



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

RAKENNUSTEKNIikka

TUTKIMUSSELOSTUS NRO RTEK/2538/2018

PAINUMAONKALOIDEN VAIKUTUS PUUKUITUERISTEISEN YLÄPOHJARAKENTTEEN LÄMMÖNERISTÄVYYTEEN

18.7.2018



Tampere 2018

Tutkimusselostus Nro 2538

9 sivua + 6 liitesivua

Tilaaja	LÄSÄ-lämmönsäästäjät Oy Lasse Laulainen Saikkosentie 7 A 3, 40250 Jyväskylä	
Tehtävä	Tutkimusselostuksessa tarkastellaan puukuitueristeiseen yläpohjarakenteeseen kattoristikoiden vinosauvojen alle syntyvien painumaonkaloiden vaikutusta rakenteen lämmöneristävyyteen ja lämpötilakenttiin.	
Tutkimusaika	01.11.2017 – 31.1.2018	
Tutkijat	Henna Kivioja, Projektitutkija, Diplomi-insinööri Juha Vinha, Professori, Tekniikan tohtori Tampereen teknillinen yliopisto Rakennustekniikka PL 600 33101 Tampere Puh. (03) 3115 11 (vaihde)	
Jakelu	LÄSÄ-lämmönsäästäjät Oy TTY/Rakennustekniikka Tutkijat	1 kpl + pdf 1 kpl 1 kpl

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



PAINUMAONKALOIDEN VAIKUTUS PUUKUITUERISTEISEN YLÄPOHJARAKENTTEEN LÄMMÖNERISTÄVYYTEEN

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	3
1.1	Tutkimuksen kuvaus	3
1.2	Tutkimusmenetelmän kuvaus	3
2	TUTKITTAVA RAKENNE JA TUTKIMUKSEN SUORITUS	3
2.1	Tutkittava rakenne	3
2.2	Tutkimuksen suoritus	4
3	TULOKSET	5
3.1	U-arvot	5
3.2	Lämpötilajakaumat	6
4	JOHTOPÄÄTÖKSET	7
	LÄHTEET	



1 JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen kuvaus

Puukuitupuhalluseriste painuu eristämisen jälkeen yläpohjarakenteessa, mikä aiheuttaa painumaonkaloita kylmäsiltoina toimivien kattoristikoiden vinosauvojen alle. Painumaonkalot heikentävät yläpohjan lämmöneristävyttä ja voivat lisätä myös eristeen sisällä tapahtuvaa sisäistä konvektiota. Lisäksi painumaonkalot voivat heikentää rakenteen kosteusteknistä toimintaa, jos rakenteen läpi tapahtuu ilmavirtauksia sisältä ulospäin.

Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laboratoriossa on määritetty puukuitupuhalluseristeiselle yläpohjarakenteelle kokeellisesti U-arvoja erilaisissa olosuhteissa. Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu, kuinka eristeeseen syntyvät painumaonkalot vaikuttavat rakenteen lämmöneristävyyteen ja lämpötilakenttiin mittaamalla U-arvot uudelleen painumaonkalotilanteessa sekä tarkastelemalla eristeessä ja kattotuoleissa lämpötilojen muutoksia. Tässä lausunnossa kuvataan lyhyesti tutkitut rakenteet ja tutkimusmenetelmät sekä todetaan tutkimusten tulokset.

1.2 Tutkimusmenetelmän kuvaus

U-arvotutkimukset tehtiin TTY:n yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisella tutkimuslaitteistolla. Koerakenteen U-arvon määrittämisessä käytettiin standardin SFS-EN ISO 8990 mukaista kalibroidun lämmönläpäisylaitteen (calibrated hot box) mittausselostusta /2/. Menetelmässä tutkittava koe-elementti asetetaan lämpimän ja kylmän kammion väliseen tutkimusaukkoon ja määritetään koe-elementin läpi kulkeva lämpövirta. Menetelmä vaatii tutkimuslaitteiston kalibroinnin ennen varsinaisten kokeiden suorittamista. Lämpimän kammion tavoitelämpötilana käytettiin 20 °C ja kylmän kammion -15 °C, jolloin lämpötilaero kammioiden välillä oli 35 °C ±0,2 °C. Liitteessä 3 on esitetty periaatekuvia sekä valokuvia yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisesta tutkimuslaitteistosta. Lisätietoa tutkimusmenetelmästä sekä tutkimuslaitteistosta on mahdollista lukea TTY:llä tehdystä diplomityöstä /1/.

2 TUTKITTAVA RAKENNE JA TUTKIMUKSEN SUORITUS

2.1 Tutkittava rakenne

Tutkittava rakenne koostui 600 mm puukuitueristekerroksesta ja k900-jaolla olevista kattoristikoiden osista. Kattoristikoiden alla oli höyrynsulkumuovi sekä vesivaneri. Laitteiston tutkimusaukon pituus on noin 2730 mm, joten tutkittavassa rakenteessa oli mukana 3 kattoristikon osaa. Kattoristikon osat sijoitettiin tutkimusaukkoon niin, että reunoille jäi lämmöneristettä noin puolet ristikkojen k-jaon leveydestä. Tutkimuslaitteiston tutkimusaukko on noin 30 mm pidempi, kuin kolmen kattotuolin väli (2700 mm), mutta tällä erolla ei ole merkittävää vaikutusta U-arvojen mittaustuloksiin. Koetulokset vastaavat siten rakenteen U-arvoa kattoristikoiden k900 jaolla. Rakenteen periaatepiirroksien sekä kuvia rakenteesta on esitetty liitteestä 1.

Eristeenä tutkittavassa rakenteessa käytettiin puukuitupuhalluseristettä, joka voi painua jopa 20 % alkupuhalluskorkeudesta. TTY:llä tehtyjen lämmönjohtavuusmittausten perusteella

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



tutkimuksessa käytetyn puukuitupuhalluseristeen lämmönjohtavuus oli 0,0398 W/(mK) 2,5 °C:en keskilämpötilassa.

Rakenne sisältä ulospäin oli seuraava:

- 20 mm Filmipinnoitettu vesivaneri
- Höyrynsulkukalvo
- 600 mm Puukuitueriste (puhallettu) + kattoristikot k900

Tuuletetussa puurakenteisessa yläpohjassa on yleensä höyrynsulkukalvon alla myös ohut ilmapäli, joka parantaa hieman rakenteen U-arvoa. Tutkittavassa rakenteessa ei ollut ilmapäliä, mutta tämä ei vaikuta eristeessä tapahtuvien painumien aiheuttamaan lisälämmönhukkaan.

Lämpötilakenttien mittaamiseksi lämpötila-antureita asennettiin sekä kattotuoleihin, että eristekerroksen sisälle eri korkeuksille. Kattotuoleissa olevat lämpötila-anturit sijoitettiin vanerin yläpinnasta lukien korkeuksille 50 mm, 235 mm ja 420 mm. Kattoristikoiden alapaarteissa ja vinosauvoissa anturit kiinnitettiin puuosien sivuihin, joten kaikki anturit olivat eristekerroksen sisällä myös painumaonkalotilanteessa. Eristekerroksen sisällä olevia antureita asennettiin korkeuksille 235 mm ja 420 mm. Kuvia lämpötila-antureiden sijoittelusta on esitetty liitteessä 1.

2.2 Tutkimuksen suoritus

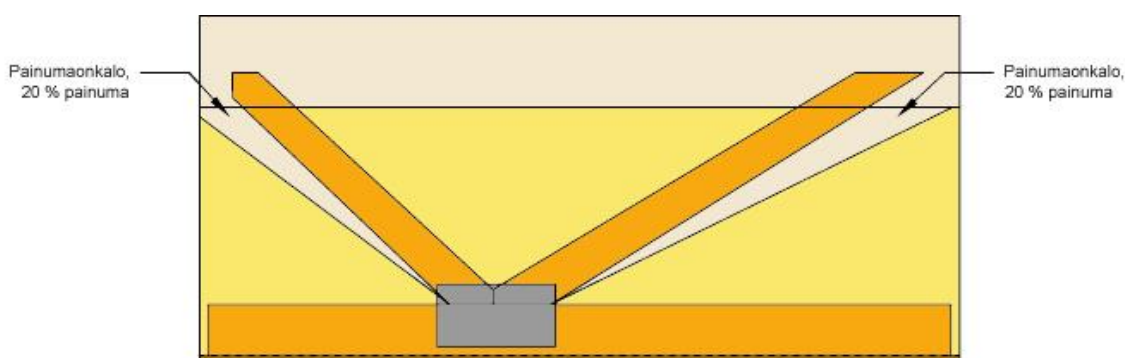
Kokeiden kalibrointi suoritettiin 600 mm XPS-eristekerroksella. XPS-eristeiden lämmönjohtavuus mitattiin LaserComp304-laitteella, jotta lämmönjohtavuus tunnettaisiin mahdollisimman tarkasti. Kalibroinnin jälkeen puukuitueriste puhallettiin puhalluskoneella laitteiston tutkimusaukkoon ensin 300 mm paksuiseksi kerrokseksi ja sen jälkeen 600 mm paksuiseksi kerrokseksi. Koko eristekerroksen keskimääräinen tiheys jälkimmäisen puhalluksen jälkeen oli noin 40 kg/m³.

TTY:llä käynnissä olevaa COMBI-tutkimushanketta varten tehtiin aluksi mittauksia normaalisti eristetyllä 600 mm paksuisella puukuitueristekerroksella. Tämän tutkimushankkeen vertailukohtana käytettiin 35 °C:een lämpötilaerolla tehtyjä mittauksia. Vertailumittauksia tehtiin kahdella eri tapauksella, joissa tuuletustilan ilmapvirtaus lämmönneristeen yläpuolella vastasi lähes tuulettumatonta tilannetta (n. 0 m/s) ja runsaasti tuulettuvaa tilannetta (n. 0,6 m/s). Tuuletustilan ilmapvirtaus luotiin tutkimuslaitteistoon kanavapuhaltimilla, jotka puhalsivat eristeen pinnan suuntaisesti noin 250 mm eristeen pinnan yläpuolella. Ilmapvirran nopeus mitattiin laitteiston keskiosasta yhdellä kuumalanka-anemometrillä.

Normaalitilanteen mittausten aikana laitteistoon puhallettu puukuitueriste painui n. 1–4 cm mittauskohdasta riippuen. Painuma oli 600 mm eristekerroksella alle 1 % kaikissa kohdissa. Normaalitilanteen mittausten jälkeen kattotuolien vinosauvojen alle tehtiin mekaanisesti painumaonkalot oletuksella, että eriste olisi painunut 20 % vinosauvojen alla. Onkalot tehtiin kiiloilla, jotka työnnettiin varovasti vinosauvojen alle pitämällä niitä vinosauvaa vasten kiiloihin kiinnitettyjen siimojen avulla. Kiilat valmistettiin puusta ja päällystettiin alumiiniteipillä, jotta kitka kiilan ja eristeen välille saatiin mahdollisimman pieneksi. Kiilat oli katkaistu osiin, jotka työnnettiin peräkkäin eristeen sisään. Kuvia kiiloista sekä niiden asennuksesta on esitetty liitteessä 2. Kuvassa 1 näkyy periaate tehdyistä painumaonkaloista.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



Kuva 1. Puukuitueristeisessä yläpohjassa ajan myötä kattoristikoiden alle syntyvät painumaonkalot.

Yläpohjarakenteen lämmönläpäisykokeet suoritettiin painumaonkaloiden tekemisen jälkeen uudelleen 35 °C:een lämpötilaerolla n. 0 m/s ja n. 0,6 m/s tuuletusilmavirran nopeuksilla. Seuraavassa kappaleessa on esitetty mittausten tuloksia.

3 TULOKSET

3.1 U-arvot

Taulukossa 1 on esitetty eri koetilanteille mitatut U-arvot sekä standardin SFS-EN ISO 6946 /3/ mukaan laskettu U-arvo, joka vastaa myös Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C4 luonnososan /4/ mukaan laskettua U-arvoa. U-arvon laskennassa on otettu huomioon sekä kattoristikon alapaarten että vinosauvojen kylmäsilta-vaikutukset. Ilmaraoista johtuvaa korjaustekijää ei ole otettu huomioon U-arvoa laskettaessa. Laskennassa käytetyt materiaalien lämmönjohtavuudet on mitattu kokeessa käytetyistä materiaaleista siinä keskilämpötilassa, jossa materiaalit olivat rakenteessa. U-arvot on ilmoitettu myös standardin SFS-EN ISO 6946 mukaisesti kahden merkitsevän numeron tarkkuudella. Tutkimuslaitteiston kokonaismittausepävarmuutena voidaan pitää ± 5 %.

Taulukko 1. Eri koetilanteille mitatut lämpövirrat rakenteen läpi sekä U-arvot 600 mm paksulle eristekerrokselle. Mittaustulosten perusteella määritetyissä U-arvoissa on käytetty rakenteen sisä- ja ulkopinnan pintavastuksina standardin SFS-EN ISO 6946 /3/ mukaisia pintavastusten arvoja (yhdistetty arvo 0,14 m²K/W). Taulukossa on ilmoitettu myös SFS-EN ISO 6946 mukaan laskettu rakenteen laskennallinen U-arvo.

Mittaustapaus	Lämpötilaero (°C)	Tuuletusvälin ilmavirtaus (m/s)	Lämpövirta rakenteen läpi (W)	Tarkka U-arvo (W/(m ² K))	Virallinen U-arvo (W/(m ² K))
Normaali IV0	34,8	< 0,01	14,05	0,0812	0,081
Normaali IV0,6	34,9	0,7	13,28	0,0762	0,076
Painumaonkalot IV0	34,9	0,04	14,53	0,0839	0,084
Painumaonkalot IV0,6	35,1	0,5	13,47	0,0769	0,077
Laskenta (SFS-EN ISO 6946)	35,0	-	12,86	0,0730	0,073

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

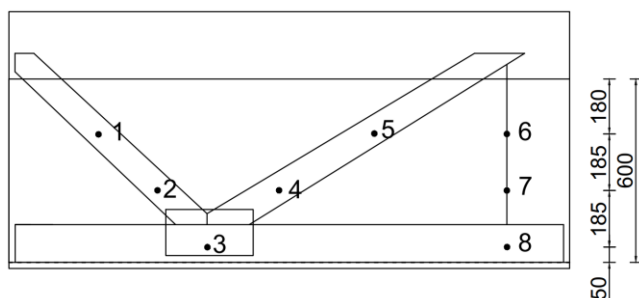


Ilman painumaonkaloja tehdyssä yläpohjarakenteessa mitattu lämpövirta rakenteen läpi oli suurempi kuin laskennallinen lämpövirta. Tämä johtuu lämmöneristekerroksessa tapahtuvasta sisäisestä konvektiosta. U-arvojen perusteella laskettuna sisäisen konvektion aiheuttama lisäys lämpövirtaan oli lähes tuulettumattomassa tapauksessa keskimäärin 13,1 % ja runsaan tuuletusilmavirran tapauksessa 4,9 %.

Mittaustuloksista laskettujen U-arvojen perusteella painumaonkalot lisäsivät lämpövirtaa rakenteen läpi 3,4 % lähes tuulettumattoman ilmavälin tapauksessa ja 0,9 % runsaasti tuulettun ilmavälin tapauksessa. Painumaonkaloista johtuvan lämpövirran lisäyksen voidaan olettaa vaihtelevan yläpohjassa näiden arvojen välillä.

3.2 Lämpötilajakaumat

Kuvassa 2 on esitetty kattoelementtien kohdalla olleiden antureiden paikat ja numerot. Mittauspisteet 6 ja 7 sijaitsivat kattoristikoiden kohdalla lämmöneristekerroksessa. Lämpötilaerot on määritetty tasaantuneessa koetilanteessa 6 tunnin keskiarvona. Taulukossa 2 on esitetty vaihteluväli, joka kertoo, kuinka paljon painumaonkalotilanteessa lämpötilat ovat eronneet normaalin tilanteen lämpötiloista. Taulukon vertailussa on mukana kaikkien kolmen kattoristikoiden lämpötila-antureiden tulokset.



Kuva 2. Lämpötila-antureiden numerointi kattoristikoiden kohdalla.

Taulukko 2. Kattoristikoiden kohdalla olevien lämpötila-antureiden mittaustulosten keskiarvojen vaihteluväli, joka kertoo, kuinka paljon lämpötila painumaonkalokokeessa on eronnut vastaavan normaalin kokeen lämpötilasta. Miinusmerkki tarkoittaa, että lämpötila on ollut mittauspisteessä kylmempi painumaonkalokokeessa kuin normaalitilanteen kokeessa.

Lähes tuulettumaton tilanne		Runsaasti tuulettuva tilanne	
Anturi	Lämpötilaero (°C)	Anturi	Lämpötilaero (°C)
1	-2,23...-4,20	1	-1,80...-3,37
2	-2,27...-4,08	2	-1,03...-3,03
3	-0,99...-1,09	3	-0,60...-0,92
4	-3,02...-3,12	4	-2,76...-3,84
5	-2,39...-3,18	5	-2,47...-2,97
6	-0,88...-1,28	6	-1,12...-1,73
7	-0,41...-0,61	7	-0,59...-0,98
8	-0,05...-0,40	8	-0,11...-0,43

Taulukon 2 tuloksia tarkasteltaessa tulee huomata, että painumaonkalokokeissa kokonaislämpötilaero oli hieman suurempi kuin normaalitilanteen kokeissa (ks. taulukko 1),

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



joten mitatut lämpötilaerot ovat tästä syystä mittauspisteestä riippuen 0–0,2 °C suurempia kuin täysin vertailukelpoisessa tilanteessa. Suuremmat erot olivat lähimpänä rakenteen ulkopintaa olevissa mittauspisteissä 1, 5 ja 6. Lämpötilojen mittaustuloksia tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon, että anturien johtojen kautta tapahtui kokeissa myös lämmön johtumista, joka saattoi vaikuttaa mittaustuloksiin jonkin verran.

Lämpötilamittausten perusteella voidaan laskea myös keskimääräiset lämpötilaerot painumaonkalokokeen ja normaalin kokeen välillä. Nämä arvot on laskettu taulukkoon 3 lähes tuulettamattoman ja tuuletetun mittauksen keskiarvotuloksina kuudesta lämpötilaerosta (kolme kattoristikkoa ja kaksi tuuletustilannetta). Myös näissä tuloksissa on mukana kaikkien kolmen kattoristikon lämpötila-antureiden tulokset.

Taulukko 3. Kattoristikon kohdalla olleiden lämpötila-antureiden mittaustulosten keskimääräinen lämpötilaero painumaonkalokokeen ja normaalin kokeen välillä. Miinusmerkki tarkoittaa, että lämpötila on ollut mittauspisteessä kylmempi painumaonkalokokeessa kuin normaalitilanteen kokeessa.

Anturi	Keskimääräinen lämpötilaero (°C)
1	-2,92
2	-2,55
3	-0,89
4	-3,16
5	-2,74
6	-1,24
7	-0,63
8	-0,23

Jos lämpötila-anturit olisivat sijainneet vinosauvojen alapinnassa vastaavilla korkeuksilla lämmöneristeen alapinnasta, painumaonkalokokeen ja normaalin kokeen väliset lämpötilaerot olisivat olleet todennäköisesti vielä jonkin verran suuremmat näissä kohdissa, koska anturien ympärillä ei olisi ollut lainkaan lämmöneristettä painumaonkalokokeessa. Anturit sijoitettiin kuitenkin vinosauvojen sivupinnoille, jotta painumaonkalot saatiin tehtyä rakenteeseen kiilojen avulla.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittausten mukaan puukuitueristeen painumisesta aiheutuvat kattoristikoiden vinosauvojen alle muodostuvat painumaonkalot aiheuttavat 0,9–3,4 % lisäyksen rakenteen läpi kulkevaan lämpövirtaan, kun eriste on painunut n. 20 %. Mittaukset tehtiin lähes tuulettumattomassa tilanteessa sekä runsaasti tuulettuvassa tilanteessa, joten näiden tulosten voidaan olettaa olevan vaihteluväli rakenteen läpi siirtyvän lämpövirran lisääntymiselle.

Lähes tuulettumattomassa tilanteessa lämpövirta rakenteen läpi lisääntyi enemmän kuin tuuletetussa tilanteessa. Tämän voidaan arvioida johtuvan siitä, että tuulettumattomassa tilanteessa eristeen sisään voi muodostua häiriöttömämpi konvektiokierto kuin runsaasti tuuletetussa tilanteessa. Kun eristeen ulkopinta on runsaasti tuuletettu, eristeen pinnalla

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



virtaava ilma voi sekoittaa ilman virtausreittejä lämmöneristekerroksen yläosassa niin, että sisäisen konvektion vaikutus rakenteen läpi siirtyvään lämpövirtaan jää vähäisemmäksi.

Lämpötilamittaukset osoittivat, että painumaonkalot jäädyttävät vinosauvojen kohtia merkittävästi verrattuna normaalisti eristettyyn rakenteeseen etenkin lähempänä rakenteen ulkopintaa. Tämä lisää vinosauvojen pinnassa homehtumisriskiä ja kosteuden kondensoitumisriskiä, jos yläpohjarakenteen läpi tapahtuu ilmavirtauksia, jotka kuljettavat sisältä rakenteeseen ylimääräistä kosteutta.

LÄHTEET

- /1/ Kivioja, Henna. 2017. Tuuletetun kertopuurakenteisen kattoelementin lämpöteknisen toiminnan tutkiminen calibrated hot box -menetelmällä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 93 s. + 27 liites.
- /2/ SFS-EN ISO 8990. 1996. Thermal insulation. Determination of steady-state thermal transmission properties. Calibrated and guarded hot box. Suomen standardoimisliitto SFS. Helsinki. 24 s.
- /3/ SFS-EN ISO 6946. 2008. Rakenne- ja rakennusosat. Lämmönvastus ja lämmönläpäisykerroin. Laskentamenetelmä. Suomen standardoimisliitto SFS. Helsinki. 31 s.
- /4/ RakMK C4. 2012. Lämmöneristys Ohjeet 2012. Luonnos 16.3.2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Helsinki. 47 s.

LIITTEET

- Liite 1 Kuvia ja periaatepiirustuksia tutkitusta yläpohjarakenteesta normaalitilanteessa, 3 s.
- Liite 2 Kuvia painumaonkaloiden toteutuksesta, 1 s.
- Liite 3 Kuvia yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisesta tutkimuslaitteistosta, 2 s.



Tampere 18.7.2018

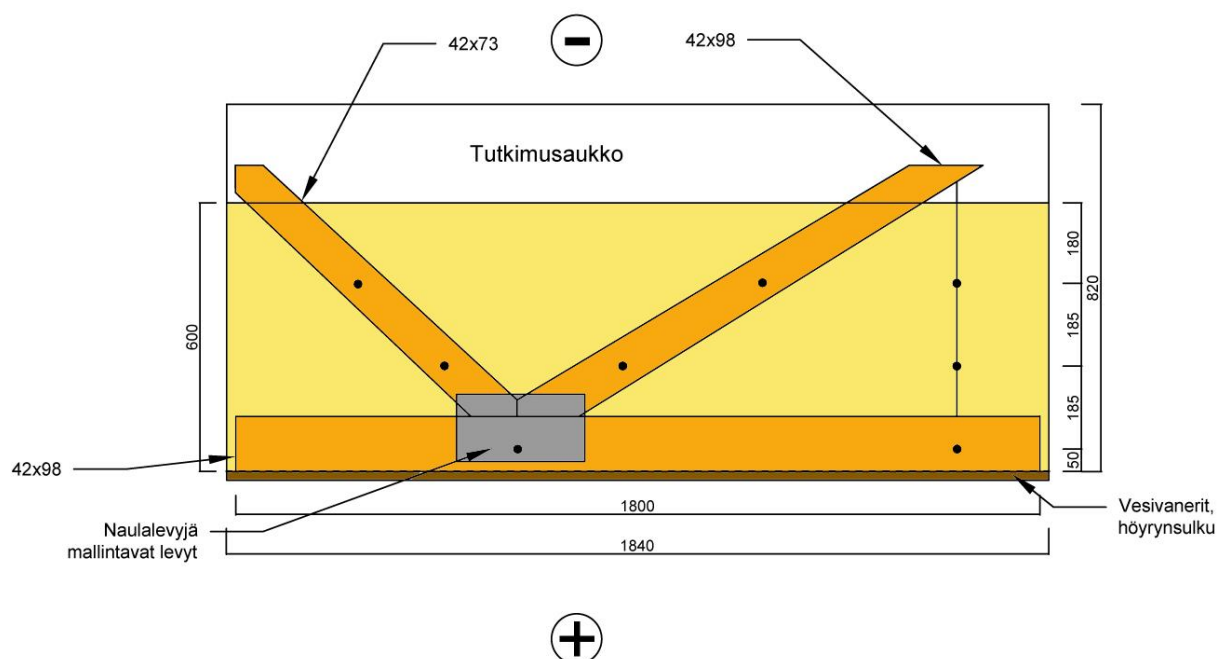
TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Rakennetekniikka

Henna Kivioja
Projektitutkija, dipl. ins.

Juha Vinha
Professori, tekn. toht.



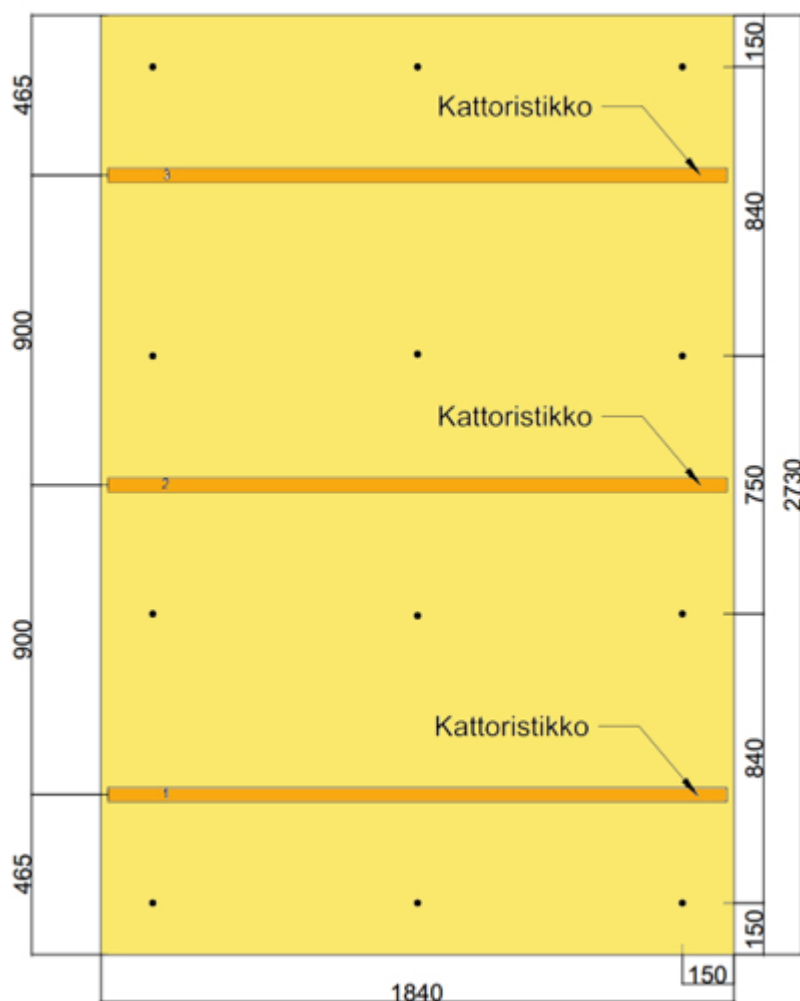
LIITE 1: Kuvia ja periaatepiirustuksia tutkittavasta yläpohjarakenteesta normaalitilanteessa



Kuva L1.1. Kuva tutkittavasta yläpohjarakenteesta, jossa on mukana kattoristikon osa. Kuvassa näkyy myös lämpötila-antureiden sijoittelu kattoristikoiden kohdalla.



Kuva L1.2. Kuva tutkittavasta rakenteesta ennen puhallusvillan asentamista laitteiston tutkimusaukkoon.



Kuva L1.3. Tasokuva tutkittavasta yläpohjarakenteesta. Lämpötiloja mitattiin mustien pisteiden kohdalta myös eristekerroksen sisältä.



Kuva L1.4. Kuva tutkittavasta yläpohjarakenteesta asennettuna tutkimuslaitteistoon. Rakenteeseen on puhallettu 600 mm puukuitueristekerros.



LIITE 2: Kuvia painumaonkaloiden toteutuksesta



Kuva L2.1. Kiilat painumaonkaloiden toteutusta varten.



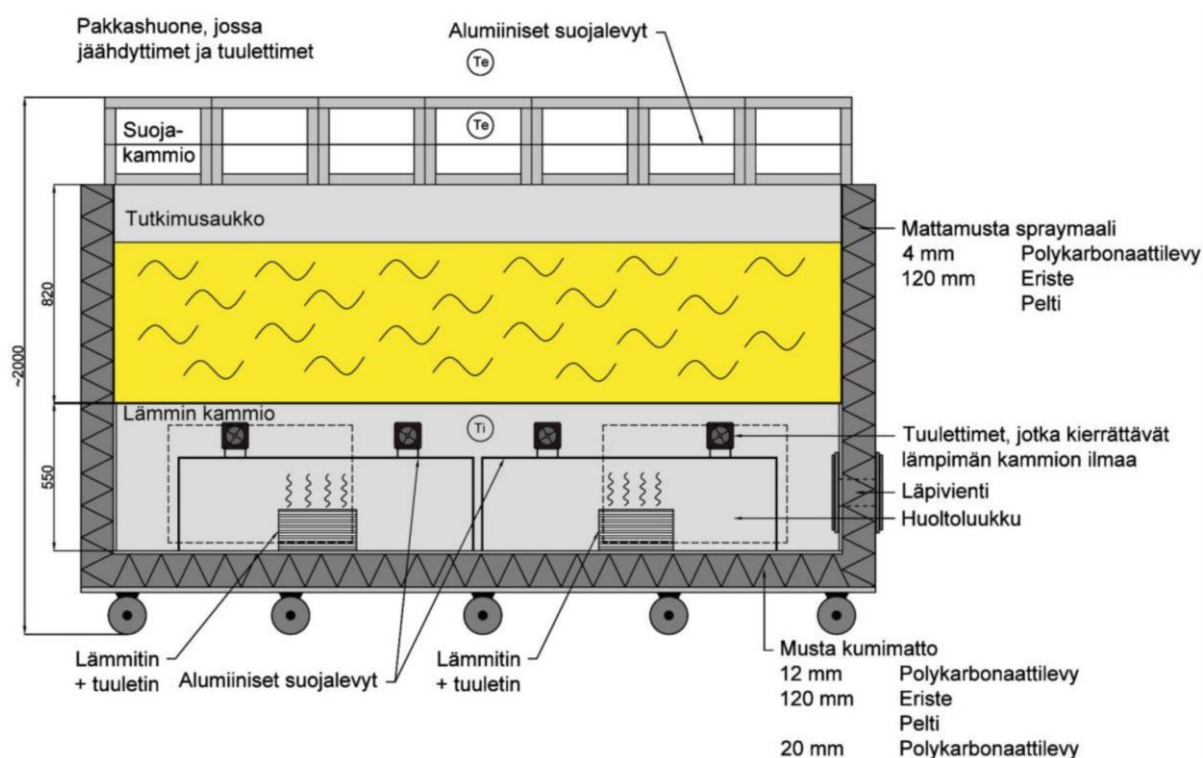
Kuva L2.2. Painumaonkaloiden toteutus kiilojen avulla.



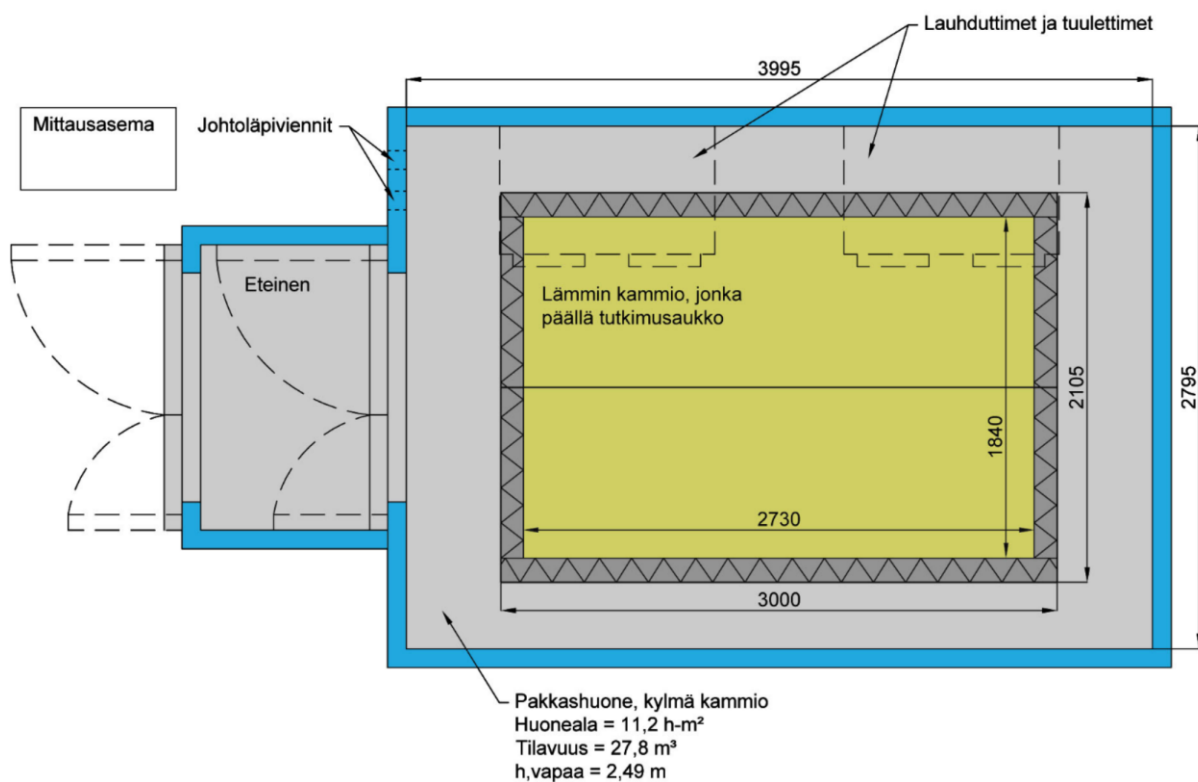
Kuva L2.3. Kuva painumaonkalosta vinosauvan alla, joissa eristekerrokseen on mekaanisesti tehty 20 % painuma. Eriste on painunut muualla normaalitilanteen mittausten aikana n. 1 %.



LIITE 3: Kuvia yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisesta tutkimuslaitteistosta



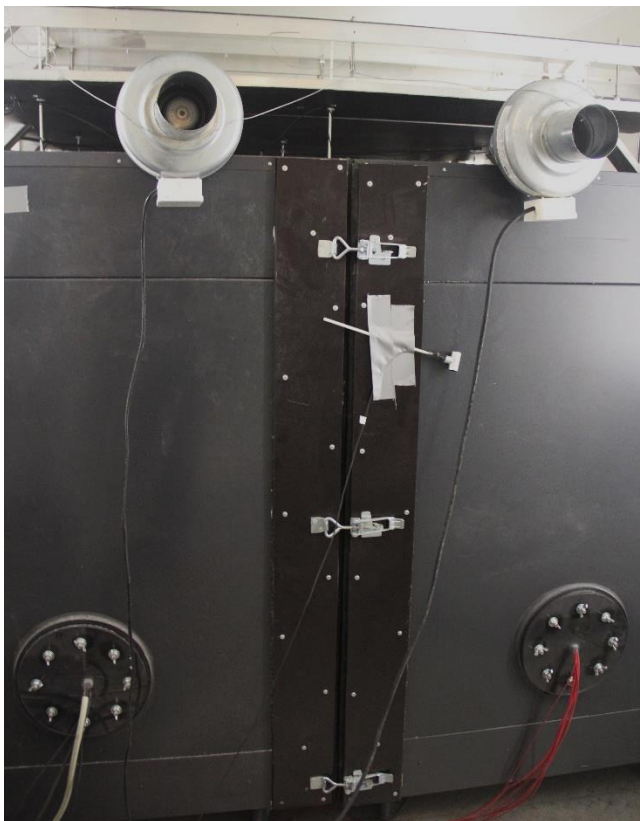
Kuva L3.1. Yläpohjarakenteiden rakennusfysikaalisen tutkimuslaitteiston periaatekuva.



Kuva L3.2. Kylmänä kammiona toimivan pakkahuoneen pohjapiirustus ja lämpimän kammion sijoittuminen pakkahuoneeseen.



Kuva L3.3. Toimintavalmis yläpohjarakenteiden tutkimuslaitteisto, jossa suojakammio on nostettu laitteiston päälle.



Kuva L3.4. Tuuletustilan ilmavirtaus luotiin tutkimuslaitteistoon kahdella kanavapuhaltimella, jotka puhalsivat eristeen pinnan suuntaisesti noin 250 mm eristeen pinnan yläpuolella.