonnistumisen sietäminen. Tavoite oli nopealla syklillä saavuttaa selkeä näkemys siitä, onko kokeiluun kannattavaa panostaa lyhyttä kokeilua enemmän ja näin säästää resursseja.

Centria. Raportteja ja selvityksiä, 39

ISBN 978-952-7173-47-3 (PDF)

ISSN 2342-933X